KFKI-Projekt ZukunftHallig

„Entwicklung von nachhaltigen Küstenschutz- und Bewirtschaftungsstrategien für die Halligen unter Berücksichtigung des Klimawandels (ZukunftHallig)“

gefördert durch:	BMBF
Förderkennzeichen:	03KIS093 03KIS094 03KIS095 03KIS096
Bearbeitungszeitraum:	01.12.2010 - 30.11.2013
Projektverlängerung:	01.12.2013 - 30.04.2014

fwu

Institut für Soziologie RWTH AACHEN UNIVERSITY ifS

Lehrstuhl und Institut
für Wasserbau und Wasserwirtschaft
Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen
Institute of Hydraulic Engineering and Water Resources Management
RWTH Aachen University
RWTH

Landesbetrieb für Küstenschutz, Nationalpark und Meeresschutz Schleswig-Holstein

GZG Geowissenschaftliches Zentrum Göttingen

Siegen, Mai 2014

Koordination: Prof. Dr.-Ing. Jürgen Jensen | e-Mail: juergen.jensen@uni-siegen.de

Danksagung

Das Forschungsvorhaben ZukunftHallig wurde vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) unter der Leitung des Projektträgers Jülich (PTJ) gefördert (Fördernummer: 03KIS093; 03KIS094; 03KIS095; 03KIS096). Das Vorhaben wurde fachlich vom Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI) begleitet. Dem PTJ und dem KFKI danken wir für die organisatorische und finanzielle Unterstützung.

Wir bedanken uns bei unseren Projektpartnern in Aachen, Göttingen und Husum für die sehr angenehme und konstruktive Zusammenarbeit!

Im Rahmen regelmäßiger Treffen mit der projektbegleitenden Gruppe des KFKI wurden wichtige Hinweise für die Erarbeitung der hier dargestellten Ergebnisse aus den Reihen der Teilnehmer gegeben. Mitglieder der projektbegleitenden Gruppe waren: Dr. Jacobus Hofstede (Obmann), Dr. Gabriele Gönnert, Holger Blum und Volker Neemann; wir danken den Mitgliedern der projektbegleitenden Gruppe für die Unterstützung und die vielen Fachgespräche!

Wir bedanken uns außerdem bei den Dienststellen der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes für die Bereitstellung der benötigten Daten und die Unterstützung bei Rückfragen jeglicher Art zu den verwendeten Datensätzen. Darüber hinaus bedanken wir uns bei allen Bewohnern der Halligen, die uns bei Fragen, Diskussionen und der Organisation verschiedener Treffen hilfreich zur Seite standen.

Siegen, im Mai 2014

Dr. Jürgen Jensen

Inhalt

1 EINLEITUNG V
1.1 Hintergrund V
1.2 Wissenschaftliche Defizite VI
1.3 Gliederung des Verbundprojektes VIII

ZukunftHallig A (fwu) 1

ZukunftHallig B

Teil IWW **129**

Teil IfS **289**

ZukunftHallig C (LKN) 441

ZukunftHallig D (GZG) 481

Anlage 1 - Publikationsliste 563

Anlage 2 - Bauwerkskatalog Hooge (LKN) 569

Anlage 3 - Bauwerkskatalog Langeness (LKN) 613

Anlage 4 - Bauwerkskatalog Nordstrandischmoor (LKN) 685

Anlage 5 - Bericht der Arbeitsgruppe HALLIGEN 2050 699

1 Einleitung

1.1 Hintergrund

Die Deutsche Nordseeküste ist stark durch die Gezeiten und das Wattenmeer geprägt. Die Nationalparke Schleswig-Holsteinisches Wattenmeer und Niedersächsisches Wattenmeer sind seit 1985 bzw. 1986 Nationalparke des Wattenmeers an der deutschen Nordseeküste, welche von der UNESCO 1990 bzw. 1993 zu „Biosphärenreservaten und 2009 zum Weltnaturerbe ernannt wurden. Das Wattenmeer weist eine sehr flache Neigung auf, wodurch bei Tideniedrigwasser große Teile trocken fallen. Das Wattenmeer selbst ist geprägt durch ausgedehnte Prielsysteme und Inseln bzw. Halligen.

Die Halligen sind ein weltweit einzigartiges System kleiner, nicht eingedeichte Inseln im nordfriesischen Wattenmeer an der Nordseeküste Schleswig-Holsteins. Das Wattenmeer mit seinen Halligen und Inseln hat neben der ökologisch und kulturhistorisch wichtigen Bedeutung auch großen Einfluss auf die Küstenschutzstrategien an der Festlandküste. Zum einen kann der Wind das Wasser aufgrund der geringen Wassertiefen stärker aufstauen als an Küsten mit großen Wassertiefen, zum anderen jedoch wird die Seegangsbelastung der Festlandküste während Sturmfluten bereits im Wattenmeer durch die geringen Wassertiefen stark reduziert.

Das Ziel der Untersuchungen war, Impulse für nachhaltige Küstenschutz- und Bewirtschaftungsstrategien zu entwickeln, die insbesondere auf den Erhalt und die Bedeutung der Halligen im nordfriesischen Wattenmeer eingehen. Es wurden dabei sowohl heutige, als auch potentiell zukünftige klimatische Randbedingungen berücksichtigt. Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde insbesondere folgenden Aspekten nachgegangen:

- Hydrologische/hydromechanische Belastungen unter heutigen und zukünftigen klimatischen Bedingungen
- Quantifizierung sedimentologischer Veränderungen an und auf den Standorten
- Quantifizierung des derzeitigen Schutzstandards
- Durchführung risikoorientierter Gefährdungsanalysen
- Entwicklung von nachhaltigen, klimaangepassten Bewirtschaftungskonzepten/ Küstenschutzstrategien
- Untersuchungen zur Akzeptanz der abgeleiteten Strategien unter den Bewohnern mit Schwerpunkt auf den Halligen

Die Untersuchungen wurden exemplarisch an den drei Halligen Langeneß, Nordstrandischmoor und Hooge durchgeführt. Die Ergebnisse des Forschungsvorhabens liefern einen wesentlichen Beitrag zum nachhaltigen Küstenschutz der nord- und ostfriesischen Küste und zum Erhalt des Weltnaturerbes Wattenmeer. Teilergebnisse des Forschungsvorhabens (z. B. Untersuchungen zur Ermittlung extremer Wasserstände) sind jedoch nicht nur für die untersuchten Standorte von Bedeutung, sondern lassen sich auch auf andere Küstenbereiche übertragen bzw. erweitern den Erkenntnisstand aus anderen Forschungsprojekten

1.2 Wissenschaftliche Defizite

Die Halligen stellen in ihrer exponierten Lage (siehe Abbildung 1) eine einzigartige Naturerscheinung dar und zwingen ihren Bewohnern besondere Lebens- und Bauweisen auf. Die Häuser auf den Halligen sind auf Warften erbaut. Einige Halligen haben Sommerdeiche, andere höher gezogene Deckwerke. Hierdurch werden die Halligen unterschiedlich häufig überflutet. Insgesamt leben auf den 38 Warften der zehn Halligen derzeit etwa 270 Einwohner.

Abbildung 1: Die Halligen im Nordfriesischen Wattenmeer (LKN-SH, 2014).

Diese bestreiten ihren Lebensunterhalt im Wesentlichen im Küstenschutz beim Landesbetrieb für Küstenschutz, Nationalpark und Meeresschutz Schleswig-Holstein (LKN-SH), durch den Tourismus und die Landwirtschaft. Nachfolgend sind die zehn Halligen aufgelistet:

- Langeneß
- Nordstrandischmoor
- Gröde
- Oland
- Hooge
- Hamburger Hallig
- Habel
- Südfall
- Süderoog
- Norderoog

Die Halligen werden aufgrund ihrer exponierten Lage im schleswig-holsteinischen Wattenmeer zuerst von den Auswirkungen des Klimawandels betroffen sein. Es zeigt sich, dass der Sedimentaufwachs der Halligen derzeit in der Größenordnung des Meeresspiegelanstiegs liegt. Allerdings können lokale Verhältnisse deutlich von den Mittelwerten abweichen. Für die größeren Halligen Hooge und Langeneß liegen die Sedimentzuwachsraten am unteren Unsicherheitsbereich des säkularen MThw-Anstiegs, so dass gegenwärtig nicht zweifelsfrei geklärt ist, ob die Halligen in Zukunft grundsätzlich mit dem Meeresspiegel mitwachsen oder nicht (SAHALL, 2009).

Während viele Folgen und Konsequenzen des projizierten anthropogenen Klimawandels noch nicht wissenschaftlich abgesichert sind, gilt eine Beschleunigung des Meeresspiegelanstiegs als gesichert. Unklar ist nur noch die Höhe des Meeresspiegelanstiegs in diesem Jahrhundert. Die aktuellen Klimaszenarien sprechen global von einem Anstieg zwischen 0,26 und 0,82 m bis 2081-2100 relativ zu 1986-2005 (Church et al., 2013). Ein Anstieg des Meeresspiegels hat direkte Auswirkungen auf die Überflutungshäufigkeit und -intensität der Halligen und Inselmaschen, indirekt aber auch auf die Häufigkeit und -intensität von Sturmfluten, die Seegangsentwicklung sowie die morphologische Entwicklung des Wattenmeers. Nur auf der Grundlage eines umfassenden Prozessverständnisses kann die zukünftige Entwicklung des Wattenmeers sowie der Halligen und Inseln auf der Grundlage ausgewählter Szenarien für ausgewählte Standorte abgeschätzt werden. Dies beinhaltet eine integrierte Betrachtung von Meeresspiegelanstieg, Sturmflutwasserständen und -häufigkeiten, Seegang und Sedimentablagerungen. Das umfassende

Prozessverständnis wurde sowohl durch eine Zusammenführung der Ergebnisse aktueller Forschungsvorhaben als auch durch umfangreiche neue Datenanalysen und Modellsimulationen verbessert.

Durch die wissenschaftliche Betrachtung des Überflutungs- und Sturmflutrisikos der Halligen und sich ergebender möglicher Anpassungen für die Küstenschutzkonzepte und -strategien an geänderte Randbedingungen wird eine nachhaltige sozio-ökonomische (u. a. Kulturerbe) und ökonomische (Tourismus, Landwirtschaft) Entwicklung der Halligen ermöglicht.

1.3 Gliederung des Verbundprojektes

Das Verbundprojekt gliedert sich in die vier Vorhaben:

ZukunftHallig A: Analyse der hydrologischen und hydrodynamischen Randbedingungen im Bereich der Halligen (Universität Siegen)

ZukunftHallig B: Risikoanalysen und Entwicklung neuer Küstenschutzkonzepte für die Halligen (RWTH Aachen)

ZukunftHallig C: Bewertung vorhandener Küstenschutzsysteme, hydrologisches Monitoring und Datenbereitstellung (LKN Schleswig-Holstein)

ZukunftHallig D: Sedimentologische Untersuchungen auf den Halligen (Universität Göttingen)

Eine Beschreibung der Inhalte der einzelnen Teilprojekte sowie eine detaillierte Darstellung der durchgeführten Arbeiten kann den jeweiligen Kapiteln entnommen werden.

ZukunftHallig A

gefördert durch:	BMBF
Förderkennzeichen:	03KIS093
Bearbeitungszeitraum:	01.12.2010 - 30.11.2013
Projektverlängerung:	01.12.2013 - 30.04.2014
Auftragsnummer:	WBL 230D

Aufgestellt von:

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Jensen
Dipl.-Ing. Arne Arns

Forschungsinstitut
Wasser und Umwelt (fwu)
an der Universität Siegen

Siegen, Mai 2014

Kontakt: Jürgen Jensen | e-Mail: juergen. jensen@uni-siegen.de

Inhalt

1 KURZFASSUNG 14

2 UNTERSUCHUNGSGEBIET UND VERWENDETE DATEN 15

A. ENTWICKLUNG EINER KONSISTENTEN VORGEHENSWEISE FÜR DIE ANALYSE DER HÖHEN UND HÄUFIGKEITEN VON STURMFLUTEN 18

3 MOTIVATION 18

4 GRUNDLAGEN 19
4.1 Trendkorrektur 20
4.2 Kollektivbildung 23
4.3 Parameter Schätzung 27
4.4 Theoretische Verteilung 27
4.5 Empirische Verteilung 28
4.6 Ermittlung von Wasserständen mit geringen Eintrittswahrscheinlichkeiten 29

5 METHODEN UND ERGEBNISSE 29
5.1 Trendkorrektur 30
5.1 Kollektivbildung 32
5.1.1 Block Maxima Methode 32
5.1.2 POT Methode 33
5.1.3 Declustern 36
5.2 Verteilung 37

6 ÜBERTRAGBARKEIT 39

7 EMPFEHLUNGEN ZUR ERMITTLUNG EXTREMER WASSERSTÄNDE 41

B. KOLLEKTIVERWEITERUNG 43

8 MOTIVATION 43

9 REGIONALISIERUNG 44

10 INFORMATIONSERWEITERUNG 46
10.1 Modellaufbau 46
10.2 Kalibrierung 49
10.3 Biaskorrektur 51
10.4 Validierung der Biaskorrektur 55

11 EXTREMWERTSTATISTISCHE ANALYSEN 58

C. WELCHEN EINFLUSS HAT EIN ANSTIEG DES MITTLEREN MEERESSPIEGELS AUF EXTREME WASSERSTÄNDE? 61

12 MOTIVATION 61

13 STAND DER WISSENSCHAFT 62
13.1 Beobachtete Änderungen der Sturmflutwasserstände 62
13.2 Untersuchungen zu zukünftigen Änderungen extremer Wasserstände 63
13.3 Ziele dieser Studie 65

14 VERÄNDERUNGEN IN DEN ANTRIEBSKRÄFTEN 66
14.1 Änderungen der Tide 66
14.2 Änderungen des meteorologischen Antriebs 66
14.3 Änderungen des mittleren Meeresspiegels (MSL) 68

15 ANALYTISCHE BETRACHTUNG 69
15.1 Relevante Prozesse 69

16 METHODIK 75
16.1 Numerisches Modell 75
16.2 Modellspezifikationen 75
16.3 Tideanalyse 77
16.4 Extremwasserstände 79

17 ERGEBNISSE 79
17.1 Änderungen der Thw infolge des MSL Anstiegs 79
17.2 Änderungen in den Thw-Eintrittszeiten infolge des MSL Anstiegs 81
17.3 Räumliche Verteilung und Ursprungsort der Änderungen 82
17.4 Änderungen in den Verteilungen der Thw 83

17.5 Änderungen in den Partialtiden 86
17.6 Einfluss auf die extremwertstatistische Analysen 88

18 ZUSAMMENFASSUNG UND DISKUSSION 91

LITERATURVERZEICHNIS 94

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Lage der betrachteten Pegelstandorte; d) die einzelnen Halligen sind in blau dargestellt. 16

Abbildung 2: Mögliche Vorgehensweisen bei extremwertstatistischen Analysen. 20

Abbildung 3: Residualtrends unterschiedlicher Wasserstands Perzentile; der Trend des MSL wurde zuvor subtrahiert (modifiziert nach Mudersbach et al., 2013). 21

Abbildung 4: (a) Mean Residual Life Plot; (b) Stability Plot; (c) resultierende Kollektivgröße. 25

Abbildung 5: Einflussfaktoren der GEV (links) und der GPD (rechts). 31

Abbildung 6: (a) Exemplarische Darstellung der Kollektivbildung mit der BM und der POT Methode; (b) Schätzung der Wiederkehrintervalle mittels GEV und GPD. 33

Abbildung 7: Stabilität der GPD Schätzungen unter Verwendung unterschiedlicher Schwellenwerte am Pegel Cuxhaven. Die graue Schattierung zeigt den Bereich der 95% Konfidenzintervalle der GEV. 35

Abbildung 8: (a) IRPS aller Standorte; (b) Mittelwert des IRPS aus allen Standorten. 36

Abbildung 9: (a) - (f) Stabilität der GEV mit r=1 bis r=6 Werten/Jahr; (g) Stabilität der GPD unter Verwendung eines Schwellenwertes von u_0=99,7-Perzentil. Die blaue Linie zeigt die Periode von 1918 bis 2009; die rote Kurve zeigt die Periode von 1918 bis 2011. 38

Abbildung 10: Ergebnisse der GEV mit r=1 Werten/Jahr (blau) und der GPD mit einem Schwellenwert von u_0=99,7-Perzentil an allen 10 Stationen. 40

Abbildung 11: IRPS aller 10 Pegel nach Tabelle 1; die Berechnungen basieren auf den Linien aus Abbildung 10. 41

Abbildung 12: Empfehlungen zur Durchführung extremwertstatistischer Analysen in der Deutschen Bucht. 42

Abbildung 13: Differenzwasserstände aller Wiederkehrintervalle zwischen T=1 und T=10.000 Jahren aus Regionalisierung und Pegelstatistik in Region I (links) und Region II (rechts). 46

Abbildung 14: Grid Punkte des meteorologischen Modellantriebs (blaue Kreise) im Modellbereich (blaue Linie). Im rechten unteren Bereich der Abbildung ist eine Windrose aller Winde [m/s] zwischen 1970 und 2009 an dem der Deutschen Bucht nächstgelegenen Grid Punkt (roter Punkt) dargestellt. Am linken Bildrand ist die offene Berandung des Modells (rot-blau gestrichelte Linie) dargestellt. 48

Abbildung 15: Kalibrierung des Modells. Die graue Linie kennzeichnet die Spanne der resultierenden Wasserstände aus der Variation der Sohlrauheiten mit $35 \leq kst \leq 50\ m^{1/3}/s$. 51

Abbildung 16: (a) Lage des Beispielsstandortes (Hörnum) in der Deutschen Bucht; (b) Empirische Verteilung am Pegel Hörnum für Pegelmessung, Modellergebnis und die resultierende Korrekturfunktion; (c) Teils interpolierte Korrekturwerte für die Deutschen Bucht; (d) Regression der Pegelmessung und der korrigierten bzw. unkorrigierten Wasserstände (Hörnum). 54

Abbildung 17: (a) Regression der modellierten (rot) und korrigierten (blau) Wasserstände gegenüber der Messung am Standort Pellworm Hafen; (b) Empirische Verteilungsfunktion am Beispielstandort für Pegelmessung (schwarz), Modellergebnis (rot) und die daraus resultierenden Differenzen (blau); (c) Perzentile aus Pegelmessung (schwarz) und Modellergebnis (rot), die blauen Punkte zeigen die Differenzen. 56

Abbildung 18: Vergleich zwischen den Naturmessungen und den Modellergebnissen an den 16 Validierungsstandorten vor (rote Punkte) und nach (blaue Punkte) Anwendung der Biaskorrektur, mit (a) dem Determinationskoeffizient r^2 und (b) dem Index of Agreement. 57

Abbildung 19: (a), (b) Vergleich der Wiederkehrintervalle aus biaskorrigierten (rot) und gemessenen (blau) Wasserständen an den Standorten (a) Hörnum und (b) Pellworm Hafen; (c) Vergleich der Differenzen der Hochwasserquantile an allen betrachteten Standorten für die Wiederkehrintervalle $T=\{10;100;200\}$. 59

Abbildung 20: (a) Wasserstände in [cmNHN] mit einem mittleren Wiederkehrintervall von T=200 Jahren entlang der Schleswig-Holsteinischen Nordseeküste; Wasserstände in [cmNHN] mit einem mittleren Wiederkehrintervall von T= 200 Jahren entlang der Außenkante von (b) Hallig Hooge, (c) Nordstrandischmoor und (d) Langeness. 60

Abbildung 21: MSL Projektionen für 2081-2100 relativ zu 1986-2005 nach Church et al. (2013). 68

Abbildung 22: Nomenklatur. 70

Abbildung 23: Reibungseinfluss auf die Tide. 72

Abbildung 24: Relativer Einfluss der Wassertiefe bzw. des MSL Anstiegs auf die die Kräfte pro Masse fS und fb. 74

Abbildung 25: Relative Tiefenänderung duch einen MSL Anstieg von +0,54 m. 76

Abbildung 26: Vergleich der Tideamplituden aus den beobachteten und den modellierten Wasserständen. 78

Abbildung 27: Vorgehensweise zur Ermittlung der Änderungen in den Extremwasserständen. 79

Abbildung 28: Verteilung der h Residuen im TSR Setup (a) und im TOR Setup (c); Verteilung der t Residuen im TSR Setup (b) und im TOR Setup (d). 80

Abbildung 29: Räumliche Verteilung und Ursprungsort der Änderungen für die Ereignisse 1976, 1981, 1999 und der Mittelwert der Ereignisse. 82

Abbildung 30: Verteilung der h Residuen an 12 zufällig gewählten Punkten entlang der Küstenlinie Schleswig-Holsteins; die zentrale Grafik zeigt die Lage der außenliegenden Abbildungen. 84

Abbildung 31: (a) normierte Wasserstände des Kontroll- und Szenariolaufs aus dem TOR Setup; (b) normierte Wasserstände des Kontroll- und Szenariolaufs aus dem TSR Setup; (c) Verteilungen der beiden Thw-Kollektive im TOR Setup; (d) Verteilungen der beiden Thw-Kollektive im TSR Setup. 85

Abbildung 32: Tideanalyse (Pawlowicz, 2002) aller n=65 Ereignisse des Szenario- und Kontrolllaufs unter Verwendung des TSR Setup am Standort Wittdün für die Partialtiden nach Tabelle 6. 87

Abbildung 33: (a) Änderungen der Phasenverschiebung vom Kontroll- zu Szenariolauf am Standort Wittdün; (b) Superposition aller acht Tiden. 88

Abbildung 34: (a) Wiederkehrintervalle am Standort Wittdün auf Basis des Kontrolllaufs (schwarze Kurve), auf Basis einer linearen Berücksichtigung der MSL Änderungen (blaue Kurve) und auf Basis des Szenariolaufs (rote Kurve); (b) Differenzen aus den Wiederkehrintervallen der Datensätze (b) und (c). 89

Abbildung 35: Differenzen in den Wasserstandsdifferenzen für (a) $P_{Ü}$ = 0,1 [1/a], (b) $P_{Ü}$ = 0,02 [1/a], (c) $P_{Ü}$ = 0,01 [1/a], (d) $P_{Ü}$ = 0,005 [1/a]. 90

Anhang

Abbildung 36: Durchschnittliche Biaskorrektur zwischen 1970 und 2009. 112

Abbildung 37: Sturmfluten mit den höchsten Wasserständen zwischen 1970 und 2009 auf Basis modellierter Wasserstände. 113

Abbildung 38: Wasserstände mit einem Wiederkehrintervall von T=10 Jahren entlang der Schleswig-Holsteinischen Nordseeküste. 115

Abbildung 39: Wasserstände mit einem Wiederkehrintervall von T=20 Jahren entlang der Schleswig-Holsteinischen Nordseeküste. 117

Abbildung 40: Wasserstände mit einem Wiederkehrintervall von T=50 Jahren entlang der Schleswig-Holsteinischen Nordseeküste. 119

Abbildung 41: Wasserstände mit einem Wiederkehrintervall von T=100 Jahren entlang der Schleswig-Holsteinischen Nordseeküste. 121

Abbildung 42: Wasserstände mit einem Wiederkehrintervall von T=200 Jahren entlang der Schleswig-Holsteinischen Nordseeküste. 123

Abbildung 43: Wasserstände mit einem Wiederkehrintervall von T=500 Jahren entlang der Schleswig-Holsteinischen Nordseeküste. 125

Abbildung 43: Wasserstände mit einem Wiederkehrintervall von T=1.000 Jahren entlang der Schleswig-Holsteinischen Nordseeküste. 127

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht der im Rahmen des Projektes verwendeten Wasserstandsdaten. 17

Tabelle 2: Lineartrends und Standardfehler der jährlichen Perzentile (direkt aus den Beobachtungsdaten abgeleitet bzw. um den MSL reduziert) für unterschiedliche Perioden. Alle Trends wurden mit Hilfe eines Mann-Kendall Test auf Signifikanz geprüft; signifikante Werte sind fett gedruckt. 22

Tabelle 3: Effizienzkriterien zur Beurteilung der bestmöglichen Modellanpassung. Als Kalibrierungsereignis wurde die Allerheiligenflut vom 01.11.2006 verwendet. 51

Tabelle 4: Vergleich der bisherigen Studien zum Einfluss des MSL Anstiegs auf Extremwasserstände. 65

Tabelle 5: Gewählte Modellkonfigurationen. 75

Tabelle 6: In der Tidenanalyse untersuchte Tide. 78

Abkürzungs- und Symbolverzeichnis

Abkürzung	Vollständiger Name
AMAX	Jahres Maxima
AR4	4. Zustandsbericht des IPCC
AR5	5. Zustandsbericht des IPCC
Bor	Borkum
BM	Block Maxima
Bus	Büsum
CDF	Kumulative Verteilungsfunktion
CIs	Konfidenzintervalle
Cux	Cuxhaven
Dag	Dagebüll
Emd	Emden
ENS	Nordsee Konfiguration
EVA	Extremwertverteilung
FRA	Frankreich
GB	Großbritannien
GBi	Deutsche Bucht Konfiguration
GER	Deutschland
GEV	Verallgemeinerte Extremwertverteilung
GIA	Glacial Isostatic Adjustment (vertikale Landbewegungen infolge isostatischer Ausgleichbewegungen)
GPD	Verallgemeinerte Pareto Verteilung
Hel	Helgoland
Hoe	Hörnum
Hus	Husum
HWS	Hochwasser Schutzeinrichtung
IDW	Inverse Distance Weighting Interpolation
IID	Unabhängig und identisch verteilt
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
IRPS	Index of return period stability
Lis	List
LtA	Leuchtturm Alte Weser
LW	Beobachteter Wasserstand
MThw	Mittleres Tidehochwasser
MLE	Maximum Likelihood Estimation
MRD	Moment Ratio Diagramm
MRLP	Mean Residual Life Plot
MSE	Mean Square Error
MSL	Mean Sea Level
MW	Minutenwerte
NHN	Normalhöhennull
NL	Niederlande
Nor	Norderney
NOR	Norwegen
NST	North Sea Tracking Model
PLP	Plotting Position
POT	Peak Over Threshold

RCP	Representative Concentration Pathways
RFA	Regional Frequency Analysis
RMSE	Root Mean Squared Error
Sch	Schlüttsiel
SSL	Standard Storm Surge Length
SSP	Stability Plot
SW	Scheitelwerte
TGZ	Tide Gauge Zero (Pegelnull)
TOR	Tide Only Run
TSR	Tide Surge Run
UK	Vereinigtes Königreich
Wil	Wilhelmshaven
Wit	Wittdün
Wyk	Wyk

Symbol	**Dimension**	**Description**
$2MK_5$	[°/h]	Partialtide (Frequenz = 0,20280)
$3MK_2$	[°/h]	Partialtide (Frequenz = 0,28331)
A	[m], [cm]	Amplitude
a	[-]	Plotting Position Parameter
C_D	[-]	Strömungswiderstandskoeffizient
c	[m/s]	Wellengeschwindigkeit
c_h	[-]	Homogene Kombinationen
c_p	[-]	Anzahl möglicher Kombinationen
D_i	[-]	Discordancy Measure
d	[-]	Index of Agreement
f	[N/m²]	Kraft pro Masseeinheit
f_b	[N/m²]	Sohlkraft pro Masse
f_s	[N/m²]	Windkraft pro Masse
g	[m/s²]	Erdbeschleunigung
g_n	[°/h]	Phasenverschiebung
H	[-]	Heterogeneity Measure
h	[m], [cm]	Wassertiefe
K_1	[°/h]	Partialtide
K_2	[°/h]	Partialtide
k	[-]	Dimensionsloser Faktor, Reibungsparameter
L	[m], [km]	Wellenlänge
M_2	[°/h]	Partialtide (Frequenz = 0,08051)
M_3	[°/h]	Partialtide (Frequenz = 0,12076)
M_4	[°/h]	Partialtide (Frequenz = 0,16102)
M_6	[°/h]	Partialtide (Frequenz = 0,24153)
M_8	[°/h]	Partialtide (Frequenz = 0,32204)
m	[-]	Anzahl der gewählten Stationen
μ	[-]	Lageparameter
μ_i	[-]	Index Flood
N	[-]	Anzahl der Stationen
N_2	[°/h]	Partialtide (Frequenz = 0,07899)
n	[-]	Anzahl der Beobachtungen

n_m	[$m^{1/3}$/s]	Manning's n
O_1	[°/h]	Partialtide (Frequenz = 0,03873)
P_1	[°/h]	Partialtide (Frequenz = 0,04155)
$P_Ü$	1/a	Überschreitungswahrscheinlichkeit
Q_1	[°/h]	Partialtide (Frequenz = 0,03721)
Q(F)	[-]	Verteilung
q(F)	[-]	Regionale Verteilung
q_i	[1/a]	Plotting Position
r	[Wert/Jahr]	r-größte Werte einer Periode
r^2	[-]	Bestimmtheitsmaß
ρ	[kg/m³]	Dichte
S	[m], [cm]	Standardabweichung
S_2	[°/h]	Partialtide (Frequenz = 0,08333)
σ	[cm]	Streuungsparameter
σ_n	[°/h]	Winkelgeschwindigkeit
$\tilde{\sigma}$	[cm]	Transformierter Skalenparameter
T	[yr]	Wiederkehrintervall
T_i	[d], [h]	Zeitdifferenz im Extremal Index
t_d	[d]	Decluster Zeit
θ	[-]	Extremal Index
τ_b	[N/m²]	Sohlschubspannung
τ_s	[N/m²]	Windschubspannung
U	[m/s]	Zonal Wind
u	[m/s]	Resultierende Strömung
u_0	[m], [cm]	Schwellenwert
V	[m/s]	Meridional Wind
$\underline{x}$	[m], [cm]	Kollektivwert
$\overline{x}$	[m], [cm]	Mittelwert
x_m	[m], [cm]	Modellierte Wasserstände
x_o	[m], [cm]	Beobachtete Wasserstände
xmax	[m], [cm]	Größter Wert einer Zeitreihe
W	[m/s]	Windgeschwindigkeit
z	[m], [cm]	Block Maxima Werte
ξ	[-]	Formparameter

Die Einheiten sind in der Regel auf die in dieser Arbeit enthaltenen Daten abgestimmt.

1 Kurzfassung

Die Deutsche Nordseeküste mit ihren Inseln und Halligen ist einer latenten Bedrohung durch extreme Sturmfluten ausgesetzt, die in der Vergangenheit immer wieder zu enormen Schäden geführt haben. Im Kontext klimatischer Veränderungen wird diese Bedrohung mittel- bis langfristig voraussichtlich zunehmen (siehe z. B. Seneviratne et al., 2012). Mit Hilfe von Küstenschutzmaßnahmen soll sichergestellt werden, dass gefährdete Gebiete ein möglichst hohes Schutzniveau erreichen ohne dabei ökologische, ökonomische sowie touristische Ansprüche zu vernachlässigen. Die Maßnahmenentwicklung basiert i. d. R. auf der Analyse von Naturmessungen. So sind z. B. die Landesschutzdeiche an der Schleswig-Holsteinischen Nordseeküste durch technische Hochwasserschutzeinrichtungen (HWS) gegen Sturmfluten gesichert, deren Schutzhöhen (Bemessungswasserstände) aus extremwertstatistischen Analysen von Wasserstandsmessungen abgeleitet werden. Dieser sog. Bemessungswasserstand wird üblicherweise durch Überschreitungswahrscheinlichkeiten $P_Ü$ bzw. Jährlichkeiten zwischen T=100 und T=10.000 Jahren definiert (Mudersbach, 2010); die Vorgehensweise zur Ermittlung dieser Größen ist jedoch nicht reglementiert und basiert gegenwärtig auf subjektiven Entscheidungen. Zur konsistenten Ermittlung extremer Wasserstände (z. B. für Bemessungszwecke) wurde daher eine objektive Vorgehensweise entwickelt, mit der sich Extremwasserstände entlang der gesamten Deutschen Nordseeküste belastbar schätzen lassen.

Insgesamt stehen hierfür in der Deutschen Bucht häufig sehr lange und zumeist lückenlose und plausibilisierte Zeitreihen der Tidehoch- und Niedrigwasser zur Verfügung. Seit Ende der 1990er Jahre existieren zudem vielerorts Wasserstandszeitreihen mit einer zeitlichen Auflösung von $t \leq 1$ h. In einigen lokalen Bereichen, z. B. im Umfeld der Schleswig-Holsteinischen Halligen, existieren jedoch nur wenige Messstationen, die insgesamt kürzere Zeitspannen abdecken und häufigere Fehler sowie Datenlücken aufweisen. Werden diese fehlerhaften und/oder unvollständigen Daten in die Auswertung mit einbezogen, kann dies zu ungenauen Einschätzungen vergangener, gegenwärtiger sowie der Projektion zukünftiger Zustände führen. Schlimmstenfalls kann dies zu Fehlentscheidungen und beträchtlichen Fehlinvestitionen führen. Um extreme Wasserstände abschätzen zu können, werden daher lokale und vollständige Wasserstandsinformationen benötigt; im Bereich der Halligen sind diese jedoch oftmals nur bedingt verfügbar. Ein wesentlicher Arbeitsschwerpunkt lag daher auf der räumlichen Interpolation von Wasserstandsdaten, um geeignete Daten auch für Bereiche zu erhalten, in denen keine örtlichen Pegel vorhanden sind.

Für den Fortbestand der Halligen ist insbesondere Frage von Bedeutung, ob sich die Höhen und Häufigkeiten von Sturmflutereignissen geändert haben bzw. wie sich diese verändern werden.

Aktuelle Untersuchungen zum Meeresspiegelanstieg an der Deutschen Nordseeküste (z. B. Wahl et al. 2010, KFKI-Projekt AMSeL) zeigen in den letzten Jahrzehnten beschleunigte Anstiegsraten. Da Sturmfluten auf dem MSL aufsatteln, werden auch die Sturmflutwasserstände durch Änderungen des MSL beeinflusst. In bisherigen Studien (Woth et al., 2006) wird dabei oftmals vereinfachend angenommen, dass die Erhöhung von Sturmfluten linear (d. h. additiv) mit den Änderungen des MSL einhergehen. Diese Annahme ist jedoch nicht völlig gerechtfertigt, da mit insgesamt größeren Wassertiefen (bei gleich bleibender Höhenlage der Watten) eine Reduktion des möglichen Windstaus einhergeht (Gönnert, 2003). Demgegenüber zeigen Mudersbach et al. (2013), dass die langfristigen Trends der jährlichen Höchstwasserstände an der Deutschen Nordseeküste in der Regel signifikant stärkere Trends aufweisen als die mittleren Hochwasserstände oder der MSL (siehe auch Mudersbach, 2006). Die bisherigen Erkenntnisse reichen folglich nicht aus, um verlässliche Aussagen über die Änderungen von extremen Wasserständen an der Deutschen Nordseeküste tätigen zu können. Für die Abschätzung zukünftiger Belastungen wurde daher ein Szenario für die Entwicklung extremer Wasserstände im Bereich der Halligen erarbeitet. Zudem wurden die zugrunde liegenden Prozesse analysiert.

2 Untersuchungsgebiet und verwendete Daten

Inmitten des Schleswig-Holsteinischen Wattenmeeres befinden sich die zehn deutschen Halligen. Diese weltweit einzigartigen Inseln entstanden z. T. aus den Resten ehemaliger Küstenmarschen; der größte Teil resultiert jedoch weitestgehend aus Neuauflandungen durch Schlickablagerungen (Quedens, 1992). Der Begriff Hallig bedeutet so viel wie „flach“ bzw. „niedrig“ und charakterisiert das geringe Höhenniveau der Halligen gegenüber dem mittleren Tidewasserstand. Da es auf den Halligen keine Deiche gibt, heißt es jährlich bis zu 50-mal „Landunter“. Um trotzdem auf den Halligen leben zu können, wurden die Häuser der heute etwa 270 Halligbewohner auf künstlich angelegten Erdhügeln, den sogenannten Warften, errichtet. Das primäre Untersuchungsgebiet mit den 10 heute noch existierenden Halligen ist in Abbildung 1c dargestellt.

Die im Folgenden durchgeführten Analysen erfolgten anhand diverser Pegelaufzeichnungen aus der Deutschen Bucht. Zur Modellkalibrierung wurden Pegeldaten entlang der gesamten Nordsee, d. h. der britischen Ostküste, aus dem Ärmelkanal, vor der Küste der Niederlande und im Bereich der Deutschen Bucht verwendet. Für die Korrektur der modellgenerierten Wasserstände (siehe Teil B) wurden Scheitelzeitreihen von Pegeln entlang der Deutschen Bucht verwendet. Alle relevanten Informationen zu den verwendeten Daten sowie daraus abgeleitete Charakteristika können Tabelle 1 entnommen werden; die Lage der einzelnen Standorte kann Abbildung 1 entnommen werden. In der „Anzahl der Jahre“ Spalte wird angegeben,

ob es sich um hochaufgelöste Daten (d. h. mit einer Auflösung von einer Minute; MW) oder um Scheitelwerte (SW) handelt. Alle Zeitreihen in Tabelle 1 wurden hinsichtlich fehlerhafter Werte geprüft und bereinigt (siehe Arns et al., 2013a). Für die Analysen wurden alle Wasserstandszeitreihen der deutschen Nordseeküste auf „Normalhöhennull“ bezogen; für die Modellkalibrierung wurden die Pegelmessungen auf Modellnull gesetzt (d. h. die Zeitreihen wurden um ihren Mittelwert reduziert).

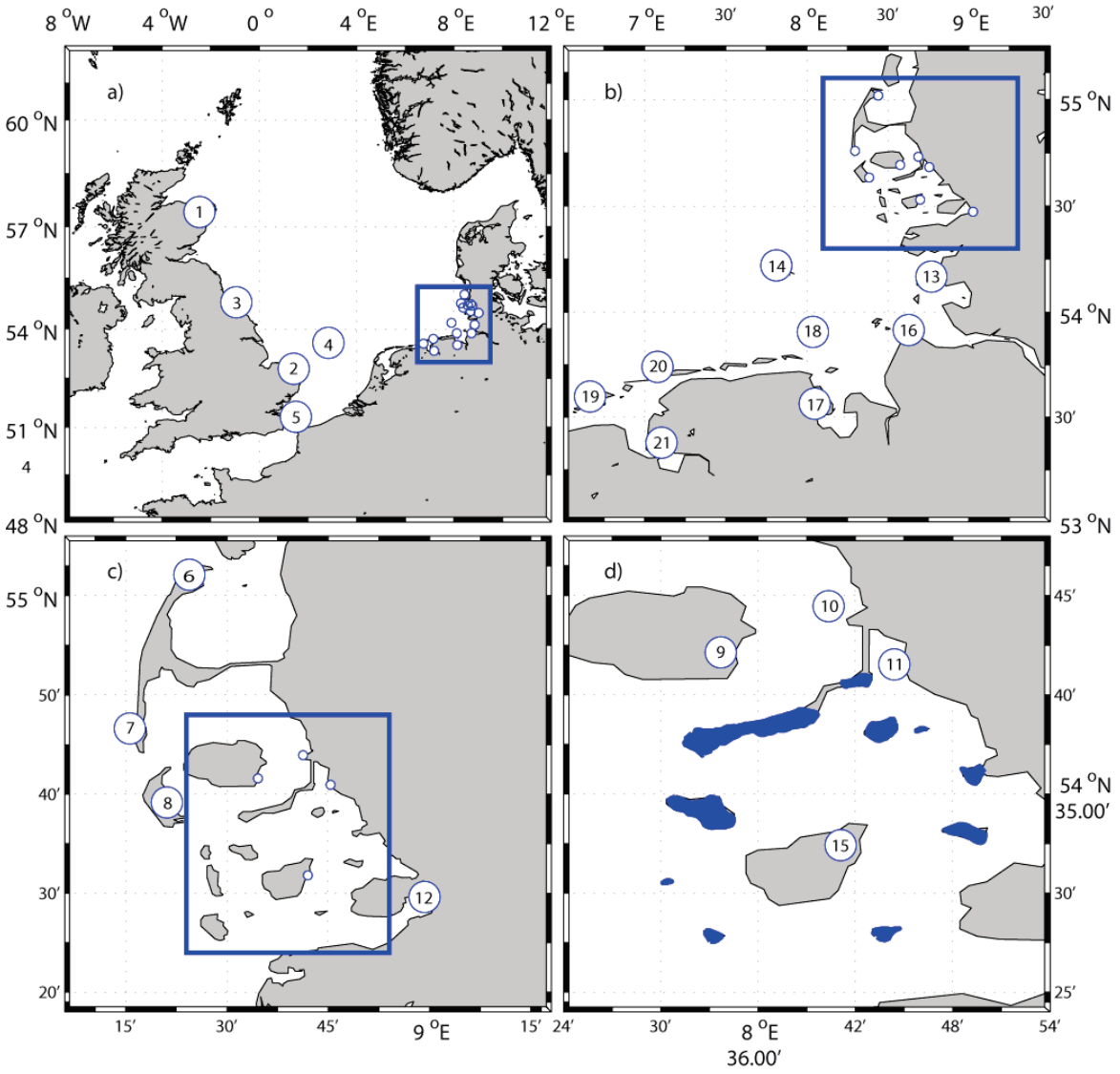


Abbildung 1: Lage der betrachteten Pegelstandorte; d) die einzelnen Halligen sind in blau dargestellt.

Tabelle 1: Übersicht der im Rahmen des Projektes verwendeten Wasserstandsdaten.

#	Station	Land	Tideregime	Standort		Tide/ surge Verh.	Anzahl der Jahre	Periode	Vollständigkeit (%)	Teil A	Teil B			Teil C
				Lon	Lat						Kal.	Kor.	Val.	
1	Aberdeen	UK	Semidiurnal	57.13300	-2.10000	-	1 (MW)	2006	100	-	√	-	-	-
2	Lowestoft	UK	Semidiurnal	52.47000	1.75000	-	1 (MW)	2006	100	-	√	-	-	-
3	Whitby	UK	Semidiurnal	54.48000	-0.61000	-	1 (MW)	2006	100	-	√	-	-	-
4	K 13a Platform	NL	Semidiurnal	53.21700	3.22000	-	1 (MW)	2006	100	-	√	-	-	-
5	Calais	FRA	Semidiurnal	50.95000	1.85000	-	1 (MW)	2006	89.6	-	√	-	-	-
6	List	GER	Semidiurnal	55.01826	8.44140	1.4	74 (SW)	1936 - 2009	99.5	√	-	√	√	√
7	Hörnum	GER	Semidiurnal	54.75979	8.29700	1.7	1 (MW) 74 (SW)	2006 1936 - 2009	98.9 99.5	- √	√ -	- √	- √	- √
8	Wittdün	GER	Semidiurnal	54.63344	8.38493	-	40 (SW)	1970 - 2009	100	-	-	√	√	√
9	Wyk	GER	Semidiurnal	54.69333	8.57638	-	40 (SW)	1970 - 2009	100	-	-	√	√	√
10	Dagebüll	GER	Semidiurnal	54.73220	8.68801	2.0	74 (SW)	1935 - 2009	98.9	√	-	√	√	√
11	Schlüttsiel	GER	Semidiurnal	54.68270	8.75590	-	40 (SW)	1970 - 2009	100	-	-	√	√	√
12	Husum	GER	Semidiurnal	54.47394	9.02585	2.3	75 (SW)	1935 - 2009	99	√	-	√	√	√
13	Büsum	GER	Semidiurnal	54.12222	8.85916	2.5	74 (SW)	1935 - 2009	98.5	√	-	√	√	√
14	Helgoland	GER	Semidiurnal	54.17660	7.89522	-	40 (SW)	1970 - 2009	100	-	-	√	√	√
15	Pellworm Hafen	GER	Semidiurnal	54.53000	8.70000	-	40 (SW)	1970 - 2009	100	-	-	-	√	-
16	Cuxhaven	GER	Semidiurnal	53.86778	8.71750	2.3	91 (SW)	1918 - 2011	100	√	√	√	√	√
17	Wilhelmshaven	GER	Semidiurnal	53.51444	8.14500	2.6	74 (SW)	1935 - 2009	99	√	-	√	√	-
18	LT Alte Weser	GER	Semidiurnal	53.86333	8.12750	2.6	109 (SW)	1900 - 2009	97.2	√	-	√	√	-
19	Borkum	GER	Semidiurnal	53.55750	6.74778	2.6	74 (SW)	1935 - 2009	99	√	-	√	√	-
20	Norderney	GER	Semidiurnal	53.69806	7.15853	2.2	75 (SW)	1935 - 2009	100	√	√	√	√	-
21	Emden	GER	Semidiurnal	53.33670	7.18600	-	40 (SW)	1970 - 2009	100	-	-	√	√	-

A. Entwicklung einer konsistenten Vorgehensweise für die Analyse der Höhen und Häufigkeiten von Sturmfluten

3 Motivation

Im Laufe der letzten Dekaden wurden diverse Ansätze zur Bemessung von Küstenschutzbauwerken entwickelt. Dabei kommen häufig statistische Verfahren zu Einsatz (Dixon und Tawn, 1994). Gegenwärtig werden jedoch sowohl auf internationaler, als auch auf nationaler Ebene unterschiedliche Verfahren verwendet. Auch entlang der Deutschen Nordseeküste ist diese Situation inhomogen. Dies ist primär darin begründet, dass der Küstenschutz in Deutschland auf Länderebene geregelt wird. Als Folge verwenden die einzelnen Bundesländer, die von Nordsee Sturmfluten betroffen sind, unterschiedliche Verfahren. So werden die Bemessungswasserstände in Hamburg mit einem empirisch hergeleiteten Bemessungsereignis ermittelt, welches bei Cuxhaven in ein hydrodynamisch-numerische Modell eingesteuert wird (Gönnert et al., 2013). In Bremen und Niedersachsen wird dagegen das sogenannte deterministische Einzelwertverfahren zur Ermittlung von Bemessungswasserständen verwendet. Dabei wird das mittlere Tidehochwasser (MThw), der Höhenunterschied zwischen dem höchsten Springtidehochwasser und dem MThw, der Höhenunterschied zwischen dem höchsten eingetretenen Tidehochwasser (HHThw) und dem MThw sowie ein prognostizierter Meeresspiegelanstieg für die nächsten 100 Jahre addiert (NLWKN, 2007). In Schleswig-Holstein werden Bemessungswasserstände (für Landesschutzdeiche) aus extremwertstatistischen Verfahren abgeleitet. Unter Verwendung der höchsten jährlichen Wasserstände (HThw) werden die Wasserstände mit Überschreitungswahrscheinlichkeiten von $P_Ü$=0,005 [1/a] bzw. Jährlichkeiten von T=200 Jahren ermittelt. Prognostizierte Wasserstandsänderungen werden additiv berücksichtigt (LKN, 2012). Es wird jedoch nicht weiter definiert, wie das statistische Modell zu spezifizieren ist. Ohne weitere Spezifikationen unterliegen die Bemessungswasserstände somit subjektiven Entscheidungen.

Die Anwendung unterschiedlicher statistischer Verfahren resultiert in signifikant unterschiedlichen Schätzungen von extremen Wasserständen. Aber auch die Verwendung von ein und demselben Verfahren kann zu großen Abweichungen in den Resultaten führen, wenn die

erforderlichen Modellparameter subjektiv wählbar sind. Aus diesem Grund werden im Folgenden die zwei gängigsten Verfahren im Hinblick auf deren Anwendung und Optimierbarkeit in der Deutschen Bucht untersucht. Das übergeordnete Ziel dieser Untersuchungen ist die Entwicklung objektiver Empfehlungen zur Anwendung extemwertstatistischer Verfahren auf nationaler und ggf. auch auf internationaler Ebene. Besonderen Wert hat eine solche Empfehlung sowohl für die Praxis als auch für die Wissenschaft, da extremwertstatistische Analysen erst hierdurch vergleichbar werden. Dabei steht insbesondere die Entwicklung einer allgemein gültigen Methodik im Fokus der Untersuchungen. Hierzu wird zunächst die Sensitivität der beiden Methoden gegenüber drei Parametern untersucht, welche die Ergebnisse der Analysen signifikant beeinflussen können. Bei diesen Faktoren handelt es sich um (1) die Trendkorrektur, (2) die Kollektivbildung und (3) die Sensitivität beider Modelle gegenüber der verwendeten Zeitreihenlänge. Der letztgenannte Punkt ist von besonderem Interesse, da die zur Verfügung stehenden Zeitreihen üblicherweise unterschiedliche Längen aufweisen und damit oftmals abweichende Ergebnisse bewirken. Daneben wir die Generalität der Ergebnisse (d. h. die Übertragbarkeit) untersucht.

4 Grundlagen

Die Untersuchungen erfolgen unter Verwendung der Block Maxima (BM) und der Peak Over Threshold (POT) Methode. Die grundlegenden Schritte bei der Anwendung dieser beiden Methoden zur Ermittlung der Höhen und Häufigkeiten extremer Wasserstände sind in Abbildung 2 dargestellt. Im ersten Schritt erfolgt die Trendkorrektur der Eingangsdaten. Hierdurch wird Langzeittrends wie z. B. den Änderungen des mittleren Meeresspiegels (MSL) Rechnung getragen. Im zweiten Schritt werden aus den hochaufgelösten Datensätzen die Kollektive erzeugt, an die im Folgenden die theoretischen Verteilungen angepasst werden. Im Fall der BM Methode werden die Kollektive aus den r-größten Werten eines Jahres generiert. Im Fall der POT Methode setzt sich das Kollektiv dagegen aus allen unabhängigen Schwellenwertüberschreitungen der Zeitreihe zusammen. In Schritt drei werden die Parameter der Verteilung aus dem zugrunde liegenden Kollektiv geschätzt während in Schritt vier die Wahl der Verteilung (z. B. GEV oder GPD; in Abhängigkeit von Schritt 2) erfolgt. Im fünften Schritt erfolgt ein Abgleich zwischen theoretischer und empirischer Verteilung (d. h. den Plotting-Positionen; siehe z. B. Jensen, 1985). Die nachfolgenden Abschnitte greifen diese Schritte auf und diskutieren die in der gängigen Literatur genannten Vorgehensweisen. Es wird darauf hingewiesen, dass die Darstellung in Abbildung 2 nicht allumfassend ist und andere, weniger gängige Methoden vernachlässigt wurden.

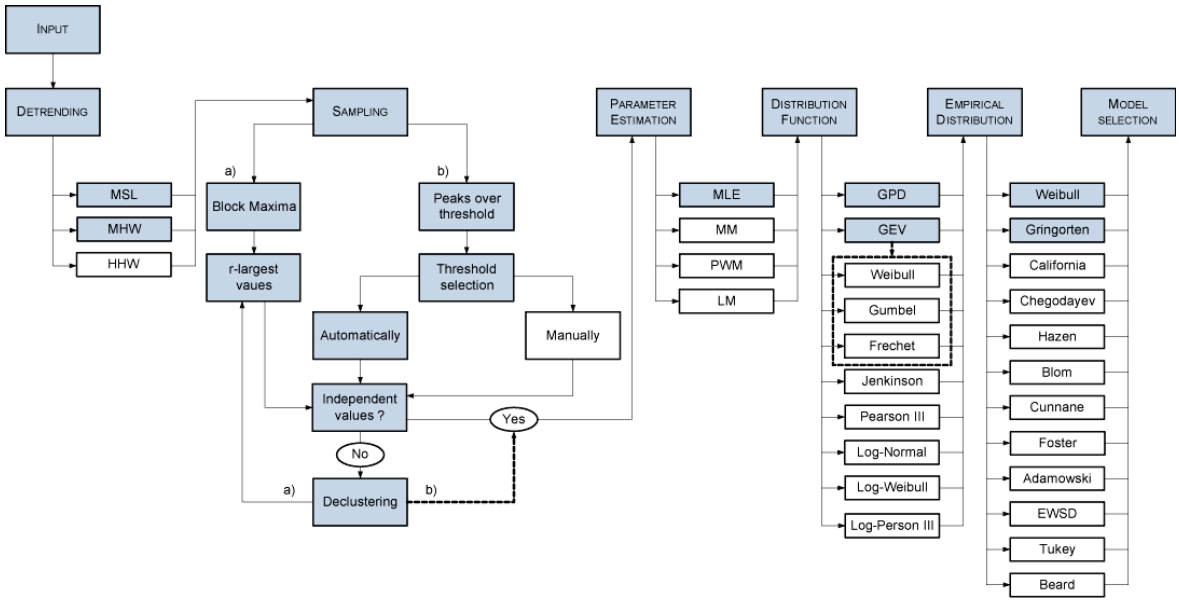


Abbildung 2: Mögliche Vorgehensweisen bei extremwertstatistischen Analysen.

4.1 Trendkorrektur

Im Zuge extremwertstatistischer Analysen werden Änderungen in den Eingangsdaten (z. B. durch Änderungen des mittleren Meeresspiegels) auf die gegenwärtigen Verhältnisse angepasst, d. h. es erfolgt eine physikalisch begründete Anpassung. In der Wahrscheinlichkeitstheorie ist die Trendkorrektur jedoch primär mathematisch begründet. Die fundamentalste aller Annahmen ist dabei, dass das Kollektiv unabhängig und stationär ist (siehe z. B. Jensen, 1984; Rao und Hamed, 2000). Dabei wird angenommen, dass ein Extremwertkollektiv einen Zufallsprozess aus unabhängigen und gleichverteilten (IID) Variablen beschreibt. In der Realität besteht jedoch häufig eine Abhängigkeit zwischen den aktuellen und den vorangegangenen Werten. Darüber hinaus unterliegen Variablen oftmals saisonalen Beeinflussungen während diese unter stationären Bedingungen nicht zugegen wären, d. h. jedes Unterkollektiv müsste streng genommen die gleichen Eigenschaften aufweisen (Coles, 2001). Wasserstandszeitreihen können als stationär betrachtet werden, wenn diese frei von signifikanten Trends, Sprüngen oder Periodizitäten sind. Dies impliziert, dass die statistischen Parameter (z. B. der Mittelwert und die Standardabweichung) eines Prozesses zeitlich unveränderlich sind (Mudersbach, 2010). In der Realität postulieren viele Zeitreihenanalyseverfahren stationäre Verhältnisse. Aus diesem Grund sollte den Analysen ein Stationaritätstest vorgeschaltet werden.

In Wasserstandszeitreihen werden Trends i. d. R. durch Variabilität und periodische Schwankungen maskiert. Die Variabilität ist in den höheren Wasserstands Perzentilen i. d. R. deutlich stärker ausgeprägt als in den mittleren. Die Trendermittlung erweist sich in diesen Fällen

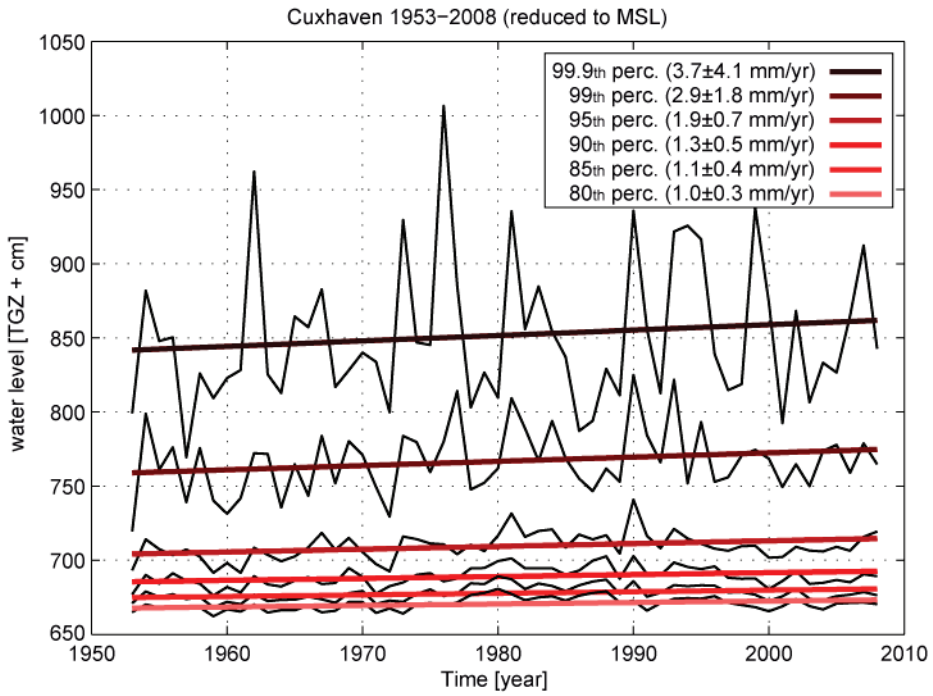


Abbildung 3: Residualtrends unterschiedlicher Wasserstands Perzentile; der Trend des MSL wurde zuvor subtrahiert (modifiziert nach Mudersbach et al., 2013).

schwierig und geht häufig mit großen Unsicherheiten einher. Die Kenntnis des zugrunde liegenden physikalischen Systems kann jedoch dazu beitragen, die Trends in den betrachteten Datensätzen robuster zu detektieren.

In vielen Studien wurden Untersuchungen zu Änderungen in den extremen Wasserständen und deren Antriebsfaktoren durchgeführt. Woodworth und Blackman (2004) habe z. B. eine globale Studie zu Änderungen extremer Wasserstände durchgeführt und schlussfolgern, dass Änderungen in den extremen Wasserständen auf die regionalen Veränderungen des Klimas sowie auf natürliche Variabilität zurückzuführen sind. Darüber hinaus zeigen die Autoren, dass säkulare Änderungen extremer Wasserstände an den meisten betrachteten Orten vergleichbar mit denen des MSL sind. Da die aus dem MSL abgeleiteten Trends i. d. R. stabiler sind und geringere Unsicherheiten aufweisen, sollten diese für die robuste Trendschätzung der höheren Perzentile verwendet werden. Diese Ergebnisse wurden für den Englischen Kanal (Haigh et al., 2010a; Pirazzoli et al., 2006) und entlang der Australischen Küstenlinie (Church et al., 2004) bestätigt.

Im Bereich der Deutschen Bucht zeigen Mudersbach et al. (2013), dass die Variabilität und die Trends der höheren Wasserstands Perzentile zwischen 1950 und 1980 deutlich höher waren als die des MSL. Die Autoren führen die unterschiedliche Entwicklung primär auf Veränderungen in den astronomischen Tiden zurück. In diesem konkreten Fall ist die Verwendung des MSL als

Proxy für den Trend der Extremwasserstände ungeeignet. Vergleichbare Resultate wurden in Douglas (1991) und in Haigh et al. (2010a) für anderen Regionen präsentiert. In Abbildung 3 sind die von Mudersbach et al. (2013) ermittelten Unterschiede in den Trends am Pegel Cuxhaven dargestellt; Perzentil Trends an weiteren Pegeln können Tabelle 2 entnommen werden.

Tabelle 2: Lineartrends und Standardfehler der jährlichen Perzentile (direkt aus den Beobachtungsdaten abgeleitet bzw. um den MSL reduziert) für unterschiedliche Perioden. Alle Trends wurden mit Hilfe eines Mann-Kendall Test auf Signifikanz geprüft; signifikante Werte sind fett gedruckt.

	Norderney			
	1901-2008 [mm/yr]		1953-2008 [mm/yr]	
Percentile	observed	reduced to MSL	observed	reduced to MSL
99.9th	**4,0** ± 1,3	**1,7** ± 1,3	**5,7** ± 3,5	2,7 ± 3,4
99th	**3,3** ± 0,6	**1,0** ± 0,6	**4,8** ± 1,6	**1,9** ± 1,5
95th	**3,2** ± 0,3	**0,9** ± 0,2	**4,5** ± 0,7	**1,5** ± 0,5
90th	**3,1** ± 0,2	**0,8** ± 0,1	**4,1** ± 0,5	**1,2** ± 0,3
85th	**3,1** ± 0,2	**0,8** ± 0,1	**4,1** ± 0,4	**1,1** ± 0,2
80th	**3,1** ± 0,1	**0,7** ± 0,1	**4,0** ± 0,4	**1,1** ± 0,2

	LT Alte Weser			
	1936-2008 [mm/yr]		1953-2008 [mm/yr]	
Percentile	observed	reduced to MSL	observed	reduced to MSL
99.9th	**6,3** ± 2,2	**4,6** ± 2,2	**4,8** ± 3,4	2,9 ± 3,3
99th	**3,5** ± 1,0	**1,7** ± 0,9	**3,5** ± 1,5	**1,7** ± 1,4
95th	**3,2** ± 0,5	**1,4** ± 0,4	**3,2** ± 0,7	**1,4** ± 0,6
90th	**2,8** ± 0,3	**1,1** ± 0,2	**2,7** ± 0,5	**0,9** ± 0,4
85th	**2,7** ± 0,3	**1,0** ± 0,2	**2,7** ± 0,5	**0,9** ± 0,3
80th	**2,7** ± 0,3	**0,9** ± 0,2	**2,6** ± 0,4	**0,8** ± 0,2

	Cuxhaven			
	1843-2008 [mm/yr]		1953-2008 [mm/yr]	
Percentile	observed	reduced to MSL	observed	reduced to MSL
99.9th	**3,9** ± 0,8	**1,6** ± 0,8	**5,7** ± 4,3	3,7 ± 4,1
99th	**3,2** ± 0,4	**1,0** ± 0,3	**4,9** ± 2,0	**2,9** ± 1,8
95th	**2,9** ± 0,2	**0,6** ± 0,1	**4,0** ± 0,9	**1,9** ± 0,7
90th	**2,9** ± 0,1	**0,6** ± 0,1	**3,4** ± 0,6	**1,3** ± 0,5
85th	**2,8** ± 0,1	**0,5** ± 0,1	**3,1** ± 0,6	**1,1** ± 0,4
80th	**2,8** ± 0,1	**0,5** ± 0,1	**3,1** ± 0,5	**1,0** ± 0,3

	Dagebüll			
	1936-2008 [mm/yr]		1953-2008 [mm/yr]	
Percentile	observed	reduced to MSL	observed	reduced to MSL
99.9th	**7,9** ± 2,8	**6,2** ± 2,7	**5,8** ± 4,1	3,3 ± 4,0
99th	**7,0** ± 1,2	**5,3** ± 1,1	**6,9** ± 1,8	**4,4** ± 1,7
95th	**5,3** ± 0,6	**3,6** ± 0,4	**6,1** ± 0,9	**3,6** ± 0,7
90th	**5,1** ± 0,5	**3,5** ± 0,3	**5,9** ± 0,7	**3,4** ± 0,4
85th	**5,2** ± 0,4	**3,5** ± 0,2	**5,7** ± 0,5	**3,2** ± 0,3
80th	**5,1** ± 0,3	**3,4** ± 0,1	**5,6** ± 0,5	**3,2** ± 0,2

	Hörnum			
	1937-2008 [mm/yr]		1953-2008 [mm/yr]	
Percentile	observed	reduced to MSL	observed	reduced to MSL
99.9th	**8,2** ± 2,4	**6,0** ± 2,4	**5,2** ± 3,6	2,3 ± 3,5
99th	**6,2** ± 1,1	**4,0** ± 1,0	**6,4** ± 1,6	**3,5** ± 1,5
95th	**4,7** ± 0,6	**2,4** ± 0,4	**5,5** ± 0,8	**2,6** ± 0,6
90th	**4,5** ± 0,4	**2,3** ± 0,3	**5,1** ± 0,6	**2,2** ± 0,4
85th	**4,5** ± 0,4	**2,2** ± 0,2	**5,0** ± 0,5	**2,1** ± 0,2
80th	**4,4** ± 0,3	**2,2** ± 0,1	**4,9** ± 0,5	**2,0** ± 0,2

	Helgoland		
		1954-2008 [mm/yr]	
Percentile		observed	reduced to MSL
99.9th		**5,3** ± 3,3	3,1 ± 3,2
99th		**3,8** ± 1,3	**1,7** ± 1,2
95th	only data	**3,7** ± 0,7	**1,5** ± 0,5
90th	available since 1954	**3,3** ± 0,5	**1,1** ± 0,3
85th		**3,1** ± 0,4	**1,0** ± 0,2
80th		**3,1** ± 0,4	**0,9** ± 0,2

Eine gängige Vorgehensweise zur Trendkorrektur ist die Verwendung einer einfachen linearen Trendkorrektur (siehe AghaKouchak et al., 2013), welche auf die gesamte Zeitreihe angewendet wird. Diesem Vorgehen liegt jedoch eine stark vereinfachte Annahme zugrunde, da Änderungen in den Wasserständen ungleichförmig auftreten und häufig von periodischen Schwankungen überlagert werden. Insbesondere im Hinblick auf die physikalische Bedeutung kann die lineare Trendkorrektur zu fehlerhaften Annahmen führen. Ein alternatives Vorgehen besteht darin, den gleitenden Mittelwert der untersuchten Variablen zur Trendkorrektur (z. B. den MSL, das MThw, das HThw etc.) zu verwenden. Dieses Vorgehen trägt Änderungen auf

unterschiedlichen Zeitskalen Rechnung und erlaubt die Korrektur von Trends sowie Periodizitäten. Die betrachtete Zeitskala kann dabei variabel gewählt werden und ermöglicht somit eine gewisse Flexibilität. Nach Dixon und Tawn (1994) weisen Wasserstandsmessungen saisonal bedingte Instationaritäten auf. Dabei treten die meisten erhöhten Wasserstände in den Wintermonaten auf. Die Autoren zeigen, dass die Vernachlässigung dieser Saisonalität in einer signifikanten Unterschätzung von Wasserständen führen kann. Darüber hinaus lautet eine der Grundforderungen bei der Anwendung extremwertstatistischer Verfahren, dass das Kollektiv die IID Bedingung (s.o.) einhält. Aus diesem Grund ist es notwendig, dass die Kollektive sowohl um Langzeittrends als auch um saisonale Effekte korrigiert werden. Idealerweise kann hierdurch ein näherungsweise stationäres Kollektiv generiert werden (Hawkes et al., 2008). In einem alternativen Ansatz werden die Instationaritäten in die Ermittlung der Wiederkehrintervalle miteinbezogen (siehe z. B. Dixon und Tawn, 1994; Méndez et al., 2007; Mudersbach und Jensen, 2010).

4.2 Kollektivbildung

Die Wahl eines Modells ist entscheidend für die Art der Kollektivbildung. So basiert die BM Methode auf der Annahme, dass die verallgemeinerte Extremwertverteilung (*engl. generalized extreme value distribution*, GEV) eine gute Näherung für die Verteilung der r-größten Wasserstände innerhalb einer definierten Periode darstellt (Dixon und Tawn, 1994). Das Kollektiv der BM Methode wird dabei aus den r-größten Werten eines Jahres gebildet. In diesem Kontext werden häufig die jährlichen Maxima, d. h. r=1 Wert/Jahr, verwendet (*engl. annual maxima*, AMAX)(siehe z. B. Acero et al., 2011). Weisen die aufgezeichneten Informationen jedoch mehr als einen Extremwert auf, d. h. auch der n. höchste Wert eines Jahres kann höher sein als der höchste Wert eines anderen Jahres, werden diese wertvollen Informationen bei der Verwendung der AMAX Methode vernachlässigt. Die Methode ist daher im Hinblick auf die Informationsausnutzung ineffizient (Coles, 2001). Aus diesem Grund präsentieren Smith und Weissman (1994) eine alternative Form der Kollektivbildung (siehe z. B. auch Smith, 1996; Tawn, 1988), die auf der Verwendung der r-größten Werte (*engl. r-largest*) eines Jahres mit $r \geq 1$ Werten/Jahr basiert. Als Praxisbeispiel wenden die Autoren diese Methodik auf Küstenpegel entlang der gesamten Küstenlinie des Vereinigten Königreiches an und zeigen, dass die Verwendung von r=8 Werten/Jahr zu robusten Schätzungen von Wiederkehrintervalle führt.

Coles (2001) weist jedoch darauf hin, dass auch diese Methode ineffizient sein kann, falls ein Block (z. B. Jahr) mehr Extremwerte beinhaltet als ein anderer Block. Insbesondere in Gebieten mit hoher interannualer Variabilität (z. B. die Deutsche Bucht, s. Dangendorf et al., 2012) zeigen die Wasserstandsaufzeichnungen teils deutliche Unterschiede in den jährlichen Häufigkeiten erhöhter Wasserstände bzw. dem Auftreten von Sturmfluten. Die Kollektivbildung durch die r-größten Werte eines Jahres differenziert jedoch nicht zwischen Extremwert und „üblichem“ Wert

und folglich werden auch sehr niedrige Ereignisse im Kollektiv berücksichtigt. Wird dieses Kollektiv nun zu Extrapolationszwecken verwendet, dann führt dies i. d. R. zu Fehleinschätzungen.

Die POT Methode ist dagegen deutlich effizienter, da hierbei alle Werte berücksichtigt werden, die einen definierten Schwellenwert überschreiten. Aus diesem Grund besteht das POT Kollektiv auch nicht aus den r-größten Werten eines Jahres, sondern erlaubt eine rationale Selektion der als „extrem“ definierten Werte (Lang et al., 1999). Die Modellverteilung des POT Kollektives ist die verallgemeinerte Pareto Verteilung (*engl. generalized Pareto distribution,* GPD) (Dupuis, 1998). In einem Vergleich von Wiederkehrintervallen aus AMAX und POT Kollektiven zeigt Cunnane (1973), dass die POT Methode eine geringere Varianz als die AMAX Methode aufweist, wenn das POT Kollektiv im Mittel wenigstens 1,65 Werte/Jahr aufweist.

Die größte Herausforderung bei der POT Methode besteht in der Wahl eines geeigneten Schwellenwertes. Wird der Schwellenwert dabei zu niedrig gewählt, werden die grundlegenden Modellannahmen verletzt (d. h. die einzelnen Werte sind nicht unabhängig und niedrige Werte werden berücksichtigt). Wird der Schwellenwert dagegen zu hoch angesetzt, verursacht dies eine große Variabilität in den Parameterschätzungen. Im Hinblick auf extremwertstatistische Analysen, deren primäre Aufgabe in der Extrapolation über den Beobachtungshorizont hinaus besteht, kann dies zu großen Abweichungen in den Schätzungen führen.

Die Wahl des Schwellenwertes kann sowohl physikalisch als auch mathematisch motiviert sein (Lang et al., 1999). Im physikalisch begründeten Ansatz beschreibt der Schwellenwert einen Wasserstand, bei dessen Überschreitung Überflutungen resultieren. Dieser Ansatz kommt vorwiegende in der Binnenhydrologie zum Einsatz während für küstenhydrologische Anwendungen primär mathematisch begründete Ansätze verwendet werden.

In den letzten Jahrzehnten wurde diesbezüglich eine große Anzahl von parametrischen und nichtparametrischen Verfahren entwickelt. Rosbjerg et al. (1992) präsentieren ein parametrisches Verfahren, welches auf einem dimensionslosen Faktor k, dem Mittelwert $\bar{x}$ und der Standardabweichung S des Originaldatensatzes basiert. Dabei empfehlen die Autoren einen Wert von k=3. Der Schwellenwert u_0 errechnet sich dabei wie folgt

$$u_0 = \bar{x} + k \cdot S \quad . \qquad \text{Formel 4.1}$$

Für die Wahl des Schwellenwertes empfiehlt Coles (2001) die Verwendung des Mean Residual Life Plots (MRLP). Der MRLP errechnet sich nach

$$\left\{ \frac{1}{n_u} \sum_{i=1}^{n_u} \left(x_{(i)} - u_0\right) : u_0 < x_{max} \right\} \quad , \qquad \text{Formel 4.2}$$

mit der Anzahl n_u der Beobachtungen x(i), die den Schwellenwert u_0 überschreiten; x_{max} steht für den größten aller Werte im Kollektiv. Der MRLP basiert auf der Annahme, dass die GPD genau dann eine adäquate Beschreibung des Kollektivs ermöglicht, wenn der MRLP näherungsweise linear ist. Zu Illustrationszwecken ist der MRLP in Abbildung 4a am Beispiel des Pegels Cuxhaven dargestellt.

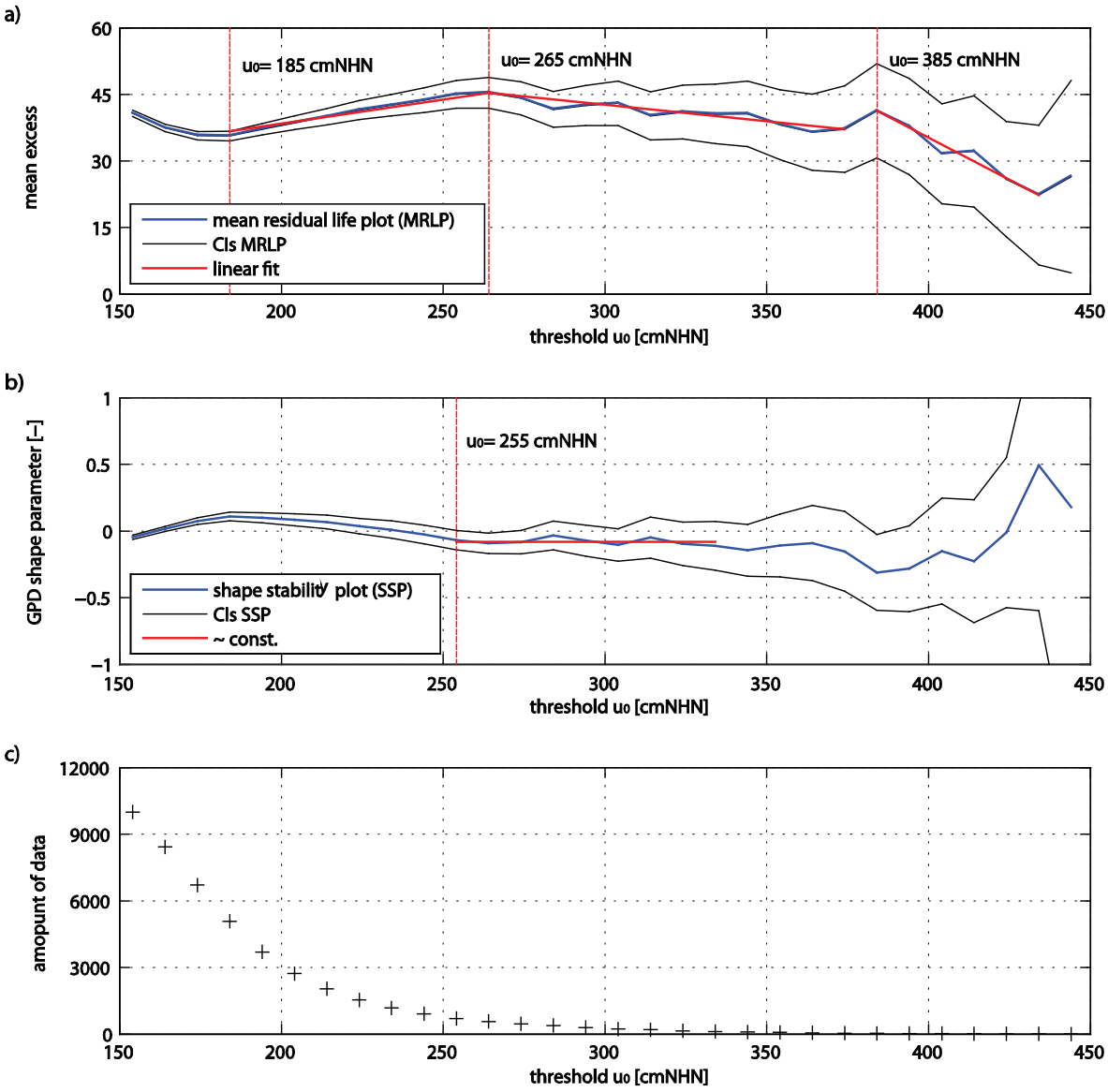


Abbildung 4: (a) Mean Residual Life Plot; (b) Stability Plot; (c) resultierende Kollektivgröße.

Dabei wird u_0 jeweils am Anfangspunkt betrachtet. Die Abbildung zeigt, dass es mehrere mögliche Segmente gibt, wo die Forderung nach Linearität erfüllt wird (siehe z. B. u_0={185, 265, 385} cmNHN). Die Frage, welcher der zur Verfügung stehende Schwellenwert zu wählen ist, bleibt dabei jedoch unbeantwortet. Als Alternative zu diesem Vorgehen empfiehlt Coles (2001) die

Verwendung des Stability Plots (SSP). Hierbei wird die Abhängigkeit zwischen dem Formparameter des Kollektivs und dem zugehörigen Schwellenwert untersucht. Die Empfehlung besagt, dass genau der Schwellenwert gewählt werden sollte, bei dem der Formparameter konstant bleibt (vgl. Abbildung 4b). Obwohl der MRLP und der SSP häufig genutzt werden (siehe z. B. Morton und Bowers, 1996; Choulakian und Stephens, 2001), offenbaren beide Verfahren Schwierigkeiten bei der Anwendung, da sie auf subjektiven Entscheidungen basieren und nur bedingt in ein automatisiertes Schema überführt werden können.

Thompson et al. (2009) und Zhang und Ge (2009) verwenden Hypothesentests und wenden diese auf die Kollektive an, die auf Basis unterschiedlicher Schwellenwerte ermittelt wurden. Aus diesen Tests geht hervor, ob das gewählte Kollektiv die vorgesehene Verteilung (hier die GPD) aufweist. Schwellenwerte werden zudem häufig mit Hilfe von Perzentilen beschreiben. Die Spanne der verwendeten Werte reicht dabei vom 97,5-Perzentil (Environment Agency, 2011) bis hin zum 99.5-Perzentil (Grabemann und Weiß, 2008). Eine nachvollziehbare Begründung für die Wahl des jeweiligen Schwellenwertes bleibt jedoch i. d. R. aus.

Neben der Schwellenwertbestimmung unterliegt die Kollektivbildung einer weiteren wichtigen Entscheidung. So können Wasserstandszeitreihen Abhängigkeiten aufweisen (sogenannte Cluster), welche i. d. R. im meteorologischen Antrieb begründet sind. Eine der wesentlichen Forderungen extremwertstatistischer Analysen ist jedoch die Unabhängigkeit des Kollektivs. Für praktische Anwendungen lautet daher eine gängige Randbedingung, dass die Ereignisse $x_i > u_0$ und $x_j > u_0$ unabhängig sind, wenn der Schwellenwert u_0 hoch genug ist und die Eintrittszeiten von i und j weit genug voneinander entfernt sind (Coles, 2001). In der BM Methode kann die Unabhängigkeit durch die Wahl eines großen Blocks (z. B. ein Jahr) erreicht werden. Bei der POT Methode wird diese Forderung jedoch nicht ohne Weiteres erfüllt, d. h. es muss ein aktives „Declustern“ durchgeführt werden. In der Literatur werden zu diesem Zweck unterschiedliche Methoden angewendet. Zachary et al. (1998) verwenden z. B. eine „Standard Storm Length“ (SSL) zwischen 24 und 72 h für das „Declustern“. Im Hinblick auf Stürme in den höheren Breitengraden verwenden Mathiesen et al. (1994) SSL zwischen 120 und 168 h. Aus der Analyse von Autokorrelationsfunktionen leiten Soares und Scotto (2004) für die Nordsee sogar SSL-Werte von 480 h ab. Aus der Bandbreite der Werte geht hervor, dass diese Thematik bisweilen subjektiven Entscheidungen unterliegt und erheblichen Spielraum lässt. Zudem ist es nicht zielführend, eine repräsentative SSL für unterschiedliche Sturmkollektive anzusetzen. Die Verwendung eines generell gültigen, konstanten SSL-Wertes ist daher bedenklich (Soukissian und Arapi, 2011).

Die Diversität der verfügbaren Methoden zeigt, dass das „Declustern“ stark subjektiv und oftmals willkürlich erfolgt. Um dieses Problem zu lösen wird ein objektives und automatisiertes Vorgehen benötigt. Aus diesem Grund empfehlen Smith und Weissmann (1994) die Verwendung

des Extremal Index, dem Kehrwert der mittleren Clustergröße eines Kollektivs. Der Extremal Index gibt Auskunft über das Maß der Clusterbildung in einem Extremwert Kollektiv und errechnet sich nach

$$\theta(u_0) = \frac{2\left\{\sum_{i=1}^{n-1}(T_i - 1)\right\}^2}{(n-1)\sum_{i=1}^{n-1}(T_i - 1)(T_i - 2)} \quad . \qquad \text{Formel 4.3}$$

Dabei beschreibt T_i die Differenzzeit zwischen den Einzelereignissen, n die Kollektivgröße und u_0 den Schwellenwert (Ferro und Segers, 2003).

4.3 Parameter Schätzung

Die Datenverfügbarkeit ist ein zentraler Aspekt extremwertstatistischer Analysen. Dabei wird eine limitierte Stichprobe (Kollektiv) i. d. R. dazu verwendet, um auf das Systemverhalten (Grundgesamtheit) eines Prozesses zu schließen. Je größer die Stichprobe, desto besser lassen sich i. d. R. auch die Charakteristika der Grundgesamtheit beschreiben. Die Verwendung sehr kleiner Stichproben kann dagegen fehlerhafte Parameterschätzungen und unrealistischen Überschreitungswahrscheinlichkeiten verursachen (Rao und Hamed, 2000). Die Verteilung der Stichprobe wird über Parameter beschrieben, die wiederum mit Hilfe von Parameterschätzmethoden ermittelt werden. Im Rahmen des Teilprojektes ZukunftHallig A wurde für diese Zwecke ausschließlich die Maximum Likelihood Methode (MLE) verwendet (Davison und Smith, 1990; Hosking und Wallis, 1987; Smith, 1986). Bei der MLE handelt es sich um eine flexible und allgemein anerkannte Methode zur Parameterschätzung (Coles, 2001; Naveau et al., 2005). Nach Katz et al. (2002) ist die MLE für sehr kleine Kollektive ($n \leq 25$) unzuverlässig, insbesondere bei der Verwendung der GEV (BM Methode). Alternative Parameterschätzer sind z. B. die Momentenmethode (Sachs, 1997) und die Methode der L-Momente (Hosking und Wallis, 1997).

4.4 Theoretische Verteilung

Bei der GEV und der GPD handelt es sich um die meistgenutzten Verteilungen in der Anwendung extremwertstatistischer Verfahren. Nach dem Fisher-Tippett Theorem (Fisher und Tippett, 1928) ist die GEV die Grenzverteilung aller IID verteilten BM Kollektive (Neves und Fraga-Alves, 2008). Die GEV vereint die Gumbel, Fréchet und Weibull Familien in einer einzigen Verteilung (Coles, 2001) und ist definiert als

$$GEV = exp\left\{-\left[1 + \xi\left(\frac{z-\mu}{\sigma}\right)\right]^{-1/\xi}\right\} \quad , \qquad \text{Formel 4.4}$$

dabei entspricht μ dem Lageparameter, σ dem Skalenparameter und ξ dem Formparameter; die Parameter werden aus dem Kollektiv der Einzelwerte z abgeleitet.

Die GPD ist die Grenzverteilung des POT Kollektives (siehe z. B. Balkema und de Haan, 1974; Pickands, 1975). Die GPD umfasst eine Vielzahl von Verteilungsfunktionen (Hawkes et al., 2008) und ist definiert als

$$GPD = 1 - \left[1 + \frac{\xi y}{\tilde{\sigma}}\right]^{-1/\xi} \quad , \qquad \text{Formel 4.5}$$

wobei gilt:

$$\tilde{\sigma} = \sigma + \xi(u - \mu) \quad . \qquad \text{Formel 4.6}$$

Die Parameter der GPD entsprechen denen der GEV (Coles, 2001).

4.5 Empirische Verteilung

Wahrscheinlichkeitsplots sind eine hilfreiche Möglichkeit, den Charakter eines Extremwertkollektivs visuell zu untersuchen (Stedinger, 1992). Durch die Verwendung von Plotting-Positionen lassen sich die Über- und Unterschreitungswahrscheinlichkeiten von beobachteten Ereignissen berechnen. Nach De (2000) werden Wahrscheinlichkeitsplots dazu genutzt, um eine spezifische Verteilung an das Kollektiv anzupassen, Ausreißer zu identifizieren und um die Anpassungsgüte visuell zu prüfen (siehe auch Jensen, 1985). Heutzutage werden die empirischen Verteilungen primär für die beiden zuletzt genannten Aspekte verwendet während die Anpassung von Verteilungsfunktionen mit Hilfe analytischer Verfahren erfolgt. Nach wie vor ist es jedoch üblich, die analytisch ermittelten Resultate durch empirisch abgeleitete Plotting-Positionen zu stützen (De, 2000). Die meisten Plotting-Positionen sind Spezialfälle einer allgemeinen Formel (Hirsch et al., 1992):

$$qi = \frac{i - a}{n + 1 - 2a} \quad . \qquad \text{Formel 4.7}$$

Dabei entspricht qi der Plotting-Position der i-größten Ereignisse, a dem Plotting Position Parameter und n der Anzahl der Beobachtungswerte. Die gängigsten Plotting-Positionen sind die Weibull-Plotting-Position mit a=0 und die Gringorten-Plotting-Position mit a =0,44. Beide Plotting-Positionen werden im Folgenden verwendet.

4.6 Ermittlung von Wasserständen mit geringen Eintrittswahrscheinlichkeiten

Aus mathematischer Sicht ist die Ermittlung von Wiederkehrintervallen die weit über die Beobachtungsperiode hinausgehen zweifelhaft. Nach Kleeber und Schumann (2001) ist die Ermittlung von Wiederkehrintervallen auf das zwei- bis dreifache der Beobachtungszeitspanne beschränkt (siehe auch DVWK, 1991; DWA, 2012). Hierfür gibt es jedoch keine mathematische Begründung. Die Einschränkungen können jedoch als allgemein anerkannte Regeln der Technik betrachtet werden. Trotz dieser Einschränkung fordern einige Richtlinien die Ermittlung von Wiederkehrintervallen bis zu T=10.000 Jahren (z. B. für die Bemessung von Rückhaltebecken nach DIN 19700-12:2004-07; Küstenschutzanlagen in den Niederlanden (siehe z. B. Vrijing et al., 2007). Im Rahmen von ZukunftHallig A wurden Wiederkehrintervalle von bis zu 10.000 Jahren dargestellt. Im primären Untersuchungsgebiet werden Landesschutzdeiche auf Wiederkehrintervalle von T=200 Jahren bemessen; in den meisten Untersuchungen stehen daher Wiederkehrintervalle von T=200 Jahren im Fokus. Darüber liegende Wiederkehrintervalle sind grau hinterlegt, um die geringe Aussagekraft dieser Ereignisse darzustellen.

5 Methoden und Ergebnisse

In diesem Abschnitt wird die Sensitivität der BM- und POT-Methode gegenüber drei Parametern (d. h. der Trendkorrektur, der Kollektivbildung und der Wahl der Verteilungsfunktion) untersucht, die allesamt einen signifikanten Einfluss auf die Ergebnisse von extremwertstatistischen Analysen haben. Die Untersuchungen erfolgen am Beispiel des Pegels Cuxhaven, da hier die längste lückenlose Zeitreihe im Bereich der Deutschen Bucht vorliegt. Falls nichts anderweitiges erwähnt wird, werden alle Analysen auf Basis des gleichen Modell Setups durchgeführt (ausgenommen der Faktor, der explizit untersucht wird). Die Trendkorrektur erfolgt durch einen gleitenden Mittelwert mit einer Fensterlänge von einem Jahr (im Folgenden als Detrend C bezeichnet). Die BM Kollektive werden aus den r-größten Werten eines jeden betrachteten Jahres gebildet. Dabei wurden r-Werte von r=1 bis r=6 Werten/Jahr berücksichtigt. Bei der POT-Methode werden die Schwellenwerte so gewählt, dass die Kollektivgrößen aus dem POT- und BM-Ansatz einander entsprechen (d. h. im Mittel ein bis 6 Werte/Jahr). Die Unabhängigkeit der Ereignisse wird durch ein „Declustern“ mit einer Länge von 1,5 Tagen bzw. 36 h gewährleistet.

5.1 Trendkorrektur

Wie in Abschnitt 4.1 bereits erläutert wurde, weisen die höheren Wasserstands Perzentile im Bereich der Deutschen Bucht signifikant höhere Trends auf als die mittleren Wasserstände. Im Hinblick auf das IID Kriterium ist die Verwendung des MSL zur Trendkorrektur somit ungeeignet und es sollte stattdessen der Trend des MThw (alternativ eines höheren Perzentils) verwendet werden. Hierdurch werden Veränderungen im Sturmflutgeschehen sowie in den Tiden berücksichtigt (Mudersbach et al., 2013). In Teil A von ZukunftHallig A wird die Trendkorrektur an den amtlich bereitgestellten Tidehochwasser (Thw) Scheitelwerten durchgeführt. Falls diese nicht vorliegen, werden die Scheitelwerte zuvor aus den hochaufgelösten Wasserstandszeitreihen generiert. Zum Test der Sensitivität der verwendeten Methoden gegenüber der Trendkorrektur werden ein Lineartrend der gesamten Zeitreihe (Detrend A) und ein 19-jähriges gleitendes Mittel verwendet. Letzteres berücksichtigt den Nodalzyklus mit einer Periode von 18,6 Jahren (Detrend B) (Haigh et al., 2010b). Um Saisonalitäten und Langzeittrends Rechnung zu tragen, wurde zudem ein einjähriger gleitender Mittelwert (Detrend C) verwendet. Zur Trendkorrektur werden die Trendschätzungen (Detrend A, B oder C) von den Originalzeitreihen subtrahiert. Aus den trendkorrigierten Zeitreihen werden BM-Kollektive mit r=1 bis r=6 Werten/Jahr generiert. Für die POT-Kollektive wird der Schwellenwert so gewählt, dass die mittlere Anzahl der Werte pro Jahr den BM-Kollektivgrößen von r=1 bis r=6 Werten/Jahr entspricht.

Abbildung 5a zeigt den Einfluss der verschiedenen Trendkorrekturen auf die Abschätzung der Höhen und Häufigkeiten von extremen Wasserständen mit der BM Methode. Dabei zeigen sich, je nach gewählter Kollektivgröße, Unterschiede von bis zu mehreren Dezimetern. Während sich die Verwendung von r=1 Wert/Jahr robust gegenüber der Trendkorrektur erweist, zeigt die Verwendung des großen Kollektives mit r=6 Werten/Jahr größere Unterschiede in den resultierenden Schätzungen (die Ergebnisse der Kollektive mit r=1 bis r=6 Werten/Jahr sind hier nicht dargestellt, können jedoch linear abgeleitet werden). Dabei verursacht die Verwendung des einjährigen gleitenden Mittelwertes (Detrend C) die insgesamt höchsten Wasserstandsschätzungen. Auch die POT Methode zeigt für kleine Kollektive keine signifikanten Unterschiede in den Schätzungen unter Verwendung der unterschiedlichen Trendkorrekturen (siehe Abbildung 5b). Im Gegensatz zur BM Methode zeigt die POT Methode jedoch auch bei größeren Kollektiven ein stabiles Verhalten (für mehr Informationen siehe Arns et al., 2013).

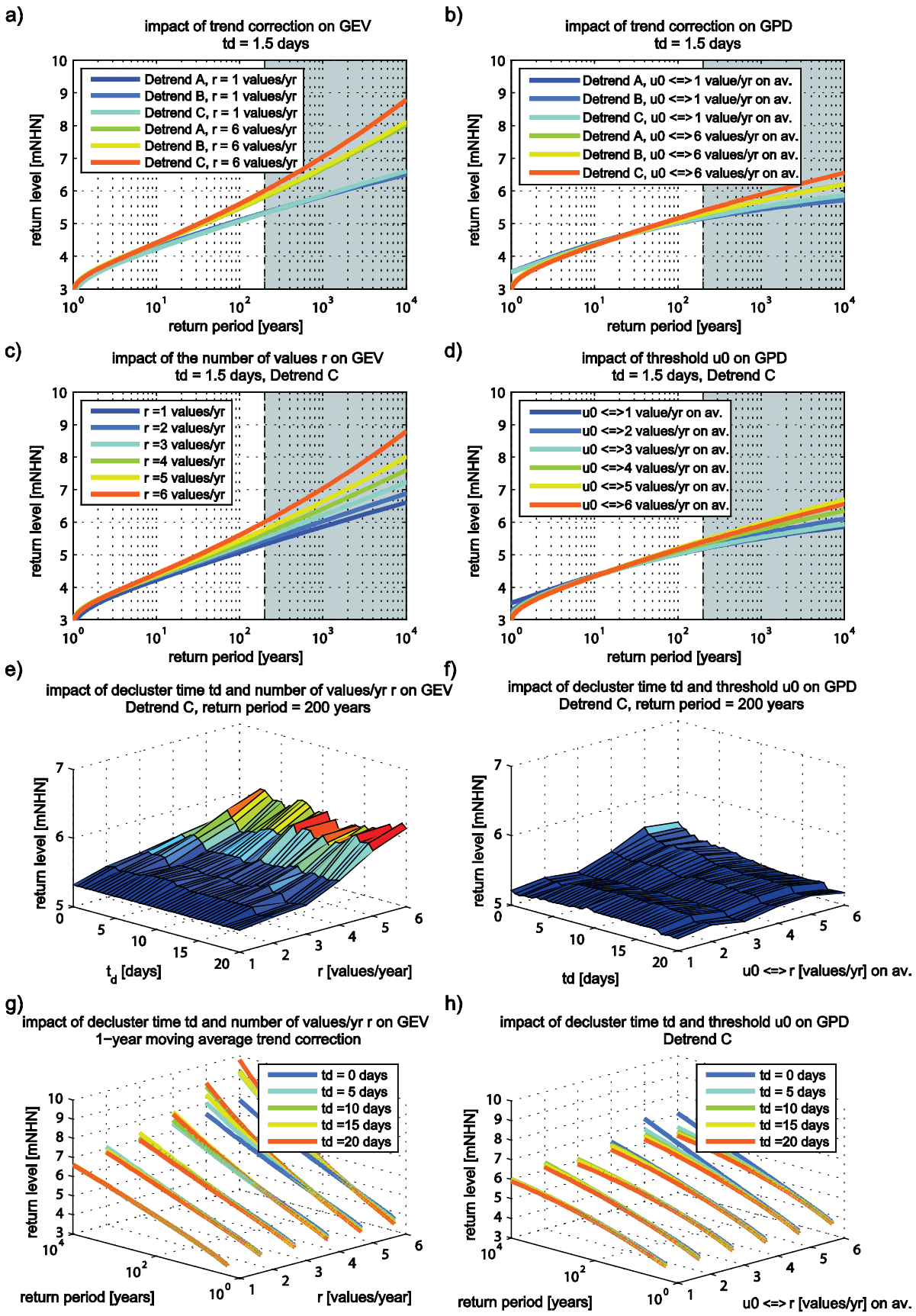


Abbildung 5: Einflussfaktoren der GEV (links) und der GPD (rechts).

5.1 Kollektivbildung

5.1.1 Block Maxima Methode

Entlang der britischen Küstenlinie empfehlen Dixon und Tawn (1994) die Verwendung von r=8 Werten/Jahr. In der Deutsche Bucht verursacht jedoch bereits die Verwendung von r≥2 Werten/Jahr eine erhebliche Überschätzung der höheren Wasserstände. Demnach hat die Kollektivgröße (d. h. die berücksichtigten Ereignisse) erkennbaren Einfluss auf die Ermittlung von Widerkehrintervallen. Um den Einfluss der Kollektivgröße auf die Höhen und Häufigkeiten von Wasserständen zu untersuchen, wird das verwendete Kollektiv von r=1 bis r=6 Werte/Jahr sukzessive vergrößert (siehe Abbildung 5c). Dabei zeigt sich, dass mit steigendem r auch deutlich höhere Wasserstände geschätzt werden (insbesondere in den höheren Wiederkehrintervallen).

Mudersbach et al. (2013) zeigen, dass die höheren Perzentile des Wasserstandes (d. h. bei einem kleinen Kollektiv) eine größere Varianz aufweisen als die niedrigeren (d. h. bei einem größeren Kollektiv). Das gleiche Verhalten kann bei der Kollektivbildung unter Verwendung der BM Methode beobachtet werden. Mit steigenden r-Werten resultiert ein größeres Kollektiv, wodurch die Varianz reduziert wird. Hierdurch lassen sich die Parameter der Verteilung stabiler schätzen. Folglich reduzieren sich auch die Konfidenzintervalle der Schätzung (Dixon und Tawn, 1994). Gleichzeitig werden jedoch auch relativ niedrige Ereignisse in das Kollektiv mitaufgenommen, welche sich nur unzureichend mit Hilfe der theoretischen Verteilung (GEV) beschreiben lassen (d. h. es resultiert ein Bias). Nach Coles (2001) handelt es sich bei der Wahl des r-Wertes somit um einen Kompromiss zwischen dem Bias und der Varianz.

Die theoretischen Verteilungen unter Verwendung der unterschiedlichen r-Werte zeigen graduell ansteigende Formparameter, einhergehende mit einem Vorzeichenwechsel. Aus physikalischer Sicht stellt sich die Frage, ob ein Formparameter mit $\xi > 0$ geeignet ist, dass Verhalten extremer Wasserstände adäquat zu beschreiben, da ein progressiver verlauf eine stetige Beschleunigung in den Wasserständen höherer Widerkehrintervalle impliziert.

Ein Beispiel der Kollektivbildung unter Verwendung der r = 3 größten Werte/Jahr (blaue Kreise) zeigt Abbildung 6a. Zu Darstellungszwecken ist dabei nur die Periode 1935 bis 1945 abgebildet. Die Abbildung zeigt, dass das BM Kollektiv nicht nur Extremwerte beinhaltet, sondern auch z. T. relativ niedrige Wasserstände berücksichtigt. So werden zwischen 1937 und 1938 drei niedrige Werte im Kollektiv berücksichtigt. Die Berücksichtigung solch niedriger Werte verursacht jedoch einen Bias in der Parameterschätzung, wodurch die höheren Werte nicht optimal durch die Verteilung beschrieben werden (siehe Abbildung 6b). Am Pegel Cuxhaven führt die Verwendung von r > 1 Werten/Jahr somit zu einer signifikanten Überschätzung der Wasserstände (für mehr Informationen siehe Arns et al., 2013).

5.1.2 POT Methode

Um den Einfluss des POT Kollektivs auf die Abschätzung von Widerkehrintervallen zu untersuchen, wird der Schwellenwert (*engl. Threshold*) so gewählt, dass die mittlere Anzahl der Werte pro Jahr den BM-Kollektivgrößen von r=1 bis r=6 Werten/Jahr entspricht. Die so gewonnen Kollektive werden zunächst mit Hilfe eines χ^2 Hypothesentests auf deren Verteilung (hier GPD) getestet. Der Einfluss des Schwellenwertes u_0 auf die Ermittlung extremer Wasserstände ist in Abbildung 5d dargestellt. Dabei bedeutet ein ansteigender Schwellenwert, dass die Kollektivgröße abnimmt. Auch bei der POT Methode zeigen sich Differenzen in den Widerkehrintervallen aus unterschiedlichen Kollektiven. Die Differenzen sind jedoch deutlich geringer als bei Verwendung der BM Methode. Wie bei der BM Methode sind die Unsicherheiten der POT Methode von der Kollektivgröße abhängig. Ein niedriger Schwellenwert verursacht dabei einen Bias im asymptotischen Verteilungsende (*engl. tail*) wohingegen ein höherer Schwellenwert zu einer geringeren Anzahl von Überschreitungen und einer größeren Varianz führt (Coles, 2001).

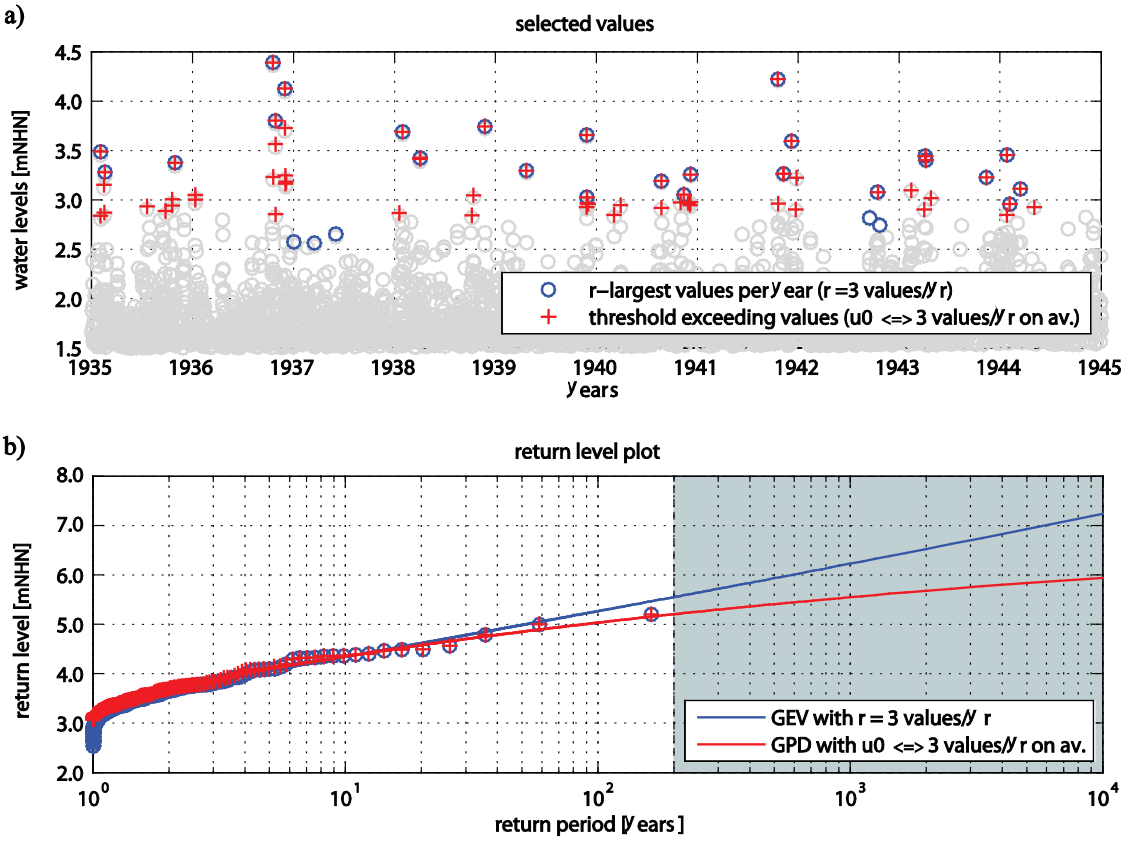


Abbildung 6: (a) Exemplarische Darstellung der Kollektivbildung mit der BM und der POT Methode; (b) Schätzung der Wiederkehrintervalle mittels GEV und GPD.

In einem weiteren Test wird der Schwellenwert so gewählt, dass die mittlere Anzahl der Werte pro Jahr der BM-Kollektivgröße von r=3 Werten/Jahr entspricht (siehe Abbildung 6a).

Vergleicht man nun das BM und das POT Kollektiv, dann existieren im POT Kollektiv Jahre, in denen keine Wasserstände berücksichtigt werden während das BM Kollektiv in jedem Jahr eine fixe Anzahl an Werten berücksichtigt. Die Kollektivbildung der POT Methode selektiert demnach nur Werte, die dem vorher zu definierenden Kriterium „Extremwert“ genügen.

Der Schwellenwert im vorigen Beispiel wurde aus praktischen Gründen verwendet. Für reale Anwendungen ist eine objektive und stabile Schwellenwertwahl jedoch von großer Bedeutung. Um die Eignung diverser Verfahren zu Ermittlung von Schwellenwerten zu untersuchen, wird im Folgenden die Stabilität der Wasserstandsschätzungen getestet. Die Stabilität eines Merkmals wird dabei nach Kuncheva (2007) als die Übereinstimmung zwischen den Resultaten verstanden, die sich aus unterschiedlichen unterkollektiven ergeben. Die Schätzung extremer Wasserstände erfolgt daher an Kollektiven, die stetig um ein Jahr gekürzt werden. Dabei wird jeweils das erste Jahr aus dem Kollektiv entfernt, bis das Kollektiv schlussendlich eine Mindestperiode von 10 Jahren berücksichtigt. Die auf diese Weise gewonnenen Schätzungen werden sowohl aus dem BM- als auch aus dem POT Kollektiv abgeleitet.

Für die Ermittlung von Schwellenwerten werden die folgenden Methoden getestet: ein parametrisches Verfahren nach Rosbjerg et al. (1992); ein nicht-parametrisches Verfahren, welches auf einem Hypothesentest basiert (Thompson et al., 2009); die K-S Teststatistik (Zhang und Ge, 2009); Perzentil basierte Ansätze (siehe z. B. Environment Agency, 2011; Grabemann und Weisse, 2008). Das übergeordnete Ziel der Untersuchungen ist die Entwicklung eines stabilen und zeitinvarianten Verfahrens zur Ermittlung extremer Wasserstände, welches eine geringere Varianz als das bisher primär verwendete AMAX Verfahren aufweist. Mit Ausnahme des Perzentil basierten Ansatzes wurden die untersuchten Verfahren jedoch an allen untersuchten Standorten verworfen, da hierbei zu hohe Schwellenwerte (verbunden mit großen Varianzen) gewählt wurden.

Die Stabilität der Wasserstände mit dem Wiederkehrintervall T=200 Jahre unter Verwendung unterschiedlicher Schwellenwerte ist in Abbildung 7 dargestellt. Dabei wurden Perzentil basierte Schwellenwerte zwischen dem 97,5-Perzentil (im Mittel ~17,6 Werte/Jahr) und dem 99,7-Perzentil (im Mittel ~2,1 Werte/Jahr) berücksichtigt. Die grau schattierten Bereiche zeigen die 95%-Konfidenzintervalle der Referenzverteilung (d. h. dem Wasserstand mit einem mittleren Wiederkehrintervall von T = 200 Jahren aus der GEV bei Verwendung eines AMAX Kollektives von 1936 oder früher bis 2009). Bis 1976 zeigen alle Kurven ein relativ stabiles Verhalten. Die Konfidenzintervalle der Referenzverteilung werden lediglich in den letzten Jahren durch die niedrigeren Perzentile überschritten. Im Jahr 1976 zeigen alle Kurven dann einen plötzlichen Einbruch mit deutlich geringeren Wasserstandsschätzungen. Danach zeigen die Kurven ein unterschiedliches Verhalten, welches insgesamt durch eine große Variabilität gekennzeichnet ist. Die Abbildung verdeutlicht, dass die Sturmflut von 1976 in der Deutschen Bucht einen maßgeblichen Einfluss auf die extremwertstatistische Ermittlung von Wasserständen hat. Dies ist

nicht verwunderlich, da diese Sturmflut in weiten Teilen der Deutschen Bucht die höchsten bisher aufgezeichneter Wasserstände verursacht hat (Jensen und Müller-Navarra, 2008; siehe Abbildung 37 im Anhang für eine detaillierte Darstellung des Auftretens extremer Wasserstände zwischen 1970 und 2009).

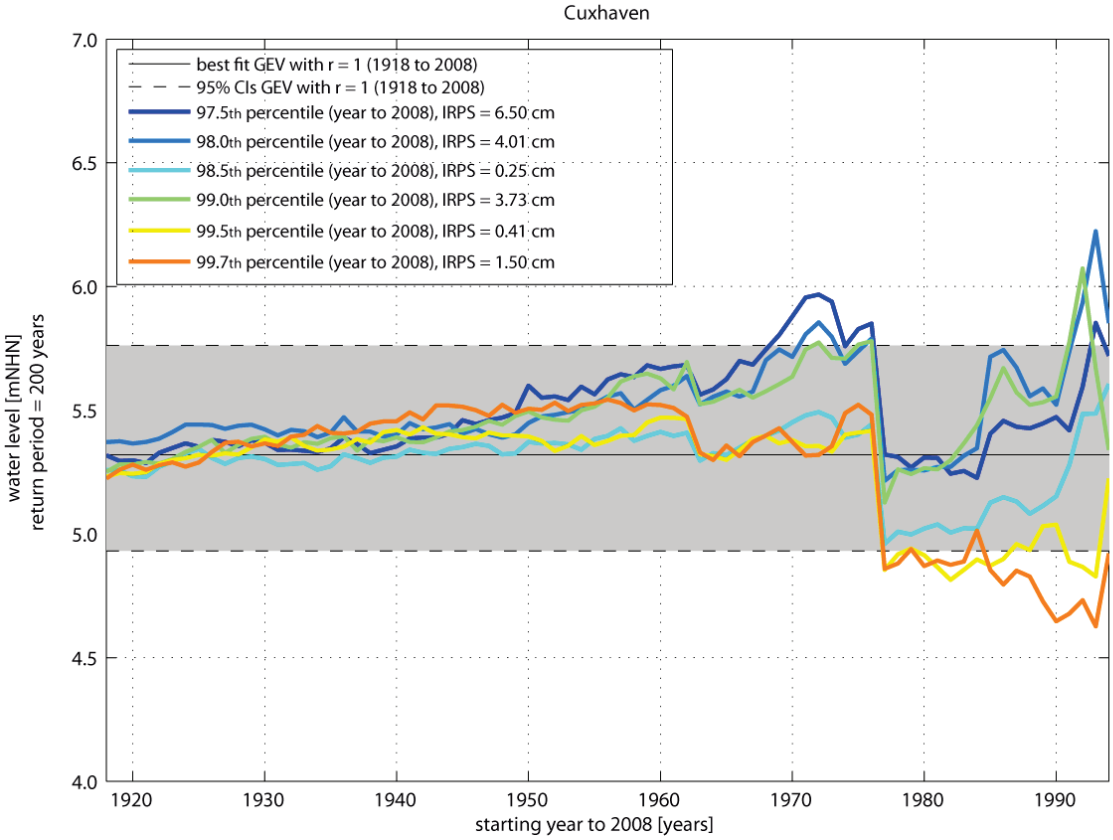


Abbildung 7: Stabilität der GPD Schätzungen unter Verwendung unterschiedlicher Schwellenwerte am Pegel Cuxhaven. Die graue Schattierung zeigt den Bereich der 95% Konfidenzintervalle der GEV.

Um die Performance der verwendeten Verfahren zur Wahl eines Schwellenwertes zu vergleichen, wird im Folgenden der Index of Return Period Stability (IRPS) (siehe Arns et al., 2013) verwendet. Der IRPS ermittelt sich aus dem Produkt der Varianz und der maximalen sowie der mittleren Distanz zu einer Referenzgröße (siehe Abschnitt 5.2), die eine Kurve von Wasserständen definierter Wiederkehrintervalle (siehe die einzelnen Kurven in Abbildung 7) aufweist. Abbildung 8a zeigt den IRPS für alle Standorte gemäß Abbildung 1. Das 99,5- und das 99,7-Perzentil verursachen dabei i. d. R. den kleinsten IRPS und werden daher für die Schwellenwertwahl als geeignet betrachtet. Um dies zu verdeutlichen, wurde in Abbildung 8b der Mittelwert aller IRPS gebildet. Die Abbildung zeigt, dass das 99,7-Perzentil im Mittel an allen Standorten den geringsten IRPS verursacht. Die zweitkleinsten Abweichungen resultieren aus dem 99,5-Perzentil. Für die

untersuchten Pegel bzw. die Deutsche Bucht wird die Verwendung des 99,7-Perzentils daher als bestmöglicher Schwellenwert betrachtet (für mehr Informationen siehe Arns et al., 2013).

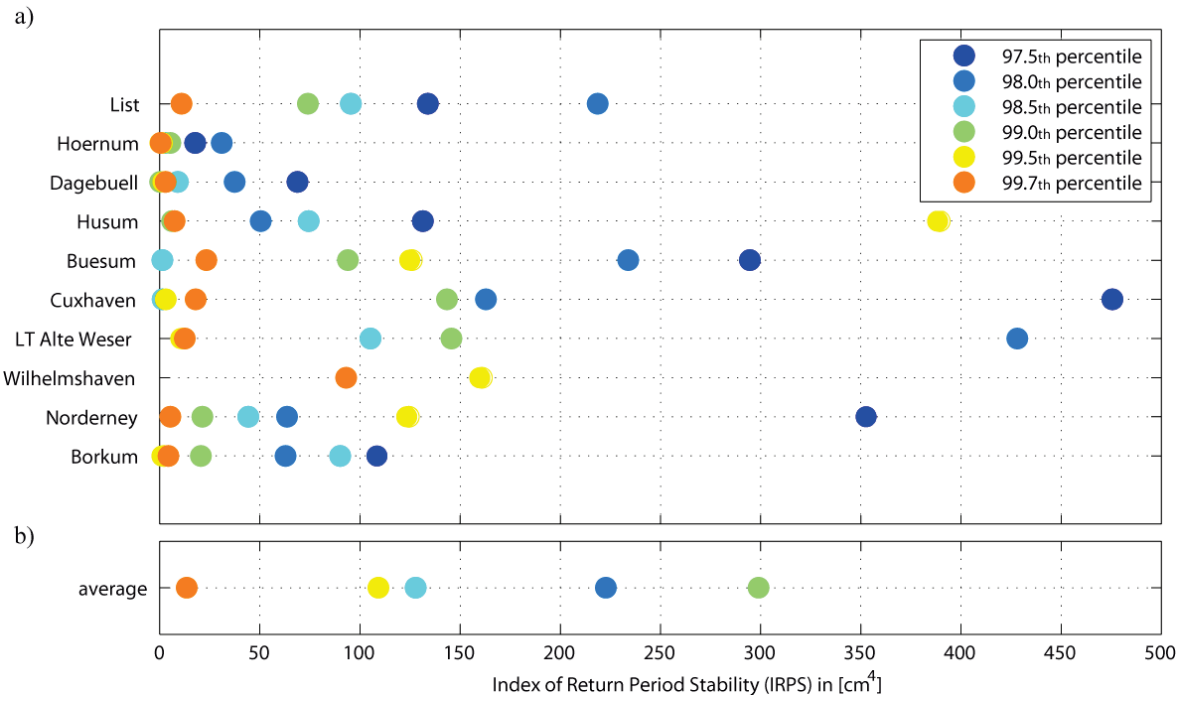


Abbildung 8: (a) IRPS aller Standorte; (b) Mittelwert des IRPS aus allen Standorten.

5.1.3 Declustern

Um den Einfluss des „Declustern“ auf die Abschätzung von Wiederkehrintervallen zu untersuchen, wurden die BM und POT Kollektive mit t_d = 0 bis t_d = 20Tagen „declustert“. Abbildung 5e bis f zeigt die Ergebnisse des „Declustern“ für das Wiederkehrintervall T=200 Jahre. In Abbildung 5e ist der Einfluss des „Declustern“ auf die BM Methode unter Verwendung der r=1 größten Werte eines Jahres (AMAX) dargestellt. Dabei wird deutlich, dass das „Declustern“ bei Verwendung der AMAX-Werte einen geringen Einfluss auf die Wiederkehrintervalle hat. Mit steigenden r-Werten nimmt der Einfluss des „Declustern“ jedoch zu; es kann jedoch kein einheitliches Verhalten bestimmt werden. Der Einfluss des „Declustern“ wurde zudem für alle Wiederkehrintervalle, d. h. die gesamte Kurve, untersucht (Abbildung 5g). Die o. g. Ergebnisse konnte dabei bestätigt werden, d. h. bei kleinen r-Werten hat das „Declustern“ einen geringen Einfluss während dieser Einfluss mit ansteigenden r-Werten zunimmt. In den Abbildung 5f und h werden die zuvor genannten Ergebnisse auch für die POT Methode bestätigt. Unter Verwendung gleicher Kollektivgrößen zeigt sich die POT Methode jedoch robuster gegenüber dem „Declustern“ (für mehr Informationen siehe Arns et al., 2013).

5.2 Verteilung

Nach Hawkes et al. (2008) sollte die Wahl einer geeigneten Verteilung nicht nur mit Hilfe von Goodness of Fit (GOF) Tests, sondern auch über die Robustheit bzw. Stabilität der Anpassung erfolgen. Die Verwendung der GEV und der GPD wird daher hinsichtlich Stabilität untersucht. Die Stabilität beider Verteilungen wird an Kollektiven untersucht, bei denen sukzessive das erste Jahr entfernt wird. Dabei ist das letzte berücksichtigte Jahr 2009, während das Startjahr stetig von 1918 erhöht wird, bis das Kollektiv eine Mindestgröße von 10 Jahren erreicht. Für alle Unterkollektive werden die Wasserstände mit einer Jährlichkeit von T=200 Jahren sowie die zugehörigen Konfidenzintervalle ermittelt. Die BM-Kollektive werden aus den r=1 bis r=6 größten Werten pro Jahr ermittelt; die POT-Kollektive werden mit Hilfe des 99,7-Perzentils erzeugt.

Die Verwendung der GEV mit r=1 Werten/Jahr zeigt ein stabiles Verhalten in den Wasserstandsschätzungen, wenn eine lange Zeitreihe zugrunde gelegt wird. Dieses Verhalten ändert sich ab 1938, wo eine plötzliche Erhöhung der Wasserstandsschätzung eintritt. Danach zeigt die GEV ein instabiles, fluktuierendes Verhalten; dabei treten Erhöhungen um bis zu 0,9 m ein. Ein ähnliches Verhalten kann für die Verwendung von r=2 bis r=6 Werten/Jahr beobachtet werden (siehe Abbildung 9b bis f). Aus diesem Grund wird am Pegel Cuxhaven die Verwendung der BM Methode nur dann empfohlen, wenn Wasserstandsinformationen vorliegen, die mindestens seit 1937 verfügbar sind. Im Folgenden wird die Verwendung der BM Methode aus den r=1 größten Werten pro Jahr zwischen 1918 (alternativ 1937) und 2009 daher als Referenzgröße betrachtet. Vergleicht man die Konfidenzintervalle aus der GEV (siehe die blauen Kurven in Abbildung 9a bis f), dann werden diese mit zunehmender Kollektivgröße kleiner.

Die Mittelwerte der Wasserstandsschätzungen nehmen dagegen mit steigenden r-Werten zu, d. h. bei r=6 Werten/Jahr resultiert die insgesamt höchste Wasserstandsschätzung. Unter der Annahme, dass die AMAX Methode verlässliche Ergebnisse liefert, kann somit angenommen werden, dass die Verwendung von BM Kollektiven mit r>1 Werten/Jahr zu einer Überschätzung von Wasserständen führt. Die GPD zeigt dagegen im Gegensatz zur GEV ein stabileres Verhalten. Dies ändert sich erst im Jahr 1976 (siehe die blauen Kurven in Abbildung 9g). Folglich verursacht die Nichtberücksichtigung des Jahres 1976 (bzw. der Sturmflut) einer Unterschätzung von Wasserständen. Nach 1976 zeigen die Wasserstandsschätzungen der GPD ein stark instabiles Verhalten.

Das Vorhaben „ZukunftHallig“ wurde zwischen 2010 und 2014 durchgeführt. Zu Beginn des Vorhabens standen dabei Wasserstandsinformationen bis 2009 zur Verfügung; diese bilden die Grundlage für einen Großteil der hier durchgeführten Analysen. Kurz vor Ende des Projektes konnte die Zeitreihe am Pegel Cuxhaven um die Jahre 2010 und 2011 ergänzt werden. Unter Verwendung der o. g. Vorgehensweise wurden die bisherigen Ergebnisse auf Plausibilität bzw.

Gültigkeit bei fortgeschriebenen Wasserstandsinformationen untersucht. Die verlängerten Zeitreihen können ebenfalls Abbildung 9 (rote Kurven) entnommen werden. Hierbei zeigt sich, dass die Berücksichtigung neuerlicher Wasserstandsaufzeichnungen bisweilen keine Änderungen in den Wasserstandsschätzungen bewirkt, solange das Jahr 1976 im Kollektiv berücksichtigt wird. Gleichzeitig zeigen die Ergebnisse, dass die Wasserstandszeitreihe am Pegel Cuxhaven, die die Zeitspanne 1976 bis 2009 abdeckt, gegenwärtig lang genug ist, um konsistente und robuste Wasserstandsschätzungen zu erhalten. Die Aussage ist jedoch periodisch bzw. nach stärkeren Sturmfluten zu prüfen.

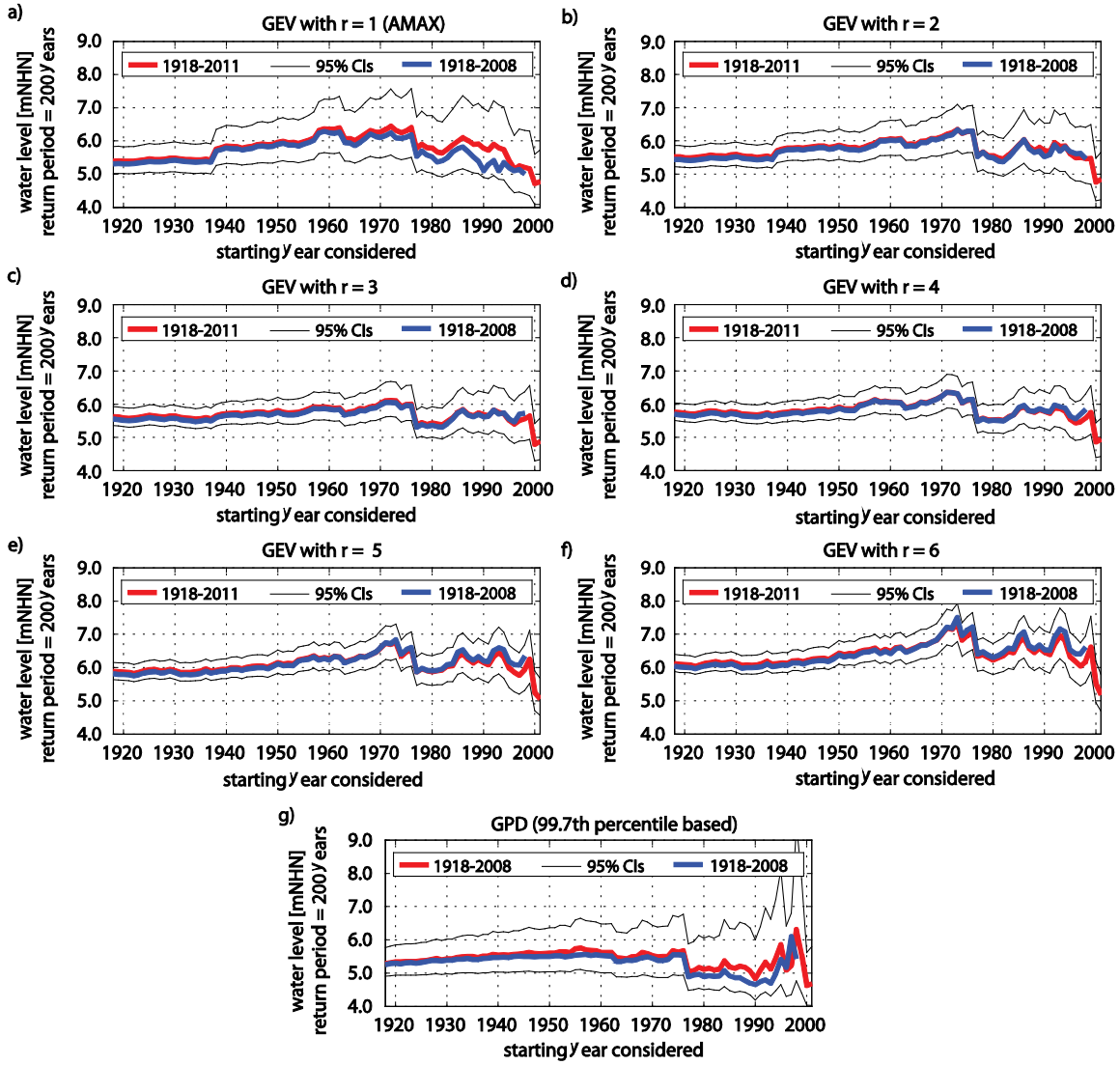


Abbildung 9: (a) - (f) Stabilität der GEV mit r=1 bis r=6 Werten/Jahr; (g) Stabilität der GPD unter Verwendung eines Schwellenwertes von u_0=99,7-Perzentil. Die blaue Linie zeigt die Periode von 1918 bis 2009; die rote Kurve zeigt die Periode von 1918 bis 2011.

6 Übertragbarkeit

Im vorigen Abschnitt wurde gezeigt, dass die GPD am Pegel Cuxhaven stabilere Wasserstandsschätzungen ermöglicht, als die GEV. Um diese Hypothese an anderen Stationen zu validieren, werden im Folgenden 9 weitere Stationen analysiert (siehe Abbildung 1 und Tabelle 1). Die Kollektivbildung sowie die Datenvorverarbeitung (Pre-Processing) erfolgt gemäß Abschnitt 5. In der BM Methode werden die T=200 jährlichen Wasserstände ($P_Ü$=0,05 [1/a]) unter Verwendung von r=1 Werten/Jahr geschätzt. Wie in Abschnitt 5.1.1 erläutert, verursacht die Verwendung der BM Methode mit r>1 Werten/Jahr eine Überschätzung der Wasserstände am Pegel Cuxhaven. Folglich wird auf die Verwendung von r>1 Werten/Jahr verzichtet. Um die Generalität der Ergebnisse aus den Analysen der POT Methode zu prüfen, werden die Kollektive aus den Schwellenwertüberschreitungen des 99,7-Perzentils gebildet.

Abbildung 10 zeigt die Anwendung der GEV bzw. GPD auf die BM- bzw. POT-Kollektive an 9 weiteren Pegelstationen (siehe Abbildung 10). An allen deutschen Pegelstationen (Abbildung 10a bis j) zeigt die GPD ein stabileres Verhalten als die GEV. Lediglich an den Pegeln Norderney und Borkum (Abbildung 10i und j) weisen die Wasserstandsschätzungen mittels GPD ab ca. 1960 eine leicht abnehmende Tendenz um bis zu 0,1 m auf.

Im Vergleich zu den Schwankungen der GEV (bis zu 1,0 m) ist diese Abnahme jedoch vernachlässigbar. Wie bereits am Pegel Cuxhaven, zeigen alle betrachteten Standorte bis 1938 ein hohes Maß an Übereinstimmung zwischen den GEV und den GPD basierten Wasserstandsschätzungen. Danach beginnen auch hier die GEV basierten Schätzungen zu fluktuieren, wodurch z. T. große Differenzen zwischen den Schätzungen der GEV und der GPD resultieren. Die Ergebnisse aus Abschnitt 5 am Pegel Cuxhaven können somit für alle betrachteten Stationen in der Deutschen Bucht bestätigt werden.

Um die Stabilität der untersuchten Methoden objektiv zu beurteilen, wird im Folgenden der IRPS (vgl. Abschnitt 5.1.2) verwendet. Abbildung 11 zeigt den IRPS für die GEV unter Verwendung von r=1 Wert/Jahr (rote Punkte) sowie für die GPD auf Basis des 99,7-Perzentils (blaue Punkte) an allen betrachteten Standorten. Dabei ist der IRPS der GPD generell niedriger als der IRPS der GEV, d. h. die Wasserstandsschätzung mittels GPD weist geringere Abweichungen zur Referenzgröße auf als die Schätzung mit Hilfe der GEV.

Die mittleren IRPS Werte (*average*, siehe Abbildung 11 unten) bestätigen das Ergebnis der Einzelstationen. Jedoch sind die mittleren Werte maßgeblich durch den starken Einfluss am Pegel Wilhelmshaven beeinflusst. In Wilhelmshaven führt die GEV insgesamt zu starken Fluktuationen, die durch einen sehr großen IRPS Wert gekennzeichnet sind ($GEV_{IRPS} = 7{,}36 \times 10^7$, $GPD_{IRPS} = 1{,}74 \times 10^5$). Extrahiert man diesen Pegel aus der Mittelwertbildung, sinken die IRPS der

GEV (von $GEV_{IRPS} = 6{,}20 \times 10^6$ auf $GEV_{IRPS} = 1{,}01 \times 10^6$) sowie der GPD (von $GPD_{IRPS} = 2.67 \times 10^4$ auf $GPD_{IRPS} = 1.54 \times 10^4$) sichtlich ab. Dabei zeigt die GPD jedoch insgesamt deutlich geringere Werte als die GEV, d. h. die GPS ist in allen betrachteten Fällen stabiler.

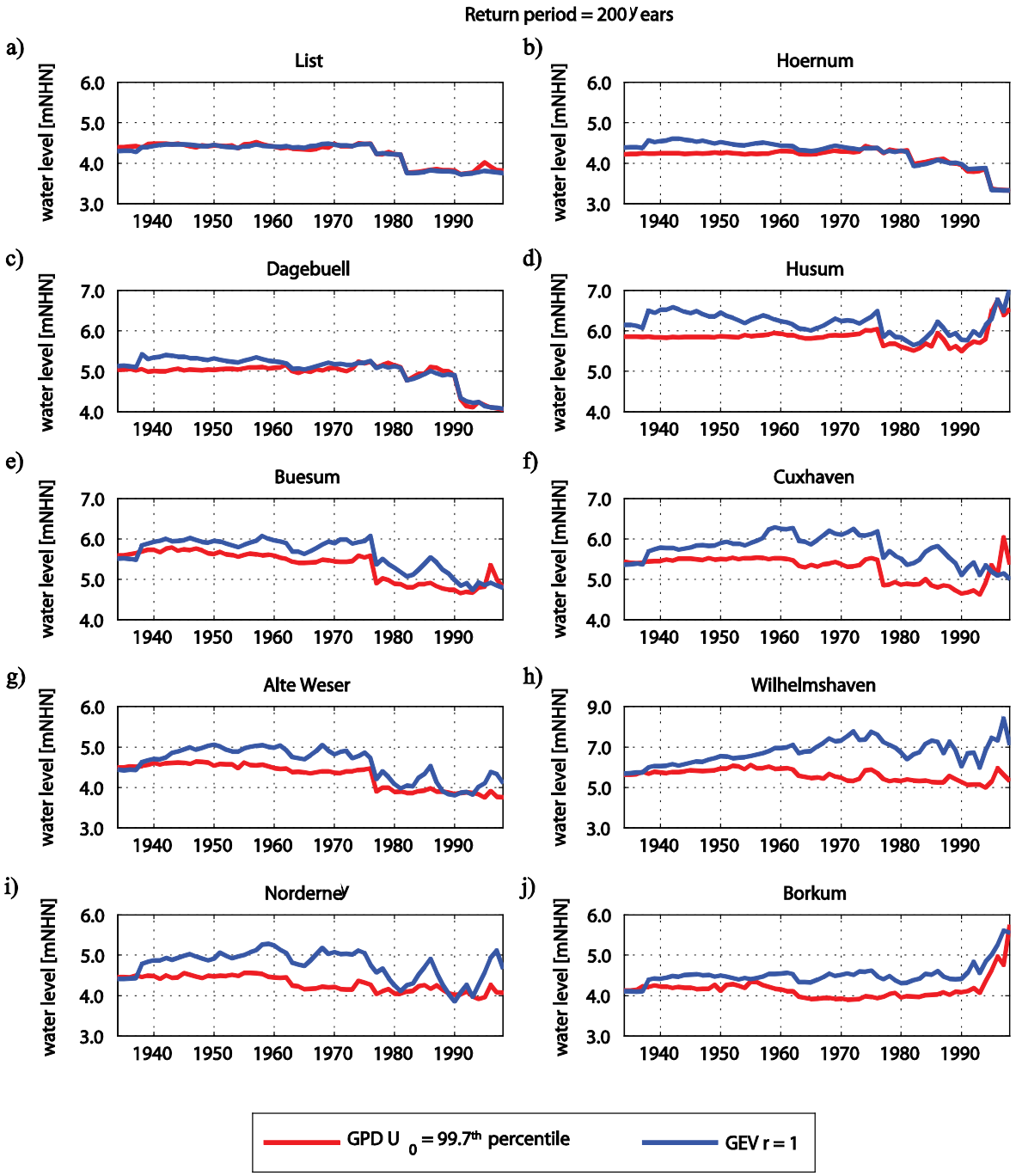


Abbildung 10: Ergebnisse der GEV mit r=1 Werten/Jahr (blau) und der GPD mit einem Schwellenwert von u_0=99,7-Perzentil an allen 10 Stationen.

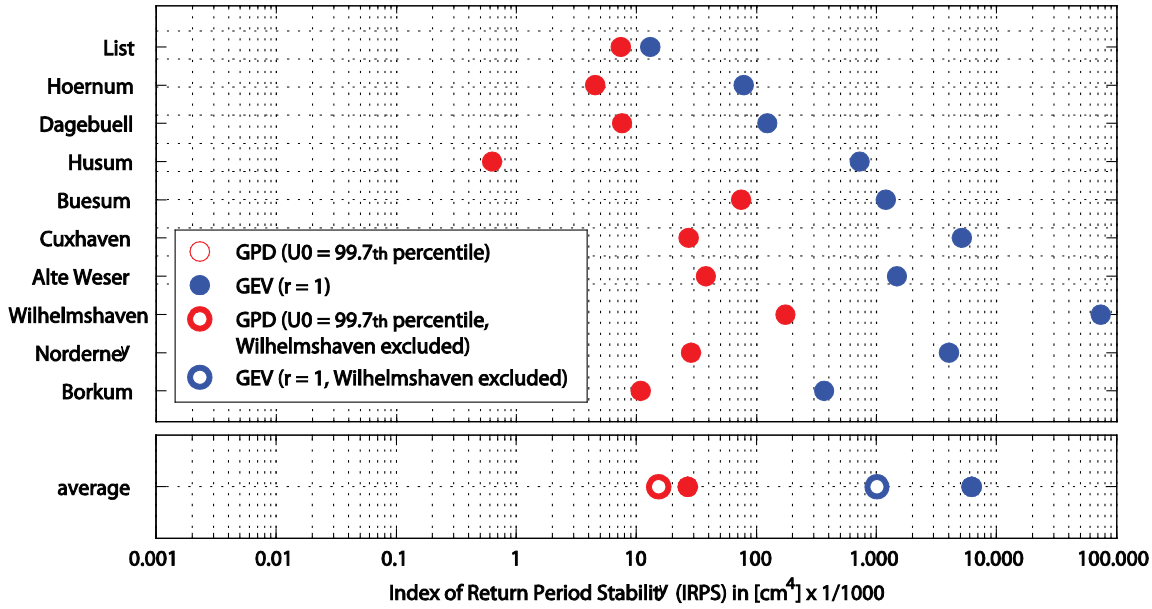


Abbildung 11: IRPS aller 10 Pegel nach Tabelle 1; die Berechnungen basieren auf den Linien aus Abbildung 10.

7 Empfehlungen zur Ermittlung extremer Wasserstände

Im Rahmen umfassender Analysen wurde die Eignung der beiden primär verwendeten direkten Verfahren (d. h. die Block Maxima und die Peak Over Threshold Methode) zur Ermittlung extremer Wasserstände untersucht. Durch Sensitivitätstests konnte eine optimale und konsistente Vorgehensweise erarbeitet werden. Wird diese Vorgehensweise konsequent angewendet, lassen sich hierdurch vergleichbare und vor allem objektive Resultate bei extremwertstatistischen Analysen erzielen. Zusammenfassend lassen sich aus den vorangegangenen Kapiteln folgende Empfehlungen (siehe Abbildung 12) für extremwertstatistische Analysen von Wasserständen ableiten:

- *Verwenden Sie eine Thw-Scheitelzeitreihe die im Jahr 1976 oder früher startet.*
- *Korrigieren Sie die Trends der Hochwasserscheitel mit Hilfe eines 1-jährigen gleitenden Mittelwertes.*
- *Verwenden Sie alle Scheitelwerte, die das 99,7-Perzentil der Thw überschreiten.*
- *Declustern Sie das Kollektiv mit Hilfe des Extremal Index.*
- *Passen Sie die GPD an das Kollektiv an.*

Diese Empfehlungen gelten bisweilen nur für die betrachteten Pegel. Da diese große Teile der Deutschen Bucht abdecken, wird angenommen, dass die Empfehlungen in der gesamten Deutschen Bucht anwendbar sind. Darüber hinaus wurden die Empfehlungen an internationalen Stationen aus Australien, England sowie Norwegen (siehe hierzu Arns et al., 2013) validiert.

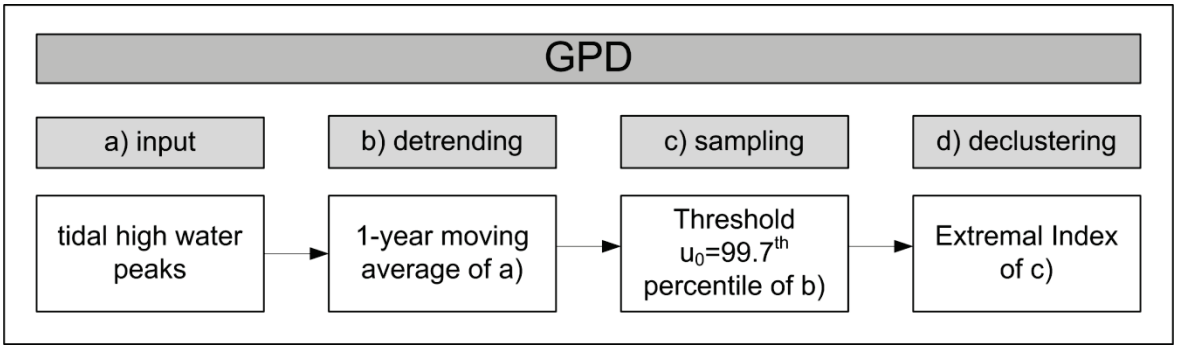


Abbildung 12: Empfehlungen zur Durchführung extremwertstatistischer Analysen in der Deutschen Bucht.

B. Kollektiverweiterung

8 Motivation

Bei der Nordsee handelt es sich um ein relativ flaches Randmeer, dessen Tide durch Schwingungen des Nordatlantiks angeregt wird. Innerhalb der Nordsee bewirken unterschiedliche Einflüsse eine Deformation der Tide. So wird die Tide z. B. im Schelf- und Küstenbereich durch komplexe Küstenlinien, Flachwassereffekte (insb. im Watt) sowie Reibungseinflüsse beeinflusst und gedämpft (siehe z. B. Gönnert et al., 2004; Jensen & Müller-Navarra, 2008; Arns et al., in revison). Diese nichtlinearen dynamischen Effekte verursachen teils starke Diskrepanzen in den Wasserstandsverläufen unterschiedlicher Standorte. Zudem sind die Wasserstände in der Deutschen Bucht stark meteorologisch (d. h. stochastisch) geprägt (siehe z. B. Siefert, 1968; Lassen et al., 2001; Gönnert, 2003; Dangendorf et al., 2012, 2013). Hieraus resultieren nichtlineare Interaktionen zwischen der astronomisch induzierten Tide und Surge (meteorologische Einflüsse wie Windstau und Fernwellen), siehe z. B. Horsburgh & Wilson (2007), Rego & Li (2010), Gönnert et al. (2010). Aufgrund der o. g. Effekte ist eine lineare Übertragung der Wasserstände von bepegelten zu unbepegelten Standorten nicht ohne weiteres möglich. Im Küsteningenieurwesen liefern Pegelmessungen, die eine ausreichend lange Zeitspanne abdecken daher immer noch die bestmögliche Basis für die statistische Ermittlung örtlich diskreter, extremer Wasserstände (Batstone, 2013). In unbepegelten Bereichen ist diese Aufgabe dagegen ungleich schwieriger.

In der Hydrologie hat sich im Falle limitierter Informationen das Konzept der Regionalisierung etabliert. Dabei wird angenommen, dass Einzugsgebiete mit vergleichbaren Gebietseigenschaften auch eine hydrologische Ähnlichkeit haben (Merz & Blöschl, 2005). Aufgrund des lokalen Charakters der nichtlinearen Tidebeeinflussungen kann diese Methodik jedoch nicht ohne Weiteres auf küstenhydrologische Zeitreihen (zumindest in der Deutschen Bucht) übertragen werden. Vielmehr muss ein Ansatz verwendet werden, der dem nichtlinearen dynamischen Charakter Rechnung trägt. In ZukunftHallig A wurde daher eine Methodik zur Regionalisierung extremer Wasserstände in unbepegelten Küstengebieten am Beispiel der Schleswig-Holsteinischen Halligen entwickelt. In dem Ansatz werden numerische Modellsimulationen, Biaskorrekturverfahren und optimierte Vorgehensweisen zur Ermittlung von Eintrittswahrscheinlichkeiten extremer Wasserstände vereint.

9 Regionalisierung

Die Datenverfügbarkeit ist ein zentraler Aspekt extremwertstatistischer Analysen. So basiert die Ermittlung der Überschreitungswahrscheinlichkeit $P_Ü$ [1/a] extremer Ereignisse auf einer limitierten Stichprobe der Grundgesamtheit. Dabei gilt, je größer die Stichprobe, desto besser lassen sich hierdurch die Charakteristika der Grundgesamtheit beschreiben. Die Verwendung sehr kleiner Stichproben führt dagegen zu fehlerhaften Parameterschätzungen und unrealistischen Überschreitungswahrscheinlichkeiten (Rao & Hamed, 2000). Da hydrologische Informationen (Beobachtungen) in der Praxis oftmals zeitlich und räumlich limitiert sind, wurden für hydrologische Aufgaben diverse Methoden entwickelt, die eine indirekte Bestimmung der gesuchten Kenngrößen ermöglichen, die sogenannte Regionalisierung. Dieser Begriff beschreibt Verfahren zur Kompensation des Informationsdefizites individueller Standorte (Stedinger et al., 1993). Eine ausführliche Definition der Regionalisierung findet sich in Becker (1992): *„Regionalisierung ist die regionale Übertragung oder flächenmäßige Verallgemeinerung (Generalisierung) einer Größe oder einer Funktion (dieses Modells) bzw. der Parameter dieser Funktion (dieses Modells)“*.

Die Regionalisierung verfolgt je nach Anwendungsfall zwei wesentliche Ziele: (a) die zeitliche und (b) die räumliche Informationserweiterung. Im Falle (a) zeitlich limitierter Informationen dient die Regionalisierung zur Informationserweiterung in beobachteten Gebieten. Die kausale Informationserweiterung erfolgt z. B. durch die Zusammenlegung einzelner Kollektive einer homogenen Gruppe. Bei dieser Form der Regionalisierung erfolgt somit eine Substitution zwischen räumlichen- und zeitlichen Informationen, wodurch sich die Parameter der theoretischen Verteilung zur approximativen Beschreibung der Grundgesamtheit stabiler schätzen lassen. Im Falle von (b) räumlich limitierten Informationen dient die Regionalisierung zur Beschaffung von Informationen in unbeobachteten Gebieten, d. h. im Untersuchungsgebiet existieren keine direkten Messungen der zu untersuchenden Größe. In diesem Fall können die gesuchten Größen, aus den Beziehungen zu diversen Einzugsgebietscharakteristiken ermittelt werden (Merz, 2006). Mit Hilfe von Ähnlichkeitskriterien wird dabei festgelegt, welche Information vom Referenzgebiet zum Untersuchungsstandort übertragen wird (Merz & Blöschl, 2005). Die Güte der Regionalisierung wird dabei sowohl von der Genauigkeit der innerhalb des beobachteten Gebietes ermittelten Kenngrößen sowie der räumlichen Übertragung der Kenngrößen bestimmt.

Das meistgenutzte Regionalisierungsverfahren ist die Index-Flood Methode nach Dalrymple (1960). In einer homogenen Region weisen die hydrologischen Kollektive N an den unterschiedlichen Standorten nahezu identische Verteilungen auf (Rao und Hamed, 2000); die Verteilungen der Einzelstandorte unterscheiden sich im Wesentlichen nur durch die sogenannte Index-Flood (Skalierungsfaktor, z. B. mittleres Hochwasser). Der gesuchte Wert ergibt sich durch

die Multiplikation der regionalen Verteilung („growth curve“) mit der Index-Flood. Die Ermittlung homogener Regionen erfolgt mit Hilfe von Homogenitätstests (Dalrymple, 1960). In der Regionalisierung kommen hierfür diverse Verfahren wie z. B. discordancy measure (siehe z. B. Rao und Hamed, 2000), heterogeneity measure (siehe Hosking & Wallis, 1993) und Wiltshire Method (Wiltshire, 1986) zum Einsatz. In der Deutschen Bucht konnten mit Hilfe dieser Verfahren zwei unterschiedliche homogene Regionen identifiziert werden. Region I umfasst insgesamt 11 Stationen (siehe Tabelle 1; Pegel Nr. 6-16) während Region II lediglich 4 Stationen vereint (siehe Tabelle 1; Pegel Nr. 17-20). Dabei tendieren Küstenpegel eher in Region I während Inselpegel (weniger flachwasserbeeinflusst) in Region II zusammengefasst sind. Ein eindeutiges, objektives Kriterium (Ähnlichkeitskriterium) konnte aus dieser Klassifizierung jedoch nicht abgeleitet werden, d. h. es existiert keine klare Abhängigkeit zwischen den Charakteristika des Standortes und der Region.

Für beide Regionen wurden regionale Verteilungen generiert und gemäß Index-Flood Methode mit den Mittelwerten der Wasserstandsverteilung eines jeden Standortes multipliziert. Zum direkten Vergleich zeigt Abbildung 2 die Differenzen zwischen den Wiederkehrintervallen aus Regionalisierung und Pegelstatistik. Dabei überschätzt die Index-Flood Methode extreme Wasserstände über alle Standorte mit einem mittleren quadratischen Fehler (RMSE) von ca. 10 cm. Landesschutzdeiche in Schleswig-Holstein werden auf Wiederkehrintervalle von T=200 Jahren bemessen. Bei diesem Wiederkehrintervall weisen die aus den regionalen Verteilungen abgeleiteten Wiederkehrintervalle („best fit“) Abweichungen zwischen -5 cm (z. B. Wittdün) und +35 cm (z. B. Husum, Büsum) auf, in höheren Wiederkehrintervallen sogar um bis zu 60 cm (z. B. Büsum). Im Hinblick auf Bemessungsaufgaben bedeutet diese Abweichung eine Überschätzung der erforderlichen Schutzhöhen. Auch wenn diese Überschätzung im Rahmen einer konservativen Betrachtung toleriert wird, stellt sich trotz allem die Frage, welches objektive Kriterium zur Beschreibung der Regionszugehörigkeit eines Standortes verwendet werden kann?

Die Regionalisierung wurde primär für den Einsatz im Binnenbereich entwickelt und angewendet. Mangels objektiver, eindeutiger Ähnlichkeitskriterien ist die Regionalisierung von Wasserständen im Küstenbereich somit nur bedingt durchführbar. Zwar weisen die Wasserstandsmessungen an unterschiedlichen Standorten in der Deutschen Bucht im Mittel insgesamt eine hohe Korrelation auf, jedoch zeigen die Scheitelwasserstände (insbesondere bei Sturmfluten) teils deutliche Unterschiede. Verursacht werden diese Unterschiede durch komplexe Vorgänge wie Flachwassereffekte, verzweigte Küstenlinien und Reibungseinflüsse. Bezogen auf Fall (a) verursacht eine einfache Übertragung der Informationen eines Standortes auf angrenzende Bereiche somit einen Bias in den Verteilungen der Wasserstände, insbesondere der Thw. Im Hinblick auf Fall (b) lassen sich für die Pegelstandorte keine abgeschlossenen Einheiten (Einzugsgebiete) definieren, d. h. die Identifikation homogener Regionen kann lediglich auf

Pegelbasis stattfinden. Um Analysen an Pegelstandorten mit kurzen Zeitreihen bzw. an unbepegelten Standorten durchführen zu können, werden daher Regionalisierungsverfahren benötigt, die der komplexen Interaktion im Küstenvorfeld Rechnung tragen. Da wesentliche, nichtlineare Effekte nach wie vor nur unzureichend analytisch beschrieben werden können, basiert die hier verwendete Regionalisierung auf numerisch generierten Wasserständen. Hierdurch lassen sich insbesondere die lokalen geometrischen Einflüsse erfassen.

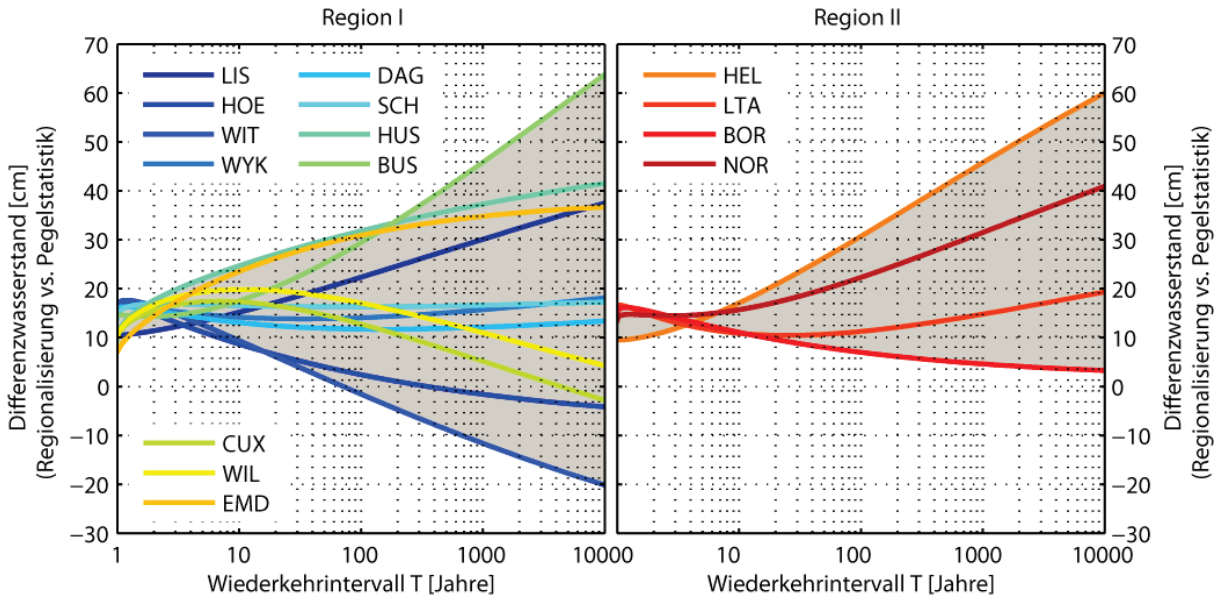


Abbildung 13: Differenzwasserstände aller Wiederkehrintervalle zwischen T=1 und T=10.000 Jahren aus Regionalisierung und Pegelstatistik in Region I (links) und Region II (rechts).

10 Informationserweiterung

10.1 Modellaufbau

Unter Einsatz der Software MIKE21 (DHI) wurde ein zweidimensionales, tiefenintegriertes barotropes Gezeitenmodell der Nordsee (Regionen II und III gemäß OSPAR-Konvention (http://www.ospar.org/)) erstellt. Die Berechnung erfolgt an einem unstrukturierten Rechengitter, welches entsprechend Abbildung 3 innerhalb des vom National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) bereitgestellten Küstenverlaufes konfiguriert wurde (http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/coast/). Dabei wurde der mittlere Punkteabstand des Küstenverlaufes an den offenen Rändern auf 30 km und im Bereich der nördlichen- und südlichen Festlandküste auf 10 km skaliert. Der zwischen den nördlichsten- und südlichsten Punkten liegende Bereich der Festlandküste (Skandinavien, Niederlande, Belgien, Frankreich) wurde auf eine

sukzessive abnehmende Punktweite interpoliert, die im Bereich der Deutschen Bucht eine Auflösung von 1 km erreicht. Die resultierenden Zellgrößen betragen im primären Untersuchungsbereich, d. h. einem ca. 30 km breiten Küstenstreifen entlang der Schleswig-Holsteinischen Küste, etwa 0,5 km². Hieraus resultieren insgesamt ca. 40.000 Elemente.

Die Tiefeninformationen (Bathymetrien) des Modells entstammen unterschiedlichen Quellen und wurden innerhalb des Modells kombiniert. Im Bereich Schleswig-Holsteins wurden aktuell verfügbare Seegrundkarten des Bundesamts für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) und Wattgrundkarten des Landesbetriebs für Küstenschutz, Nationalpark und Meeresschutz Schleswig-Holstein (LKN-SH) mit einem mittleren Punkteabstand von ca. 15 m zusammengefügt. Für den verbleibenden Bereich der Deutschen Bucht wurden vom BSH erstellte Bathymetrien mit einer Auflösung von 1 Seemeile verwendet. Außerhalb der Deutschen Bucht wurden GEBCO-Bathymetrien (General Bathymetric Chart of the Oceans) vom British Oceanographic Data Centre (BODC) mit einer Auflösung von 0,5° (~56 km) verwendet.

Um die Interaktion zwischen den Halligen und den Strömungen bzw. Wasserständen zu erfassen, wurde zudem ein Digitales Geländemodell der Halligen (LKN-SH) mit einer Auflösung von 1 m (DGM1) in die gesamt Bathymetrie mit aufgenommen. Während die vom LKN-SH und vom BSH bereitgestellten Daten den gleichen Bezugshorizont aufwiesen (NHN), basierten die GEBCO-Daten auf dem Bezugsniveau „Global Mean Sea Level“; exakte Höheninformationen lassen sich hieraus jedoch nicht ableiten. Zur Ermittlung der relativen Höhenlage zwischen der GEBCO-Bathymetrie und der LKN-SH bzw. der BSH-Bathymetrie wurden die Höhenwerte der GEBCO-Bathymetrie sukzessive in 10 cm Schritten erhöht. Die höhenmäßig angepasste GEBCO-Bathymetrie, sowie die beiden auf NHN bezogenen Bathymetrien wurden auf die zuvor erstellten Elemente des Rechengitters interpoliert. Jedes daraus resultierende Rechengitter wurde als Basis zur Simulation des Kalibrierungsereignisses, der Allerheiligenflut am 01.11.2006, verwendet. Hierdurch konnte diejenige Höhenanpassung ermittelt werden, die zur geringsten Abweichung zwischen den Modellrechnungen und den Beobachtungsdaten an den Referenzstandorten nach Tabelle 1 führte. Für die Deutsche Bucht wurde auf diese Weise ein Höhenversatz von 1,20 m zwischen der GEBCO-Bathymetrie und der LKN-SH bzw. der BSH-Bathymetrie ermittelt.

Um diese aufwändige Prozedur zu umgehen, stehen außerhalb des primären Untersuchungsgebietes (GEBCO und BSH) mittlerweile bereits zusammengesetzte Bathymetrien der gesamten Nordsee aus dem EU-geförderten Projekt EMODnet (http://www.emodnet-hydrography.eu/) mit einer Auflösung von 0,25‘ (~460 m) frei zur Verfügung; diese könnten zukünftig alternativ verwendet werden Im Modell wurden keine zeitlichen Änderungen in den Bathymetrien berücksichtigt, d. h. zwischen 1970 und 2009 wurde mit einer stationären Bathymetrie gerechnet. Wasserstandsbeeinflussungen infolge morphologischer Änderungen

bleiben somit unberücksichtigt. Alternativ könnten hierfür jedoch dynamische Bathymetrien (z. B. der Deutschen Bucht aus dem KFKI-Projekt AufMod) verwendet werden.

Als dynamische Randbedingung wurden an den offenen Modellrändern (siehe rot-blau gestrichelte Linien in Abbildung 3) astronomische Tidezeitreihen eingesteuert. Die astronomischen Tiden wurden mit Hilfe eines in MIKE21 (DHI) integrierten globalen Tidemodells generiert, welches die acht primären Partialtiden (K1, O1, P1, Q1, M2, S2, N2 und K2) berücksichtigt (siehe z. B. Andersen, 1995).

Der meteorologische Modellantrieb erfolgte unter Verwendung von Wind- und Druckfeldern aus dem CIRES 20th Century Reanalysis V2 Project (Compo et al., 2011) des Earth System Research Laboratory der US National Oceanic & Atmospheric Administration (NOAA). Die verwendeten Windfelder beschreiben die meridionalen und zonalen Windgeschwindigkeiten in einer Höhe von 10 m über den Gitterpunkten (bzw. MSL); die Werte sind in einer räumlichen Auflösung von zwei Grad (Gauß-Krüger-Koordinaten) und einer zeitlichen Auflösung von 3 Stunden (0:00 bis 21:00 Uhr) verfügbar. Die atmosphärischen Druckfelder weisen die gleiche räumliche- und zeitliche Auflösung auf, haben jedoch das Bezugsniveau MSL.

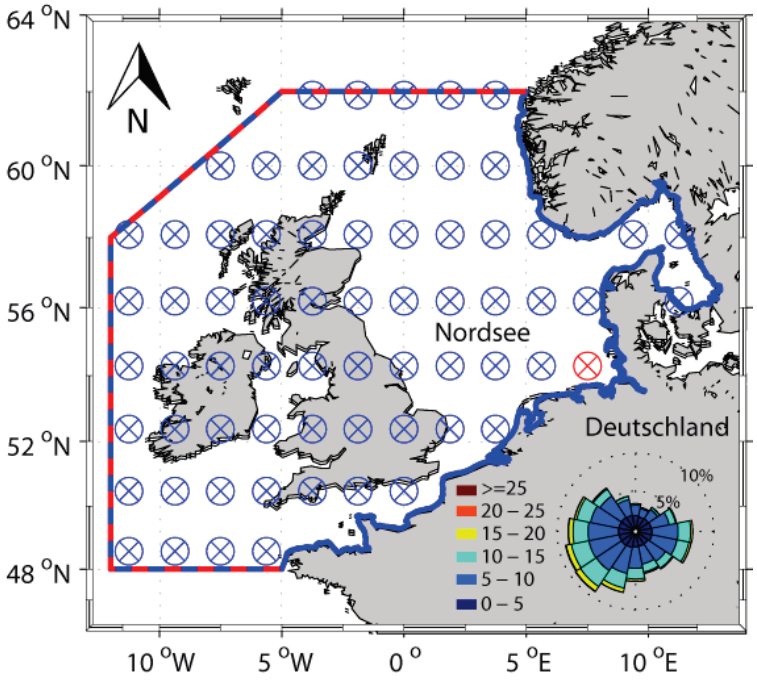


Abbildung 14: Grid Punkte des meteorologischen Modellantriebs (blaue Kreise) im Modellbereich (blaue Linie). Im rechten unteren Bereich der Abbildung ist eine Windrose aller Winde [m/s] zwischen 1970 und 2009 an dem der Deutschen Bucht nächstgelegenen Grid Punkt (roter Punkt) dargestellt. Am linken Bildrand ist die offene Berandung des Modells (rot-blau gestrichelte Linie) dargestellt.

Die Entwicklung des mittleren Meeresspiegels wurde unter Verwendung der von Wahl et al. (2013) generierten Indexzeitreihe für die gesamte Nordsee, bestehend aus den Zeitreihen von insgesamt 30 Nordseeanrainer-Standorten, berücksichtigt. Ausgehend von 2009 wurde der mittlere Meeresspiegel an den Modellrändern durch die Jahresmittelwerte der Indexzeitreihe rücklaufend korrigiert. Die Rauheiten des Modells wurden im gesamten Modellbereich mit $k_{st} = 45\, m^{1/3}/s$ vereinfacht als konstant angenommen; der Wert wurde im Rahmen der Kalibrierung als geeignet nachgewiesen (siehe hierzu Abschnitt. 10.2). Mit Hilfe des oben beschriebenen Modells wurde ein 40 Jahre „Hindcast“ für die Zeitspanne 1970 und 2009 durchgeführt. Jedes Einzeljahr wurde separat mit einer Aufwärmphase (zur Berücksichtigung der Einschwingzeit der Tide und Windstauentwicklung) von drei Tagen, d. h. ab dem 29.12. eines jeden Jahres, berechnet. Ein Test mit längerer Aufwärmzeit ist erfolgt, brachte jedoch keine Änderung in den Wasserständen. Die Berechnungsergebnisse wurden alle 10 Minuten in einem Abstand von 1000 m entlang der gesamten Deutschen Bucht ausgelesen.

10.2 Kalibrierung

Die Kalibrierung des Modells wurde auf Basis von Pegelaufzeichnungen an verschiedenen Standorten während der Allerheiligenflut 2006 (01.11.2006) durchgeführt. Hierzu wurden die dem Modell zugrunde liegenden Rauheitsbeiwerte schrittweise variiert. Dabei müssen die für die Kalibrierung verwendeten Parameter nach DVWK (1999) zahlenmäßig in einem physikalisch sinnvollen Bereich liegen. Zur Beurteilung der Anpassungsgüte jeder schrittweisen Veränderung des k_{st}-Wertes wurden unterschiedliche Effizienzkriterien verwendet. In Krause et al. (2005) werden Effizienzkriterien im Kontext hydrologischer Modellierungen untersucht und empfohlen. Auf Basis dieser Untersuchungen wurden für die vorliegenden Auswertungen der *Determinationskoeffizient r²* und der *Index of Agreement d* zur Beurteilung der Anpassungsgüte ausgewählt. Der *Determinationskoeffizient r²* (auch bekannt als *Bestimmtheitsmaß*) beschreibt das quadrierte Verhältnis der *Pearson-Korrelation* aus *n* beobachteten (*Wb)* und modellierten (*Wm)* Wasserständen und errechnet sich nach:

$$r^2 = \left\{ \sum_{i=1}^{n} (Wm_i - \overline{Wm})(Wb_i - \overline{Wb}) \Big/ \left(\sqrt{\sum_{i=1}^{n} (Wb_i - Wb)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^{n} (Wm_i - \overline{Wm})^2} \right) \right\}^2 ,$$

Formel 10.1

mit den Mittelwerten $\overline{Wb}$ bzw. $\overline{Wm}$ und $0 \leq r^2 \leq 1$. Dabei bedeutet $r^2 = 0$, dass keine Korrelation zwischen *Wb* und *Wm* vorliegt während $r^2 = 1$ bedeutet, dass die Streuungen von *Wb* und *Wm*

identisch sind. Der *Index of Agreement d* nach Willmot (1981) beschreibt das Verhältnis des RMSE (*engl. Root Mean Squared Error*, mittlerer quadratischer Fehler) zum potentiellen Fehler nach:

$$d = 1 - \sum_{i=1}^{n} |Wb_i - Wm_i|^2 \Big/ \sum_{i=1}^{n} \left(\left|Wm_i - \overline{Wb}\right| + \left|Wb_i - \overline{Wb}\right|\right)^2 \quad . \qquad \text{Formel 10.2}$$

Die Spanne der möglichen Werte entspricht der des *Determinationskoeffizienten r²*. Zusätzlich wurde für die vorliegende Untersuchung die Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers (RMSE) nach:

$$RMSE = \sqrt{1/n \sum_{i=1}^{n} (Wb(i) - Wm(i))^2} \quad . \qquad \text{Formel 10.3}$$

berechnet. Dabei entspricht *n* der Anzahl der Einzelwerte, *Wb* dem beobachteten Wasserstand am Pegel und *Wm* dem modellgenerierten Wasserstand.

Die Rauheiten wurden vereinfacht global angesetzt, d. h. innerhalb des Modells wurde keine weitere Differenzierung einzelner Rauheitsbereiche vorgenommen. Die Spanne der Resultate infolge der k_{st}-Änderung ist in Abbildung 15 (graue Kurven) dargestellt. Die schwarze Kurve entspricht der Wasserstandsmessung am betrachteten Standort; die rote Kurve zeigt den resultierenden Wasserstandsverlauf, der gemäß Effizienzkriterien zur besten Übereinstimmung zwischen *Wb* und *Wm* geführt hat. Aus diesem Vorgehen ergibt sich ein globaler Rauheitsbeiwert von $k_{st} = 45\, m^{1/3}/s$; der Wert entspricht einem d90 (Korn) von ~30 mm, d. h. Kies. Im Kontext des Modells scheint dieser k_{st}-Wert etwas zu niedrig (d. h. zu rau), kompensiert jedoch vermutlich Unzulänglichkeiten der Bathymetrie. Unter Verwendung der EMODnet (s. o.) Daten kann dies in zukünftigen Modellstudien möglicherweise angepasst werden. Die Rauheit wurde für den gesamten Wasserstands-Hindcast als konstant angenommen. Darüber hinaus wurden im Vorfeld diverse Kalibrierungsläufe unter Berücksichtigung differenzierter Rauheitsbereiche durchgeführt. Die Resultate zeigten dabei insgesamt jedoch stärkere Abweichungen. Im Rahmen dieser Kalibrierungsläufe konnten bisweilen keine zufriedenstellenden Resultate erzielt werden.

Die Effizienzkriterien der bestmöglichen Anpassung, die im Zuge der Kalibrierung erreicht wurden, sind in Tabelle 3 zusammengestellt. Die insgesamt beste Anpassung konnte an den britischen Stationen erreicht werden. Im Bereich der deutschen Stationen ergeben sich etwas größere Abweichungen (u.a. die höheren Scheitelwerte in Cuxhaven und Norderney, vgl. Abbildung 15). Diese sind vermutlich auf den größeren Flachwassereinfluss im Bereich der Deutschen Bucht sowie die gewählte Sohlrauheit zurückzuführen.

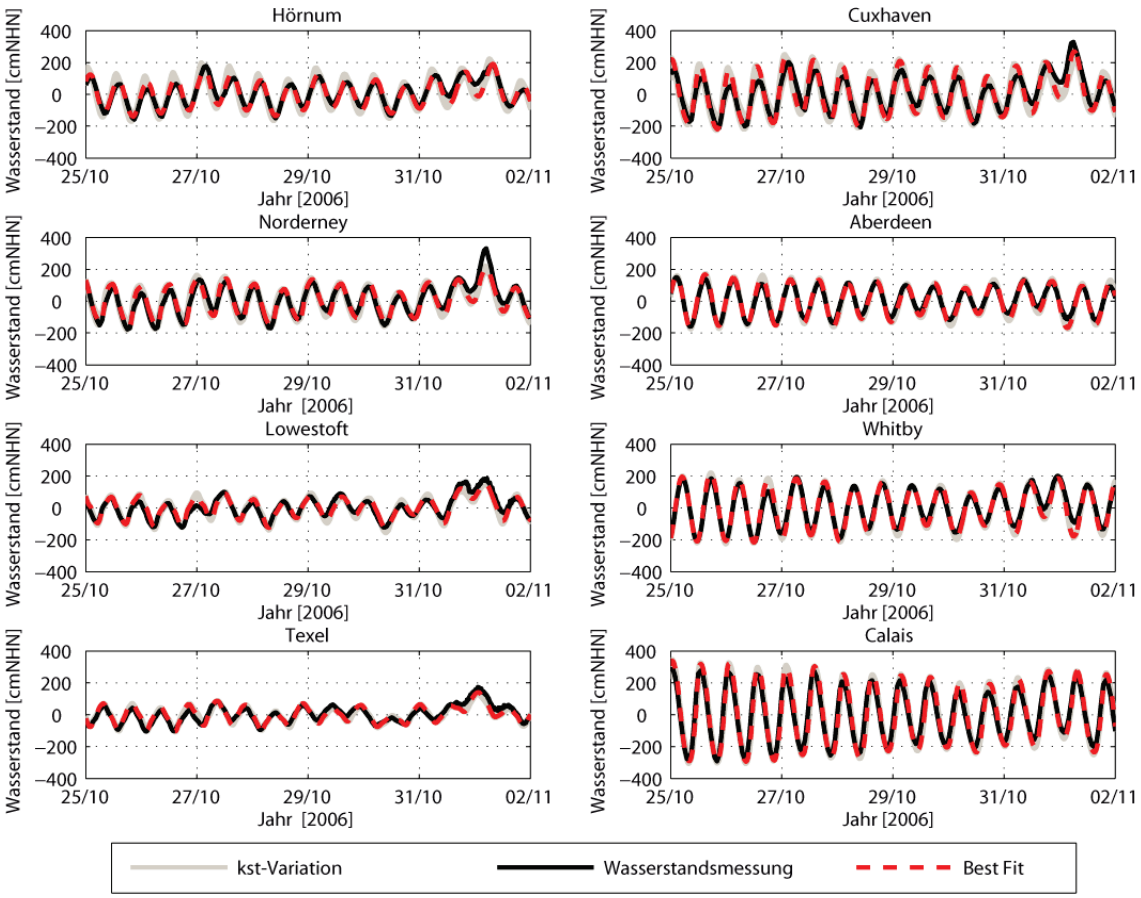


Abbildung 15: Kalibrierung des Modells. Die graue Linie kennzeichnet die Spanne der resultierenden Wasserstände aus der Variation der Sohlrauheiten mit 35≤kst≤50 $m^{1/3}/s$.

Tabelle 3: Effizienzkriterien zur Beurteilung der bestmöglichen Modellanpassung. Als Kalibrierungsereignis wurde die Allerheiligenflut vom 01.11.2006 verwendet.

Kriterium	Aberdeen	Whitby	Lowestoft	Calais	K 13 a	Hörnum	Cuxhaven	Norderney
r^2 [-]	0,97	0,95	0,86	0,94	0,85	0,91	0,88	0,89
d [-]	0,99	0,99	0,96	0,98	0,96	0,98	0,96	0,97
RMSE [cm]	13,26	19,76	17,25	33,20	14,61	16,64	31,08	21,92

10.3 Biaskorrektur

Im Idealfall stimmen modellierte und gemessene Daten überein. Da die an den Pegelstandorten aufgezeichneten Wasserstände unterschiedlichen natürlichen sowie anthropogenen Einflüssen unterliegen, die zum Teil nur unzureichend in numerischen Modellsimulationen berücksichtigt werden können, resultieren jedoch oftmals Diskrepanzen zwischen den Wasserstandsverteilungen aus Naturmessungen (*Wb*) und Modellsimulationen (*Wm*), auch Bias genannt. Der Bias beschreibt die Differenz zwischen dem Erwartungswert der Verteilung und der zu schätzenden Größe und wird daher auch Verzerrung des Schätzers genannt. Im Hinblick auf extremwertstatistische Betrachtungen können kleinere Abweichungen in den zugrunde liegenden

Wasserstandsdaten zu großen Abweichungen in den statistisch ermittelten Wiederkehrintervallen führen.

Der Bias gibt Hinweise auf bisher vernachlässigte Zusammenhänge und ist in erster Linie in der modellinternen Parametrisierung sowie der Sensitivität gegenüber den äußeren Randbedingungen begründet (Mudelsee et al., 2010). In dem vorliegenden Modell kann der Bias vermutlich primär auf folgende Prozesse zurückgeführt werden:

- Die zeitliche Auflösung der Eingangsdaten (insbesondere Wind) ist noch immer relativ grob.
- Die räumliche Auflösung der Eingangsdaten (z. B. Wind, Bathymetrie, Rauheit) ist nicht ausreichend, um lokale Effekte hinreichend genau abbilden zu können.

Die verwendeten Windfelder stellen einen Ensemble-Mean dar, d. h. einen Mittelwert aus insgesamt 57 Realisationen. Der Mittelungsprozess kann zu einer Unterschätzung einzelner Extremwerte führen.

Um die Modellergebnisse zu erhalten, die den Anforderungen des Anwendungsfalles gerecht werden, lassen sich aus statistischen Analysen des Bias sog. Biaskorrekturen (auch als Climate Model Bias Correction (CMBC) bekannt) ableiten. Diese verfolgen das Ziel, systematische Modellabweichungen zu verringern (Mudelsee et al., 2010). Nach Piani et al. (2010) kann die Biaskorrektur als Transferfunktion formuliert werden, die die modellierte in die korrigierte Variable überführt. Unter der Annahme, dass die Transferfunktion eine adäquate Beschreibung der Abweichungen eines Wertepaares (Messung und Modell) innerhalb eines Kontrollzeitraumes ermöglicht, lassen sich so prinzipiell auch Zukunftsprojektionen ableiten. Problematisch wird dies, wenn die Modellierung Extremwerte generiert, die den Kalibrierungsbereich überschreiten (Mudelsee et al., 2010).

Um modellgenerierte Wasserstände zu erhalten, die nur geringe Abweichungen gegenüber den Naturmessungen aufweisen, wurde für jedes betrachtete Kalenderjahr (Kontrollzeitraum 01.01. – 31.12.) eine nichtparametrische Transferfunktion entwickelt. Die Transferfunktionen wurden für die Zeitspanne 1970 bis 2009 aus den jährlichen Wertepaaren (Messung und Modell) generiert, d. h. die Transferfunktionen werden für jedes Jahr neu berechnet. Mit Hilfe der Transferfunktion lassen sich die numerisch generierten Daten so modifizieren, dass der Bias der Wertepaare an den Referenzstandorten, d. h. Standorten an denen ausreichend lange Pegelaufzeichnungen vorliegen, vollständig eliminiert wird. Da die Transferfunktion nichtparametrisch ist, kann diese jedoch nicht für die Projektion zukünftiger Wasserstände verwendet werden.

Die hier angewendete nichtparametrische Biaskorrektur erfolgt als Transferfunktion aus den empirischen Verteilungen der Wertepaare, d. h. das zeitliche Auftreten von Einzelereignissen wird während der Korrektur nicht berücksichtigt. Im Hinblick auf extremwertstatistische

Untersuchungen, z. B. unter Verwendung des Peak Over Threshold (POT) Verfahrens, ist der exakte Zeitbezug der beobachteten Ereignisse irrelevant, solange die Länge des Beobachtungszeitraums bekannt ist. Da die Hindcast-Wasserstände in erster Linie als Eingangsgröße extremwertstatistischer Untersuchungen mit Hilfe des POT Verfahrens dienen, ist die Entwicklung korrekter Wasserstandsverteilungen daher von übergeordneter Bedeutung.

Zur Ermittlung der Transferfunktion wird zunächst ein aufsteigender Rangvektor der Wasserstände *W* erstellt, so dass der Wert dem Rang 1 dem kleinsten *W* und der Wert mit dem Rang n dem größten *W* in der Zeitreihe entspricht. Die Transferfunktion B_K eines jeden Jahres *j* und eines jeden Referenzstandortes *s* resultiert aus den Differenzen der Verteilungsfunktion $F_n(Wb_{,js})$ der beobachteten Wasserstände (*Wb*) und den Verteilungsfunktionen $F_n(Wm_{,js})$ der modellgenerierten Wasserstände (*Wm*) und ermittelt sich nach

$$B_{K,js} = F_n\left(Wb_{,js}\right) - F_n\left(Wm_{,js}\right) \quad . \qquad \text{Formel 10.4}$$

Die Transferfunktion ($B_{K,js}$) wird im Anschluss zu den Verteilungsfunktionen der simulierten Zeitreihen $F_n(Wm_{,js})$ hinzu addiert; die Differenzen zwischen den Verteilungsfunktionen werden somit nach

$$F_n\left(W_{b,js}\right) = F_n\left(W_{m,js}\right) + B_{K,js} \quad , \qquad \text{Formel 10.5}$$

eliminiert. Für jeden Referenzstandort, dessen Zeitreihenlänge mit der simulierten Zeitspanne übereinstimmt, können die modellierten Wasserstandszeitreihen auf diese Weise korrigiert werden, d. h. die Verteilungsfunktionen an den modellierten Referenzstandorte entsprechen exakt den Verteilungsfunktionen der Pegelmessungen der Referenzstandorte.

Die Transferfunktionen für die Bereiche zwischen den Referenzstandorten lassen sich hierdurch jedoch nicht direkt ermitteln. Um dies zu erreichen, werden die Transferfunktionen der Referenzstandorte jeweils in $n = 1000$ diskrete Einzelwerte mit $i = 1, 2, \ldots 1000$ zerlegt. Zu jedem der 1000 Einzelwerte werden auf Basis vorhandener Stützstellen (Koordinaten der Referenzstandorte) die Transferfunktionen $B_{K(i),js}$ im Abstand von 1000 m auf den betrachteten Küstenabschnitt mit der inversen Distanzwichtung (IDW) (vgl. Batstone et al., 2013) interpoliert.

Die Ermittlung und Anwendung der Transferfunktion wird anhand von Abbildung 16 erläutert. In Abbildung 16a) sind alle Gridpunkte (schwarz) dargestellt, an denen die Wasserstände des 40-jährigen Hindcast ausgelesen wurden. Die Referenzstandorte werden durch grün umrandete Kreise symbolisiert. Diese entsprechen allen Standorten, die in Tabelle 1 in der Spalte „Korrektur“ vermerkt sind. Als Beispiel für die Ermittlung und Anwendung der Transferfunktion an einem Einzelstandort wurde der Pegel Hörnum gewählt. Die Lage des Standortes wird durch einen rot umrandeten Kreis symbolisiert.

In Abbildung 16b) sind die kumulierten Verteilungsfunktionen des Wertepaares am Standort Hörnum (Messungen = schwarze Line; Modellierung = rot gestrichelte Linie) dargestellt. Die Transferfunktion (blaue Linie) resultiert nach Formel 10.5 aus den Differenzen der beiden Verteilungsfunktionen des Wertepaares und liefert an den Referenzstandorten für jeden Wert $x_{(i)}$ der kumulierten Wahrscheinlichkeit $0 \leq F_n(x) \leq 1$ einen Korrekturwert. Bezogen auf n Werte ergibt sich auf diese Weise, z. B. für den Wert $F_n(0,2)$, d. h. dem $i = 200$sten Wert der insgesamt $n = 1000$ diskreten Einzelwerte, ein Korrekturwert von $\Delta h = 4{,}96$ cm. Diese Vorgehensweise wird sukzessive für alle Referenzstandorte durchgeführt.

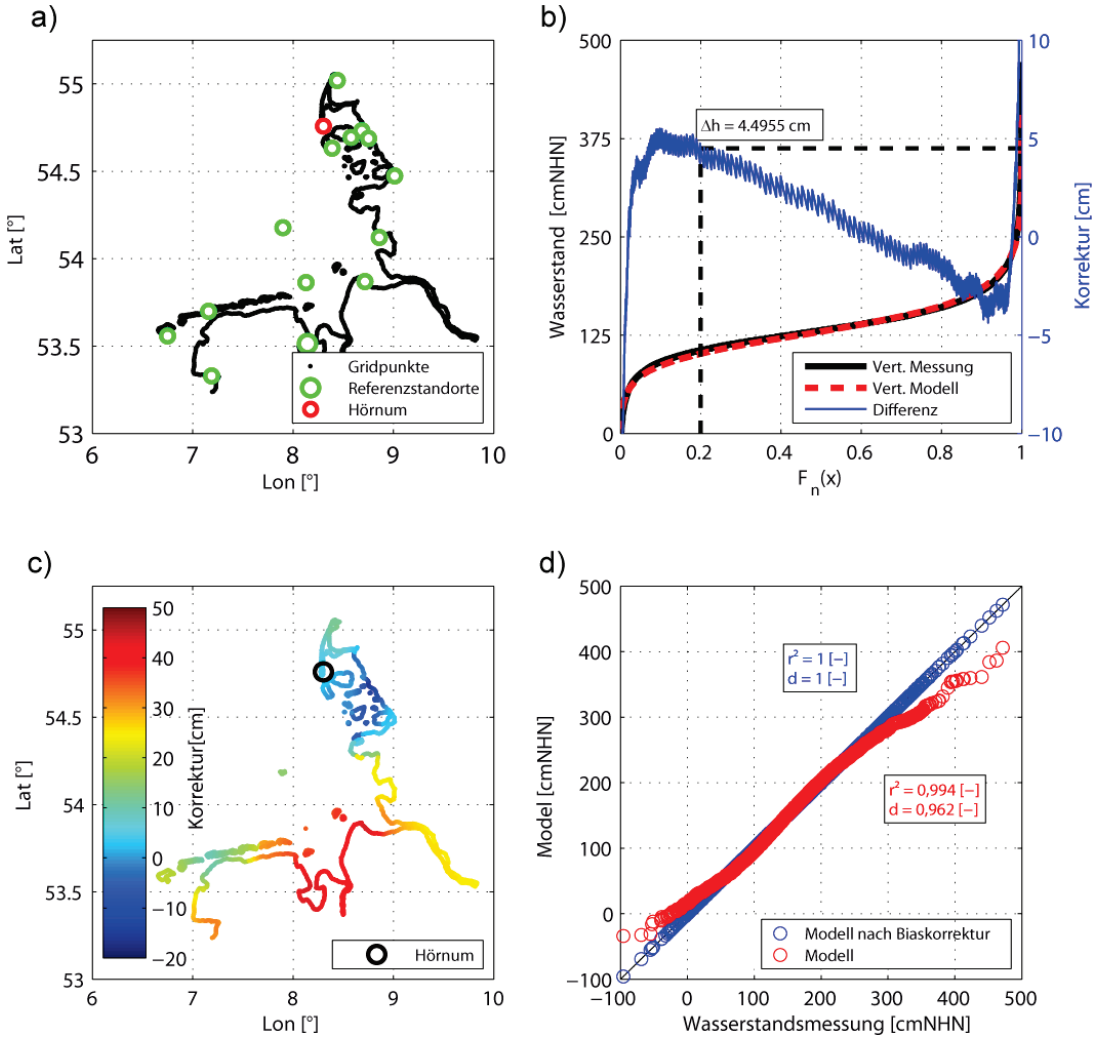


Abbildung 16: (a) Lage des Beispielsstandortes (Hörnum) in der Deutschen Bucht; (b) Empirische Verteilung am Pegel Hörnum für Pegelmessung, Modellergebnis und die resultierende Korrekturfunktion; (c) Teils interpolierte Korrekturwerte für die Deutschen Bucht; (d) Regression der Pegelmessung und der korrigierten bzw. unkorrigierten Wasserstände (Hörnum).

Um alle modellgenerierten Wasserstände zu korrigieren, werden die Transferfunktionen der Referenzstandorte in n Schritten auf alle Modell-Gridpunkte interpoliert. Nachdem die Interpolation für die verbleibenden Schritte durchgeführt wurde, existieren zu jeder kumulierten Wahrscheinlichkeit $F_n(x_{(i)})$ und für jeden Modell-Gridpunkt spezifische Korrekturwerte. Diese werden den empirischen Wasserstandsverteilungen des jeweiligen Gridpunktes hinzuaddiert. In Abbildung 16c) sind die interpolierten Korrekturwerte für den $i = 200$sten Wert der insgesamt $n = 1000$ diskreten Korrekturwerte eines jeden Gridpunktes dargestellt. Diese wurden aus den Korrekturwerten der Referenzstandorte (siehe grüne Kreise Abbildung 16a und Spalte „Korrektur“ in Tabelle 1) mittels IDW Verfahren errechnet. Der Beispielstandort Hörnum wird durch einen schwarzen Kreis symbolisiert. Aus der Abbildung wird deutlich, dass im Bereich Schleswig-Holsteins (nördlicher Bereich des Küstenverlaufes) deutlich geringere Korrekturen vorgenommen werden, als im restlichen Bereich der Deutschen Bucht. Dies ist insbesondere in der Qualität der dem Modell zugrunde liegenden Bathymetrien begründet, deren Auflösung in diesem Bereich (der auch die Halligen einschließt) entsprechend höher ist.

In Abbildung 16d) ist der Vergleich zwischen beobachteten und modellierten Scheitelwasserständen vor- und nach Anbringung der Korrektur dargestellt. Dabei werden sehr niedrige Thw am Beispielstandort zunächst zu hoch abgebildet während sehr hohe Thw um bis zu 60 cm zu niedrig berechnet werden. Die Korrektur gleicht diese Unzulänglichkeiten aus. Im Bereich mittlerer Wasserstände weist das Modell kaum bis gar keine Abweichungen auf; nach der Korrektur stimmen alle resultierenden Scheitelwasserstände der Wertepaare überein.

Durch die Verwendung der modellgenerierten Wasserstände werden lokale Effekte infolge komplexer Bathymetrien und Küstenlinien berücksichtigt. Die Unzulänglichkeiten des Modells werden dagegen durch die Biaskorrektur kompensiert. Diese Unzulänglichkeiten resultieren aus unterschiedlichen Einflüssen wie z. B. der unzureichenden Datenbasis und es wird unterstellt, dass Effekte, die zu fehlerhaften Berechnungen an einem Standort führen, auch in unmittelbarer Umgebung auftreten. Die Transferfunktion kann somit über Interpolationsmethoden auf die nächstgelegenen Nachbarstandorte übertragen werden. Eine Plausibilitätsprüfung dieser Annahme erfolgt im nachfolgenden Abschnitt.

10.4 Validierung der Biaskorrektur

In diesem Abschnitt wird die Validität (Gültigkeit) der Biaskorrektur im Hinblick auf die generelle Eignung untersucht. Hierdurch soll die Praxistauglichkeit der im vorigen Abschnitt erläuterten theoretischen Aspekte nachgewiesen werden. Die verwendeten Daten sollten dabei ein möglichst breites Spektrum abdecken (Zielke, 1999). Für die Validierung werden daher alle

beobachteten Ereignisse zwischen 1970 und 2009 mit den Modelldaten (korrigiert, unkorrigiert) verglichen.

Zur Validierung der Biaskorrektur wird in diesem Abschnitt eine Biaskorrektur am Standort Pellworm Hafen vorgenommen. Die Pegelaufzeichnungen am Standort Pellworm Hafen wurden im Hinblick auf die Validierung aus dem Kollektiv der Referenzstandorte entfernt, d. h. die Transferfunktion für diesen Standort wurde aus den Transferfunktionen der der anderen Referenzstandorte (siehe Abschnitt 10.3) interpoliert. Hierdurch soll die Übertragbarkeit der Biaskorrektur untersucht werden.

Abbildung 17a) zeigt die Regressionsbeziehungen (rote Kreise) zwischen den Naturmessungen und den Modellergebnissen für den Standort Pellworm Hafen. Wie bereits in Hörnum treten die größten Abweichungen bei sehr hohen und sehr niedrigen Thw ($r^2 = 0{,}99$ [-], $d = 0{,}98$ [-]) auf. Durch die Biaskorrektur können die Abweichungen zwischen den modellierten und den gemessenen Wasserständen deutlich reduziert werden ($r^2 = 0{,}99$ [-], $d = 0{,}99$ [-]). Die Abweichungen in den Verteilungsfunktionen sind in Abbildung 17b) dargestellt. Dabei zeigen die höheren Thw tendenziell geringere Abweichung als die niedrigeren. Diese Tendenz wird auch durch die Perzentil Betrachtung in Abbildung 17c) bestätigt. Dabei zeigen die niedrigen Perzentile insgesamt größere Abweichungen als die höheren Perzentile.

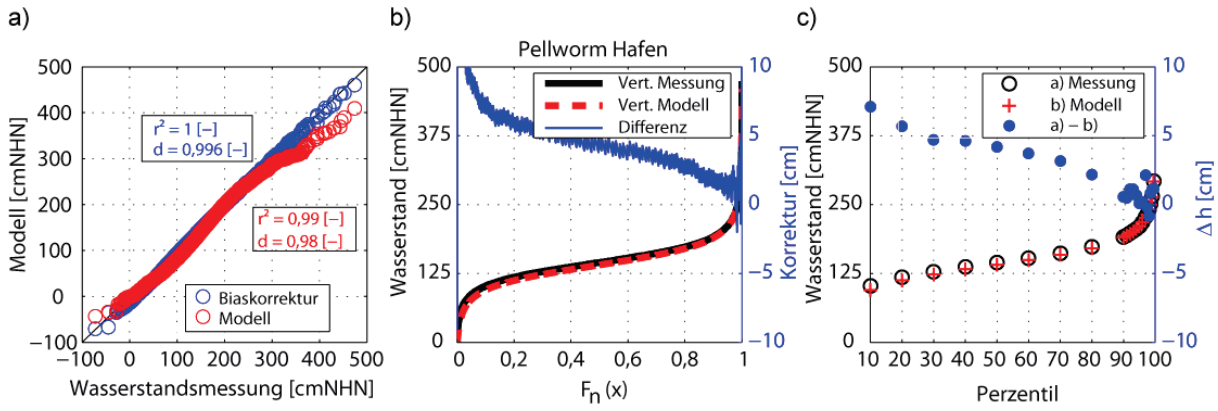


Abbildung 17: (a) Regression der modellierten (rot) und korrigierten (blau) Wasserstände gegenüber der Messung am Standort Pellworm Hafen; (b) Empirische Verteilungsfunktion am Beispielstandort für Pegelmessung (schwarz), Modellergebnis (rot) und die daraus resultierenden Differenzen (blau); (c) Perzentile aus Pegelmessung (schwarz) und Modellergebnis (rot), die blauen Punkte zeigen die Differenzen.

In Abbildung 18 sind die Effizienzkriterien aller 16 Validierungsstandorte in einer Übersicht zusammengefasst. Die roten Punkte resultieren aus dem Vergleich zwischen gemessenen und modellierten Thw (*Wb* vs. *Wm*) aller Ereignisse zwischen 1970 und 2009; die blauen Punkte

resultieren aus den Vergleich zwischen gemessenen und korrigierten Thw (*Wb* vs. *Wk)* des gleichen Zeitraumes. Die Abbildung 18a zeigt deutlich, dass durch die Biaskorrektur an allen Standorten eine Erhöhung des *Determinationskoeffizienten* r^2 erreicht wurde; alle Standorte erreichen nach der Korrektur Werte von $r^2 \approx 1$ [-].Abbildung 18b) zeigt den *Index of Agreement d*. Auch hier führt die Biaskorrektur zu einer deutlichen Erhöhung des Effizienzkriteriums; der *Index of agreement d* konnte durch die Biaskorrektur an nahezu allen Standorten auf $d \approx 1$ [-] verbessert werden. Lediglich in Wittdün, Wyk und Dagebüll konnte nur eine geringfügige Erhöhung des *Index of Agreement* erreicht werden; an diesen Standorten war die Differenz zwischen *Wm* und *Wb* bereits vor der Biaskorrektur gering.

Für extremwertstatistische Analysen sind insbesondere Wasserstände mit geringen Überschreitungswahrscheinlichkeiten (d. h. sehr hohe Wasserstände) von Bedeutung. Dabei können kleinere Abweichungen in den zugrunde liegenden Wasserstandsdaten zu großen Abweichungen in den Wiederkehrintervallen extremer Wasserstände führen. Die Validierung zeigt, dass diese Abweichungen mit der Biaskorrektur an bepegelten Standorten eliminiert werden konnten und die Wiederkehrintervalle aus biaskorrigierten Modelldaten und Pegelmessungen übereinstimmen. Im Bereich unbepegelter Standorte konnte gezeigt werden, dass die Biaskorrektur diese Abweichung reduziert, jedoch nicht vollständig eliminiert. An diesen Standorten verbleibt eine geringe Abweichung, die im vorliegenden Fall jedoch vernachlässigbar ist.

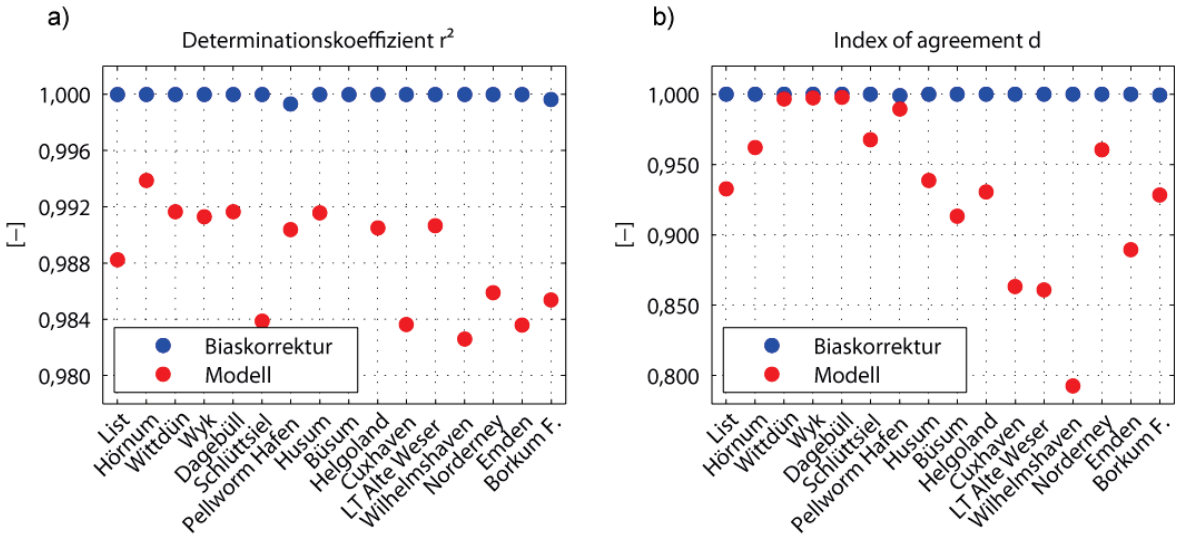


Abbildung 18: Vergleich zwischen den Naturmessungen und den Modellergebnissen an den 16 Validierungsstandorten vor (rote Punkte) und nach (blaue Punkte) Anwendung der Biaskorrektur, mit (a) dem Determinationskoeffizient r² und (b) dem Index of Agreement.

11 Extremwertstatistische Analysen

Die modellgenerierten Wasserstände werden extremwertstatistischen Analysen zugeführt, d. h. es werden Wiederkehrintervalle für extreme Wasserstände entlang der gesamten Küstenlinie mit quasi-lückenloser Ausdehnung (1000 m) ermittelt. In den letzten Dekaden wurden zahlreiche Ansätze zur statistischen Analyse von Extremwasserständen entwickelt. Die Verfahren folgen dabei unterschiedlichen Modellansätzen, die systembedingte Stärken und Schwächen aufweisen. In ZukunftHallig A wurden alle extremwertstatistischen Analysen wie in Abschnitt A erläutert durchgeführt (siehe auch Arns et al., 2013).

Wie in Teil A bereits erläutert wurde, kann eine geringe Abweichung in den zugrunde liegenden Wasserstandsdaten zu großen Abweichungen in den daraus ermittelten Wiederkehrintervallen führen. Aus diesem Grund wird im Folgenden die Eignung der korrigierten Modellwasserstände im Hinblick auf extremwertstatistische Analysen betrachtet. Hierzu werden die Wiederkehrintervalle der beobachteten und korrigiert-modellierten Wasserstände nach oben beschriebenen Methodik ermittelt und für $P_Ü$ = {0,1; 0,01; 0,005} [1/a] bzw. T = {10; 100; 200} Jahre einander gegenübergestellt.

Abbildung 19a) zeigt exemplarisch die Wiederkehrintervalle am Standort Hörnum. Dabei wird deutlich, dass die Wiederkehrintervalle aus *Wb* und *Wk* keine Differenzen aufweisen; auch die Konfidenzintervalle aus *Wb* und *Wk* zeigen exakt gleiche Werte. Gleiches gilt uneingeschränkt für alle anderen Referenzstandorte. In Abbildung 19b) ist selbige Betrachtung für den Standort Pellworm Hafen dargestellt. Zwar zeigen sich hier geringe Abweichungen zwischen den Wiederkehrintervallen aus *Wb* und *Wk,* jedoch betragen diese bis zu einem Wiederkehrintervall von T = 400 Jahren $\Delta h \leq 2$ cm und bei T = 1.000 Jahren $\Delta h \leq 5$ cm. Erst danach steigen die Abweichungen beim Wiederkehrintervall von T = 10.000 Jahren auf einen maximalen Wert von $\Delta h \leq 11$ cm.

In Abbildung 19c) sind alle zur Validierung verwendeten Standorte und deren Quantil-Differenzen zwischen *Wb* und *Wk* dargestellt; zum Vergleich wurde *Wm*, d. h. die modellierten Wasserstände ohne Korrektur, ebenfalls dargestellt. Durch die Korrektur wurden an nahezu allen Standorten die Diskrepanzen in den Hochwasserquantilen eliminiert. Lediglich der Standort Pellworm Hafen zeigt geringe Abweichung zwischen den Quantilen auf Basis gemessener und biaskorrigierter Wasserstände. Diese resultieren aus der Übertragung der Transferfunktion von den Nachbarstandorten. Trotz Biaskorrektur lässt sich der beobachtete Wasserstand somit nicht exakt reproduzieren. Im Kontext der hier durchgeführten Untersuchungen sind die verbleibenden Differenzen jedoch vernachlässigbar.

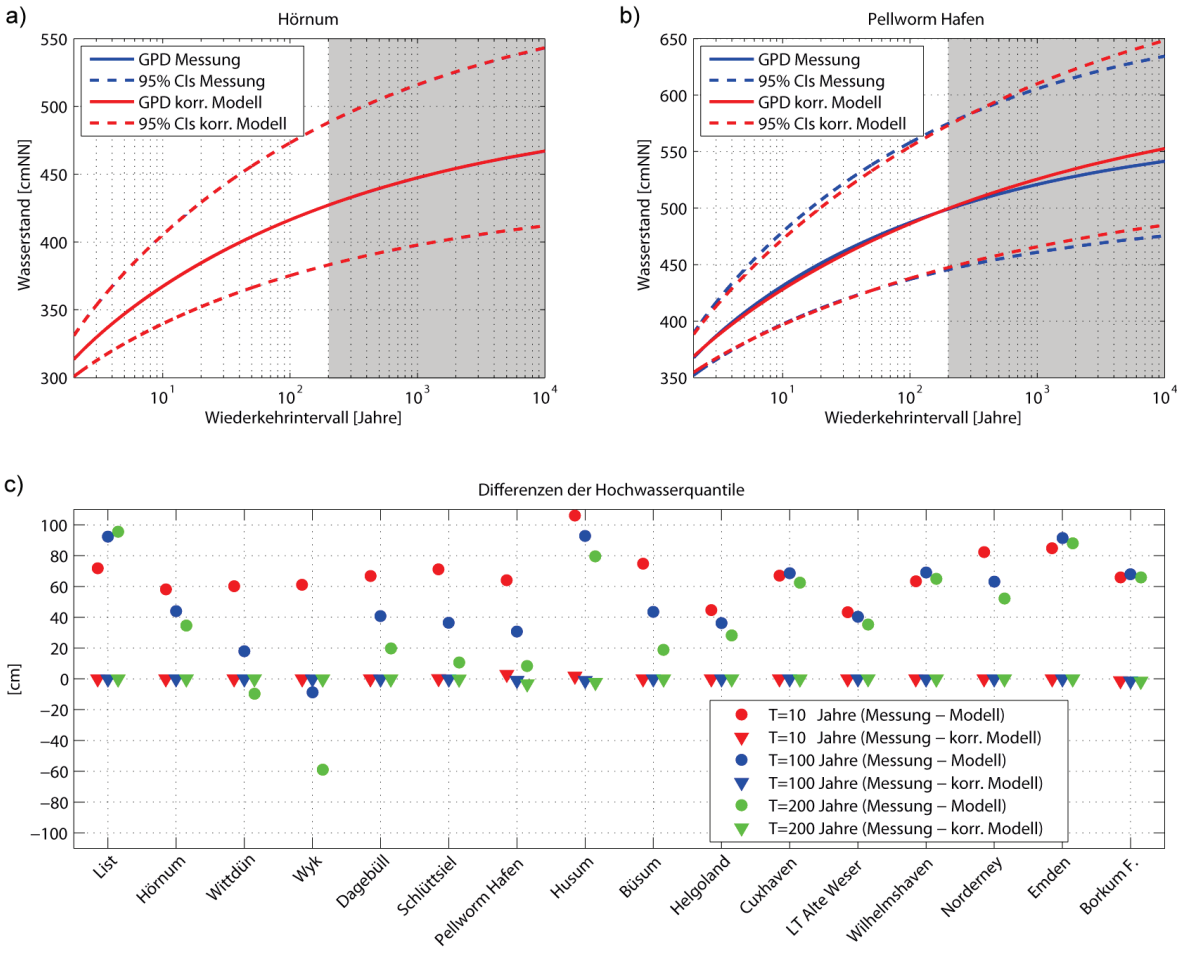


Abbildung 19: (a), (b) Vergleich der Wiederkehrintervalle aus biaskorrigierten (rot) und gemessenen (blau) Wasserständen an den Standorten (a) Hörnum und (b) Pellworm Hafen; (c) Vergleich der Differenzen der Hochwasserquantile an allen betrachteten Standorten für die Wiederkehrintervalle T={10;100;200}.

In Abbildung 20a sind regionalisierte Wasserstände mit einem Wiederkehrintervall von T = 200 Jahren entlang der gesamten Schleswig-Holsteinischen Nordseeküste dargestellt. Die Abbildung zeigt, dass die Wasserstände im nördlichen Teil Schleswig-Holsteins (Sylt, Amrum) bei gleichen Überschreitungswahrscheinlichkeiten niedriger als im südlichen Teil des Bundeslandes (z. B. Husum, Meldorfer Bucht) sind. Dies ist sowohl auf Flachwassereffekte sowie auf Stauwirkungen infolge meteorologischer Einflüsse (siehe z. B. Dangendorf et al., 2012, 2013) zurückzuführen. Abbildung 20b, Abbildung 20c und Abbildung 20d zeigen die Detailausschnitte der regionalisierten Wasserstände entlang der Außenkanten der Halligen Hooge, Nordstrandischmoor und Langeness. In diesem Bereich existieren keine Pegelaufzeichnungen, mit denen sich Hochwasserquantile robust ermitteln lassen können. Erst die Regionalisierung ermöglicht eine adäquate Ermittlung von Überschreitungswahrscheinlichkeiten, die als Grundlage zur Planung effizienter HWS verwendet werden können.

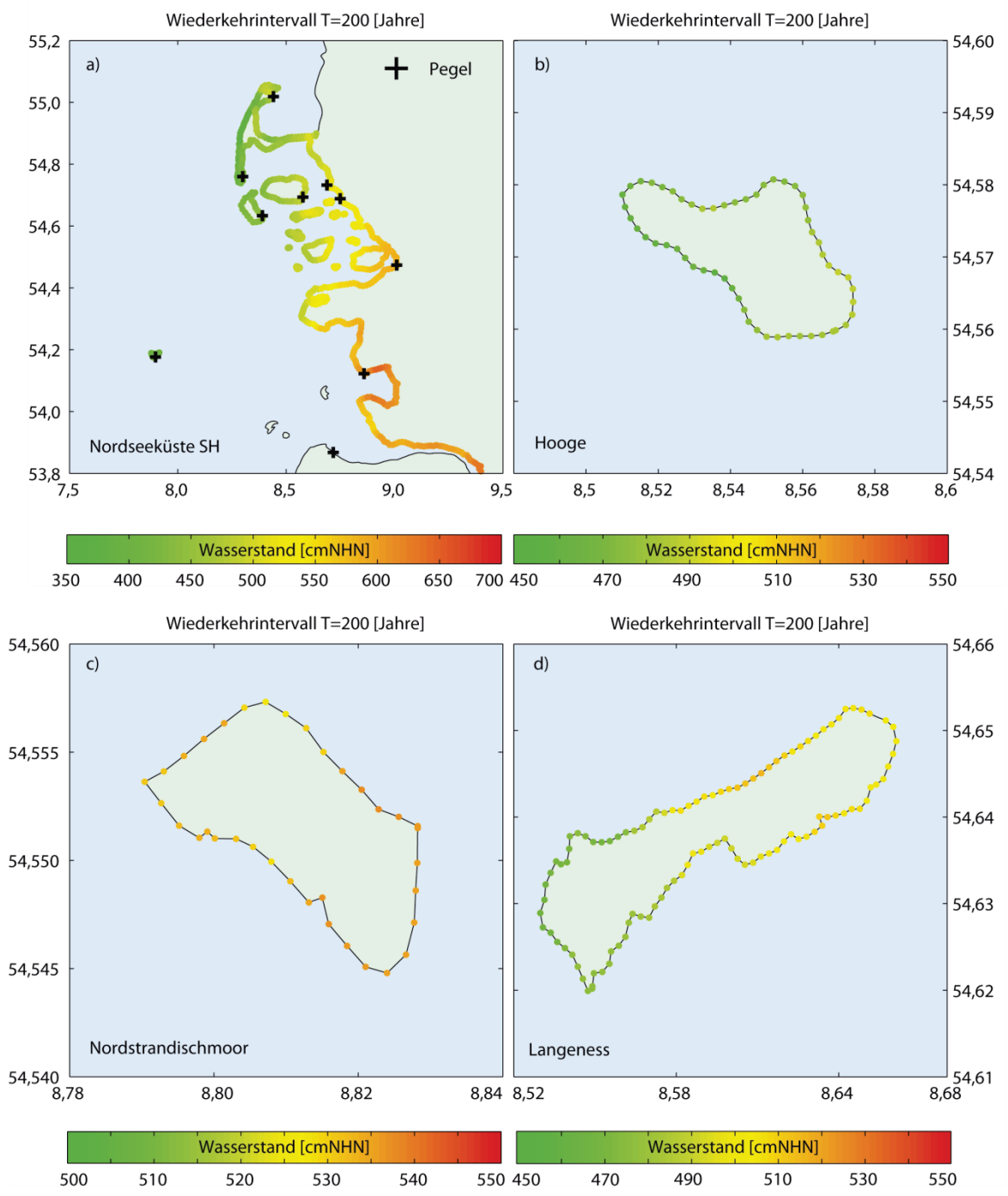


Abbildung 20: (a) Wasserstände in [cmNHN] mit einem mittleren Wiederkehrintervall von T=200 Jahren entlang der Schleswig-Holsteinischen Nordseeküste; Wasserstände in [cmNHN] mit einem mittleren Wiederkehrintervall von T= 200 Jahren entlang der Außenkante von (b) Hallig Hooge, (c) Nordstrandischmoor und (d) Langeness.

C. Welchen Einfluss hat ein Anstieg des mittleren Meeresspiegels auf extreme Wasserstände?

12 Motivation

Die Ermittlung extremer Wasserstände (z. B. für die Bemessung von HWS) basiert meist auf extremwertstatistischen Ansätzen. Hierfür werden i. d. R. stationäre Eingangsdaten benötigt (siehe z. B. Jensen, 1984; Rao und Hamed, 2000). An vielen Standorten weisen die Kollektive extremer Wasserstände jedoch instationäre Eigenschaften wie Trends oder Periodizitäten auf (Dixon und Tawn, 1994). Aus diesem Grund haben z. B. Coles (2001), Méndez et al. (2007), Ménendez und Woodworth (2010) sowie Mudersbach und Jensen (2010) sogenannte instationäre extremwertstatistische Ansätze entwickelt, welche zeitliche Änderungen in den statistischen Modellen berücksichtigen. Hunter (2010) verwendet dagegen einen Ansatz, bei dem Änderungen in den Extremwasserständen durch eine simple Superposition mit prognostizierten Änderungen des MSL approximiert werden. Dabei wird angenommen, dass Extremwasserstände im 21. Jahrhundert durch Änderungen im MSL dominiert werden. Dieser Ansatz wurde bisher in vielen Küstenschutzkonzepten adaptiert, d. h. die Bemessungswasserstände des 21. Jahrhunderts wurden um den prognostizierten Anstieg des MSL erhöht (Smith et al., 2010). Auch dabei wird angenommen, dass mittlere und extreme Wasserstände in gleichem Maße ansteigen. Untersuchungen von Mudersbach et al. (2013) zeigen jedoch, dass diese Annahme aufgrund nichtlinearer Interaktionen zwischen den einzelnen Wasserstandskomponenten (MSL, Tide, Windstau) zu Über- und Unterschätzungen von Bemessungswasserständen führen kann. Um potentielle Änderungen in den Extremwasserständen für zukünftige Bemessungsaufgaben abschätzen zu können, wird daher ein umfassendes Systemverständnis benötigt.

13 Stand der Wissenschaft

13.1 Beobachtete Änderungen der Sturmflutwasserstände

In den vergangenen Dekaden wurde eine Vielzahl an Studien veröffentlicht, die Änderungen der Sturmflutwasserstände auf Basis von Beobachtungsdaten untersuchen. Die Untersuchungen wurden dabei für gesamte Küstenabschnitte (für die Deutsche Bucht siehe z. B. Jensen, 1985; Mudersbach et al., 2013) sowie für einzelne Pegelstandorte (z. B. am Pegel Cuxhaven durch von Storch und Reinhardt, 1997; Weisse und von Storch, 2009) durchgeführt. Erste Untersuchungen zur Frage, ob sich Extremwasserstände und der MSL unterschiedlich verändert haben, wurden von Woodworth und Blackman (2004) durchgeführt und später durch Menéndez und Woodworth (2010) aktualisiert und erweitert. Auf Basis eines quasi-globalen Datensatzes zeigen die Autoren, dass die Extremwasserstände weltweit an den meisten Standorten angestiegen sind und dass diese Veränderung primär im Anstieg des MSL begründet ist. Vergleichbare Ergebnisse können einer Vielzahl an Studien von diversen Autoren für andere europäische Standorte entnommen werden (z. B. für den Ärmelkanal durch Haigh et al., 2010b; für Südeuropa von Marcos et al., 2009 sowie Tsimplis und Shaw, 2010; für den Standort Marseille von Letetrel et al., 2010). Eine umfassende Literaturstudie zu dieser Thematik kann Woodworth et al. (2011) entnommen werden. Diese Studie schlussfolgert, dass Änderungen der Extremwasserstände in den meisten Fällen in den Änderungen des MSL begründet sind, es jedoch Ausnahmen gibt. Ein konkretes Beispiel hierfür ist das Rhone Delta. An diesem Standort zeigen Ullmann et al. (2007), dass die Extremwasserstände im 20. Jahrhundert etwa doppelt so schnell angestiegen sind wie der MSL und machen hierfür Änderungen in den Windfeldern verantwortlich. Für Ostende (Belgien) zeigen Ullmann und Monbaliu (2010), dass Änderungen der atmosphärischen Zirkulation über dem Nordatlantik zwischen 1925 und 2000 eine Erhöhung der 99-Perzentile der Wasserstände im Winter um +3.0 mm/Jahr und der jährlichen Surges um ca. +1.0 mm/Jahr verursacht haben.

In der Deutschen Bucht zeigen Mudersbach et al. (2013), dass sich die Trends der höheren Wasserstands Perzentile zwischen den 1950er Jahren und 1990 signifikant von denen des MSL unterscheiden. An sechs Pegeln untersuchten die Autoren hierfür die Residualtrends der höheren Wasserstand Perzentile, d. h. die Trends des MSL wurden an allen Pegeln vorher entfernt (siehe Abbildung 3). Die Residualtrends zeigen dabei signifikante Trends zwischen +1,0 und +3,7 mm/Jahr. Mudersbach et al. (2013) schlussfolgern, dass die unterschiedliche Entwicklung auf Änderungen in den Partialtiden zurückzuführen ist. Darüber hinaus zeigen Dangendorf et al. (2013c), dass die beobachteten Änderungen der Extremwasserstände in der Deutschen Bucht saisonalitäten aufweisen. Dabei treten die höchsten Änderungen der Wasserstände während des Winters auf und gehen mit gleichzeitigen Änderungen in den lokalen und großräumigen

Windfeldern einher. Eine abschließende Quantifizierung des Einflusses beider Komponenten (Tide, Surge) an den unterschiedlichen Entwicklungen zwischen MSL und Extremwasserständen steht jedoch noch aus.

13.2 Untersuchungen zu zukünftigen Änderungen extremer Wasserstände

Wasserstände setzen sich aus dem MSL, der astronomisch induzierten Tide, der dynamischen Reaktion der Wasseroberfläche auf meteorologisch induzierte Kräfte (Surge) sowie nichtlinearen Interaktionen zwischen diesen Komponenten zusammen. Langzeittrends in einer dieser Komponenten (z. B. infolge klimatischer Änderungen) können das Risiko durch extreme Wasserstände entscheidend verändern (Weisse et al., 2011). Eine Quantifizierung des Einflusses von Änderungen in den einzelnen Komponenten lässt sich auf Basis von Beobachtungsdaten nur bedingt durchführen. Aus diesem Grund basieren zahlreiche Studien zu diesem Thema auf Modelluntersuchungen, bei denen jeweils eine oder mehrere der Komponenten verändert werden.

Für unterschiedlichste Standorte weisen zahlreiche Studien auf Veränderungen in den Extremwasserständen hin, die signifikant unterschiedlich von den Änderungen des MSL sind. Für den nördlichen Teil des Golfs von Bengalen (nördlicher Indik) untersuchten Flather und Khandker (1993) den Einfluss von einem +2,0 m Anstieg im MSL unter gegenwärtigen meteorologischen und morphologischen Bedingungen (Kontrolllauf) auf Extremwasserstände. Dabei untersuchten sie lediglich ein Sturmflutereignis. Die Resultate zeigen, dass die maximalen Surgehöhen um +0,2 bis +0,3 m reduziert wurden. Die absoluten Wasserstände zeigten dagegen ein räumlich inhomogenes Bild, mit Erhöhungen um bis zu +0,25 m und Verringerungen um bis zu -0,5 m gegenüber dem berücksichtigten MSL Anstieg. Für die Küste Südost Louisianas untersuchten Smith et al. (2010) den Einfluss eines MSL Anstiegs um +0,5 m und +1,0 m auf die Wasserstände infolge sechs synthetischer Hurricanes mit Eintrittswahrscheinlichkeiten von jeweils $P_Ü$=0,001 [1/a]. In den Bereichen, die den maximalen Surge aufweisen, zeigten die Surges einen linearen Anstieg mit dem MSL. Die Autoren begründen diese Abhängigkeit mit einer unveränderten Interaktion zwischen der Topografie und der Surge Ausbreitung. In Bereichen moderater und niedriger Surges (2,0 bis 3,0 m) beträgt die Surgerhöhung dagegen jedoch das zwei- bis dreifache des berücksichtigten MSL Anstieges. Die Autoren schreiben diese nichtlineare Erhöhung den Änderungen in den Flachwassereffekten (z. B. durch die Erhöhung der Wellenfortschrittsgeschwindigkeit) zu.

In der Deutschen Bucht wurden erste modellgestützte Untersuchungen zum Einfluss der Änderungen des MSL auf Extremwasserstände von Stengel und Zielke (1994) durchgeführt. Anhand von vier historischen Sturmfluten vergleichen diese einen Modelllauf der beobachteten Sturmfluten mit einem Modelllauf, der die gleichen Sturmfluten bei einem MSL Anstieg von

+1,0 m berücksichtigt. Dabei zeigen die Autoren, dass die Extremwasserstände an den meisten Stellen signifikant höher ausfallen als die Änderungen des MSL. Die Ergebnisse sind insgesamt jedoch sehr inhomogen. Um den nichtlinearen Zusammenhang zwischen dem Anstieg des MSL und extremen Wasserständen in der Nordsee zu untersuchen, vergleichen Kauker und Langenberg (2000) eine 20-jährige Sturmflutsimulationen abgelaufener Ereignisse mit einem weiteren 20-jährigen Modelllauf, bei dem alle Randbedingungen gleich bleiben, der mittlere Wasserstand jedoch um +0,1 m erhöht wird. Die Simulationen deuten auf eine lineare Veränderung der extremen Wasserstände bei ansteigendem MSL hin. Kauker und Langenberg (2000) schlussfolgern, dass Sturmfluthöhen in der Nordsee nicht stärker ansteigen als der MSL. Eine aktuellere Studie zum Einfluss des MSL auf Extremwasserstände im Bereich der Deutschen Bucht wurde durch Bruss et al. (2010) angefertigt. Diese untersuchen u. a. den Einfluss eines MSL Anstiegs von bis zu +1,0 m anhand einer Simulation des gesamten Jahres 1999. Die Ergebnisse zeigen Wasserstandsänderungen, die gegenüber dem betrachteten MSL um bis zu ±0.25 m unterschiedlich sind. Jedoch sind die Ergebnisse räumlich sehr inhomogen. Die Autoren begründen die Änderungen mit einer lokalen Amplitudenerhöhung der Tide.

Neben dem Einfluss von MSL Änderungen auf Extremwasserstände wurde in diversen Studien der Einfluss von atmosphärischen Änderungen auf Extremwasserstände untersucht. Unter der Annahme einer linearen Abhängigkeit zwischen dem MSL und Sturmfluten, haben Woth et al. (2006) zwei 30-jährige Modellläufe der gesamten Nordsee verglichen. Der erste Modelllauf simuliert die Periode 1961 bis 1990, während der Szenariolauf die Periode 2071 bis 2100 (auf Basis unterschiedlicher Klimamodelle) betrachtet. Die Ergebnisse zeigen insgesamt große Veränderungen an den kontinentalen Küsten während der Einfluss auf die Britische Küste nicht signifikant war. Von der Deutschen Bucht bis nach Dänemark konnten Anstiege in der Intensität und der Dauer extremer Wasserstände festgestellt werden. Die 99,5-Perzentile der Wasserstände zeigten dabei signifikante Anstiege zwischen +0,2 und +0,3 m sowie einen Anstieg des Surges um ca. 20%. In einem Vergleich von gegenwärtigen und möglichen zukünftigen Klimabedingungen in Verbindung mit Änderungen des MSL haben Lowe et al. (2001) statistisch signifikante Änderungen der Extremwasserstände nachgewiesen. Die Änderungen der Extremwasserstände wurden dabei maßgeblich durch die Meteorologie beeinflusst während Änderungen im MSL lediglich lineare Änderungen der Extrema hervorriefen. Vergleichbare Resultate wurden für die Britische (Lowe und Gregory, 2005) und die Niederländische Küste (Sterl et al., 2009) publiziert.

Tabelle 4: Vergleich der bisherigen Studien zum Einfluss des MSL Anstiegs auf Extremwasserstände.

Autoren	MSL	Kollektiv	Wasserstand	Bemerkung
Flather und Khandker (1993)	+2.0 m	1 Ereignis	-0.5m bis +0.25 m	Inkonsistent
Stengel und Zielke (1994)	+1.0 m	4 Ereignisse	Sign. unterschiedlich zum MSL	Inkonsistent
Kauker und Langenberg (2000)	+0.1 m	20 Jahre	Vernachlässigbar	Für die meisten Gridpunkte
Bruss et al. (2010)	+0.5 bis +1.0 m	1 Jahr (wenig Extrema)	±0.1 bis ±0.25 m relativ zum MSL	Inhomogen
Smith et al. (2013)	+0.5 bis +1.0 m	6 Ereignisse	Bis zum 3-fachen des MSL	Inkonsistent

13.3 Ziele dieser Studie

Die beiden vorherigen Unterkapitel zeigen, dass nur wenige Untersuchungen zum Einfluss des MSL Anstiegs auf Extremwasserstände in der Deutschen Bucht existieren. Alle bisherigen Untersuchungen schlussfolgern, dass Änderungen der Extremwasserstände primär im Anstieg des MSL begründet sind. Die Folgerungen wurden jedoch i. d. R. aus sehr kleinen Kollektiven abgeleitet, weshalb keine allgemeingültigen Aussagen möglich sind. Das übergeordnete Ziel der nachfolgenden Untersuchungen ist daher, den Einfluss möglicher Änderungen des MSL auf Extremwasserstände und die daraus abgeleiteten Wiederkehrintervalle im Bereich der Deutschen Bucht zu erfassen. Einige Studien haben neben dem MSL auch den Einfluss von meteorologischen Änderungen auf Extremwasserstände untersucht. Da die Unsicherheiten im Zusammenhang mit möglichen meteorologischen Änderungen z. Zt. jedoch noch verhältnismäßig hoch sind, werden im Folgenden lediglich Änderungen des MSL berücksichtigt. Auf Basis der in Abschnitt 7 gegebenen Empfehlungen zur Durchführung extremwertstatistischer Analysen werden alle Extremwasserstände (d. h. alle Schwellenwertüberschreitungen des 99,7-Perzentils) zwischen 1970 und 2009 berücksichtigt. Hieraus resultiert ein Sturmflutkollektiv von insgesamt n=65 Ereignissen (nach Declustern). Neben dem übergeordneten Ziel werden dabei folgende Aspekte untersucht:

(1) Änderungen der Thw-Scheitel
(2) Änderungen der Thw- Eintrittszeiten
(3) Änderungen der Thw Verteilungen
(4) Änderungen der Partialtiden
(5) Die räumliche Verteilung der beobachteten Änderungen

14 Veränderungen in den Antriebskräften

14.1 Änderungen der Tide

Zur Charakterisierung der vorherrschenden Tideverhältnisse wird i. d. R. der Tidehub (Thb), d. h. die Differenz zwischen dem Thw und Tnw, verwendet. Im Bereich der Deutschen Bucht haben Jensen et al. (1992) sowie Jensen und Mudersbach (2007) auf Basis von Pegelmessungen große Anstiege des mittleren Tidehub (MThb) ermittelt. Diese Erkenntnisse sind von großer Bedeutung, da Anstiege im MThb zu verstärkter Erosion führen können. Im Rahmen von Modellstudien konnte darüber hinaus gezeigt werden, dass Änderungen des MSL zu einer Zunahme des MThb in der Deutschen Bucht führen (siehe Flather und Williams, 2000).

Die Änderungen der Tide betreffen jedoch nicht nur den Thb, sondern spiegeln sich auch in den zugrunde liegenden Partialtiden wider. Auf Basis von Beobachtungsdaten konnten z. B. für den Golf von Maine (Ray, 2006), den östlichen Pazifik (Jay, 2009) und die Ostküste Nordamerikas sowie die Bermuda Region (Ray, 2009) Veränderungen in den Partialtiden beobachtet werden. Auch im Bereich der Deutschen Bucht konnten Veränderungen der Partialtiden beobachtet werden (siehe Woodworth, 2010). Darüber hinaus wurden diverse Modellstudien zu den Änderungen der Partialtiden infolge eines MSL Anstieges durchgeführt (siehe z. B. Flather und Khandker, 1993). Im Bereich der Deutschen Bucht haben Stengel und Zielke (1994) Änderungen in der Tidedynamik infolge eines MSL Anstieges um +1,0 m untersucht. In einzelnen Bereichen wurden dabei Änderungen des Thb um mehr als 30% ermittelt. Die größten Änderungen traten dabei im Bereich der Elbe auf. Auch in Plüß (2004) wurde der Einfluss des MSL Anstiegs um +1,0 m auf die Tide in einem numerischen Modell untersucht; die simulierte Periode umfasst ca. 14 Tagen. Dabei wurde ein leichter Anstieg der dominanten M_2 Gezeit festgestellt, welcher die in den Ästuaren um bis zu +0,05 m betrug. Für die M_4 konnte Plüß (2004) keine signifikanten Änderungen feststellen, jedoch geringfügig abnehmende Amplituden im direkten Küstenvorfeld; gleiches gilt für die M_6, jedoch mit geringeren Amplituden.

14.2 Änderungen des meteorologischen Antriebs

In Küstengebieten stellen Sturmfluten die mitunter größten geophysikalischen Bedrohungen dar, welche oftmals mit signifikanten monetären Schäden sowie mit Personenschäden einhergehen (von Storch und Woth, 2008). Sturmfluten resultieren aus der Reaktion des Wasserstandes auf lokale und großräumige meteorologische Kräfte. Im Allgemeinen lassen sich Stürme in tropische- und extratropische Stürme (z. B. im Bereich der Deutschen Nordsee) differenzieren. In der Deutschen Bucht werden Sturmfluten i. d. R. durch starke

Nordseewinde (>25 m/s) mit Windrichtungen zwischen Nord und West verursacht (Jensen und Müller-Navarra, 2008).

In einer Reihe unterschiedlicher Publikationen wurden jüngst Trends in den mittleren und extremen Winden in der Nordsee untersucht. So konnte aus geostrophischen Winden der südlichen Nordsee zwischen 1876 und 1989 (Schmidt und von Storch, 1993) und aus Luftdruckaufzeichnungen an zwei schwedischen Messstationen zwischen 1780 und 2002 (Bärring und von Storch, 2004) ein erhebliches Maß an interannualer sowie dekadischer Variabilität nachgewiesen werden. Dabei ließen sich jedoch keine signifikanten Langzeittrends nachweisen. Anhand von 13 niederländischen Messreihen von oberflächennahen Winden konnten Smits et al. (2005) nachweisen, dass die extremen Windgeschwindigkeiten pro Dekade um bis zu 10% abgenommen haben. Paradoxerweise konnten sie aus Reanalysedaten, welche die gleiche Periode und Region abdecken, ableiten, dass die extremen Windgeschwindigkeiten pro Dekade um bis zu 20% zugenommen haben. Smits et al. (2005) erklären diese Diskrepanz mit Inhomogenitäten in den Reanalysedaten, schließen Überschätzungen aus den Beobachtungsdaten jedoch auch nicht aus. Daneben existieren weitere Veröffentlichungen, die eine unterschiedliche Entwicklung zwischen Beobachtungs- und Reanalysedaten thematisieren (siehe z. B. Seneviratne et al., 2012 und die darin enthaltenen Referenzen). Anhand von Reanalysedaten des 20th Century Reanalsis Projekt (20 CR; Compo et al.; 2011), zeigen Donat et al. (2011) einen signifikanten Anstieg der jährlich stärksten (AMAX) Stürme über Europa und schlussfolgern, dass dieser Trend zumindest teilweise durch den Anstieg der Treibhausgasemissionen der letzten Dekaden verursacht wurde. Krüger et al. (2013) begründen die Trends dagegen primär durch die geringeren Datenmengen und die größeren Inkonsistenzen, die vor 1950 in den Reanalysedaten Eingang finden (siehe hierzu auch Wang et al., 2013). Diese Aussagen wurden von Dangendorf et al. (under review) anhand der Pegelmessung am Standort Cuxhaven bestätigt. Darüber hinaus wurde gezeigt, dass die Surges seit 1843 keine signifikanten Langzeittrends aufweisen.

Einige weitere Veröffentlichungen thematisieren die Veränderungen in den nordatlantischen Sturmpfaden (siehe z. B. Weisse et al., 2011 und die darin enthaltenen Veröffentlichungen), mit abnehmenden Sturmhäufigkeiten und nahezu konstant bleibenden Intensitäten in den mittleren Breiten, welche in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts durch interannuale und dekadische Variabilität überlagert werden. Für die gleiche Periode wurden für die höheren Breiten, d. h. nördlich von 60°N, eine Zunahme der Sturmintensitäten und Häufigkeiten detektiert. Auf Basis von Reanalysedaten konnten Siegismund und Schrum (2001) eine Verlagerung starker Südwestwinde vom späten Herbst in den früheren Frühling nachweisen. Diese Verlagerung ist konsistent mit den Veränderungen der Saisonalitäten im MSL (siehe Dangendorf et al., 2012).

14.3 Änderungen des mittleren Meeresspiegels (MSL)

Der Anstieg des mittleren Meeresspiegels ist einer der wichtigsten Aspekte aktuell diskutierter Klimaveränderungen (Woodworth et al., 2001; Wahl et al., 2013). Zu diesem Thema wurde eine Fülle an Studien verfasst, welche den MSL auf globaler sowie regionaler Ebene untersuchen (siehe z. B. Church und White, 2006; Woodworth et al., 2009; Wöppelmann et al., 2008 und 2009; Haigh et al., 2009; Wahl et al., 2010 und 2011 und 2013). All diese Studien zeigen, dass der MSL in beträchtlichem Maße durch regionale Variabilität überlagert wird (siehe z. B. Church et al., 2004 und 2008; Dangendorf et al., 2012 und 2013a), welche u. a. durch regionale meteorologische, ozeanografische- und Gravitationseffekte verursacht werden (siehe z. B. Wahl et al., 2013 für einen Überblick der relevanten Faktoren in der Nordsee). Für Planungs- und Managementaufgaben ist der regionale bzw. lokale MSL die entscheidende Größe (Nicholls, 2011) und es kann angenommen werden, dass auch zukünftige Änderungen des MSL durch starke Variabilität überlagert werden (Wahl et al., 2011 und 2013). Projektionen eines möglichen zukünftigen MSL wurden bereits auf globaler (siehe Meehl et al., 2007 für einen Überblick; Rahmstorf, 2007; Vermeer und Rahmstorf, 2009; Grinsted et al., 2010; Jevrejeva et al., 2010) sowie regionaler Ebene, z. B. für den Nordostatlantik (Katsman et al., 2008), entlang der britischen Küstenlinie (Lowe et al., 2009) sowie für die niederländische (Katsman et al., 2011) und norwegische (Simpson et al., 2012; Nilsen et al., 2012) Küstenlinie erstellt. Im fünften Zustandsbericht (AR5) des IPCC (Church et al., 2013) wird dabei prognostiziert, dass der globale MSL zwischen 0,26 und 0,82 m bis 2081-2100 relativ zu 1986-2005 ansteigen (durch regionale Variabilität überlagert) wird.

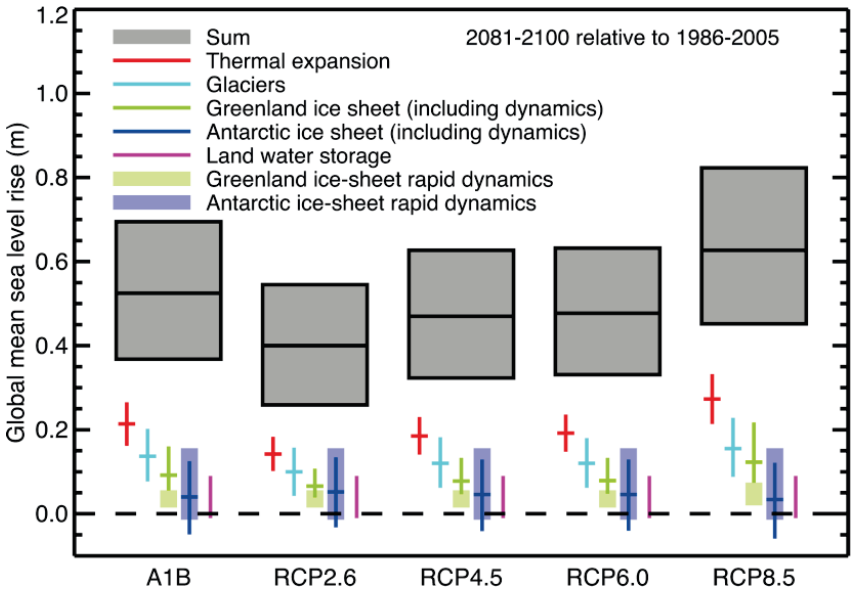


Abbildung 21: MSL Projektionen für 2081-2100 relativ zu 1986-2005 nach Church et al. (2013).

15 Analytische Betrachtung

Tidepegel messen die kombinierte und komplexe Antwort eines Wasserkörpers auf unterschiedliche Krafteinwirkungen. Nach Flather und Williams (2000) handelt es sich bei extremen Wasserständen um die Summe des Zusammenspiels zwischen dem MSL, der Tide, dem Surge sowie den nichtlinearen Interaktionen zwischen diesen Komponenten. In Tiefwasserbereichen können die nichtlinearen Effekte vernachlässigt werden, da diese erst lokal im Flachwasser erzeugt werden (Pugh, 1987). Die Einteilung des Wasserstandes in die o. g. drei Hauptkomponenten ist jedoch nur approximativ zulässig, da langperiodische Tiden (z. B. der saisonale Zyklus) und der MSL z. T. durch meteorologische Effekte beeinflusst werden, die jedoch nicht vollständig zu detektieren sind. So zeigt die mittlere Amplitude der dominanten M_2 Gezeit in der Nordsee z. B. eine saisonale Modulation zwischen 1% und 2%. Teile dieser Modulation werden durch astronomische Effekte induziert, während der verbleibende Anteil der Interaktion zwischen den Komponenten Tide und Surge (Pugh und Vassie, 1976) sowie saisonalen Schichtungen (Müller et al., in review) zugeschrieben wird.

Vereinfacht kann jede der o. g. Komponenten des Wasserstandes mit Hilfe von analytischen Ansätzen beschrieben werden. Hierbei handelt es sich jedoch i. d. R. um approximative Ansätze, welchen die komplexen Bedingungen (z. B. morphologisch, meteorologisch) im Küstenvorfeld vernachlässigen. Um diese komplexen Randbedingungen besser erfassen zu können, werden oftmals numerische Modelle verwendet (Pugh, 1987). Im Folgenden werden beide (d. h. analytische sowie numerische) Ansätze zur Ermittlung des Einflusses des MSL Anstiegs auf Extremwasserstände verwendet. In einem ersten Schritt werde potentielle Änderungen in den extremen Wasserständen unter Annahme eines MSL Anstiegs von +0,5 m analytisch erfasst. Hierdurch sollen die wichtigsten Antriebs- bzw. Einflussfaktoren identifiziert werden. Die nichtlinearen Interaktionen werden anschließend mit Hilfe eines numerischen Modells untersucht.

15.1 Relevante Prozesse

Bei der tideinduzierten Wasserstandsbewegung handelt es sich um die lokale Antwort des Wasserköpers auf die Gravitationskräfte des Mondes und der Sonne (Kamphuis, 2000). Im Tiefwasser ist das Tidespektrum eng mit dem Tidepotential verbunden (Le Provost, 1991). Bei der Fortpflanzung in die flacheren Bereiche des Kontinentalschelfs wird die Tide durch unterschiedliche Effekte deformiert. Hierdurch entstehen Oberschwingungen, die auch als Flachwassertiden bezeichnet werden (van Rijn, 2010). Das Tidespektrum der Nordsee wird durch semidiurnale Schwingungen (d. h. ca. zweimal am Tag) mit einer Periode von ~12 Stunden und 25 Minuten dominiert. Die größte tideerzeugende Kraft resultiert dabei vom Mond (M_2 Gezeit),

welche alle 14,78 Tage ein Maximum (Springtide) aufweist, wenn der Mond die geringste Distanz zur Erde aufweist. Durch Reibungseffekte treten Springtiden jedoch i. d. R. mit einer Verzögerung von zwei bis drei Tagen auf (van Rijn, 2010). Nach Proudman (1941) wird diese Verzögerung als „age of the tide“ bezeichnet.

Sowohl Tide als auch Surge gehören zur Klasse der sogenannten Schwerewellen (Flather und Kandkher, 2000). Unter Vernachlässigung der Sohlreibung konnten Airy und Lamb (1842) zeigen, dass die Geschwindigkeit c der Tidewelle, deren Amplitude klein ist im Vergleich zur Wassertiefe h (zusammengesetzt aus der Wassertief d und den Wellenamplitude η; siehe Abbildung 22) und deren Wassertiefe h klein im Vergleich zur Wellenlänge L ist, wie folgt approximiert werden kann:

$$c \approx \sqrt{g * h} \quad . \qquad \text{Formel 15.1}$$

Folglich ist die Fortschrittsgeschwindigkeit c der Tidewelle nur von der Wassertiefe h abhängig; g beschreibt dabei die Erdbeschleunigung in m/s². Mit steigendem MSL erhöht sich die Wassertiefe h, infolge dessen die Wellengeschwindigkeit zunimmt. Die Scheitel treten insgesamt früher ein.

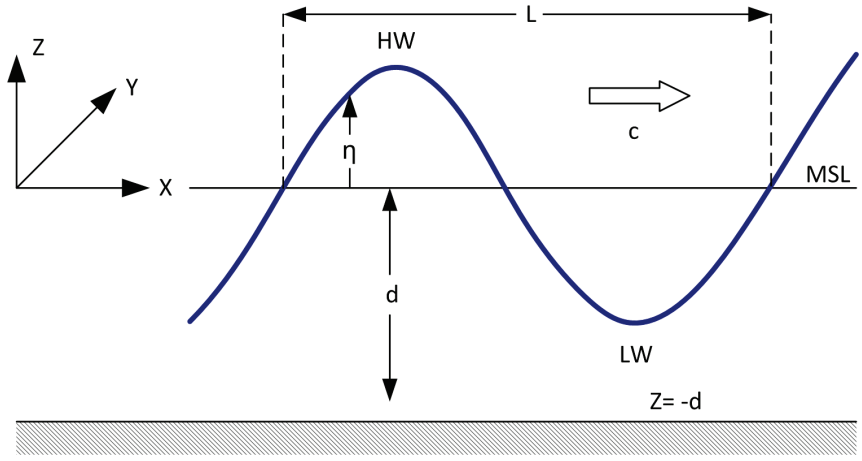


Abbildung 22: Nomenklatur.

Die Scheitelwerte des Wasserstandes werden als Tidehoch- (Thw) und Niedrigwasser (Tnw) bezeichnet. Die Differenz der beiden Scheitelwerte wird als Tidehub (Thb) bezeichnet. Im Bereich der Deutschen Bucht kann der Thb mehr als 3,0 m betragen (siehe z. B. Jensen, 1984; Wahl et al., 2011). Nach Formel 15.1 ist die Wellengeschwindigkeit der Tide proportional zur Wassertiefe h, wodurch zu Hoch- und Niedrigwasserzeiten (mit $c_{HW} > c_{LW}$) unterschiedliche Wellengeschwindigkeiten verursacht werden. Hierdurch wird die vormals sinusoidale Tidewelle deformiert. Die hieraus resultierende Asymmetrie kann durch höhere harmonische Schwingungen

der Haupttiden beschrieben werden (van Rijn, 2010). Dabei verursacht die Entstehung der höheren Harmonischen eine Reduktion der Amplituden von den Haupttiden. Nach Formel 15.1 würde ein Anstieg im MSL einer Reduzierung der Differenz zwischen c_{HW} und c_{LW} verursachen, wodurch insgesamt weniger Energie von den Haupttiden in die höheren Harmonischen übergehen würde.

Die Tidedeformation wird zusätzlich durch Shoalingeffekte, d. h. durch die Amplitudenerhöhung im Flachwasser, beeinflusst (siehe z. B. van Rijn, 2010). Dieser Effekt kann mit dem Energieerhaltungssatz beschrieben werden:

$$E(t) = \frac{1}{2} * \rho * g * A(t)^2 * \sqrt{g * h(t)} = const. \quad , \qquad \text{Formel 15.2}$$

wo ρ die Dichte des Wasser, g die Erdbeschleunigung, h die Wassertiefe und A die Amplitude der Tide beschreiben. Unter der Annahme einer konstanten Dichte mit ρ = g = konst., vereinfacht sich Formel 15.2 zu

$$A(t)^2 * \sqrt{h(t)} = const. \quad , \qquad \text{Formel 15.3}$$

und beschreibt das Verhältnis von Amplitude A zu Wassertiefe h. Wandert eine Tidewelle z. B. von einer Tiefe h1 = 20 m in einen flacheren Bereich mit h2 = 10 m (h1/h2 = 2), wächst die Amplitude um den Faktor f = 1,19 an (entnommen aus Pugh, 1981); durch den Anstieg des MSL um 0,5 m reduziert sich dieser Faktor auf f = 1,18 (mit h1/h2 = 1,95). Folglich wächst die Amplitude der Tidewelle mit abnehmender Wassertiefe an, jedoch bewirkt der Anstieg im MSL eine leichte Reduzierung dieses Amplitudenanwachses.

Die Tiden in der Nordsee werden durch Oszillationen des Nordatlantiks induziert. Dabei findet ein Energiestrom vom Tiefwasser des Atlantiks in die Schelfbereiche der Nordsee statt. Sowohl Tide als auch Surge werden durch Reibung beeinflusst. In den Flachwasserbereichen gewinnt die Sohlreibung zunehmen an Bedeutung. Aus numerischen Modelluntersuchungen konnte Flather (1976) zeigen, dass am nordwestlichen europäischen Kontinentalschelf eine erhebliche Energiedissipation erfolgt. In der Nordsee erfolgt die größte Energiedissipation jedoch in den flachen südlichen Bereichen und der Deutschen Bucht, wodurch systematische Veränderungen in den Tiden induziert werden (Pugh, 1981). Die durch Sohlreibung τ_b erzeugte Schubspannung lässt sich wie folgt beschreiben:

$$\tau_b = k\rho_w u^2 \quad . \qquad \text{Formel 15.4}$$

Dabei beschreibt k einen Reibungsparameter, ρ die mittlere Dichte des Wassers und u die resultierende Strömung (Flather und Kandkher, 2000).

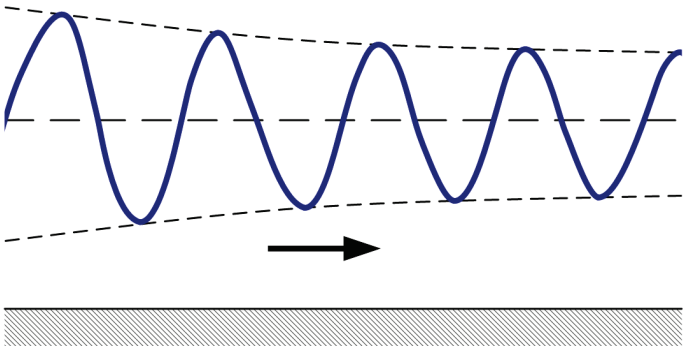


Abbildung 23: Reibungseinfluss auf die Tide.

Extreme Wasserstände resultieren u. a. aus dem barometrischen Druck und der Windschubspannung, die beide auf die Wasseroberfläche wirken. Die Wind induzierte Schubspannung auf die Wasseroberfläche ist definiert als

$$\tau_S = C_D \rho_a W^2 \quad , \qquad \text{Formel 15.5}$$

und berücksichtigt einen Schubspannungskoeffizienten C_D, die Windgeschwindigkeit W und die Dichte der Luft ρ_a (Pugh, 1981). Der Schubspannungskoeffizient ist dabei eine Konstante, die durch unterschiedliche Ansätze (z. T. auch als Variable in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit) beschrieben werden kann. Wu (1982) beschreibt den Schubspannungskoeffizienten z. B. als

$$C_D = \frac{0.8 + 0.0065 * W}{10^3} \quad , \qquad \text{Formel 15.6}$$

für alle Windgeschwindigkeiten zwischen W = 0 und W = 50 m/s.

Tide und Surge lassen sich mit Hilfe der gleichen dynamischen Gleichungen beschreiben (Flather und Kandkher, 2000). Da die horizontale Ausdehnung von Tide und Surge die Wassertiefe i. d. R. signifikant übersteigt, kann die Flachwassertheorie verwendet werden (siehe z. B. Nosov und Skachko, 2001). Bei den Flachwassergleichungen handelt es sich um ein einfaches, lineares Gleichungssystem für inkompressible Strömungen, welche tiefengemittelt Strömungen bei freien Oberflächen beschreiben (Vater und Klein, 2009). Die Flachwassergleichungen resultieren primär aus der 2D Kontinuitäts- und Impulsgleichung. Die Kontinuitätsgleichung (welche Volumenerhaltung postuliert) kann aus der Langrangschen Formulierung (d. h. ein Beobachter folgt einem Wasserpartikel durch Raum und Zeit) der Massenerhaltung hergeleitet werden

$$\frac{Dm}{Dt} = 0 \quad . \qquad \text{Formel 15.7}$$

Um die Eulersche Formulierung (d. h. ein Beobachter fokussiert einen spezifischen Ort, den ein Wasserpartikel passiert) der Kontinuitätsgleichung zu erhalten, wird das Koordinatensystem aus Formel 15.7 transformiert und die Boussinesq-Approximation wird angewendet. Durch die Boussinesq-Approximation wird die vertikale Koordinate eliminiert, wodurch die Volumenerhaltung in die Massenerhaltung überführt wird. Die daraus resultierende Kontinuitätsgleichung lautet

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial uh}{\partial x} + \frac{\partial vh}{\partial y} = 0 \quad , \qquad \text{Formel 15.8}$$

und beschreibt das Verhältnis zwischen den Wasserstandsänderungen und dem Ein- und Ausstrom an einem Kontrollvolumen.

Die Impulsgleichung basiert auf dem zweiten Newtonschen Gesetz

$$\frac{D\vec{u}}{Dt} = \sum \vec{f} \quad , \qquad \text{Formel 15.9}$$

welches den Bewegungszustand bzw. die Beschleunigung (linke Seite) eines Körpers infolge eines auf ihn wirkenden Impulses $\vec{f}$ (rechte Seite) beschreibt. Angewendet auf ein Kontrollvolumen in kartesischen Koordinaten folgt

$$\frac{D\vec{u}}{Dt} = \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + u\frac{\partial \vec{u}}{\partial x} + v\frac{\partial \vec{u}}{\partial y} \quad . \qquad \text{Formel 15.10}$$

Unter Berücksichtigung aller Kräfte (ausgenommen der Corioliskraft, die hier vereinfacht nicht dargestellt wird jedoch im Rahmen von Computermodellen berücksichtigt werden sollte) folgt ein System linearer Gleichungen

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u\frac{\partial u}{\partial x} + v\frac{\partial u}{\partial y} = -g\frac{\partial z_s}{\partial x} - \frac{1}{h}\frac{\vec{\tau}_{b_x}}{\rho_w} + \frac{1}{h}\frac{\vec{\tau}_{s_x}}{\rho_a} + f_{x,tide} \quad , \qquad \text{Formel 15.11}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u\frac{\partial v}{\partial x} + v\frac{\partial v}{\partial y} = -g\frac{\partial z_s}{\partial y} - \frac{1}{h}\frac{\vec{\tau}_{b_y}}{\rho_w} + \frac{1}{h}\frac{\vec{\tau}_{s_y}}{\rho_a} + f_{y,tide} \quad , \qquad \text{Formel 15.12}$$

in welchem Nichtlinearitäten durch den quadratischen Sohlreibungsterm (siehe Formel 15.4; Le Provost, 1991) und den zweiten und dritten Term in Formel 15.11 und Formel 15.12 induziert werden. In Formel 15.11 und Formel 15.12 wird die Sohlschubspannung τ_b und die Windschubspannung τ_s durch quadratische Terme beschrieben. Die resultierenden Kräfte pro Masse $\vec{f}$ sind dabei definiert als

$$\vec{f}_b = \frac{1}{h}\frac{\vec{\tau}_b}{\rho_w} \quad , \quad \text{Formel 15.13}$$

und

$$\vec{f}_S = \frac{1}{h}\frac{\vec{\tau}_S}{\rho_a} \quad , \quad \text{Formel 15.14}$$

und berücksichtigen den Kehrwert der Wassertiefe h. Beide Gleichungen implizieren, dass eine ansteigende Wassertiefe h die resultierenden Kräfte $\vec{f}$ auf den Wasserstand reduzieren.

In Abbildung 24 ist der relative Einfluss eines MSL Anstiegs von +0,5 m auf die Kräfte pro Masse $\vec{f}_S$ und $\vec{f}_b$ dargestellt. Die Abszisse zeigt den Wasserstand (bezogen auf den Fall MSL +0,0 m), die Ordinate den relativen Einfluss des MSL Anstiegs auf beide Kräfte. Die Abbildung zeigt, dass der MSL Anstieg den Einfluss von Sohl- und Windschubspannung auf den Gesamtwasserstand reduziert. Windschubkräfte haben dabei einen im Verhältnis stärkeren Einfluss als die Sohlschubspannung.

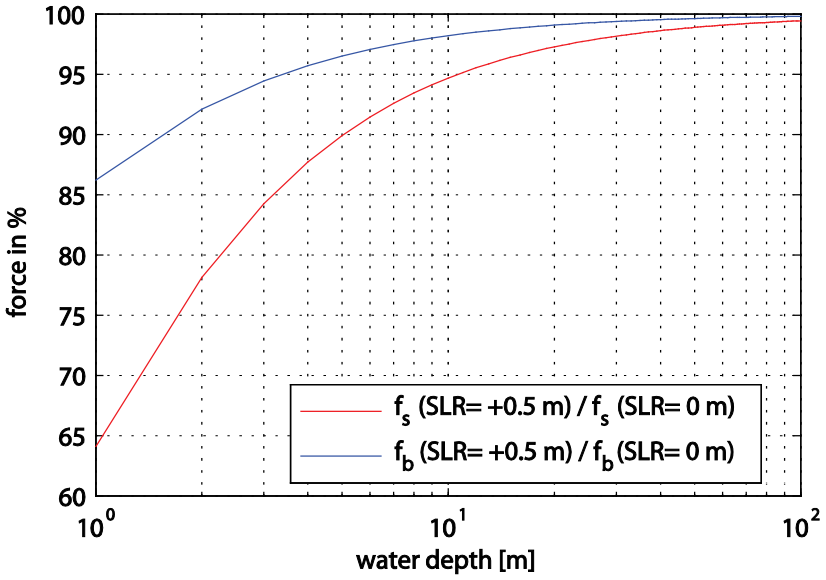


Abbildung 24: Relativer Einfluss der Wassertiefe bzw. des MSL Anstiegs auf die die Kräfte pro Masse $\vec{f}_S$ und $\vec{f}_b$.

16 Methodik

16.1 Numerisches Modell

Zur Untersuchung des Einflusses von MSL Änderungen auf Extremwasserstände im Untersuchungsgebiet bzw. der Deutschen Bucht wird das numerische Modell aus Abschnitt 10.1 verwendet.

16.2 Modellspezifikationen

Die verwendeten Modellspezifikationen können Tabelle 5 entnommen werden. Für die Untersuchungen wurden zwei Konfigurationen vorgenommen. Eine Konfiguration fokussiert die Deutsche Bucht (GBi) während die Andere die gesamte Nordsee (ENS) betrachtet. Durch die GBi Konfiguration soll der Einfluss von MSL Änderungen auf Extremwasserstände in den flachen Wattenbereichen untersucht werden. Die Ergebnisse der GBi Konfiguration wurden Äquidistant im Abstand von 1000 m entlang der gesamten Küstenlinie (wie in Abschnitt 10.1 beschrieben) ausgelesen; die Ergebnisse der ENS Konfiguration wurden an einem Raster ausgelesen, dass die gesamte Nordsee abdeckt und eine mittlere Punktweite von 0,5° (~1000 Punkte) aufweist. Hierdurch sollen die Bereiche der Nordsee detektiert werden, in denen die größten MSL induzierten Änderungen der Extremwasserstände stattfinden.

Tabelle 5: Gewählte Modellkonfigurationen.

Konfiguration		German Bight (GBi)		entire North Sea (ENS)	
Setup		Tide-Surge Run (TSR)	Tide Only Run (TOR)	Tide-Surge Run (TSR)	Tide Only Run (TOR)
Lauf	Kontrolllauf (0)	65 Ereignisse	65 Ereignisse	3 Ereignisse	3 Ereignisse
	MSL Szenariolauf (+)	65 Ereignisse	65 Ereignisse	3 Ereignisse	3 Ereignisse

In beiden Konfigurationen wurden entweder der astronomische (Tide Only Run bzw. TOR) oder der astronomische und der atmosphärische Antrieb (Tide-Surge Run bzw. TSR) berücksichtigt. In der GBi Konfiguration wurden das TOR- und das TSR Setup zur Simulation von insgesamt n=65 Extremereignissen zwischen 1970 und 2009 verwendet (Kontrolllauf). Als Extremereignisse wurden alle Schwellenwertüberschreitungen des 99,7-Perzentils (siehe Abschnitt 7) verwendet. Als Referenzstandort wurde der Pegel Hörnum verwendet. In der ENS Konfiguration wurden ebenfalls beide Setups verwendet, jedoch wurden aufgrund der längeren Rechenzeit lediglich 3 Ereignisse (01/1976, 11/1981, und 12/1999) simuliert.

Zusätzlich wurde ein Szenariolauf zum MSL Anstieg durchgeführt. Hierdurch sollen zukünftige Extremwasserstände besser abgeschätzt werden können. Im jüngsten Bericht des IPCC (AR5) wurden regionale MSL Projektionen veröffentlicht. Die Auflösung der dort verwendeten Modelle ist für Randmeere wie die Nordsee jedoch nach wie vor relativ grob. Auf Basis der globalen Projektionen des AR5 wurde für die im Folgenden durchgeführten Studien ein MSL Anstieg von +0,5 m angesetzt. Zusätzlich wurden vertikale Landbewegungen mit ~0,44 mm/Jahr berücksichtigt (siehe Peltier, 2004), wodurch sich der Gesamtanstieg des Szenarios auf +0,54 m beziffert (eine detailliertere Beschreibung der Szenario Entwicklung kann Arns et al. (in revison) entnommen werden).

In Abschnitt 14.2 wurde gezeigt, dass mögliche meteorologische Änderungen gegenwärtig kontrovers diskutiert werden (siehe z. B. Weisse und von Storch (2009) sowie die darin enthaltenen Referenzen). Aus diesem Grund wird der meteorologische Modellantrieb im MSL Szenariolauf nicht verändert, d. h. alle Modellläufe verwenden den meteorologischen Antrieb des Kontrolllaufs zwischen 1970 und 2009. Eventuelle Änderungen zukünftiger meteorologische Verhältnisse könnten Extremwasserstände theoretisch jedoch zusätzlich beeinflussen (Woth et al., 2006). Im MSL Szenariolauf wurde somit angenommen, dass alle Randbedingungen (mit Ausnahme des MSL) exakt so sind, wie im Kontrolllauf. Lediglich der MSL wurde um +0,54 m erhöht, d. h. zu dem zwischen 1970 und 2009 aufgetretenen MSL hinzuaddiert. Hierdurch kann der Einfluss des MSL Anstiegs auf Extremwasserstände direkt quantifiziert und verglichen werden. In Abbildung 25 sind die relativen Tiefenänderungen infolge eines MSL Anstieges um +0,54 m im Vergleich zum MSL im Jahre 2009 (vereinfacht wurde die MSL Indexzeitreihe von Wahl et al. (2013) für die

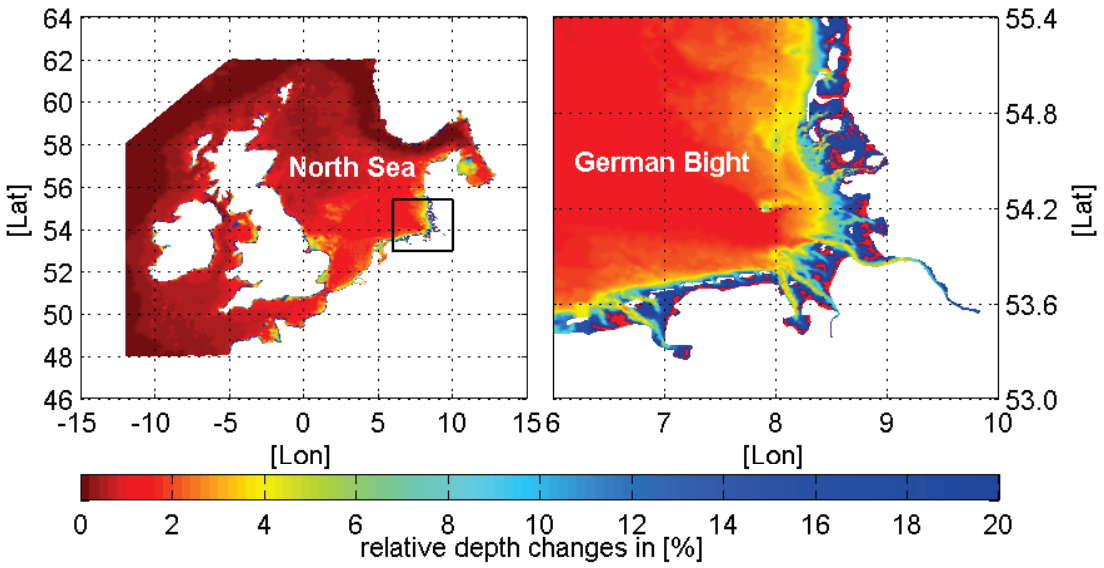


Abbildung 25: Relative Tiefenänderung duch einen MSL Anstieg von +0,54 m.

gesamte Nordsee angesetzt) dargestellt. Die farbliche Abstufung symbolisiert die Tiefenänderungen zwischen 0 % und 20 %. Die Abbildung zeigt, dass die größten relativen Tiefenänderungen in der südlichen Nordsee, der Irischen See, dem Ärmelkanal und der Südostküste Englands auftreten. Die größten Änderungen treten jedoch in der Deutschen Bucht auf (schwarzes Rechteck in Abbildung 25 links sowie in Abbildung 25 rechts), mit relativen Tiefenänderungen um bis zu 20 %. Zudem verursacht der MSL Anstieg, dass vormals trocken liegende Bereiche überflutet werden. Hierdurch wird die Anzahl der nassen Zellen im Modellgebiet erhöht.

16.3 Tideanalyse

Das Tidesignal kann als eine Reihe von harmonischen Schwingungen betrachtet werden. An den offenen Modellrändern wird das numerische Modell durch acht primäre Partialtiden angetrieben (siehe Abschnitt 10.1), welche für einen Großteil der diurnalen und semidiurnalen Tideenergie verantwortlich sind (Foreman et al., 1995). Aufgrund nichtlinearer Effekte, welche aus Flachwassereffekten und Reibung resultieren, erzeugt das Modell zusätzliche Obertiden (d. h. Tiden, die multiple Perioden der Haupttiden haben) sowie zusammengesetzte Tiden (lineare Kombinationen der Partialtiden). Dabei weist jede dieser Tiden eine eigene Amplitude und Frequenz auf. Im Hinblick auf die zugrunde liegenden Gleichungen resultieren die Nichtlinearitäten aus dem quadratischen Bodenreibungsterm und aus den advektiven Termen. Hierdurch werden Impuls und Energie von einer zur anderen Frequenz transferiert (Parker, 1991).

Le Provost (1976) zeigt, dass gerade Obertiden primär aus den Flachwassereffekten resultieren während die Reibung höherfrequente und ungerade Schwingungen verursacht. Zudem können Interaktionen höherer Ordnung zusätzlich zur Entstehung von Partialtiden beitragen (Le Provost, 1991). Die tidebedingten Wasserstandsschwankungen können durch die Summation der einzelnen Partialtiden beschrieben werden

$$tide = \sum_{n=1}^{N} A_n * cos(\sigma_n - g_n) \quad . \qquad \text{Formel 16.1}$$

Dabei entspricht A_n den Amplituden, σ_n der Winkelgeschwindigkeit und g_n der Phasenverschiebung bezogen auf Greenwich (siehe z. B. Godin, 1972; Foreman, 1977; Pugh, 1987). Diese Gleichung beschreibt die unterschiedlichen Partialtiden aus linearen und nichtlinearen Prozessen. Um den Einfluss des MSL Anstiegs auf die Tideantwort zu untersuchen, wurde für jede einzelne Sturmflut eine Tideanalyse mit Hilfe des Matlab Tools t-tide (Pawlowicz et al., 2002) durchgeführt. Dabei wurden nur die Tiden (siehe Tabelle 6) berücksichtigt, die eindeutig von ihren

Nachbartiden zu separieren waren (Rayleigh Kriterium) und eine Periode von mindestens dem zweifachen Sampling Intervall aufweisen (Nyquist Kriterium, siehe z. B. Pugh, 1987).

Tabelle 6: In der Tidenanalyse untersuchte Tide.

Tide	K_1	M_2	M_3	M_4	M_6	M_8	$2MK_5$	$3MK_2$
Nonlinear*	no	no	no	yes	yes	yes	yes	yes

* Nichtlinearitäten resultieren aus dem quadratischen Bodenreibungsterm und der Advektion (Le Provost, 1991).

Zur Modellvalidierung zeigt Abbildung 26 den Vergleich zwischen den Partialtiden am Standort Wittdün (gemäß Tabelle 6), die aus den Pegelmessungen ermittelt wurden und denen, die aus dem Kontrolllauf des Modells resultieren. Die Haupttiden K_1 und M_2 sowie die höheren Harmonischen (M_3, M_4, M_8) zeigen eine gute Übereinstimmung (siehe blaue Kreuze). Die M_6 und die Reibungstiden $3MK_7$ und $2MK_5$ (rote Kreuze) werden im Modell geringfügig unterschätzt, jedoch werden hierdurch die wesentlichen Resultate und Schlussfolgerung voraussichtlich nicht beeinflusst.

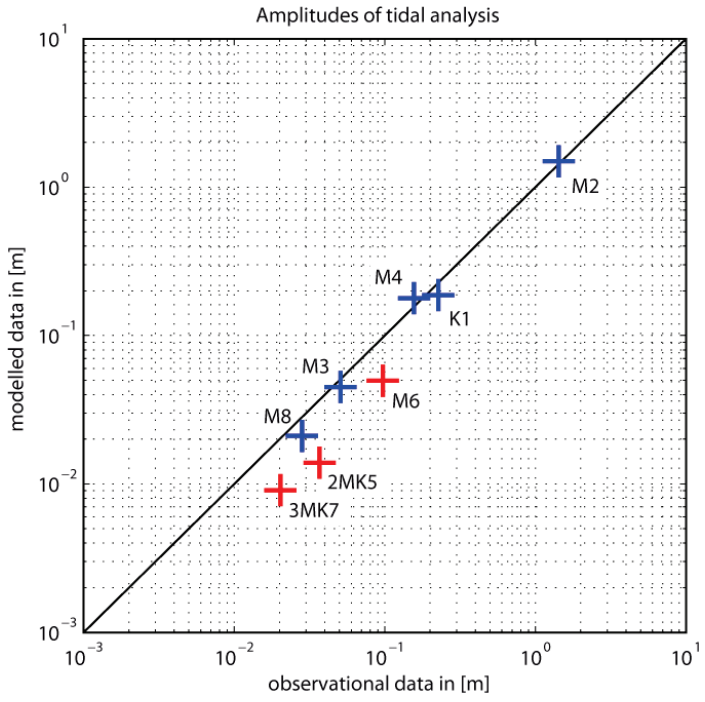


Abbildung 26: Vergleich der Tideamplituden aus den beobachteten und den modellierten Wasserständen.

16.4 Extremwasserstände

Die Ermittlung der Extremwasserstände erfolgt wie in Abschnitt 7 beschrieben. Die Differenzen der Extremwasserstände des Kontroll- und des MSL Szenariolaufs wurden, wie in Abbildung 27 dargestellt, anhand der theoretischen Verteilung ermittelt.

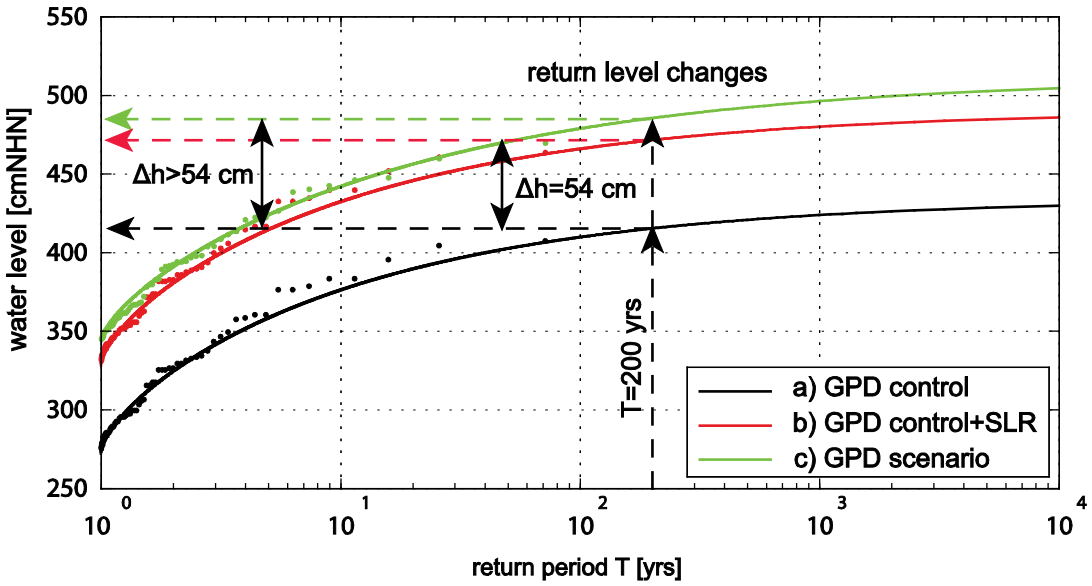


Abbildung 27: Vorgehensweise zur Ermittlung der Änderungen in den Extremwasserständen.

17 Ergebnisse

17.1 Änderungen der Thw infolge des MSL Anstiegs

Die Änderungen der Thw infolge des MSL Anstiegs wurden mit Hilfe der GBi Konfiguration unter Verwendung beider Setups (d. h. TOR und TSR) untersucht. Die Differenzen zwischen den Thw des Kontrolllaufs und den Thw des Szenariolaufs (im Folgenden als Wasserstands Residuen bzw. h Residuen bezeichnet), sind in Abbildung 28a und Abbildung 28c dargestellt und wurden wie folgt ermittelt:

$$h\ Residuen = \sum_{i=1}^{65} Thw_{i,(+)} - Thw_{i,(0)} - MSL \quad . \qquad \text{Formel 17.1}$$

Die Abbildungen zeigen den Mittelwert aus allen n=65 Ereignissen. Aus den Farbbalken lassen sich die Höhen der Wasserstands Residuen entlang der nördlichen Deutschen Bucht ableiten. Dabei deuten blaue Punkte auf negative Residuen (d. h. die Thw der Extremwasserstände steigen

geringer als der MSL) und rote Punkte auf positive Residuen hin (d. h. die Thw der Extremwasserstände steigen stärker als der MSL); ein linearer Zusammenhang zwischen dem MSL und den Extremwasserständen (d. h. Wasserstands Residuen von ~0) wird durch weiße Punkte gekennzeichnet. Nicht signifikante Residuen (d. h. Residuen, die im 95% Konfidenzintervall (CIs) nicht unterschiedlich von null sind) werden durch schwarze Punkte symbolisiert. Abbildung 28a zeigt, dass die Wasserstands Residuen im TSR Setup generell größer null sind und an den meisten Standorten signifikant positive Werte aufweisen. Die größten Änderungen finden sich dabei im Bereich des Schleswig-Holsteinischen Wattenmeeres, wo die Wassertiefe sehr gering ist (vgl. Abbildung 25).

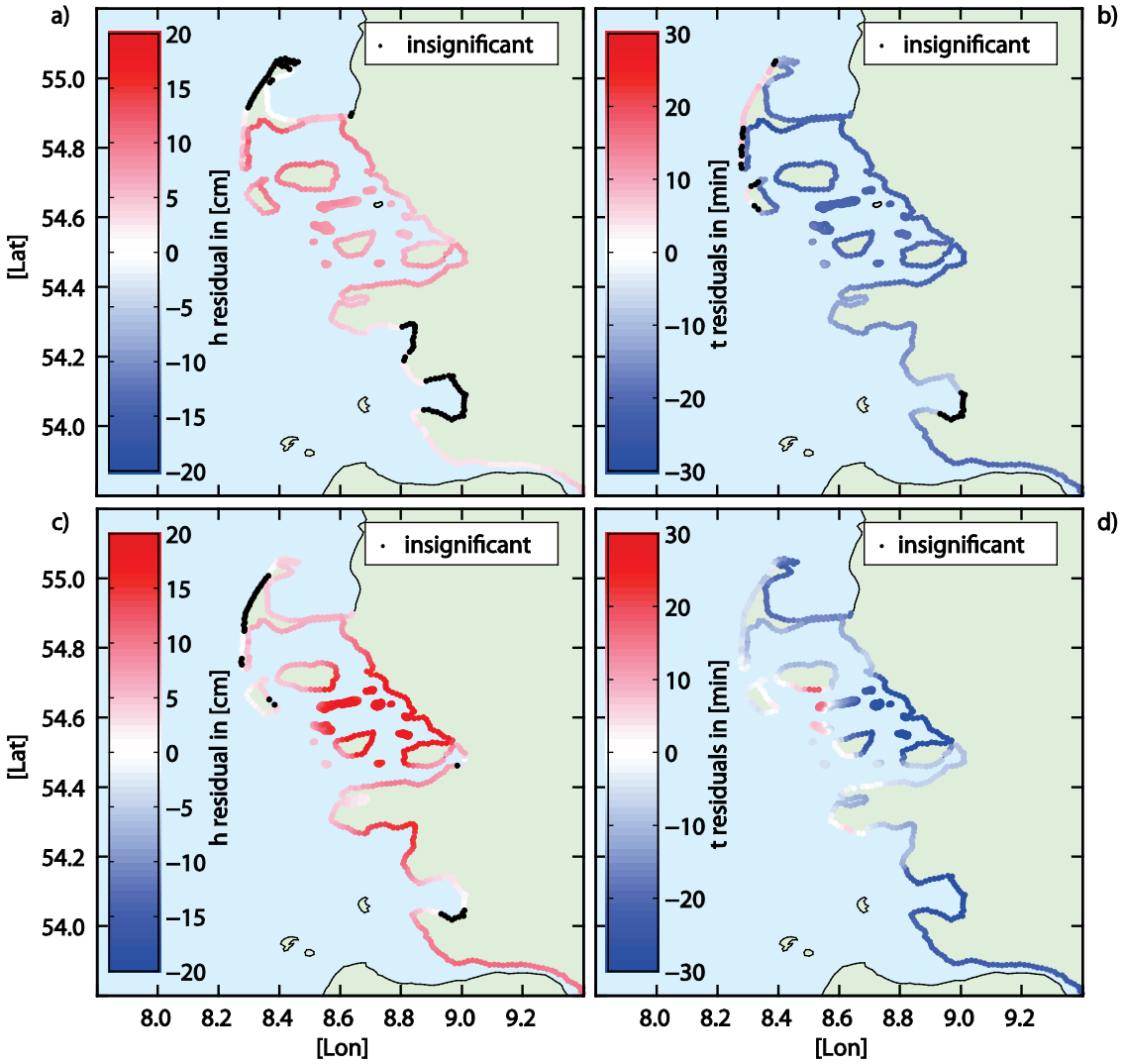


Abbildung 28: Verteilung der h Residuen im TSR Setup (a) und im TOR Setup (c); Verteilung der t Residuen im TSR Setup (b) und im TOR Setup (d).

Nach Formel 15.14 verursacht ein Anstieg des zugrunde liegenden Wasserstandes eine Reduzierung des Surge. Finden dabei keine Änderungen in den Tiden statt und werden keine zusätzlichen nichtlinearen Effekte induziert, sollte der Sturmflutwasserstand insgesamt geringer ansteigen als der MSL. Die Sensitivitätsstudie zeigt jedoch, dass Sturmflutwasserstände stärker ansteigen als der berücksichtigte MSL. Daher wird geschlussfolgert, dass die Wasserstands Residuen aus nichtlinearen Effekten und der Tide resultieren.

Um den Einfluss des MSL Anstiegs auf die Tiden zu untersuchen, wurde ein zweiter Modellauf unter Berücksichtigung des TOR Setups durchgeführt. Abbildung 28c zeigt die Ergebnisse dieses Laufs; die Farbcodierungen wurden wie zuvor beschriebenen gewählt. Wie zuvor verursacht der TOR Setup lediglich positive Wasserstands Residuen, deren Maximum im Bereich des Schleswig-Holsteinischen Wattenmeeres und insbesondere im Bereich der Halligen zu finden ist. Die Ausprägung der Residuen ist jedoch bis zu dreimal so hoch wie im TSR Setup. Folglich verursacht der Anstieg des MSL im Untersuchungsgebiet eine nichtlineare Erhöhung der Tide. Im TSR Setup wird dieser Effekt z. T. durch die Reduktion des Surge kompensiert. Die verbleibenden Wasserstands Residuen werden vermutlich durch eine Abnahme von Reibungs-, Deformations- und Dämpfungseffekten verursacht, welche einen direkten Einfluss auf die Tidecharakteristika haben.

17.2 Änderungen in den Thw-Eintrittszeiten infolge des MSL Anstiegs

Die Änderungen der Thw-Eintrittszeiten infolge des MSL Anstiegs wurden mit Hilfe der GBi Konfiguration unter Verwendung beider Setups (d. h. TOR und TSR) untersucht. Die Differenzen zwischen den Thw-Eintrittszeiten des Kontrolllaufs und den Thw- Eintrittszeiten des Szenariolaufs (im Folgenden als Residuen der Thw-Eintrittszeiten bzw. t Residuen bezeichnet), sind in Abbildung 28b und Abbildung 28d dargestellt und wurden wie folgt ermittelt:

$$t\ residuals = \sum_{i=1}^{65} t_{i,(+)} - t_{i,(0)} \quad . \qquad \text{Formel 17.2}$$

Die Abbildungen zeigen die t Residuen des TSR und des TOR Setups; die Farbcodierung wurde wie in Abschnitt 17.1 gewählt, jedoch wurde die Dimension in Minuten geändert. Die t Residuen zeigen insgesamt ein ähnliches Muster wie die h Residuen. Dabei sind die t Residuen im TSR Setup generell negativ. In Anlehnung an Formel 15.1 folgt diese Veränderung aus der Zunahme der Tidewellengeschwindigkeit, die aus der Wasserstandszunahme resultiert (d. h. die Thw-Scheitel treffen früher ein). Vergleichbare Ergebnisse wurden für den TOR Setup detektiert und auch hier fanden die größten Veränderungen im Umfeld der Halligen statt.

17.3 Räumliche Verteilung und Ursprungsort der Änderungen

Um die Regionen zu identifizieren, in denen die h und t Residuen besonders groß sind, wurde die NST Konfiguration verwendet. Die Simulationen wurden dabei sowohl mit dem TSR Setup (hier nicht dargestellt) als auch mit dem TOR Setup für insgesamt drei unterschiedliche Sturmfluten (1976, 1981, 1999) durchgeführt. Die h Residuen nach Formel 17.1 für den TOR Setup sind in Abbildung 29 dargestellt. Die Farbskala berücksichtigt dabei Werte zwischen -6 (blau) und +6 cm (rot); h Residuen, die einen Wert von |h| > 2.5 cm überschreiten werden zusätzlich

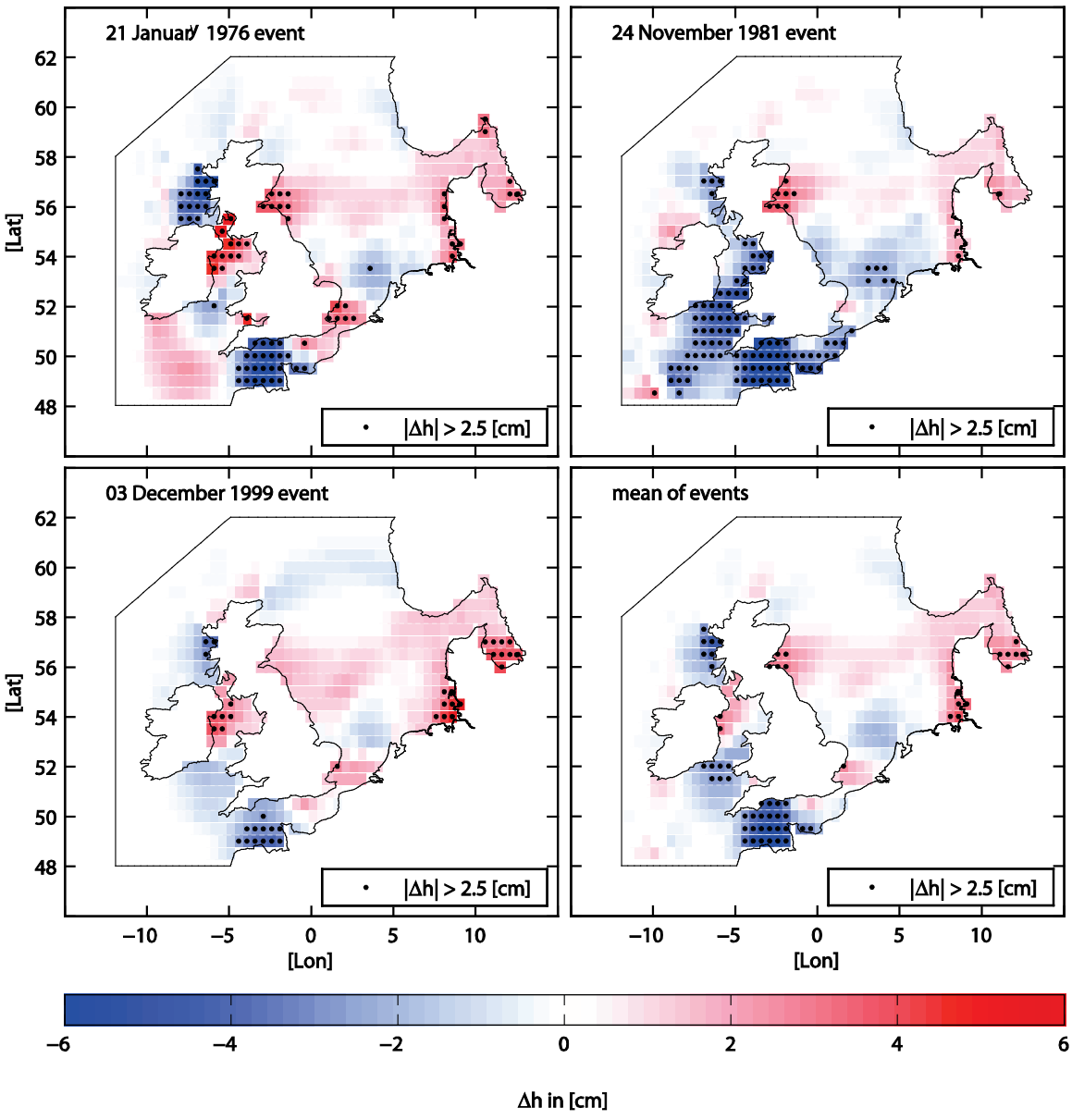


Abbildung 29: Räumliche Verteilung und Ursprungsort der Änderungen für die Ereignisse 1976, 1981, 1999 und der Mittelwert der Ereignisse.

mit einem schwarzen Punkt gekennzeichnet. Die Abbildung zeigt, dass die Wirkung von MSL Änderungen auf Extremwasserstände räumlich sehr unterschiedlich ist. Insgesamt treten die größten h Residuen im Bereich der Deutschen Bucht auf, während die niedrigsten h Residuen im Bereich der Schottischen Westküste und dem westlichen Teil des Ärmelkanals auftreten.

Im restlichen Teil der Nordsee treten insgesamt geringere Änderungen auf. Vergleicht man Abbildung 29 mit Abbildung 25, dann fällt auf, dass die größten h Residuen dort auftreten, wo die relativen Wasserstandsänderungen am größten sind. Vergleichbare Ergebnisse wurden im TSR Setup erzielt, wenngleich in geringerer Ausprägung (infolge der Reduzierung des Wasserstandes durch einen geringeren Surge, vgl. Abschnitt 17.1). Es wird daher geschlussfolgert, dass die Änderungen der Tiden primär in lokalen Veränderungen der relativen Wassertiefe begründet sind, wodurch insbesondere Flachwassereffekte beeinflusst werden. Durch den MSL Anstieg wird die Amplitude der Tide erhöht, wodurch ein nichtlinearer (d. h. ein stärker als durch den MSL begründeter) Anstieg der Extremwasserstände resultiert.

17.4 Änderungen in den Verteilungen der Thw

Die oben durchgeführten Analysen deuten an, dass die mittleren Tide-Amplituden durch die veränderte Wassertiefe beeinflusst werden. Um die Änderungen der Tide jedoch adäquat beschreiben zu können, ist nicht nur der Mittelwert, sondern auch die Streuung der betrachteten Größe von Interesse. Aus diesem Grund wurden die empirischen Verteilungen der h Residuen des TOR Setup an zufällig gewählten Punkten innerhalb des Untersuchungsgebietes ermittelt. Die zentrale Grafik von Abbildung 30 zeigt die h Residuen entlang der Schleswig-Holsteinischen Küstenlinie. Die blauen Kreuze symbolisieren die Standorte der außenliegenden Abbildungen; für alle Standorte (d. h. an allen außenliegenden Abbildungen) wurden der Mittelwert (Pfeil), der Modalwert (d. h. der Wert, der am häufigsten vorkommt; gestrichelter Pfeil) sowie eine parametrische Verteilungsfunktion der h Residuen dargestellt. Die Abbildung zeigt, dass die Verteilung der h Residuen infolge des MSL Anstiegs entlang der Küstenlinie sehr unterschiedlich ist. Dabei ist der Einfluss des MSL Anstiegs auf die nordwestlichen Bereiche (z. B. Standorte 1, 2, 4) geringer als auf die Bereiche im zentralen Untersuchungsgebiet (z. B. Standorte 3, 5, 7). Mit Hilfe eines Kolmogorov-Smirnov Test (KS-Test) konnte nachgewiesen werden, dass die h Residuen an den Standorten 2, 4, 10 und 12 normalverteilt sind; im Szenariolauf zeigen diese Standorte ansteigende Lageparameter. An den verbleibenden Standorten folgen die h Residuen dagegen einer GEV Verteilung, was systematische Änderungen in den Thw-Verteilungen impliziert. Bis auf Standort 1 zeigen auch hier alle Lageparameter einen Anstieg.

Um den Ursprung der Veränderungen zu detektieren, wird im Folgenden der Standort 3 (Dagebüll) näher untersucht. In Abbildung 31a sind die normierten Wasserstände des Kontroll- und

Szenariolaufs aus dem TOR Setup gegeneinander geplottet. Die Abbildung zeigt, dass die Wasserstände aus dem Szenariolauf im Mittel ~15,3 cm höher (zusätzlich zum MSL Anstieg) auflaufen als im Kontrolllauf. Weiterhin zeigt der Vergleich, dass die Szenariowasserstände mit einem Faktor von 1,08 überproportional zum Kontrollauf ansteigen. Folglich sind die Differenzen zwischen Szenario- und Kontrolllauf höher, wenn die astronomisch induzierte Tide höher ist (z. B. bei Springtide) und umgekehrt. In Abbildung 31c sind die Verteilungen der beiden Thw-Kollektive dargestellt; beide werden durch die GEV beschrieben und weisen eine negative Krümmung auf.

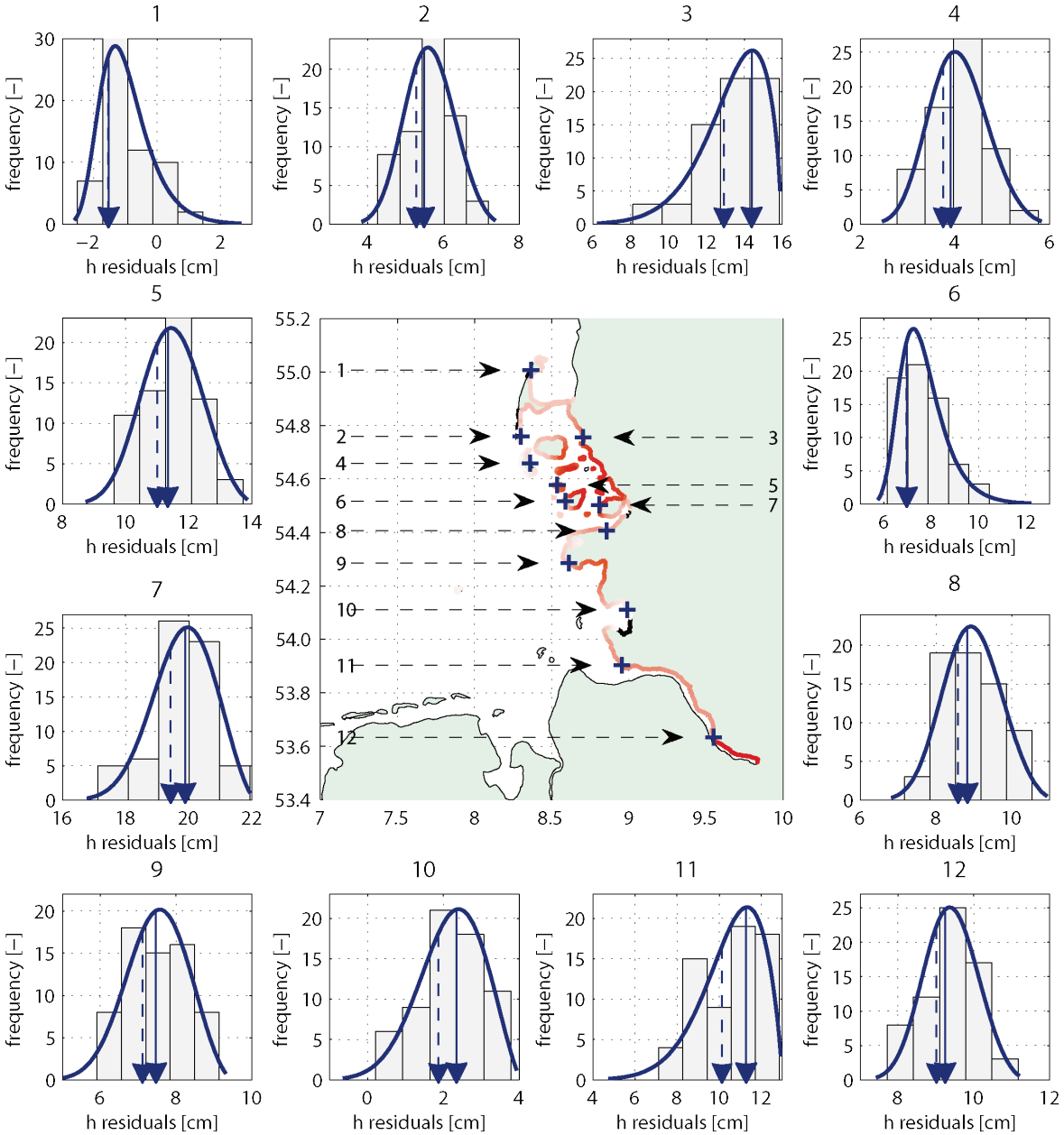


Abbildung 30: Verteilung der h Residuen an 12 zufällig gewählten Punkten entlang der Küstenlinie Schleswig-Holsteins; die zentrale Grafik zeigt die Lage der außenliegenden Abbildungen.

Diese Verteilung ist darin begründet, dass die meisten der n=65 berücksichtigten Sturmfluten während einer Springtide auftraten. Ein Vergleich beider Verteilungen (Szenario- und Kontrolllauf) zeigt, dass der MSL Anstieg den Formparameter der Verteilung (k) nur geringfügig beeinflusst; der Streuungsparameter (σ) steigt dagegen geringfügig an. Der größte Einfluss ist im Lageparameter (μ) zu beobachten und beläuft sich im vorliegenden Beispiel auf ~15 cm (vgl. Abbildung 31a).

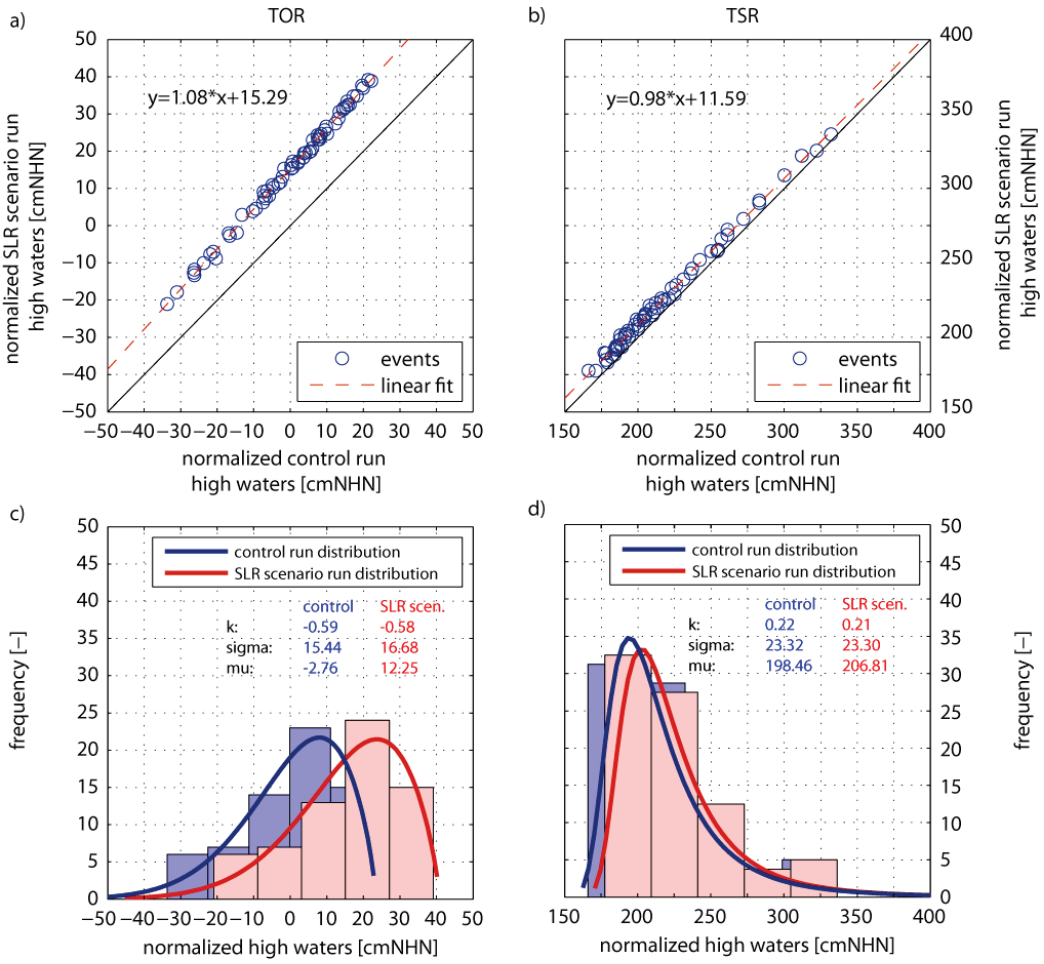


Abbildung 31: (a) normierte Wasserstände des Kontroll- und Szenariolaufs aus dem TOR Setup; (b) normierte Wasserstände des Kontroll- und Szenariolaufs aus dem TSR Setup; (c) Verteilungen der beiden Thw-Kollektive im TOR Setup; (d) Verteilungen der beiden Thw-Kollektive im TSR Setup.

In Abbildung 31b wurden die gleichen Untersuchungen wie oben durchgeführt, jedoch wurde dabei der TSR Setup verwendet. In diesem Fall sind die Wasserstände am Standort 3 im Szenariolauf im Mittel um ca. 11,6 cm höher als im Kontrolllauf. Gleichzeitig zeigen die Szenariowasserstände mit einem Faktor von 0,98 ein unterproportionales Verhalten gegenüber den Kontrollwasserständen. Abbildung 31d zeigt die Verteilung der beiden Kollektive. Diesmal werden die Kollektive jedoch durch die GEV mit positiver Krümmung beschrieben, was die Häufigkeit des

Auftretens extremer Ereignisse widerspiegelt. Sowohl Form- als auch Streuungsparameter sind nahezu unbeeinflusst durch den MSL Anstieg; der Lageparameter zeigt dagegen einen Anstieg um ~9,3 cm.

Ein Vergleich von Abbildung 31c und Abbildung 31d zeigt, dass die größten Anstiege der Extremwasserstände in der Tide begründet sind. Die meteorologische Komponente kompensiert diesen Effekt z. T., jedoch sind die resultierenden Wasserstände immer noch höher als durch den MSL Anstieg alleine zu erklären ist. Folglich ist die Surgereduzierung infolge der Wasserstandserhöhung geringer, als die Wasserstandszunahme durch Tideänderungen.

17.5 Änderungen in den Partialtiden

In Abschnitt 15 wurde gezeigt, dass Änderungen der Wassertiefe die Hydrodynamik beeinflussen und dass mit einem MSL Anstieg auch Veränderungen der Amplituden und Phasen von Tiden einhergehen (siehe Formel 16.1). In Abbildung 32 sind die Partialtiden aus der Tideanalyse (Pawlowicz, 2002) aller n=65 Ereignisse des Szenario- und Kontrolllaufs unter Verwendung des TSR Setup am Standort Wittdün dargestellt (d. h. Station 4 in Abbildung 30). Die Teilabbildungen a) bis h) zeigen alle acht Partialtiden, die das Rayleigh Kriterium erfüllt haben. Insgesamt zeigen die nichtlinearen Tiden (d. h. alle Tiden ausgenommen K_1, M_2 und M_3; siehe Tabelle 6) im Szenariolauf (d. h. bei gestiegenem MSL) abnehmende Amplituden, was darauf hindeutet, dass weniger Energie in diese Partialtiden übergeht. So zeigt die M_4 als Oberschwingung der M_2 im Szenariolauf eine deutliche Amplitudenreduzierung, die zudem mit einem Faktor von 0,7 von der Höhe des zugrunde liegenden Wasserstandes abhängt. Folglich ist der Einfluss des MSL Anstieges auf die Amplituden der M_4 bei insgesamt höheren Wasserständen stärker, bei Niedrigen dagegen weniger stark. Dies ist vermutlich auf den geringeren Einfluss von Deformationseffekten (Flachwassereffekten) zurückzuführen (siehe z. B. Parker, 1991). Ein ähnliches Verhalten kann für die M_8 beobachtet werden, jedoch sind die Größenordnungen kleiner. Eine Abnahme kann auch in den Amplituden der $2MK_5$ und $3MK_7$ beobachtet werden. Diese Abnahme in den Reibungstiden resultiert vermutlich aus der (zur Wassertiefe relativen) reduzierten Reibung; lediglich die Amplitude der M_6 zeigt einen geringen Anstieg. Es ist jedoch zu beachten, dass die Reibungstiden größere Unsicherheiten aufweisen und die Variabilität der beobachteten Änderungen im Vergleich zur absoluten Änderung sehr groß ist (insbesondere für die $2MK_5$ und die $3MK_7$).

Als Folge der Änderungen in den Obertiden zeigt die M_2 einen Anstieg um den Faktor 1,05; die Amplituden der K_1 und M_3 bleiben dagegen nahezu unverändert. In Abbildung 32i wurden alle Partialtiden gemäß Formel 16.1 überlagert. Die Abbildung zeigt, dass die Gesamtamplitude der Tide mit einem ansteigenden MSL zunimmt.

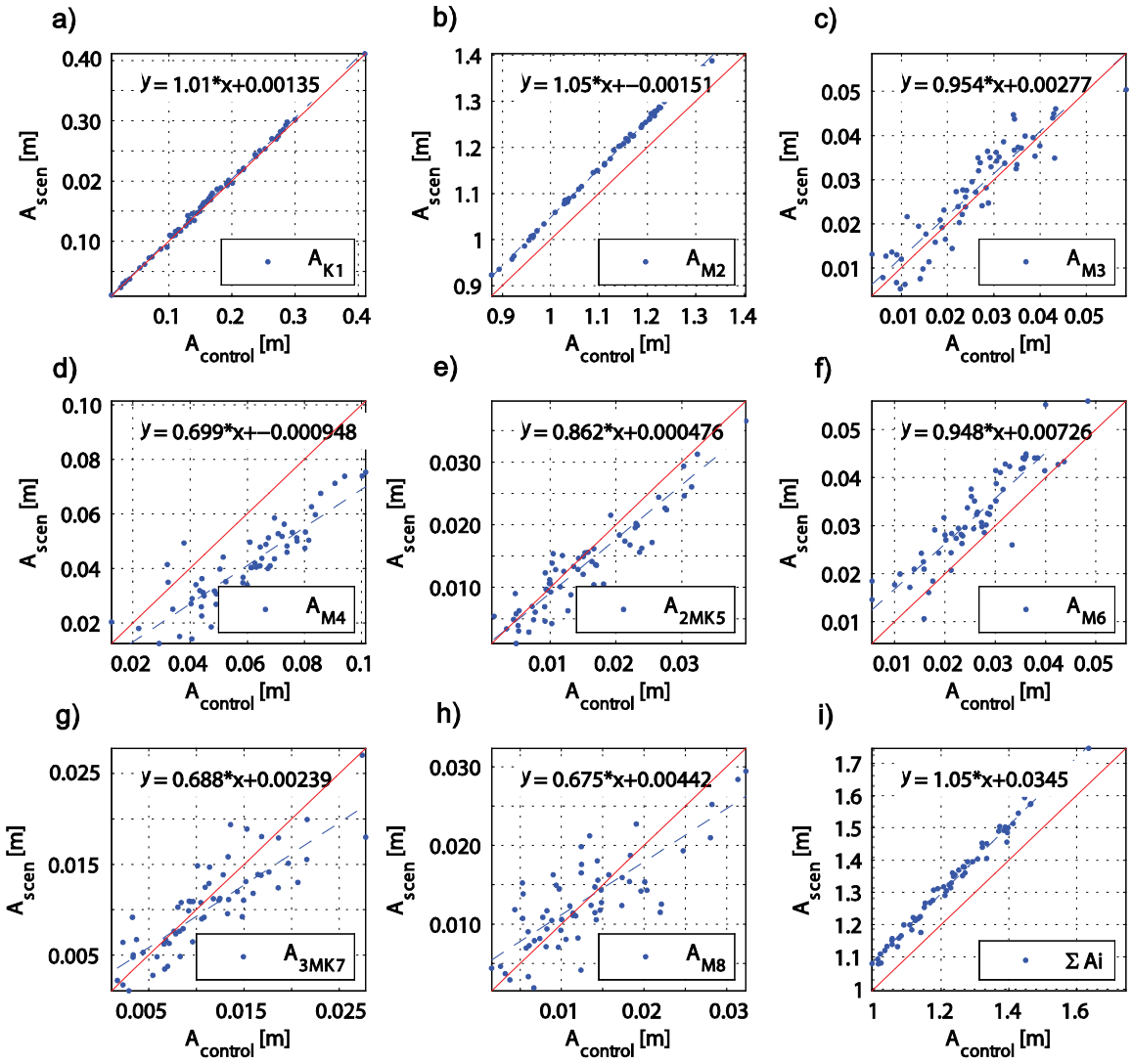


Abbildung 32: Tideanalyse (Pawlowicz, 2002) aller n=65 Ereignisse des Szenario- und Kontrolllaufs unter Verwendung des TSR Setup am Standort Wittdün für die Partialtiden nach Tabelle 6.

Aus den zuvor durchgeführten Analysen lassen sich Aussagen zu nichtlinearen Änderungen (infolge Reibung, Advektion, Kontinuität) in den Amplituden einzelner Partialtiden ableiten. Aus Abschnitt 15 wurde deutlich, dass Änderungen der Wassertiefe auch mit Änderungen der Wellengeschwindigkeit einhergehen. Hierdurch werden auch die Phasenverschiebungen (gegenüber Greenwich) beeinflusst. Diese Änderungen spiegeln sich jedoch nicht gleichmäßig in allen Partialtiden wider, sondern sind für jede Tide individuell. In einer Tidesynthese wie nach Formel 16.1, wo eine Superposition der Signale aus unterschiedlichen Partialtiden erfolgt, kann dies zu nichtlinearen Änderungen in den Tidewasserständen führen. In Abbildung 33 sind die Änderungen der Phasenverschiebung vom Kontroll- zu Szenariolauf am Standort Wittdün dargestellt. Die Abbildung zeigt die mittleren Änderungen der Phasenverschiebungen der acht Partialtiden (Punkte) sowie die zugehörigen Unsicherheiten (blaue Fehlerbalken); signifikante

Änderungen werden durch weiße Punkte symbolisiert. Bis auf die $2MK_5$ und die $3MK_7$ resultiert bei allen Tiden eine signifikante Reduzierung der Phasenverschiebung. Die Veränderung ist dabei jedoch nicht für alle Partialtiden homogen.

Werden die Phasenänderungen in der Tidesynthese berücksichtigt, ändert sich hierdurch auch das Gesamtsignal. Die schwarze Kurve in Abbildung 33b zeigt die Superposition aller acht Tiden unter Berücksichtigung der Amplituden und Phasen aus dem Kontrolllauf; die blaue Kurve zeigt selbiges für die Phasen aus dem Szenariolauf. Der Vergleich zeigt, dass der tideinduzierte Wasserstand durch Änderungen der Phasenverschiebung ansteigt. Die rote Kurve in Abbildung 33b resultiert aus den Phasen und Amplituden aus dem Szenariolauf. Dabei wird deutlich, dass die Änderungen der Amplituden den tideinduzierten Wasserstand zusätzlich erhöhen, wenngleich der Einfluss der Phasenverschiebung dominiert.

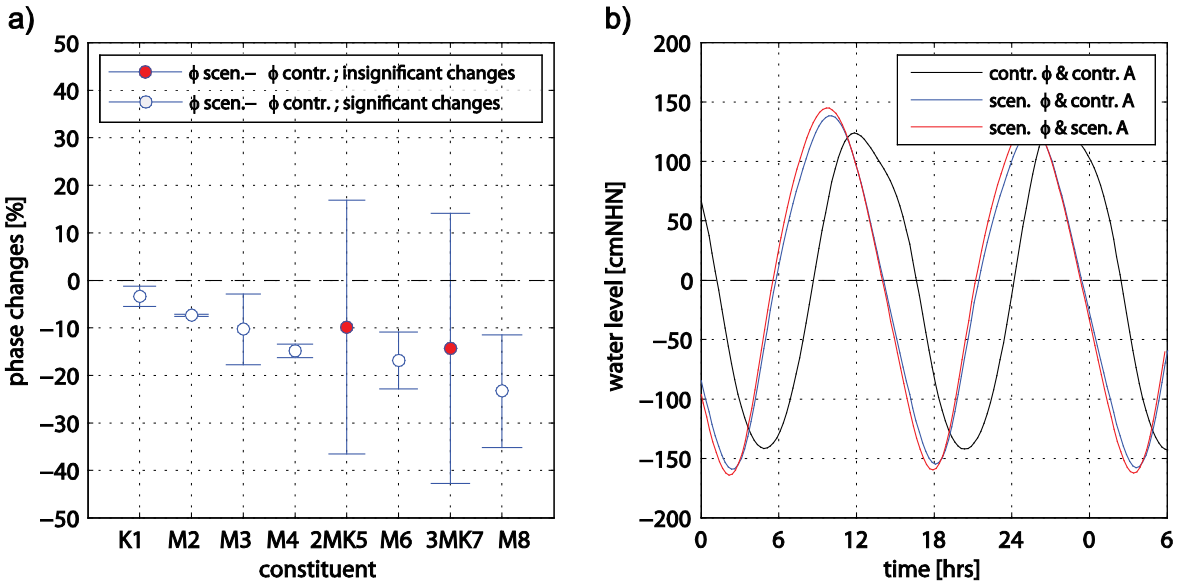


Abbildung 33: (a) Änderungen der Phasenverschiebung vom Kontroll- zu Szenariolauf am Standort Wittdün; (b) Superposition aller acht Tiden.

17.6 Einfluss auf die extremwertstatistische Analysen

Die vorherigen Kapitel haben gezeigt, dass ein ansteigender MSL in der Deutschen Bucht Änderungen in den astronomisch induzierten Wasserständen verursacht. Hieraus werden auch die Wiederkehrintervalle extremer Wasserstände beeinflusst. Die Wiederkehrintervalle in Abbildung 34a am Standort Wittdün zeigen die Schätzungen auf Basis des Kontrolllaufs (Datensatz (a); schwarze Kurve), auf Basis einer linearen Berücksichtigung der MSL Änderungen (Datensatz (b); blaue Kurve) und auf Basis des Szenariolaufs (Datensatz (c); rote Kurve). Die dargestellten

Plotting-Positionen (PLPs) wurden mit Hilfe der Gringorten Formel berechnet (siehe Abschnitt 4.5).

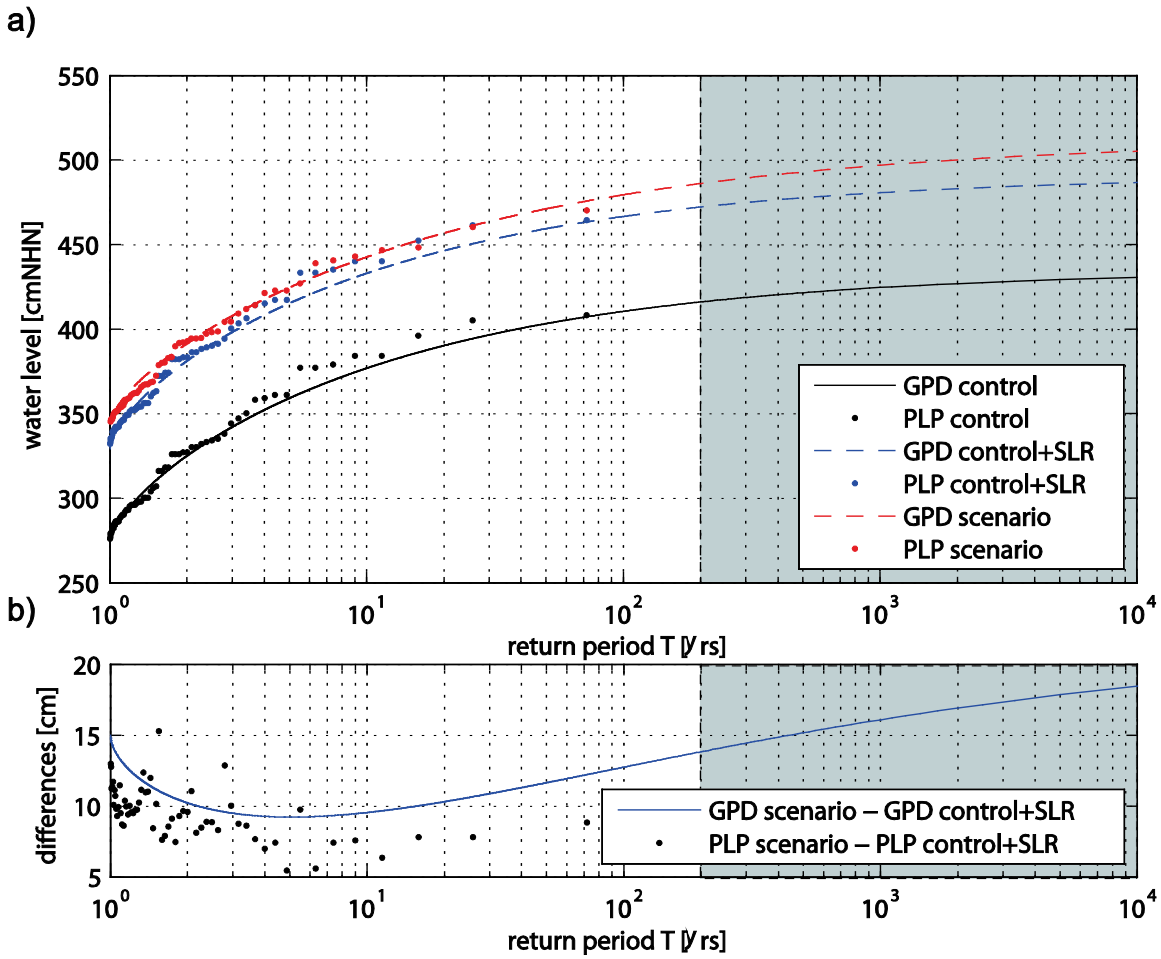


Abbildung 34: (a) Wiederkehrintervalle am Standort Wittdün auf Basis des Kontrolllaufs (schwarze Kurve), auf Basis einer linearen Berücksichtigung der MSL Änderungen (blaue Kurve) und auf Basis des Szenariolaufs (rote Kurve); (b) Differenzen aus den Wiederkehrintervallen der Datensätze (b) und (c).

In Abbildung 34b sind die Differenzen aus den Wiederkehrintervallen der Datensätze (b) und (c) dargestellt. Die Abbildung zeigt im MSL Szenario nichtlineare Änderungen in den Wiederkehrintervallen am Standort Wittdün. Kleinere Änderungen (d. h. in der Größenordnung ~10 cm) können für Überschreitungswahrscheinlichkeiten zwischen $P_{Ü} = 0.5$ [1/a] und $P_{Ü} = 0.1$ [1/a] beobachtet werden; größere Änderungen (d. h. in der Größenordnung ~15 cm) finden sich dagegen für Überschreitungswahrscheinlichkeiten zwischen $P_{Ü} = 0.001$ [1/a] und $P_{Ü} = 0.005$ [1/a]. Dieses nichtlineare Verhalten kann anhand der Differenzen in den PLPs erläutert werden, wo niedrigere Wasserstände insgesamt häufiger auftreten, jedoch im Mittel größere Differenzen zum

Kontrolllauf (Datensatz (a)) aufweisen. Die höheren Wasserstände treten dagegen seltener auf und weisen zudem geringere Differenzen zum Kontrolllauf auf (Datensatz (a)).

Das o. g. Verhalten ist primär in den geringeren Surges bei höheren Wasserständen begründet. Dieser Effekt tritt nicht nur am hier betrachteten Pegel auf, sondern kann in ähnlicher Weise entlang der gesamten Küstenlinie Schleswig-Holsteins beobachtet werden. Die Größenordnung der Änderungen ist dabei jedoch nicht homogen, sondern variiert zwischen den Standorten. In Abbildung 35 sind die Wasserstandsdifferenzen aus den Datensätzen (b) und (c) für die Wiederkehrintervalle $P_Ü$ = {0,1; 0,02; 0,01; 0,005} [1/a] entlang der gesamten Schleswig-Holsteinischen Küste dargestellt. Dabei zeigen positive (rote) Werte eine Zunahme (zusätzlich zum MSL) der Wasserstandsschätzungen während negative (blaue) Werte auf eine Abnahme hindeuten.

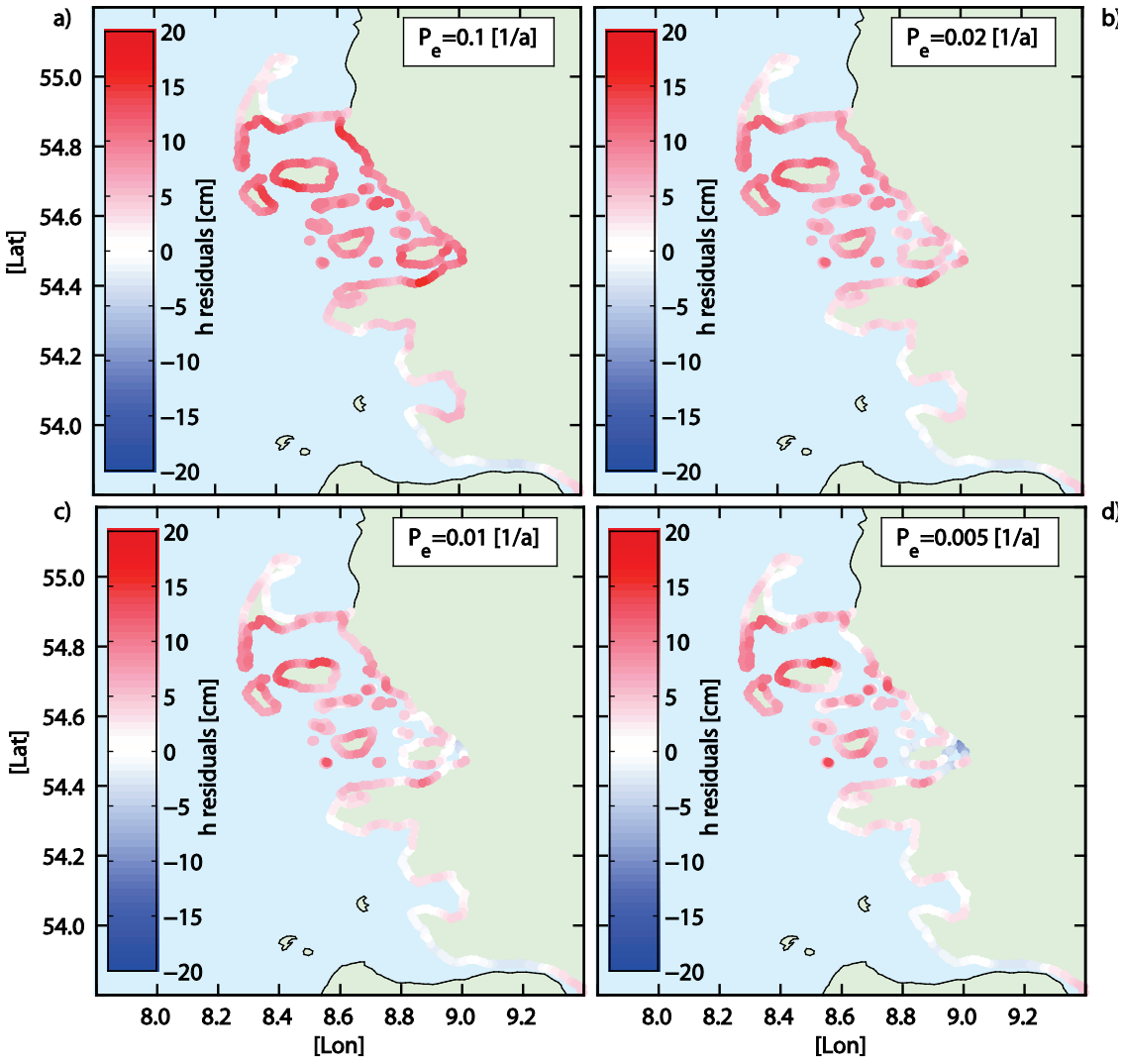


Abbildung 35: Differenzen in den Wasserstandsdifferenzen für (a) $P_Ü$ = 0,1 [1/a], (b) $P_Ü$ = 0,02 [1/a], (c) $P_Ü$ = 0,01 [1/a], (d) $P_Ü$ = 0,005 [1/a].

Die Abbildung zeigt, dass die größten (absoluten) Änderungen in den höheren Wiederkehrintervallen auftreten, während im Mittel die größten Änderungen eher in den niedrigeren Wiederkehrintervallen auftreten. Insgesamt ist die Verteilung der Änderungen über das Untersuchungsgebiet betrachtet sehr inhomogen. So zeigen sich z. B. auf Föhr (Längengrad: 8,4 bis 8,6; Breitengrad: 54,6 bis 54,8) für ein $P_Ü = 0{,}005$ [1/a] Änderungen von bis zu 17 cm (über dem MSL Anstieg). Im Bereich der Halligen zeigt sich dagegen ein über alle betrachteten Wiederkehrintervalle nahezu konstanter Anstieg der Wasserstände um bis zu 10 cm.

18 Zusammenfassung und Diskussion

Im Teilprojekt ZukunftHallig A wurden insbesondere die folgenden Forschungsfragen behandelt:

A) *Wie können Wiederkehrintervalle von extremen Wasserständen konsistent und robust für Bemessungszwecke geschätzt werden?*
B) *Wie können Wiederkehrintervalle von extremen Wasserständen in unbepegelten Gebieten ermittelt werden?*
C) *Welchen Einfluss hat der Anstieg des mittleren Meeresspiegels auf die Extremwasserstände?*

Im ersten Teil (A) wurde gezeigt, dass die Ermittlung von Wiederkehrintervallen auf nationaler sowie auf internationaler Ebene sehr inhomogen ist. So kommen auch in Deutschland in den einzelnen Bundesländern, die durch Sturmfluten der Nordsee betroffen sind, unterschiedliche Verfahren (statistisch und deterministisch) zum Einsatz. Und selbst in den Bundesländern, wo extremwertstatistische Verfahren verwendet werden, ist die Vorgehensweise nicht reglementiert und unterliegt somit oftmals subjektiven Einflussmöglichkeiten. Aus diesem Grund wurden die in Deutschland meist genutzten direkten extremwertstatistischen Verfahren im Rahmen einer Sensitivitätsstudie untersucht und verglichen. Der Terminus „direkt“ impliziert die direkte Verwendung der gesamt aufgezeichneten Wasserstände. Dixon und Tawn (1999) haben gezeigt, dass die Block Maxima Methode (siehe Abschnitt 5.1.1) zu erheblichen Unterschätzungen von Wasserständen führen kann, wenn der deterministische Anteil (Tide) größer ist als der stochastische Anteil (Surge). In Allamano et al. (2011) werden vergleichbare Resultate für die Peak Over Threshold Methode (siehe Abschnitt 5.1.2) präsentiert. Aus diesem Grund wurden sogenannte indirekte Verfahren entwickelt. Dabei werden die deterministischen und stochastischen Komponenten des Wasserstandes separat modelliert; Wiederkehrintervalle extremer Wasserstände werden aus der Kombination beider Größen abgeleitet (für mehr Informationen siehe z. B. Pugh und Vassie, 1979, 1980; Middleton und Thompson, 1986; Walden et al., 1982; Tawn und Vassie,

1989; Tawn, 1992; Dixon und Tawn, 1994; Haigh et al., 2010b; Environment Agency, 2011). An einigen Standorten ist die Verwendung der indirekten Verfahren jedoch nicht möglich, da die erforderlichen hoch aufgelösten Wasserstandsmessungen nicht verfügbar sind. So haben Haigh et al. (2010b) z. B. geschlussfolgert, dass für die zuverlässige Ermittlung extremer Wasserstände mindestens 20 Jahre an hochaufgelösten Pegelmessungen benötigt werden. In der Deutschen Bucht liegen an vielen Stationen Informationen über die Scheitelwert vor, während hochaufgelöste Wasserstandszeitreihen erst seit den späten 1990er Jahren digital aufgezeichnet wurden (Wahl et al., 2011). Am Beispiel des Pegels Cuxhaven konnten Mudersbach et al. (2013) überdies Änderungen in den Tiden nachweisen, die um 1950 eingesetzt haben. In der Deutschen Bucht ist die Verwendung der indirekten Methoden daher bisweilen mit großen Unsicherheiten verbunden.

Teil A endet mit einer Reihe von Empfehlungen zur objektiven Verwendung direkter extremwertstatistischer Methoden. Werden die Empfehlungen konsistent angewendet, kann das Problem der aktuell vorliegenden inhomogenen Situation in Deutschland bewältigt werden. Die Empfehlungen wurden primär für die Deutsche Bucht entwickelt, jedoch konnte an ausgewählten Beispielen gezeigt werden (siehe Arns et al., 2013), dass diese auch an einigen internationalen Pegeln anwendbar sind; hierzu sollte die Methodik jedoch verifiziert werden. Darüber hinaus sollte die Methodik periodisch oder nach dem Auftreten hoher Sturmfluten validiert werden.

Die Empfehlungen setzen voraus, dass ein ausreichendes Datenkollektiv vorliegt. Im zweiten Teil (B) wurde jedoch gezeigt, dass die benötigten Wasserstandsinformationen in der Deutschen Bucht nicht an allen Standorten vorliegen. Aus diesem Grund wurde in Teil B ein Ansatz entwickelt, mit dem sich Aussagen zu extremen Wasserständen in unbepegelten Gebieten ableiten lassen. Der Ansatz basiert auf der Verknüpfung von numerischen Modellsimulationen und den o. g. Empfehlungen zur statistischen Ermittlung extremer Wasserstände. Unter Verwendung der Software MIKE21 wurden Wasserstände für die Zeitspanne 1970 bis 2009 entlang der gesamten Deutschen Bucht simuliert. Vereinfacht wurden die Sohlrauheiten im Modell global angesetzt, d. h. es wurde keine Differenzierung der Rauheiten vorgenommen. Hierdurch resultieren Modellfehler, die im Zuge einer umfassenden Kalibrierung hätten reduziert werden können. Die Kalibrierung unter Verwendung vieler unterschiedlicher Rauheitsbereiche ist jedoch sehr zeitaufwändig, weshalb im Rahmen des Projektes auf die Differenzierung verzichtet wurde. Um den Fehler der simulierten Wasserstände (u. a. aus der globalen Rauheit) zu eliminieren, wurde eine Biaskorrektur entwickelt, mit deren Hilfe die simulierten Wasserstände an die tatsächlich abgelaufenen Ereignisse (d. h. die Pegelmessungen) angeglichen wurden. Die resultierenden Wasserstände zeigen eine nahezu vollständige Übereinstimmung mit den Pegelmessungen. Basierend auf Empfehlungen zur Durchführung extremwertstatistischer Wasserstandsanalysen in der Deutschen Bucht (siehe Arns et al., 2013) wurden im Abstand von 1000 m die Höhen und Häufigkeiten von Sturmfluten für die gesamte Küstenlinie berechnet. Anhand eines Vergleichs

wurde gezeigt, dass extremwertstatistische Analysen auf Basis biaskorrigierter Modellwasserstände keine Abweichungen gegenüber pegelbasierten Auswertungen aufweisen. Insbesondere in Gebieten, in denen keine bzw. nur wenige Wasserstandsmessungen vorliegen ermöglicht diese Methodik somit eine simple sowie stabile Vorgehensweise für die Ermittlung von Bemessungsgrößen.

In Teil A und B wurden die Wiederkehrintervalle extremer Wasserstände unter gegenwärtigen Bedingungen (d. h. inklusive der Vergangenheit) ermittelt. In Teil C wurde dagegen der Einfluss eines MSL Anstiegs von +0,54 m auf die Extremwasserstände in der Deutschen Bucht untersucht. Die Sensitivitätsstudie zeigt, dass zukünftige Extremwasserstände signifikant höher auflaufen könnten als nur für den MSL prognostiziert. Diese Differenzen sind primär in Änderungen von Flachwasser- und Reibungseffekten und der damit einhergehenden Beeinflussung der Tide begründet. In Teil C wird das in Teil B entwickelte zweidimensionale numerische Modell verwendet; Reibungseffekte werden demnach nur an der Sohle erfasst. Schichtungseffekte und Oberwasserzuflüsse werden dagegen nicht berücksichtigt, d. h. die Interaktionen zwischen der Tide und Oberwasserabflüssen sowie die Entstehung interner Tiden werden vernachlässigt (Foreman et al., 1995). Es wird jedoch davon ausgegangen, dass die dadurch induzierten Effekte eher von untergeordneter Bedeutung sind und zudem saisonal unterschiedlich sind (in der Deutschen Bucht treten Schichtungen nur in den Sommermonaten auf).

In Teil C werden atmosphärische und batyhmetrische Änderungen vernachlässigt. Dies war notwendig, um die zugrunde liegenden Prozesse sowie deren Antriebsfaktoren erfassen zu können. In der Realität unterliegt die Morphologie des Seegrundes durch hydrodynamische Prozesse (z. B. durch die Vertiefung der großen Ströme) jedoch ständigen Veränderungen. Aktuelle Untersuchungen zu Änderungen der Bathymetrien im Bereich der Deutschen Bucht zwischen 1982 und 2006 wurden im Rahmen der KFKI-Projektes „AufMod“ durchgeführt (siehe z. B. Kösters und Winter, 2014). Ein allgemeinerer statistischer Ansatz zur Beschreibung dieser morphologischen Änderungen kann Siefert (1987) entnommen werden. Solche Einflüsse könnten die Resultate aus Teil C sowohl verstärken als auch abschwächen (siehe z. B. Siefert und Lassen, 1987; Stengel und Zielke; 1994; Ferk, 1995).

Die Ergebnisse aus ZukunftHallig A können verwendet werden, um objektive und konsistente Aussagen zu den Höhen und Häufigkeiten extremer Wasserstände unter heutigen und potentiellen zukünftigen Bedingungen abzuleiten. Die präsentierten Methoden helfen, um Wasserstandsinformationen (z. B. Bemessungshöhen) in Bereichen abzuleiten, in denen keine bzw. nur unzureichende Pegelmessungen vorliegen.

Literaturverzeichnis

Acero, F.J., García, J.A., Gallego, M.C., 2011. Peaks-over-threshold study of trends in extreme rainfall over the Iberian Peninsula. Journal of Climate 24, 1089–1105.

Acreman, M.C., Sinclair, C.D., 1986. Classification of drainage basins according to their physical characteristics: an application for flood frequency analysis in Scotland. Journal of Hydrology, Vol. 86, p. 365-380

AghaKouchak, A., Easterling, D., Hsu, K., Schubert, S., Sorooshian, S., 2013. Extremes in a changing climate. Detection, Analysis and Technology. Springer.

Aguilar, E., Auer, I., Brunet, M., Peterson, T.,Wieringa, J., 2003. Guidelines on climate metadata and homogenization. World meteorological organization. Secretariat of the World Meteorological Organization.

Airy, G.B., 1841. Tides and waves. Encyclopaedia Metropolitana (1817–1845), Mixed Sciences, Vol. 3.

Allamano, P., Laio, F., Claps, P., 2011. Effects of disregarding seasonality on the distribution of hydrological extremes. Hydrology and Earth System Sciences 15, 3207–3215.

Andersen, O. B., 1995. Global ocean tides from ERS 1 and TOPEX/POSEIDON altimetry, Journal of Geophysical Research, Volume 100, p. 25249-25259. DOI: 10.1029/95JC01389

Arns, A., Wahl, T., Haigh, I.D., Jensen, J., Pattiaratchi, C., 2013a. Estimating extreme water level probabilities: A comparison of the direct methods and recommendations for best practise, Coastal Engineering, Volume 81, p. 51-66, http://dx.doi.org/10.1016/j.coastaleng.2013.07.003.

Arns, A., Wahl, T., Dangendorf, S., Mudersbach, C., Jensen, J., 2013b. Ermittlung regionalisierter Extremwasserstände für die Schleswig-Holsteinische Nordseeküste. Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, HW57, 2013, H. 6.

Arns, A., Wahl, T., Haigh, I.D., Jensen, J., under review. Determining return water levels at un-gauged coastal sites: a case study for northern Germany, Ocean Dynamics, under review.

Arns, A., Wahl, T., Dangendorf, S., Jensen, J., in revision. The impact of sea level rise on extreme water levels in the northern part of the German Bight, submitted to: Coastal Engineering.

Balkema, A.A. and de Haan, L. (1974). Residual life time at great age, Ann. Probab., 2, 792–804.

Bardet, L., Duluc, C.M., Rebour, V., L`Her, J., 2011. Regional frequency analysis of extreme storm surges along the French coast. Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 11, p. 1627-1639

Batstone, C., Lawless, M., Horsburgh, K., Blackman, D., Tawn, J., 2009. Calculating extreme sea level probabilities around complex coastlines. A best practice approach. Proceedings of the Irish National Hydrology Conference 2009.

Batstone, C., Lawless, M., Tawn, J., Horsburgh, K., Blackman, D., McMillan, A., Worth, D., Laeger, S., Hunt, T., 2013. A UK best-practice approach for extreme sea-level analysis along complex topographic coastlines. Ocean Engineering, Vol. 71, p. 28-39, http://dx.doi.org/10.1016/j.oceaneng.2013.02.003.

Bärring, L., von Storch, H., 2004. Scandinavian storminess since about 180. Geophysical Res. Letters, vol. 31, doi:10.1029/2004GL02044.

Baxter, P.J., 2005. The east coast Big Flood, 31 January–1 February 1953: a summary of the human disaster. Philos Trans R Soc A Math Phys Eng Sci 363, p. 1293–1312.

Becker, A., 1992. Methodische Aspekte der Regionalisierung. In. Regionalisierung in der Hydrologie. Deutsche Forschungsgemeinschaft. Mitt. XI der Senatskommision für Wasserforschung. VCH Verlagsgesellschaft, Weinheim.

Bender, J, Wahl, T., Müller, A., Jensen, J., under review. On Deriving Design Water Levels at River Confluences Using Copula Functions and Hydrodynamic Flow Models, submitted to: Water Res. Research.

Bernadara, P., Andreewsky, M., Benoit, M., 2011. Application of regional frequency analysis to the estimation of extreme storm surges. Journal of Geophysical Research, Vol. 116.

Bindoff, N.L. et al., 2007. Observations: oceanic climate change and sea level. In: Solomon, S. et al. (eds) Climate change 2007: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK, pp 385–432

Blöschl, G., Sivapalan, M., 1995. Scale issues in hydrological modelling: a review. Hydrological processes, vol. 9, pp. 251-190.

Bocchiola, D., De Michele, C., Rosso, R., 2003. Review of recent advances in index flood estimation. Hydrology and Earth System Sciences, Vol. 7, p. 283-296.

Brabson, B.B., Palutikof, J.P., 2000. Tests of the generalized Pareto distribution for predicting extreme wind speeds. Journal of Applied Meteorology 39, 1627–1640.

Bruss, G., Gönnert, G., Mayerle, R., 2010. Extreme scenarios at the German North Sea coast: a numerical model study. Proceedings of the 32nd International Conference on Coastal Engineering (ICCE) 2010.

Bütow, H., 1963. Die große Flut in Hamburg: Eine Chronik der Katastrophe vom Februar 1962. Verlag: Hansestadt, German.

Cartwright D. E., Tayler, R. J., 1971. New computations of the tide-generating potential. Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society, 23, 45-74.

Castellarin, A., Burn, D.H., Brath, A., 2008. Homogeneity testing: How homogeneous do heterogeneous cross-correlated regions seem? Journal of Hydrology, Vol. 160, p. 67-76

Choulakian, V., Stephens, M.A., 2001. Goodness-of-fit tests for the generalized Pareto distribution. Technometrics 43, 478–484.

Church, J.A., White, N.J., Coleman, R., Lambeck, K., Mitrovica, J.X., 2004. Estimates of the regional distribution of sea level rise over the 1950–2000 period. Journal of Climate 17, 2609–2625, http://dx.doi.org/10.1175/1520-0442(2004)017 < 2609:EOTRDO > 2.0.CO;2

Church, J.A., White, N.J., 2006. A 20th century acceleration in global sea-level rise. Geophysical Research Letters 33, L01602. http://dx.doi.org/10.1029/2005GL024826.

Church, J.A., White, N.J., Aarup, T.,Wilson, S.W., Woodworth, P.L., Domingues, C.M., Hunter, J.R., Lambeck, K., 2008. Understanding global sea levels: past, present and future. Sustainability Science 3, 9–22. http://dx.doi.org/10.1007/s11625-008-0042-4.

Church, J.A., Clark, P.U., Cazenave, A., Gregory, J.M., Jevrejeva, S., Levermann, A., Merrifield, M.A., Milne, G.A., Nerem, R.S., Nunn, P.D., Payne, A.J., Pfeffer, W.T., Stammer, D., Unnikrishnan, A.S., 2013. Sea Level Change. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., Midgley, P.M. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Coles, S., 2001. An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values. Springer Verlag, London.

Coles, S.G., Tawn, J.A., 2005. Bayesian modelling extreme surges on the UK east coast. Phil.Trans. Roy. Soc. A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 363, 1387-1406,

Compo G.B., Whitaker, J.S., Sardeshmukh, P.D. et al. (2011). The twentieth century reanalysis project. Q J Roy Meteor Soc 137:1–28, DOI: 10.1002/qj.776

Cunnane, C., 1973. A particular comparison of annual maxima and partial duration series methods of flood frequency prediction. Journal of Hydrology 18, 257–271.

Cunnane, C., 1987. Review of Statistical Models for Flood Frequency Estimation. Springer Netherlands.

Dalrymple, T., 1960. Flood-frequency analyses. U.S. Geological Survey Water Supply Paper 1543-A, 11.51

Danckwerth, K., 1963: Die Landkarten von Johannes Meier, Husum, aus der neuen Landesbeschreibung der zwei Herzogtümer Schleswig und Holstein. Hamburg.

Dangendorf, S., Wahl, T., Hein, H., Jensen, J., Mai, S., Mudersbach, C., 2012. Mean sea level variability and influence of the North Atlantic Oscillation on long-term trends in the German Bight. Water 4(1):170–195. doi:10.3390/w4010170

Dangendorf, S., Mudersbach, C., Jensen, J., Ganske, A., Heinrich, H., 2013a. Seasonal to decadal forcing of high water level percentiles in the German Bight throughout the last century. Ocean Dynamics, Vol. 63, Issue 5, pp. 533-548

Dangendorf, S., Wahl, T., Nilson, E., Klein, B., Jensen, J., 2013b. A new athmosperic proxy for sea level variability in the southeastern North Sea: observations and future ensemble projections. Climate Dynamics.

Dangendorf, S., Mudersbach, C., Wahl, T., Jensen, J., 2013c. Characteristics of intra-, inter-annual and decadal variability and the role of meteorological forcing: the long record of Cuxhaven. Ocean Dyn., Vol. 63(2–3):209–224

Dangendorf, S., Müller-Navarra, S., Jensen, J., Schenk, F., Wahl, T., Weisse, R., under review. North Sea storminess from a novel storm surge record since AD 1843, Journal of Climate.

Davison, A.C., Smith, R.L., 1990. Models for Exceedances over High Thresholds. 52, 393–442.

De,M., 2000. A new unbiased plotting position formula for Gumbel distribution. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment 14, 1436–3240.

De Winter, R.C., Sterl, A., Ruessink, B.G., 2013. Wind extremes in the North Sea Basin under climate change: an ensemble study of 12 CMIP5 GCMs. J Geophys Res 118:1–12.

Dixon, M.J., Tawn, J.A., 1994. Extreme sea-levels at the UK A-class sites: site-by-site analyses. Proudman Oceanographic Laboratory Internal Document No. 65.

Dixon, M.J., Tawn, J.A., 1995. A semi-parametric model for multivariate extreme values. Statistics and Computing 5 (3), 215–252.

Dixon, M.J., Tawn, J.A., 1997. Estimation of extreme sea conditions. Spatial analyses for theUK coast. Final report. Ministry of Agriculture, Fisheries and Food.

Dixon, M.J., Tawn, J.A., 1999. The effect of non-stationarity on extreme sea-level estimation. Journal of the Royal Statistical Society: Series C: Applied Statistics 48, 135–151.

Dooge, J.C.I., 1982. Parameterization of hydrologic processes. in Eagleson, P.S. (Ed.). Land Surjace Processes in Atmospheric General Circulation Models. Cambridge University Press, London. pp. 243-288.

Dooge, J.C.I., 1986. Looking for hydrologic laws. Wat. Resour. Res., 22, 46s-58s.

Douglas, B.C., 1991. Global sea level rise. Journal of Geophysical Research 96, 6981–6992.

Dupuis, D.J., 1998. Exceedances over high thresholds: a guide to threshold selection. Extremes 1, 251–261.

Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V. (DVWK), 1999: Statistische Analsyse von Hochwasserabflüssen, DVWK-Merkblatt 251.

Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft und Abfall e.V. (DWA), 2012: Ermittlung von Hochwasserwahrscheinlichkeiten, Merkblatt DWA-M 552.

DIN 19700-12:2004-07: Stauanlagen – Teil 12: Hochwasserrückhaltebecken (engl. Dam plants – Part 12: Flood retarding basins).

Dyck, S., Peschke, G., 1995. Grundlagen der Hydrologie. Verlag für Bauwesen, Berlin.

EurOtop, 2007. Wave Overtopping of Sea Defences and Related Structures: Assessment Manual. Die Küste, Heft 73.

Environment Agency, 2011. Coastal flood boundary conditions for UK mainland and islands. Project: SC060064/TR2: Design sea-levels. Environment Agency of England and Wales.

Ferk, U., 1995. Folgen eines beschleunigten Meeresspiegelanstiegs für die Wattgebiete der niedersächsischen Nordseeküste. Die Küste, Heft 57.

Ferro, Ch.A.T., Segers, J., 2003. Inference for clusters of extreme values. Journal of the RoyalStatistical Society: Series B 65, 545–556.

Fisher, R.A., Tippett, L.H.C., 1928. Limiting forms of the frequency distribution of the largest and smallest member of a sample, Proc. Camb. Phil. Soc., 24, pp. 180-190.

Flather, R.A., 1976. A tidal model of the north-west European continental shelf. Memoires de la Society Royal des Sciences de Liege, 6 series, 10: 141-164.

Flather, R.A., Khandker, H., 1993. The storm surge problem and possible effects of sea level changes on coastal flooding in the Bay of Bengal. Climate and sea level change: observations, projections and implications. Warrick, R.A., Barrow, E.M., Wigley, T.M.L., Eds.Cambridge: Cambridge University Press.

Flather, R.A., Williams, J.A., 2000. Climate change effects on storm surges: methodologies and results. Climate scenarios for water-related and coastal impacts, (3), 66-72.

Foreman, M.G.G., 1977. Manual for tidal heights analysis and prediction. Canadian Pacific Marine Science Report No. 77-10, 10 pp.

Foreman, M.G.G., Walters, R.A., Henry, R.F, Keller, C.P., Dolling, A.G, 1995. A tidal model for eastern Juan de Fuca Strait and the southern Strait of Georgia JO. Journal of Geophysical Research: Oceans, Vol. 100, 721-740, DOI: 10.1029/94JC02721

Führböter, A., 1976. Über zeitliche Veränderungen der Wahrscheinlichkeiten von Extremsturmfluten an der Deutschen Nordseeküste. Mitteilungen des Leichtweiß-Instituts der TU Braunschweig, Heft 51.

Gerritsen, H., 2005. What happened in 1953? The Big Flood in the Netherlands in retrospect. Philos Trans R Soc A Math Phys Eng Sci 363, p. 1271–1291.

Godin, G., 1972. The Analysis of Tides. Liverpool University Press, 264 pp.

Gönnert, G., Müller, O., Gerkensmeier, B., 2013. Development of extreme storm surge events - results of the XtremRisK project. In: Klijn, F., Schwecckendiek, T. (Eds.),Comprehensive Flood Risk Management. Research for policy and practice.

Grabemann, I., Weisse, R., 2008. Climate change impact on extreme wave conditions in the North Sea: an ensemble study. Ocean Dynamics 58, 199–212.

Gram-Jensen, I.B., 1985. Sea floods. Danish Meteorological Institute, Climatological Papers No. 13. Copenhagen, 76 pp.

Grähler, B., van den Berg, M. J., Vandenberghe, S., Petroselli, A., Grimaldi, S., De Baets, B., Verhoest, N.E.C., 2013. Multivariate retun periods in hydrology: a criticla and practical review focusing on synthetic design hydrograph estimation. Hydrol. Earth Syt. Sci., 17.

Grinsted, A., Moore, J.C., Jevrejeva, S., 2009. Reconstructing sea level from paleo and projected temperatures 200 to 2100 AD. Climate Dynamics. http://dx.doi.org/10.1007/s00382-008-0507-2 (published online first).

Gutknecht, D., 1991. Computer aided modeling for operational forecasting systems. Ann. Geeophysical Suppl. Vol. 9, C480.

Haigh, I.D., 2009. Extreme sea levels in the English Channel 1900 to 2006. (Ph.D. Thesis) University of Southampton, United Kingdom (198 pp.).

Haigh, I., Nicholls, R., Wells, N., 2010a. Assessing changes in extreme sea levels: application to the English Channel, 1900–2006. Continental Shelf Research 30, 1042–1055.

Haigh, I.D., Nicholls, R.,Wells, N., 2010b. A comparison of the main methods for estimating probabilities of extreme still water levels. Coastal Engineering 57, 838–849.

Haigh, I.D., Wijeratne, E.M.S., MacPherson, L.R., Pattiaratchi, C.B., George, S., 2013a. Estimating present day extreme total water level exceedance probabilities around the coastline of Australia: tides, extra-tropical storm surges and mean sea level. Climate Dynamics (in press-a). http://dx.doi.org/10.1007/s00382-012-1652-1.

Haigh, I.D., MacPherson, L.R., Mason, M.S., Wijeratne, E.M.S., Pattiaratchi, C.B., Crompton, R.P., George, S., 2013b. Estimating present day extreme total water level exceedance probabilities around the coastline of Australia: tropical cyclone induced storm surges. Climate Dynamics (in press-b). http://dx.doi.org/10.1007/s00382-012-1653-0.

Haußer, F., Luchko, Y., 2011. Mathematische Modellierung mit MATLAB. Eine praxisorientierte Einführung. Spektrum akademischer Verlag, Springer.

Hawkes, P.J., Gonzalez-Marco, D., Sánchez-Arcilla, A., Prinos, P., 2008. Best practice for the estimation of extremes: a review. Journal of Hydraulic Research 46, 324–332.

Hirsch, R.M., Helsel, D.R., Cohn, T.A., Gilroy, E.J., 1992. Statistical analysis of hydrological data. In: Maidment, D.R. (Ed.), Handbook of Hydrology.

Hollebrandse, F.A.P., 2005. Temporal development of the tidal range in the southern North Sea. Master thesis, TU Delft, Faculty of civil engineering and geosciences.

Hosking, J.R.M., Wallis, J.R., 1987. Parameter and quantile estimation for the generalized Pareto distribution. Technometrics 29, 339–349.

Hosking, J.R.M., 1990. L-moments analysis and estimation of distributions using linear combination of order statistics. Journal of the Royal Statistical Society, Vol. 52, p. 105-124

Hosking, J.R.M., Wallis, J.R., 1993. Some statistics useful in regional frequency analysis. Water Resources Research, Vol. 29, Issue 2, p. 271-281

Hosking, J.R.M.,Wallis, J.R., 1997. Regional Frequency Analysis. Cambridge University Press, Cambridge.

Hundt, C., 1955. Maßgebende Sturmfluthöhe für das Deichbestick der Schleswig-Holsteinischen Westküste. Die Küste, Jahrgang 3, Doppelheft 12.

Hunter, J., 2010. Estimating sea-level extremes under conditions of uncertain sea-level rise. Climatic Change, vol. 99, pp. 331-350.

IPCC, 2013. Summary for Policymakers. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Jansz, W., Blaeu, J., 2000. The Folio Atlases. Utrecht University, HES Punlishers BV.

Jay, D.A., 2009. Evolution of tidal amplitudes in the eastern Pacific Ocean. Geoph. Res. Letters, Vol. 36.

Jensen, J., 1984. Änderungen der mittleren Tidewasserstände an der Nordseeküste. Mitteilungen Leichtweiß-Institut der TU Braunschweig, Heft 83.

Jensen, J., 1985. Über instationäre Entwicklungen der Wasserstände an der deutschen Nordseeküste. Mitteilungen Leichtweiß-Institut der TU Braunschweig, Heft 88.

Jensen, J., Mügge, H.-E., Schönfeld, W., 1992. Analyse der Wasserstandsentwicklung und Tidedynamik in der Deutschen Bucht. Die Küste, Heft 53.

Jensen, J., Mudersbach, C., 2007. Zeitliche Änderungen in den Wasserstandszeitreihen an den Deutschen Küsten. In: Glaser R, Schenk W, Vogt J, Wießner R, Zepp H (eds) Berichte zur deutschen Landeskunde 81:99–112. Leipzig, Germany (in German).

Jensen, J.,Müller-Navarra, S., 2008. Storm surges on the German Coast. Die Küste, Heft 74, pp. 92–125.

Jensen, J., Schwarzer, K.: Germany In: Pranzini, E. & Williams, A., Coastal Erosion and Protection in Europe, Earthscan, London, S. 108-135, 2013

Jevrejeva, S., Moore, J.C., Grinsted, A., 2010. How will sea level respond to changes in natural and anthropogenic forcings by 2100? Geophysical Research Letters, Vol. 37, http://dx.doi.org/10.1029/2010GL042947

Kamphuis, J.W., 2000. Introduction to Coastal Engineering and Management. World Scientific Publishing.

Katsman, C.A., Hazeleger, W., Drijfhout, S.S., van Oldenborgh, G.J., Burgers, G.J.H., Change, Climatic, 2008. Climate scenarios of sea level rise for the northeast Atlantic Ocean: a study including the effects of ocean dynamics and gravity changes induced by ice melt. Climatic Change 91 (3–4), 351–374.

Katsman, C.A., Sterl, A., Beersma, J.J., van den Brink, H.W., Hazeleger, W., et al., 2011. Exploring high-end scenarios for local sea level rise to develop flood protection strategies for a low-lying delta — the Netherlands as an example. Climatic Change. http://dx.doi.org/10.1007/s10584-011-0037-5.

Katz, R.W., Parlange, M.B., Naveau, P., 2002. Statistics of extremes in hydrology. Advances in Water Resources 25, 1287–1304.

Kauker, F., Langenberg, H., 2000. Two models for the climate change related development of sea levels in the North Sea - A comparison. Clim. Res., Vol. 15, pp. 61-67.

Kleeberg, H.B., 1992. Regionalisierung in der Hydrologie. DFG-Mitt. XI. VCH Verl. ges., Weinheim. 444 pp.

Kleeberg, H.B., Schumann, A.H., 2001: Zur Ableitung von Bemessungsabflüssen geringer Überschreitungswahrscheinlichkeiten. Wasserwirtschaft 91 (12), 609.

Krause, P., Boyle, D.P., Bäse, F., 2005. Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. Adv. in Geosc., Vol. 5, pp. 89-97.

Krueger, O., F. Schenk, F. Feser, R. Weisse, 2013a. Inconsistencies between long-term trends in storminess derived from the 20CR reanalysis and observations. J Clim, Vol. 26, pp. 868-874.

Kuncheva, L.I., 2007. A stability index for feature selection. Proceedings of the 25th IASTED International Multi-Conference: artificial intelligence and applications, pp. 390–395.

Lamb, H., 1932. Hydrodynamics. 6th edn. Cambridge University Press, 738 pp.

Lamb, H., 1991. Historic storms of the North Sea, British Isles and Northwest Europe. Cambridge University Press, Cambridge

Lang, M., Ouarda, T.B.M.J., Bobée, B., 1999. Towards operational guidelines for over threshold modelling. Journal of Hydrology 225, 103–117.

Le Provost, C., 1976. Theoretical analysis of the tidal wave's spectrum in shallow water areas. Memoires de la Society Royale des Sciences de Liege, Vol. 6, pp. 97.-111.

Le Provost, C., 1991. Generation of overtides and compound tides (review). Tidal Hydrodynamics, John Wiley, New York, pp. 269-296.

Letetrel, C., Marcos, M., Míguez, B.M., Woppelmann G., 2010. Sea level extremes in Marseille (NW Mediterranean) during 1885–2008, Cont. Shelf Res., Vol. 30, pp. 1267–1274.

Liese, R., Luck, G., 1978. Verfahren zum Nachweis von Veränderungen der Tidehochwasserstände in der Deutschen Bucht. Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen, Jahrgang. 22, Heft 5.

LKN (Landesbetrieb für Küstenschutz,Nationalpark und Meeresschutz Schleswig-Holstein), 2012. Generalplan Küstenschutz der Landes Schleswig-Holstein, Fortschreibung 2012. Entwurf für die Anhörung der Verbände.

Losada, I.J., Reguero, B.G., Méndez, F.J., Castanedo, S., Abascal, A.J., Minguez, R., 2013. Long-term changes in sea-level components in Latin America and the Caribbean. Global and Planetray Change, Vol. 104, p. 34-50

Lowe, J. A., Gregory, J. M., Flather, R. A., 2001. Changes in the occurrence of storm surges around the United Kingdom under a future climate scenario using a dynamic storm surge model driven by the Hadley Centre climate models. Climate Dynamics, Vol. 18, pp. 179-188.

Lowe, J.A., Gregory, J.M., 2005. The effects of climate change on storm surges around the United Kingdom. Philosophical Transactions of the Royal Society A, 363, pp. 1313-1328.

Lowe, J. A. et al., 2009. UK Climate Projections Science Report: Marine and Coastal Projections. Report provided by Met. Office Hadley Centre, Exeter, UK.

LSBG (Landesbetriebe Straßen, Brücken und Gewässer), 2012. Ermittlung des Sturmflutbemessungswasserstandes für den öffentlichen Hochwasserschutz in Hamburg. Bericht Nr. 12/2012.

Luther, M.E., Merz, C.R., Scudder, J., Baig, S.R., Pralgo, J.L.T., Thompson, D., Gill, S., Hovis, G., 2007. Water Level Observations for Storm Surge. Marine Technology Society Journal, Vol. 41, Number 1, pp. 35-43.

Mai, V.C., van Gelder, P., Vrijling, J.K., 2007. Statistical methods to estimate extreme quantile values of the sea data. In: Proceedings of the Fifth International Symposium on Evironmental Hydraulics (ISEH-V), Tempe, Arizona, USA.

Marcos, M., Tsimplis, M.N., Shaw, A.G.P., 2009. Sea level extremes in southern Europe. J Geophys Res 114:C01007. doi:10.1029/2008JC004912

Mathiesen,M., Goda, Y., Hawkes, P.J., Mansard, E.,Martín,M.J., Peltier, E., Thompson, E.F., Van Vledder, G., 1994. Recommended practice for extreme wave analysis. 32 (6), 803–814.

McInnes, K.L., Macadam, I., Hubbert, G.D., O'Grady, J.G., 2009. A Modelling Approach for Estimating the Frequency of Sea Level Extremes and the Impact of Climate Change in Southeast Australia. Natural Hazards, Vol. 51, pp. 115-137.

McMillan, A., Batstone, C., Worth, D., Tawn, J., Horsburgh, K., Lawless, M., 2011. Coastal flood boundary conditions for UK mainland and islands. Project: SC060064/TR2: Design sea-levels. Environment Agency of England and Wales.

McRobie, A., Spencer, T., Gerritsen, H., 2005. The Big Flood: North Sea storm surge. Philos Trans R Soc A Math Phys Eng Sci 363, p. 1263–1270.

Meehl, G.A., et al., 2007. Global climate projections. In: Solomon, S., et al. (Eds.), Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Méndez, F.J., Menéndez, M., Luceño, A., Losada, I.J., 2007. Analyzing monthly extreme sea levels with a time-dependent GEV model. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology 24, 894–911.

Menéndez, M., Woodworth, P.L., 2010. Changes in extreme high water levels based on a quasi-global tide-gage dataset. J Geophys Res Oceans 115:C10011. doi:10.1029/2009JC005997

Merz, R., Blöschl, G., 2005. Flood frequency regionalisation – spatial proximity vs. catchment attributes. Journal of Hydrology, Volume 302, Issues 1–4, Pages 283-306

Middleton, Thompson, 1986. Return periods of extreme sea levels from short records. Journal of Geophysical Research 91, 11,707.

Morton, I.D., Bowers, J., 1996. Extreme value analysis in a multivariate offshore environment. Applied Ocean research 18, 303–317.

Mudelsee, M., Chirila, D., Deutschländer, T., et al., 2010. Climate Model Bias Correction und die Deutsche Anpassungsstrategie. Mitteilungen Deutsche Meteorologische Gesellschaft, p. 2-7 (in German)

Mudersbach, C., Jensen, J., 2010. Nonstationary extreme value analysis of annual maximum water levels for designing coastal structures on the German north sea coastline. Journal Flood Risk Management 3 (1), 52–62. http://dx.doi.org/10.1111/j.1753-318X.2009.01054.x.

Mudersbach, C., Wahl, T., Haigh, I.D., Jensen, J., 2013. Trends in extreme high sea levels along the German north sea coastline compared to regional mean sea level changes. Continental Shelf Research (in press). ISSN 0278–4343. http://dx.doi.org/10.1016/j. csr.2013.06.016.

Müller, M., Cherniawsky, J.Y., Foreman, M.G.G., von Storch, J.S., under review. Seasonal variation of the M2 tide. Submitted to Ocean Dynamics.

Naveau, P.,Nogaj,M., Ammann, C., Yiou, P., Cooley, D., Jomelli, V., 2005. Statistical methods for the analysis of climate extremes. Comptes Rendus Geosciences 1013–1022.

Neves, C., Fraga-Alves, M.I., 2008. Testing extreme value conditions - an overvbiew and recent approaches. Revstat – Statistical Journal, Vol. 6, # 1, pp.83–100.

Nicholls, R.J.,Wong, P.P., Burkett, V.R., Codignotto, J.O., Hay, J.E., McLean, R.F., Ragoonaden, S., Woodroffe, C.D., 2007. Coastal systems and low-lying areas. In: Parry, M.L., Canziani, O.F., Palutikof, J.P., van der Linden, P.J., Hanson, C.E. (Eds.), Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK, pp. 315–356.

Nicholls, R.J.,Hanson, S., Herweijer, C., Patmore,N.,Hallegatte, S., Corfee-Morlot, J., Château, J.,Muir-Wood, R., 2008. Ranking port cities with high exposure and vulnerability to climate extremes: exposure estimates. OECD Environment Working Papers, No. 1. OECD Publishing. http://dx.doi.org/10.1787/011766488208.

Nicholls, R.J., Cazenave, A., 2010. Sea-level rise and its impact on coastal zones. Science 328(5985):1517–1520. doi:10.1126/science.1185782

Nicholls, R.J., 2011. Planning for the impacts of sea level rise. Oceanography 24 (2), 144–157. http://dx.doi.org/10.5670/oceanog.2011.34.

Nicholls, R.J., Hanson, S.E., Lowe, J.A.,Warrick, R.A., Lu, X., Long, A.J., Carter, T.R., 2011. Constructing sea-level scenarios for impact and adaptation assessment of coastal area: a guidance document. Supporting Material, Intergovernmental Panel on Climate Change Task Group on Data and Scenario Support for Impact and Climate Analysis (TGICA). (47 pp. Available online at http://www.ipcc-data.org/docs/Sea_Level_Scenario_Guidance_Oct2011.pdf).

Niedersächsischer Landesbetrieb fürWasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN), 2007. Generalplan Küstenschutz Niedersachsen/Bremen–Festland.

Nilsen, J.E.Ø., Drange, H., Richter, K., Jansen, E., Nesje, A., 2012. Changes in the past, present, and future sea level on the coast of Norway. NERSC Special Report 89, Bergen, Norway. 48 pp.

Nosov, M.A., Skachko, S.N., 2001. Nonlinear tsunami generation mechanism. Natural Hazards and Earth System Sciences, p. 251–253.

Parker, B.B., 1991. The relative importance of the various nonlinear mechanisms in a wide range of tidal interactions. In: B.B. Parker (ed.), Tidal Hydrodynamics, John Wiley and Sons, Inc. New York, pp. 237-268.

Pawlowicz, R., Beardsley, B., Lentz, S., 2002. Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T_TIDE. Comput Geosci 28(8):929–937. doi:10.1016/S0098-3004(02) 00013-4

Peel, M., Wang, Q.J., Vogel, R.M., McMahon, T.A., 2001. The utility of L-moment ratio diagrams for selecting a regional probability distribution. Hydrological Sciences Journal, Vol. 46, p.147-155.

Peltier, W.R., 2004. Global Glacial Isostasy and the Surface of the Ice-Age Earth: The ICE-5G(VM2) model and GRACE. Ann. Rev. Earth. Planet. Sci. 2004. 32,111-149.

Petersen, M., Rohde, H., 1977. Sturmflut: Die großen Fluten an den Küsten Schleswig-Holsteins und in der Elbe. Neumünster (Karl Wachholtz), 148 pp.

Piani, C., Haerter, J.O., Coppola, E., 2010. Statistical bias correction for daily precipitation in regional climate models over Europe. Theor. Appl. Climatol., Vol. 99, p. 187-192

Pickands, J. (1975). Statistical inference using extreme order statistics, Ann. Statist., 3, 119-131.

Pilgrim, D.H., 1983. Some problems in transferring hydrological relationships between small and large drainage basins and between regions. Journal of Hydrology, Vol. 65, p. 49-72

Pirazzoli, P. A., Tomasin, A., 2003. Recent Near-Surface Wind Changes in the Central Mediterranean and Adriatic Areas. Int. Journal of Climatology, Vol. 23, pp. 963-973.

Pirazzoli, P.A., Costa, S., Dornbusch, U., Tomasin, A., 2006. Recent evolution of surge-related events and assessment of coastal flooding risk on the eastern coasts of the English Channel. Ocean Dynamics 56, 498-512.

Plüß, A., 2004. Küstenschutz in Hamburg - Nichtlineare Wechselwirkung der Tide auf Änderungen des Meeresspiegels im Übergangsbereich Küste/Ästuar am Beispiel der Elbe. In: Proc Klimaänderung Küstenschutz, pp. 129-138.

Proudman, J.F.R.S., 1941. The Effect of Coastal Friction on the Tides. Geophysical Journal International. Volume 5.

Pugh, D.T., Vassie, J.M., 1976. Tide and surge propagation off-shore in the Dowsing region of the North Sea. Deutsche Hydrographische Zeitschrift, 29, 163-213

Pugh, D. T., 1981. Tidal amphidrome movement and energy dissipation in the Irish Sea. Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society, 67, 515-27.

Pugh, D.J., 1987. Tides, Surges and Mean Sea-Level. A Handbook for Engineers and Scientists. Wiley, Chichester, p. 472.

Pugh, D., Vassie, 1979. Extreme sea levels from tide and surge probability. Proceedings of the sixteenth Coastal Engineering Conference, 1, pp. 911–930.

Pugh, D., Vassie, 1980. Applications of the joint probability method for extreme sea level computations. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, 69, pp. 959–975.

Quedens, G., 1992. Die Halligen. Breklumer Verlag, Breklum (in German)

Rahmstorf, S., 2007. A semi-empirical approach to projecting future sea-level rise.Science 315 (5810), 368-370. http://dx.doi.org/10.1126/science.1135456.

Rao, A.R., Hamed, K.H., 2000. Flood frequency analysis. CRC Press, New York.

Ray, R.D., 2006. Secular changes of the M2 tide in the Gulf of Maine. Cont. Shelf Res., Vol. 26, pp. 422-427.

Ray, R.D., 2009. Secular changes in the solar semidiurnal tide of the western North Atlantic Ocean. Geophysical Research Letters, Vol. 36.

Riecken, G., 1985. Die Halligen in Wandel. Husum-Druck- und Verl.-Ges.

Rosbjerg, D., Madsen, H., Rasmussen, P.F., 1992. Prediction in partial duration serieswith generalized Pareto-distributed exceedances. Water Resources Research 28, 3001–3010.

Sachs, L., 1997. Angewandte Statistik. Anwendung Statistischer Methoden. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.

Schmidt, H., von Storch, H., 1993. German Bight storm analysed. Nature 365:791. doi:10.1038/365791a0

Seneviratne, S.I., Nicholls, N., Easterling, D., Goodess, C.M., Kanae, S., Kossin, J., Luo, Y., Marengo, J., McInnes, K., Rahimi, M., Reichstein, M., Sorteberg, A., Vera, C., Zhang, X., 2012. Changes in climate extremes and their impacts on the natural physical environment. Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA, pp. 109-230.

Siefert, W., 1968. Sturmflutvorhersage für den Tidebereich der Elbe aus dem Verlauf der Windstaukurve in Cuxhaven. Mitteilungen des Franzius Institut der TU Hannover, Heft 30.

Siefert, W., 1987. Umsatz- und Bilanz-Analysen für das Küstenvorfeld der Deutschen Bucht. Grundlagen und erste Auswertungen. Die Küste, Heft 45.

Siefert, W., Lassen, H., 1987. Zum säkularen Verhalten der mittleren Watthöhen an ausgewählten Beispielen. Die Küste, Heft 45.

Siefert, W., 1998. Bemessungswasserstände 2085 A entlang der Elbe - Ergebnisse einer Überprüfung durch die Länderarbeitsgruppe nach 10 Jahren (1995/1996). Die Küste, Heft 60.

Siegismund, F., Schrum, C., 2001. Decadal changes in the wind forcing over the North Sea. Clim Res 18:39-45. doi:10.3354/cr018039

Simpson, M., Breili, K., Kierulf, H.P., Lysaker, D., Ouassou, M., Haug, E., 2012. Estimates of future sea-level changes for norway. Technical Report of the Norwegian Mapping Authority.

Smith, R.L., 1986. Extreme value theory based on the r largest annual events. Journal of Hydrology 86, 27-43.

Smith, R.L.,Weissman, I., 1994. Estimating the extremal index. Journal of the Royal StatisticalSociety: Series B: Methodological 56, 515–528.

Smith, J.M., Cialone, M.A., Wamsley, T.V., McAlpin, T.O., 2010. Potential impact of sea level rise on coastal surges in southeast Louisiana. Ocean Engineering, Vol. 37, pp. 37-47.

Smits, A., Klein-Tank, A.M.G., Können, G.P., 2005. Trends in storminess over the Netherlands 1962–2002. Int. Journal of Climatology, Vol. 25, pp. 1331-1344.

Soares, G., Scotto, M.G., 2004. Application of the r largest-order statistics for long-term predictions of significant wave height. Coastal Engineering 51, 387–394.

Sönnichsen, U., Moseberg, J., 1994. Wenn die Deiche brechen. Husum Druck- und Verlagsgesellschaft.

Soukissian, T.H., Arapi, P.M., 2011. The effect of declustering in the r-largest maxima model for the estimation of Hs-design values S. The Open Ocean Engineering Journal 4, 34-43.

Stedinger, J.R., Vogel, R.M., Foufoula-Georgiou, E., 1993. Frequency Analysis of Extreme Events. In: Handbook of Hydrology, ed. D.R. Maidment, McGraw-Hill, New-York, NY, pp. 18.1-18.66

Stengel, T., Zielke, W.,1994. Der Einfluß eines Meeresspiegelanstiegs auf Gezeiten und Sturmfluten in der Deutschen Bucht. Die Küste, H. 56.

Sterl, A., van den Brink, H., de Vries, H., Haarsma, R., van Meijgaard, E., 2009. An enesemble study of extreme storm surge related water levels in the North Sea in a changing climate, Ocean Science 5, p. 369-378.

Tawn, J.A., 1988. Bivariate extreme value theory: models and estimation. Biometrika 75, 397-415.

Tawn, J.A., 1992. Estimating probabilities of extreme sea-levels. Journal of the Royal Statistical Society: Series C: Applied Statistics 41, 77-93.

Tawn, J.A., Vassie, J.M., 1989. Extreme sea levels: the joint probabilities method revisited and revised. Proceedings of the Institution of Civil Engineers 87, 42-442.

Thompson, K.R., Bernier, N.B., Chan, P., 2009. Extreme sea levels, coastal flooding and climate change with a focus on Atlantic Canada. Natural Hazards 51, 139-150.

Tsimplis, M.N., Shaw, A.G.P., 2010. Seasonal sea level extremes in the Mediterranean Sea and at the Atlantic European coasts. Nat Hazards Earth Syst Sci 10:1457-1475. doi:10.5194/nhess-10-1457-2010.

Ullmann, A., Pirazzoli, P.A., Tomasin, A., 2007. Sea surges in Camargue (French Mediterranean coast): evolution and statistical analysis on the 20th century. Continental Shelf Research, Vol. 27, pp. 922-934.

Ullmann, A., Monbaliu, J., 2010. Changes in atmospheric circulation over the North Atlantic and sea surge variations along the Belgian coast during the 20th century. Int. J. Climatol., Vol. 30, pp. 558-568.

van der Meer, J.W., Stam, C.M., 1992. Wave runup on smooth and rock slopes of coastal structures. Journal of Waterway Port Coastal and Ocean Engineering, Vol. 118 (5).

van Gelder, P., Nykov, M.N., 1998. Regional frequency analysis of extreme water levels along the dutch coast using L-moments: A preliminary study. Proceedings of the 8th international probabilistic workshop, Szcecin, Poland.

Van Rijn, L.C., 2010. Tidal phenomena in the Scheldt Estuary. Report, Deltares.

Vater, S., Klein, R., 2009. Stability of a Cartesian grid projection method for zero Froude number shallow water flows. Num. Math., Vol. 113, p. 123-161

Vermeer, M., Rahmstorf, S., 2009. Global sea level linked to global temperature. http://dx.doi.org/10.1073/pnas.0907765106 .

Viglione, A., Laio, F., Claps, P., 2006. A comparison of homogeneity tests for regional frequency analysis. Water Resources Research, Vol. 43, Issue 3.

von Storch, H., Reichardt, H., 1997. A scenario of storm surge statistics for the German Bight at the expected time of doubled atmospheric carbon dioxide concentration, J. Climate 10, p. 2653-2662

von Storch, H., Woth, K., 2006. Storm surges - the case of Hamburg, Germany. ESSP OSC panel session on ‘‘GEC, natural disasters, and their implications for human security in coastal urban areas’’. Available online: http://www.safecoast.nl/editor/databank/File/hamburg-storms.pdf. Accessed 26 Jan 2012

von Storch, H., Woth, K., 2008. Storm surges, perspectives and options. Sustain Sci 3(1):33–43. doi:10.1007/s11625-008-0044-2

von Storch, H., Doerffner, J., Meinke, I., 2009. Die deutsche Nordseeküste und der Klimawandel. Hamburger Symposium Geographie, Band 1, Hamburg 2009, pp. 9-22.

von Storch, H., 2012. Storm Surges: Phenomena, Forecasting and Scenarios of Change. Proceeding of the International Union of Theoretical and Applied Mechanics (IUTAM).

Vrijling, J.K., Kanning, W., Kok, M., Jonkman, S.N., 2007: Designing robust coastal structures. In: Coastal structures 2007, Proceedings of the 5th coastal structures international conference, Venice, Italy.

Wahl, T., Jensen, J., Frank, T., 2010. On analysing sea level rise in the German Bight since 1844. Nat Hazards Earth Syst Sci 10:171–179. doi:10.5194/nhess-10-171-2010

Wahl, T., Jensen, J., Frank, T., Haigh, I.D., 2011. Improved estimates of mean sea level changes in the German Bight over the last 166 years. Ocean Dyn 61(5):701–715. doi:10.1007/s10236-011-0383-x

Wahl. T., 2012. Statistical Methods to assess the hydrodynamic boundary conditions for risk based design approaches in coastal engineering - Methods and application to the German North Sea

coastline. Mitteilungen des Forschungsinstituts Wasser und Umwelt der Universität Siegen. Heft 4.

Wahl, T., Haigh, I.D., Woodworth, P.L., Albrecht, F., Dillingh, D., Jensen, J., Nicholls, R.J., Weisse, R., Wöppelmann, G., 2013. Observed mean sea level changes around the North Sea coastline from 1800 to present, Earth-Science Reviews, Vol.124, pp. 51-67, http://dx.doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.05.003.

Walden, A.T., Prescott, P., Webber, N.B., 1982. An alternative approach to the joint probability method for extreme high sea level computations. Coastal Engineering 6, 71–82.

Wang, W., Van Gelder, P.H.A.J.M., Vrijling, J.K., 2005. Trend and stationarity analysis for stream flow processes of rivers in western Europe in the 20th century. IWA International Conference on Water Economics, Statistics, and Finance, pp. 451–461.

Wang, X.L., Feng, Y., Compo, G.P., Zwiers, F.W., Allan, R. J., Swail, V.R., Sardeshmukh, P. D., 2013. Is the storminess in the twentieth century reanalysis really inconsistent with observations? - A reply to the comment by Krüger et al. (2013), Geophys. Res. Abstr., Vol. 15.

WASA Group, 1998. Changing waves and storms in the Northeast Atlantic? Bull Am Meteorol Soc 79:741–760. doi:10.1175/1520-0477(1998)079 < 0741:CWASIT > 2.0.CO;2

Wemelsfelder, P. J., 1939. Wetmatigheden in het optreden van stormvloeden. De Ingenieur, No. 9.

Weiss, J., Bernadara, P., Benoit, M., 2013. A method to identify and form homogeneous regions for regional frequency analysis of extreme skew storm surges. Proceedings of the 1st International Short Conference on Advances in Extreme Value Analysis and Application to Natural Hazards (EVAN2013), Siegen, Germany

Weisse, R., von Storch, H., 2009. Marine Climate and Climate Change: Storms, Wind Waves and Storm Surges. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York.

Weisse, R., von Storch, H., Niemeyer, H.D., Knaack, H., 2011. Changing North Sea storm surge climate: An increasing hazard? Ocean & Coastal Management, Vol. 68, pp. 58-68.

Wiltshire, S.E., 1985. Grouping basins for regional flood frequency analysis. Hydrological Sciences Journal, Vol. 30, Issue 1, doi: 10.1080/02626668509490976, pp. 151-159

Wiltshire, S.E., 1986. Identification of Homogeneous Regions for Flood Frequency Analysis. Journal of Hydraulics, Vol. 84, pp. 287-307

Willmot, C.J., 1981. On the validation of models. Physical Geography, Vol. 2, p. 184–194

Woodworth, P.L., Blackman, D.L., 2004. Evidence for systematic changes in extreme high waters since the mid-1970s. Journal of Climate 17, 1190–1197.

Woodworth, P.L., Teferle, F.N., Bingley, R.M., Shennan, I., Williams, S.D.P., 2009. Trends in UK mean sea level revisited. Geophysical Journal International 176 (22), 19–30.

Woodworth, P.L., 2010: A survey of recent changes in the main components of the ocean tide. Continental Shelf Research, vol. 30, pp. 1680–1691.

Woodworth, P.L., Menéndez, M., Gehrels, W.R., 2011. Evidence for century-timescale acceleration in mean sea levels and for recent changes in extreme sea levels. Surv Geophys 32:603–618

Wöppelmann, G., Pouvreau, N., Coulomb, A., Simon, B., Woodworth, P.L., 2008. Tide gage datum continuity at Brest since 1711: France's longest sea-level record. Geophysical Research Letters 35, L22605. http://dx.doi.org/10.1029/2008GL035783.

Wöppelmann, G., Letetrel, C., Santamaria, A., Bouin, M.-N., Collilieux, X., Altamimi, Z., Williams, S.D.P., Miguez, B.M., 2009. Rates of sea-level change over the past century in a geocentric reference frame. Geophysical Research Letters 36, L12607. http://dx.doi.org/10.1029/2009GL038720.

Woth, K., R. Weisse, H. von Storch, 2006. Climate change and North Sea storm surge extremes: An ensemble study of storm surge extremes expected in a changed climate projected by four different regional climate models. Ocean Dyn., Vol. 56, pp. 3-15.

Wu, Jin, 1988: Wind-Stress Coefficients at Light Winds. J. Atmos. Oceanic Technol., 5, 885–888. doi:

Zachary, S., Feld, G.,Ward, G.,Wolfram, J., 1998. Multivariate extrapolation in the offshore environment. Applied Ocean research 20 (5), 273–295.

Zhang, X., Ge, W., 2009. A new method to choose the threshold in the POT model. Proceedings to the 1st International Conference on Information Science and, Engineering (ICISE2009).

Anhang

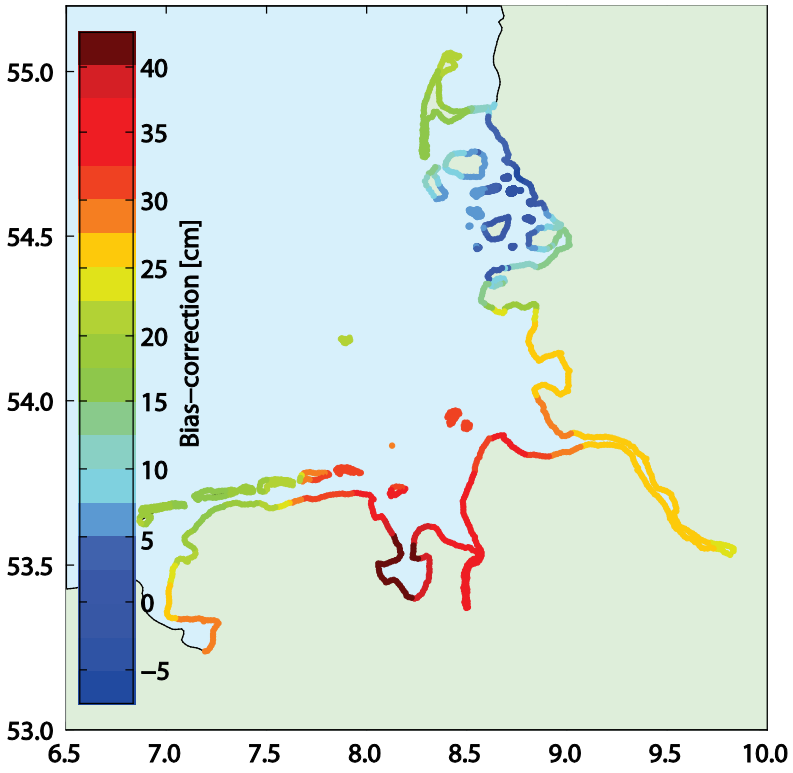


Abbildung 36: Durchschnittliche Biaskorrektur zwischen 1970 und 2009.

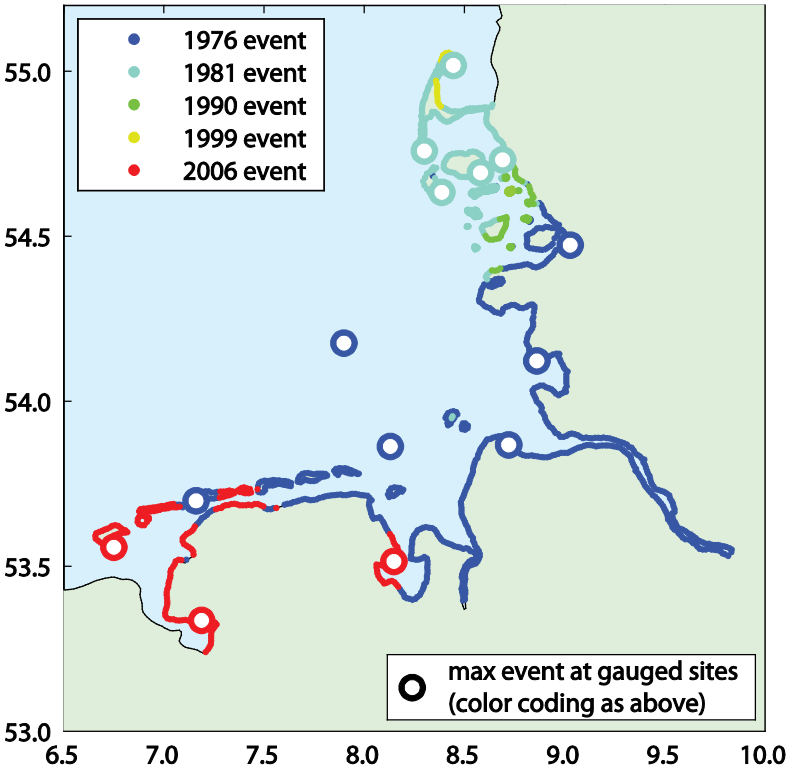
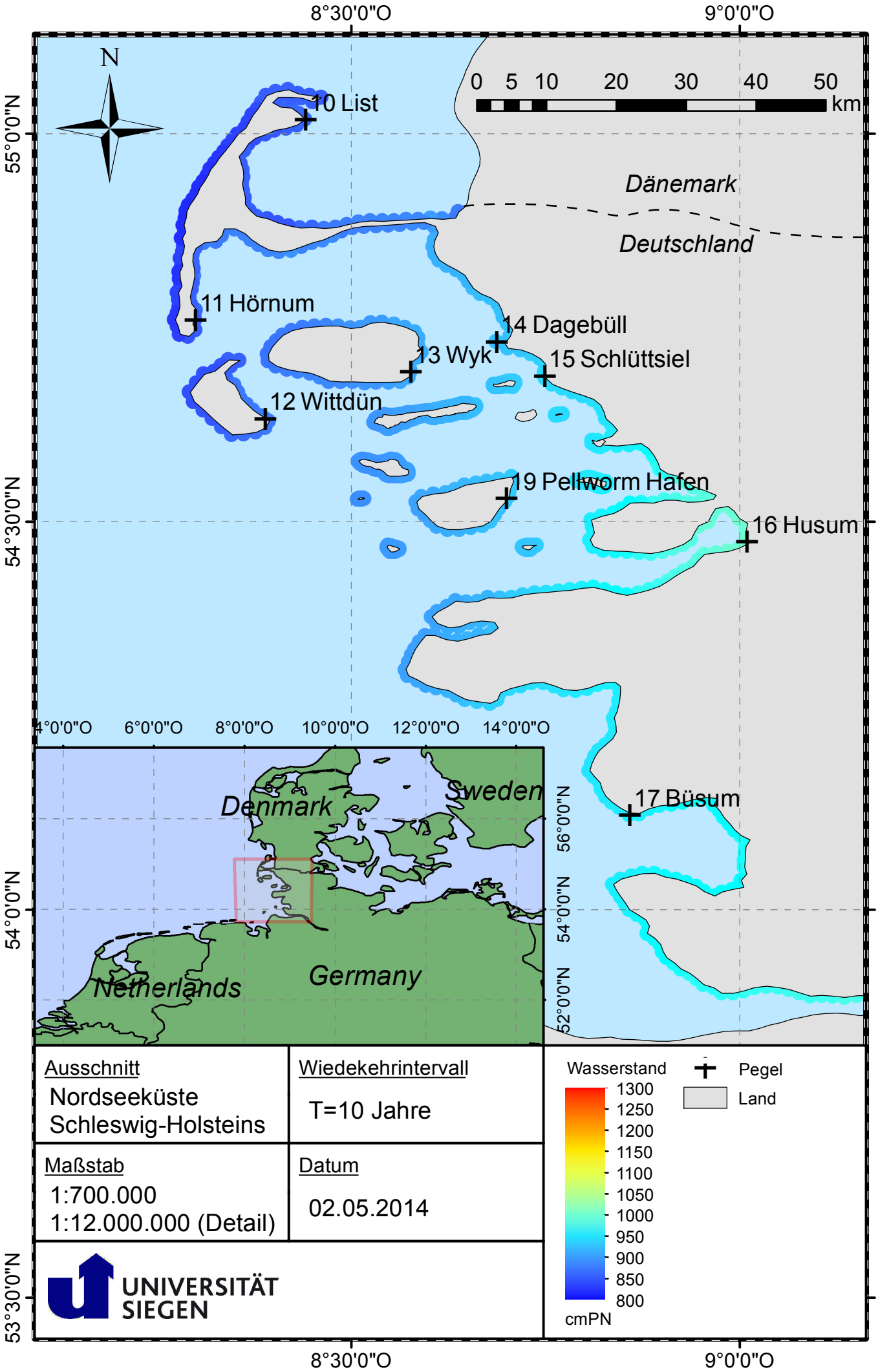
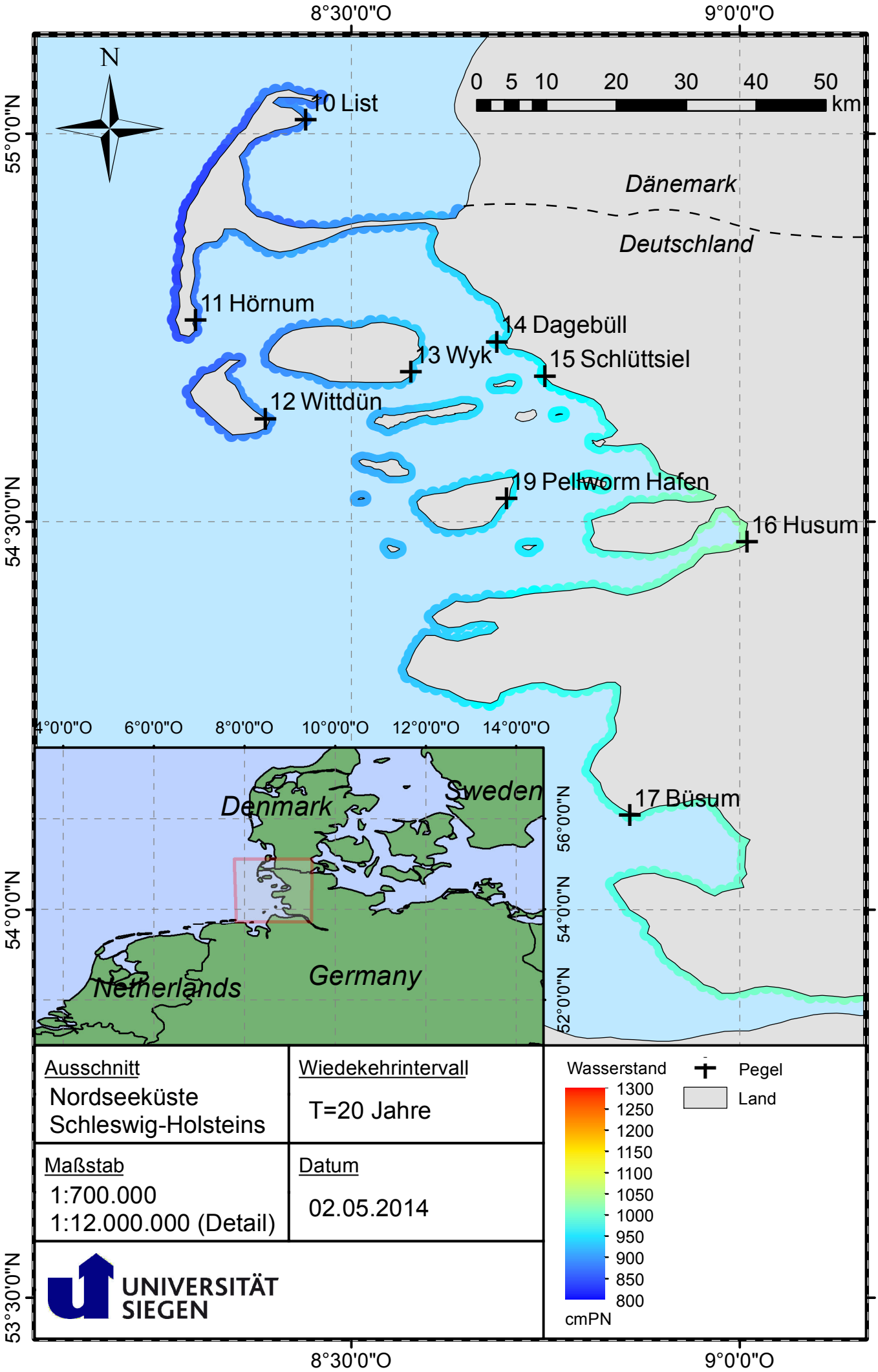
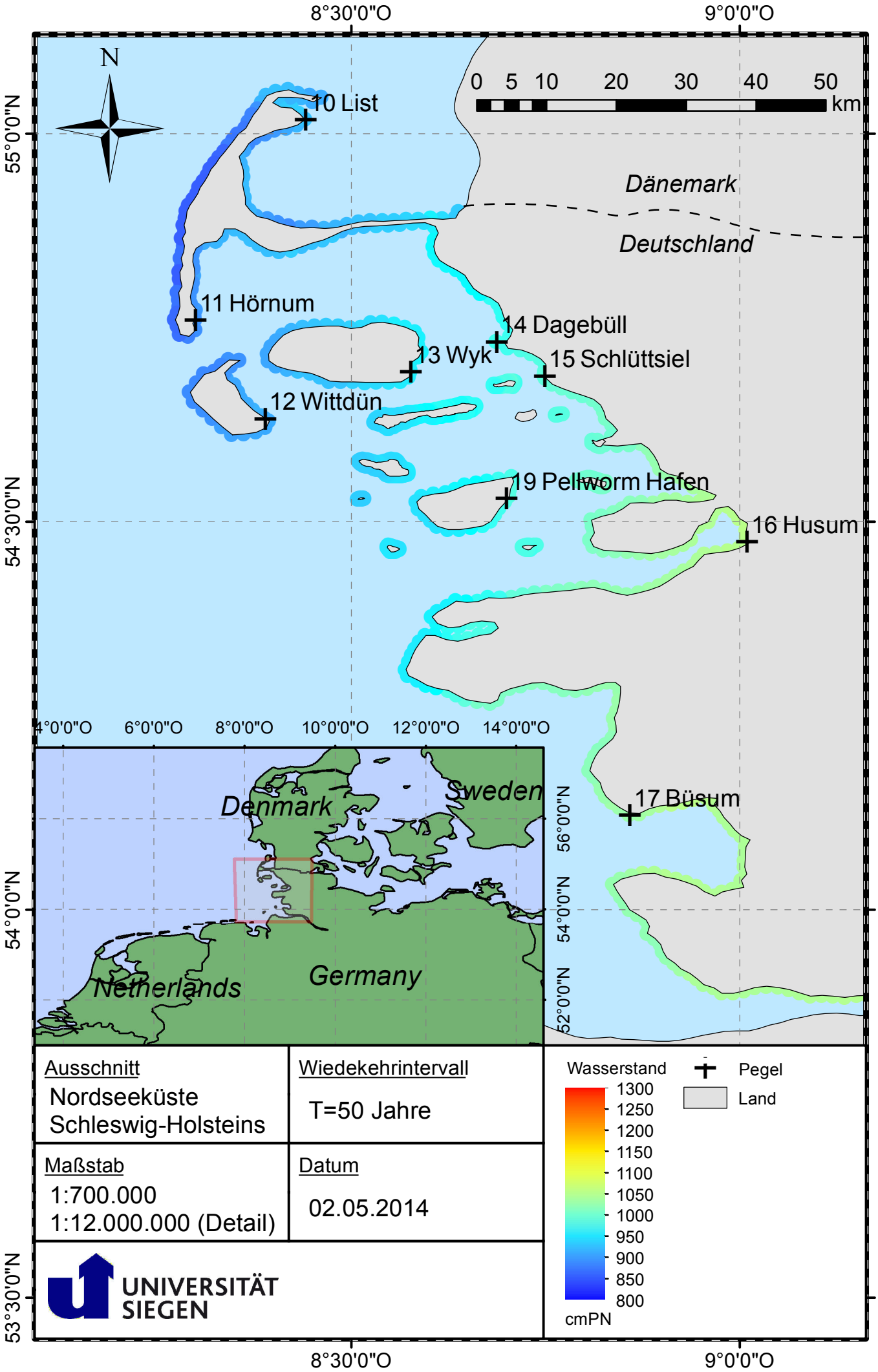
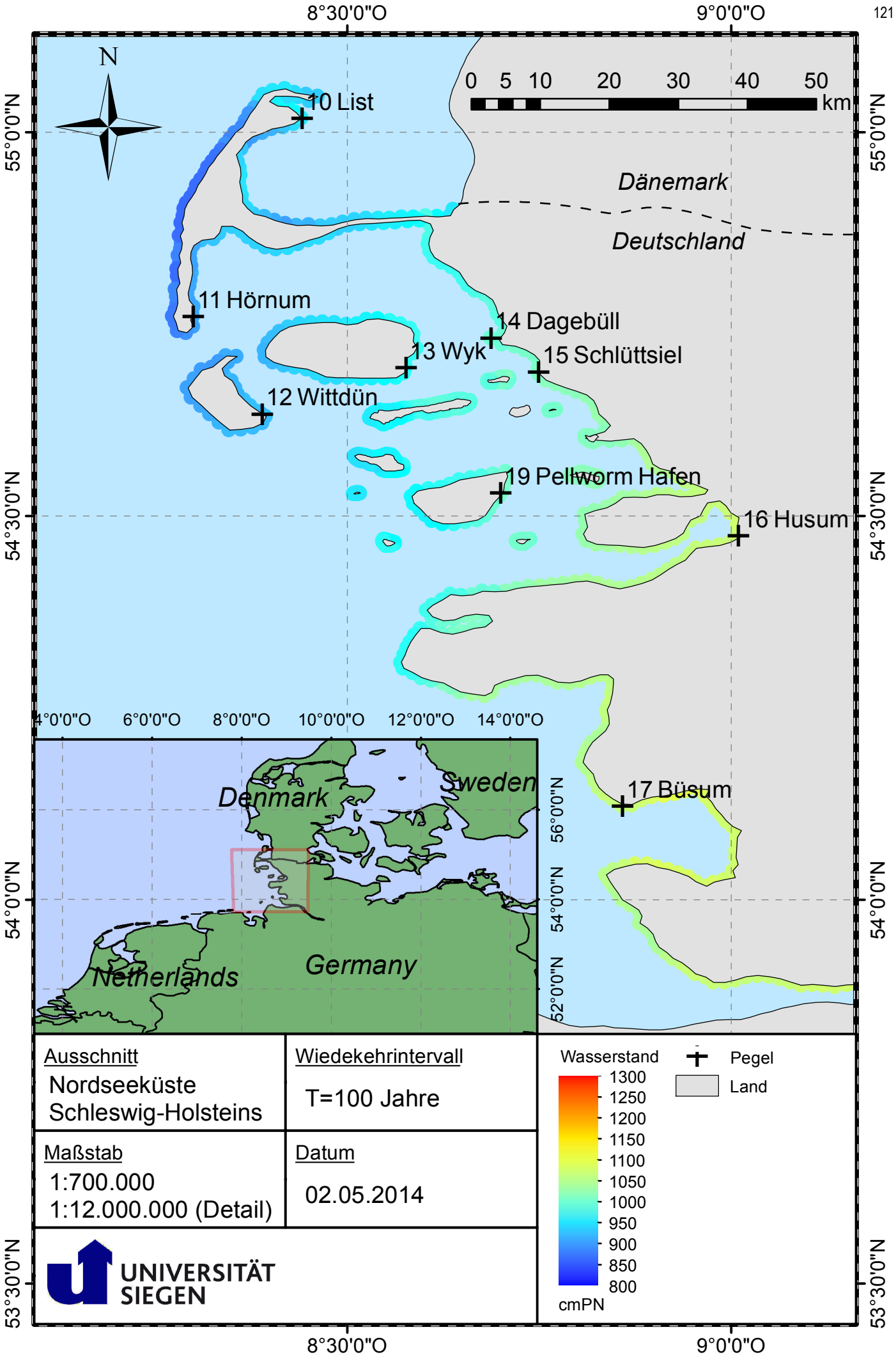


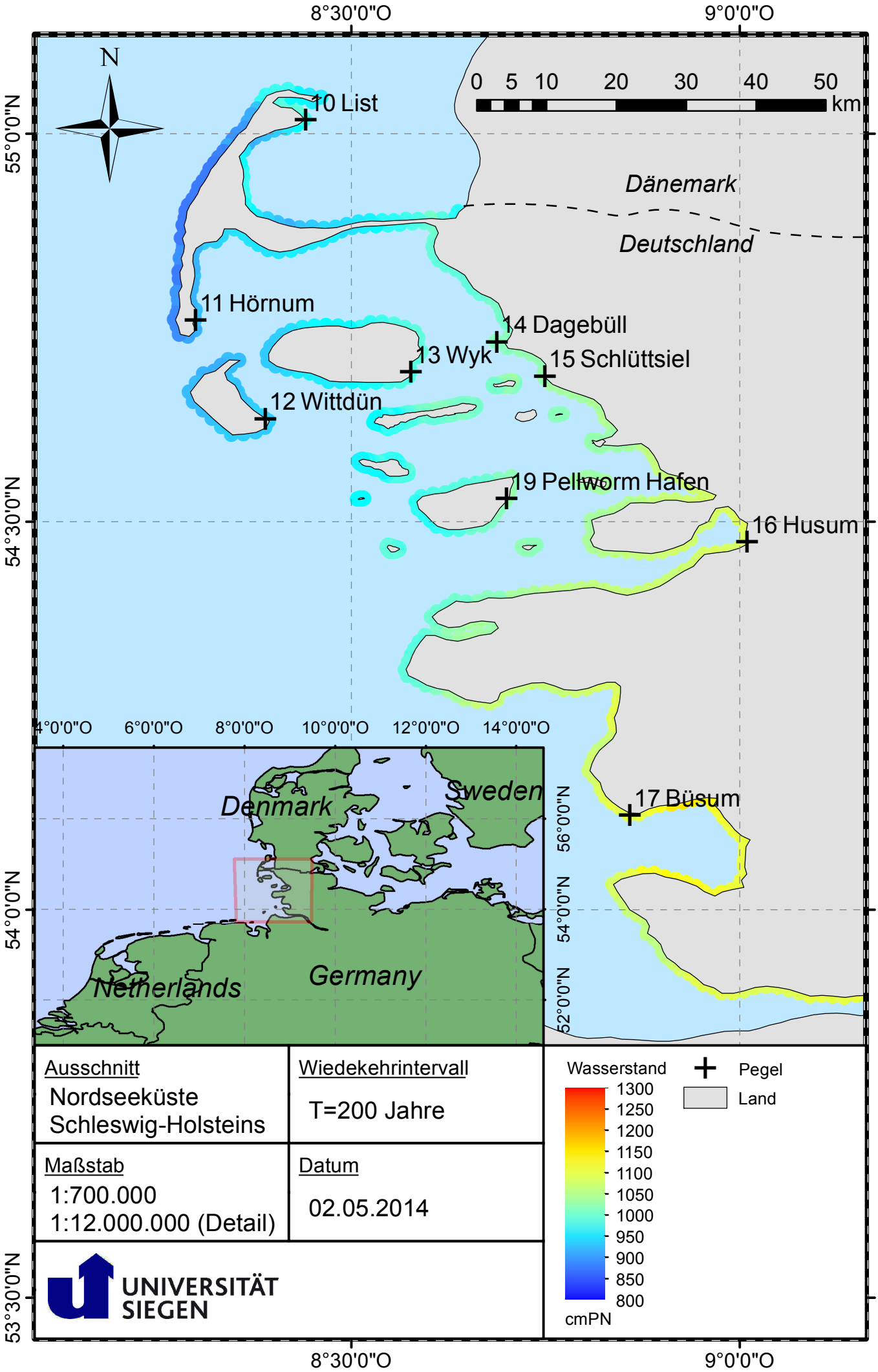
Abbildung 37: Sturmfluten mit den höchsten Wasserständen zwischen 1970 und 2009 auf Basis modellierter Wasserstände.

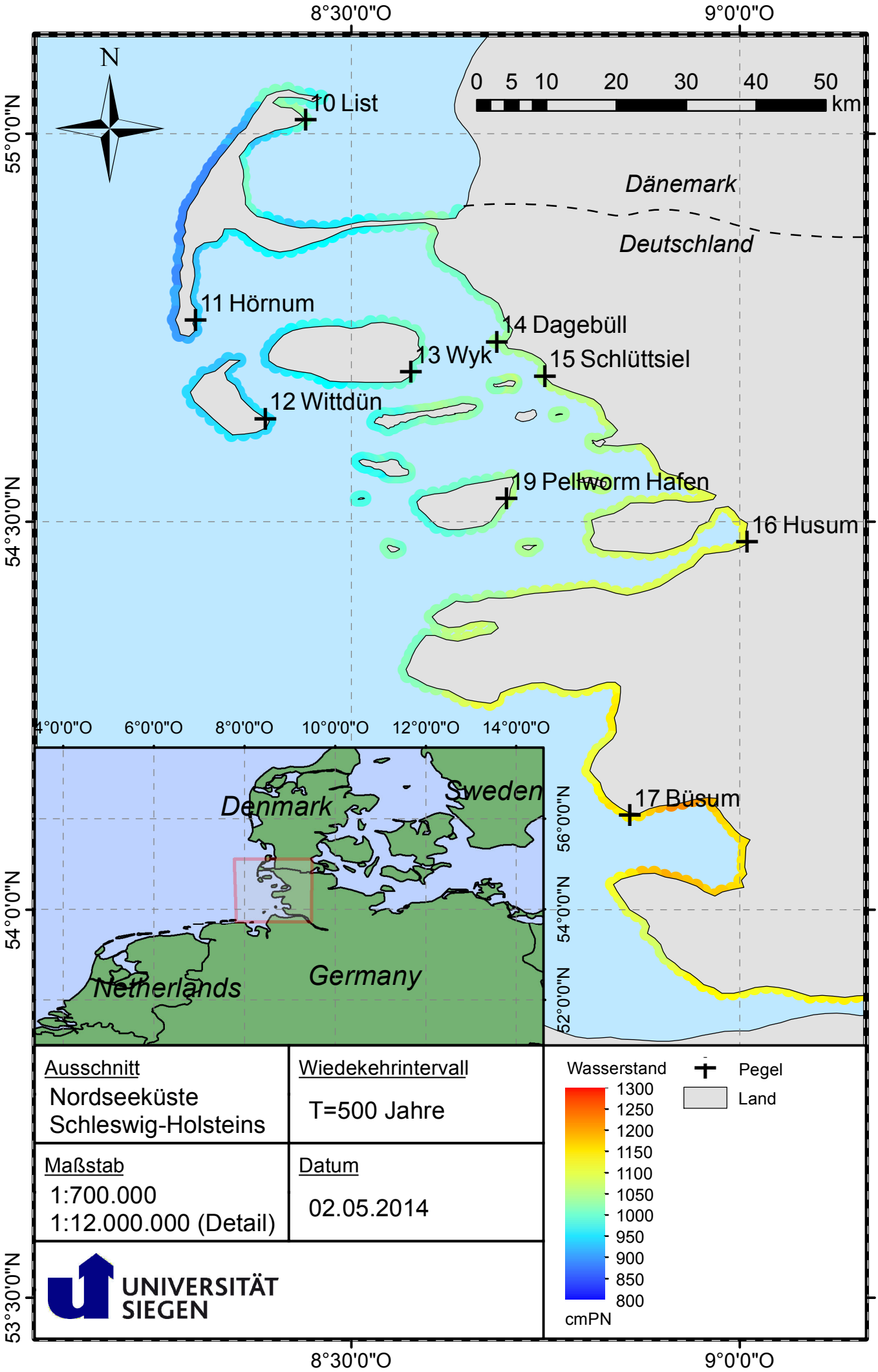

8°30'0"O
9°0'0"O
55°0'0"N
54°30'0"N
54°0'0"N
53°30'0"N
N
0 5 10 20 30 40 50
km
10 List
11 Hörnum
12 Wittdün
13 Wyk
14 Dagebüll
15 Schlüttsiel
19 Pellworm Hafen
16 Husum
17 Büsum
Dänemark
Deutschland
4°0'0"O
6°0'0"O
8°0'0"O
10°0'0"O
12°0'0"O
14°0'0"O
56°0'0"N
54°0'0"N
52°0'0"N
Denmark
Sweden
Germany
Netherlands
Ausschnitt
Nordseeküste Schleswig-Holsteins
Wiedekehrintervall
T=10 Jahre
Maßstab
1:700.000
1:12.000.000 (Detail)
Datum
02.05.2014
UNIVERSITÄT SIEGEN
Wasserstand
1300
1250
1200
1150
1100
1050
1000
950
900
850
800
cmPN
Pegel
Land

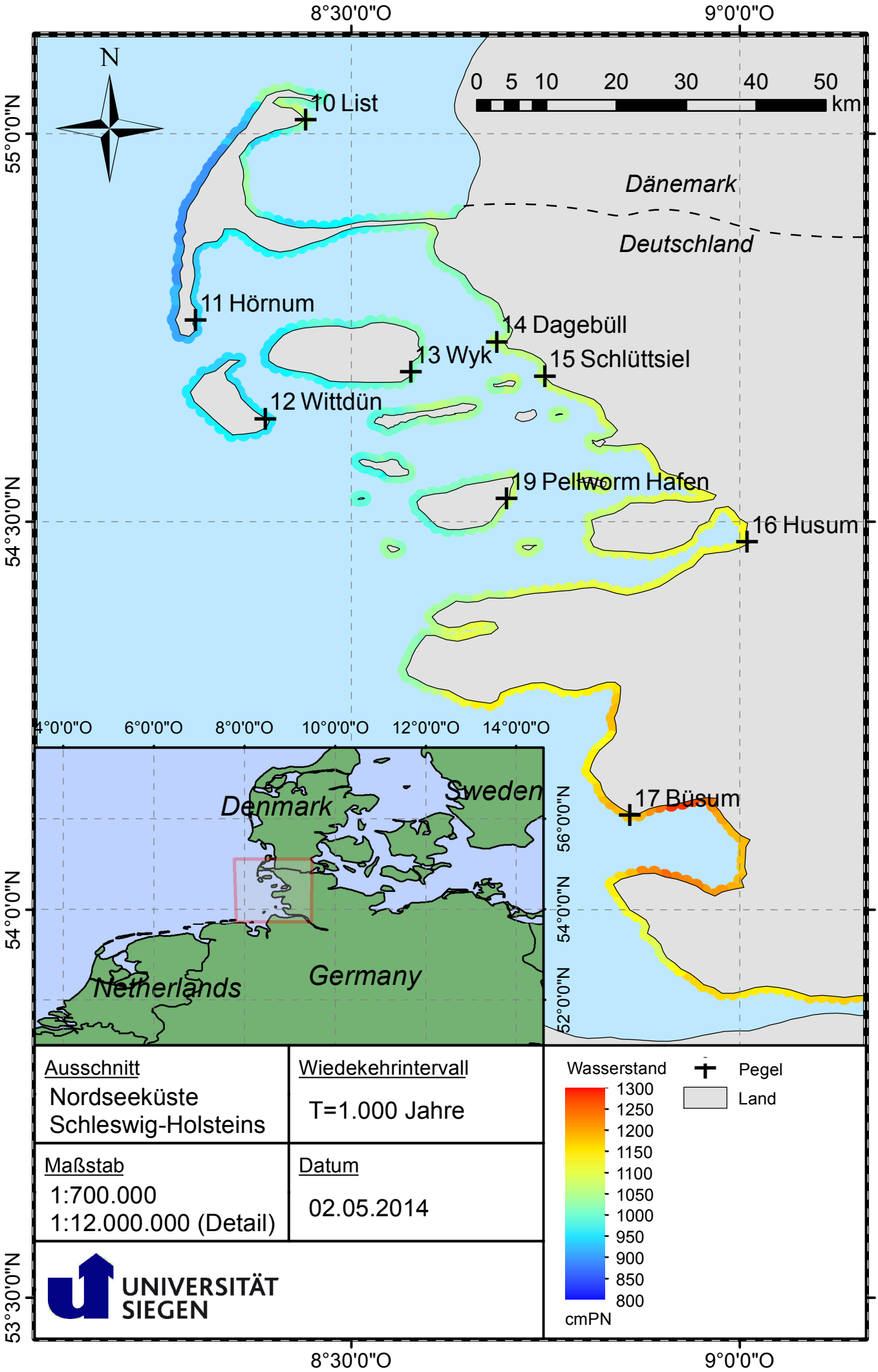

8°30'0"O
9°0'0"O
55°0'0"N
54°30'0"N
54°0'0"N
53°30'0"N
N
0 5 10 20 30 40 50
km
10 List
11 Hörnum
12 Wittdün
13 Wyk
14 Dagebüll
15 Schlüttsiel
19 Pellworm Hafen
16 Husum
17 Büsum
Dänemark
Deutschland
4°0'0"O
6°0'0"O
8°0'0"O
10°0'0"O
12°0'0"O
14°0'0"O
56°0'0"N
54°0'0"N
52°0'0"N
Denmark
Sweden
Germany
Netherlands
Ausschnitt
Nordseeküste Schleswig-Holsteins
Wiedekehrintervall
T=20 Jahre
Maßstab
1:700.000
1:12.000.000 (Detail)
Datum
02.05.2014
UNIVERSITÄT SIEGEN
Wasserstand
1300
1250
1200
1150
1100
1050
1000
950
900
850
800
cmPN
Pegel
Land


8°30'0"O
9°0'0"O
55°0'0"N
54°30'0"N
54°0'0"N
53°30'0"N
N
0 5 10 20 30 40 50
km
10 List
11 Hörnum
12 Wittdün
13 Wyk
14 Dagebüll
15 Schlüttsiel
19 Pellworm Hafen
16 Husum
17 Büsum
Dänemark
Deutschland
4°0'0"O
6°0'0"O
8°0'0"O
10°0'0"O
12°0'0"O
14°0'0"O
56°0'0"N
54°0'0"N
52°0'0"N
Denmark
Sweden
Germany
Netherlands
Ausschnitt
Nordseeküste Schleswig-Holsteins
Wiedekehrintervall
T=50 Jahre
Maßstab
1:700.000
1:12.000.000 (Detail)
Datum
02.05.2014
UNIVERSITÄT SIEGEN
Wasserstand
1300
1250
1200
1150
1100
1050
1000
950
900
850
800
cmPN
Pegel
Land


8°30'0"O
9°0'0"O
55°0'0"N
54°30'0"N
54°0'0"N
53°30'0"N
N
0 5 10 20 30 40 50
km
10 List
11 Hörnum
12 Wittdün
13 Wyk
14 Dagebüll
15 Schlüttsiel
19 Pellworm Hafen
16 Husum
17 Büsum
Dänemark
Deutschland
4°0'0"O
6°0'0"O
8°0'0"O
10°0'0"O
12°0'0"O
14°0'0"O
56°0'0"N
54°0'0"N
52°0'0"N
Denmark
Sweden
Germany
Netherlands
Ausschnitt
Nordseeküste Schleswig-Holsteins
Wiedekehrintervall
T=100 Jahre
Maßstab
1:700.000
1:12.000.000 (Detail)
Datum
02.05.2014
UNIVERSITÄT SIEGEN
Wasserstand
1300
1250
1200
1150
1100
1050
1000
950
900
850
800
cmPN
Pegel
Land


8°30'0"O
9°0'0"O
55°0'0"N
54°30'0"N
54°0'0"N
53°30'0"N
N
0 5 10 20 30 40 50
km
10 List
11 Hörnum
12 Wittdün
13 Wyk
14 Dagebüll
15 Schlüttsiel
16 Husum
17 Büsum
19 Pellworm Hafen
Dänemark
Deutschland
4°0'0"O
6°0'0"O
8°0'0"O
10°0'0"O
12°0'0"O
14°0'0"O
56°0'0"N
54°0'0"N
52°0'0"N
Denmark
Sweden
Germany
Netherlands
Ausschnitt
Nordseeküste Schleswig-Holsteins
Wiedekehrintervall
T=200 Jahre
Maßstab
1:700.000
1:12.000.000 (Detail)
Datum
02.05.2014
UNIVERSITÄT SIEGEN
Wasserstand
1300
1250
1200
1150
1100
1050
1000
950
900
850
800
cmPN
Pegel
Land


8°30'0"O
9°0'0"O
55°0'0"N
54°30'0"N
54°0'0"N
53°30'0"N
N
0 5 10 20 30 40 50
km
10 List
11 Hörnum
12 Wittdün
13 Wyk
14 Dagebüll
15 Schlüttsiel
19 Pellworm Hafen
16 Husum
17 Büsum
Dänemark
Deutschland
4°0'0"O
6°0'0"O
8°0'0"O
10°0'0"O
12°0'0"O
14°0'0"O
56°0'0"N
54°0'0"N
52°0'0"N
Denmark
Sweden
Germany
Netherlands
Ausschnitt
Nordseeküste Schleswig-Holsteins
Wiedekehrintervall
T=500 Jahre
Maßstab
1:700.000
1:12.000.000 (Detail)
Datum
02.05.2014
UNIVERSITÄT SIEGEN
Wasserstand
1300
1250
1200
1150
1100
1050
1000
950
900
850
800
cmPN
Pegel
Land


8°30'0"O
9°0'0"O
55°0'0"N
54°30'0"N
54°0'0"N
53°30'0"N
N
0 5 10 20 30 40 50
km
10 List
11 Hörnum
12 Wittdün
13 Wyk
14 Dagebüll
15 Schlüttsiel
19 Pellworm Hafen
16 Husum
17 Büsum
Dänemark
Deutschland
4°0'0"O
6°0'0"O
8°0'0"O
10°0'0"O
12°0'0"O
14°0'0"O
56°0'0"N
54°0'0"N
52°0'0"N
Denmark
Sweden
Germany
Netherlands
Ausschnitt
Nordseeküste Schleswig-Holsteins
Wiedekehrintervall
T=1.000 Jahre
Maßstab
1:700.000
1:12.000.000 (Detail)
Datum
02.05.2014
UNIVERSITÄT SIEGEN
Wasserstand
1300
1250
1200
1150
1100
1050
1000
950
900
850
800
cmPN
Pegel
Land

ZukunftHallig B

(IWW)

gefördert durch:	BMBF
Förderkennzeichen:	03KIS094
Bearbeitungszeitraum:	01.12.2010 - 30.11.2013
Projektverlängerung:	01.12.2013 - 30.04.2014

Aufgestellt von: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Holger Schüttrumpf
Dipl.-Geogr. Theide Wöffler

Lehrstuhl und Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft (IWW) der RWTH Aachen University

Aachen, April 2014

Kontakt: Holger Schüttrumpf | e-Mail: schuettrumpf@iww.rwth-aachen.de

Inhalt

1 EINLEITUNG 143
1.1 Allgemeines 143
1.2 Vorgehensweise 144

2 NUMERISCHES MODELL ZUR BESTIMMUNG DER STRÖMUNGS- UND SEEGANGSVERHÄLTNISSE 146
2.1 Vorherrschende und prognostizierte Randbedingungen 146
2.2 Delft3D 155
2.3 Grundlagen der Seegangsmodellierung 157
2.4 Simulating Waves Nearshore (SWAN) 158
2.5 Nordseemodell 159
2.6 Wattenmeermodell 162
2.7 Überflutungssimulationen für die Halligen 166
2.8 Zusammenfassung 167

3 ENTWICKLUNG EINES BEMESSUNGSANSATZES FÜR HALLIGRAUSTREIFEN 168
3.1 Allgemeines 168
3.2 Maßgebende Parameter als Grundlage für die Bemessung von Halligraustreifen 170
3.3 Entwicklung eines Modells für Halligraustreifen 172
3.4 Physikalische Modellversuche 172
3.5 Numerische Modellversuche 177
3.6 Funktionale Bemessung eines Halligraustreifens 178
3.7 Ermittlung der Einwirkungs- und Widerstandsgrößen für den Halligraustreifen 180
3.8 Beispielhafte Bemessung eines Raustreifenprofils auf der Hallig Langeneß 191

4 UNTERSUCHUNGEN ZUR ERHÖHUNG DER SEDIMENTATIONSRATEN AUF DEN HALLIGFLÄCHEN 202
4.1 Allgemein 202
4.2 Situation an der Sieltoranlage Osterwehl 203
4.3 Stationäre hydraulische Berechnungen für die Sieltoranlage Osterwehl 205
4.4 Numerisches Modell zur Simulation der Öffnung des Sieltores Osterwehl 207
4.5 In-situ-Messungen 210
4.6 Zusammenfassung 227

5 WARFTEN 229
5.1 Einleitung 229
5.2 Ermittlung der Sicherheitsstandards der Halligwarften 230
5.3 Risikoorientierte Gefährdungsanalyse 238

6 ENTWICKLUNG VON ALTERNATIVEN KÜSTENSCHUTZ- UND BEWIRTSCHAFTUNGSSTRATEGIEN 240
6.1 Allgemein 240
6.2 Ideengenerierung zukünftiger Küstenschutzmaßnahmen 240
6.3 Beschreibung und Bewertung der Ideen der Zukunftworkshops 242
6.4 H1 - Bepflanzung und Verbindung der Außensände 243
6.5 H2 - Raupflasterung der Warften 247
6.6 H3 - Deichschlauch 248
6.7 H4 – Ringdeich als Wellenbrecher vor die Warft 250
6.8 H5 - Hydraulische Hochwasserschutzwand 256
6.9 L1 - Warftverstärkung durch Abflachung, Raupflasterung und Freiborderhöhung 259
6.10 L2 - Automatische Warfterhöhung durch Wasserkraft 264
6.11 L3 - Komplette Warfterhöhung / Neubau 265
6.12 L4 - Wirkungsvolle Schutzräume in den Häusern einrichten. 266
6.13 L5 - Deich von Sylt bis Eiderstedt 267
6.14 Zusammenfassende Bewertung 269

7 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK 272

8 SCHRIFTTUM 274

A ANHANG 278

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1 Untersuchungsgebiet und Zuordnung der Kapitel der Untersuchungen zu den unterschiedlichen Halligabschnitten; Bathymetrie und Topographie des nordfriesischen Wattenmeeres (Verschnitt aus Wattgrundkarten, Seekarten, DGM1 und DGM25) 144

Abb. 2 Relative Häufigkeiten der auf Tageswerte gemittelten Messdaten der Windmessstation Hooge für den Zeitraum vom 01.01.1969 bis 31.01.2011 146

Abb. 3 Modellierte Windrichtung und zugehörige Windgeschwindigkeit der Jahre 2010 bis 2080 für den Knotenpunkt lon = 8.2° und lat = 54.6° im IPCC-Szenario A1B 148

Abb. 4 Modellierte Windrichtung und zugehörige Windgeschwindigkeit der Jahre 2010 bis 2080 für den Knotenpunkt lon = 8.2° und lat = 54.6° im IPCC-Szenario B1 148

Abb. 5 Relative Häufigkeiten der modellierten Windgeschwindigkeiten für die Jahre 2010 – 2080 der IPCC Szenarien A1B (links) und B1 (rechts) 149

Abb. 6 Positionen der Messbojen Rütergat, Süderaue, Norderhever und Süderhever 151

Abb. 7 Prozentuale Häufigkeit der Seegangsrichtung und der zugehörigen signifikanten Wellenhöhe für die Seegangsmessbojen Rütergat, Süderaue, Süderhever und Norderhever 152

Abb. 8 Verhältnis $H_{1/3}$ zu T_m; A Boje Süderhever, B Boje Norderhever 154

Abb. 9 Verhältnis H1/3 zu Tm; A Boje Rütergat, B Boje Süderaue 155

Abb. 10 Modellkette der numerischen Nordsee-, Wattenmeer- und Halligmodelle 156

Abb. 11 Modelleigenschaften des Nordseemodells 161

Abb. 12 Auf der Grundlage von XTPXO7.2-Daten simulierter Tidewasserstand der Nordsee zum Zeitpunkt des Tidehochwassers in der Deutschen Bucht 161

Abb. 13 Alter der Bathymetriedaten 162

Abb. 14 Simulierte Wasserstände im südlichen nordfriesischen Wattenmeer 164

Abb. 15 Tiefengemittelte Strömungsgeschwindigkeiten zu unterschiedlichen Tidezeitpunkten 165

Abb. 16 Signifikante Wellenhöhe zu Tidehochwasser (links) und Tideniedrigwasser (rechts) bei Wind aus 290° und 24 m/s 165

Abb. 17 Wasserstandsganglinie der Capella-Sturmflut vom 3. Januar 1976 am Pegel Büsum (nach Stadelmann (2008)) 166

Abb. 18	Entwicklung eines Landunters auf der Hallig Nordstrandischmoor	167
Abb. 19	Kantenschutz der Halligen	168
Abb. 20	Gedankenmodell zu Einwirkungen und Prozessen an und im Halligraustreifen	170
Abb. 21	Aufbau des physikalischen Modellversuchs in der Ausbaustufe 2 in der Kipprinne des IWW	173
Abb. 22	Sieblinie der verwendeten Kalksandstein-Körnung	174
Abb. 23	Anordnung der Messquerschnitte während der physikalischen Modellversuche	176
Abb. 24	Definition des Freibords für durchlässige Bauwerke nach dem EurOtop Manual (Pullen et al., 2007)	182
Abb. 25	Einfluss des Reibungsbeiwertes f auf die Überlaufgeschwindigkeit auf der Bauwerkskrone	187
Abb. 26	Bemessungsablauf für den Halligraustreifen	190
Abb. 27	Lage des untersuchten Raustreifenprofils auf der Hallig Langeneß	191
Abb. 28	Deckwerksprofil an Station 7+037 auf der Hallig Langeneß (LKN-SH, 2011b)	192
Abb. 29	Hs (links) und Tm (rechts) für NHN+2,6 m, θ=300° und U=26 m/s	193
Abb. 30	Wellenüberlauf- und Sickerrate am Ende des Raustreifens	195
Abb. 31	Reduktion des Wellenüberlaufs	196
Abb. 32	Geschwindigkeit des Wellenüberlaufschwalls am Beginn der Halligmarsch für verschiedene Bauwerkskonfigurationen	196
Abb. 33	Entwässerungsgebiete der Hallig Langeneß	198
Abb. 34	Geographische Lage der Sieltoranlage Osterwehl	203
Abb. 35	Längsschnitt und Grundriss des Sieltores Osterwehl (Petersen, 1981)	204
Abb. 36	Fließquerschnitt im Bereich der Sieltoranlage Osterwehl basierend auf dem DGM1 für MThw (NHN +1,19 m) und MThw + 81 cm (NHN +2,0 m)	208
Abb. 37	Modellierte Wasserstände an der Sieltoranlage Osterwehl für MThw, MThw +0,5 m und MThw +1,0 m	208
Abb. 38	Modellierte tiefengemittelte Strömungsgeschwindigkeiten (Magnitude) an der Sieltoranlage Osterwehl für MThw, MThw +0,5 m und MThw +1,0 m	209

Abb. 39 Modellierte tiefengemittelte Strömungsgeschwindigkeiten an der Sieltoranlage Osterwehl für MThw +1,0 m bei maximalen Flutstrombedingungen (links) und maximalen Ebbstrombedingungen (rechts) 209

Abb. 40 Maximale Bodenschubspannung unter Bedingung des MThw+1,0 m bei Flut (links) und Ebbe (rechts) 210

Abb. 41 Valeport Midas CTD-Sonde im Außenbereich des Sieltores Osterwehl während Tideniedrigwassers 211

Abb. 42 Orte der durchgeführten Messungen im Rahmen der Messkampagne Osterwehl 212

Abb. 43 Berechnete Wassertiefen an den Positionen der CTD-Sonden 213

Abb. 44 Wasserstände in Meter bezogen auf NHN an den Positionen der CTD-Sonden 213

Abb. 45 Measure Cat Teledyne RD Instruments Sentinel ADCP im Osterwehl 214

Abb. 46 Maximale horizontale Strömungsgeschwindigkeiten am Profil 45 m am 27.02.2013 zwischen 13:32 Uhr und 13:41 Uhr 215

Abb. 47 Horizontale Strömungsgeschwindigkeiten in Bezug auf die Hauptströmungsrichtung am Profil 45 m am 27.02.2013 zwischen 13:32 Uhr und 13:41 Uhr 216

Abb. 48 Gemittelte Durchflussmengen am Sieltor Osterwehl in Abhängigkeit des Wasserstandes im Tidenzyklus 218

Abb. 49 Gemittelte Fließgeschwindigkeiten am Sieltor Osterwehl in Abhängigkeit des Wasserstandes im Tidenzyklus 219

Abb. 50 Aufbau des Erosionsmessgerät EROSIMESS 220

Abb. 51 Das EROSIMESS während der Messkampagne am Osterwehl 221

Abb. 52 Kalibrierungskurve Lichtintensität – Feststoffkonzentration für Messpunkt P5 222

Abb. 53 Feststoffkonzentration über die Zeit am Messpunkt P3 223

Abb. 54 Fotos der Trübung während der Messung an Messpunkt P3; links: Propeller noch in Ruhe; Mitte: Beginn der Propellerdrehung; rechts: gegen Ende der Messung 223

Abb. 55 Feststoffkonzentration über die Zeit am Messpunkt P4 224

Abb. 56 Feststoffkonzentration über die Zeit am Messpunkt P5 225

Abb. 57 Ergebnisse der Trübungsmessungen und Wassertiefe im Binnenbereich 226

Abb. 58 Zeitreihe der Salinität an den Positionen der CTD-Sonden 227

Abb. 59 Einfluss von Klimaänderungen auf das Risiko durch Sturmfluten 229

Abb. 60 Inventar möglicher Küstenschutzmaßnahmen und deren Bereiche am Beispiel eines Querprofils auf der Hallig Hooge 230

Abb. 61 Einteilung einer idealisierten Warft in acht Richtungsklassen 232

Abb. 62 Beispiele der drei Warftkategorien: a) Warft ohne Ringdeich (Westerwarft auf Hooge); b) Warft mit geschlossenem Ringdeich (Ockenswarft auf Hooge); c) Warft mit nicht durchgängigem Ringdeich (Süderhörn auf Langeneß) 234

Abb. 63 Einteilung des Schutzstandards in Kategorien durch Wellenüberlauf an Warften in Anlehnung an die Anhaltswerte zur Wirkung von Wellenüberlaufraten nach EAK (2002) 235

Abb. 64 Mittlere Wellenüberlaufraten der Backenswarft auf Hooge 236

Abb. 65 Ergebnisse der risikoorientierten Gefährdungsanalyse für die Halligwarften 238

Abb. 66 Schematische Darstellung der während der Zukunftworkshops auf Hooge (links) und Langeneß (rechts) entwickelten Ideen 241

Abb. 67 Schematische Darstellung der Bepflanzung und Verbindung der Außensände 243

Abb. 68 Referenzzustand (links) und Sandaufspülung (rechts) 244

Abb. 69 Referenzzustand für die Seegangs- und Windrichtungen 240°, 270° und 300° 244

Abb. 70 Wirkung der Sandaufspülung im Vergleich zum Referenzzustand 246

Abb. 71 Schematische Darstellung der Raupflasterung einer Warft 247

Abb. 72 Einfluss der Rauheit auf die relative Wellenüberlaufrate 247

Abb. 73 Schematische Darstellung des Einsatzes eines Deichschlauches 248

Abb. 74 Einfluss einer Kronenmauer bzw. eines Deichschlauches auf die relative Wellenüberlaufrate 249

Abb. 75 Aufklappbares Hochwasserschutzsystem (links: aufgeklappt, rechts: abgeklappt) (ThyssenKrupp Bautechnik, 2014) 250

Abb. 76 Schematische Darstellung eines Ringdeiches um die Warft 250

Abb. 77 Referenzzustand (links) und Anordnung von Längswerken (rechts) 251

Abb. 78 Referenzzustand für eine Seegangs- und Windrichtung von 240° 251

Abb. 79 Wirkung der Längswerke im Vergleich zum Referenzzustand für eine Seegangs- und Windrichtung von 240° 253

Abb. 80 Differenz der signifikanten Wellenhöhe in [m] (links) und der mittleren Wellenperiode in [s] (rechts) aus Referenzzustand und Anordnung von Längswerken mit einer Höhe von 1,5 m bei einem Wasserstand von 5,70 m für eine Seegangs- und Windrichtung von 240° 254

Abb. 81 Einfluss der signifikanten Wellenhöhe am Warftfuß auf die relative Wellenüberlaufrate 255

Abb. 82 Einfluss der mittleren Wellenperiode auf die relative Wellenüberlaufrate 255

Abb. 83 Schematische Abbildung einer hydraulischen Hochwasserschutzwand 256

Abb. 84 Darstellung der hydraulischen Hochwasserschutzwand 257

Abb. 85 Dichtung und Aneinanderreihungsprinzip des Konzeptes 258

Abb. 86 Baukastenprinzip der hydraulischen Hochwasserschutzwand 258

Abb. 87 Schematische Darstellung der Abflachung des Warftprofils 260

Abb. 88 Schematische Darstellung der Anhebung eines Warfthauses und eines Rindeiches 260

Abb. 89 Einfluss der Warftsteigung auf die relative Wellenüberlaufrate 261

Abb. 90 Einfluss einer Berme auf die relative Wellenüberlaufrate 261

Abb. 91 Exemplarisches Warftprofil 262

Abb. 92 Einfluss der Freibordhöhe auf die Wellenüberlaufrate, Wellenüberlaufgeschwindigkeit und Erdvolumenzunahme 263

Abb. 93 Einfluss der Steigung auf die Wellenüberlaufrate, Wellenüberlaufgeschwindigkeit und Erdvolumenzunahme 263

Abb. 94 Einfluss der Bermenlänge auf Wellenüberlaufrate, Wellenüberlaufgeschwindigkeit und Erdvolumenzunahme 264

Abb. 95 Schematische Darstellung einer hydraulisch gelagerten Warft 265

Abb. 96 Schematische Darstellung einer Aufwarftung mit anschließendem Neubau 265

Abb. 97 Einfluss der Freibordhöhe auf die relative Wellenüberlaufrate 266

Abb. 98 Einrichtung eines Schutzraumes in einem Hallighaus 267

Abb. 99 Variante 1 mit einer Gesamtlänge von 30,5 km 268

Abb. 100 Variante 2 mit einer Gesamtlänge von 37,2 km 268

Abb. 101 Zusammenfassende Bewertung der im Rahmen der Zukunftworkshops generierten Maßnahmen für die Hallig Hooge 270

Abb. 102 Zusammenfassende Bewertung der im Rahmen der Zukunftworkshops generierten Maßnahmen für die Hallig Langeneß 271

Tabellenverzeichnis

Tab. 1 Relative Häufigkeiten der auf Tageswerte gemittelten Messdaten der Windmessstation Hooge für den Zeitraum vom 01.01.1969 bis 31.01.2011 und relative Häufigkeiten der modellierten Windgeschwindigkeiten und Windrichtungen in den IPCC-Szenarien A1B und B1 150

Tab. 2 Relative Häufigkeiten der signifikanten Wellenhöhe für unterschiedliche Seegangsrichtungen an der Station Rütergat und Süderhever 153

Tab. 3 Relative Häufigkeiten der signifikanten Wellenhöhe für unterschiedliche Seegangsrichtungen an der Station Süderaue und Norderhever 153

Tab. 4 Anzahl der Teilbereiche an den Modellrändern 160

Tab. 5 Auswertung der Porositätsmessung 175

Tab. 6 Überfallhöhen der physikalischen Modellversuche am Messquerschnitt 1 176

Tab. 7 Eingangsrandbedingungen für das Seegangsmodell 192

Tab. 8 Geometriedaten der untersuchten Raustreifenvarianten 194

Tab. 9 Schwallgeschwindigkeit an charakteristischen Punkten des Bauwerkes (RWS=NHN+2,4 m; f=0,2) 198

Tab. 10 Wasservolumina auf der Hallig bei Wasserständen von 0,1-0,4 m oberhalb der Halligkante 199

Tab. 11 Bemessung der Bauwerksvarianten Igel 3 B1-B3 200

Tab. 12 Entwässerungsgebiete auf der Hallig Langeneß 205

Tab. 13 Hydraulische Berechnung für die Sieltoranlage Osterwehl für unterschiedliche Wasserstände und stationäre Verhältnisse 206

Tab. 14 Durchführung der Messkampagne Osterwehl 211

Tab. 15 Position CTD-Sonden Messkampagne Osterwehl 22.02. - 27.02.2013 212

Tab. 16 Durchflussermittlung am Profil 45 m am 27.02. zwischen den Uhrzeiten 13:32 und 13:41 214

Tab. 17 Regionalisierte Referenzwasserstände für das Untersuchungsgebiet (bereitgestellt vom LKN-SH) 233

Tab. 18 Einteilung der Warften in verschiedene Kategorien 234

Tab. 19 Maximal kehrbare Wasserstände der zu untersuchenden Warften 237

Tab. 20 Eingangsgrößen für die Berechnung der Füllzeiten der Warften mit geschlossenem Ringdeich 239

Abkürzungs- und Symbolverzeichnis

Die Einheiten sind in der Regel auf die in dieser Arbeit enthaltenen Daten abgestimmt.

Abkürzung	Bedeutung
ADCP	Acoustic Doppler Current Profiler
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
CTD	Conductivity, Temperature, Depth
DACC	Word Data Center for Climate
DGM	Digitales Geländemodell
FTU	Formazine Turbidity Unit
GZG	Geowissenschaftliches Zentrum der Universität Göttingen
IfS	Institut für Soziologie, Lehrstuhl Technik und Organisationssoziologie
IHO	International Hydrographic Organization
IPCC	Intergovermental Panel on Climate Change
IWW	Lehrstuhl und Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft der RWTH Aachen
JONSWAP	Joint North Sea Wave Atmosphere Program
KFKI	Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen
LKN-SH	Landesbetrieb für Küstenschutz, Nationalpark und Meeresschutz Schleswig Holstein
OPeNDAP	Open-Source Project for a Network Data Access Protocol
PN	Pegel Null (5 m unter Normalhöhennull)
PROMAIDES	Protection Measure against Inundation Decision Support
PSU	Practical Salinity Unit
RWS	Ruhewasserspiegel
RWTH	Rheinisch Westfälisch Technische Hochschule
SWAN	Simulating Waves Nearshore

Symbol	Dimension	Bedeutung
A_c'	[m]	Kronenhöhe
b	[-]	Koeffizient zur Berechnung der Wellenüberlaufrate
b_f	[-]	Turbulenter Reibungskoeffizient
c_U	[N/m²]	Scherfestigkeit
D_i	[m]	Steindurchmesser bei i- % Siebdurchgang
d	[m]	Wassertiefe
d_{krit}	[m]	Kritisches Wasserpolster
$d_{OK,\ Hallig}$	[m]	Einstauhöhe oberhalb des Geländeniveaus der Hallig (Wasserpolster)
f	[-]	Reibungsbeiwert
f_G	[-]	Qualitätsfaktor der Grasnarbe
Fr	[-]	Froude-Zahl
g	[m/s²]	Erdbeschleunigung
H*	[-]	Dimensionsloser Parameter für den Wellenüberlauf an einem durchlässigen Bauwerk
H_b	[m]	Wellenhöhe
H_{m0}	[m]	Spektrale signifikante Wellenhöhe
H_S	[m]	Signifikante Wellenhöhe am Warftfuß

h	[m]	Wasserüberdeckung
$h_ü$	[m]	Überfallhöhe
k_s	[m]	Äquivalente Sandrauheit
k_t	[m²/s²]	Turbulente kinetische Energie
k(t)	[-]	Zeitabhängiger Faktor
L_0	[m]	Wellenlänge im Tiefenwasser
L_i	[m]	Länge des Bauwerksabschnitts i
L_{RS}	[m]	Länge des Raustreifens
l_E	[m]	Länge des Bodenelements
n	[%]	Porosität
p_{krit}	[kN/m²]	Widerstände gegen Druckschlag
p_{max}	[kN/m²]	Maximaler Druckschlag
Q^*_{tot}	[-]	Dimensionsloser Parameter für Wellenüberlauf an einem durchlässigen Bauwerk
q	[m³/(s*m)]	Mittlere Wellenüberlaufrate
$q_{e,over}$	[m³/(s*m)]	Wellenüberlaufrate an einem durchlässigen Bauwerk
q_s	[m³/(s*m)]	Durchsickerrate
q_{inf}	[m³/(s*m)]	Infiltrierende Anteil des Wellenüberlaufs
R		Widerstände
R_C	[m]	Freibordhöhe
$R_{u2\%,glatt}$	[m]	Wellenauflaufhöhe, die von 2 % aller Wellen überschritten wird
S		Einwirkungen
T_m	[s]	Mittlere Wellenperiode
U	[-]	Ungleichförmigkeitszahl des Bodens
T_p	[s]	Peakperiode
t	[m]	Schichtdicke des Bodenelements
t_s	[h]	Einwirkzeit des Wellenüberlaufs
n	[-]	Anzahl der Elemente/Beobachtungen
V	[m³/m]	Erdvolumenzunahme
V’	[m³/m]	Wasservolumen, das auf Hallig gelangen muss, um bestimmtes Wasserpolster zu erzeugen
V_P	[l]	Porenvolumen
v	[m/s]	Überlaufgeschwindigkeit
v_{krit}	[m/s]	Kritische Überlaufgeschwindigkeit
$v_{OK,Hallig}$	[m/s]	Überlaufgeschwindigkeit an der Oberkante der Hallig
W	[m/s]	Windgeschwindigkeit
w	[m]	Wehrhöhe
x_c	[m]	Fließlänge auf der Krone
x_e	[m]	x-Koordinate des Ruhewasserspiegels auf der Außenböschung
x_r	[m]	x-Koordinate der Lage der Halligoberkante
Z	[-]	Grenzzustand
z_e	[m]	z-Koordinate des Ruhewasserspiegels auf der Außenböschung
z_r	[m]	z-Koordinate der Lage der Halligoberkante

Symbol	**Dimension**	**Beschreibung**
α	[°]	Böschungsneigung der Luv-Seite (Gleichung 3.9)
β_f	[-]	Dimensionsloser Parameter zur Berechnung von b_f
γ	[N/m³]	Wichte
γ_b	[-]	Empirischer Beiwert für den Einfluss einer Berme
γ_f	[-]	Empirischer Beiwert für den Einfluss der Böschungsrauheit
γ_θ	[-]	Empirischer Beiwert für den Einfluss der Wellenangriffsrichtung (EAK)
γ_β	[-]	Empirischer Beiwert für den Einfluss der

		Wellenangriffsrichtung (EUROTOP)
γ_{RS}	[-]	Rauheit des Raustreifens
γ_v	[-]	Empirischer Beiwert für den Einfluss einer Kronenmauer
ε	[m²/s³]	Dissipationsrate
θ	[°]	Windrichtung
μ	[-]	Dimensionsloser Überfallbeiwert
$\xi_{m-1,0}$	[-]	Brecherparameter

1 Einleitung

1.1 Allgemeines

Die im Bereich des Schleswig-Holsteinischen Wattenmeeres liegenden Inseln und Halligen sind im Wesentlichen durch Gezeiten, ausgedehnte Prielsysteme und das flache Relief des Meeresbodens geprägt. Im Jahr 2009 wurde das gesamte Wattenmeer mit den in Schleswig-Holstein, Niedersachsen und den Niederlanden befindlichen Gebieten zum UNESCO-Weltnaturerbe ernannt. Die im Rahmen dieses Projektes ZukunftHallig zu untersuchenden weltweit einzigartigen Halligen zeichnen sich vor allem dadurch aus, dass sie nicht eingedeicht und die Häuser der Bewohner zum Schutz vor Überflutungen auf Warften errichtet sind. Die Halligen und das sie umgebende Nordfriesische Wattenmeer sind aber nicht nur wegen ihrer ökologischen und kulturellen Besonderheit von großer Bedeutung, sondern auch wegen der Reduzierung der an der Festlandsküste auftretenden Seegangsbelastung.

Zentrales Ziel des Verbundprojektes ZukunftHallig ist es, Impulse für nachhaltige Küstenschutz- und Bewirtschaftungsstrategien zu entwickeln, die gleichzeitig zukünftige klimatische Bedingungen und dadurch verursachte Beanspruchungen berücksichtigen. Unter Beachtung der nachfolgend aufgeführten Aspekte sollen die Untersuchungen exemplarisch an den drei Halligen Langeneß, Nordstrandischmoor und Hooge durchgeführt werden:

- *Hydrologische/hydromechanische Belastungen unter heutigen und zukünftigen klimatischen Bedingungen*
- *Integration morphologischer und sedimentologischer Veränderungen an und auf den Standorten*
- *Quantifizierung des derzeitigen Schutzstandards*
- *Durchführung risikoorientierter Gefährdungsanalysen*
- *Entwicklung von nachhaltigen, klimaangepassten Bewirtschaftungskonzepten /Küstenschutzstrategien*

Das vorrangige Ziel des Teilprojektes ZukunftHallig-B ist die Entwicklung von nachhaltigen Bewirtschaftungskonzepten beziehungsweise Küstenschutzstrategien und –maßnahmen für die nordfriesischen Halligen. Die genaue Vorgehensweise innerhalb dieses

Teilprojektes wird im folgenden Kap. 1.2 beschrieben. Dabei werden zunächst die hydrologischen Belastungsgrößen untersucht, um in den darauf folgenden Untersuchungsschritten die Hallig beginnend von der Halligkante bis hin zur Warft kategorisch zu untersuchen.

Die gewonnenen Ergebnisse sollen einen grundlegenden Beitrag für einen zukünftigen nachhaltigen Küstenschutz im Gebiet des nordfriesischen Wattenmeeres leisten und durch einzelne Teilergebnisse auch eine Erweiterung des Wissens für andere Küstenbereiche darstellen.

1.2 Vorgehensweise

Die Abb. 1 zeigt das Untersuchungsgebiet des südlichen nordfriesischen Wattenmeeres mit den nordfriesischen Inseln und Halligen sowie typischen geomorphologischen Elementen wie den Außensänden, Prielen, Seegatts und Barren (Ehlers, 1988). Anhand des Geländeprofils durch die Hallig Hooge wird eine Zuordnung der Kapitel der folgenden Untersuchungen des Teilprojektes ZukunftHallig-B zu den unterschiedlichen Teilbereichen der Halligen dargestellt.

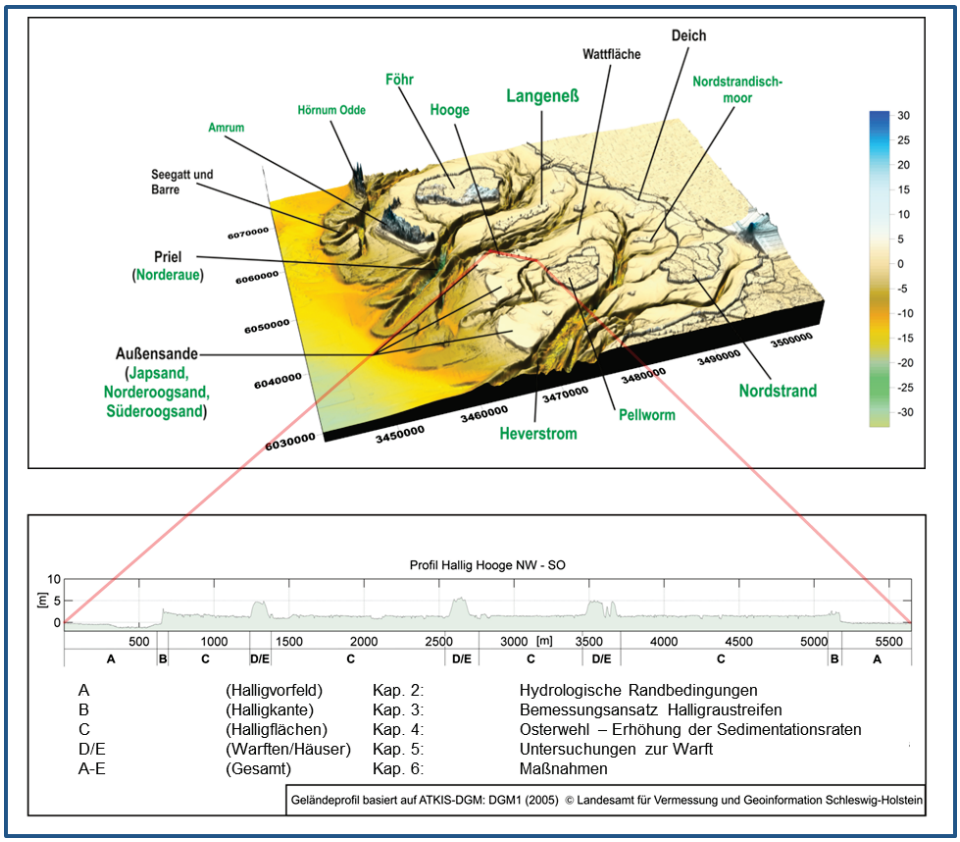


Abb. 1 Untersuchungsgebiet und Zuordnung der Kapitel der Untersuchungen zu den unterschiedlichen Halligabschnitten; Bathymetrie und Topographie des nordfriesischen Wattenmeeres (Verschnitt aus Wattgrundkarten, Seekarten, DGM1 und DGM25)

Der Bereich A im unteren Teil der Abb. 1 umfasst das See- beziehungsweise Wattgebiet vor den Halligen. Für diesen Bereich werden innerhalb des Kap. 2 die vorherrschenden

hydrologischen Bedingungen untersucht und der Aufbau eines numerischen Modells zur Simulation der Seegangsverhältnisse beschrieben. Dieses Kapitel dient somit der Untersuchung der Randbedingungen der in den folgenden Kapiteln beschriebenen Untersuchungen für die übrigen Teilbereiche.

Der Bereich B beinhaltet das Gebiet der Halligkante. Für diesen Bereich werden im Kap. 3 durchgeführte physikalische und numerische Untersuchungen zur Entwicklung eines Bemessungsansatzes für Halligraustreifen beschrieben.

Der Bereich C umfasst die eigentlichen Halligflächen. Für diese wurden sowohl in-situ-Messungen im Entwässerungsgebiet der Sieltoranlage Osterwehl als auch numerische Simulationen durchgeführt, welche im Kap. 4 beschrieben werden. Ziel der Untersuchungen für den Bereich der zentralen Halligflächen ist die Erhöhung der Sedimentationsraten durch ein Öffnen der Sieltore bei bestimmten Wasserständen. Diese Maßnahme dient somit der Entwicklung einer neuen Küstenschutz- beziehungsweise Bewirtschaftungsstrategie, bei der mit der gezielten Flutung der Hallig zusätzliche Sedimente auf den Halligflächen abgelagert werden sollen.

Die Bereiche D und E umfassen die Warften mit den darauf befindlichen Gebäuden. Für die Warften ist in Kap. 5 eine Ermittlung des Schutzstandards sowie eine risikoorientierte Gefährdungsanalyse durchgeführt worden. Außerdem wurden für die im Rahmen der soziologischen Begleitforschung mit den Halligbewohnern erarbeiteten Vorschläge für zukünftige Küstenschutzmaßnahmen Untersuchungen zur Wirksamkeit auf den Wellenüberlauf durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen befinden sich im Kap.6.

2 Numerisches Modell zur Bestimmung der Strömungs- und Seegangsverhältnisse

2.1 Vorherrschende und prognostizierte Randbedingungen

2.1.1 Windverhältnisse

Als maßgebliche Eingangsgröße für die Bestimmung der Seegangsverhältnisse im Untersuchungsgebiet soll hier zunächst ein Blick auf die vorherrschenden Windverhältnisse im Bereich des nordfriesischen Wattenmeeres geworfen werden. Dazu dienen aufgezeichnete Windgeschwindigkeiten der Windmessstation auf der Hallig Hooge, die Daten für den Zeitraum von 1970 bis 2011 geliefert hat.

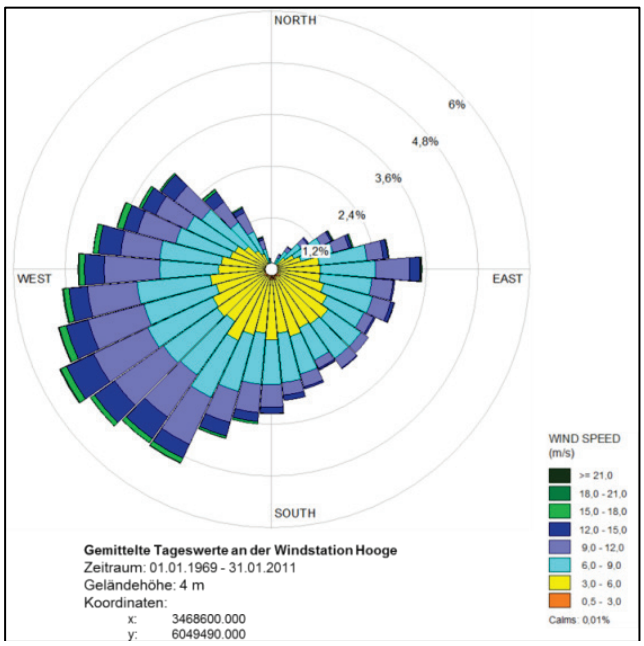


Abb. 2 Relative Häufigkeiten der auf Tageswerte gemittelten Messdaten der Windmessstation Hooge für den Zeitraum vom 01.01.1969 bis 31.01.2011

Die Station befindet sich an der Position mit den folgenden Koordinaten in einer Höhe von NN +4 m:

- Rechtswert: 3468600
- Hochwert: 6049490

Die Werte liegen in einer zeitlichen Auflösung von einer Stunde vor und weisen die Maximalwerte bei westlichen Windrichtungen um 270° auf. Dabei wurden im Messzeitraum von 1969 bis 2011 Maximalwerte von über 28 m/s gemessen. Der Spitzenwert von 28,6 m/s wurde beim Orkan Anatol am 3. Dezember 1999 um 17.30 Uhr bei einer Windrichtung aus 260° erreicht. Darauf folgt der Capella-Orkan vom 3. Januar 1976, bei dem um 12.30 Uhr eine Geschwindigkeit von 28,4 m/s aus der Richtung 280° erreicht wurde.

Die Abb. 2 stellt die relativen Häufigkeiten der Windrichtungen und -geschwindigkeiten der auf Tageswerte gemittelten Messdaten der Windmessstation Hooge für den Zeitraum vom 01.01.1969 bis 31.01.2011 dar. Auffällig ist die gleichmäßige Verteilung der Häufigkeiten der Windrichtungen bei geringen Windgeschwindigkeiten von 0 m/s – 5 m/s. Bei Windgeschwindigkeiten von 5 m/s – 10 m/s dominieren westliche und östliche Richtungen. Die höheren Windgeschwindigkeiten bis 20 m/s hingegen werden zum größten Teil aus westlicher Richtung erreicht.

Für die zukünftige Entwicklung der Hydrologie ist eine Betrachtung der Entwicklung der Windbedingungen notwendig, um die sich ändernden Randbedingungen in die Modellierung des Seegangs mit einfließen lassen zu können. Im Rahmen des Projektes werden aus diesem Grund Winddaten des World Data Center for Climate (DACC) verwendet, die auf den IPCC-Szenarien A1B und B1 basieren und aus dem Modelllauf des Climate Local Model (CLM) stammen.

Das IPCC-Szenario A1B basiert auf einem großen ökonomischen Wachstum und einem ausgeglichenen Verbrauch aller Energieressourcen. Die durchschnittliche globale Erwärmung der Erdoberfläche am Ende des 21. Jahrhunderts beträgt in diesem Szenario 2,8°C. Das IPCC-Szenario B1 basiert auf globaler Nachhaltigkeit und der Verwendung ressourcenschonender Technologien. In diesem Szenario beträgt die globale Erwärmung der Erdoberfläche 1,8°C (Pachauri & Reisinger, 2007).

Die Auflösung des Rechengitters des CLM-Klimamodells beträgt 20 km x 20 km. Dabei liegen nun für den Knotenpunkt lon = 8.2° und lat = 54.6° sowohl Windgeschwindigkeiten als auch Windrichtungen in einer zeitlichen Auflösung von einer Stunde für die Jahre 2010 bis 2080 vor.

In den Abb. 3 und Abb. 4 sind die Verteilungen der modellierten Windrichtung und zugehörigen Windgeschwindigkeiten der Jahre 2010 bis 2080 für die IPCC-Szenarien A1B und B1 dargestellt.

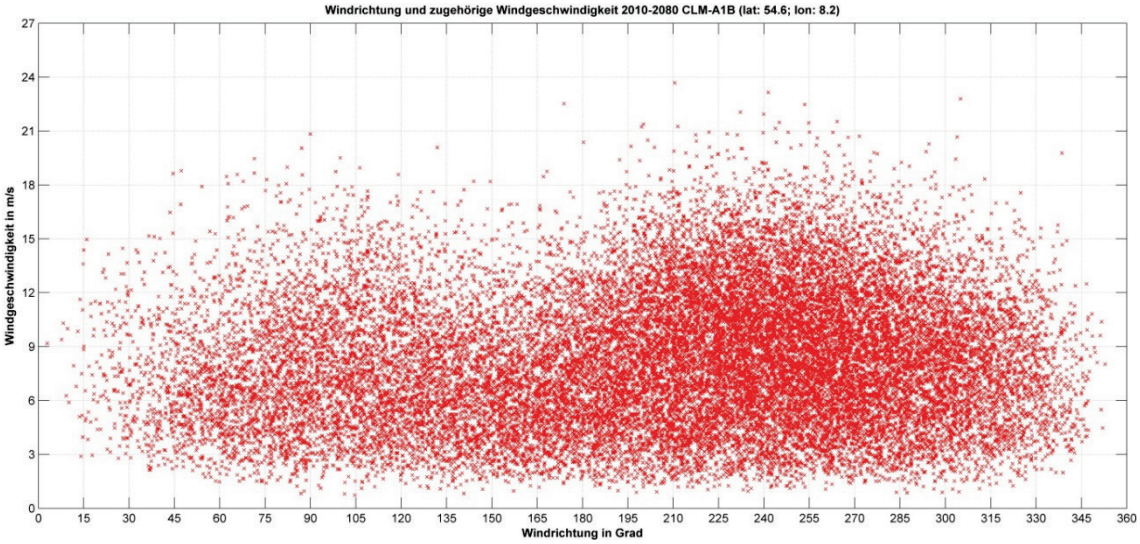


Abb. 3 Modellierte Windrichtung und zugehörige Windgeschwindigkeit der Jahre 2010 bis 2080 für den Knotenpunkt lon = 8.2° und lat = 54.6° im IPCC-Szenario A1B

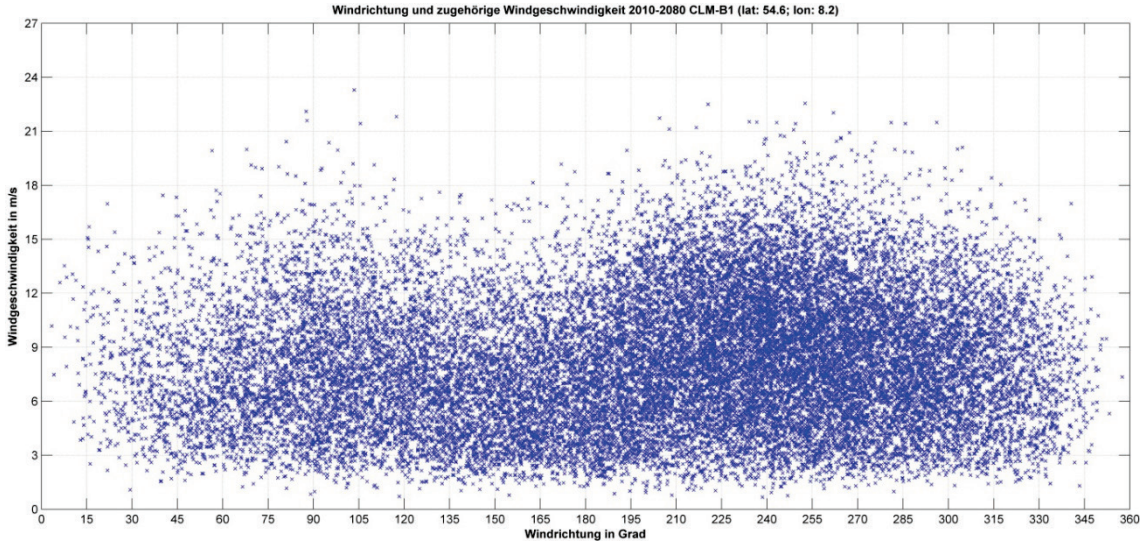


Abb. 4 Modellierte Windrichtung und zugehörige Windgeschwindigkeit der Jahre 2010 bis 2080 für den Knotenpunkt lon = 8.2° und lat = 54.6° im IPCC-Szenario B1

Die nachfolgende Abb. 5 zeigt die prozentuale Häufigkeit der in 32 Klassen eingeteilten Windrichtungen für den Knotenpunkt lon = 8.2° und lat = 54.6° der IPCC-Szenarien A1B und B1.

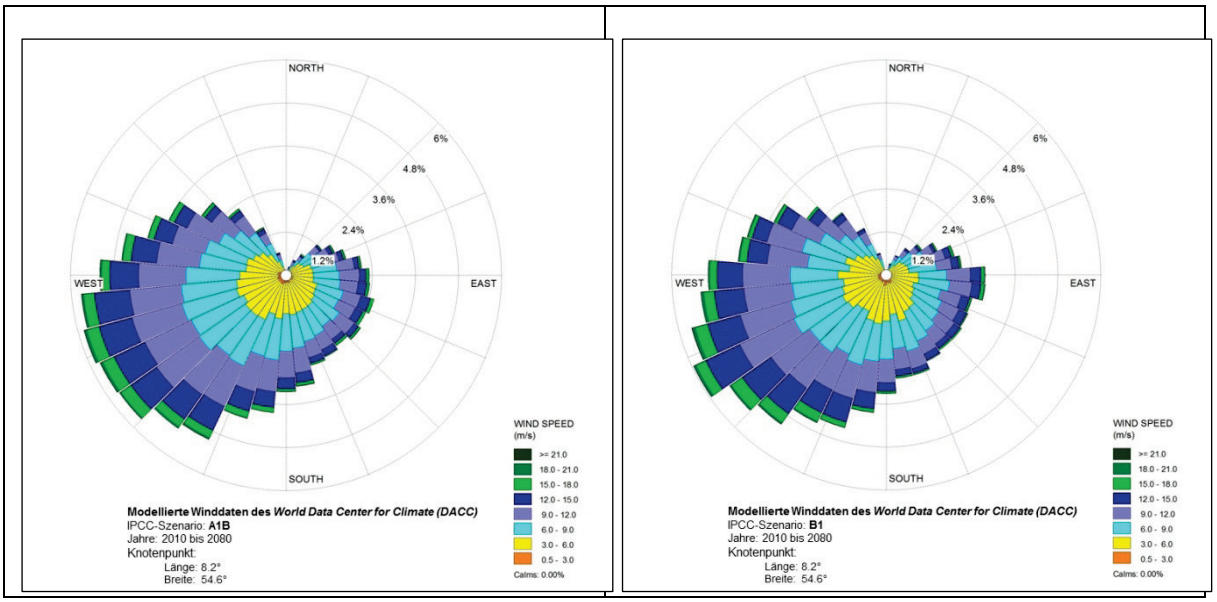


Abb. 5 Relative Häufigkeiten der modellierten Windgeschwindigkeiten für die Jahre 2010 – 2080 der IPCC Szenarien A1B (links) und B1 (rechts)

Zur besseren Vergleichbarkeit der gemessenen Winddaten an der Station Hooge und den modellierten Winddaten der Modellläufe des CLM-Modells des World Data Center for Climate (WDCC) für die IPCC-Szenarien A1B und B1 am Knotenpunkt lon = 8.2° und lat = 54.6° wurden die Stundenwerte der Messungen der Station Hooge ebenfalls auf Tageswerte gemittelt (vgl. Abb. 2). Geographisch liegt der Knotenpunkt des CLM-Modells ca. 20 km westlich der Windmessstation Hooge. Die modellierten Winddaten entsprechen den Werten in einer Höhe von NHN +10 m, während die Daten der Station Hooge in einer Höhe von NHN +4 m aufgenommen werden. Abgesehen von den Unsicherheiten des Modells führen auch diese geographischen Unterschiede zu Unsicherheiten bei Aussagen zur zukünftigen Entwicklung der Windverhältnisse im Bereich der nordfriesischen Halligen.

Die Häufigkeitsverteilung der Windrichtungen lässt erkennen, dass die modellierten Windrichtungen des IPCC-Szenarios B1 den gemessenen Windrichtungen der Station Hooge eher entsprechen als die des IPCC-Szenarios A1B. Als Beispiel hierfür können die östlichen Windrichtungen von 85° - 95° genannt werden, die sowohl bei den gemessenen Daten des Zeitraumes der Jahre 1969 - 2011 als auch bei den modellierten Daten des B1-Szeanrios mit relativen Häufigkeiten von 3,46 % bzw. 2,76 % stärker vertreten sind als die übrigen östlichen Windrichtungen.

Die Tab. 1 zeigt zusammenfassend die relativen Häufigkeiten der auf Tageswerte gemittelten Messdaten der Windmessstation Hooge für den Zeitraum vom 01.01.1969 bis 31.01.2011 und die relativen Häufigkeiten der modellierten Windgeschwindigkeiten und Windrichtungen basierend auf den IPCC-Szenarien A1B und B1 im direkten Vergleich.

Tab. 1 Relative Häufigkeiten der auf Tageswerte gemittelten Messdaten der Windmessstation Hooge für den Zeitraum vom 01.01.1969 bis 31.01.2011 und relative Häufigkeiten der modellierten Windgeschwindigkeiten und Windrichtungen in den IPCC-Szenarien A1B und B1

Winddaten Zukunft Hallig		Koordinaten Station Hooge: x: 3468600; y: 6049490 Geländehöhe: 4 m CLM-Knotenpunkt: x: 3448373.5 y: 6052554.6																										
Zeitraum: 01.01.1969 - 31.12.2080		Windgeschwindigkeiten der Tagesmittel in m/s																										
	Windrichtung in Grad	0.5 - 3.0			3.0 - 6.0			6.0 - 9.0			9.0 - 12.0			12.0 - 15.0			15.0 - 18.0			18.0 - 21.0			>= 21.0			Total		
		Hooge	A1B	B1	Hooge	A1B	B1	Hooge	A1B	B1	Hooge	A1B	B1	Hooge	A1B	B1	Hooge	A1B	B1	Hooge	A1B	B1	Hooge	A1B	B1	Hooge	A1B	B1
1	355 - 5	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.02	0.00	0.01	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.00	0.01
2	5 - 15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.00	0.02	0.03	0.00	0.02	0.02	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.09
3	15 - 25	0.00	0.01	0.01	0.01	0.05	0.07	0.06	0.07	0.13	0.04	0.07	0.07	0.04	0.04	0.03	0.00	0.01	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.15	0.25	0.33
4	25 - 35	0.02	0.01	0.02	0.05	0.14	0.19	0.22	0.14	0.25	0.10	0.13	0.11	0.02	0.05	0.03	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.39	0.47	0.61
5	35 - 45	0.02	0.04	0.04	0.13	0.28	0.31	0.37	0.19	0.27	0.12	0.13	0.22	0.02	0.06	0.07	0.00	0.03	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.65	0.73	0.93
6	45 - 55	0.01	0.07	0.08	0.38	0.41	0.44	0.45	0.39	0.37	0.18	0.26	0.20	0.04	0.06	0.08	0.00	0.02	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.04	1.22	1.22
7	55 - 65	0.01	0.10	0.06	0.57	0.43	0.52	0.69	0.53	0.56	0.25	0.25	0.29	0.04	0.12	0.09	0.02	0.04	0.04	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	1.57	1.49	1.57
8	65 - 75	0.04	0.17	0.09	0.67	0.55	0.55	0.77	0.51	0.64	0.38	0.30	0.43	0.07	0.14	0.19	0.03	0.05	0.06	0.00	0.01	0.02	0.00	0.00	0.00	1.95	1.72	1.97
9	75 - 85	0.09	0.14	0.10	1.02	0.61	0.54	1.12	0.66	0.77	0.37	0.49	0.42	0.12	0.15	0.22	0.02	0.05	0.04	0.00	0.02	0.02	0.00	0.00	0.00	2.72	2.11	2.11
10	85 - 95	0.12	0.15	0.15	1.01	0.60	0.74	1.28	0.73	0.78	0.80	0.55	0.66	0.24	0.20	0.31	0.02	0.07	0.09	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	3.46	2.31	2.76
11	95 - 105	0.09	0.19	0.17	1.05	0.58	0.75	1.20	0.75	0.86	0.50	0.49	0.62	0.04	0.25	0.26	0.00	0.07	0.09	0.00	0.01	0.02	0.00	0.00	0.00	2.85	2.33	2.78
12	105 - 115	0.05	0.16	0.12	1.20	0.74	0.68	1.17	0.75	0.78	0.44	0.50	0.59	0.09	0.29	0.25	0.01	0.09	0.05	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	2.94	2.53	2.48
13	115 - 125	0.16	0.20	0.16	1.26	0.70	0.71	0.94	0.70	0.85	0.25	0.52	0.53	0.04	0.24	0.25	0.00	0.08	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.64	2.44	2.52
14	125 - 135	0.24	0.19	0.17	1.36	0.78	0.76	0.93	0.83	0.85	0.20	0.51	0.54	0.00	0.16	0.22	0.00	0.06	0.04	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	2.73	2.54	2.58
15	135 - 145	0.20	0.14	0.22	1.36	0.89	0.88	0.98	0.69	0.80	0.27	0.45	0.45	0.02	0.15	0.17	0.00	0.07	0.05	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	2.81	2.40	2.57
16	145 - 155	0.18	0.21	0.25	1.32	0.84	0.89	0.83	0.81	0.89	0.21	0.44	0.41	0.04	0.20	0.20	0.01	0.03	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.57	2.51	2.66
17	155 - 165	0.26	0.21	0.23	1.36	0.86	1.10	0.91	0.85	0.88	0.31	0.46	0.51	0.05	0.18	0.15	0.00	0.05	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.86	2.60	2.89
18	165 - 175	0.23	0.19	0.21	1.26	0.91	0.90	1.15	0.93	0.96	0.29	0.69	0.58	0.12	0.29	0.19	0.00	0.08	0.05	0.00	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	3.03	3.10	2.89
19	175 - 185	0.25	0.21	0.26	1.39	0.86	1.02	1.03	1.04	1.06	0.53	0.74	0.65	0.15	0.32	0.25	0.01	0.07	0.06	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	3.33	3.24	3.30
20	185 - 195	0.24	0.22	0.30	1.25	1.00	1.06	1.19	1.15	1.05	0.66	0.88	0.86	0.21	0.45	0.47	0.05	0.14	0.08	0.00	0.01	0.02	0.00	0.00	0.00	3.57	3.83	3.84
21	195 - 205	0.15	0.26	0.19	1.42	0.86	1.13	1.36	1.20	1.28	0.74	1.02	0.96	0.33	0.58	0.69	0.05	0.19	0.15	0.01	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	4.04	4.13	4.41
22	205 - 215	0.20	0.25	0.21	1.63	1.10	0.90	1.46	1.42	1.32	1.20	1.24	1.10	0.36	0.75	0.71	0.12	0.22	0.26	0.02	0.04	0.04	0.00	0.01	0.00	4.94	5.04	4.55
23	215 - 225	0.20	0.23	0.22	1.28	1.15	0.92	1.52	1.34	1.49	1.19	1.33	1.22	0.61	0.85	0.89	0.12	0.25	0.30	0.01	0.05	0.05	0.00	0.00	0.01	4.89	5.21	5.09
24	225 - 235	0.21	0.25	0.21	1.34	1.13	1.08	1.53	1.57	1.32	1.39	1.46	1.33	0.57	0.88	0.99	0.11	0.34	0.37	0.01	0.04	0.05	0.00	0.00	0.00	5.12	5.66	5.35
25	235 - 245	0.17	0.22	0.23	1.34	1.08	1.12	1.66	1.61	1.50	1.39	1.43	1.67	0.69	0.96	1.06	0.15	0.34	0.30	0.02	0.07	0.06	0.01	0.01	0.01	5.40	5.71	5.94
26	245 - 255	0.16	0.25	0.24	1.18	1.18	1.03	1.74	1.57	1.49	1.34	1.44	1.46	0.53	0.96	0.95	0.17	0.35	0.36	0.02	0.07	0.08	0.01	0.01	0.01	5.10	5.81	5.62
27	255 - 265	0.16	0.21	0.21	1.27	1.17	0.99	1.71	1.54	1.43	1.15	1.44	1.36	0.43	0.99	0.84	0.12	0.30	0.30	0.03	0.05	0.07	0.00	0.01	0.00	4.84	5.71	5.19
28	265 - 275	0.13	0.20	0.22	1.10	1.09	1.12	1.36	1.49	1.33	1.28	1.31	1.32	0.46	0.81	0.72	0.12	0.22	0.20	0.02	0.04	0.04	0.00	0.00	0.00	4.46	5.17	4.97
29	275 - 285	0.05	0.23	0.19	1.12	0.89	0.85	1.43	1.29	1.17	0.91	1.19	1.13	0.52	0.72	0.58	0.12	0.23	0.20	0.01	0.03	0.04	0.00	0.00	0.00	4.13	4.58	4.15
30	285 - 295	0.08	0.22	0.17	0.91	0.92	1.02	1.31	1.18	1.24	0.92	0.95	1.02	0.34	0.53	0.44	0.15	0.16	0.10	0.02	0.02	0.03	0.00	0.00	0.00	3.70	3.98	4.02
31	295 - 305	0.07	0.17	0.15	0.88	0.84	0.82	1.23	1.05	1.08	0.80	0.98	0.86	0.35	0.39	0.44	0.07	0.14	0.09	0.01	0.02	0.02	0.00	0.00	0.00	3.37	3.60	3.46
32	305 - 315	0.04	0.16	0.14	0.72	0.74	0.65	1.23	0.86	0.79	0.77	0.76	0.74	0.38	0.24	0.32	0.04	0.08	0.07	0.01	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	3.15	2.87	2.71
33	315 - 325	0.03	0.09	0.13	0.50	0.62	0.54	0.80	0.73	0.65	0.58	0.58	0.57	0.29	0.19	0.21	0.06	0.06	0.03	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.27	2.28	2.14
34	325 - 335	0.02	0.08	0.07	0.39	0.36	0.44	0.57	0.54	0.44	0.49	0.32	0.37	0.12	0.14	0.10	0.03	0.04	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.59	1.48	1.45
35	335 - 345	0.01	0.04	0.02	0.15	0.19	0.18	0.34	0.22	0.26	0.22	0.14	0.14	0.06	0.05	0.03	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.78	0.66	0.64
36	345 - 355	0.01	0.02	0.00	0.08	0.06	0.05	0.10	0.05	0.05	0.04	0.03	0.03	0.03	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.26	0.16	0.15
	Sub-Total	3.84	5.49	5.23	31.75	24.58	24.96	34.39	29.39	29.58	20.18	23.48	23.44	7.36	12.39	12.45	1.59	3.92	3.58	0.20	0.62	0.61	0.01	0.05	0.07	99.32	99.92	99.93
	Windstille																									0.01	0.00	0.00
	Fehlende Daten																									0.67	0.08	0.07
	Total																									100.00	100.00	100.00

2.1.2 Seegang

Der Seegang, der aus der Überlagerung der Windwellen und der Dünung besteht, wird im nordfriesischen Wattenmeer maßgeblich von der Topographie beziehungsweise der Wassertiefe und dem lokalen Wind beeinflusst. Entscheidend für die Ausprägung ist neben der Windwirkdauer vor allem auch die Windwirklänge (*fetch*), die ihre größten Werte bei Winden aus nordwestlicher Richtung erreicht, da so der Wind vom Nordpolarmeer bis in die Nordsee einen Impulseintrag leisten kann. Der aus der Nordsee in das Wattenmeer einlaufende Seegang wird dabei in seiner maximalen Wellenhöhe durch die dort vorherrschende Wassertiefe begrenzt. Gleichzeitig kann sich aber auch im Schatten von Inseln, Außensanden und Sandbänken neuer Seegang entwickeln (LKN-SH, 2009).

Von entscheidender Bedeutung ist die Kenntnis über den Seegang besonders in Bereichen, an denen Brandung auftritt. Dies ist an den Stränden der Inseln, den Riffen, Außensanden und den Platen im Wattenmeer der Fall. An den exponiert liegenden Außensanden werden bei Sturmfluten

beispielsweise Wellenhöhen von 4 m und Brandungsströmungen vom 2 m/s erreicht (Winskowsky, 1998).

Von besonderem Interesse für das Küsteningenieurwesen ist vor allem die Transformation des Seegangs in den flachen küstennahen Meeresbereichen. So kommt es beim Einlaufen des Seegangs in das flache Wattenmeergebiet zu Grundberührungen der Wellen und den damit verbundenen Flachwassereffekten wie *Refraktion, Shoaling* und *Wellenbrechen*. Außerdem verursachen natürliche Hindernisse und anthropogene Küstenschutzmaßnahmen *Diffraktion, Reflexion, Transmission* und das Brechen von Wellen (LKN-SH, 2009).

Der Landesbetrieb für Küstenschutz, Nationalpark und Meeresschutz des Landes Schleswig-Holstein (LKN-SH) hat insgesamt fünf Bojen des Typs Direktional Waverider zur Messung des Seegangs an der schleswig-holsteinischen Westküste in Betrieb. Dies sind die Stationen Westerland, Rütergat, Süderhever, Süderaue und Norderhever (östlich von Pellworm gelegen). Bis auf die zuletzt genannte befinden sich alle Bojen im Bereich von Wassertiefen über 10 m und ihre Daten können spektralen und Zeitreihenauswertungen unterzogen werden (Stadelmann, 2008).

Die genauen Positionen der Messbojen des LKN-SH sind der folgenden Abb. 6 zu entnehmen.

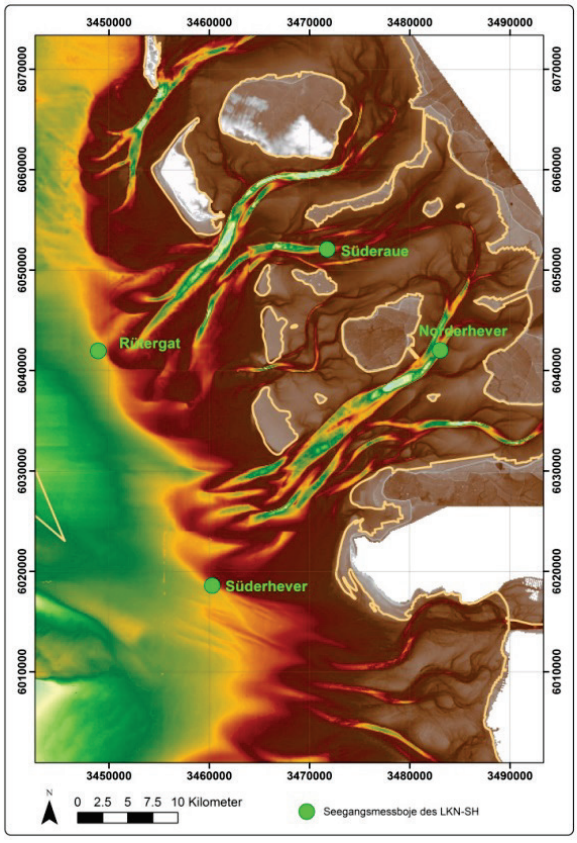


Abb. 6 Positionen der Messbojen Rütergat, Süderaue, Norderhever und Süderhever

Dabei ist der Hinweis des LKN-SH zu beachten, dass die Datensätze trotz Vorfilterung noch Fehler enthalten können und auch innerhalb der angegebenen Zeiträume noch Datenlücken auftauchen und die zeitliche Auflösung variieren kann. Außerdem sind Angaben zur vorherrschenden Seegangsrichtung erst ab dem Februar des Jahres 2011 verfügbar.

Im Gegensatz zu den Coastdat-Datensätzen sowie den Modellierungen des Seegangsatlas der deutschen Nordseeküste stehen mit diesen Datensätzen Naturmessungen für einen bestimmten Zeitraum zur Verfügung. Anhand dieser Daten kann, zusammen mit den Winddaten der Station Hooge, unter anderem ermittelt werden, wie sich beispielsweise die signifikante Wellenhöhe an der im Küstenvorfeld befindlichen Messboje *Rütergat* unter bestimmten Windbedingungen im Verhältnis zu den Messungen an der im geschützteren Bereich liegenden Messboje *Norderhever* verhält.

In der Abb. 7 sind die prozentuale Häufigkeit der Seegangsrichtung und der zugehörigen signifikanten Wellenhöhe für die Seegangsmessbojen Rütergat, Süderaue, Süderhever und Norderhever dargestellt.

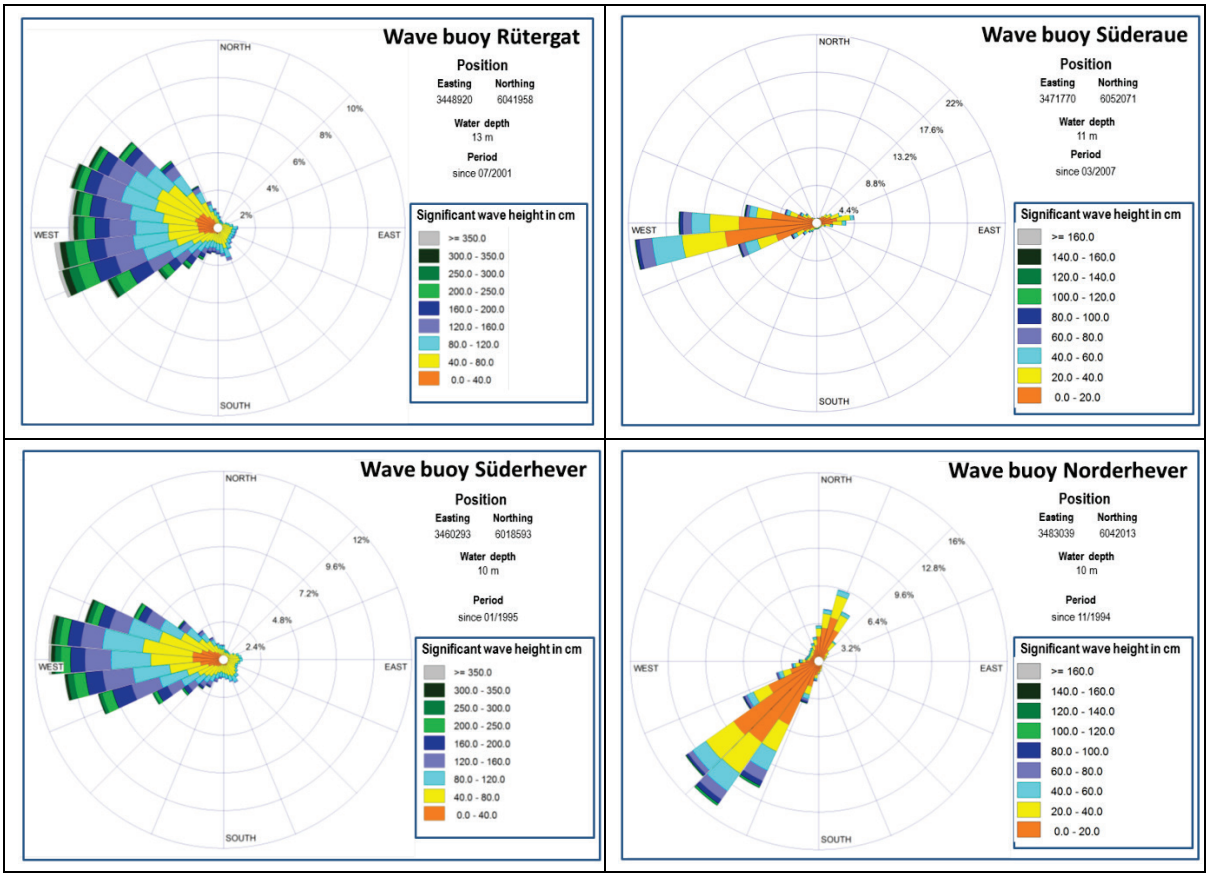


Abb. 7 Prozentuale Häufigkeit der Seegangsrichtung und der zugehörigen signifikanten Wellenhöhe für die Seegangsmessbojen Rütergat, Süderaue, Süderhever und Norderhever

Tab. 2 Relative Häufigkeiten der signifikanten Wellenhöhe für unterschiedliche Seegangsrichtungen an der Station Rütergat und Süderhever

	sign. Wellenhöhe in cm	0.0 - 40.0		40.0 - 80.0		80.0 - 120.0		120.0 - 160.0		160.0 - 200.0		200.0 - 250.0		250.0 - 300.0		300.0 - 350.0		>= 350.0		Total	
	Seegangsichtungen	Rütergat	Süderhever	Rütergat	Süderhever	Rütergat	Süderhever	Rütergat	Süderhever	Rütergat	Süderhever	Rütergat	Süderhever	Rütergat	Süderhever	Rütergat	Süderhever	Rütergat	Süderhever	Rütergat	Süderhever
1	355 - 5	0.00157	0.00186	0.00326	0.00466	0.00257	0.00219	0.00065	0.0004	0.00009	0.00015	0.00006	0.00003	0	0.00007	0	0	0	0.00002	0.00818	0.00861
2	05 -15	0.00117	0.0013	0.0024	0.00356	0.00196	0.00152	0.00058	0.00018	0.00013	0	0.00002	0	0	0	0	0	0	0.00002	0.00624	0.00604
3	15 - 25	0.00088	0.00147	0.00196	0.00311	0.00108	0.00124	0.00037	0.00028	0.00017	0.00002	0	0	0	0.00002	0	0.00002	0	0	0.00444	0.00565
4	25 - 35	0.0006	0.00163	0.00239	0.00346	0.00089	0.00092	0.0003	0.00008	0.00002	0	0	0	0.00002	0	0	0	0	0	0.0042	0.0056
5	35 - 45	0.00078	0.00142	0.00248	0.00349	0.00052	0.00066	0.00011	0.00007	0.00002	0	0	0	0.00002	0	0	0	0	0	0.00392	0.00518
6	45 - 55	0.00075	0.0017	0.00211	0.00321	0.00065	0.00063	0.00017	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00366	0.00509
7	55 - 65	0.00112	0.00222	0.00313	0.00466	0.00104	0.00084	0.00011	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00002	0.00539	0.00711
8	65 - 75	0.00097	0.00237	0.00419	0.00626	0.00101	0.00147	0.00009	0.00003	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00624	0.00931
9	75 - 85	0.00129	0.00268	0.00494	0.00712	0.00173	0.00166	0.00013	0.00003	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00807	0.01057
10	85 - 95	0.00153	0.00265	0.00626	0.00761	0.00252	0.00186	0.00041	0.00002	0.00004	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.01072	0.01116
11	95 - 105	0.00155	0.00282	0.00576	0.00649	0.00203	0.00137	0.00076	0.00005	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.01007	0.00985
12	105 - 115	0.00164	0.00232	0.00578	0.00572	0.00196	0.00138	0.00054	0.00008	0.00002	0.00002	0	0.00002	0	0	0	0	0	0	0.00991	0.00876
13	115 - 125	0.00162	0.00295	0.00546	0.0054	0.0019	0.00132	0.00078	0.00038	0.00011	0	0.00002	0.00002	0	0	0	0	0	0	0.00987	0.00925
14	125 - 135	0.00194	0.00311	0.00526	0.00665	0.00175	0.0013	0.0005	0.00026	0	0.00003	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00942	0.01044
15	135 - 145	0.00218	0.00351	0.00544	0.00782	0.00233	0.00199	0.00067	0.00035	0.00011	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0107	0.01256
16	145 - 155	0.00216	0.00362	0.00684	0.00817	0.00315	0.00397	0.00045	0.00066	0.00007	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.01264	0.01509
17	155 - 165	0.003	0.00364	0.00837	0.0069	0.00496	0.00351	0.00171	0.00064	0.00007	0.00003	0.00002	0	0	0	0	0	0	0	0.01808	0.01353
18	165 - 175	0.00224	0.00343	0.00654	0.00576	0.00477	0.00288	0.00149	0.00059	0.00017	0.00002	0	0	0	0	0	0	0	0	0.01516	0.01166
19	175 - 185	0.00307	0.00334	0.00507	0.00507	0.00371	0.00259	0.00153	0.00033	0.00037	0.00002	0.00017	0	0	0	0	0	0	0	0.01388	0.01043
20	185 - 195	0.00319	0.00295	0.00455	0.00479	0.00291	0.00315	0.00194	0.00112	0.00045	0.0002	0.0002	0	0.00002	0	0.00002	0	0	0	0.01323	0.01122
21	195 - 205	0.00278	0.00343	0.00444	0.00527	0.00367	0.00387	0.00233	0.00173	0.00086	0.00043	0.00013	0.00002	0.00006	0.00002	0.00004	0	0.00009	0	0.01435	0.01356
22	205 - 215	0.00313	0.00425	0.00483	0.00651	0.00432	0.00466	0.00322	0.00298	0.00192	0.00092	0.00088	0.00026	0.00047	0.00007	0.00011	0	0.00004	0	0.01886	0.01806
23	215 - 225	0.00352	0.00529	0.00587	0.00787	0.00602	0.00453	0.00442	0.00351	0.00397	0.00124	0.00181	0.00043	0.00084	0.00012	0.00028	0.00008	0.00007	0	0.02672	0.02119
24	225 - 235	0.00434	0.00588	0.00712	0.00906	0.00807	0.00712	0.00779	0.0057	0.00494	0.00301	0.00449	0.00114	0.0017	0.00035	0.00052	0.00005	0.00022	0	0.03908	0.02968
25	235 - 245	0.00511	0.00733	0.01025	0.01066	0.01282	0.01159	0.01323	0.00988	0.01068	0.00703	0.0082	0.00239	0.00328	0.00086	0.00136	0.00018	0.00075	0	0.06549	0.04588
26	245 - 255	0.00781	0.01008	0.01522	0.014	0.01819	0.0182	0.01554	0.0184	0.01185	0.01257	0.0088	0.00682	0.00512	0.00203	0.0035	0.00044	0.00196	0.00013	0.08775	0.07597
27	255 - 265	0.01036	0.01476	0.0164	0.01971	0.01869	0.02335	0.0156	0.01945	0.00917	0.01082	0.00693	0.00771	0.00457	0.0039	0.00291	0.00153	0.00291	0.00033	0.08729	0.09335
28	265 - 275	0.01051	0.01948	0.01597	0.02676	0.01727	0.02522	0.01424	0.01677	0.00755	0.00904	0.00608	0.00628	0.00319	0.00377	0.00207	0.00216	0.00242	0.00166	0.07907	0.10214
29	275 - 285	0.01118	0.01976	0.01839	0.03192	0.01755	0.02563	0.01422	0.014	0.00736	0.00814	0.00486	0.0053	0.00257	0.00321	0.00155	0.00203	0.00143	0.00152	0.07891	0.10248
30	285 - 295	0.01273	0.01464	0.02191	0.02777	0.01882	0.02023	0.0137	0.01278	0.0068	0.00708	0.00373	0.00456	0.00192	0.00287	0.00151	0.00124	0.00078	0.00041	0.08167	0.08416
31	295 - 305	0.01148	0.0112	0.02441	0.01878	0.01688	0.01464	0.0118	0.01028	0.00634	0.00484	0.00281	0.00239	0.00142	0.00079	0.00093	0.00018	0.0003	0.00005	0.07616	0.05804
32	305 - 315	0.01113	0.00758	0.02115	0.0114	0.01433	0.00965	0.0096	0.00473	0.00455	0.0014	0.00307	0.00061	0.00061	0.0001	0.0003	0.00002	0.00013	0.00002	0.06469	0.03262
33	315 - 325	0.00762	0.00583	0.01577	0.00903	0.01066	0.00539	0.00615	0.00219	0.00205	0.00049	0.00114	0.00007	0.00022	0.00003	0.00004	0	0.00002	0	0.04354	0.02116
34	325 - 335	0.00509	0.004	0.01008	0.00631	0.00585	0.0038	0.00274	0.00133	0.00047	0.00033	0.00032	0.00008	0.00017	0.00003	0.00004	0	0.00002	0	0.0247	0.01461
35	335 - 345	0.00257	0.00306	0.00658	0.00461	0.0036	0.00267	0.00157	0.00061	0.00013	0.00012	0.00007	0	0.00006	0	0	0	0.00002	0	0.01455	0.01017
36	345 - 355	0.00196	0.00236	0.00471	0.00425	0.00265	0.00242	0.0008	0.00059	0.00013	0.00002	0.00011	0.00002	0	0	0.00002	0	0.00002	0	0.01037	0.00887
	Sub-Total	**0.14413**	**0.17455**	**0.29446**	**0.29761**	**0.22222**	**0.20164**	**0.14982**	**0.11992**	**0.08037**	**0.06246**	**0.05376**	**0.03504**	**0.02617**	**0.01674**	**0.01515**	**0.00728**	**0.01115**	**0.00383**	**0.99723**	**0.91906**
	kein Seegang																			0	0
	fehlende Daten																			0.00277	0.08094
	Total																			1	1

Tab. 3 Relative Häufigkeiten der signifikanten Wellenhöhe für unterschiedliche Seegangsrichtungen an der Station Süderaue und Norderhever

	sign. Wellenhöhe in cm	0.0 - 20.0		20.0 - 40.0		40.0 - 60.0		60.0 - 80.0		80.0 - 100.0		100.0 - 120.0		120.0 - 140.0		140.0 - 160.0		>= 160.0		Total	
	Seegangsichtungen	Süderaue	Norderhever	Süderaue	Norderhever	Süderaue	Norderhever	Süderaue	Norderhever	Süderaue	Norderhever	Süderaue	Norderhever	Süderaue	Norderhever	Süderaue	Norderhever	Süderaue	Norderhever	Süderaue	Norderhever
1	355 - 5	0.00329	0.02085	0.00054	0.00678	0.00029	0.00201	0	0.00027	0	0.00005	0	0.00005	0	0.00002	0	0	0	0	0.00412	0.02993
2	05 -15	0.00429	0.02838	0.00112	0.01206	0.00037	0.00321	0.00008	0.00063	0.00004	0.00003	0	0	0	0.00002	0	0	0.00008	0	0.00599	0.0442
3	15 - 25	0.00487	0.03836	0.00079	0.01951	0.00017	0.00449	0	0.00035	0	0.00003	0	0	0	0	0	0	0.00004	0	0.00587	0.06255
4	25 - 35	0.00533	0.02931	0.00104	0.01384	0.00021	0.00286	0	0.0003	0	0.00002	0.00004	0.00003	0	0.00002	0	0	0.00004	0	0.00666	0.04623
5	35 - 45	0.0085	0.01211	0.00133	0.00746	0.00033	0.00115	0	0.00008	0	0	0	0	0	0.00002	0.00004	0	0	0	0.01019	0.02076
6	45 - 55	0.01096	0.00703	0.00346	0.00309	0.0005	0.00035	0.00004	0.00003	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.01493	0.01047
7	55 - 65	0.01225	0.00522	0.00604	0.00238	0.00133	0.00023	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00004	0	0.01963	0.0078
8	65 - 75	0.01733	0.00437	0.00991	0.00145	0.00254	0.00013	0.00046	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0302	0.00593
9	75 - 85	0.02374	0.00394	0.01545	0.00078	0.00412	0.00012	0.00046	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00008	0	0.0438	0.00482
10	85 - 95	0.01845	0.00291	0.011	0.00081	0.00408	0.00003	0.00054	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00004	0	0.03407	0.00374
11	95 - 105	0.00987	0.00291	0.00591	0.00065	0.00279	0.00003	0.00037	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.01893	0.00358
12	105 - 115	0.00571	0.00277	0.00362	0.00093	0.00108	0.00002	0.00017	0	0.00004	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.01061	0.00371
13	115 - 125	0.00475	0.00246	0.00196	0.00066	0.00037	0.00003	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00707	0.00315
14	125 - 135	0.0045	0.00317	0.0015	0.0006	0.00017	0.00003	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00008	0	0.00624	0.00379
15	135 - 145	0.00442	0.00327	0.00192	0.00071	0.00033	0	0.00008	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00008	0	0.00682	0.00398
16	145 - 155	0.00317	0.00455	0.0025	0.00073	0.00067	0.00003	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00632	0.0053
17	155 - 165	0.00312	0.00563	0.00287	0.001	0.00079	0.00007	0.00004	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00004	0	0.00686	0.00668
18	165 - 175	0.00412	0.00706	0.00229	0.00151	0.00087	0.00022	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00728	0.00876
19	175 - 185	0.00412	0.00904	0.00233	0.00131	0.00054	0.00043	0	0.00003	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00699	0.01078
20	185 - 195	0.00387	0.01203	0.00267	0.00261	0.00067	0.0014	0.00008	0.00065	0.00004	0.0003	0.00004	0.00012	0	0.00002	0	0	0.00004	0	0.0074	0.01706
21	195 - 205	0.00492	0.02236	0.00204	0.00706	0.00071	0.00377	0.00004	0.00216	0	0.0014	0	0.00043	0	0.00022	0	0.00002	0	0	0.0077	0.03731
22	205 - 215	0.00621	0.05958	0.00308	0.02486	0.00158	0.01781	0.00046	0.00994	0.00021	0.00435	0	0.00141	0	0.0004	0	0.00015	0.00004	0	0.01156	0.11815
23	215 - 225	0.00712	0.08397	0.00387	0.03223	0.00175	0.01821	0.00054	0.00897	0.00042	0.00415	0.00004	0.00156	0	0.00045	0.00004	0.00007	0	0.00003	0.01377	0.14921
24	225 - 235	0.01141	0.08831	0.00433	0.02886	0.00279	0.01359	0.00079	0.00474	0.0005	0.00191	0.00017	0.00065	0	0.00015	0	0.00007	0	0	0.01997	0.13786
25	235 - 245	0.01724	0.04702	0.00866	0.01409	0.00429	0.00585	0.00167	0.00256	0.00067	0.00103	0.00037	0.00037	0.00017	0.00012	0	0.00002	0	0.00002	0.03303	0.07085
26	245 - 255	0.04928	0.02497	0.02258	0.00668	0.01495	0.00354	0.00579	0.00145	0.00154	0.0005	0.00058	0.00017	0.00012	0.00003	0	0.00002	0.00008	0	0.0948	0.03724
27	255 - 265	0.10747	0.01617	0.05024	0.0038	0.03503	0.00186	0.01495	0.00095	0.00383	0.0002	0.00079	0.00012	0.00021	0	0	0	0.00008	0	0.21232	0.02303
28	265 - 275	0.09068	0.01102	0.03395	0.00284	0.02116	0.00188	0.01008	0.00063	0.00362	0.00027	0.00092	0.00007	0.00033	0.00002	0	0	0.00004	0	0.16057	0.01667
29	275 - 285	0.05319	0.00748	0.01749	0.00234	0.00858	0.00111	0.00329	0.00053	0.00133	0.00003	0.00075	0.0001	0.00025	0.00003	0	0	0	0	0.08478	0.0116
30	285 - 295	0.02374	0.00708	0.00866	0.00198	0.00433	0.0012	0.00125	0.00038	0.00058	0.00008	0.00012	0	0	0	0	0	0	0	0.03865	0.01068
31	295 - 305	0.0125	0.0067	0.00542	0.00173	0.00258	0.0011	0.00112	0.00035	0.00021	0.00003	0.00021	0.00005	0.00008	0.00002	0	0.00002	0.00004	0	0.02213	0.00996
32	305 - 315	0.009	0.0068	0.00487	0.00223	0.00142	0.00101	0.00054	0.00027	0.00008	0.00008	0	0.00003	0.00008	0	0	0	0.00004	0	0.01602	0.01039
33	315 - 325	0.005	0.00704	0.00233	0.00279	0.00046	0.0013	0.00029	0.00038	0.00004	0.00007	0	0.00003	0	0	0	0	0	0	0.00811	0.01158
34	325 - 335	0.0045	0.00837	0.00162	0.00256	0.00021	0.0014	0	0.00028	0.00004	0.0001	0.00004	0.00002	0	0.00002	0	0	0	0	0.00641	0.01271
35	335 - 345	0.00358	0.01014	0.00071	0.00371	0.00017	0.00156	0	0.00053	0.00008	0.00003	0	0.00003	0	0.00002	0	0	0	0	0.00453	0.01597
36	345 - 355	0.00342	0.01369	0.00058	0.0048	0.00021	0.00173	0.00004	0.00038	0.00008	0.00005	0	0.00002	0	0	0	0	0	0	0.00433	0.02061
	Sub-Total	**0.56516**	**0.62421**	**0.24839**	**0.22077**	**0.1223**	**0.09346**	**0.04314**	**0.03673**	**0.01335**	**0.01468**	**0.00408**	**0.00523**	**0.00125**	**0.00154**	**0.00008**	**0.00035**	**0.00092**	**0.00005**	**0.99867**	**0.99702**
	kein Seegang																			0	0
	fehlende Daten																			0.00133	0.00298
	Total																			1	1

Die Tab. 2 und Tab. 3 zeigen die relativen Häufigkeiten der signifikanten Wellenhöhen für unterschiedliche Seegangsrichtungen sowohl an den im Randbereich des Wattenmeeres gelegenen Stationen Rütergat und Süderhever als auch an den direkt im Wattenmeer gelegenen Stationen Süderaue und Norderhever im Vergleich.

Ähnliche Ergebnisse liefert der Vergleich der Zusammenhänge zwischen der signifikanten Wellenhöhe und der zugehörigen mittleren Wellenperiode an den Messbojen Süderhever und Norderhever sowie Rütergat und Süderaue. Dies wird in den folgenden Abb. 8 und Abb. 9 dargestellt und lässt deutlich die wesentlich geringeren Wellenhöhen an der Messboje Norderhever und Süderaue erkennen. Auffällig ist zudem die deutlich breitere Streuung der Wellenperioden bei geringen signifikanten Wellenhöhen an den Messbojen Norderhever und Süderaue.

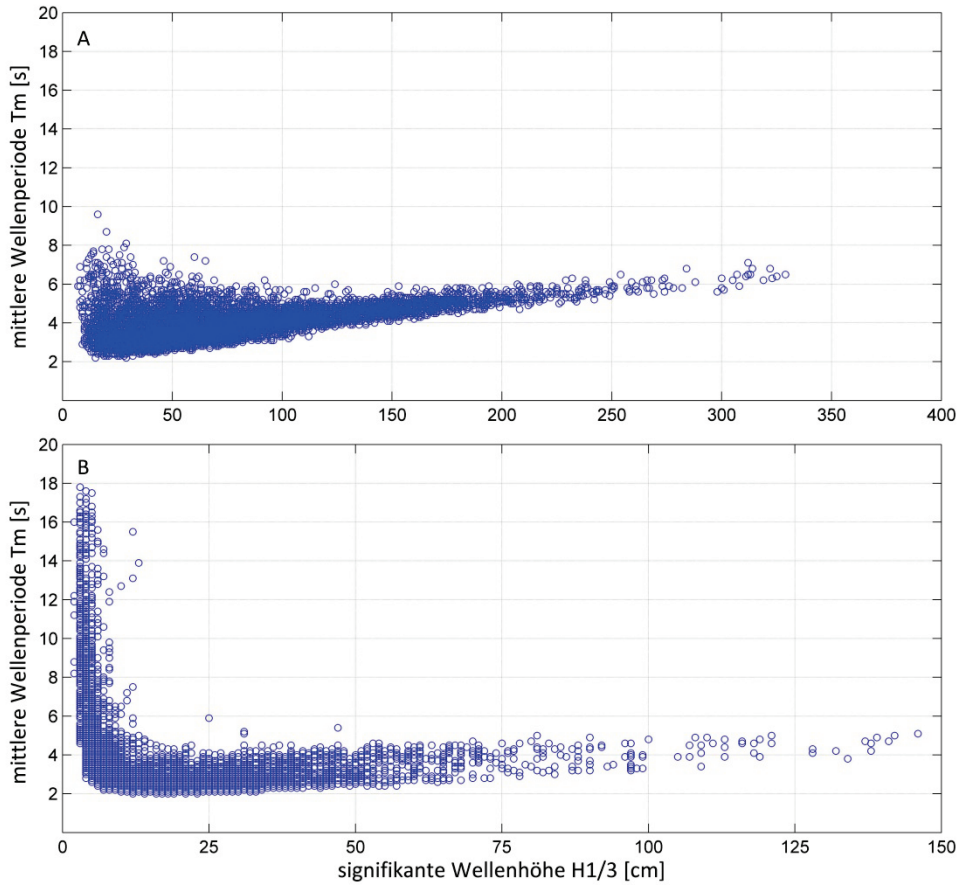


Abb. 8 Verhältnis $H_{1/3}$ zu T_m; A Boje Süderhever, B Boje Norderhever

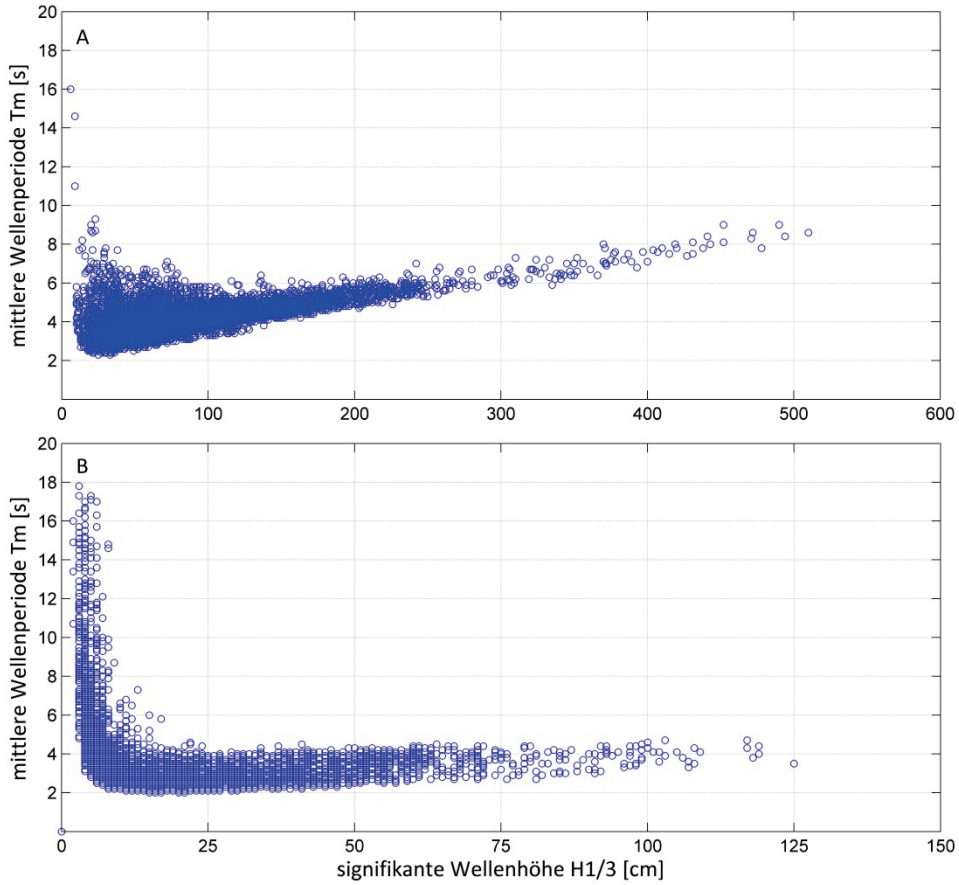


Abb. 9 Verhältnis H1/3 zu Tm; A Boje Rütergat, B Boje Süderaue

Da für den Bereich der Halligen keine Messdaten vorliegen, aus denen repräsentative Wellenparameter wie die signifikante Wellenhöhe und die Wellenperiode abgeleitet werden könnten, wird im Rahmen des Projektes ZukunftHallig-B eine Modellierung des Seeganges im Untersuchungsgebiet durchgeführt, die in den folgenden Kapiteln beschrieben wird.

2.2 Delft3D

Auf Grund der sehr viel aufwendigeren und teureren Naturmessungen durch Messbojen werden im Rahmen des Projektes ZukunftHallig numerische Modelle für das Untersuchungsgebiet des nordfriesischen Wattenmeeres aufgebaut, deren Ergebnisse die Grundlage für die Bemessung von neuen und in diesem Projekt zu entwickelnden Küstenschutzmaßnahmen bilden. Zum Einsatz kommen für die numerische Strömungs- und Seegangsmodellierung Delft Dashboard und Delft3D der Deltares Systems sowie für die numerische Überflutungssimulation das am IWW entwickelte PROMAIDES (Protection Measure against Inundation Decision Support). Abb. 10 zeigt exemplarisch die Modelkette der unterschiedlichen numerischen Modelle. Dabei liefert das mit Delft Dashboard erzeugte Gezeitenmodell der Nordsee (vgl. Abb. 10A) die Randbedingungen für

das über eine Rechengitterweite von 100 m x 100 m verfügende Wattenmeermodell (vgl. Abb. 10B). Dieses Modell stellt wiederum die Randbedingungen für ein hochaufgelöstes numerisches Modell der Halligen bereit, mit dessen Hilfe Sensitivitätsanalysen zur hydrodynamischen Wirksamkeit unterschiedlicher Küstenschutzmaßnahmen durchgeführt werden (vgl. Abb. 10C).

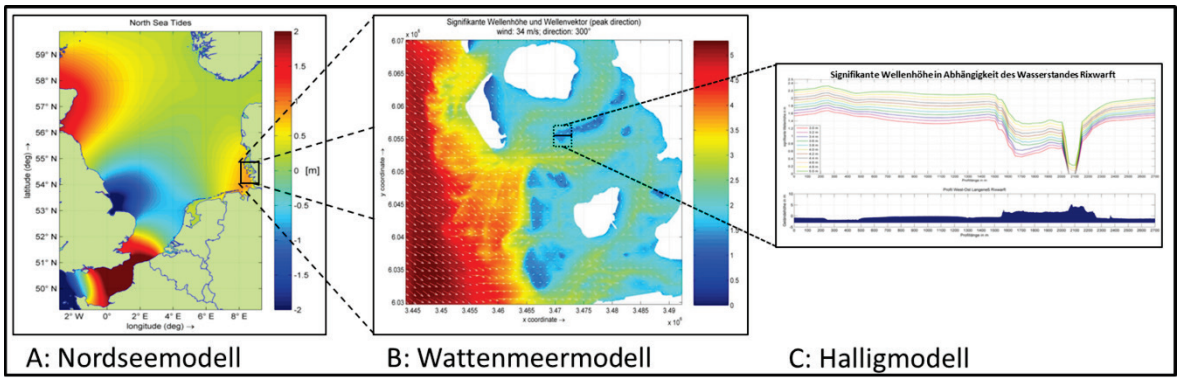


Abb. 10 Modellkette der numerischen Nordsee-, Wattenmeer- und Halligmodelle

Delft Dashboard ist ein Teilprojekt der OpenEarth Initiative und eine MATLAB basierte stand-alone Software. Es bietet einfachen Zugriff auf zahlreiche Onlinedatenbanken über OPeNDAP (Open-source Project for a Network Data Access Protocol). So kann beispielsweise auf Daten der Messstationen der International Hydrographic Organization (IHO) und die XTIde Tidal Stations abgerufen werden. Außerdem können Bathymetriedaten zahlreicher weiterer Datensätze heruntergeladen werden.

Da im Rahmen des Projektes Bathymetriedaten vom LKN-SH bereitgestellt werden konnten, liegen für das Untersuchungsgebiet hoch aufgelöste Daten zur Verfügung. Im Rahmen des Projektes ZukunftHallig wird DelftDashboard dazu genutzt, ein Gezeitenmodell für die Nordsee aufzubauen, mit dem wiederum die Randbedingungen für ein höher aufgelöstes Modell des südlichen nordfriesischen Wattenmeeres erzeugt werden können.

Delft3D ist ein Programmpaket der *Deltares Systems*, das sowohl zweidimensionale als auch dreidimensionale Strömungen, Sedimenttransport, Morphologie, Wasserqualität und Wellen sowie die Wechselwirkungen der einzelnen Prozesse in Abhängigkeit von Raum und Zeit simulieren kann. Die Anwendungsgebiete liegen zumeist im Bereich von Küstengebieten, Flüssen und Ästuaren. Dabei besteht Delft3D aus mehreren einzelnen Programmen, die teilweise miteinander verknüpft und ineinander integriert sind. Zu den im Rahmen dieser Seegangsmodellierung verwendeten Komponenten von Delft3D zählen die folgenden:

- *RGFGRID*

- *QUICKIN*
- *Wave*
- *Flow*

RGFGRID ist ein Programm zur Generierung und Veränderung sowohl kurvenförmiger als auch rechtwinkliger Gitternetze, welche die weitere Grundlage der durzuführenden Berechnungen darstellen.

Die Delft3D Komponente QUICKIN dient vorrangig dazu, das Bathymetriemodell für die spätere Verwendung in den Programmen Wave und Flow aufzubauen. Als Eingangsdaten dienen dabei zum einen das mit RGFGRID erzeugte Gitternetz und zum anderen Bathymetriedaten im xyz-Format. QUICKIN berechnet mittels einer auszuwählenden Methode den jeweiligen Wert einer jeden Gitterzelle anhand der darin befindlichen xyz-Daten.

Die Delft3D-Wave Komponente verwendet das phasengemittelte Seegangsmodell SWAN (Simulating Waves Nearshore) der TU Delft in der Version 40.72. Mit ihm können realistische Abschätzungen bestimmter Wellenparameter in Küstenregionen, Seen und Ästuaren getroffen werden, die durch anzugebende Wind-, Boden-, und Strömungsbedingungen verursacht werden. Ein Vorteil von SWAN gegenüber anderen Seegangsmodellen ist die richtungsunabhängige Modellierung der Ausbreitung des Seegangs. Dies ist gerade im Untersuchungsgebiet des nordfriesischen Wattenmeeres mit den teilweise starken Gezeitenströmen von Bedeutung. Nähere Informationen zu SWAN sind im User Manual (Swan User Manual, 2006) zu finden.

Delft3D-Flow ist ein multidimensionales hydrodynamisches Simulationsprogramm zur Berechnung instationärer Strömungen und Transportphänomenen, die durch Gezeitenkräfte oder Wind verursacht werden. Im Rahmen dieses Projektes wird Delft3D-Flow zur Simulierung der Gezeitenströmungen im Wattenmeer genutzt.

2.3 Grundlagen der Seegangsmodellierung

Die erste Seegangsvorhersage wurde im Rahmen der Landung der Alliierten in der Normandie im Zweiten Weltkrieg durchgeführt und hat seitdem immer mehr an Bedeutung gewonnen (Zanke, 2002). Seegang besitzt die Fähigkeit, große Energiemengen zu speichern, über weite Entfernungen zu transportieren und in Küstengebieten freizusetzten. Damit ist er neben den Gezeiten, Sturmflutwasserständen und Strömungen eine maßgebende Größe für die Schifffahrt und für jegliche See-und Küstenbauwerke (Mai et al., 2004). Mit der empirischen und numerischen Seegangsvorhersage existieren zwei Konzepte den Seegang vorherzusagen.

Die numerische Seegangsvorhersage gliedert sich in deterministische und phasengemittelte Modellansätze. Der deterministische Ansatz ist derzeit noch nicht praktisch anwendbar, da jede Welle diskret abgebildet werden muss und dies bei heutigen Messmethoden und Rechenzeiten an

seine Grenzen stößt (Zanke, 2013). Der phasengemittelte Modellansatz baut auf der Grundidee der spektralen Seegangsanalyse auf. Jedoch wird im Gegensatz zur Spektralanalyse nicht die Wellenenergie, sondern die Wellenaktion N als maßgebliche Größe betrachtet. Diese kann auch gering veränderliche Strömungsverhältnisse beschreiben. Die Beschreibung der Fortpflanzung sowie der Entstehung und des Zerfalls des Richtungsspektrums in der zeitlichen und räumlichen Dimension wird in der Wellenaktionsgleichung ausgedrückt (Zanke, 2013).

$$\frac{\partial}{\partial t} N + \nabla_x (\dot{X} N) + \frac{\partial}{\partial \sigma} (\dot{\theta} N) + \frac{\partial}{\partial \theta} (\dot{\sigma} N) = S_{tot} \quad , \tag{2.1}$$

Die zeitliche Änderung der Wellenaktion wird durch den ersten Summanden erfasst. Der zweite und dritte Summand beschreiben jeweils die horizontale Fortpflanzung beziehungsweise die Fortpflanzung im spektralen Raum. Die Summe steht im Gleichgewicht mit den sogenannten Senk- und Quelltermen. Diese beschreiben wiederrum die verschiedenen Prozesse der Änderung der lokalen Wellenaktion und sind in Gleichung (2.2) aufgeschlüsselt.

$$\frac{dN}{dt} = S_{tot} = S_{Wind} + S_{Dis,Sbr} + S_{Dis,Wbr} + S_{Dis,Boden} + S_{nl4} + S_{nl3} \quad , \tag{2.2}$$

Der Quellterm S_{Wind} beschreibt den Eintrag von Windenergie in das System. Die Senkterme unterteilen sich in Dissipationsanteile und Anteile nichtlinearer Wechselwirkungen. Eine Energiedissipation (Umwandlung von einer Energieform in eine andere) findet durch Schaumkronenbrechen $S_{Dis, Sbr}$, Wellenbrechen im Flachwasser $S_{Dis, Wbr}$ und infolge Bodenreibung $S_{Dis, Boden}$ statt. Die nichtlinearen Anteile bilden einen Energietransfer innerhalb des Seegangsspektrums infolge von Welle-Welle- Wechselwirkungen ab. Sie werden als Quadrupletinteraktion S_{nl4} und Triadeninteraktion S_{nl3} bezeichnet (Mai et al., 2004). Durch numerische Verfahren kann die Wellenaktionsgleichung gelöst werden und anschließend eine Überführung des Seegangspektrums in die Basisgrößen des Seegangs $H_{1/3}$ und T_p stattfinden. Das Seegangsmodell SWAN stellt ein solches Modell dar und wird im nächsten Abschnitt vorgestellt.

2.4 Simulating Waves Nearshore (SWAN)

Simulating Waves Nearshore, kurz SWAN, ist ein Seegangsimulationsmodell, das eine realistische Abschätzung von Wellenparametern in Küstenregionen, Seen und Ästuaren in Abhängigkeit von Wind-, Boden- und örtlichen Strömungsverhältnissen ermöglicht (Swan User Manual, 2006). Das an der niederländischen Hochschule TU Delft entwickelte Modell basiert auf dem phasengemittelten Modellansatz und baut damit auf der spektralen Seegangsanalyse auf. SWAN löst folglich die Wellenaktionsgleichung (vgl. Formel (2.1)) und kann dabei je nach

Generation unterschiedliche Quell- und Senkterme einbeziehen. Grundsätzlich verfügen alle drei Generationen von SWAN über die Möglichkeit den Windeintrag linear oder exponentiell anzunehmen. Auch wird das Schaumkronenbrechen, das tiefeninduzierte Wellenbrechen, die Bodenreibung und die Triaden-interaktion in allen Generationen berücksichtig. Lediglich die dritte Generation ist um die Fähigkeit, die Quadrupletinteraktion zu erfassen, erweitert (SWAN USER MANUAL, 2006).

Im Gegensatz zu anderen numerischen Seegangsmodellen wie WW3 (Wave Watch 3) ist SWAN speziell für küstennahe Gebiete und den Übergang vom Tiefwasser- zum Flachwasserbereich konzipiert worden. Zudem ist eine unbeschränkte Abbildung der Seegangs Ausbreitung in Bezug auf die Richtung möglich, so dass SWAN gerade für das durch Priele stark strukturierte Modellgebiet geeignet ist (Mai et al., 2004). Zwar ist SWAN für jede Skalierung der Wellenparameter geeignet, arbeitet im Tiefwasserbereich jedoch weniger effizient als das andere genannte Modell. Deshalb ermöglicht SWAN die Verschachtelung (engl. „Nestling“) in andere Seegangsmodelle, die beispielsweise über eine effizientere Tiefenwasserabbildung verfügen. Dazu werden die Randbedingungen des übergeordneten Modells an SWAN übergeben, welches anschließend die Modellierung von Flachwasserbereichen übernimmt. Zudem wird hierdurch eine Abbildungsgenauigkeit für Gebiete hoher Relevanz ermöglicht ohne dabei die Gitterweite des gesamten Gitters zu beeinflussen, sodass eine Optimierung der Rechenzeiten möglich ist.

Abschließend lässt sich feststellen, dass das in Delft3D integrierte Seegangsmodell SWAN ein geeignetes numerisches Simulationswerkzeug zur Beschreibung und Vorhersage des Seegangs und seiner Kenngrößen darstellt und dabei in besonderer Weise die im Wattenmeer auftretenden Flachwassereffekte berücksichtigt.

2.5 Nordseemodell

Zur Simulation von zukünftigen Sturmflutereignissen im Untersuchungsgebiet des nordfriesischen Wattenmeeres wird im Rahmen des Projektes ein Gezeitenmodell für die Nordsee aufgebaut, in das wiederum ein höher aufgelöstes Modell für die Region des südlichen nordfriesischen Wattenmeeres (siehe Kapitel 2.6) eingenistet wird.

Die eingesteuerten Randbedingungen des Nordseemodells stammen aus dem globalen Gezeitenmodell TPXO7.2 Global Inverse Tide Model. Dieses ist in Delft Dashboard integriert und besitzt eine Auflösung von 0,25° auf einem globalen Rechengitter bestehend aus 1440 x 721 Rechenzellen. Es berücksichtigt acht primäre Partialtiden (M2, S2, N2, K2, K1, O1, P1, Q1), zwei langperiodische (Mf, Mm) und drei nicht lineare (M4, MS4, MN4) harmonische Komponenten. Diese Partialtiden wurden an den offenen Modellrändern (vgl. Abb. 11a) eingesteuert. Die folgende

Auflistung zeigt die acht eingesteuerten primären Partialtiden. Die fettgedruckten Partialtiden stellen dabei die vier bedeutendsten dar, welche den größten Einfluss auf die tatsächliche Tidewelle ausüben:

- Halbtägige Tiden:
  - ***M2: Hauptmondtide (Principal Lunar)***
  - ***S2: Hauptsonnentide (Principal solar)***
  - *N2: Elliptische Mondtide (Elliptical lunar)*
  - *K2: Luni-solare Halbtagestide (Declination lunar solar)*

- Eintägige Tiden:
  - ***K1**: **Luni-solare Eintagestide** (Declination lunar solar)*
  - ***O1**: **Hauptmondtide** (Principal lunar)*
  - *P1: Hauptsonnentide (Principal solar)*
  - *Q1: Elliptische Sonnentide (Elliptical solar)*

Die offenen Modellränder sind jeweils in unterschiedliche Teilbereiche (vgl. Abb. 11a) gegliedert, um eine höhere Genauigkeit bei den eingesteuerten Randbedingungen zu erhalten. Die Tab. 4 zeigt die Anzahl der jeweiligen Unterteilungen.

Tab. 4 Anzahl der Teilbereiche an den Modellrändern

Modellrand	Anzahl Teilbereiche
Nord	26
West	29
Süd	11
Ost	13

Das rechtwinklige Rechengitter des Nordseemodells besteht aus 306 x 287 Zellen, die jeweils eine Höhe und Breite von 5000 m aufweisen. Über das Modellgebiet verteilt sind zahlreiche Beobachtungspunkte, die zur späteren Kalibrierung des Modells dienen (siehe Abb. 11b).

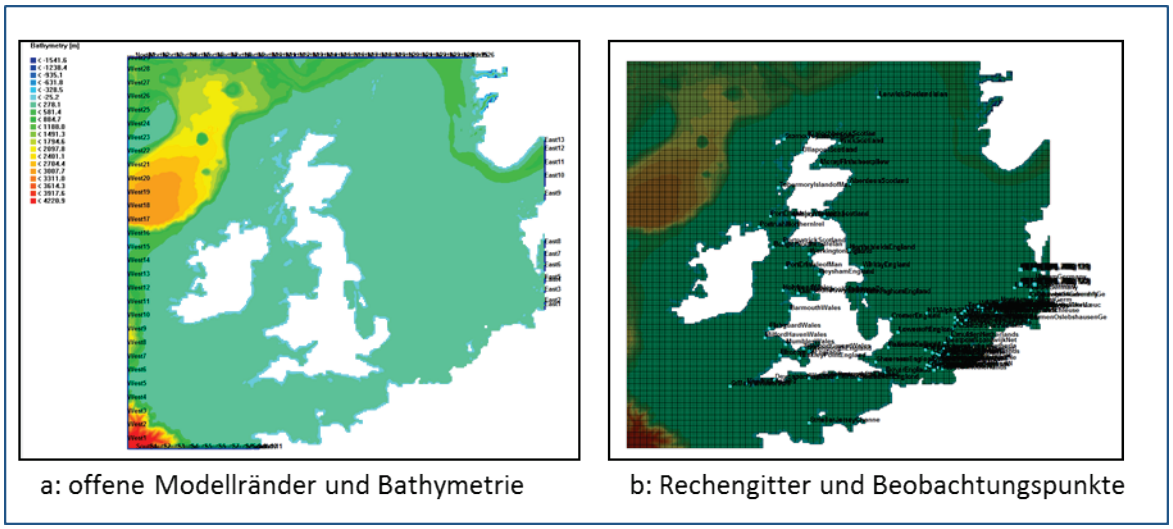


Abb. 11 Modelleigenschaften des Nordseemodells

Die Abb. 12 zeigt den durch das Modell berechneten Wasserstand zum Zeitpunkt des Tidehochwassers im Bereich der Deutschen Bucht.

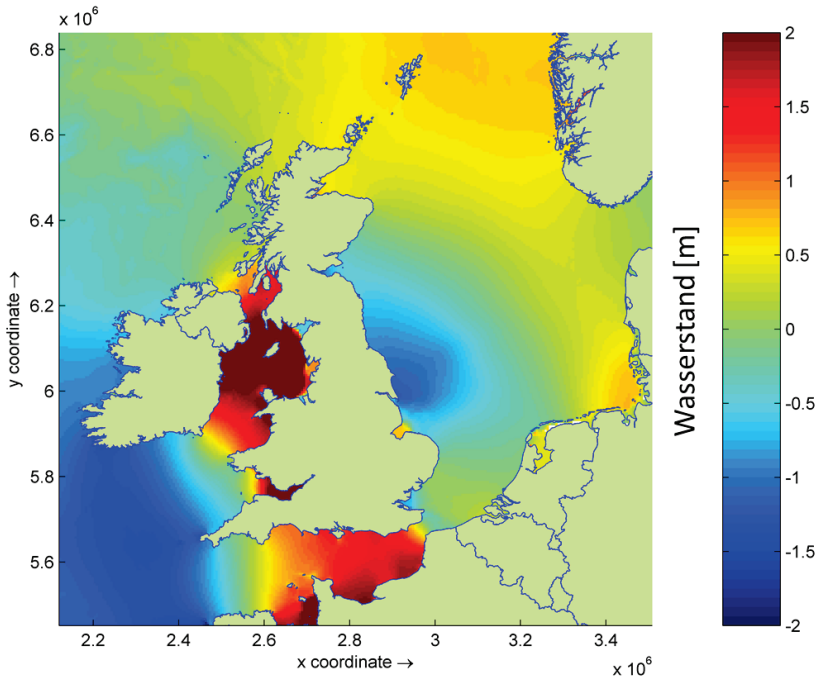


Abb. 12 Auf der Grundlage von XTPXO7.2-Daten simulierter Tidewasserstand der Nordsee zum Zeitpunkt des Tidehochwassers in der Deutschen Bucht

2.6 Wattenmeermodell

Zur Modellierung der Strömungen und des Seegangs im Bereich des südlichen nordfriesischen Wattenmeeres ist es zunächst notwendig gewesen, ein baythmetrisches Modell des Untersuchungsgebietes aufzustellen. Dazu wurden Peildaten des Landesbetriebs für Küstenschutz, Nationalpark und Meeresschutz des Landes Schleswig-Holstein (LKN-SH) und Seegrundkarten des Bundeamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) bereitgestellt. Durch die Größe des Untersuchungsgebietes stammen die bereitgestellten Daten jedoch zum Teil aus unterschiedlichen Jahren, so dass es gerade im Bereich der großen Prielsysteme mit ihrer Dynamik zu unerwünschten Geländekanten kommt, welche die Modellierung beeinflussen könnten. Die Abb. 13 zeigt das Alter beziehungsweise den Aufbereitungszeitpunkt der verwendeten Bathymetriedaten.

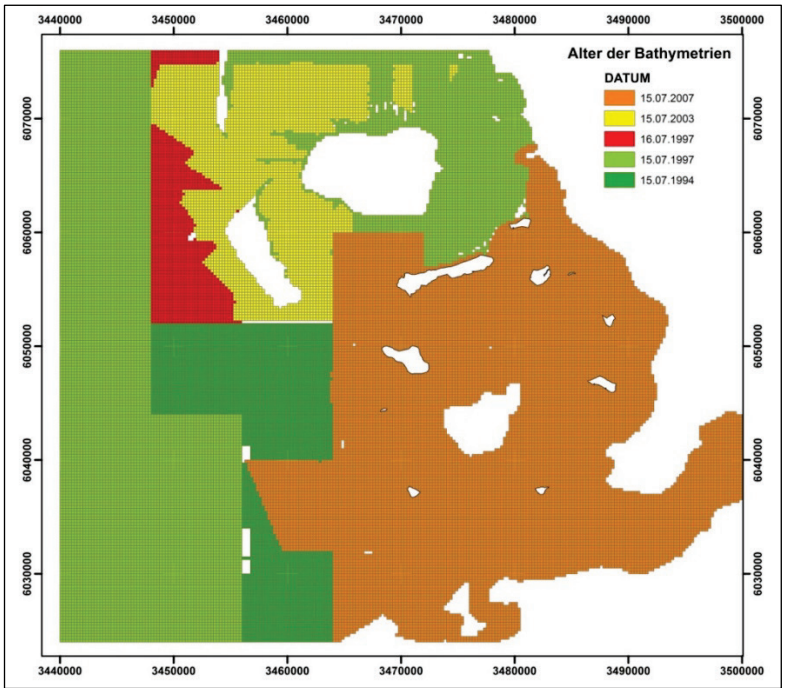


Abb. 13 Alter der Bathymetriedaten

Im Bereich der Halligen liegen jedoch mit den Wattgrundkarten aus dem Jahr 2007 einheitliche aktuelle Daten vor. Zu Problemen führt das unterschiedliche Alter der Datensätze vor allem im Bereich der Norder- und Süderaue und deren Übergang westlich der Hallig Hooge in das Küstenvorfeld. Da hier Datensätze aus den Jahren 1994 und 2007 aufeinandertreffen, kommt es aufgrund der natürlichen Dynamik der Prielsysteme zur Bildung von Kanten im Geländemodell, die im weiteren Verlauf korrigiert werden müssen. Damit im Bereich der Inseln und Festlandsgebiete keine Datenlücken vorliegen, wurde für diese Bereiche das DGM25 des *Landesamtes für Vermessung und Geoinformation* und für die Halligen das DGM1 aus dem Jahr 2005 verwendet (vgl. Abb. 1 und Abb. 6).

Die Aufbereitung der Bathymetriedaten und Verschneidung mit den Geländemodellen der Insel- und Festlandsbereiche erfolgte mit dem Programm ArcGIS 10 der Firma Esri. Zur weiteren Verwendung in Delft3D wurde das gesamte Bathymetriemodell in das xyz-Format konvertiert.

Die Vorgehensweise zur Seegangsmodellierung lässt sich in die drei elementaren Arbeitsschritte des Modellaufbaus, der Kalibrierung sowie der Verifizierung unterteilen. Die im xyz-Format vorliegenden Bathymetrie- und Geländedaten dienen als Eingangsdaten für den Aufbau eines Geländemodells im Delft3D eigenen Format (*.dep). Für die Berechnung des Geländemodells wurde zunächst mittels RGFGRID ein Grid mit einer Gitterweite von 100 m sowohl in x- als auch in y-Richtung generiert.

Die QUICKIN-Komponente berechnet aus den jeweils innerhalb einer Gridzelle befindlichen xyz-Daten den Mittelwert und weist dieser Zelle den ermittelten Wert zu. So wird ein gleichmäßiges Rastertiefenmodell mit einer Auflösung von 100 m generiert. Da Delft3D die Werte der Meerestiefe unterhalb von Normalnull als positive Werte und Landhöhen oberhalb von NN als negative Werte benötigt, müssen die Werte des erzeugten Modells mit dem Faktor -1 innerhalb von QUICKIN multipliziert werden. Zur Glättung der erwähnten Geländekanten wird abschließend mit der *Smoothing*-Funktion von QUICKIN das Höhenmodell im betroffenen Bereich überarbeitet. Die Werte der entsprechenden Rasterzellen werden mittels folgender Formel (2.3) neu berechnet.

$$New = (1\text{-}Faktor)*Old + Faktor*Neighbours \tag{2.3}$$

Der Glättungs-Faktor wurde in diesem Fall mit 0.8 angegebenen. Das Geländemodell des Wattenmeergebietes bildet zusammen mit den Modellparametern die Grundlage zur numerischen Simulation des Seegangs. Dabei müssen für eine jeweilige Simulation zusätzlich Randbedingungen für die seeseitigen Grenzen des zu untersuchenden Gebietes angegeben werden. Dazu gehören die Werte des Wasserstandes, des Windes und der dort vorherrschenden Seegangsbedingungen. Die westliche Modellgrenze wurde aus diesem Grund so festgelegt, dass sie sich an der Position der Seegangsmessboje Rütergat befindet (vgl. Abb. 6). So können bei der Kalibrierung Messwerte direkt am Modellrand eingesteuert werden. Als *Computational Grid* für die Berechnung des Seegangs wird das gleiche wie bei der Erzeugung des Topographiemodells verwendet.

Aufgrund der in diesen Untersuchungen nicht berücksichtigten Strömung werden der Wasserstand und die Windgeschwindigkeit als konstant für das zu modellierende Gebiet angenommen. Der an den Rändern einlaufende Seegang wird durch ein JONSWAP-Spektrum (Joint North Sea Wave Atmosphere Program) charakterisiert. Die im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Randbedingungen werden in den entsprechenden Kapiteln aufgeführt. Da es sich bei dem zu untersuchenden Gebiet des Wattenmeeres um ein extrem flaches Meeresgebiet handelt,

werden in der Simulation durch Grundberührung verursachte Flachwassereffekte berücksichtigt. Dazu zählen Shoaling, Refraktion, Diffraktion, Bodenreibung und das Brechen der Wellen. Der Standardwert für die JONSWAP-Bodenreibung von Cb=0.067 m^2s^{-3} wird im Allgemeinen als zu hoch für sandige Küsten eingeschätzt und so wurde bei diesen Berechnungen der Wert für die Bodenreibung auf 0,038 m^2s^{-3} gesetzt.

Die Randbedingungen für das Strömungsmodell für das Untersuchungsgebiet des südlichen Nordfriesischen Wattenmeeres liefert das in Kap. 2.5 beschriebene numerische Gezeitenmodell der Nordsee. Die Auflösung des Rechengitters des höher aufgelösten Wattenmeermodells beträgt 100 m. Die nachfolgende Abb. 14 zeigt die simulierten Wasserstände zum Zeitpunkt des Hochwassers und Niedrigwassers im Küstenbereich.

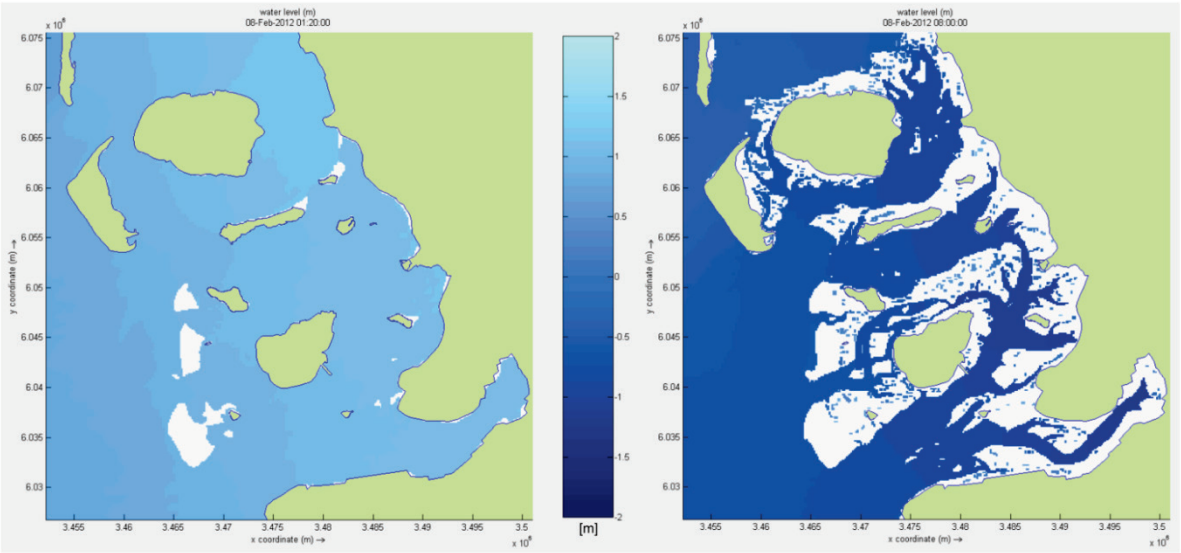


Abb. 14 Simulierte Wasserstände im südlichen nordfriesischen Wattenmeer

Die durch Gezeiten verursachten Strömungen im Wattenmeer sind der folgenden Abb. 14 zu entnehmen. Gleichzeitig wurde dabei Wind mit einer Geschwindigkeit von 24 m/s aus einer Richtung von 290° eingesteuert. Die höchsten tiefengemittelten Strömungsgeschwindigkeiten treten sowohl bei ablaufendem als auch bei auflaufendem Wasser in den großen Prielen auf.

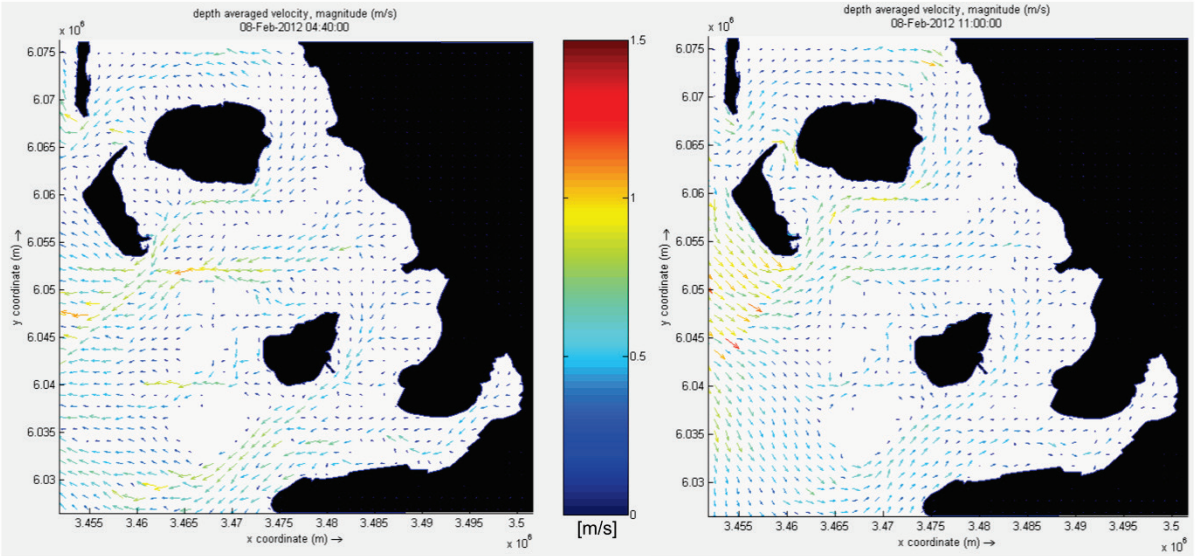


Abb. 15 Tiefengemittelte Strömungsgeschwindigkeiten zu unterschiedlichen Tidezeitpunkten

Die Abb. 16 zeigt die signifikante Wellenhöhe zu Tidehochwasser (links) und Tideniedrigwasser (rechts) bei Wind aus 290° und 24 m/s. Die höheren Wasserstände zum Zeitpunkt des Tidehochwassers führen im flachen Wattenmeergebiet auch gleichzeitig zu höheren signifikanten Wellenhöhen.

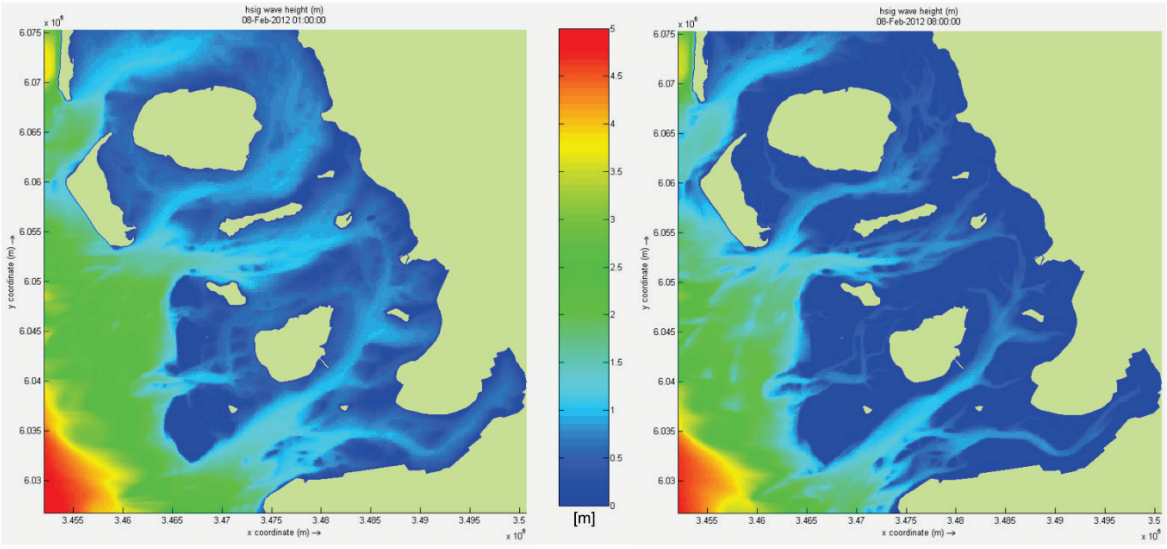


Abb. 16 Signifikante Wellenhöhe zu Tidehochwasser (links) und Tideniedrigwasser (rechts) bei Wind aus 290° und 24 m/s

Die zeitliche Entwicklung des Seegangs wird im Rahmen des Projektes ZukunftHallig nicht modelliert, da für die im Projekt zu bearbeitenden Fragestellungen der stationäre Betrieb von SWAN ausreicht.

2.7 Überflutungssimulationen für die Halligen

Zur Ermittlung des Risikos, dessen genaue Definition im Kap. 5.1 nachzulesen ist, werden im Rahmen des Projektes ZukunftHallig Überflutungssimulationen mit dem am Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft der RWTH Aachen entwickelten, modular aufgebauten Entscheidungsunterstützungssystem PROMAIDES (Protection Measure against Inundation Decision Support) durchgeführt. PROMAIDES ermöglicht eine hydrodynamische Analyse zur Bestimmung von Überflutungsflächen bei bestimmten vorgegebenen Wasserständen. Diese Wasserstände können durch Wasserstandsganglinien vergangener und zukünftiger Sturmfluten in das Modell eingesteuert werden.

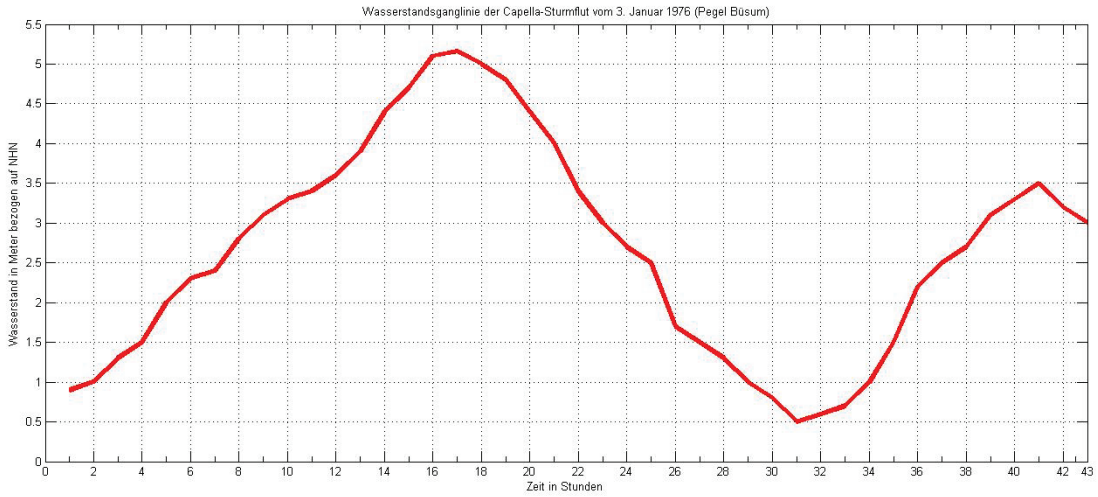


Abb. 17 Wasserstandsganglinie der Capella-Sturmflut vom 3. Januar 1976 am Pegel Büsum (nach Stadelmann (2008))

Die nachfolgenden Abbildungen zeigen die Ergebnisse eines Überflutungsszenarios, das auf der Wasserstandsganglinie des Pegels Pellworm vom Capella-Orkans am 03. Januar 1976 sowie den DGM1-Daten aus dem Jahr 2005 basiert.

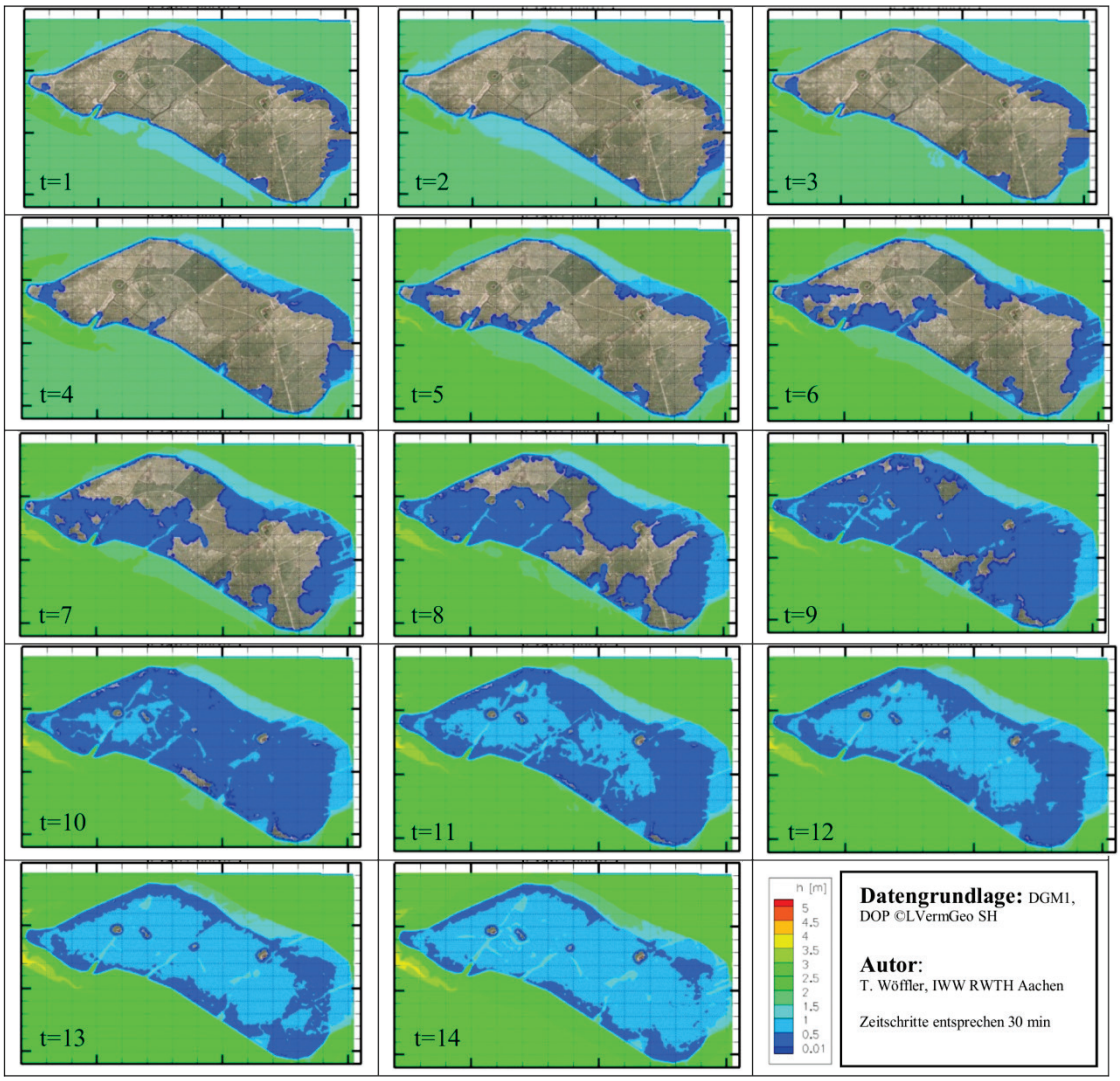


Abb. 18 Entwicklung eines Landunters auf der Hallig Nordstrandischmoor

2.8 Zusammenfassung

Mit den in diesem Kapitel dargestellten numerischen Untersuchungen ist die Grundlage zur Bearbeitung der relevanten Fragestellungen innerhalb des Teilprojektes ZukunftHallig-B geschaffen worden. Dabei dienen diese Werkzeuge zum einen der Bemessung von zu entwickelnden Maßnahmen des Küstenschutzes zum anderen aber auch der Bewertung der hydrodynamischen Wirksamkeit neu entwickelter Maßnahmen.

3 Entwicklung eines Bemessungsansatzes für Halligraustreifen

3.1 Allgemeines

An besonders seegangsexponierten Bereichen, vor allem an den westlichen Rändern der Halligen, sind die Halligkanten durch massive Deckwerke geschützt. Mit dem Bau von Deckwerken zum Schutz der Ufer vor rückschreitender Erosion wurde im Rahmen des „Halligsicherungsprogramms“ von 1895 begonnen. Die Deckwerke sind Setzsteindeckwerke oder Schüttsteindeckwerke aus Granit-Findlingen oder Säulen-Basalt. An der Seeseite besitzen die Deckwerke eine Böschungsneigung von 1:2 und zum Teil eine zusätzliche Fußsicherung aus Schüttsteinen. Der Deckwerkskopf dient der Überschlagssicherung. Er ist waagerecht auf einer Breite von 1,0 bis zu 5,0 m ausgebildet und soll als Transport- und Fahrweg genutzt werden können. Im Anschluss an die Überschlagssicherung schützt ein zumeist überhöhtes Deckwerk den Übergang zwischen massivem Kantendeckwerk und Halligfläche. Dieses wird hydraulisch rau gestaltet und als Halligraustreifen oder Halligigel bezeichnet (LKN-SH, 2011b). Einen Überblick über den Kantenschutz der Halligen bietet die Abb. 19.

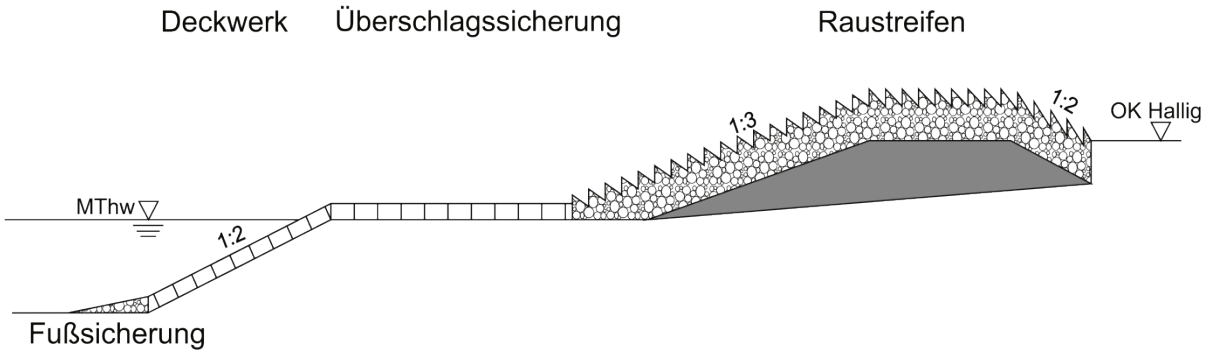


Abb. 19 Kantenschutz der Halligen

Die primäre Aufgabe der Halligraustreifen ist es, eine Sedimentation auf der Halligmarsch während Landunter Ereignissen zu begünstigen und gleichzeitig mögliche Auskolkungen

unmittelbar hinter dem Raustreifen zu verhindern. Mit den regelmäßigen Überflutungen der Halligen werden Schwebstoffe auf die Halligmarsch getragen. Dort sedimentieren sie und tragen so zu einem natürlichen Anwachsen der Halligen bei. Im Hinblick auf einen steigenden Meeresspiegel müssen die Halligraustreifen im Rahmen eines nachhaltigen Küstenschutzes gewährleisten, dass die Überflutungshäufigkeit weiterhin eine natürliche Anpassung und somit eine stabile Entwicklung der Höhenlage der Halligen ermöglicht.

Die Erosion der Halligkanten wird durch Welleneinwirkung verursacht. Die Umwandlung der Wellenenergie auf der Halligmarsch in Form von Wellenüberlaufraten und –geschwindigkeiten sowie Druckschlägen durch überschlagende Wellen führt zu Auskolkungen vor allem im unmittelbaren Übergang zwischen Halligmarsch und Deckwerk. Hier finden sich zum einen die höchsten Aufwuchsraten aber bedingt durch die Exposition des in die Höhe gewachsenen Bodens auch das größte Angriffspotential. Die Aufgabe der Halligraustreifen ist es, seegangsinduzierte Kräfte auf die Halligoberfläche zu verringern. Im Detail bedeutet dies die Wellenüberlaufrate zu reduzieren, Wellenüberlaufgeschwindigkeiten zu verringern und Druckschläge auf den Halligboden zu verhindern und somit die Schadensfreiheit zu gewährleisten. Die Halligraustreifen schützen also nicht vor den Überflutungen der Sturmfluten sondern vor den hydraulischen Wirkungen der Wellen an den Halligkanten.

Vom LKN-SH wird neben den funktionellen Aufgaben auch ein integratives Erscheinungsbild der Küstenschutzmaßnahmen auf den Halligen gefordert. Der Tourismus ist auf den Halligen zu einem wichtigen Wirtschaftsfaktor geworden. Das erhöhte Deckwerk soll in diesem Zusammenhang nicht als Fremdkörper wahrgenommen werden, sondern sich in seiner Gestaltung der flachen Landschaftsform der Halligen anpassen.

Der Küstenschutz auf den Halligen bietet zahlreiche Arbeitsplätze für die Bewohner. Es ist daher wichtig, den Bewohnern auch weiterhin einen gesicherten Arbeitsplatz zu bieten, indem viele Baumaßnahmen weiterhin in Eigenleistung ausgeführt werden. Dies wird dadurch erreicht, dass im Küstenschutz so weit wie möglich auf Verfahren verzichtet wird, die den Einsatz von Spezialbaufirmen oder besonderem Gerät erfordern.

Halligraustreifen werden in drei Varianten ausgeführt:

- *als Setzsteinraustreifen*
- *als Schüttsteindeckwerk mit kolloidaler Vermörtelung oder Asphaltverguss*
- *als Elastomer-verklebtes Schotterdeckwerk*

Welche Variante eingebaut wird, hängt von der Lage des zu verstärkenden Abschnittes, der Erreichbarkeit von Land oder See, den Witterungsverhältnissen während des Einbaus und der Beschäftigung der Mitarbeiter des LKN-SH ab.

Eine ausführliche Bemessungsgrundlage für den Halligraustreifen bestehend aus Polyurethan-verklebtem Schotterdeckwerk liegt bisher nicht vor. Nach dem Erläuterungsbericht für Halligdeckwerke (LKN-SH, 2011b) existiert ein vereinfachter Ansatz nach Schulz, der die Durchlässigkeit des Deckwerkes berücksichtigt. Außerdem wurden von Kumbruck (2009) zwei Ansätze zur Konstruktion eines undurchlässigen Raustreifens untersucht.

3.2 Maßgebende Parameter als Grundlage für die Bemessung von Halligraustreifen

3.2.1 Einführung

Die maßgebenden Parameter bei der Bemessung eines Raustreifens werden zunächst mit Hilfe eines Gedankenmodells übersichtlich zusammengetragen. Sie gliedern sich in Einwirkungen, Umwandlungsprozesse der hydraulischen Belastungen am Bauwerk und den Schadensmechanismus der Erosion auf der Hallig.

3.2.2 Gedankenmodell zu maßgeblichen Prozessen für die Bemessung von Halligraustreifen

Das Modell für die Bemessung von Halligigeln lässt sich in drei repräsentative Bereiche einteilen. Die Einwirkungen erfolgen von der Seeseite. Die hydraulischen Umwandlungsprozesse geschehen am und im Halligraustreifen. Die Auswirkungen und Schadensmechanismen schlagen sich hinter dem Raustreifen, auf der Halligoberfläche, nieder. Einen Überblick über die relevanten Parameter zur Bemessung des Küstenschutzes auf den Halligen bietet Abb. 20.

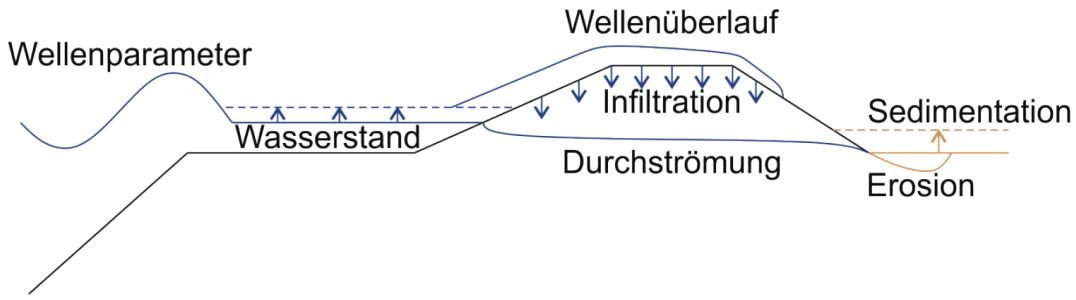


Abb. 20 Gedankenmodell zu Einwirkungen und Prozessen an und im Halligraustreifen

Die maßgeblichen Einwirkungen an den Kanten der Halligen sind der Wasserstand und der Seegang. Die Wellenbelastung am Bauwerk wird durch die Parameter Wellenhöhe, Wellenperiode und Wellenangriffsrichtung bestimmt. Das Windfeld, ausgedrückt in der Hauptwindrichtung sowie der maximalen Windgeschwindigkeit, verursacht die außerhalb des Wattenmeeres generierten Wellen. Der letztendlich im Bereich der Halligen auftretende Seegang wird zum einen lokal durch

den Wind generiert und zum anderen stark durch die Interaktion der aus der Nordsee einlaufenden Wellen mit der Topographie des nordfriesischen Wattenmeeres bestimmt. Dementsprechend ist der Einfluss des Wasserstandes auf den Seegang groß. Neben den Wellenparametern beeinflusst der Wasserstand die Sickerrate durch den porösen Raustreifen. Die Wellenenergie und Strömungsprozesse werden auf und in dem Halligraustreifen umgewandelt Diese Umwandlungsprozesse lassen sich durch geometrische Parameter und Materialparameter ausdrücken:

- Geometrische Parameter
    - *Kronenhöhe*
    - *Kronenbreite und –bauweise*
    - *Böschungsneigung*

- Materialparameter
    - *Porosität*
    - *Steinform und -orientierung*
    - *Steindurchmesser*

Innerhalb der Spritzwasserzone sowie über die Wellenauflauf- und Wellenüberlauflänge infiltriert Wasser in das durchlässige Küstenschutzbauwerk. Beim Durchströmen und Überströmen des Halligraustreifens wird Energie dissipiert, und es kommt zur Interaktion zwischen externer und interner Wellenbewegung.

Die letztendlich auf der Hallig ankommende Wellenenergie äußert sich in auf die Marschfläche brechende Wellen und in den Strömungsgrößen hinter dem Raustreifen. Von Interesse sind dabei als Belastungen der Halligmarsch sowohl der maximale Druckschlag als auch die Strömungsgeschwindigkeiten des Wellenüberlaufschwalls. Der Wasserstand oberhalb der Marschfläche bildet ein schützendes Wasserpolster gegen Erosionserscheinungen und ist somit als Widerstand anzusetzen.

Die Erosion der Halligoberfläche ist unerwünscht, da sie einerseits das Mitwachsen der Hallig mit dem ansteigenden Meeresspiegel verhindert und andererseits die Stabilität des Küstenschutzbauwerkes an der Halligkante gefährdet. Die Zielsetzung für die Bemessung eines Halligraustreifens ist dementsprechend, die Erosion während eines Sturmereignisses zu beschränken bzw. ganz einzudämmen. Gleichzeitig ist die Sedimentation von im Wasser transportierten Schwebstoffen so zu gewährleisten, dass die Halligen sich natürlich an den zu erwartenden und bereits erfolgten Meeresspiegelanstieg anpassen können. Der dafür notwendige Sedimenttransport durch den Raustreifen wird im Rahmen dieses Projektes nicht betrachtet. Hier liegt das Augenmerk zunächst auf den Strömungsgrößen, die die Randbedingungen für eine

mögliche Sedimentation bilden. Die ausreichende Durchlässigkeit für Sediment wird vereinfachend vorausgesetzt.

Ein Bemessungskonzept muss zusammenfassend sowohl die Einwirkungen als auch die Widerstände gegen den Versagens- oder Schadensfall beinhalten. Der Vergleich zwischen Belastungen und Widerständen erfolgt über die Grenzzustandsgleichung (3.1):

$$Z = R - S \tag{3.1}$$

Ein Versagen tritt im Allgemeinen ein, sobald die Einwirkungen S größer werden als die Widerstände R, also für $Z < 0$. Der Grenzzustand ist erreicht, wenn sich die Einwirkungen und Widerstände die Waage halten ($Z = 0$).

3.3 Entwicklung eines Modells für Halligraustreifen

Im Rahmen von physikalischen und numerischen Modellversuchen sollen erste Aufschlüsse über die hydraulische Wirksamkeit der Halligraustreifen unter stationärer Belastung gewonnen werden. Die physikalischen Modellversuche dienen dabei der Validierung des numerischen Modells. Der Vorteil dieser hybriden Modellierung ist, dass die grundlegenden Eigenschaften des Bauwerks aus wenigen physikalischen Modellversuchen gewonnen werden und anschließend für eine umfassende numerische Simulation verwendet werden können. Die numerische Modellierung wird vor allem für Optimierungsaufgaben und Variantenstudien eingesetzt, denn der Aufbau neuer Geometrien ist innerhalb eines numerischen Modells vergleichsweise einfach.

In diesem Kapitel werden zunächst die physikalischen Versuche an einem verkleinerten Modell des PUR-Raustreifens (Kapitel 3.4) beschrieben. Hierbei werden der verwendete Modellmaßstab, die eingesetzten Materialien sowie die Messtechnik erläutert. Anschließend wird der Aufbau des numerischen Modells mit dem Softwarepaket OpenFOAM vorgestellt (Kapitel 3.5). Um die Grundlage für die numerische Simulation zu bilden, werden die maßgebenden Modellgleichungen, die Navier-Stokes Gleichungen und die Implementierung der durchlässigen Deckwerksschicht in OpenFOAM, kurz beschrieben. Die ausführlichen Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in Wohlbring (2013) zu finden.

3.4 Physikalische Modellversuche

Die hydraulischen Modellversuche wurden in der Kipprinne des Instituts für Wasserbau und Wasserwirtschaft (IWW) an der RWTH Aachen durchgeführt. Für zwei Modellgeometrien

(siehe Abb. 23) wurden stationäre Abflusszustände mit unterschiedlichen Überfallhöhen untersucht.

3.4.1 Modellaufbau

Der Freispiegelabfluss der stationären Versuche wird von Trägheits- und Schwerekräften dominiert. Das Verhältnis zwischen beiden Kräften wird mit der Froude-Zahl ($Fr = v / \sqrt{gd}$) ausgedrückt. Besonders bei den turbulenten Fließwechseln über einen Wehrrücken kann der Einfluss der Reibung in der kleinskaligen Modellierung vernachlässigt werden (Martin & Pohl, 2008). Im kleinmaßstäblichen physikalischen Modell soll das Gleichgewicht zwischen den dominierenden Kräften erhalten bleiben, dementsprechend wird der Modellskalierung das Froude'sche Ähnlichkeitsgesetz ($Fr_{\text{Modell}} = Fr_{\text{Prototyp}}$) zu Grunde gelegt. Für den Längenmaßstab wurde ein Verhältnis zwischen Modell und Prototyp von $N_L = L_M : L_P = 1:5$ gewählt, daraus ergibt sich ein Maßstabsfaktor für den Zeitmaßstab von $N_T = T_M : T_P = 1:\sqrt{5}$.

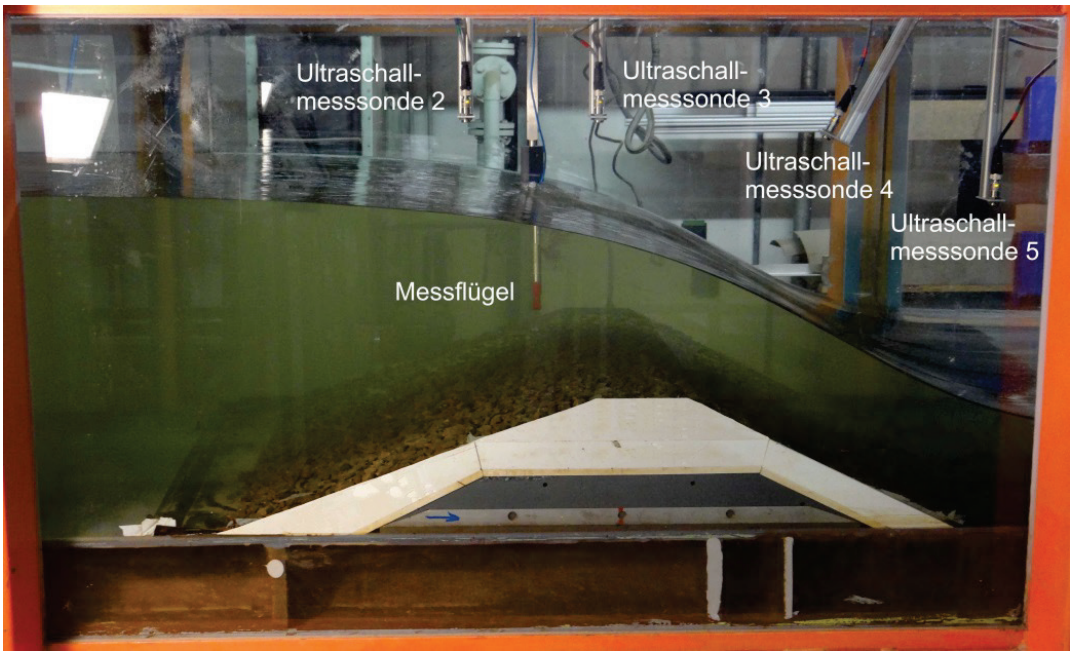


Abb. 21 Aufbau des physikalischen Modellversuchs in der Ausbaustufe 2 in der Kipprinne des IWW

Die Modellkörper repräsentieren zwei Ausbauzustände des Halligraustreifens (vgl. Abb. 23). Im ersten Ausbauzustand besitzt die Raustreifenkonstuktion eine Gesamthöhe von 0,13 m. Sie besteht aus einer undurchlässigen Unterkonstruktion von 9 cm Höhe, die sowohl auf der Luv- als auch auf der Leeseite eine Böschungsneigung von 1:2 aufweist. Auf die Unterkonstruktion ist eine durchlässige Schicht aus Polyurethan-verklebten Schottersteinen aufgebracht. Der geklebte Modellkörper besitzt auf der Luv-Seite eine Böschungsneigung von 1:3 und ist auf der Lee-Seite parallel zum Unterbau mit der Steigung 1:2 geneigt. Die Krone des ersten Ausbauzustands ist 0,41 m lang. Dementsprechend nimmt die ganze Konstruktion eine Länge von 1,06 m ein. Das

Modell erstreckt sich mit 1,0 m Breite über den gesamten Querschnitt der Kipprinne, so dass sich ein zweidimensionaler Strömungszustand einstellen kann.

Für den Modellkörper der zweiten Ausbaustufe wurde die poröse Schicht auf eine Kronenhöhe von 0,19 m erhöht. Die weiteren Modellparameter wie die Modelllänge, Unterkonstruktion und Böschungsneigung bleiben unverändert, während die Kronenbreite durch die Verlängerung der Böschung auf 11 cm reduziert wird (vgl. Abb. 23).

Die Kornzusammensetzung der PUR-verklebten Deckwerksschicht des Modells wurde in Abstimmung mit dem Prototypen zusammengesetzt. Für die Halligraustreifen wird Granitschottergestein mit einem minimalen Korndurchmesser von 38 mm und einem maximalen von 58 mm eingebaut (LKN-SH, 2011b). In den Modellversuchen wurden Kalksteine eingesetzt. Die Skalierung des Korndurchmessers kann im kleinen Maßstab nicht exakt eingehalten werden, da die Nennöffnungsweite der in einer Maschinensiebung eingesetzten Siebböden normativ festgelegt ist (DIN 66165-1 (1987)). Der minimale Korndurchmesser der Versuchskörnung beträgt somit 8 mm und der maximale 16 mm. Die Sieblinie der eingesetzten Körnung ist in Abb. 22 dargestellt. Wie aus der Abbildung ersichtlich ist, ergibt sich eine relativ enggestufte Sieblinie ($U = 5{,}5$). Als charakteristischer Durchmesser kann aus der Sieblinie der Steindurchmesser bei 50% Siebdurchgang bestimmt werden ($D_{50} = 0{,}0109$ m).

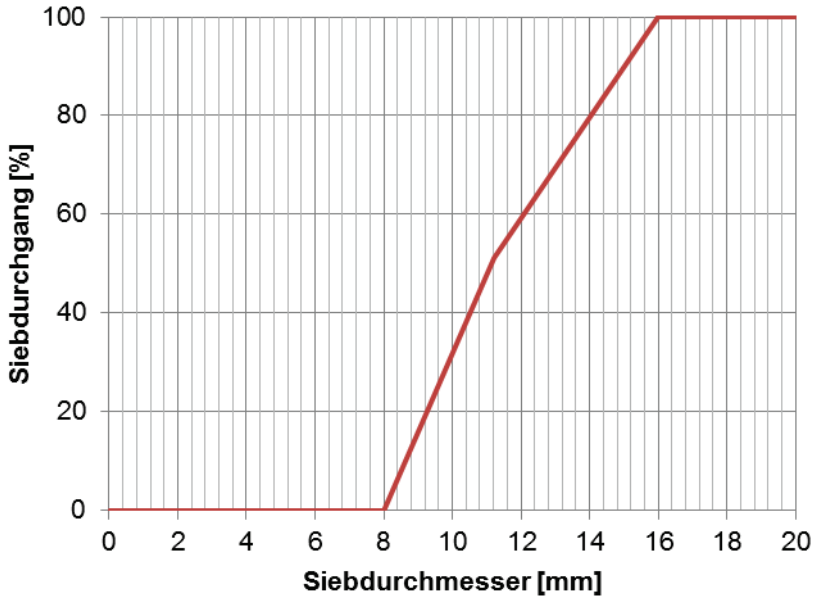


Abb. 22 Sieblinie der verwendeten Kalksandstein-Körnung

Für die Beschreibung der hydraulischen Parameter wurde die Porosität der geschütteten Körnung ermittelt. Die Gesteinskörnung wurde in unverklebtem Zustand auf ihre Porosität hin untersucht, da der Polyurethankleber bei einem Verhältnis von 33 kg PUR je m³ Steine lediglich

eine dünne Schicht auf den Steinen hinterlässt und die Porosität somit nur unwesentlich beeinflusst. Hierfür wurden insgesamt sechs Proben untersucht. Das Porenvolumen V_P ergibt sich aus der Gewichtsdifferenz zwischen der reinen Steinschüttung und der Steinschüttung mit Wasserfüllung. Für die Porosität n wird der Quotient aus Porenvolumen und Gesamtvolumen des Versuchsbehälters gebildet.

Tab. 5 gibt eine Übersicht über die Streuung der gemessenen Werte.

Tab. 5 Auswertung der Porositätsmessung

Versuch	V_P [l]	n [%]
Min	4,8	38,4
Max	5,2	41,6
Mittelwert	5,0	40,1

Die minimale und maximale Porosität weicht nur geringfügig vom Mittelwert ab. Als charakteristischer Wert für die Porosität wird in den numerischen Modellversuchen (Kapitel 3.5) das arithmetische Mittel der Messungen verwendet.

3.4.2 Messprogramm

Das Messprogramm der stationären Versuche bestand aus Messungen der Wasserspiegeloberfläche und der Fließgeschwindigkeit an fünf Messpositionen, davon liegen drei über dem Bauwerk und je eine vor und hinter dem Raustreifenmodell. Für die Messungen der zweiten Ausbaustufe wurde die Lage der Querschnitte 3 und 4 leicht verändert. Messquerschnitt 3 wurde auf die Mitte der neuen Modellkrone verschoben. Messquerschnitt vier wurde orthogonal zur leeseitigen Böschung auf den Übergang der Krone des undurchlässigen Unterbaus ausgerichtet. Die exakte Lage am Bauwerk kann für beide Ausbaustufen der Abb. 23 entnommen werden.

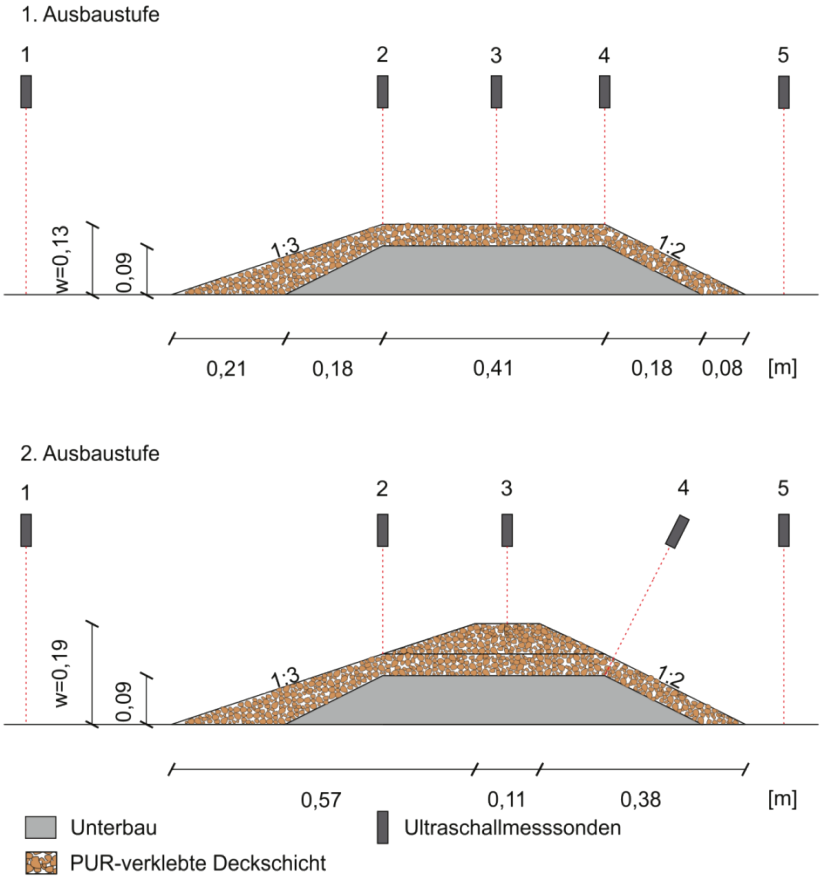


Abb. 23 Anordnung der Messquerschnitte während der physikalischen Modellversuche

Für jeden Ausbauzustand wurden zehn Messungen durchgeführt. Die Pumpe im Zulauf wurde so gesteuert, dass sich an der ersten Messposition zuvor festgelegte Überfallhöhen als Differenz zwischen Wasserspiegel und Kronenhöhe einstellten. Vor allem bei kleineren Zuflüssen waren Messungen über der Modellkrone nicht immer möglich, so dass für beide Ausbauzustände jeweils nur sieben verwertbare Messergebnisse vorliegen, deren eingestellte Überfallhöhen in Tab. 6 zusammengefasst sind.

Tab. 6 Überfallhöhen der physikalischen Modellversuche am Messquerschnitt 1

	$w/h_{ü}$ [-]						
Ausbauzustand 1	1,00	0,86	0,77	0,69	0,59	0,48	0,42
Ausbauzustand 2	1,48	1,26	1,11	1,00	0,86	0,70	0,67

Für die Wasserspiegelmessung wurden Ultraschallmesssonden des Typs pico+35/I der Firma microsonic verwendet. Die Sonde entsendet einen Ultraschall-Impuls, der von der Phasengrenze Luft-Wasser reflektiert wird. Der reflektierte Strahl wird wieder von der Sonde

erfasst und die Laufzeit zwischen Sendeimpuls und Echosignal gemessen. So kann die Distanz des Wasserspiegels zur Sonde mit einer Genauigkeit von ± 1 % ermittelt werden.

Die Geschwindigkeitsmessungen wurden mit der Mini Water6 Micro Flügelmesssonde der Firma Schiltknecht unterhalb der fünf Ultraschallmessonden in der Mitte der Kipprine durchgeführt. Für eine möglichst gute Darstellung der Geschwindigkeitsverteilung über die Fließtiefe, wurde an fünf Positionen innerhalb des Tiefenprofils gemessen. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in Wohlbring (2013) aufgezeigt.

3.5 Numerische Modellversuche

Die numerischen Modellversuche der Halligigel wurden mit dem Softwarepaket OpenFOAM 2.0.1 (Open Source Field Operation and Manipulation) durchgeführt. Im folgenden Abschnitt wird ein kurzer theoretischer Hintergrund zu den verwendeten numerischen Verfahren und Modellgleichungen gegeben ohne den Anspruch auf Vollständigkeit zu erheben.

Bei den simulierten Strömungsprozessen am Halligraustreifen handelt es sich um einen Freispiegelabfluss. Die freie Wasseroberfläche kann in OpenFOAM über die Simulation einer Zwei-Phasen Strömung aus Luft und Wasser mit Hilfe der Volume of Fluid Methode (VOF) abgebildet werden. Hierbei wird die Wasserspiegeloberfläche nicht explizit berechnet, sondern über den Volumenanteil der zwei Phasen innerhalb einer Zelle approximiert. Der Volumenanteil, oder Phasenanteil *alpha1*, beträgt 1, wenn die Zelle voll mit Wasser gefüllt ist. Ist die Zelle lediglich mit Luft gefüllt, nimmt der Phasenanteil den Wert 0 an. Befindet sich die Wasserspiegeloberfläche innerhalb einer Zelle, erhält diese einen Wert zwischen 0 und 1 entsprechend ihrer anteiligen Füllung mit der Phase Wasser.

Der zwei-Phasen Ansatz wird in OpenFOAM mit dem Standardlöser interFoam berechnet. Dieser basiert auf der Finite Volumen Methode. Räumlich wird das Modellgebiet hierbei in Kontrollvolumina unterteilt, über deren Ränder die integrierten Größen der unbekannten Strömung bilanziert werden. Die Finite Volumen Methode ist somit von Natur aus massenerhaltend und erlaubt auch eine Berechnung auf unregelmäßigen Gittergeometrien.

Zur Simulation von Turbulenzgrößen stehen verschiedene Turbulenzmodelle zur Verfügung. In der Simulation des Halligigels wird das $k-\varepsilon$ Modell verwendet. Es basiert auf den Reynoldsgemittelten Navier Stokes Gleichungen (RANS – Reynolds averaged Navier Stokes). Die in einer turbulenten Strömung stark fluktuierenden Strömungsgrößen werden in den RANS in einen Mittelwert und einen Schwankungswert aufgeteilt. Bei der zeitlichen Mittelung der Navier Stokes Gleichungen ergibt sich ein zusätzlicher Spannungsterm. Diese aus den Schwankungsgrößen der turbulenten Strömung resultierende Spannung kann über die Wirbelviskosität ν_t wie eine innere Reibung behandelt werden und wird mit Hilfe des $k-\varepsilon$ Modells nachgebildet. Die turbulente

kinetische Energie k charakterisiert den Geschwindigkeitsmaßstab der turbulenten Fließbewegung. Sie wird im weiteren Verlauf dieser Arbeit mit k_t bezeichnet. Die Dissipation der turbulenten kinetischen Energie ε beschreibt den charakteristischen Längenmaßstab der Turbulenz (Forkel, 1999). Weitere Turbulenzmodelle sowie der theoretische Hintergrund zum $k-\varepsilon$ Modell kann der einschlägigen Fachliteratur (z.B. Ferzinger & Peric, 2008) entnommen werden.

Poröse Medien werden in OpenFOAM über einen zusätzlichen Senke-Term in den Navier Stokes Gleichungen modelliert (Hafsteinsson, 2009):

$$S_i = -\left(\nu D_{ij} + \frac{1}{2}|u_{kk}|F_{ij}\right)u_i \tag{3.2}$$

Zur Lösung der erweiterten Navier Stokes Gleichungen wird der Löser porousInterFoam benötigt. Er stellt eine Erweiterung des oben genannten Standardlösers InterFoam um die porösen Gleichungen dar.

Auf die Auswertung der physikalischen Modellversuche und die Validierung des numerischen Modells soll an dieser Stelle nicht weiter eingegangen werden. Die Ergebnisse können in Wolbring (2013) nachgelesen werden.

3.6 Funktionale Bemessung eines Halligraustreifens

3.6.1 Einführung

Innerhalb dieses Kapitels werden konkrete Grenzzustandsgleichungen für die funktionale Bemessung eines Halligraustreifens unter Zuhilfenahme der aus der Literaturrecherche sowie der aus den numerischen und physikalischen Versuchen gewonnenen Erkenntnisse aufgestellt. Dabei werden die Erosion der Halligmarsch durch den Überlaufschwall, die Erosion durch den Druckschlag und die schützende Wirkung eines Wasserpolsters berücksichtigt. Im Anschluss daran werden Gleichungen für den Wellenüberlauf, die Überlaufgeschwindigkeit und den Druckschlag am Halligigel aufgestellt. Für die Halligmarsch werden konkrete Randbedingungen für die Erosion durch die Einwirkungsgrößen gegeben. Es wird ebenso ein Ansatz zur Berechnung des Einstaus der Hallig durch überlaufendes und durchsickerndes Wasser vorgestellt und dessen Anwendung im Rahmen der funktionalen Bemessung konkretisiert. Die Bemessungsgleichungen werden im Kapitel 3.8 an einem repräsentativen Bauwerksprofil auf der Hallig Langeneß angewandt und deren Ergebnisse in dem Zusammenhang diskutiert.

3.6.2 Aufstellen der Grenzzustandsgleichung

Im Kapitel 3.2.2 wurde bereits eine allgemeingültige Grenzzustandsgleichung vorgestellt (vgl. Gl. (3.1)). Diese Gleichung wird für die konkreten Schadensmechanismen an den Kanten der Halligen angepasst. Der Schadensfall an der Halligkante ist die Erosion der Salzwiesenoberfläche

unmittelbar hinter dem Raustreifen. Sie wird durch die Geschwindigkeit des Wellenüberlaufschwalls und den Aufschlag brechender Wellen auf die Halligmarsch hervorgerufen.

Die Druckschlagbelastung ist eine direkte Folge dieses Wellenbrechens. Sie ist örtlich stark auf den Auftreffpunkt der Brecherzunge auf der Halligmarsch begrenzt. Aus diesem Grund wird die Grenzzustandsgleichung anhand des Druckgleichgewichts an einem repräsentativen Bodenelement aufgestellt (Kortenhaus & Oumeraci, 2002):

$$Z_p = p_{krit} - p_{\max} \tag{3.3}$$

In der funktionalen Bemessung des Halligigels muss überprüft werden, ob für die Grenzzustandsgleichung des Druckschlags die Widerstände p_{krit}, die vom Bodenelement aufgebracht werden, nicht von den Einwirkungen durch den maximalen Druckschlag $p_{\max}$ überschritten werden und die Bedingung $Z \geq 0$ erfüllt ist.

Laufen die Wellen über das Bauwerk, wird durch die Schwallgeschwindigkeit eine Schubspannung auf die Halligmarsch übertragen. Wenn die vorhandenen Schwallgeschwindigkeiten eine kritische Geschwindigkeit überschreiten, beginnt die Erosion der Halligmarsch. Dies wird in der folgenden Grenzzustandsgleichung ausgedrückt:

$$Z_v = v_{krit} - v_{OK,Hallig} \tag{3.4}$$

Aufgrund der spezifischen Gegebenheiten auf den Halligen bedeutet eine Überschreitung der kritischen Geschwindigkeit jedoch nicht in jedem Fall einen Schaden durch Erosion. Wenn die Hallig eingestaut ist und sich ein Wasserpolster von $d \geq 0{,}40$ m ausgebildet hat, ist die Marschoberfläche vor Erosion durch den Wellenüberlaufschwall geschützt (Erchinger et al., 1996). Aus diesem Zusammenhang ergibt sich eine zweite Grenzzustandsgleichung:

$$Z_d = d_{OK,Hallig} - d_{krit} \tag{3.5}$$

Die beiden aufgestellten Grenzzustandsgleichungen (3.4) und (3.5) müssen für einen ganzheitlichen Bemessungsansatz über eine logische *UND*-Verknüpfung aneinander gekoppelt werden. Dem zufolge tritt ein Schadensfall nur ein, wenn die kritische Geschwindigkeit überschritten wird und kein ausreichendes Wasserpolster auf der Hallig vorhanden ist ($Z_v < 0$ & $Z_d < 0$). Der Raustreifen gilt als bemessen für den Fall, dass entweder beide oder eine der beiden Grenzzustandsgleichungen erfüllt werden (($Z_v > 0$ & $Z_d > 0$) *ODER* ($Z_v > 0$ & $Z_d < 0$) *ODER* ($Z_v < 0$ & $Z_d > 0$)).

3.7 Ermittlung der Einwirkungs- und Widerstandsgrößen für den Halligraustreifen

3.7.1 Berechnung des Druckschlags

Der Druckschlag stellt die größte Belastung der Halligkante dar. Trifft die brechende Welle auf die ungeschützte Marschfläche, kann es zur Sprengwirkung und Kolkbildung kommen. Da der Halligigel jedoch hinter einer durchschnittlich 3 m breiten Überschlagssicherung angeordnet ist, wird das Auftreffen der Brecherzunge auf die ungeschützte Hallig sehr unwahrscheinlich. Aus diesem Grund sollte in einem ersten Schritt zunächst der Punkt des Auftreffens der Fallparabel berechnet werden.

Der Ursprung der Fallparabel liegt am Kamm der brechenden Welle. Als Extremwert kann auf der sicheren Seite liegend angenommen werden, dass die Wellenhöhe im Verhältnis zur Wassertiefe $H_b / d = 1{,}0$ am Punkt des Wellenbrechens steht. An diesem Punkt herrschen Flachwasserbedingungen und die Wellen steilen sich auf, deswegen wird der Wellenberg weiter vom Ruhewasserspiegel ausgehend ausgelenkt als das Wellental. Es wird angenommen, dass der Brecherkamm in der Höhe $0{,}78 H_b$ oberhalb des Ruhewasserspiegels liegt (Führböter, 1966).

Wenn die Fallparabel auf die Hallig trifft, wird der maximale Druckschlag berechnet. Die Erosion erfolgt nur an einem bereits mit Rissen durchzogenen Boden. Ein repräsentatives Bodenelement wird dann durch die Auftriebswirkung am Grund des Risses aus dem Bodenverbund geschlagen. Der Scherwiderstand des Bodenelementes ist der Auftriebskraft entgegengesetzt. Dieser wird durch die drainierte Scherfestigkeit ausgedrückt. Für die Scherfestigkeit des Halligbodens werden die Eigenschaften eines geringplastischen Schluffbodens angenommen, so dass sich ein Wert von $c_u = 5$ kN/m² ergibt. Der k-Faktor zur Berücksichtigung des zeitversetzten Auftretens der Druckspitze unterhalb des Bodenelementes wird mit $k(t) = 0{,}1$ angesetzt. Die Abmessungen des Bodenelementes werden in Anlehnung an Kortenhaus & Oumeraci (2002) mit 0,25 x 0,25 x 0,25 m³ gewählt und für den Durchwurzelungsgrad der untere Grenzwert mit 2,5 angenommen. Als Wichte des Bodens wird die Wichte von Schluff übernommen $\gamma = 26$ kN/m³. Bei einem horizontalen Untergrund ergibt sich daraus der kritische Druck an dem Bodenelement:

$$p_{krit} = \frac{t}{1-k(t)}\left[\gamma_k \cdot \cos\alpha + 2{,}5 \cdot c_u \left(\frac{1}{b} + \frac{2}{l_E}\right)\right] = 1{,}11 \cdot 0{,}25\left[26 + 2{,}5 \cdot 5 \cdot 12\right] = 48{,}84 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \quad (3.6)$$

3.7.2 Bemessungsgleichung für das Durchströmen des Raustreifens

Befindet sich der Ruhewasserspiegel oberhalb des Halliggeländes strömt Wasser entsprechend zum Druckgefälle durch den porösen Halligigel. Die Durchsickerung des

Halligraustreifens bei Einstau auf der wasserseitigen Böschung erfolgt nach Kobayashi & de los Santos (2007). Die Sickerrate ergibt sich demnach zu:

$$q_s = 0{,}2\left(z_r - z_e\right)^{1{,}5}\left[\frac{g}{\left(x_e - x_r\right)b}\right]^{0.5} \tag{3.7}$$

Nach den Ergebnissen der numerischen Simulation eines kleinmaßstäblichen Raustreifenmodells (vgl. Kap. 3.5) wurde mit dem Koeffizienten $\beta_f = 1{,}1$ eine gute Näherung für den turbulenten Reibungskoeffizienten b_f erzielt. Dieser lässt sich weiterhin empirisch über die Porosität des Halligigels und einen charakteristischen Korndurchmesser bestimmen. Nach den physikalischen Modellversuchen wird die Porosität der PUR-verklebten Deckschicht des Raustreifens mit $n = 0{,}401$ verwendet. Der charakteristische Durchmesser bei 50 % Siebdurchgang wird aus der Sieblinie der kleinskaligen Versuche mit $D_{50} = 0{,}0545$ m auf die Größenordnung des Prototyps angewendet (vgl. Kapitel 3.4.1). Mit diesen Größen kann der turbulente Reibungskoeffizient b_f berechnet werden:

$$b_f = \beta_f \frac{1-n}{n^3}\frac{1}{gD_{50}} = 19{,}11\,m^2/s^2 \tag{3.8}$$

Die Durchsickerung wird durch die Druckdifferenz zwischen der Lage des Ruhewasserspiegels auf der Außenböschung $\left(x_e, z_e\right)$ und der Lage der Halligoberkante $\left(x_r, z_r\right)$ initiiert.

3.7.3 Bemessungsgleichungen für die mittlere Wellenüberlaufrate

Neben der Sickerströmung durch den Halligigel, trägt der Wellenüberlauf zur Befüllung der Hallig bei. Die Integration der Sickerrate und der Wellenüberlaufrate ergibt das Gesamtwasservolumen, das während eines Zeitraums auf die Hallig gelangt. In diesem Kapitel wird die Berechnungsgleichung der mittleren Wellenüberlaufrate eines undurchlässigen, geböschten Küstenschutzbauwerkes in Kombination mit der Abminderung durch die durchlässige Steinschüttung auf den PUR-verklebten Raustreifen übertragen.

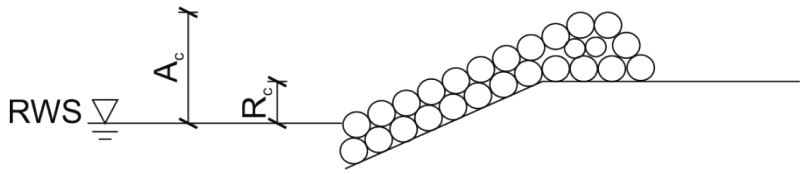


Abb. 24 Definition des Freibords für durchlässige Bauwerke nach dem EurOtop Manual (Pullen et al., 2007)

Im EurOtop Manual (Pullen et al., 2007) wird zur Berechnung des Wellenüberlaufs die Freibordhöhe R_c als vertikale Distanz zwischen Ruhewasserspiegel (RWS) und dem höchsten Punkt des undurchlässigen Stützkörpers oder eines undurchlässigen Kronenbauwerks verwendet (vgl. Abb. 24). Die tatsächliche Kronenhöhe hat in dem Ansatz keinen Einfluss auf die deterministische Berechnung der mittleren Wellenüberlaufrate. Sie geht lediglich in die Ermittlung der Wahrscheinlichkeit des Wellenüberlaufs ein, auf die an dieser Stelle allerdings kein Bezug genommen wird.

Lioutas et al. (2012) untersuchten den Einfluss der Freiborddefinition auf den Wellenüberlauf in kleinmaßstäblichen Modellversuchen eines geschütteten Wellenbrechers. Es wurde die gemessene Wellenüberlaufrate in Abhängigkeit von dem anzusetzenden Freibord aufgetragen. Hierbei wird gezeigt, dass die Wellenüberlaufrate mit der Freiborddefinition des EurOtop Manuals (Pullen et al., 2007) überschätzt wird. Wenn stattdessen als Freibord die Lage des höchsten horizontalen Bauwerksabschnittes A_c, der Bauwerkskrone, gewählt wird, werden die Wellenüberlaufraten leicht unterschätzt. Stattdessen schlagen Lioutas et al. (2012) als anzusetzendes Freibord eine im Verhältnis zum eingebauten Material verringerte Kronenhöhe vor:

$$A_c^{'} = A_c - 0{,}9 \cdot D_{n50} \tag{3.9}$$

Die relevanten Gleichungen werden an dieser Stelle aus Gründen der Übersichtlichkeit in angepasster Schreibweise aufgeführt. Weil der Halligraustreifen kein Kronenbauwerk besitzt und unter Vernachlässigung von schrägem Wellenangriff, reduziert sich die Gleichung für die Wellenüberlaufrate auf die folgende Form:

$$\frac{q}{\sqrt{g \cdot H_{m0}^3}} = \frac{0{,}067}{\sqrt{\tan\alpha}} \gamma_b \cdot \xi_{m-1,0} \cdot \exp\left(-4{,}75 \frac{A_c^{'}}{\xi_{m-1,0} \cdot H_{m0} \cdot \gamma_b \cdot \gamma_f} \right) \tag{3.10}$$

Das Maximum ist dabei definiert als:

$$\frac{q}{\sqrt{g \cdot H_{m0}^3}} = 0{,}2 \cdot \exp\left(-2{,}6 \frac{A_c'}{H_{m0} \cdot \gamma_f \cdot \gamma_\beta}\right) \tag{3.11}$$

mit:

g	=	Erdbeschleunigung	[m/s²]
q	=	mittlere Wellenüberlaufrate	[m³/s · m]
A'_C	=	Modifizierte Materialfreibordhöhe	[m]
H_{m0}	=	signifikante Wellenhöhe	[m]
α	=	Böschungsneigung der Luv-Seite	[°]
$\xi_{m-1,0}$	=	$\tan\alpha/(H_{m0}/L_{m-1,0})^{1/2}$ Brecherparameter	[-]
γ_b	=	Empirischer Beiwert für den Einfluss einer Berme	[-]
γ_f	=	Empirischer Beiwert für den Einfluss der Böschungsraueit	[-]
γ_β		Empirischer Beiwert für den Einfluss der Wellenangriffsrichtung	[-]
γ_v		Empirischer Beiwert für den Einfluss einer Kronenmauer	[-]

Beim Kantenschutz der Halligen handelt es sich um ein zusammengesetztes Profil, dessen Steigung sich über die verschiedenen Bauwerksabschnitte Deckwerk, Überschlagssicherung und Raustreifen verändert. In die Bauwerksparameter fließen deshalb gemittelte Größen ein. Die Überschlagssicherung besitzt in der Regel eine Steigung, die flacher ist als das vom EurOtop Manual (Pullen et al., 2007) vorgegebene Kriterium für eine Berme ($1:m \leq 1:15$). Deshalb wird die Überschlagssicherung als Berme behandelt und geht über den Reduktionsfaktor γ_b in die Überlaufberechnung ein. Die charakteristische Steigung des Bauwerkes wird über die Gleichungen mit den Neigungen des Deckwerks und des Raustreifens berechnet. Sie trägt sowohl direkt mit $\tan\alpha$ als auch indirekt mit der Brecherkennzahl $\xi_{m-1,0}$ zur Berechnung der mittleren Wellenüberlaufrate bei.

Die Bauwerksrauheit wird mit dem Faktor γ_f berücksichtigt. Der Rauheitsfaktor für die PUR-verklebte Körnung des Halligraustreifens (38/58 mm) wird in Übereinstimmung mit den Untersuchungen von Gu (2007) und Oumeraci et al. (2010) zunächst mit $\gamma_f = 0{,}7$ abgeschätzt. Im EurOtop Manual (Pullen et al., 2007) wird beschrieben, dass sich der Rauheitsfaktor für Bauwerke

mit durchlässigem Kern weiter reduziert. Bei der Elastocoast®-Raustreifenvariante handelt es sich um ein vollständig durchlässiges Bauwerk, deswegen wird der Rauheitsfaktor auch hier auf $\gamma_f = 0{,}55$ reduziert. Dieser Wert steht im Einklang mit den Untersuchungen von Oumeraci et al. (2010), die einen unteren Grenzwert von $\gamma_f = 0{,}54$ für eine 15 cm starke Elastocoast®-Deckwerksschicht ermittelten. Für die Rauheit des Granit-Deckwerkes wird der Wert $\gamma_f = 0{,}9$ angesetzt (Pullen et al., 2007). Entsprechend der Bauwerksneigung, wird auch der Rauheitsbeiwert eines zusammengesetzten Bauwerksprofils über die verschiedenen Bauwerksabschnitte gemittelt:

$$\gamma_f = \frac{\sum_{i=1}^{n} \gamma_{f,i} \cdot L_i}{\sum_{i=1}^{n} L_i} \tag{3.12}$$

Der betrachtete Bauwerksausschnitt befindet sich hierbei zwischen den Punkten $0{,}25 \cdot R_{u2\%,glatt}$ unterhalb und $0{,}5 \cdot R_{u2\%,glatt}$ oberhalb des Ruhewasserspiegels. Die Wellenauflaufhöhe $R_{u2\%,glatt}$ wird für eine glatte aber ansonsten baugleiche Böschung mit $\gamma_f = 1{,}0$ berechnet.

Das Produkt der Reduktionsfaktoren für die Berme und die Oberflächenrauheit ($\gamma_b \cdot \gamma_f$) in Gleichung (3.10) sollte auf den minimalen Wert 0,4 beschränkt werden. Eine größere Reduktion wurde bisher nicht untersucht und ist dementsprechend nicht empfehlenswert (Pullen et al., 2007).

In der Berechnung des Wellenüberlaufs an einem Halligigel (Gl. (3.10)) wird die Freiborddefinition für ein durchlässiges Bauwerk nach Lioutas et al. (2012) verwendet. Der Höhenunterschied zwischen der Bauwerkskrone und dem Ruhewasserspiegel wird in dieser Definition um 90 % des nominalen Steindurchmessers reduziert. Für den Raustreifen wird stattdessen der Korndurchmesser bei 50 % Siebdurchgang verwendet. Wird die Korngrößenverteilung der physikalischen Modellversuche hochskaliert, beträgt dieser für das Schotterdeckwerk des Halligigels $D_{50} = 54{,}5$ mm.

Die mittlere Wellenüberlaufrate an einem durchlässigen Bauwerk wird während des Strömens über die Bauwerkskrone und die Binnenböschung verringert. Da bisher keine physikalischen Versuche unter instationärer Wellenbelastung an einem Raustreifenmodell durchgeführt wurden, wird die Reduktion nach dem von van Kester (2009) aufgestellten Ansatz berechnet. Im Vergleich zu den übrigen diskutierten Ansätzen scheint der Ansatz des dimensionslosen Parameters H^* als Quotient aus den einwirkenden Wellenparametern, der Wellenhöhe H und Wellenlänge L, sowie den beiden Bauwerksparametern, dem Freibord und der Kronenbreite, als physikalisch am plausibelsten.

Vereinfachend wird angenommen, dass nur das Wasser, das auch tatsächlich als Wellenüberlauf am Bauwerksende ankommt ($q_{e,over}$), auf die Hallig gelangt. Der infiltrierende Anteil des Wellenüberlaufs am Beginn der Bauwerkskrone ($q_{\inf} = q_{tot} - q_{e,over}$) wird vernachlässigt. Für den Fall, dass das Freibord negative Werte annimmt, ist der Ansatz nach van Kester (2009) nicht definiert. Hier wird angenommen, dass keine Infiltration stattfindet und der gesamte Wellenüberlauf das Bauwerk überströmt ($q_{e,over} = q_{tot}$). Die Wirkung des durchlässigen Raustreifens wird stattdessen im dimensionslosen Überfallbeiwert für den stationären Anteil des Überlaufs bei negativem Freibord berücksichtigt. Hierfür können in einem ersten Ansatz die Überfallbeiwerte der kleinskaligen physikalischen und numerischen Modellversuche (Kapitel 3.4 und 3.5) für die jeweilige Ausbaustufe in Abhängigkeit von der dimensionslosen Überfallhöhe $h_{ü} / w$ verwendet werden.

3.7.4 Bemessungsgleichungen für die Strömungsgrößen des Wellenüberlaufs

Die empirischen Gleichungen zur Berechnung der Strömungsgrößen des Wellenüberlaufs über ein Küstenschutzbauwerk wurden bisher nur für ein undurchlässiges Bauwerk unter Vernachlässigung von senkrecht zur Krone und Binnenböschung wirkenden Geschwindigkeitskomponenten hergeleitet. Die Strömung über die durchlässige Deckschicht des Raustreifens wird diese Voraussetzung nicht erfüllen, da das Wasser beim Überlaufen in das Bauwerk infiltrieren kann. Die mittlere Schichtdicke h und Überlaufgeschwindigkeit v stehen über die Kontinuitätsgleichung ($q = v \cdot h$) im Zusammenhang mit maximalen Werten des Wellenüberlaufs, die nur von 2 % der auflaufenden Wellen überschritten werden. Bei diesem maximalen Wellenüberlaufschwall kann angenommen werden, dass die Infiltration aufgrund des starken Impulses in horizontaler Richtung auf der Bauwerkskrone minimiert wird.

Diese Annahme wird auch von den Ansätzen zur Berechnung der mittleren Wellenüberlaufrate gestützt. Besonders deutlich wird der Zusammenhang im Ansatz nach Verhagen et al. (2004). Die nicht abgeminderte Wellenüberlaufrate geht direkt in den dimensionslosen Parameter Q_{tot}^{*} ein. Dieser bezieht den gesamten Wellenüberlauf am Kronenanfang q_{tot} auf die Kronenbreite B_c.

$$Q_{tot}^{*} = \frac{q_{tot}}{\sqrt{g B_c^{\,3}}} \tag{3.13}$$

Wenn sich der Wellenüberlauf am Beginn der Bauwerkskrone erhöht, wird auch der Parameter Q_{tot}^{*} erhöht und analog dazu der am Ende des Bauwerkes gemessene Wellenüberlauf $q_{e,over}$. Im Ansatz nach van Kester (2009) kann dieser Zusammenhang ebenfalls abgelesen werden.

Nach Gleichung (3.14) vergrößern eine maximale Wellenhöhe und –länge sowie ein minimales Freibord die überlaufende Wassermenge bzw. reduzieren die infiltrierende.

$$H^* = \frac{H_s \cdot L}{R_c \cdot G_c} \tag{3.14}$$

Der Parameter H^* enthält neben der dimensionslosen Freibordhöhe, dem Quotienten aus signifikanter Wellenhöhe H_s und Freibordhöhe R_c, auch das Verhältnis zwischen Wellenlänge L und Infiltrationslänge G_c. Wird H^* kleiner als ein empirisch ermittelter Grenzwert ($H_d^* = 26$) findet kein Wellenüberlauf über die binnenseitige Bauwerksböschung statt und das gesamte überlaufende Wasser wird in das Bauwerk infiltriert.

Diese Wellen- bzw. Bauwerksparameter entsprechen den Voraussetzungen für eine maximale Wellenüberlaufrate. Aus diesem Grund wird in der Bemessung der Halligraustreifen vereinfachend angenommen, dass die Strömungsgrößen des Wellenüberlaufs ausreichend durch die Gleichungen nach Schüttrumpf (2001) beschrieben werden, da sie die Maximalwerte des Wellenüberlaufs abbilden.

Besondere Vorsicht ist jedoch in der Wahl des Reibungsbeiwertes f, der in die Berechnung der Strömungsgrößen auf der Bauwerkskrone und auf der binnenseitigen Böschung eingeht, geboten. Zur Veranschaulichung wird an dieser Stelle noch einmal die Gleichung für die Entwicklung der Überlaufgeschwindigkeit über die Bauwerkskrone aufgeführt:

$$v_c(x_c) = v_c(x_c = 0)\exp\left(-\frac{x_c f}{2h_c}\right) \tag{3.15}$$

Die Geschwindigkeit am Anfang der Bauwerkskrone $v_c(x_c = 0)$ wird entlang der Krone abgemindert. Die Abminderung erfolgt exponentiell in Abhängigkeit von dem Reibungsbeiwert, der Fließlänge auf der Krone x_c und der Wasserüberdeckung h.

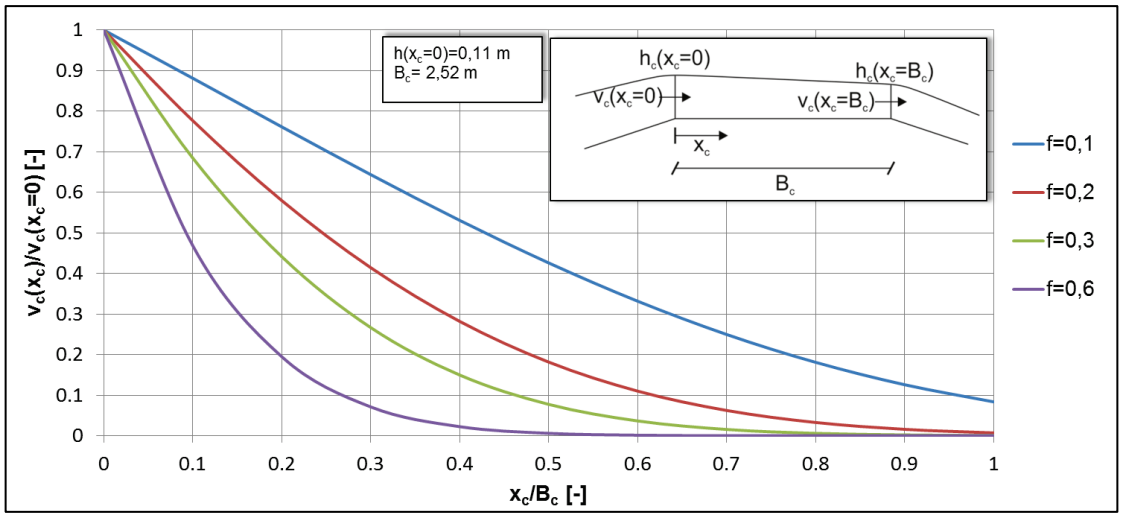


Abb. 25 Einfluss des Reibungsbeiwertes f auf die Überlaufgeschwindigkeit auf der Bauwerkskrone

Der Halligraustreifen besitzt eine raue Oberfläche, für die der Reibungsbeiwert mit der äquivalenten Sandrauheit ($k_s \approx 2 \cdot D_{90} = 2 \cdot 0{,}0751$) berechnet werden kann. Generell werden sich für hydraulisch raue Strömungen Reibungsbeiwerte zwischen $f = 0{,}1$ und $f = 0{,}6$ ergeben (van Gent, 1995). In Abb. 25 ist der Verlauf der Überlaufgeschwindigkeit über die Bauwerkskrone eines repräsentativen Raustreifenprofils für verschiedene Reibungsbeiwerte innerhalb dieser Bandbreite aufgetragen. Mit einer Kronenbreite von 2,52 m entspricht das gewählte Profil dem ersten Ausbauzustand eines Elastocoast®-Raustreifens. Bei dieser vergleichsweise großen Überlauflänge beeinflusst die Wahl des Reibungsbeiwertes die Geschwindigkeit am Ende der Krone stark. Für den dargestellten Fall wird die Überlaufgeschwindigkeit bei einem Reibungsbeiwert von $f = 0{,}2$ im Vergleich zu $f = 0{,}1$ um zusätzliche 92 % am Kronenende reduziert. Wird stattdessen ein Reibungsbeiwert von $f = 0{,}6$ verwendet, ist die Geschwindigkeit am Kronenende verschwindend gering.

Dementsprechend ist der Reibungsbeiwert besonders für die großen Kronenbreiten des ersten Ausbauzustandes mit Bedacht zu wählen. Erscheint der Reibungsbeiwert als zu groß, kann auf der sicheren Seite liegend der untere Grenzwert für eine hydraulisch raue Oberfläche mit $f = 0{,}1$ gewählt werden.

3.7.5 Bemessungsgleichung für die kritische Geschwindigkeit

Da für die Festlegung einer kritischen Geschwindigkeit konkrete Angaben zur Widerstandsfähigkeit des Halligbodens mit seinem typischen Bewuchs fehlen, wird als Bemessungsgrundlage die Gleichung zur Berechnung der kritischen Geschwindigkeit auf der binnenseitigen Böschung eines Grasdeiches herangezogen:

$$v_{krit} = f_G \cdot \frac{3{,}8}{(1 + 0{,}8 \cdot \lg t_s)} = 0{,}7 \cdot \frac{3{,}8}{(1 + 0{,}8 \cdot \lg 6)} = 1{,}64 \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}} \tag{3.16}$$

Mit dem Faktor f_G geht die zusätzliche Erosionsresistenz des Untergrundes durch Bewuchs in die Berechnungsgleichung ein. Der Bewuchs wird hierbei nur nach seiner Qualität beurteilt. Die Vegetation auf den Halligen und besonders an deren Kanten wird durch die häufigen Landunter Ereignisse und die resultierenden Sedimentfrachten jährlichen Veränderungen an der Oberfläche unterzogen. Aus diesem Grund wird in der Raustreifenbemessung der Wert $f_G = 0{,}7$ für einen schlechten Grasbewuchs angenommen.

Der Faktor t_s ist die Zeitspanne, in der Wellenüberlauf stattfindet. Die kritische Geschwindigkeit entwickelt sich antiproportional zum Logarithmus der Einwirkungsdauer. Das bedeutet, dass bei kurzzeitiger Beanspruchung ein Widerstand gegen größere Überlaufgeschwindigkeit besteht als bei dauerhafter Einwirkung. Da der Wellenüberlauf ein hochgradig instationärer Prozess ist und der exakte Zeitraum, in dem Wellenüberlauf stattfindet, schwierig zu erfassen ist, wird für die Raustreifen eine durchschnittliche Sturmdauer von 6 h angesetzt. Der Ansatz liegt somit auf der sicheren Seite und es ergibt sich daraus eine kritische Geschwindigkeit von 1,64 m/s für die Oberfläche der Halligen.

Wenn sich über der Oberfläche der Halligmarsch ein 40 cm tiefes Wasserpolster bildet ist die Hallig vor Erosion durch die Schwallströmung des Wellenüberlaufes geschützt. Über die topographischen Informationen der Halligen kann das Wasservolumen berechnet werden, das benötigt wird, um die Hallig bis auf 40 cm oberhalb des Geländeniveaus hinter dem Raustreifen einzustauen $\left(V\left(d_{OK,Hallig} = 0{,}4\ \mathrm{m}\right)\right)$. Hierfür können die größeren Halligen in sinnvolle Entwässerungsbereiche eingeteilt werden. Für die kleineren Halligen wird die gesamte Fläche der Hallig zur Volumenberechnung herangezogen. In einer ersten Näherung wird so davon ausgegangen, dass die gesamte Hallig eingestaut werden muss, um das Wasserpolster hinter dem Raustreifen aufzubauen. In der Realität ist die Halligoberfläche nicht homogen und zum Teil können sich auch schon kleinere Wasserbecken unmittelbar hinter dem Kantenschutz bilden, so dass eine Überdeckung bereits ab einem geringeren Wasservolumen auf der Hallig erreicht wird.

Das Wasserpolster wird durch das vom Wellenüberlauf und die Durchsickerung durch den Raustreifen auf die Hallig gelangende Wasser aufgebaut. Das Wasservolumen, das über 1 m Deckwerkslänge auf die Hallig gelangen muss, wird durch die Division des gesamten Wasservolumens durch die Länge des Raustreifens L_{RS} berechnet:

$$V' = \frac{V\left(d_{OK,Hallig} = 0{,}4\ \mathrm{m}\right)}{L_{RS}} \quad [\mathrm{m^3/m}] \tag{3.17}$$

Wird dieses Volumen durch die Wellenüberlaufrate und die Durchsickerungsrate geteilt, kann der Zeitraum ermittelt werden, in der die Halligmarsch dem Wellenüberlaufschwall ungeschützt ausgesetzt ist:

$$t\left(d_{krit}\right) = \frac{V'}{q_{e,over} + q_s} \quad [\mathrm{s}] \tag{3.18}$$

In diesem Ansatz wird zunächst angenommen, dass über alle Kantenabschnitte die gleiche Wassermenge auf die Hallig gelangt. In der Realität sind verschiedenste durchlässige und undurchlässige Raustreifenmodelle auf den Halligen verbaut, die mit ihren spezifischen Bauwerkseigenschaften unterschiedliche Zulaufraten ergeben. Des Weiteren resultieren aus den standortspezifischen Wellen- und Wasserstandsparametern unterschiedliche Überlaufraten für die jeweiligen Deckwerksabschnitte.

Der Ansatz wird realitätsnäher, wenn das Gesamtvolumen, das als Wasserpolster auf die Hallig gelangen muss, aus den spezifischen Duchfluss- und Überlaufraten der jeweiligen Deckwerksabschnitte zusammengesetzt wird. Diese werden über die entsprechende Deckwerkslänge integriert:

$$t\left(d_{krit}\right) = \frac{V\left(\mathrm{d_{OK,Hallig}} = 0{,}4\ \mathrm{m}\right)}{Q_{e,over} + Q_s} \quad [\mathrm{s}] \tag{3.19}$$

$$Q_{e,over} = \sum_{i=1}^{n} q_{e,over,i} \cdot L_i \tag{3.20}$$

$$Q_s = \sum_{i=1}^{n} q_{s,i} \cdot L_i \tag{3.21}$$

Mit:

$q_{e,over,i}$	Mittlere Wellenüberlaufrate am Küstenabschnitt i	[m³/(m·s)]
$q_{s,i}$	Durchflussrate am Küstenabschnitt i	[m³/(m·s)]
L_i	Länge des Küstenabschnittes i	[m]

Sobald sich ein Wasserpolster auf der Hallig ausbilden kann, ist die Halligmarsch dem Wellenüberlaufschwall lediglich während des Zeitraumes bis zum Erreichen der kritischen Überflutungstiefe ausgesetzt. Wenn diese Zeitspanne kürzer als die angesetzte Sturmdauer von 6 h

ist, kann die Halligmarsch während dieser verkürzten Einwirkungsdauer einer größeren Überlaufgeschwindigkeit Widerstand leisten. Dementsprechend kann die Geschwindigkeit, bei der die Oberfläche anfängt zu erodieren, modifiziert werden:

$$v_{krit} = \max\begin{cases} v_{krit}\left(t_s = 6h\right) \\ v_{krit}\left(t\left(d_{krit}\right)\right) \end{cases} \text{ [m/s]} \tag{3.22}$$

Das angepasste Erosionskriterium stimmt gut mit den Beobachtungen an den Halligkanten überein. Hier werden Schäden nicht zwangsläufig durch die höchsten Wasserstände verursacht, sondern vielmehr durch Wasserstände, die statistisch gesehen mehrmals in einem Jahr während der Winterstürme auftreten. Die Kombination aus Wasserstand und Welleneinwirkung auf der Halligmarsch ist entscheidend für die Erosion. Bei hohen Wasserständen wird entsprechend viel Wasser auf die Halligen transportiert, so dass sich schnell ein schützendes Wasserpolster ausbildet. Nach Gleichung (3.22) wird die kritische Überlaufgeschwindigkeit durch die verkürzte Einwirkungsdauer soweit erhöht, dass auch unter den intensivierten hydraulischen Einwirkungen kein Schaden zu erwarten ist und das Bauwerk als bemessen gilt. Der gesamte Bemessungsablauf ist für die kritische Geschwindigkeit noch einmal übersichtlich in Abb. 26 zusammengefasst.

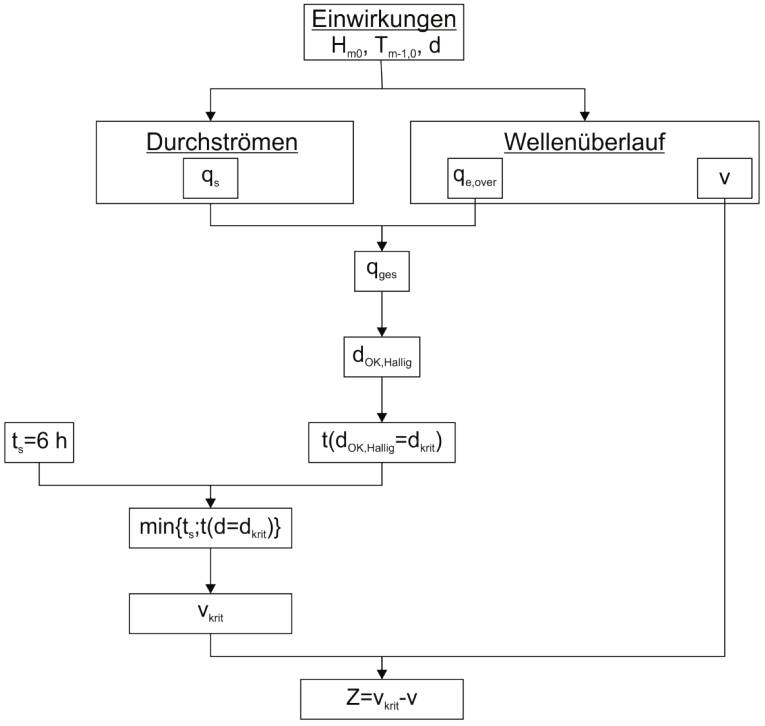


Abb. 26 Bemessungsablauf für den Halligraustreifen

Am Schluss sei noch angemerkt, dass die Wellenüberlaufrate sowie die Durchflussrate durch den Raustreifen für diskrete Wasserstände und Wellenrandbedingungen berechnet werden.

Bei der Vereinfachung wird angenommen, dass sich noch kein Wasser auf der Hallig befindet. Würde die kontinuierliche Befüllung der Hallig über steigende Wasserstände berücksichtigt, müsste eine Wasserstandsganglinie für Sturmereignisse verwendet werden. Der Ansatz von diskreten Wasserständen liegt damit aber auf der sicheren Seite.

3.8 Beispielhafte Bemessung eines Raustreifenprofils auf der Hallig Langeneß

3.8.1 Vorstellung des Bauwerks

In diesem Kapitel soll eine Bemessung an einem konkreten Küstenschutzbauwerk auf der Hallig Langeneß durchgeführt werden, um die vorgestellten Bemessungsgleichungen an einem konkreten Beispiel anzuwenden und deren Aussagekraft kritisch zu beleuchten. Die Hallig erstreckt sich zwischen den großen Prielen Norder- und Süderaue. Für die Bemessung wurde das Deckwerksprofil an der Station 7+037 ausgewählt, das am nord-westlichen Ufer der Hallig liegt (vgl. Abb. 27).

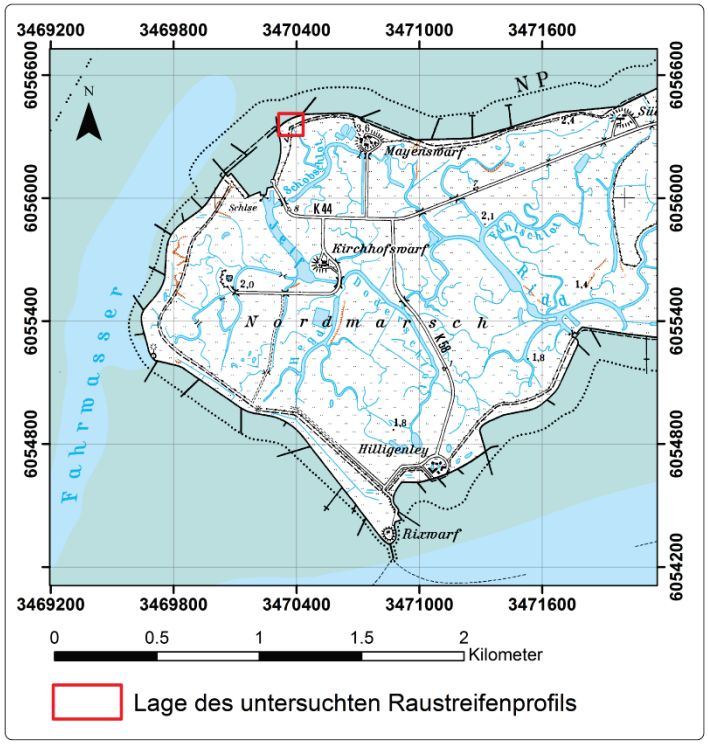


Abb. 27 Lage des untersuchten Raustreifenprofils auf der Hallig Langeneß

In Abb. 28 ist ein Querschnitt durch das Küstenschutzbauwerk dargestellt. Die Kante des Küstenprofils ist mit einem massiven Granitdeckwerk geschützt. An das Granitdeckwerk schließt eine 3 m breite Überschlagssicherung an. Der Raustreifen besitzt auf seiner wasserseitigen Böschung eine Neigung von 1:3 und auf der Binnenseite die Steigung 1:2. Er wurde nach dem

Baukastenprinzip aus einer PUR-verklebten Schotterdeckschicht über einem durchlässigen Schotterkern hergestellt. Die Oberkante des Halligigels befindet sich auf dem Niveau NHN+2,50 m. Dies entspricht dem ersten Ausbauzustand. Die Erhöhung des Raustreifens auf das Niveau NHN+2,90 m wurde für das Jahr 2013 geplant. Die Höhenlage des anschließenden Geländes wird mit NHN+2,01 m angegeben.

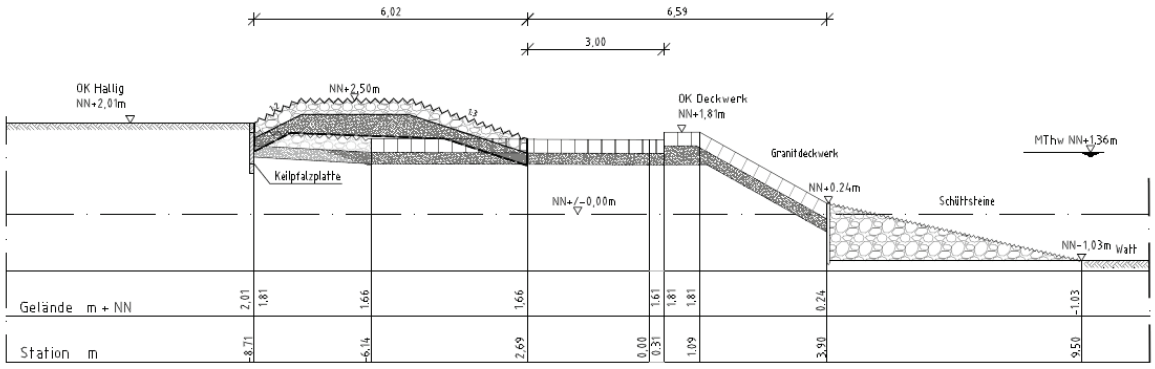


Abb. 28 Deckwerksprofil an Station 7+037 auf der Hallig Langeneß (LKN-SH, 2011b)

3.8.2 Eingangsparameter

Da nicht vor allen Bereichen der Halligen Messungen des Seegangs vorliegen, wird für die Eingangsparameter auf das in Kapitel 2 beschriebene Seegangsmodell für das Gebiet der nordfriesischen Inseln und Halligen zurückgegriffen. Das Seegangsmodell basiert auf einer stationären Berechnung des Wasserstandes. Im Bereich der Hallig Langeneß wird ein verfeinertes Raster bei einer Gitterweite von 50 m x 50 m in das Basisgitter eingebettet (Nesting). Die Randbedingungen des eingebetteten Rasters werden automatisch vom Basisgitter eingelesen.

Tab. 7 Eingangsrandbedingungen für das Seegangsmodell

Wasserstand		RWS=1,2-2,9 m.ü.NN
Windfeld		
	Windgeschwindigkeit	W=26 m/s
	Windrichtung	θ=300°
Wellenparameter		
	Peakperiode	Tp=11 s
	Signifikante Wellenhöhe	Hs=4,8 m

Für die Eingangsparameter der Bemessung des Raustreifens auf der Hallig Langeneß wurden Berechnungen mit stationären Wasserständen im Wattenmeer zwischen NHN+1,2 m und NHN+2,9 m ausgewertet. Das mittlere Tidehochwasser unmittelbar vor dem Raustreifen wird mit

NHN+1,36 m angegeben. Der höchste untersuchte Wasserstand von NHN+2,9 m korrespondiert für Langeneß mit 14 gemessenen Überflutungen der Hallig im Zeitraum von 1997-2006 (LKN-SH, 2011a). Durchschnittlich entspricht dies einer Häufigkeit von 1,4 Überflutungen pro Jahr. Für die Hallig Langeneß wird zur Bemessung der Warftprofile im Westen ein Wasserstand bei einer Jährlichkeit von 20 a mit HW_{20}=4,4 m angegeben. Bei diesem Wasserstand ist die Halligkante bereits mit einem Wasserpolster von 2,4 m bedeckt und eine Schädigung durch Erosion kann für den Wasserstand ausgeschlossen werden.

Im Bereich der Halligen ergeben sich die höchsten Wellen, wenn der Wind aus westlicher bis nord-westlicher Richtung ungedämpfte Wellen über die Priele Norder- und Süderaue in das nordfriesische Wattenmeer einlaufen lässt.

Als Eingangsrandbedingung sind an den Modellrändern eine signifikante Wellenhöhe von Hs=4,8 m und eine Peakperiode von Tp=11 s vorgegeben. Beispielhaft sind in Abb. 29 die Wellenhöhen und Perioden für den Ruhewasserspiegel RWS=2,6 m ü. NN und eine Windgeschwindigkeit von W=26 m/s aus der Richtung θ=300° dargestellt. Diese Windangriffsrichtung ergab für den untersuchten Deckwerksabschnitt die größten Belastungen. Aufgrund der Auflösung des Berechnungsgitters können die Wellenparameter nicht direkt am Bauwerksfuß ermittelt werden. Stattdessen werden die signifikante Wellenhöhe (Hs) und die mittlere Wellenperiode (Tm) im Abstand von 100 m vor dem Deckwerk ausgelesen. Bei einem Rechengitter von 50 m x 50 m wird so garantiert, dass nicht die tiefenabhängigen Wellenparameter des hohen Ufers erfasst werden, sondern die Wattflächen vor dem Deckwerk.

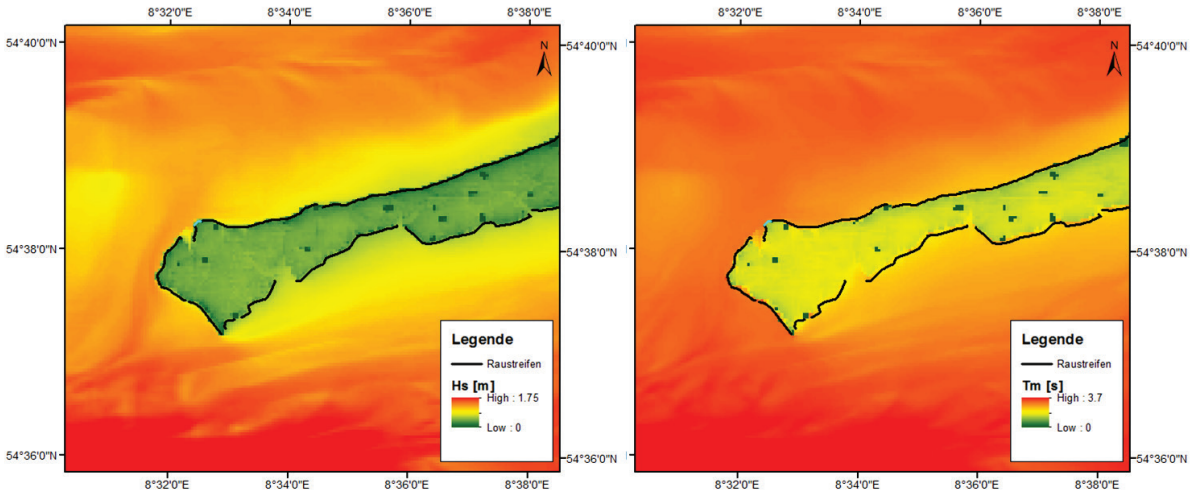


Abb. 29 Hs (links) und Tm (rechts) für NHN+2,6 m, θ=300° und U=26 m/s

3.8.3 Bemessung des Raustreifenprofils

Im Folgenden wird nicht nur das bereits vorhandene Raustreifenprofil mit der Kronenhöhe NHN+2,5 m (Igel 1) berechnet, sondern auch vergleichend eine Kappenerhöhung auf NHN+2,7 m

(Igel 2) sowie NHN+2,9 m (Igel 3 B1). Die zuletzt genannte Höhe entspricht dem zweiten Ausbauzustand. Außerdem wird die qualitative Auswirkung einer Bauwerksverbreiterung um 0,48 m (Igel 3 B2) und 0,98 m (Igel 3 B3) berechnet. Tab. 8 gibt eine Übersicht über die Geometrie der berechneten Raustreifenvarianten.

Tab. 8 Geometriedaten der untersuchten Raustreifenvarianten

Variante	Höhe	Kronenbreite B	Infiltrationslänge G_c
Igel 1	NHN+2,5 m	2,52 m	3,5 m
Igel 2	NHN+2,7 m	1,52 m	2,9 m
Igel 3 B1	NHN+2,9 m	0,52 m	2,3 m
Igel 3 B2	NHN+2,9 m	1 m	2,78 m
Igel 3 B3	NHN+2,9 m	1,5 m	3,28 m

Zunächst soll überprüft werden, ob überhaupt eine Druckschlagbelastung auf die Halligmarsch wirken kann und wenn dem so ist, ob diese die kritische Druckschlagspannung überschreitet. Hierbei werden drei charakteristische Punkte des Profils als mögliche Punkte des Wellenbrechens untersucht. Es wird die Fallparabel beim Wellenbrechen am Deckwerksfuß, am Fuß des Halligigels und am Beginn der Raustreifenkrone für den ersten Ausbauzustand des Raustreifens (NHN+2,5 m) berechnet und mit der Lage der Halligmarsch verglichen. Für den Anfang der Raustreifenkrone ist erst ab einem Wasserstand von NHN+3,8 m das Aufschlagen der Brecherzunge auf die Hallig möglich. Die brechende Welle erreicht für den Wasserstand oberhalb der Bauwerkskrone eine Wellenhöhe von 1,3 m und schlägt nach der Gleichung (3.23) in einer Distanz von 3,6 m auf der Höhe der Hallig auf:

$$y = \frac{x^2}{2y} \tag{3.23}$$

Der Halligboden steht bereits 3,5 m hinter dem Beginn der Bauwerkskrone an. Da jedoch ein Wasserstand von 3,8 m ü. NN einen Überstau von 1,3 m oberhalb des vorhandenen Raustreifenprofils bedeutet und dies einen entsprechenden Einstau der Hallig verursacht, kann ein Schaden durch Druckschlag ausgeschlossen werden.

Die Ergebnisse der Wellenüberlaufberechnungen und der Berechnung der Sickerrate bei verschiedenen Wassertiefen sind in Abb. 30 für die Bauwerksvarianten dargestellt. Der größte Wellenüberlauf ist für den Raustreifen mit der niedrigsten Kronenhöhe zu erwarten. Ab einem Wasserstand von NHN+2,5 m wird der Raustreifen der ersten Ausbauvariante überströmt und ab einem Wasserstand von NHN+2,7 m das zweite Raustreifenprofil. Der Wellenüberlauf setzt sich dann aus einem stationären und einem instationären Anteil zusammen. Der stationäre Überfall

wurde mit dem Überfallbeiwert $\mu = 0{,}42$ berechnet. Dies entspricht dem gemessenen Überfallbeiwert der kleinskaligen Modellversuche am Messquerschnitt 3 für eine relative Überfallhöhe von $w / h_{ü} = 0{,}85$.

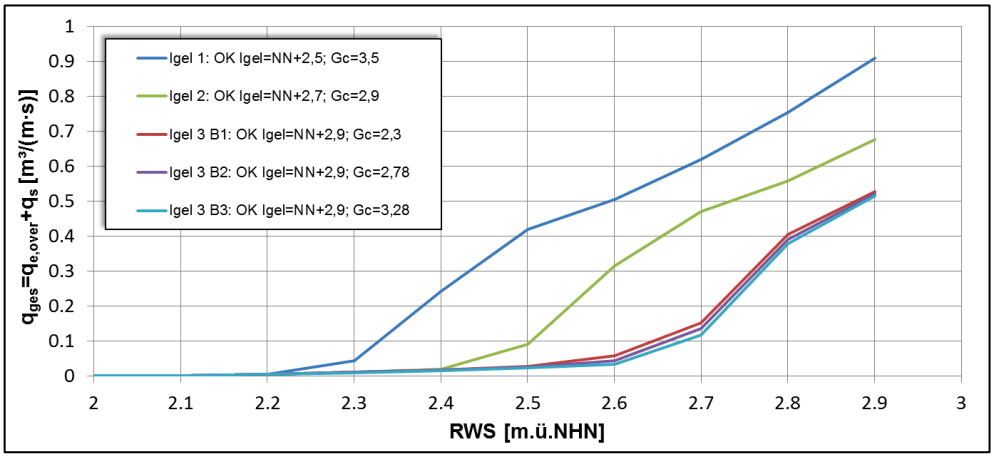


Abb. 30 Wellenüberlauf- und Sickerrate am Ende des Raustreifens

Der Wellenüberlauf der übrigen Varianten wird aufgrund des hohen Freibords stark verringert (vgl. Abb. 30 und Abb. 31). Für die Varianten Igel 2 und Igel 3 B1 gelangt erst ab einem Ruhewasserspiegel von 2,5 m ü. NN Wasser durch Wellenüberlauf auf die Hallig. Das zuströmende Wasser wird dann allein durch die Durchsickerung des porösen Elastocoast®-Raustreifens gebildet. Wenn die Kronenbreite bei einer Kronenhöhe von NHN+2,9 m weiter vergrößert wird (Igel 3 B2 und Igel 3 B3), wird der Wellenüberlaufschwall so stark infiltriert, dass Überlauf am Bauwerksende erst ab einem Ruhewasserspiegel von 2,6 m ü. NN zu erwarten ist (vgl. Abb. 31). Mit zunehmendem Wasserspiegel und dementsprechend zunehmender Wellenbelastung werden die Unterschiede in der Wellenüberlaufrate der Raustreifenvarianten Igel 3 B1 bis B3 geringer und folglich auch der reduzierende Einfluss einer größeren Infiltrationslänge (vgl. Abb. 31).

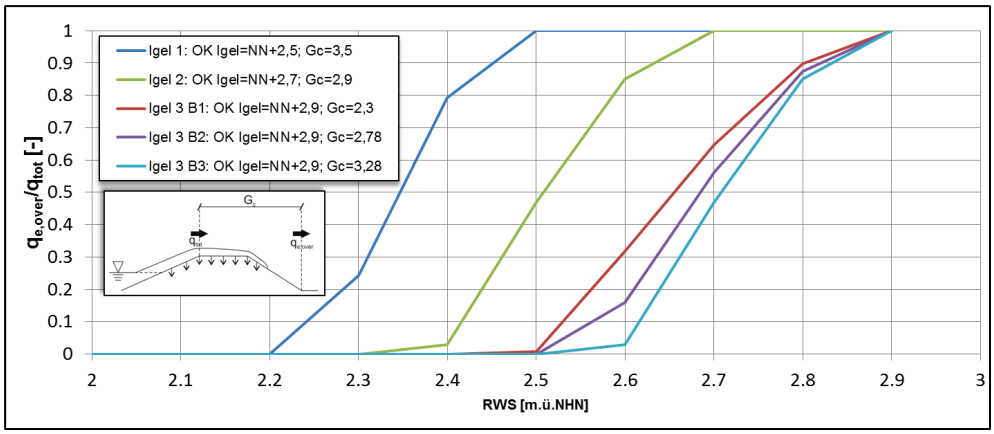


Abb. 31 Reduktion des Wellenüberlaufs

Die kritische Geschwindigkeit für den Erosionsbeginn bei einer Einwirkungsdauer von 6 h beträgt 1,64 m/s (vgl. Gleichung (3.16)). In Abb. 32 sind die Geschwindigkeiten am Beginn der Halligmarsch für die untersuchten Wasserspiegellagen und Bauwerksvarianten aufgetragen. Es wird lediglich die instationäre Schwallströmung des Wellenüberlaufs berechnet. Die nahezu stationäre Geschwindigkeit beim Überlaufen des Wassers für negatives Freibord kann über eine Betrachtung der Energielinie gelöst werden. Da dieser Zustand jedoch nicht die größte Belastung der Halligkante darstellt, wird er an dieser Stelle vernachlässigt.

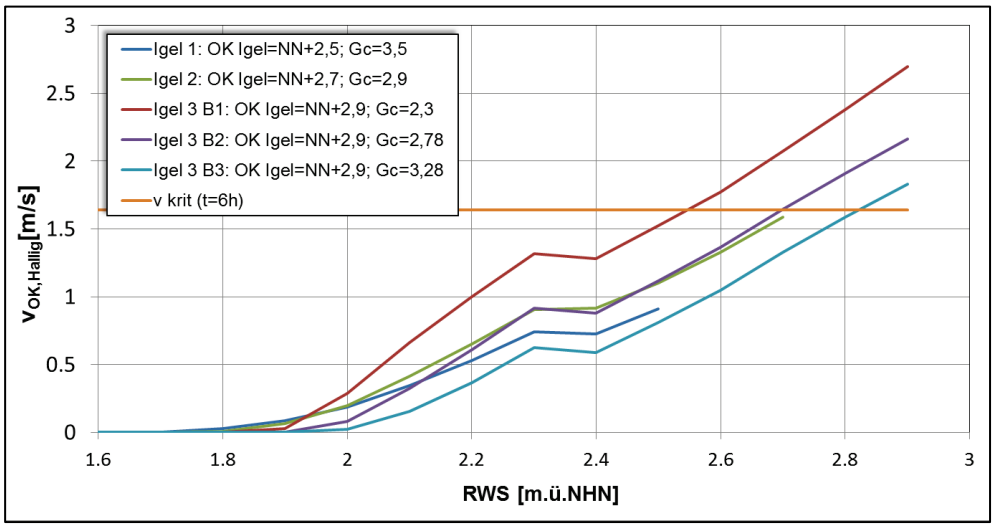


Abb. 32 Geschwindigkeit des Wellenüberlaufschwalls am Beginn der Halligmarsch für verschiedene Bauwerkskonfigurationen

Der diskontinuierliche Verlauf der Strömungsgeschwindigkeiten kann mit der Mittelung des Rauheitskoeffizienten der Bauwerksböschung γ_f begründet werden. Ab einer Wasserspiegellage von NN +2,4 m befindet sich das Deckwerk mehr als ein Viertel der Wellenauflaufhöhe eines baugleichen, glatten Bauwerkes unterhalb des Ruhewasserspiegels

($H_{DW} \leq RWS - 0{,}25R_{u,glatt}$). Ab diesem Punkt hat die geringere Deckwerksrauheit keinen Einfluss mehr auf die gemittelte Rauheit des gesamten Bauwerkes und der Rauheitskoeffizient entspricht dem des Raustreifens ($\gamma_f = \gamma_{RS} = 0{,}55$).

Beim Vergleich der Geschwindigkeiten fällt auf, dass die höchsten Schwallgeschwindigkeiten in den Varianten Igel 3 B1 und Igel 3 B2 erreicht werden, obwohl am Beginn der Bauwerkskrone aufgrund der größeren Bauwerkshöhe geringere Auflaufgeschwindigkeiten berechnet werden (Tab. 9). Dies liegt zum einen darin begründet, dass die Geschwindigkeit ab dem höher gelegenen Kronenende auf der binnenseitigen Böschung zunimmt. Für die Variante Igel 3 B1 wird die Geschwindigkeit bei der kurzen Kronenbreite von 0,52 m außerdem vergleichsweise wenig durch Oberflächenreibung entlang der Überlaufstrecke reduziert. Der Reibungskoeffizient wird nach Gleichung (3.24) berechnet und befindet sich für die untersuchten Wellen- und Wasserstandsrandbedingungen im Bereich $f = 0{,}26 - 0{,}18$. Er ergibt sich in Abhängigkeit von der relativen Wellenamplitude zu:

$$f = 0{,}4\left(\frac{A_b}{k_s}\right)^{-0{,}75} \tag{3.24}$$

Mit:

A_b Relative Wellenamplitude $A_b = \dfrac{A}{\sinh kh}$ [m]

k_s Äquivalente Sandrauheit $k_s \approx 2 \cdot D_{90}$ [m]

Daraus resultiert, dass alle drei Varianten mit einer Kronenhöhe von NN +2,9 m die kritische Geschwindigkeit für ein 6-stündiges Sturmereignis überschreiten. Um beurteilen zu können, ob der Deckwerksabschnitt dennoch bemessen ist, wird die Überflutungscharakteristik des Deckwerksabschnittes untersucht.

Tab. 9 Schwallgeschwindigkeit an charakteristischen Punkten des Bauwerkes (RWS=NHN+2,4 m; f=0,2)

Variante	v_A [m/s]	$v_{c(xc=B)}$ [m/s]	$v_{OK,Hallig}$ [m/s]
Igel 1	4,94	0,13	0,73
Igel 2	4,44	0,29	0,91
Igel 3 B1	3,88	1,13	1,28
Igel 3 B2	3,88	0,36	0,88
Igel 3 B3	3,88	0,11	0,59

Die Hallig Langeneß ist nicht an jedem Deckwerksabschnitt gleich hohen Wellenbelastungen ausgesetzt. Dieser Umstand wurde in den eingesetzten Küstenschutzmaßnahmen berücksichtigt. Sind am exponierten westlichen Ufer vor allem massive Deckwerke eingebaut, basiert der Küstenschutz am östlichen Ende der Hallig hauptsächlich auf ausgedehnten Lahnungsfeldern. Um die Küstenschutzmaßnahmen des jeweiligen Abschnittes sinnvoll bemessen zu können, wird die Hallig in Entwässerungsgebiete unterteilt und die Deckwerke dem entsprechenden Entwässerungsgebiet zugeordnet. Die insgesamt sechs Teilgebiete wurden auf Grundlage von DGM1-Daten, die in ein Raster mit der Auflösung 10 m x 10 m konvertiert wurden, ermittelt. Hierzu wurde die jeweilige Abflussrichtung einer jeden Zelle in dem Raster mit Hilfe der Software ArcGIS ausgewertet.

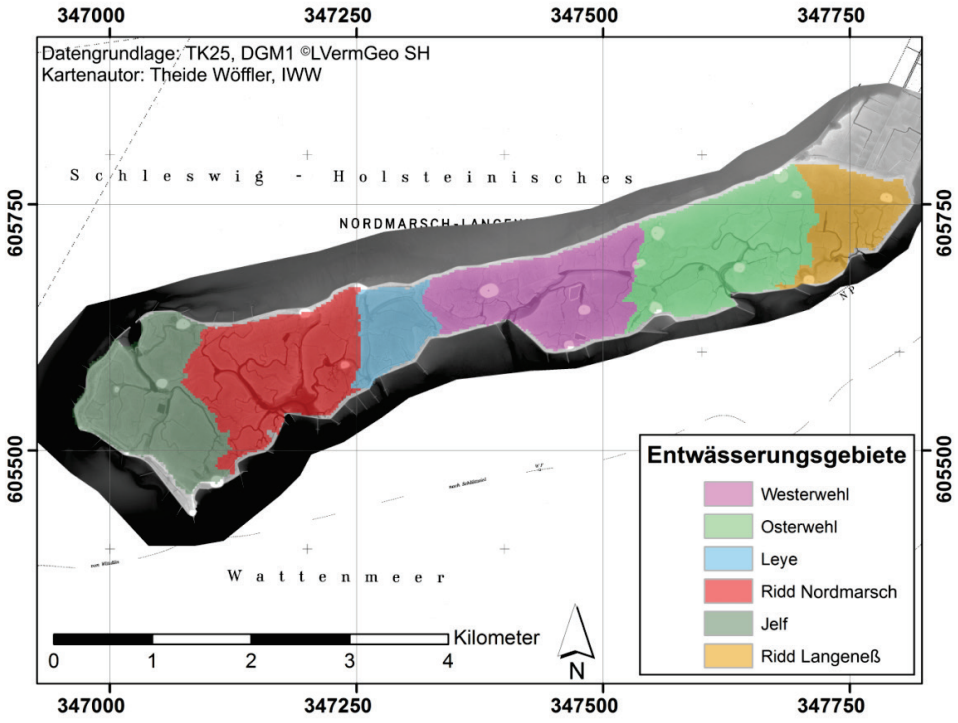


Abb. 33 Entwässerungsgebiete der Hallig Langeneß

Der untersuchte Raustreifenabschnitt kann dem westlichen Entwässerungsgebiet der Sieltoranlage Jelf zugeordnet werden (vgl. Abb. 33). Das Entwässerungsgebiet umfasst eine Fläche von ca. 165 ha. Das Wasservolumen, das in das Gebiet fließen muss, damit ein Wasserpolster von 0,4 m ausgebildet werden kann, wird auf Grundlage des DGM1berechnet. Für das Wasserpolster muss der Wasserstand auf der Hallig die Höhenlage NHN+2,41 m erreichen (vgl. Abb. 28). In Tab. 10 sind die Volumina zusammengefasst, die für die angegebenen Überflutungstiefen auf die Hallig gelangen müssen. Für ein Wasserpolster von 40 cm werden insgesamt $1{,}554 \cdot 10^6$ m³ Wasser entweder durch Zustrom durch den porösen Halligigel oder als Wellenüberlauf benötigt. Die verbaute Deckwerkslänge im Entwässerungsgebiet beträgt 3840,2 m.

Tab. 10 Wasservolumina auf der Hallig bei Wasserständen von 0,1-0,4 m oberhalb der Halligkante

Wasserstand	V [m³]	dV [m³]	V‘ [m³/m]	dV(1m) [m³/m]
0,1 m	$1{,}075 \cdot 10^6$	$1{,}075 \cdot 10^6$	280,0	280,1
0,2 m	$1{,}233 \cdot 10^6$	$0{,}158 \cdot 10^6$	321,1	41,1
0,3 m	$1{,}393 \cdot 10^6$	$0{,}160 \cdot 10^6$	362,7	41,6
0,4 m	$1{,}554 \cdot 10^6$	$0{,}161 \cdot 10^6$	404,5	41,9

Obwohl im untersuchten Entwässerungsgebiet ebenfalls Schüttsteindeckwerke mit Betonvermörtelung oder Asphaltvermörtelung eingesetzt werden, wird im Folgenden angenommen, dass über die gesamte Deckwerkslänge ähnliche Wellenüberlauf- und Durchsickerungsraten erreicht werden. Eine Untersuchung der weiteren Deckwerksabschnitte würde den Rahmen dieser Arbeit sprengen, ist aber innerhalb einer detaillierteren Bemessung problemlos möglich. Für die übrigen Deckwerksabschnitte ergeben sich zum einen andere Wellenparameter und zum anderen aufgrund der fehlenden Infiltration sowie anderer Oberflächenrauheit unterschiedliche Wellenüberlaufraten. Die Durchströmung entfällt bei der undurchlässigen Beton- bzw. Asphaltvermörtelung.

Zur Berechnung der Einwirkungszeit bis das Wasserpolster aufgebaut wurde, wird dementsprechend das Volumen je Meter Bauwerkslänge (V‘=404,5 m³/m) herangezogen. Um die Durchsickerung, die durch den Druckgradienten zwischen der Luv- und Lee-Seite getrieben ist, realitätsnah darzustellen, wird diese schrittweise bei gleichbleibendem Wasserstand vor dem Halligigel in Intervallen von 10 cm Wasserüberdeckung auf der Hallig berechnet. Aus der Sickerrate und der mittleren Wellenüberlaufrate wird die Zulaufrate ermittelt. Die Einwirkzeit ergibt sich durch die Division des benötigten Zulaufvolumens je Meter mit der Zulaufrate. Die Einwirkzeit fließt dann in die Berechnung der kritischen Geschwindigkeit ein.

Tab. 11 Bemessung der Bauwerksvarianten Igel 3 B1-B3

Variante	H [m.ü.NN]	$v_{OK,Hallig}$ [m/s]	t (d=0,4) [h]	v_{krit} (d=0,4) [m/s]	Bemessen ?
Igel 3 B1	2,6	1,78	1,73	2,08	Ja
	2,7	2,08	0,67	2,93	Ja
	2,8	2,38	0,26	4,74	Ja
	2,9	2,70	0,20	5,68	Ja
Igel 3 B2	2,7	1,65	0,74	2,79	Ja
	2,8	1,91	0,27	4,64	Ja
	2,9	2,17	0,20	5,63	Ja
Igel 3 B3	2,9	1,83	0,21	5,59	Ja

Die Resultate der Bemessung der untersuchten Raustreifenvarianten sind in Tab. 11 zusammengefasst. Die kritische Geschwindigkeit für Erosionsbeginn wurde durch die verringerte Einwirkzeit bis zur Ausbildung des schützenden Wasserpolsters für alle Bauwerksvarianten soweit erhöht, dass das Bemessungskriterium erfüllt ist.

3.8.4 Ergebnisdiskussion

Die Berechnung des Druckschlags, des Wellenüberlaufs und der Befüllung der Hallig ergibt, dass alle Profilvariationen für die untersuchten hydraulischen Belastungen bemessen sind. Im Fall der Varianten Igel 1 und Igel 2 wurde die kritische Geschwindigkeit zum Erosionsbeginn bei einem 6-stündigen Sturmereignis nicht erreicht. Die Varianten Igel 3 B1-B3 überschreiten am Bauwerksende diese Geschwindigkeit. Da sich aber das schützende Wasserpolster von 0,4 m innerhalb der Sturmdauer ausbilden kann, wird die Einwirkdauer des Wellenüberlaufschwalls auf die Halligmarsch herabgesetzt. Dementsprechend erhöht sich die kritische Geschwindigkeit für Erosion hinter dem Bauwerk.

Die Ergebnisse der Bemessung nach den vorhandenen Formeln lassen darauf schließen, dass für den PUR-verklebten Halligigel eine niedrigere Raustreifenkonstruktion von Vorteil wäre. Zum einen gelangt durch das Überströmen des Raustreifens und den erhöhten Wellenüberlauf bei niedrigeren Wasserständen mehr Wasser auf die Hallig und zum anderen wird die Schwallgeschwindigkeit des Wellenüberlaufs durch die große Kronenbreite der niedrigeren Raustreifenkonstruktion herabgesetzt. Die Schlussfolgerung, ein niedrigerer Halligigel sei von Vorteil, sollte jedoch beispielsweise mit physikalischen oder numerischen Modellversuchen unter instationärer Wellenbelastung noch weitergehend überprüft werden. An dieser Stelle sei angemerkt, dass die Entscheidung für eine niedrigere Konstruktion auch stark von der für die Halligbewohner und für die auf den Halligen betriebene Landwirtschaft akzeptablen Überflutungshäufigkeit

abhängt. Außerdem ist zu berücksichtigen, dass der Raustreifen als Wellenbrecher vor den weiter landeinwärts gelegenen Warften dient. Die an die Warften gelangende Wellenenergie wird durch eine höhere Raustreifenkonstruktion reduziert.

In den vorgestellten Berechnungen wurde angenommen, dass nur der durch das durchlässige Bauwerk reduzierte Wellenüberlauf auf die Hallig gelangt. Auch Wellen, die auf der durchlässigen Bauwerksböschung auflaufen aber die Krone nicht überschreiten, werden durch den porösen Halligigel Wasser auf die Hallig tragen. Dieses zusätzliche Wasservolumen ist innerhalb der vorgestellten Bemessung noch nicht quantifiziert. Es trägt neben dem direkt durch den Wellenüberlauf auf die Hallig gelangenden Wasser zur Ausbildung des schützenden Wasserpolsters bei.

Eine weitere große Unsicherheit in der Bemessung des PUR-verklebten Raustreifens ist die genaue Bestimmung der Wellenüberlaufgeschwindigkeit über das durchlässige Bauwerk. Besonders auf der binnenseitigen Böschung ist mit Ungenauigkeiten zu rechnen. Hier erfährt der Überlaufschwall nach den vorhandenen Bemessungsformeln eine zusätzliche Beschleunigung. Durch die abwärtsgerichtete Gewichtskraft des Überlaufschwalls wird die Strömung auch eine bedeutende Komponente senkrecht zur Bauwerksböschung besitzen, die zu einer Infiltration in das Bauwerk und somit weitergehenden Reduktion der Überlaufgeschwindigkeit führt. In der Berechnung der Fließgeschwindigkeiten ist der Einfluss einer breiten Bauwerkskrone deutlich zu erkennen. Eine Verbreiterung des Raustreifens sollte allerdings vermieden werden, damit keine zusätzliche Fläche an den Halligkanten verbaut wird.

Weil der größte Anteil des Wassers durch den Wellenüberlauf auf die Hallig gelangt, sollte die Erhöhung des Bauwerkes erst durchgeführt werden, wenn die Wellenüberlauf- und Sickerrate so groß ist, dass auch bei größerer Kronenhöhe die ausreichende Befüllung der Hallig gewährleistet ist. Der Volumenstrom auf die Hallig wurde im Rahmen der beispielhaften Bemessung eines Elastocoast®-Raustreifens als konstant über die gesamte Küstenlänge angenommen. Die weitergehende Berechnung der Zustromrate an den übrigen Bauwerksabschnitten ermöglicht eine detailliertere Abschätzung des Einstaus der Hallig.

4 Untersuchungen zur Erhöhung der Sedimentationsraten auf den Halligflächen

4.1 Allgemein

Untersuchungen innerhalb der Forschungsprojekte „SAHall II“ und „Zukunft Hallig“ des Geowissenschaftlichen Zentrums der Georg-August-Universität Göttingen haben ergeben, dass die beiden flächengrößten Halligen, Langeneß und Hooge, in Bezug auf den am Pegel Wyk gemessenen Anstieg des mittleren Tidehochwassers zu niedrige Sedimentauswachsraten aufweisen. Auf Grund dieses Sedimentdefizits liegen die zentralen Bereiche der beiden Halligen unterhalb der Höhe des MThw. Diese Tatsache lässt die Annahme zu, dass vor den Zeiten der Prielverbauungen der Sedimenttransport in die zentralen Bereiche der Halligen über die unverbauten Priele stattgefunden hat.

Da im Rahmen des KFKI/BMBF-Projektes ZukunftHallig nachhaltige Küstenschutz- und Bewirtschaftungsstrategien zu entwickeln sind, sollen Versuche durchgeführt werden, die Sedimentationsraten in den zentralen Halliggebieten wieder zu erhöhen.

Zur Durchführung dieser Untersuchungen ist die folgende Vorgehensweise entwickelt worden:

Für eine erste Einschätzung der Strömungsverhältnisse am geöffneten Sieltor Osterwehl werden hydraulische Berechnungen auf Grundlage des DGM1-Datensatzes durchgeführt. Da diese Berechnungen jedoch nur stationär gleichförmige Strömungsverhältnisse ergeben, wird zusätzlich ein hochaufgelöstes numerisches Strömungsmodell für das Untersuchungsgebiet aufgebaut. Diese Simulationsergebnisse müssen durch Messungen vor Ort für Flut- und Ebbebedingungen verifiziert werden.

Werden die numerischen Ergebnisse auf der Grundlage der in-situ-Messungen bestätigt und es sind keine Gefährdungen der benachbarten Bauelemente sowie des Sieltores zu erwarten, können in einem nächsten Schritt durch Modellrechnungen die Strömungsverhältnisse unter Springtidebedingungen ermittelt werden. Diese müssen wiederum durch Messungen vor Ort verifiziert werden.

Zeigen auch diese Untersuchungen eine Bestätigung der numerischen Simulationen und es besteht weiterhin keine Gefährdung für die betroffenen Bauwerke, können die Strömungsverhältnisse unter Sturmflutbedingungen simuliert werden und zur Abschätzung möglicher Gefahren unter diesen Bedingungen dienen.

4.2 Situation an der Sieltoranlage Osterwehl

Halligsiele sind Hochwasserschutzbauwerke, die zum einen ein Eindringen von Meerwasser bei Hochwasser über die Priele verhindern und zum anderen den Abfluss von Niederschlag und nach Überflutungen ermöglichen. Diese Entwässerungssiele befinden sich am Kreuzpunkt des natürlichen Halligpriels und des Sommerdeichs. Im Falle von Kantenfluten und höher auflaufenden Fluten werden die Sieltore durch den Wasserdruck geschlossen, so dass die Hallig bei Landunter nur durch Wellenüberlauf und Überströmen an den Deckerwerken überflutet wird, der Abfluss hingegen aber auch über die Sielzüge stattfinden kann (Petersen, 1981). Die Sieltoranlage Osterwehl ist an der Südkante der Hallig Langeneß nahe der Peterswarft gelegen (Abb. 34).

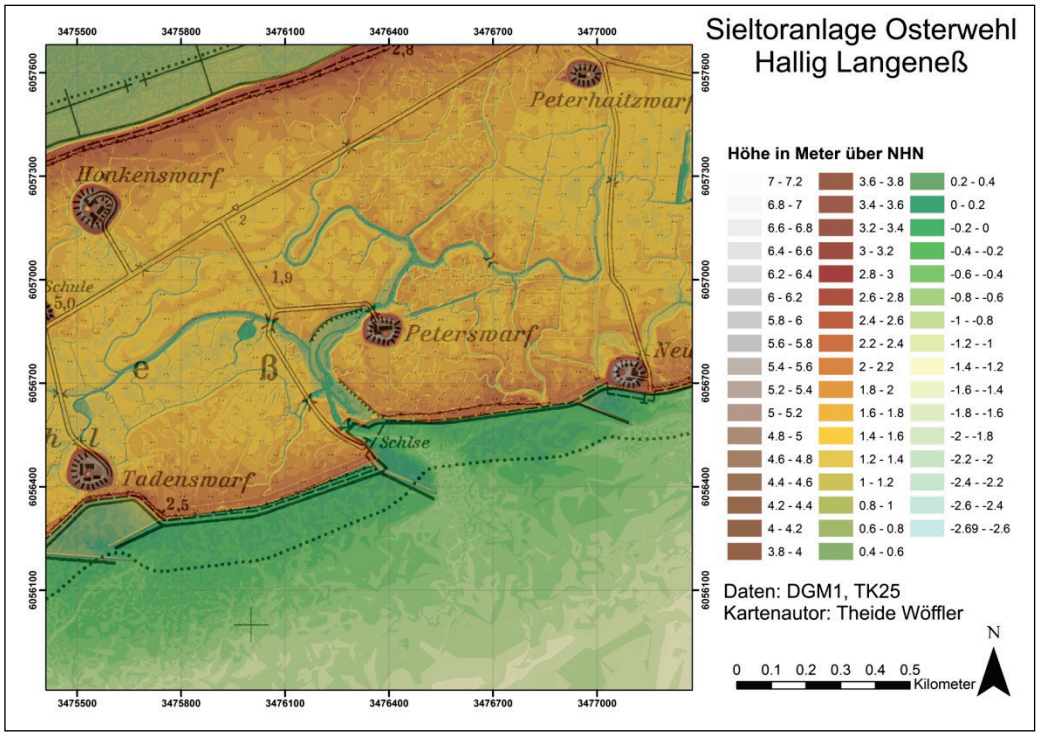


Abb. 34 Geographische Lage der Sieltoranlage Osterwehl

Die Sieltoranlage Osterwehl verfügt über drei selbsttätig wirkende Sieltore mit einer Breite von jeweils 2,50 m und einer dazugehörigen Höhe von 1,80 m. Daraus ergibt sich der folgende Fließquerschnitt für die Sieltoranlage Osterwehl:

$$A_{OW} = 3 \times 2{,}5\text{m} \times 1{,}8\text{m} = 13{,}5\text{m}^2$$

Der Baugrund des Sieltores Osterwehl besteht aus festgelagertem Klei, in dem das Sielbauwerk mit Pfählen gegründet ist. In die Baugrube wurde zudem eine Sauberkeitsschicht aus Sand mit einer Mächtigkeit von 10 cm eingebracht, die als Unterlage für die bewehrte und 50 cm starke Fundamentplatte dient. Bei gefülltem Siel beträgt der Bodendruck in diesem Bereich in etwa 0,3 kg/cm² (Petersen, 1981).

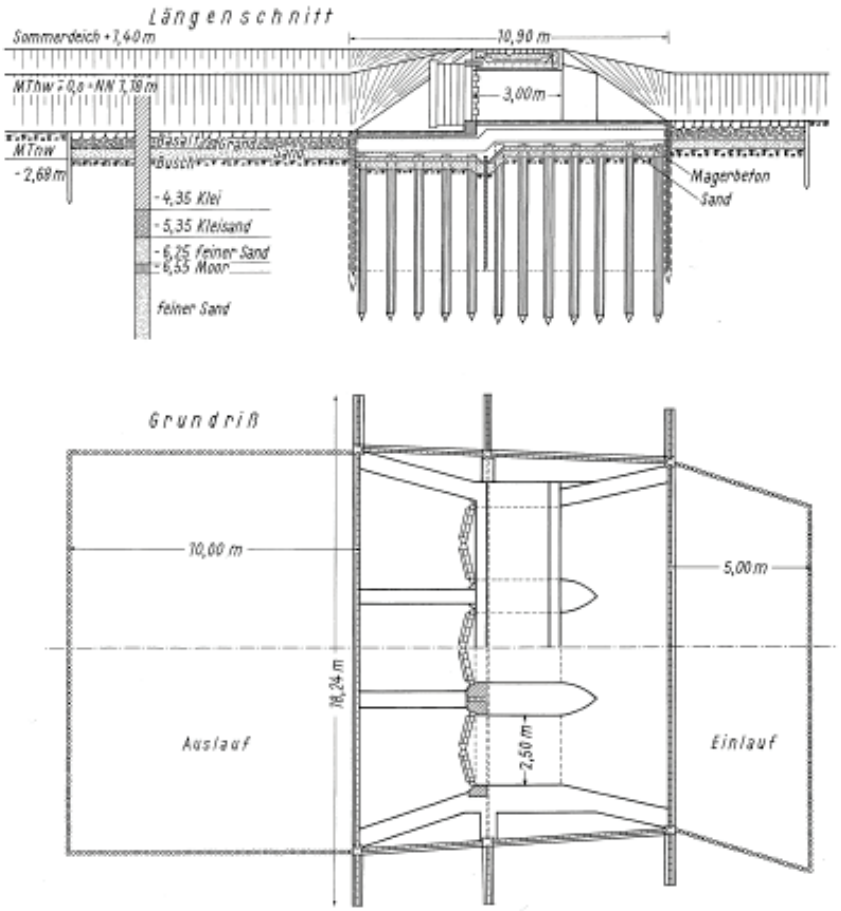


Abb. 35 Längsschnitt und Grundriss des Sieltores Osterwehl (Petersen, 1981)

Zweck der ab dem Jahr 1902 gebauten Halligsiele ist in erster Linie der Schutz vor einem verfrühten Landunter der Halligen. Mit dem Bau der Siele erfolgt die Überflutung der Halligen zu einem späteren Zeitpunkt über die Halligkanten. Die Querschnitte der Halligsiele sind nach Petersen (1981) so bemessen, dass die Entleerung der Hallig nach einem Landunter innerhalb von einer Tide möglich ist und spätestens innerhalb von 20 Stunden erfolgt.

4.3 Stationäre hydraulische Berechnungen für die Sieltoranlage Osterwehl

4.3.1 Berechnungen auf Grundlage des DGM1

Das Entwässerungsgebiet der Sieltoranlage Osterwehl umfasst nach Abb. 33 eine Fläche von etwa 194 ha. Bezogen auf den Sieltorquerschnitt des Osterwehls von 13,5 m² ergibt dies eine Entwässerungsfläche von F_{OW} = 194 ha / 13,5 m² = 14,38 ha/m² für die Sieltoranlage Osterwehl.

In der Tab. 12 sind die Flächen der sechs Entwässerungsgebiete sowie die jeweils zugehörigen Bemessungsgrößen der Sieltoranlagen auf der Hallig Langeneß dargestellt. Daraus wurde zusätzlich die pro m² Sieltorquerschnitt zu entwässernde Fläche bestimmt. Demnach muss über die Sieltoranlage des Entwässerungsgebietes Leye eine Fläche von ca. 60 ha entwässert werden. Bei einem Sieltorquerschnitt von 3 m² ergibt dies eine zu entwässernde Fläche von etwa 20 ha pro m² Sieltorquerschnitt im Entwässerungsgebiet Leye. Im Gegensatz dazu werden im Entwässerungsgebiet Ridd Langeneß 5,1 ha pro m² Sieltorquerschnitt entwässert. Insgesamt wurde für die Hallig Langeneß ein über die Sieltoranlagen zu entwässerndes Gebiet von 818,74 ha ermittelt. Die Summe der Querschnitte der Sieltoranlagen auf Langeneß beträgt 66 m², woraus sich ein Durchschnittswert von 12,41 ha pro m² Sieltorquerschnitt ergibt.

Tab. 12 Entwässerungsgebiete auf der Hallig Langeneß

Entwässerungsgebiet	Größe Entwässerungs-gebiet [ha]	Anzahl Sieltore	Breite Sieltor [m]	Höhe Sieltor [m]	Siel-querschnitt [m²]	Sielquerschnitt [ha/m²]
Jelf	165.38	3	2.5	1.8	13.5	12.25
Ridd/Nordmarsch	188.24	3	2.5	1.8	13.5	13.94
Leye	59.60	1	3.0	1.0	3	19.87
Westerwehl	165.57	3	2.5	1.8	13.5	12.26
Osterwehl	194.08	3	2.5	1.8	13.5	14.38
Ridd/Langeneß	45.87	2	2.5	1.8	9	5.10
Gesamt	818.74	15			66	12.41

Die nachfolgende Tab. 13 zeigt die Ergebnisse einer hydraulischen Berechnung für die Sieltoranlage Osterwehl. Die Sohlhöhe der Sieltoranlage wurde dabei nach Petersen 1981 auf NHN -0.5 m festgesetzsetzt. Außerdem gilt die Voraussetzung, dass die Sommerdeiche im Bereich des Entwässerungsgebietes Osterwehl eine Mindesthöhe von NHN+ 2,60 m aufweisen, so dass bei Wasserständen bis zur Höhe von NHN+ 2,60 m die Entwässerung des Entwässerungsgebietes

Osterwehl ausschließlich über die Sieltoranlage Osterwehl erfolgt. Zur Vereinfachung werden bei diesen hydraulischen Berechnungen stationäre Strömungsbedingungen angenommen.

Tab. 13 Hydraulische Berechnung für die Sieltoranlage Osterwehl für unterschiedliche Wasserstände und stationäre Verhältnisse

Wasserstand im Entwässerungs-gebiet [m NHN]	Entleerungs-dauer [h]	Volumen [m³]	Fließquerschnitt am Sieltor [m²]	Durchfluss Q am Sieltor [m³/s]	Strömungs-geschwindigkeit v am Sieltor [m/s]
0.8	6.5	26480	9.75	1.13	0.12
0.8	13	26480	9.75	0.57	0.06
0.8	20	26480	9.75	0.37	0.04
1	6.5	44090	11.25	1.88	0.17
1	13	44090	11.25	0.94	0.08
1	20	44090	11.25	0.61	0.05
1.2	6.5	68593	12.75	2.93	0.23
1.2	13	68593	12.75	1.47	0.11
1.2	20	68593	12.75	0.95	0.07
1.4	6.5	112247	13.5	4.80	0.36
1.4	13	112247	13.5	2.40	0.18
1.4	20	112247	13.5	1.56	0.12
1.6	6.5	239897	13.5	10.25	0.76
1.6	13	239897	13.5	5.13	0.38
1.6	20	239897	13.5	3.33	0.25
1.8	6.5	497963	13.5	21.28	1.58
1.8	13	497963	13.5	10.64	0.79
1.8	20	497963	13.5	6.92	0.51
2	6.5	824703	13.5	35.24	2.61
2	13	824703	13.5	17.62	1.31
2	20	824703	13.5	11.45	0.85
2.2	6.5	1180497	13.5	50.45	3.74
2.2	13	1180497	13.5	25.22	1.87
2.2	20	1180497	13.5	16.40	1.21
2.4	6.5	1550099	13.5	66.24	4.91
2.4	13	1550099	13.5	33.12	2.45
2.4	20	1550099	13.5	21.53	1.59
2.6	6.5	1925028	13.5	82.27	6.09
2.6	13	1925028	13.5	41.13	3.05
2.6	20	1925028	13.5	26.74	1.98

Bei Wasserständen ab NHN +1,4 m beträgt der Fließquerschnitt der Sieltoranlage Osterwehl 13,5 m², da ab dieser Wasserstandshöhe, bei einer angenommen Höhe der Sielsohle von

NHN -0,5m, das Sieltor voll durchströmt wird. Bei einem maximal zu entwässernden Wasserstand von NHN +2,60 m ergibt sich bei einer Entwässerungszeit von 6,5 Stunden die maximale Strömungsgeschwindigkeit von ca. 6 m/s. Allerdings wird dieser Wert in der Realität nicht erreicht werden, da der Außenwasserstand wahrscheinlich nicht in dieser Geschwindigkeit fallen wird.

4.4 Numerisches Modell zur Simulation der Öffnung des Sieltores Osterwehl

4.4.1 Modellaufbau

Da die in Kapitel 4.3 beschriebenen hydraulischen Berechnungen nur stationär gleichförmige Ergebnisse beinhalten, wird zusätzlich mit der Software Deflt3D von Deltares ein numerisches Modell aufgebaut, um die der Natur entsprechenden instationären Bedingungen simulieren zu können (Deltares, 2010).

Zur Simulation der Strömungsverhältnisse am Sieltor Osterwehl wird ein hochaufgelöstes Detailmodell mit einer Rechengitterweite von 2 m x 2 m für das Untersuchungsgebiets generiert. Dieses Detailmodell wird in das bestehende Strömungs- und Seegangsmodell genestet, das innerhalb des Projektes ZukunftHallig am Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft der RWTH Aachen aufgebaut worden ist und so die jeweiligen Randbedingungen für die Simulation der Strömungsverhältnisse am geöffneten Sieltor Osterwehl liefert (vgl. Kap. 2).

Das Geländemodell muss im Bereich der Sieltoranlage Osterwehl dahingehend angepasst werden, dass der abflusswirksame Fließquerschnitt den tatsächlichen Begebenheiten entspricht. Da die DGM1-Daten des Landesamtes für Vermessung und Geoinformation Schleswig-Holstein auf Laserscanbefliegungen basieren, sind die Geländetiefen in den Bereichen der wasserführenden Sielzüge nur unzureichend dargestellt. Außerdem wurde die Sieltoranlage in der automatisierten Datenaufbereitung als Bauwerk erkannt und somit aus dem DGM herausgerechnet. Die folgende Abb. 36 zeigt die auf dem DGM1-Datensatz basierenden abflusswirksamen Fließquerschnitte für ein mittleres Tidehochwasser (MThw 1,19 m) und ein um 81 cm erhöhtes Tidehochwasser. Der Fließquerschnitt bei Verwendung des DGM1-Datensatzes beträgt für das MThw mit einer Höhe NHN +1,19 m im Bereich der Sieltoranlage Osterwehl 9,41 m² und für das um 81 cm erhöhte MThw mit einer Höhe NHN +2,0 m etwa 19,14 m².

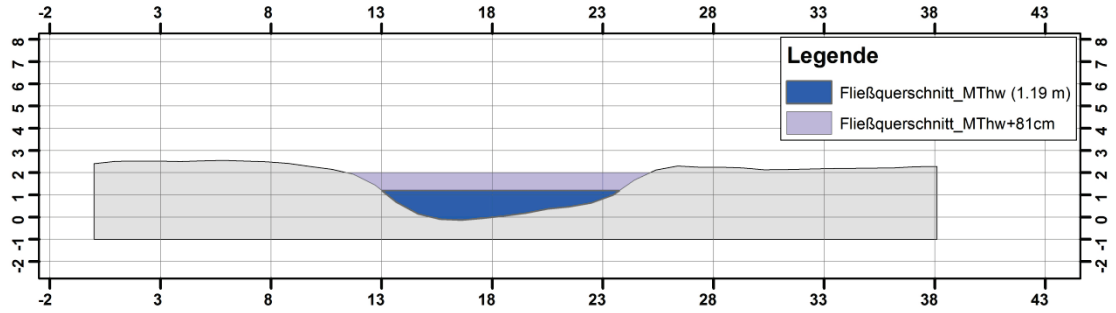


Abb. 36 Fließquerschnitt im Bereich der Sieltoranlage Osterwehl basierend auf dem DGM1 für MThw (NHN +1,19 m) und MThw + 81 cm (NHN +2,0 m)

Die Anpassung der Topographie im Bereich der Sieltoranlage wird im Rahmen der Kalibrierung der numerischen Modelle vorgenommen.

4.4.2 Darstellung der numerischen Ergebnisse

Die hier dargestellten Ergebnisse der numerischen Simulation zeigen zunächst die Strömungs- und Wasserstandsverhältnisse unter Bedingungen des MThw, MThw +0,5 m sowie MThw +1,0 m im Bereich der Sieltoranlage Osterwehl. Die Position (x: 3476261,8; y: 6056580,5) des Beobachtungspunktes liegt direkt im Zentrum der Sieltoranlage

In der Abb. 37 sind die modellierten Wasserstände an der Sieltoranlage Osterwehl für MThw, MThw +0,5 m und MThw +1,0 m dargestellt. Das MThw beträgt in diesem Bereich NHN +1,31 m.

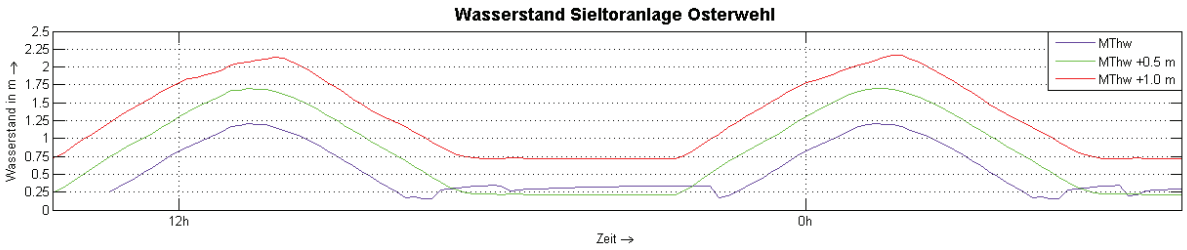


Abb. 37 Modellierte Wasserstände an der Sieltoranlage Osterwehl für MThw, MThw +0,5 m und MThw +1,0 m

Die Abb. 38 zeigt die modellierten tiefengemittelten Strömungsgeschwindigkeiten (Magnitude) an der Sieltoranlage Osterwehl für MThw, MThw +0,5 m und MThw +1,0 m. Während die Maximalwerte der tiefengemittelten Strömungsgeschwindigkeiten unter den Bedingungen des MThw und MThw +0,5 m jeweils bei etwa 1 m/s liegen, erreichen die Maximalwerte bei der Modellierung unter Bedingung des MThw +1,0 m bis zu 2,2 m/s.

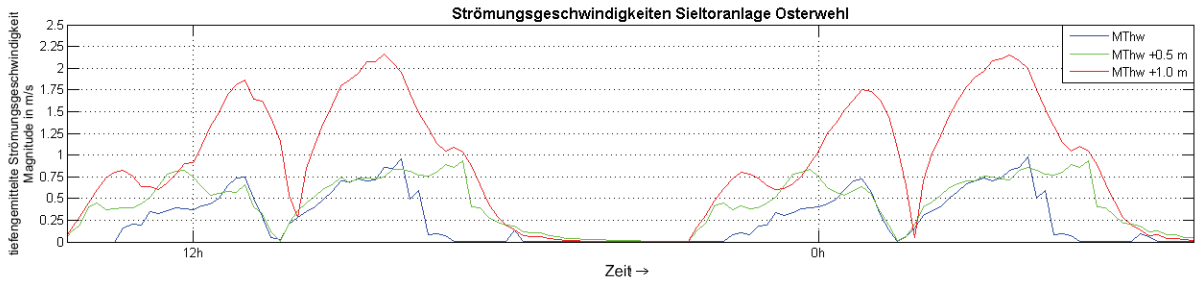


Abb. 38 Modellierte tiefengemittelte Strömungsgeschwindigkeiten (Magnitude) an der Sieltoranlage Osterwehl für MThw, MThw +0,5 m und MThw +1,0 m

In der Abb. 39 sind die modellierten tiefengemittelten Strömungsgeschwindigkeiten an der Sieltoranlage Osterwehl für MThw +1,0 m bei maximalen Flutstrombedingungen (links) und maximalen Ebbstrombedingungen (rechts) dargestellt. Strömungsgeschwindigkeiten, die kleiner als 0,2 m/s sind, werden zur besseren Übersicht nicht dargestellt.

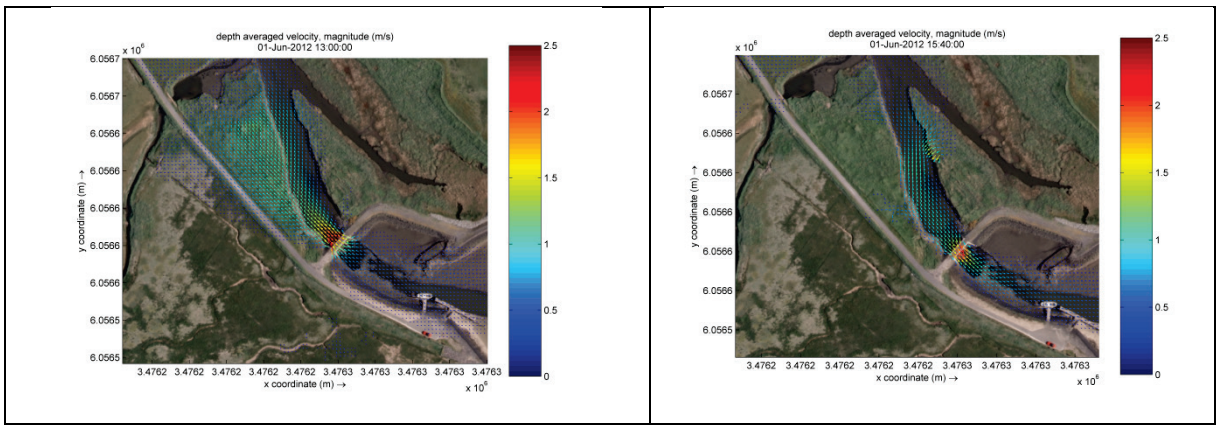


Abb. 39 Modellierte tiefengemittelte Strömungsgeschwindigkeiten an der Sieltoranlage Osterwehl für MThw +1,0 m bei maximalen Flutstrombedingungen (links) und maximalen Ebbstrombedingungen (rechts)

Die nachfolgende Abb. 40 zeigt die Bodenschubspannung im Bereich der Sieltoranlage Osterwehl bei auflaufendem Wasser (links) und bei ablaufendem Wasser (rechts) jeweils zum Zeitpunkt der maximalen Belastungen unter Bedingungen des MThw+1,0 m. Bereiche, in denen Bodenschubspannungen <0,5 N/m² auftreten, werden in dieser Darstellung aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht angezeigt. Bei Flut treten die maximalen Bodenschubspannungen im Bereich hinter der Sieltoranlage auf und erreichen hier maximale Werte von 12 N/m². Bei Ebbe treten die maximalen Bodenschubspannungen mit 12 N/m² vor der Sieltoranlage auf.

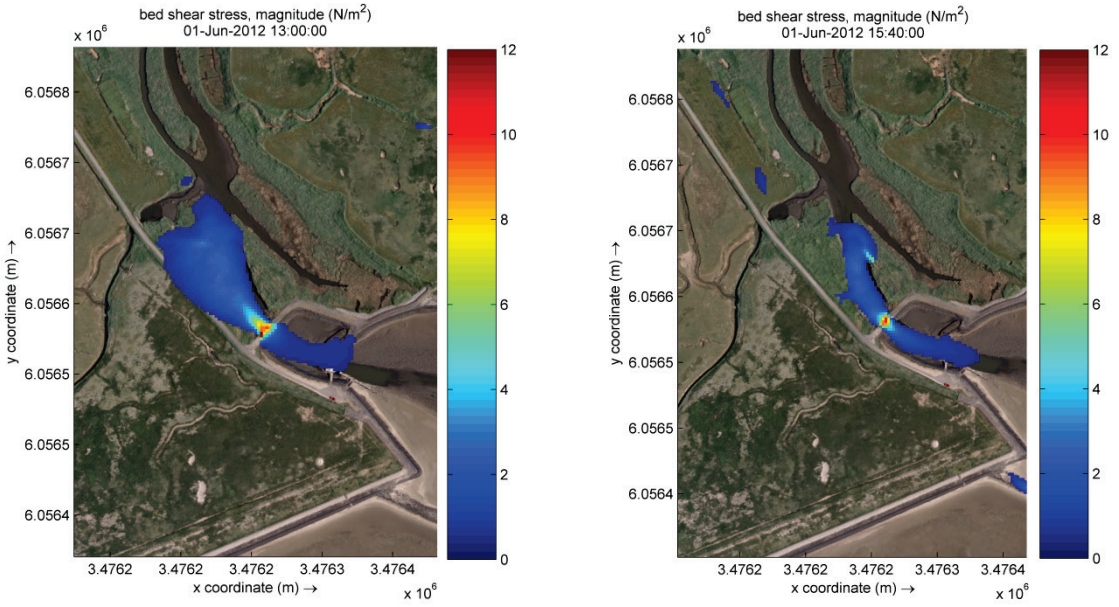


Abb. 40 Maximale Bodenschubspannung unter Bedingung des MThw+1,0 m bei Flut (links) und Ebbe (rechts)

4.5 In-situ-Messungen

4.5.1 Durchführung der in-situ-Messungen

Die Messkampagne am Sieltor Osterwehl hat in der Zeit vom 22.02.2013 bis zum 27.02.2013 stattgefunden. Der nachfolgenden Tab. 14 sind die erfolgten Messungen und Angaben zu den Zeiten des Tidehoch- und Tideniedrigwassers am Fähranleger Hilligenley zu entnehmen. Außerdem ist der Öffnungszustand des Sieltores vermerkt.

Im Rahmen der Messkampagne sind seitens des IWW dabei die folgenden Messgeräte eingesetzt worden:

- *EROSIMESS-Messgerät zur Messung der kritischen Sohlschubspannung*
- *2 x Valeport Midas CTD+ zur Messung von Trübung, Wasserstand, Temperatur Leitfähigkeit*
- *MeasureCat mit Teledyne RD Instruments Sentinel ADCP zur Messung der Strömungsgeschwindigkeiten*

Tab. 14 Durchführung der Messkampagne Osterwehl

Tag	Tätigkeit 1	Tätigkeit 2	Zustand Sieltor	Tide	Hoch-wasser	Niedrig-wasser	Hoch-wasser	Niedrig-wasser	Hoch-wasser
22.02.13	Erosimess	Strömungs-, Trübungs- und Wasserstandsmessungen (stationär)	geschlossen	Mt		05:11 / 0.86 m	10:59 / 3.04 m	17:44 / 0.95 m	23:19 / 3.19 m
23.02.13	Erosimess	Strömungs-, Trübungs- und Wasserstandsmessungen (stationär)	geschlossen	Mt		06:15 / 0.72 m	11:57 / 3.17 m	18:37 / 0.79 m	
24.02.13	Erosimess	Strömungs-, Trübungs- und Wasserstandsmessungen (stationär)	geschlossen	Mt	00:13 / 3.32 m	07:02 / 0.56 m	12:45 / 3.26 m	19:20 / 0.61 m	
25.02.13	Strömungsmessungen (mobil)	Strömungs-, Trübungs- und Wasserstandsmessungen (stationär)	offen	Sp	00:59 / 3.39 m	07:44 / 0.41 m	13:26 / 3.31 m	20:00 / 0.46 m	
26.02.13	Strömungsmessungen (mobil)	Strömungs-, Trübungs- und Wasserstandsmessungen (stationär)	offen	Sp	01:39 / 3.40 m	08:24 / 0.30 m	14:04 / 3.31 m	20:39 / 0.35 m	
27.02.13	Strömungsmessungen (mobil)	Strömungs-, Trübungs- und Wasserstandsmessungen (stationär)	offen	Sp	02:15 / 3.37 m	09:02 / 0.22 m	14:40 / 3.28 m	21:15 / 0.27 m	

Das am IWW entwickelte EROSIMESS-Messgerät (vgl. Kap. 4.5.4) wurde zur Bestimmung der kritischen Sohlschubspannung an vier im Vorfeld der Messkampagne festgelegten Punkten eingesetzt.

Die Valeport Midas CTD-Sonden (siehe Abb. 41) verfügen zusätzlich über Trübungsmesssonden des Typs Seapoint Turbidity Meter und wurden sowohl im Binnenbereich als auch im Außenbereich des Osterwehl eingesetzt und verankert. Mit ihnen wurden über den gesamten Zeitraum die Werte der Salinität, Temperatur, Wasserstände und Trübung aufgezeichnet.

Abb. 41 Valeport Midas CTD-Sonde im Außenbereich des Sieltores Osterwehl während Tideniedrigwassers

In der Abb. 42 sind sowohl die Positionen der stationären Messungen der CTD-Sonden und des Trübungsmessgerätes ASM-IV des Geowissenschaftlichen Zentrums der Universität Göttingen (GZG) als auch die Messpositionen des EROSIMESS und die gefahrenen ADCP-Querprofile

dargestellt. Außerdem sind die durch das LKN-SH im Vorfeld der Messkampagne aufgenommenen acht Querprofile (siehe Anlage) dargestellt.

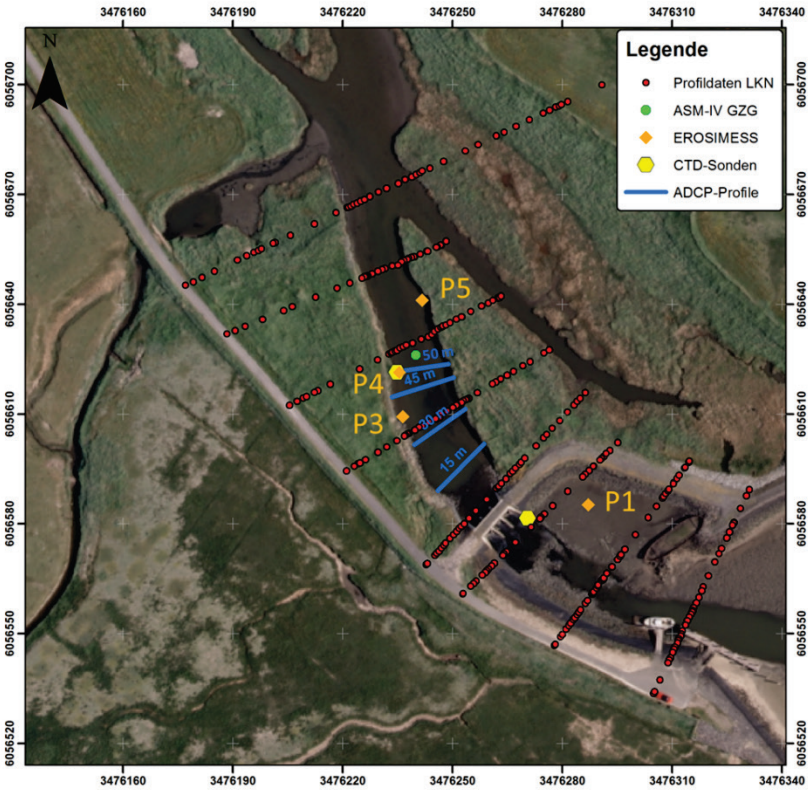


Abb. 42 Orte der durchgeführten Messungen im Rahmen der Messkampagne Osterwehl

4.5.2 Wasserstandsmessungen

Die Messungen der Wasserstände erfolgten über die Drucksensoren der beiden CTD-Sonden, deren Position und Höhenlage der nachfolgenden Tab. 15 zu entnehmen ist.

Tab. 15 Position CTD-Sonden Messkampagne Osterwehl 22.02. - 27.02.2013

	Rechtswert	Hochwert	Höhenlage
CTD-Sonde 1 (Außen)	3476270.52	6056581.585	NHN -0.07 m
CTD-Sonde 2 (Binnen)	3476234.81	6056621.334	NHN -0.19 m

Aus der Abb. 43 wird deutlich, dass vor der Öffnung des Sieltores Osterwehl die Wassertiefen im Binnenbereich (CTD 2) nur geringfügig den durch Gezeiten bedingten Schwankungen des Wasserstandes ausgesetzt sind. Mit der Öffnung des Sieltores Osterwehl vor

Beginn des zweiten Flutzeitraumes am 25.02.2013 lässt sich erkennen, dass die Wassertiefen nun auch im Binnenbereich des Prieles dem Tidenhub ausgesetzt sind.

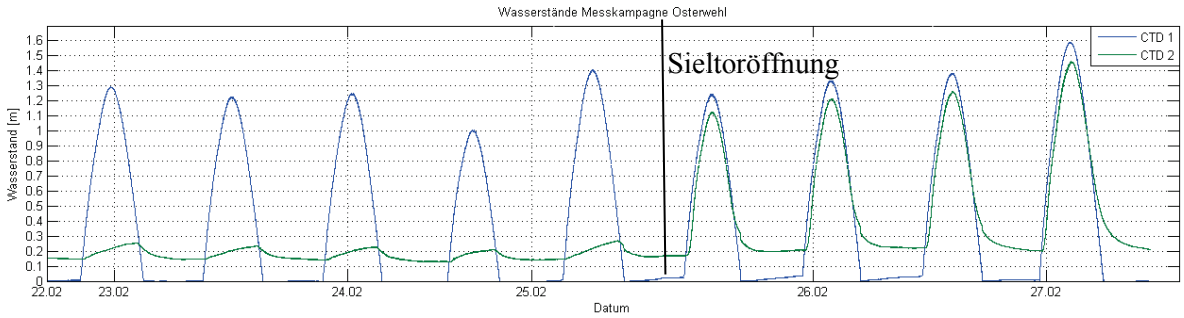


Abb. 43 Berechnete Wassertiefen an den Positionen der CTD-Sonden

Für die Wasserstände bezogen auf NHN ergeben sich die in Abb. 44 dargestellten Werte.

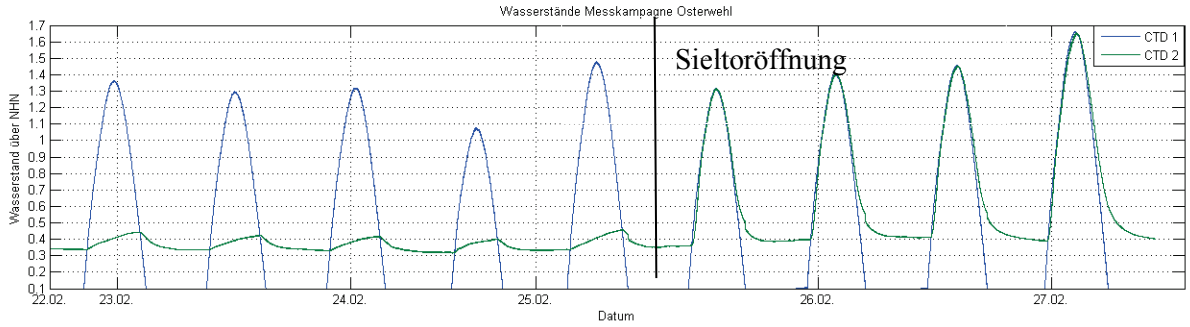


Abb. 44 Wasserstände in Meter bezogen auf NHN an den Positionen der CTD-Sonden

4.5.3 Geschwindigkeitsmessungen

Die Messungen der Strömungsgeschwindigkeiten erfolgten mit dem auf dem MeasureCat installierten ADCP des Typs *Teledyne RD Instruments Sentinel ADCP* (siehe Abb. 45). Dabei wurden kontinuierlich zu unterschiedlichen Wasserständen an den in Abb. 42 gezeigten Positionen im Binnenbereich des Priels die Strömungsverhältnisse sowie Navigationsdaten des MeasureCats aufgenommen.

Durch den Bottom Tracker des ADCP wurden zusätzlich Tiefenprofile aufgenommen und die jeweiligen Durchflüsse ermittelt. Für eine zuverlässige Angabe zum Durchfluss wurden zu jedem Zeitpunkt mindestens drei Querprofile gefahren.

Abb. 45 Measure Cat Teledyne RD Instruments Sentinel ADCP im Osterwehl

Die nachfolgende Tab. 16 zeigt die jeweiligen Bestandteile bei der Ermittlung des Gesamtdurchflusses für drei erfolgte Messungen während des Flutstromes am Profil 45 m am 27.02.2013 zwischen den Uhrzeiten 13:32 und 13:41. Aufgrund der Totbereiche des ADCP im Bereich der Wasseroberfläche (Q oben), den Uferbereichen (Q links, Q rechts) und dem Grundbereich (Q unten) werden diese Werte aus den eigentlichen Messwerten extrapoliert und so zu einem Gesamtdurchfluss addiert. Der Mittelwert des Durchflusses für diese drei Messungen beträgt somit am Profil 45 m 5,78 m³/s.

Tab. 16 Durchflussermittlung am Profil 45 m am 27.02. zwischen den Uhrzeiten 13:32 und 13:41

	A	B	C	Mittelwert ABC
Q oben [m³/s]	2.638	2.887	2.905	2.81
Q gemessen [m³/s]	1.675	1.906	2.06	1.88
Q unten [m³/s]	0.751	0.871	0.84	0.82
Q links [m³/s]	0.031	0.138	0.079	0.08
Q rechtes [m³/s]	0.199	0.158	0.214	0.19
Q gesamt [m³/s]	5.295	5.96	6.097	5.78

Die folgende Abb. 46 zeigt die aufgenommenen maximalen horizontalen Strömungsgeschwindigkeiten am 27.02.2013 zwischen den Uhrzeiten 13:32 und 13:41 bei auflaufendem Wasser auf Höhe des in Abb. 42 dargestellten Querprofils bei 45 m. Die maximalen Strömungsgeschwindigkeiten liegen bei etwa 1,2 m/s.

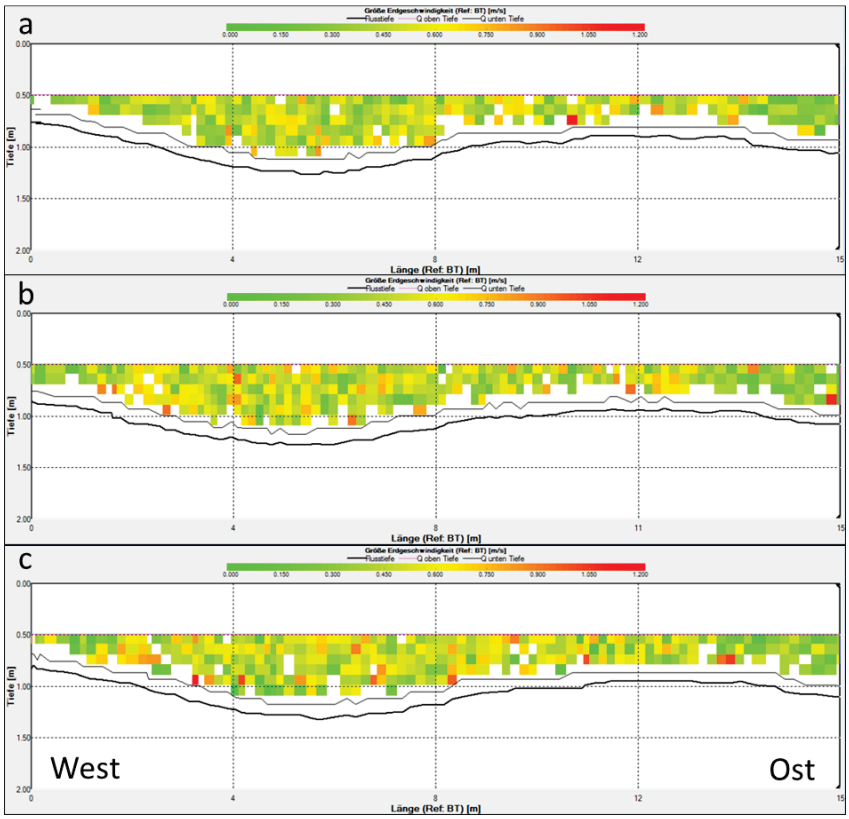


Abb. 46 Maximale horizontale Strömungsgeschwindigkeiten am Profil 45 m am 27.02.2013 zwischen 13:32 Uhr und 13:41 Uhr

Aufgrund der hohen Turbulenz ergeben sich sehr unterschiedliche Strömungsmuster bei den drei aufgenommen Querprofilen und der Darstellung der maximalen horizontalen Strömungsgeschwindigkeiten. Aus diesem Grund wird in der folgenden Abb. 47 die in Bezug auf die Hauptströmungsrichtung des jeweiligen Querschnitts vorherrschende horizontale Strömungsgeschwindigkeit angezeigt. Die Verteilung der Strömungsgeschwindigkeiten lässt erkennen, dass in den Uferbereichen teilweise durch Verwirbelungen Rückströmungen und somit negative Geschwindigkeiten vorherrschen. Im zentralen Prielbereich werden Strömungsgeschwindigkeiten von etwa 0,4 m/s bis 0,6 m/s erreicht.

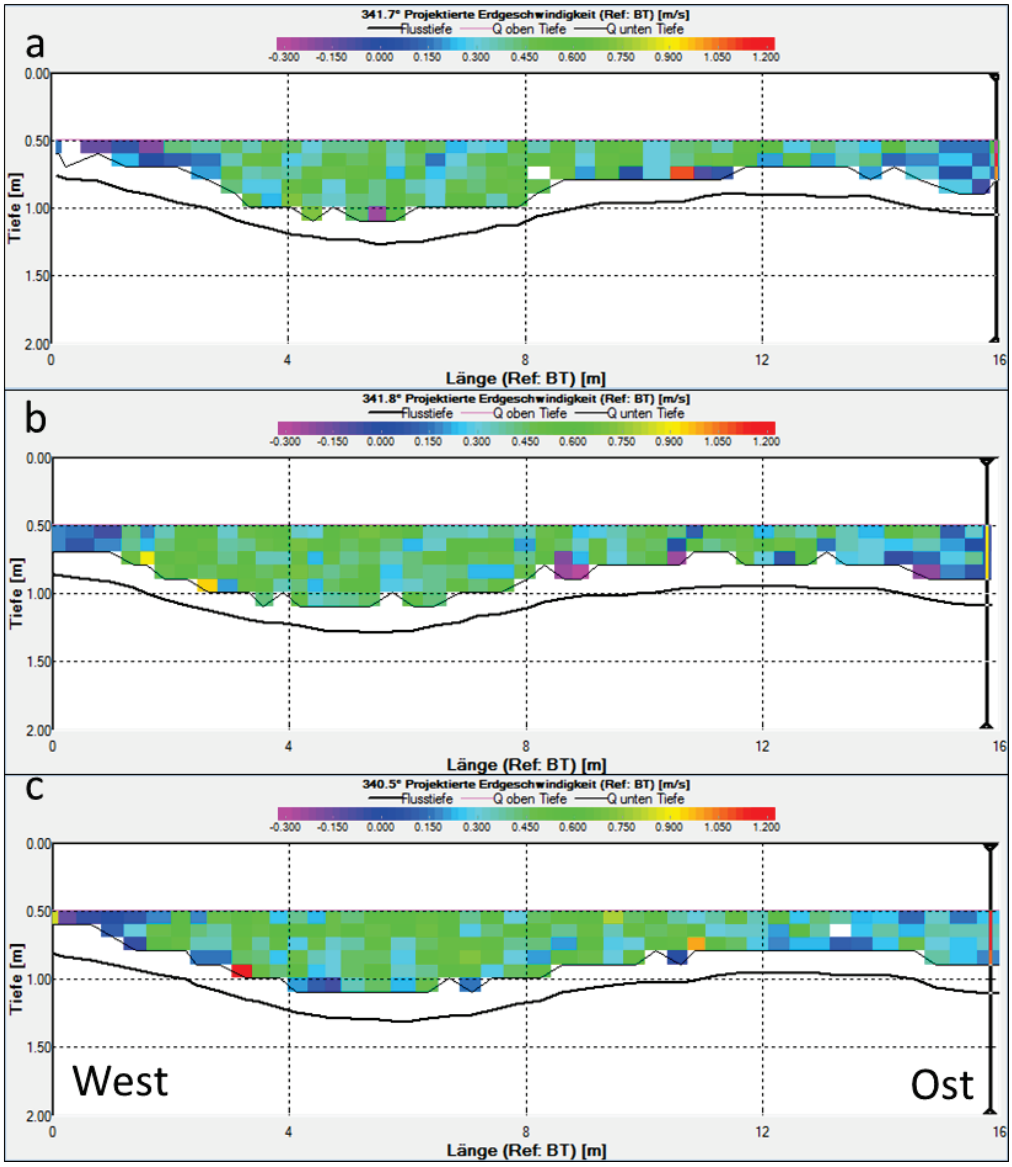


Abb. 47 Horizontale Strömungsgeschwindigkeiten in Bezug auf die Hauptströmungsrichtung am Profil 45 m am 27.02.2013 zwischen 13:32 Uhr und 13:41 Uhr

Im Folgenden wird auf die Durchflussmengen in Abhängigkeit von der jeweiligen Wasserstandssituation, also dem vorliegenden Wasserstand und dem Zeitpunkt im Tidenzyklus, eingegangen. Dafür sind diese Parameter in Abb. 48 über die Zeit aufgetragen. Die eingetragenen Durchflusswerte stellen dabei die Mittelwerte aller aus zwei bis vier Einzelmessungen bestehenden Messgruppen dar, welche nach den vier verschiedenen Profilen, an denen gemessen wurde, getrennt sind. Von den negativen Werten, die ablaufendes Wasser kennzeichnen, wurden die Beträge gebildet. Als Wasserstandsdaten sind zum einen die vom IWW mit Hilfe der CTD Sonden auf der Binnenseite des Sieltores gemessenen Wasserstände in dunkelblau eingetragen. Gleichzeitig sind die vom LKN-SH bereitgestellten Wasserstandshöhen dargestellt, die im

Zeitraum der Messungen an der Pegelmessstation auf Höhe der 6 km östlich des Sieltores gelegenen Warft Hilligenley ermittelt wurden.

Man sieht hier deutlich, dass das Sieltor beim ersten Tidehochwasser am 25.02.2013 noch nicht geöffnet war, weswegen im Binnenbereich kaum Wasserstandsänderungen stattgefunden haben. Ab dem 27.02. um ca. 11:00 Uhr fehlen die am Sieltor gemessenen Wasserstandsdaten. Zu dieser Zeit wurden die Messungen mit den CTD-Sonden abgeschlossen und die Messgeräte aus dem Wasser genommen. Zudem ist festzustellen, dass die Maximalwerte des Tidehochwassers im Binnenbereich des Sieltores ca. eine halbe Stunde später erreicht werden, als an der Pegelmessstation. Außerdem kommt das auflaufende Wasser erst später im Binnenbereich an. Gleichzeitig fällt der Wasserstand im Binnenbereich bei Niedrigwasser nie so intensiv ab, wie im Außenbereich bei Hilligenley, sondern unterschreitet eine Wasserstandshöhe von gut 500 cm über dem Pegelnullpunkt nicht.

Es gibt insgesamt drei Zeitblöcke, in denen Durchflusswerte eingetragen sind. Dabei liegen die Werte aufgrund der oben beschriebenen Restriktionen hinsichtlich der Messungen bei geringer Wassertiefe immer im Bereich der höheren Wasserstände. Zu den zeitlich in der Nacht liegenden Tidehochwassern gibt es keine vorliegenden Durchflussmesswerte, da hier keine Messungen durchgeführt wurden.

Bezüglich der Durchflussmengen ist festzustellen, dass die kleineren Werte im Bereich der maximalen Wasserstände erreicht werden. Je weiter man zeitlich von den Tidehochwassern entfernt ist, desto größer werden tendenziell die erreichten Durchflusswerte. Dieser Zusammenhang erklärt sich dadurch, dass am Zeitpunkt des maximalen Tidehochwassers ungefähr auch der Kenterpunkt der Strömung liegt. Am besten ist diese Tendenz bei dem ersten Messungsblock am 25.02. zu sehen. Ungefähr zum am Sieltor vorliegenden Wasserhöchststand von 598 cm über PN erreichen das 15 m hinter dem Sieltor liegende Profil mit 3,3 m³/s, das 30 m Profil mit 4,1 m³/s und das 45 m Profil mit 4,08 m³/s seinen an dem Tag kleinsten gemessenen Wert. Bei den Messungen am 26.02 gibt es einige Ausreißer, die den oben beschriebenen Zusammenhang nicht bestätigen. Jedoch muss hier beachtet werden, dass der Höchstwasserstand im Vergleich zum ersten Tidehochwasser, in dem Durchflüsse gemessen wurde, mit 612 cm über PN 14 cm höher war und somit auch insgesamt höhere Durchflusswerte zu verzeichnen sind. Am 27.02 sind nochmal Messungen gefahren worden. Dabei konnte jedoch nur jeweils eine Gruppe von Messungen für ein Profil erstellt werden. Auch hier werden am 15 m Profil und am 30 m Profil sehr hohe Durchflusswerte erreicht. Der Pegelstand direkt auf der Binnenseite des Sieltores wurde zu dem Zeitpunkt nicht mehr gemessen, jedoch lässt sich vom Pegel Hilligenley ableiten, dass der Höchstwasserstand nochmal knapp 10 cm höher gewesen sein muss als am 26.02.

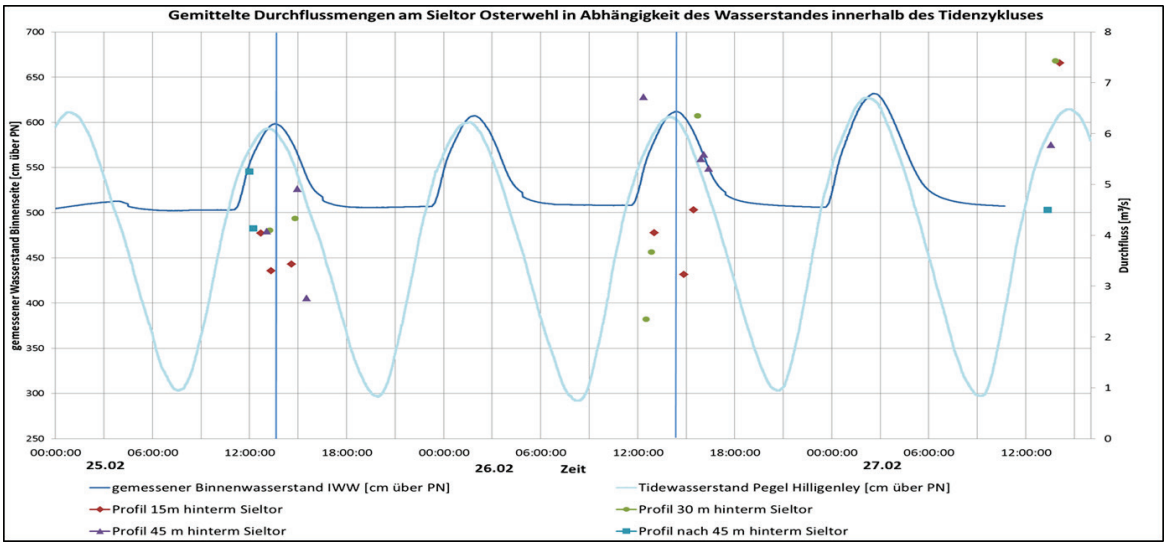


Abb. 48 Gemittelte Durchflussmengen am Sieltor Osterwehl in Abhängigkeit des Wasserstandes im Tidenzyklus

Nach den gleichen Gesichtspunkten, nämlich der Abhängigkeit von der Wassertiefe bzw. dem Zeitpunkt im Tidenzyklus, sollen auch die Werte der Fließgeschwindigkeiten behandelt werden (Abb. 49). Analog zu den Durchflusswerten lässt sich auch hier feststellen, dass um den Zeitpunkt des Tidehochwassers die geringeren Fließgeschwindigkeiten erreicht werden. Am 25.02. sind das am 15 m Profil 0,15 m/s, am 30 m Profil 0,26 und am 45 m Profil 0,25 m/s. Am 15 m Profil werden im Vergleich zu den anderen Profilen eher niedrige Fließgeschwindigkeiten erreicht, was damit zu erklären ist, dass es sich dabei um das breiteste der hier gemessenen Querprofile handelt. Insgesamt werden Fließgeschwindigkeiten zwischen 0,11 und 0,46 m/s erreicht.

Die höchsten gemessenen Fließgeschwindigkeiten werden, mit Ausnahme eines Ausreißers am 27.02. am 30 m Profil mit 0,46 m/s, während des zweiten Tidehochwassers am 26.02. gemessen, zu dem ein im Vergleich zum 25.02. um 14 cm höherer Wasserstand von ca. 612 cm über PN ermittelt wurde. Am 30 m Profil lag dort eine mittlere Fließgeschwindigkeit von 0,41 m/s vor, am 45 m Profil eine mittlere Fließgeschwindigkeit von 0,42 m/s.

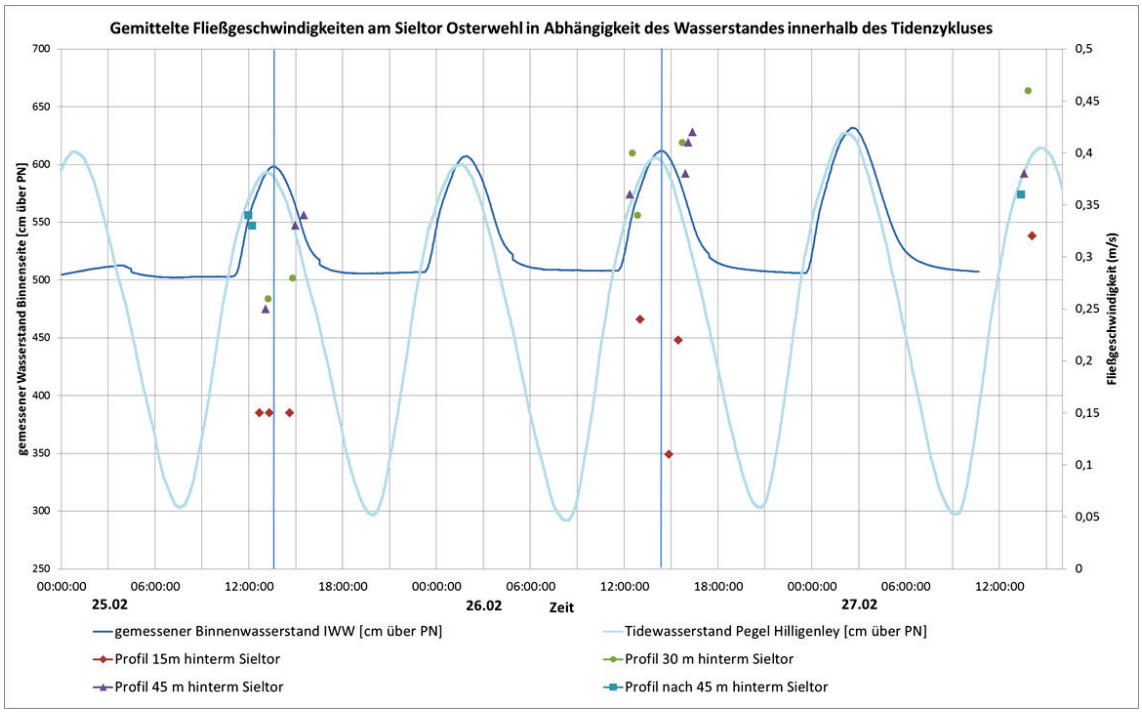


Abb. 49 Gemittelte Fließgeschwindigkeiten am Sieltor Osterwehl in Abhängigkeit des Wasserstandes im Tidenzyklus

4.5.4 Kritische Sohlschubspannung

Zur Bestimmung der Erosionsanfälligkeit wird das am Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft der RWTH Aachen entwickelte Messgerät EROSIMESS verwendet. EROSIMESS dient unter anderem der Messung kritischer Sohlschubspannungen von kohäsivem Material. Es besteht aus einem wasserdichten Motorgehäuse mit Kameraschacht sowie einem Versuchszylinder. Das Motorgehäuse wird auf den Zylinder gesetzt und mit diesem verschraubt. Mit dem Elektromotor ist eine Welle verbunden, die durch das Motorgehäuse nach unten geführt ist. An dieser Welle sind zwei dreiflügelige Propeller befestigt. Der untere Propellerrührer, dessen Abstand zum Sediment durch eine am Probenzylinder befestigte Kunststoffplatte definiert wird, erzeugt im Zylinder eine Strömung, die sich parallel zum Sedimentbett ausbildet und eine von der Umdrehungsgeschwindigkeit des Propellers abhängige Schubspannung induziert. In den oberen Propellerrührer ist eine Dispersionsscheibe integriert, die die Konzentration des erodierten Sediments über das gesamte Volumen des Zylinders verteilt. Der funktionale Zusammenhang zwischen Propellerumdrehung und aufgebrachter Schubspannung wird im Rahmen einer vorgehenden Kalibrierung mithilfe der Erosionskriterien nach Shields (1936) und Unsöld (1984) ermittelt. Mit dem Messgerät können beliebige Sohlschubspannungen in einem Bereich von 0 N/m² bis 12 N/m² induziert werden. Es besteht die Möglichkeit, das EROSIMESS im drückenden oder im

saugenden Betrieb zu nutzen. Je nach Drehrichtung der Welle kann aufgrund der Form der Propeller dieser Betrieb beeinflusst werden. Die kritische Sohlschubspannung wird bei saugendem Betrieb (Drehrichtung gegen den Uhrzeigersinn) schneller erreicht (Liem, 1995; Pietsch, 2001; Schweim, 2005).

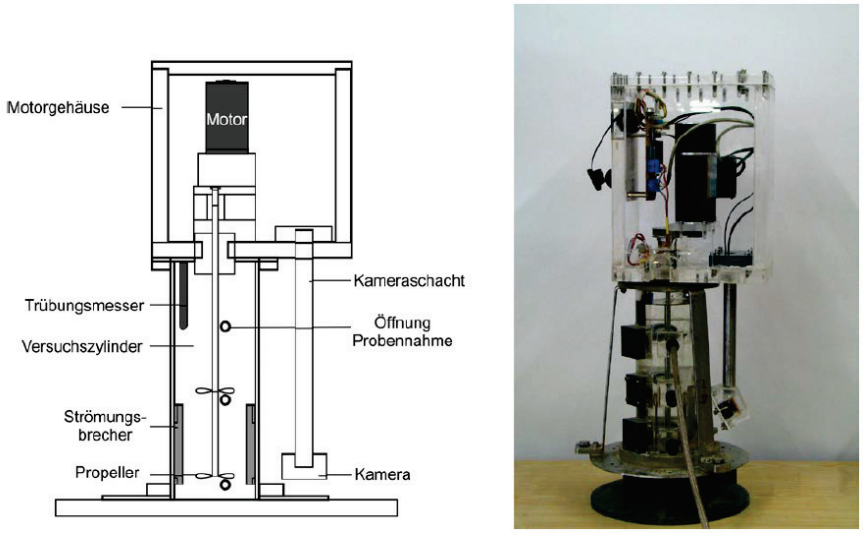


Abb. 50 Aufbau des Erosionsmessgerät EROSIMESS

Das beschriebene Motorgehäuse ist über zwei Kabel mit einem Steuergerät verbunden. Hiervon dient ein Kabel der Stromversorgung, ein weiteres dem Datenaustausch. Die Steuerung des EROSIMESS, sowie die kontinuierliche Aufzeichnung der Daten erfolgt mithilfe eines über eine serielle Schnittstelle angeschlossenen Computers über ein eigens entwickeltes Messprogramm.

Die Bestimmung der kritischen Sohlschubspannung mithilfe des EROSIMESS erfolgt vorzugsweise durch die Einstellung verschiedener Sohlschubspannungsstufen, die über einen gewissen Zeitraum (mind. 10 min) initiiert werden, und die gleichzeitige Messung der Feststoffkonzentration im Zylinder. Ein starker Anstieg der Feststoffkonzentration lässt auf das Erreichen der kritischen Sohlschubspannung schließen. Der Resuspensionsgrad, der sich durch erodierte Partikel im Propellerzylinder fortlaufend ändert, wird mithilfe von zwei Trübungsmessern, die sich zur Ermittlung der Feststoffkonzentration oberhalb des oberen Propellers befinden, gemessen. Über einen Sender wird Infrarotlicht einer vorgegebenen Frequenz ausgesendet und über einen Empfänger aufgrund der Absorption suspendierter Partikel in abgeschwächter Lichtintensität empfangen. Je nach Menge, Größe, Form und Farbe verschiedenartiger Sedimente werden unterschiedliche Lichtintensitäten beim Empfänger gemessen. Der funktionale Zusammenhang zwischen gemessener Lichtintensität und Feststoffkonzentration im Versuchszylinder wird durch die Entnahme von Probeflüssigkeiten kalibriert. Die seitlich am Zylinder in einem Plexiglasschacht angebrachte Kamera dient der

Beobachtung der Erosion der Sedimente bei in-situ-Messungen (Liem, 1995; Pietzsch, 2001; Scheim, 2005).

Da vor Ort lediglich die Trübungen der durch die vom EROSIMESS-Messgerät induzierten Schubspannungen erfasst werden können, müssen noch zusätzlich die entnommenen Wasserproben auf ihre Feststoffgehalte untersucht werden. Erst dann kann eine zuverlässige Auskunft über die kritische Sohlschubspannung an den vier Positionen gegeben werden. Die Abb. 51 zeigt die Messpositionen P4 (links) und P1 (rechts) (vgl. Abb. 42).

Abb. 51 Das EROSIMESS während der Messkampagne am Osterwehl

Schon während der Versuche im Feld konnte über die Färbung der Proben und über die gemessenen Werte der Lichtintensität abgeschätzt werden, dass die kritische Sohlschubspannung an allen untersuchten Punkten über der vorliegenden Sohlschubspannung liegt und somit eine Öffnung des Sieltores unter den gegebenen Bedingungen keine Gefährdung durch Erosion darstellt. Im Labor wurden anschließend die vor Ort entnommenen Wasserproben aufbereitet und ausgewertet, so dass nun genauere, fundierte Aussagen bezüglich der kritischen Sohlschubspannung getätigt werden können.

Dafür musste durch Filtration, Trocknung und wiederholtem Wiegen zunächst der Feststoffgehalt jeder Probe bestimmt werden. Dieser wurde im Folgenden mit den zum Zeitpunkt der Probenentnahme gemessenen Werten der Lichtintensität in Zusammenhang gesetzt. Durch Auswahl einer passenden Regressionskurve wird so für jeden Punkt eine Funktion gebildet. Abb. 52 zeigt exemplarisch die für den Messpunkt P5 entstandene Funktionskurve. Mit Hilfe dieser Funktion können die Feststoffkonzentrationen zu den Zeitpunkten berechnet werden, zu denen keine Probe entnommen worden ist.

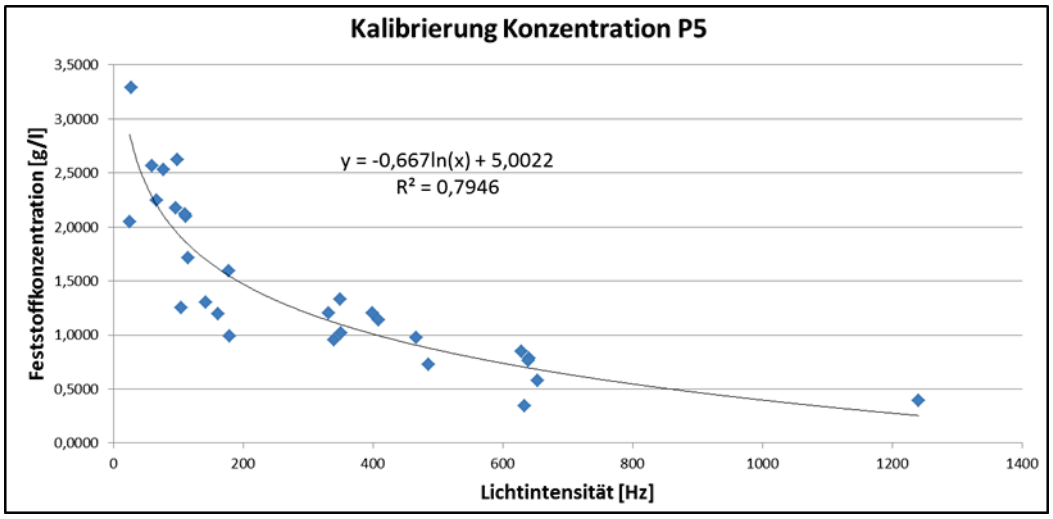


Abb. 52 Kalibrierungskurve Lichtintensität - Feststoffkonzentration für Messpunkt P5

Die so ermittelten Werte der Feststoffkonzentrationen wurden im letzten Schritt der Auswertung zusammen mit den Schubspannungsstufen über die Funktionszeit abgebildet. Mit Hilfe dieses Diagramms kann der gesuchte Punkt des Erosionsbeginns abgelesen werden. Ein starkes, erkennbares Ansteigen der Feststoffkonzentration lässt auf ein Erreichen der kritischen Sohlschubspannung schließen.

Die Messergebnisse der Messungen an Messpunkt P3 zeigen am Anfang der Messung einen Konzentrationsabfall. Zu Beginn der ersten Schubspannungsstufe von 0,5 N/m² ist zwar ein kleiner Ausschlag nach oben zu verzeichnen, dieser geht aber im Folgenden wieder zurück (vgl. Abb. 53). Dies ist damit zu erklären, dass beim Einsetzen des Messgerätes aufgewirbeltes Material zum Startpunkt der Messung noch nicht wieder sedimentiert war, sondern sich noch im Laufe des Versuches wieder auf der Gewässersohle absetzte. Ab Minute 20 hat sich die Feststoffkonzentration auf einen ungefähren Wert von 0,20 g/l eingependelt und es sind kaum noch Veränderungen feststellbar. Abb. 54 zeigt, dass auch auf den Kamerabildern eine Abnahme der Feststoffkonzentration im Laufe der Funktionszeit zu erkennen ist. Insgesamt lässt sich damit die Aussage tätigen, dass innerhalb dieses Versuches die kritische Sohlschubspannung nicht erreicht wurde. Sie muss daher für den Messpunkt P3 über 12 N/m² liegen, womit sie deutlich über den 2,5 N/m² liegt, die laut Berechnungen während einer Sieltoröffnung unter den Bedingungen eines MThw +1,0 m an diesem Punkt wirken würden. Mit Erosion ist deswegen an diesem Messpunkt unter den gegebenen Bedingungen nicht zu rechnen.

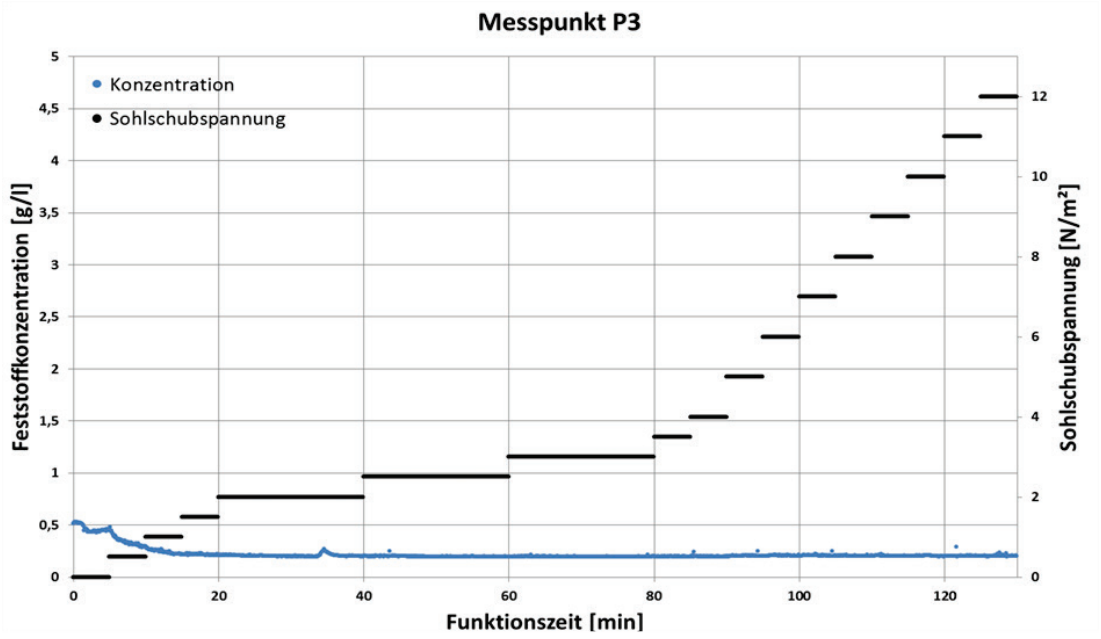


Abb. 53 Feststoffkonzentration über die Zeit am Messpunkt P3

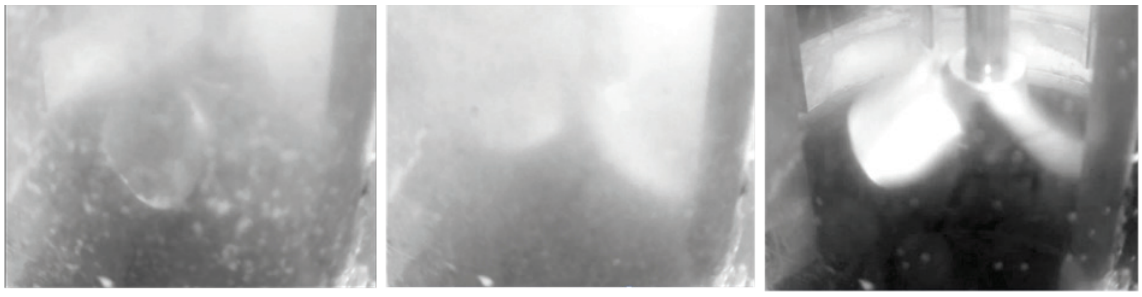


Abb. 54 Fotos der Trübung während der Messung an Messpunkt P3; links: Propeller noch in Ruhe; Mitte: Beginn der Propellerdrehung; rechts: gegen Ende der Messung

Am Messpunkt P4 sind am Anfang der Messung kleinere Feststoffkonzentrationssteigerungen von ca. 0,2 g/l jeweils zu Beginn einer höheren Sohlschubspannungsstufe verzeichnet (vgl. Abb. 55). Während der jeweiligen Sohlschubspannungsstufe ändert sich die Feststoffkonzentration jedoch nicht weiter, sondern bleibt auf dem zu Beginn der Stufe erreichten Wert. Die Anstiege werden deshalb noch nicht als Erosionsbeginn gedeutet. Zu Beginn der zehnten Spannungsstufe mit 5 N/m² nimmt die Feststoffkonzentration zu und steigert sich im Laufe der Stufe weiter. Der Anstieg ist mit 0,4 g/l ungefähr doppelt so groß wie die kleinen Anstiege zu Beginn der Messung. Es ist zwar im weiteren Verlauf wieder ein kleiner Abfall der Feststoffkonzentration zu verzeichnen, jedoch soll zur Sicherheit hier der Punkt des Erosionsbeginns festgelegt werden. Somit ergibt sich für den Messpunkt P4 eine kritische Sohlschubspannung von 5 N/m². Diese liegt somit über der an diesem

Punkt für ein MThw +1,0 m - Szenario modellierten Sohlschubspannung von 2,1 N/m². Der Punkt gilt daher ebenfalls als nicht erosionsgefährdet.

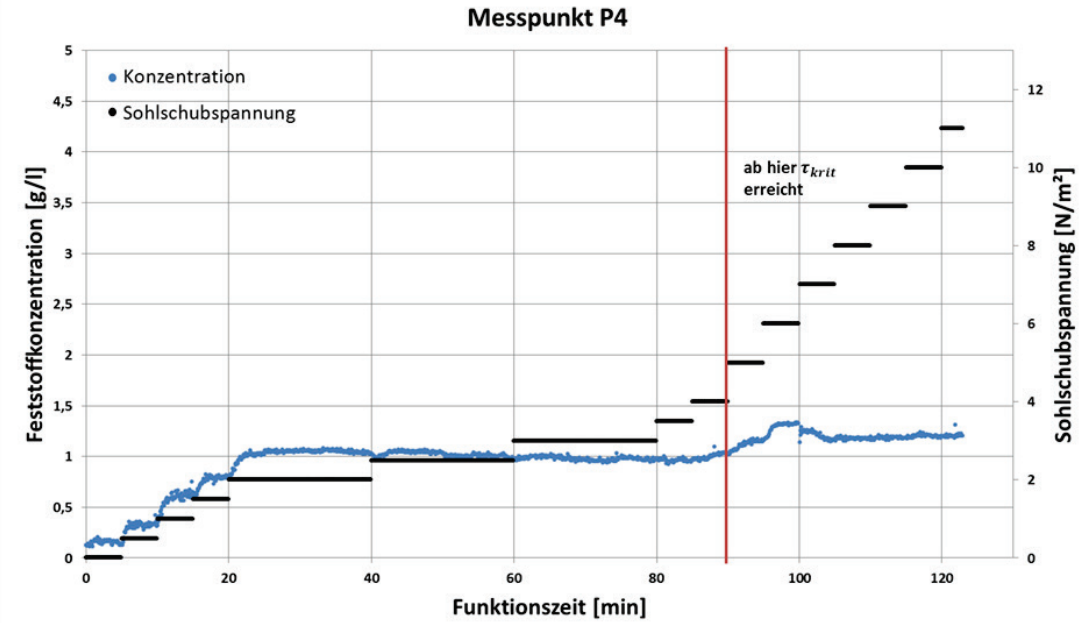


Abb. 55 Feststoffkonzentration über die Zeit am Messpunkt P4

An Messpunkt P5 sind insgesamt drei deutliche Anstiege der Feststoffkonzentration zu erkennen. Zu Beginn der ersten Sohlschubspannungsstufe erfolgt ein relativ hoher, sprunghafter Anstieg, der sich danach innerhalb der nächsten drei Stufen kontinuierlich wieder abbaut. Ein erneuter starker Anstieg, der auch über den Beginn der Sohlschubspannungsstufe heraus weiter besteht, findet beim Funktionszeitpunkt von 80 Minuten unter der Einwirkung einer Sohlschubspannung von 5 N/m² statt. Auch hiernach nimmt die Feststoffkonzentration über 20 Minuten bzw. über vier Sohlschubspannungsstufen zunächst wieder ab, um bei Einwirkung der Sohlschubspannung von 11 N/m² wieder sprunghaft anzusteigen. Bis zum Ende der Aufzeichnungen ist danach wieder ein Rückgang verzeichnet (siehe Abb. 56).

Diese drei Feststoffkonzentrationsanstiege sind als Erosionsbeginn jeweils unterschiedlicher Schichten zu deuten. Die oberste Schicht besitzt demnach eine kritische Sohlschubspannung von 0,5 N/m², die zweite Schicht eine von 5 N/m² und bei der dritten Schicht müssen 11 N/m² auf die Sohle wirken, um Erosion zu verursachen. In dem hier untersuchten Fall besteht die oberste Schicht wahrscheinlich aus Sediment, das erst vor kurzer Zeit mit Meerwasser bei Flut eingebracht wurde und sich abgelagert hat. Andernfalls kann es sich auch um Sediment handeln, das beim Aufstellen des Messgerätes aufgewirbelt wurde und sich vor der Messung wieder abgesetzt hat. Diese sehr instabile Schicht wird bei der Bestimmung der gesamten kritischen Sohlschubspannung außer Acht gelassen, da das Ziel der Untersuchung eine Bestimmung von

möglichen Erosionsschäden ist. Ein Abtragen der obersten, sehr lockeren Schicht ist nicht als Erosionsschaden zu werten. Stattdessen wird die kritische Sohlschubspannung der zweiten Schicht als hier anzusetzendes Maß angenommen. Die kritische Sohlschubspannung für den Messpunkt P5 ergibt sich damit zu 5 N/m². Weil die numerischen Simulationen für diesen Punkt bei einem MThw +1,0 m eine Sohlschubspannung von 1,2 N/m² ergaben, kann auch hier eine Gefährdung durch Erosion weitgehend ausgeschlossen werden.

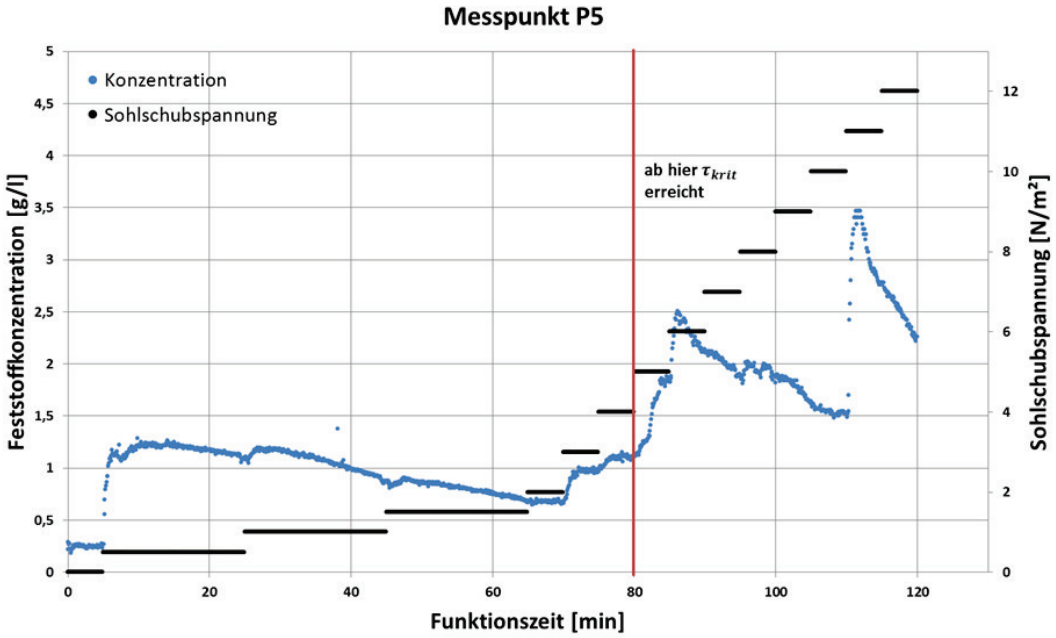


Abb. 56 Feststoffkonzentration über die Zeit am Messpunkt P5

Auf Grundlage der hier vorliegenden Ergebnisse der Laboruntersuchungen zur kritischen Sohlschubspannung sowie der Ergebnisse der numerischen Untersuchungen zur Öffnung der Sieltoranlage Osterwehl kann eine Gefährdung durch Erosion bei Wasserständen bis zu MThw +1 m an der geöffneten Sieltoranlage Osterwehl ausgeschlossen werden.

4.5.5 Trübungsmessungen

Die beiden eingesetzten CTD-Sonden verfügen zusätzlich über Sonden des Typs *Seapoint Turbidity Meter* zur Messung der Turbidität. Diese Sensoren werden nicht durch Umgebungslicht gestört und wurden mit der Trübungsstandardflüssigkeit Formazin kalibriert. Nach DIN EN ISO 7027 ist die Turbidität beziehungsweise die Trübung „die Verringerung der Durchsichtigkeit einer Flüssigkeit, verursacht durch die Gegenwart ungelöster Substanzen.“

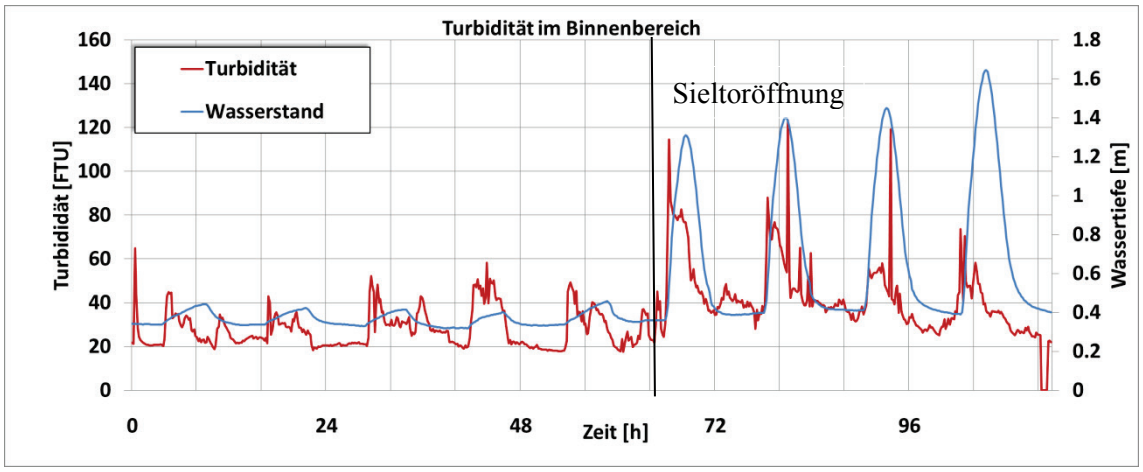


Abb. 57 Ergebnisse der Trübungsmessungen und Wassertiefe im Binnenbereich

Die Zeitreihe der Turbidität (siehe Abb. 57) lässt erkennen, dass mit der Öffnung des Sieltores am 25.02.2013 Wasser mit deutlich erhöhter Trübung in den Priel (CTD 2) eindringt. Allerdings muss gerade bei den beiden Tiden im Anschluss an die Sieltoröffnung berücksichtigt werden, dass sehr viel Eis mit dem Gezeitenstrom transportiert worden ist, wodurch diese Messungen wohlmöglich beeinflusst sind. Zur zweiten Tide am 26.02.2013 und der ersten Tide am 27.02.2013 hingegen war der Priel eisfrei und die Turbidität im Binnenbereich des Priels erreichte maximale Werte bis 120 FTU.

Da die Absorption des einfallenden Lichts bei der Messung der Trübung auch von der Form und den weiteren optischen Eigenschaften der suspendierten Stoffe abhängt, ist eine Berechnung der Feststoffkonzentration aus den Werten der Turbidität jedoch nicht möglich.

4.5.6 Salinität

Wie aus der Abb. 58 hervorgeht, betragen die Werte der Salinität im Außenbereich des Sieltores ca. 26 PSU. Im Binnenbereich des Priels liegen die Werte der Salinität mit 25 PSU vor der Öffnung des Sieltores etwas unterhalb der Werte im Außenbereich und sinken jeweils bei ablaufendem Wasser bis auf 20 PSU herab. Mit der Öffnung des Sieltores am 25.02.2013 gleichen sich die Salzgehalte im Binnen- und Außenbereich des Osterwehls auf einen annähernd gleichen Wert von 26 PSU an.

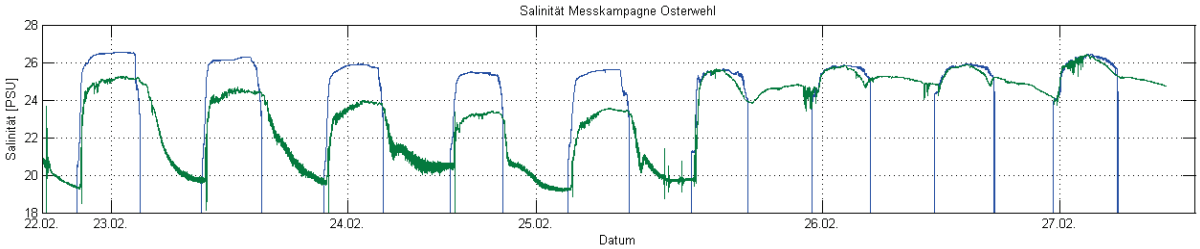


Abb. 58 Zeitreihe der Salinität an den Positionen der CTD-Sonden

Die niedrigen der Werte Salinität im Binnenbereich der Sieltoranlage können auf Grundlage dieser Messungen nicht geklärt werden. Zum einen könnte schmelzendes Eis in den Prielbereichen verantwortlich sein, zum anderen könnten diese Messungen auch ein Hinweis auf die von Müller (1917) erwähnten Süßwasserquellen auf Langeneß sein.

4.6 Zusammenfassung

Die im Rahmen der Messkampagne am Sieltor Osterwehl gewonnenen Daten bieten neue Möglichkeiten zur Modellierung der Sedimentablagerungen bei Landunter-Ereignissen auf den Halligen. Mit den Daten zu den Strömungsgeschwindigkeiten, Wasserständen und der Turbidität können die bestehenden numerischen Modelle weiter ausgebaut und genauere Aussagen über den Nutzen einer Sieltoröffnung bei erhöhten Wasserständen getroffen werden. Die mit Hilfe des EROSIMESS-Messgerätes ermittelten kritischen Sohlschubspannungen lassen ferner eine Aussage zu, bis zu welchen Wasserständen eine solche Öffnung des Sieltores ohne die Gefahr von Erosion im Prielbereich durchgeführt werden kann.

Da es im Rahmen der Messkampagne jedoch nicht zu einem Landunter gekommen ist, bleibt die Frage offen, welcher Anteil der im Wasser mitgeführten und aufgrund der erhöhten Turbidität deutlich erkennbaren Sedimente auch tatsächlich auf der Hallig abgelagert werden würde. Aus diesem Grund wäre eine Fortführung der Versuche bei höheren Wasserständen zwischen MThw +50 cm und MThw +100 cm wünschenswert. Der Vergleich des numerischen Modells mit den ermittelten kritischen Sohlschubspannungen lässt die Aussage zu, dass von einer Sieltoröffnung bei Wasserständen bis zu MThw + 1m keine Gefahr durch Erosion zu befürchten ist.

Die Messungen des Trübungssensors (vgl. Kap. 4.5.5) zeigen zudem eine signifikante Zunahme der Sedimentgehalte bereits bei niedrigen Tidehochwasserständen. Hätte man die Messungen bei Sturmflut durchgeführt, so wäre es auf Grund der erhöhten Strömungsgeschwindigkeiten zu einem weitaus höheren Sedimenteintrag gekommen. Dieser Sedimenteintrag würde zu einem Anwachsen der Halligen führen. Somit war der Feldversuch

erfolgreich, da ein Anwachsen der Halligen mit zunehmendem Meeresspiegelanstieg möglich ist. Die zukünftige Bewirtschaftungsstrategie sollte dieser Erkenntnis unter Berücksichtigung sonstiger Nutzungen der Halligflächen angepasst werden.

5 Warften

5.1 Einleitung

Die Eingangsgrößen für die im Rahmen des Projektes ZukunftHallig durchzuführende risikoorientierte Gefährdungsanalyse werden maßgeblich durch jene Parameter beeinflusst, die für die jeweilige Belastung durch eine Sturmflut verantwortlich sind. Neben der Beschaffenheit der Küstenlinie sowie der Bathymetrie sind es vor allem die meteorologischen Einflüsse wie Windgeschwindigkeit, Windrichtung und Winddauer, die für die Schwere einer Sturmflut verantwortlich sind und im Kapitel 2.1.1 schon aufgeführt worden sind. Die möglichen Einflüsse von Klimaänderungen und zu erarbeitende risikomindernde Maßnahmen können der nachfolgenden Abb. 59 entnommen werden.

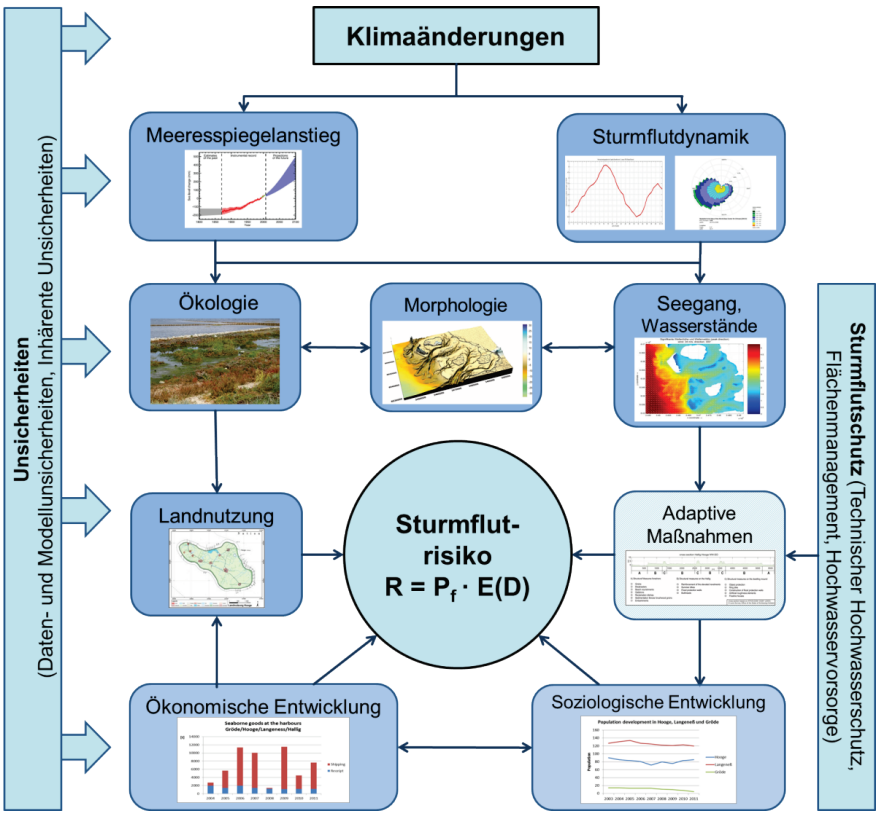


Abb. 59 Einfluss von Klimaänderungen auf das Risiko durch Sturmfluten

Diese Maßnahmen sollen im weiteren Verlauf des Projektes, aufbauend auf den Basisstrategien des Küstenschutzes, auf Kombinationsmöglichkeiten sowie deren Wirksamkeit untersucht werden. Neue Strategien beziehungsweise Kombinationen bestehender Strategien werden entwickelt, um ein Leben auf den Halligen auch unter veränderten klimatischen Bedingungen zu ermöglichen. Mit Hilfe der aufgebauten numerischen Modelle zur Strömungs- und Seegangssimulation werden hydrodynamische Analysen zur Wirksamkeit bestehender und möglicher neuer Küstenschutzmaßnahmen durchgeführt. Sensitivitätsstudien zeigen die hydrodynamischen Auswirkungen von Veränderungen an den Küstenschutzbauwerken wie beispielsweise der Erhöhung der Sommerdeiche und Halligigel oder einer Veränderung des Deichprofils.

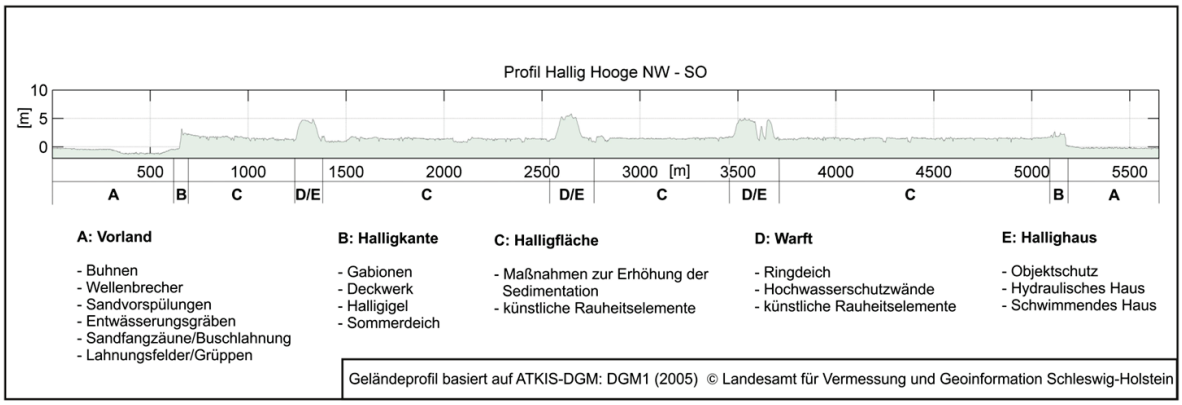


Abb. 60 Inventar möglicher Küstenschutzmaßnahmen und deren Bereiche am Beispiel eines Querprofils auf der Hallig Hooge

Die Abb. 60 zeigt am Beispiel eines Querprofils der Hallig Hooge ein Inventar möglicher Küstenschutzmaßnahmen und teilt die Regionen der Maßnahmen dabei in die folgenden fünf Bereiche ein:

- *A: Vorland*
- *B: Halligkante*
- *C: Halligfläche*
- *D: Warft*
- *E: Hallighaus*

5.2 Ermittlung der Sicherheitsstandards der Halligwarften

Die Halligen stellen nicht nur naturräumlich eine Besonderheit dar, sondern müssen auch im Rahmen von Risiko- und Gefährdungsanalysen speziell analysiert werden. Im Gegensatz zu den übrigen Küstenregionen der deutschen Nordseeküste können sie als nicht eingedeichte Inseln, deren Bebauungen auf Warften errichtet sind, im Rahmen von etablierten Risikoanalyseverfahren nicht untersucht werden. Die Hauptursache dafür liegt in der Tatsache begründet, dass die

wesentliche Gefahr für die zu schützenden Objekte einer Hallig nicht durch fließendes oder stehendes Wasser verursacht wird, sondern vielmehr durch Wellenüberlauf auf der Warft.

Aus diesem Grund wird im Rahmen des Projektes Zukunft Hallig eine neue Methode der risikobasierten Gefährdungsanalyse für die Halligen entwickelt, die auf diese speziellen Bedingungen adaptiert ist. Aus den Ergebnissen der numerischen Seegangsmodellierung (vgl. Kap. 2.6) und den DGM1-Daten können die Wellenüberlaufraten der einzelnen Warften für unterschiedliche Szenarien berechnet werden. Zusammen mit dem vorhandenen Gebäudebestand der jeweiligen Warft lässt sich so risikobasiert die Gefährdung einzelner Warften miteinander vergleichen.

Die Berechnung des Wellenüberlaufs wird mit Hilfe der Formel (5.1) nach EAK (2002) durchgeführt:

$$q = 0{,}038\,\gamma_b\sqrt{2gH_S^3}\;\frac{\tan\alpha}{\sqrt{H_S/L_0}}\exp\left(-3{,}7\;\frac{R_C}{H_S}\;\frac{\sqrt{H_S/L_0}}{\tan\alpha}\;\frac{1}{\gamma_b\gamma_f\gamma_\theta}\right) \tag{5.1}$$

Dabei darf der folgende Maximalwert nicht überschritten werden:

$$q = 0.096\,\sqrt{2gH_S^3}\;\exp\left(-1{,}85\;\frac{R_C}{H_s}\frac{1}{\gamma_\theta\gamma_f}\right) \tag{5.2}$$

Mit:

q		mittlere Wellenüberlaufrate	[m³/(m·s)]
L_0	$=\frac{gT_m^2}{2\pi}$	Wellenlänge im Tiefwasser	[m]
T_m		mittlere Wellenperiode	[s]
R_C		Freibordhöhe	[m]
α		Deichneigung	[°]
γ_f		Empirischer Beiwert für den Einfluss der Böschungsrauheit	[-]
γ_θ		Empirischer Beiwert für den Einfluss der Wellenangriffsrichtung	[-]
γ_b		Empirischer Beiwert für den Einfluss einer Berme	[-]

Die mittlere Wellenperiode T_m, die signifikante Wellenhöhe H_S am Warftfuß und die Wellenangriffsrichtung werden aus den Ergebnissen der mit Delft3D durchgeführten numerischen

Simulationen für unterschiedliche Szenarien ermittelt. Die Freibordhöhe R_C ergibt sich aus der Differenz der Geländehöhe der Wartoberkante und dem jeweiligen Wasserstand.

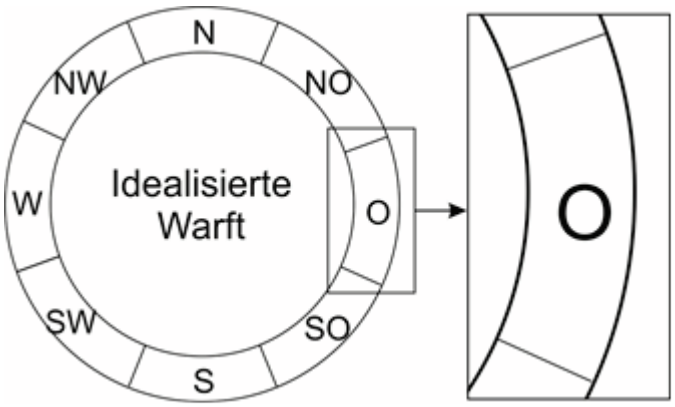


Abb. 61 Einteilung einer idealisierten Warft in acht Richtungsklassen

Anhand der Fallrichtung wird die Warft in die in der Abb. 61 dargestellten acht Ausrichtungsklassen unterteilt. Die Aufteilung erfolgt anhand der Haupthimmelsrichtungen. Sie ist entscheidend, da je nach Wellenangriffsrichtung die Wellenüberlaufraten unterschiedlich stark abgemindert werden. Das maßgebliche Profil befindet sich an der Stelle, wo die Brecherkennzahl ξ am größten und die Kronenhöhe am geringsten ist. Die Brecherkennzahl verhält sich linear zum Tangens des Steigungswinkels α. Sie wird also dort am größten, wo die horizontale Entfernung geteilt durch die vertikale Entfernung zwischen Warftfuss und Warftkrone den kleinsten Wert ergibt.

5.2.1 Eingangsdaten

Die Bemessungswasserstände für alle Halligen werden vom LKN-SH zur Verfügung gestellt. In Tab. 17 sind die maßgebenden Wasserstände für die einzelnen Bemessungshochwasserstände dargestellt. Die Werte HW_{20} bis HW_{200} sind Referenzwasserstände für den aktuellen Zustand ohne Klimazuschlag. Die Werte des HW_{Bem} beziehen sich auf das Jahr 2100 und umfassen die Referenzwasserstände HW_{200} zuzüglich eines Klimazuschlages von 50 cm. Die in der Tab. 17 dargestellten Bemessungswasserstände dienen als Eingangsrandbedingungen für die numerische Seegangsmodellierung des nordfriesischen Wattenmeers mit Delft3D (vgl. Kap. 2.6).

Tab. 17 Regionalisierte Referenzwasserstände für das Untersuchungsgebiet (bereitgestellt vom LKN-SH)

Wasserstand [cm ü. NN]	HW_{20}	HW_{50}	HW_{100}	HW_{200}	HW_{Bem}
Langeness Ost, Mitte	455	485	505	520	570
Langeness West	440	465	485	510	560
Hooge	430	460	475	490	540
Oland	465	495	515	530	580
Gröde	470	500	520	540	590
Südfall	480	510	530	550	600
Nordstrandischmoor	485	520	540	560	610
Norderoog	430	460	475	490	540
Süderoog	445	475	480	490	540
Habel	475	505	530	540	590
Hamburger Hallig	485	515	535	555	605

Die Windangriffsrichtung wird in den numerischen Seegangsimulationen mit 240°, 270° und 300° und einer Geschwindigkeit von 34 m/s angesetzt. Jedes Warftprofil wird auf seine maßgebenden Eingangsparameter für den Wellenüberlauf infolge der verschiedenen Windangriffsrichtungen zu untersuchen. Dabei werden jeweils die Parameter übergeben, die die höchsten signifikanten Wellenhöhen aufweisen. Die zu verwendenden Seegangsparameter sind die signifikante Wellenhöhe Hs, die mittlere Wellenperiode Tm und die Wellenangriffsrichtung. Die Ergebnisse der Wellenüberlaufraten für eine Warft in Abhängigkeit der unterschiedlichen Wasserstände setzen sich somit aus den jeweils ungünstigsten Kombinationen der Richtungsklassen zusammen.

5.2.2 Quantifizierung des Schutzstandards der Halligwarften

Die Halligwarften unterscheiden sich in ihrer jeweiligen Sicherheit gegenüber Sturmflutereignissen. Um den jeweiligen Schutzstandard der Halligwarften zu quantifizieren, wird die Wellenüberlaufrate q an den Warftprofilen verglichen und der maximal kehrbare Wasserstand HW ermittelt. Dafür erfolgt zunächst eine Einteilung der Warften in drei verschiedene Warftkategorien, für die unterschiedliche Wellenüberlaufkriterien gelten. Die erste Kategorie besteht aus Warften mit Ringdeich, zur zweiten Kategorie zählen Warften ohne Ringdeich und zur dritten Kategorie Warften mit nicht geschlossenem Ringdeich, bei denen Wasser ein- und ausströmen kann.

Eine typische Warft ohne Ringdeich ist die Westerwarft auf Hooge. Sie ist relativ eben, besitzt keinen Fething und auch keine Erhöhung auf der Westseite gegenüber Wellenangriff (vgl. Abb. 62a).

Bei den Warften mit Ringdeich ist das Wasser, welches durch Wellenüberlauf die Warftkrone überschreitet, im Warftkörper gestaut und kann nur schwer wieder abfließen. Dadurch wird die potentielle Einstauhöhe der Häuser erhöht (vgl. Abb. 62b).

Ein Vorteil der dritten Kategorie, der Warften mit nicht durchgängigem Ringdeich, ist die Abflussmöglichkeit des Wellenüberlaufes aufgrund eines Durchlasses im Ringdeich. Innerhalb dieser letzten Kategorie gibt es einige Warften, die zusätzlich über Stöpen verfügen. Da es bei senkrechten Wänden jedoch schneller zu Wellenüberlauf über die Krone kommen kann als bei einem langsam ansteigendem Warftprofil, wird dadurch der Schutzstandard der Warft gesenkt. Besteht im Ringdeich eine dem Wellenangriff zugewandte Öffnung, wirkt sich auch diese negativ auf die Sicherheit der Warft aus (vgl. Abb. 62c). Ob die Ringdeichöffnung also positive oder negative Auswirkungen hat, muss im Einzelnen geprüft werden.

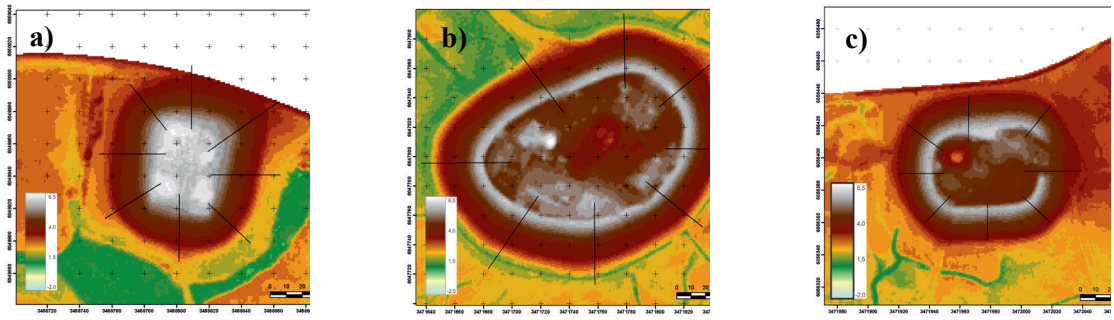


Abb. 62 Beispiele der drei Warftkategorien: a) Warft ohne Ringdeich (Westerwarft auf Hooge); b) Warft mit geschlossenem Ringdeich (Ockenswarft auf Hooge); c) Warft mit nicht durchgängigem Ringdeich (Süderhörn auf Langeneß)

In Tab. 18 ist die Einteilung aller Warften der Halligen Langeneß, Hooge und Nordstrandischmoor in eine der drei Kategorien dargestellt.

Tab. 18 Einteilung der Warften in verschiedene Kategorien

	Warften	Ringdeich	Öffnungsrichtung	Kategorie
Langeness	Rixwarft	ja	Norden & Osten	3
	Hilligenley	ja	Osten	3
	Kirchhofswarft	nein		1
	Mayenswarft	ja	Osten	3
	Süderhörn	ja	Osten	3
	Norderhörn	ja	Osten	3
	Treuberg	nein		1
	Ketelswarft	ja		2
	Tamenswarft	nein		1
	Christianswarft	nein		1

	Tadenswarft	ja	Süden	3
	Kirchwarft	ja	Westen & Süden	3
	Honkenswarft	ja	Norden, Süden & Osten	3
	Peterswarft	ja	Osten	3
	Neuwarft	ja	Osten	3
	Petershaitzwarft	nein		1
	Hunnenswarft	ja	Norden, Süden & Osten	3
	Bandixwarft	ja	Süden & Osten	3
Hooge	Westerwarft	nein		1
	Ipkenswarft	nein		1
	Volkerswarft	Ja		2
	Lorenzwarft	nein		1
	Ockelützwaft	nein		1
	Kirchwarft	ja		2
	Backenswarft	ja		2
	Hanswarft	nein		1
	Ockenswarft	ja		2
Nordstrandischmoor	Norderwarft	ja	Osten	3
	Halberweg	nein		1
	Amalienwarft	nein		1
	Neuwarft	nein		1

Zur Quantifizierung des Schutzstandards wurde die in Abb. 63 dargestellte Einstufung verwendet. Sie ist an die Schadenseinteilung infolge Wellenüberlaufs bei Deichen angelehnt und dabei an zwei wesentliche Unterschiede angepasst. Zum einen besitzen Warften im Gegensatz zu Deichen nur eine marginale Binnenböschung, an der Wasser abströmen kann, zum anderen weisen Warfthäuser deutlich größere Widerstände gegenüber Wellenüberlauf auf als die meisten hinter einem normalen Deich gelegenen Gebäude. Das Erdgeschoss vieler, vor allem neuerer nach 1962 erbauter, Warftgebäude befindet sich um einen halben Meter höher als die Warftoberkante. Die dadurch gewonnene Aussteifung wirkt unterstützend, so dass diese Gebäude auf einen höheren Wassereinstau und auf höhere Impulsschläge infolge eines Wasserschwalls bemessen sind.

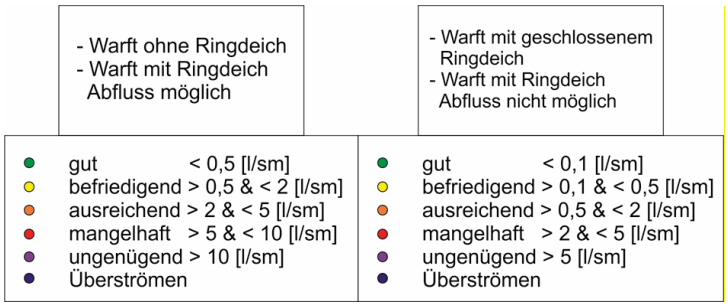


Abb. 63 Einteilung des Schutzstandards in Kategorien durch Wellenüberlauf an Warften in Anlehnung an die Anhaltswerte zur Wirkung von Wellenüberlaufraten nach EAK (2002)

Abb. 64 zeigt exemplarisch für die Backenswarft auf Hooge die für jede der 31 Warften auf Langeneß, Hooge und Nordstrandischmoor mit Hilfe der Kategorieeinordnung durchgeführte Visualisierung der Ergebnisse der Wellenüberlaufberechnungen. Mit diesen lassen sich die Schwachstellen der Warften schnell bestimmen. Im Fall der Backenswarft ist die Schwachstelle die nordwestliche Warftflanke, an der durch die Steigung des Profils und durch den Wellenangriff aus Nordwest eine Anfälligkeit gegenüber größeren Wellenüberlaufraten besteht. Insgesamt ist die Backenswarft aktuell somit für ein alle 50 Jahre wiederkehrendes Hochwasser bemessen. Dabei gilt bei diesen Untersuchungen, dass eine Warft als bemessen eingestuft wird, solange alle Richtungskategorien mindestens als ausreichend bei den Wellenüberlaufraten bewertet worden sind.

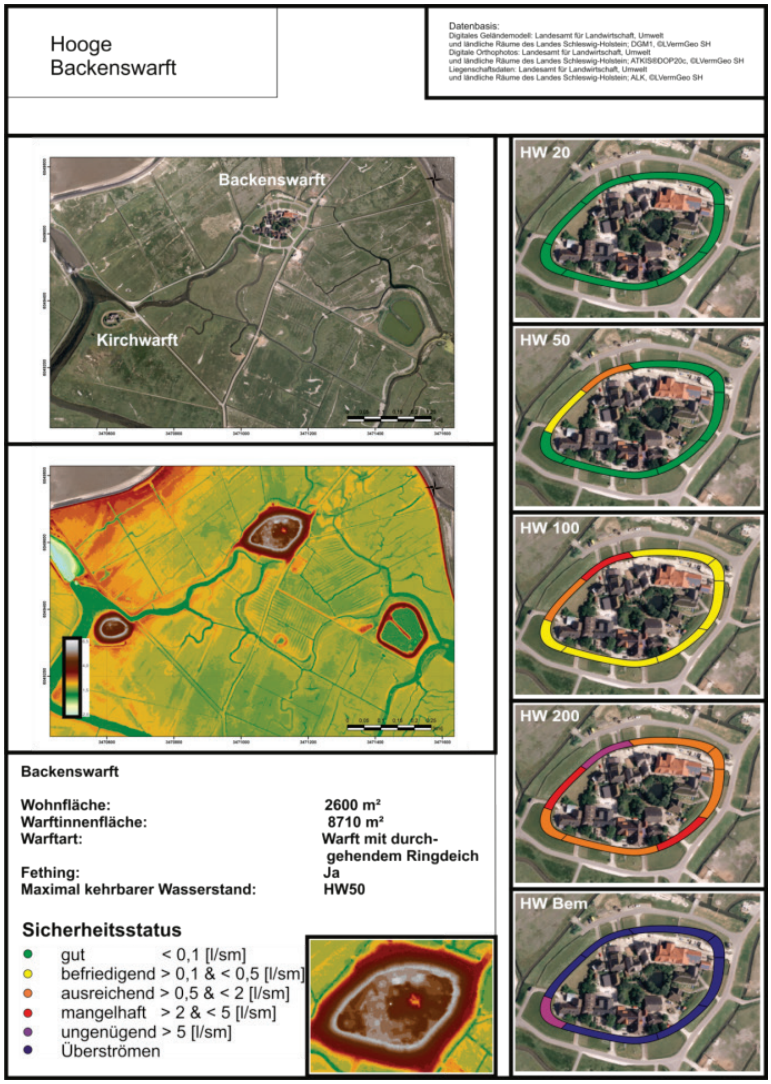


Abb. 64 Mittlere Wellenüberlaufraten der Backenswarft auf Hooge

In der Tab. 19 sind die maximal kehrbaren Wasserstände für alle zu untersuchenden Warften der Halligen Hooge, Langeneß und Nordstrandischmoor dargestellt. Auffällig ist, dass alle

Warften nach diesen Untersuchungen zu gering bemessen sind. Viele der Warften auf Langeneß können kein HW_{20} kehren und werden an einigen Profilen schon bei einem HW_{20} überströmt. Dabei ist jedoch anzumerken, dass zum Zeitpunkt der Untersuchungen noch keine Seegangsdaten für den Bereich auf den Halligen zum Kalibrieren des numerischen Seegangmodells vorgelegen haben. Daten der Sturmflut Xaver vom 05./06. Dezember 2013 haben jedoch im Nachhinein gezeigt, dass die Wellenhöhen im numerischen Modell überschätzt wurden und die maximal kehrbaren Wasserstände in Bezug auf den Anteil der Wellenüberlaufrate höher liegen dürften als hier dargestellt. Die genauen Untersuchungsergebnisse der Quantifizierung des Schutzstandards der Warften befinden sich im Anhang.

Tab. 19 Maximal kehrbare Wasserstände der zu untersuchenden Warften

	Warft	Kehrbarer Wasserstand
Langeness	Rixwarft	< HW20
	Kirchhofswarft	< HW20
	Mayenswarft	< HW20
	Süderhörn	HW20
	Norderhörn	< HW20
	Treuberg	< HW20
	Ketelswarft	HW20
	Tamenswarft	< HW20
	Christianswarft	< HW20
	Tadenswarft	< HW20
	Kirchwarft	HW20
	Honkenswarft	HW20
	Peterswarft	< HW20
	Neuwarft	HW20
	Petershaitzwarft	< HW20
	Hunnenswarft	HW20
	Bandixwarft	HW20
Hooge	Westerwarft	HW200
	Ipkenswarft	HW20
	Volkerswarft	HW20
	Lorenzwarft	HW20
	Ockelützwaft	HW20
	Kirchwarft	HW50
	Backenswarft	HW50
	Hanswarft	HW20
	Ockenswarft	HW100
Nordstrandischmoor	Norderwarft	< HW20
	Halberweg	HW20
	Amalienwarft	< HW20
	Neuwarft	HW20

5.3 Risikoorientierte Gefährdungsanalyse

Wie zu Beginn des Kapitels 5.2 erwähnt, müssen die Halligen im Rahmen von Risiko- und Gefährdungsanalysen speziell analysiert werden, da die gängigen Schadensfunktionen als Eingangsgrößen mit Wasserständen im jeweiligen Gebäude rechnen und auf den Warften die Gefährdung vor allem durch Wellenüberlauf verursacht wird. Aus diesem Grund werden in diesem Kapitel zwei Ansätze einer risikoorientierten Gefährdungsanalyse für die Halligwarften dargestellt. Im ersten Ansatz werden die im vorherigen Kapitel klassifizierten Schutzstandards der Warften mit tangiblen oder intangiblen Schadenskategorien der bebauten Fläche beziehungsweise der kategorisierten Anzahl der auf der jeweiligen Warft lebenden Menschen multipliziert. Die Ergebnisse dieses Ansatzes sind in der Abb. 65 dargestellt.

Hallig	Warften	Kehrbares Ereignis	Priorität der Verstärkung aufgrund Wellenüberlauf	Anzahl Wohn-häuser	Priorität der Verstärkung aufgrund Häuseranzahl	Einwohner	Schutz-räume	gesamte bebaute Fläche [m²]	Priorität aufgrund bebauter Fläche	Gebäude in Sonder-kategorien	Prioritäten-summe Häuser	Priorität Häuser-anzahl	Prioritäten-summe Fläche	Priorität bebaute Fläche
Langeness	Rixwarft	< HW20	2	1	4	1	1	189,828	5		10	3	12	4
	Kirchhofswarft	< HW20	2	2	4	7	2	649,6	3		10	3	8	2
	Mayenswarft	< HW20	2	6	2	12	4	1442,95	1		6	2	4	1
	Süderhörn	HW20	3	3	3	3	2	696,48	3		9	3	9	3
	Norderhörn	< HW20	1	5	3	13	3	1249,46	2		7	2	5	1
	Treuberg	< HW20	1	1	4	2	0	214,09	4		9	3	9	3
	Ketelswarft	HW20	3	9	1	16	3	1827,18	1	2	5	1	5	1
	Tameswarft	< HW20	3	1	4	1	1	443,04	4		11	4	11	4
	Christianswarft	< HW20	2	2	4	4	1	579,05	4		10	3	10	3
	Tadenswarft	< HW20	3	4	3	7	3	949,19	3		9	3	9	3
	Kirchwarft	HW20	4	2	4	8	2	814,34	3	3	12	4	10	3
	Honkenswarft	HW20	4	6	2	10	2	1419,38	1		8	2	6	2
	Peterswarft	< HW20	2	1	4	1	1	553,93	4		10	3	10	3
	Neuwarft	HW20	3	2	4	2	1	457,56	4		11	4	11	4
	Petershaitzwarft	< HW20	2	1	4	1	1	214,4	4		10	3	10	3
	Hunnenswarft	HW20	3	5	3	13	5	1711,91	1		9	3	5	1
	Bandixwarft	HW20	4	2	4	4	2	780,05	3		12	4	10	3
Hooge	Westerwarft	HW200	5	4	3	5	1	505,57	4		11	4	13	5
	Ipkenswarft	HW20	3	3	3	3	2	624,09	3		9	3	9	3
	Volkerswarft	HW20	4	0	5	1	1	562,12	4		14	5	12	4
	Lorenzwarft	HW20	4	4	3	1	1	1670,49	1		10	3	6	2
	Ockelützwarft	HW20	3	8	2	9	5	1585,02	1	1	7	2	5	1
	Kirchwarft	HW50	4	0	5	2	1	445,5	4	3	14	5	12	4
	Backenswarft	HW50	5	10	1	30	9	2869,34	1		7	2	7	2
	Hanswarft	HW20	3	13	1	37	13	4239,77	1	1	5	1	5	1
	Ockenswarft	HW100	5	9	1	14	7	1942,23	1		7	2	7	2
Nordstrand-ischmoor	Norderwarft	< HW20	2	1	4	7	1	396,76	4		10	3	10	3
	Halberweg	HW20	3	1	4	1	1	132,36	5		11	4	13	5
	Amalienwarft	< HW20	3	0	5	0	1	131,75	5		13	5	13	5
	Neuwarft	HW20	4	2	4	14	2	805,25	3		12	4	10	3

Prioritätenklassen	
1	Überströmen ab HW 20 // Zustand „mangelhaft" < HW 20
2	Überströmen ab HW 50 // Zustand „mangelhaft" < HW 20
3	Überströmen ab HW 100 // Zustand „mangelhaft" ab HW 20
4	Überströmen ab HW 200 // Zustand „mangelhaft" ab HW 50
5	Überströmen ab HW Bem. // Zustand „mangelhaft" ab HW 100

Häuserpriorität	
max. Anzahl Häuser	Kategorie
13	1
8	2
5	3
2	4
0	5

Flächenpriorität	
Fläche bis [m²]	Kategorie
1900	1
1400	2
1000	3
600	4
200	5

Gesamtprioritätenkategorieneinteilung	
Gesamtpriorität	Summe (bis)
1	5
2	8
3	10
4	12
5	15

Abb. 65 Ergebnisse der risikoorientierten Gefährdungsanalyse für die Halligwarften

Zum besseren Verständnis sind die zur Berechnung der jeweiligen Gesamtpriorität notwendigen Hilfsspalten in der Abb. 65 mit aufgeführt. Während sich die Prioritäten der Warftverstärkungen aufgrund des Wellenüberlaufes aus den in Kap. 5.2.2 aufgeführten Untersuchungen ergeben, sind die Kategorien für die Anzahl der Häuser sowie der bebauten Fläche zusätzlich im unteren Teil der Abbildung dargestellt. Bei der Ermittlung der beiden Gesamtprioritäten („Priorität Häuseranzahl" und „Priorität bebaute Fläche") wurden diese

Häuserpriorität und die Flächenpriorität mit dem Faktor 2 versehen. Beim Vergleich der beiden Gesamtprioritäten fällt auf, dass ein maximaler Unterschied von zwei Prioritätenkategorien bei der Hunnenswarft auf Langeneß auftritt. Auf dieser Warft befindet sich mit insgesamt fünf Gebäuden die maximale Anzahl der Kategorie 3 bei den Häuserprioritäten. Allerdings besitzen diese relativ wenigen Gebäude zusammen mit ca. 1711 m² eine relativ große Gesamtfläche.

Da bei diesem Ansatz der risikoorientierten Gefährdungsanalyse ein großer streitbarer Punkt die jeweilige Zuordnung der Prioritätskategorien zu der Anzahl der Häuser oder der bebauten Fläche darstellt, wird im zweiten Ansatz auf eine Zuordnung von Kategorien verzichtet und stattdessen eine Berechnung der Zeit bis zum vollständigen Befüllen der Warft vorgenommen. In der Tab. 20 sind die Eingangsgrößen für die Berechnung der Füllzeiten der Warften mit geschlossenem Ringdeich dargestellt. Dabei wurde für jede Warft mit Hilfe des DGM1 und der ALK-Daten das Volumen berechnet, das benötigt wird, um die Warft bis zum Ringdeich zu befüllen. Die Häuser wurden dabei als wasserdicht angesehen und vom jeweiligen Volumen subtrahiert.

Tab. 20 Eingangsgrößen für die Berechnung der Füllzeiten der Warften mit geschlossenem Ringdeich

Name	Ketelswarft	Volkerswarft	Kirchwarft	Backenswarft	Ockenswarft
bebaute Fläche [m²]	1827.00	562.00	446.00	2869.00	1942.00
Warfthöhe [m]	4.30	4.16	4.20	4.50	4.43
Warftvolumen [m³]	6376.48	2541.00	3063.15	7912.26	10206.67
red. Warftvolumen [m³]	5280.28	1967.76	2536.87	5588.37	8206.41
Ringdeichlänge [m]	410.12	196.96	204.11	398.62	396.44
q [l/m*s] für HW 20	1.03	0.14	0.11	0.01	0.0014
$t_{Füllung\ bei\ HW\ 20}$ [h]	3.46	20.07	31.35	336.57	3971.16
q [l/m*s] für HW 50	11.55	2.08	1.40	0.30	0.06
$t_{Füllung\ bei\ HW\ 50}$ [h]	0.31	1.33	2.47	12.97	102.61
q [l/m*s] für HW 100		7.22	4.74	1.24	0.28
$t_{Füllung\ bei\ HW\ 100}$ [h]		0.38	0.73	3.15	20.68
q [l/m*s] für HW 200		23.32	16.62	4.64	1.17
$t_{Füllung\ bei\ HW\ 200}$ [h]		0.12	0.21	0.84	4.94

Die Wellenüberlaufraten q stellen Mittelwerte aus allen acht Richtungsklassen für die jeweiligen Wasserstände dar. Die Ergebnisse zeigen, dass beispielsweise die Kirchwarft auf Hooge bei einem HW_{100} innerhalb von 0,73 Stunden (ca. 44 Minuten) komplett vollgelaufen ist. Die Ketelswarft wird ab einem HW_{100} überströmt. In diesem Fall berechnet sich q nach der Formel für den Wehrüberfall.

6 Entwicklung von alternativen Küstenschutz- und Bewirtschaftungsstrategien

6.1 Allgemein

Im Rahmen des Projektes wurden zwei Zukunftworkshops auf den Halligen Hooge und Langeneß unter der Leitung des Instituts für Soziologie, Lehrstuhl Technik und Organisationssoziologie (IfS) der RWTH Aachen durchgeführt. Das IfS lud zu diesem Workshop sowohl auf die Hallig Hooge am 17.06.2013 als auch auf die Hallig Langeneß am 18.06 2013 ein. Ziel dieses Workshops war es, die Halligbewohner und Ingenieure, die im Verbundprojekt beteiligt sind, zusammenzubringen und Raum für einen Dialog zu schaffen. Hierbei sollte es zu einem Austausch des fachlichen Wissens und der bereits gewonnenen Erkenntnisse aus dem Projekt seitens der Ingenieure mit den Erfahrungen und Wünschen der Bewohner kommen. Es sollte aus diesem Austausch eine Ideensammlung entstehen, die potentielle zukünftige Küstenschutzmaßnahmen hervorbringt. Dies soll zum einen technisch innovativ sein und zum anderen auf die Akzeptanz der Halligbewohner stoßen.

Während dieser Workshops entstand ein umfangreicher Katalog an Ideen für zukünftige Maßnahmen des Küstenschutzes auf den Halligen. Im Folgenden befasst sich dieses Kapitel mit dieser Ideensammlung und der wasserbaulichen Bewertung ausgewählter Maßnahmen.

6.2 Ideengenerierung zukünftiger Küstenschutzmaßnahmen

Die in der Abb. 66 dargestellten Maßnahmen wurden aus dem Gesamtkatalog der generierten Ideen für Untersuchungen von den Halligbewohnern auf Hooge (links) und Langeneß (rechts) gewählt, um sie in weiteren Schritten vom Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft der RWTH Aachen untersuchen zu lassen. Die jeweiligen Untersuchungen für die einzelnen Maßnahmen folgen in den Kap. 6.4 bis 6.13.

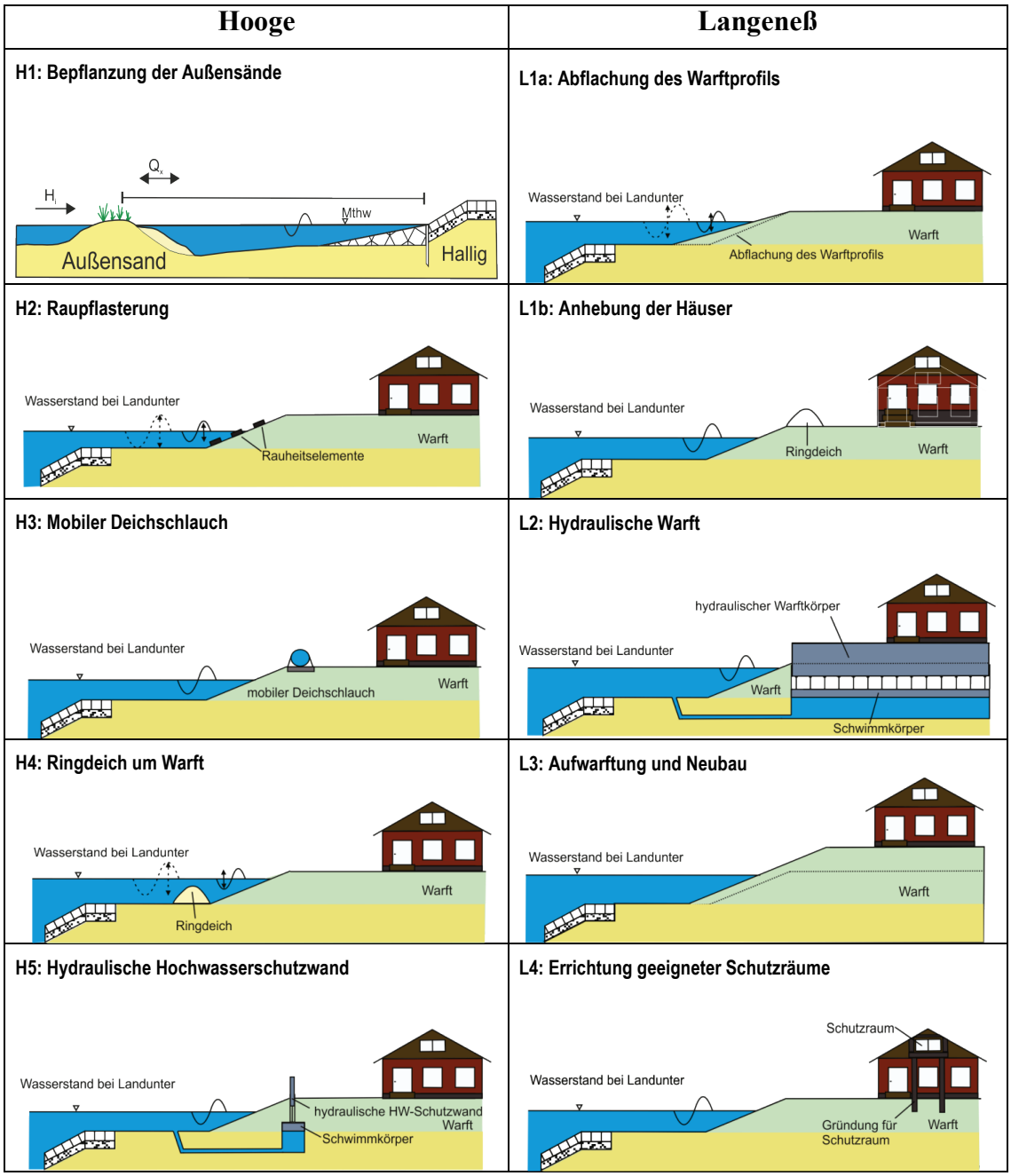


Abb. 66 Schematische Darstellung der während der Zukunftworkshops auf Hooge (links) und Langeneß (rechts) entwickelten Ideen

6.3 Beschreibung und Bewertung der Ideen der Zukunftworkshops

In den folgenden Kapiteln erfolgt eine Beschreibung und Bewertung der im Rahmen der Zukunftworkshops auf Hooge und Langeneß entwickelten Ideen für zukünftige Küstenschutzmaßnahmen für die Halligen. Die Bewertung der hydrodynamischen Wirksamkeit der zukünftigen Küstenschutzmaßnahmen bezieht sich auf die folgenden Aspekte:

- *Wasserstände*
- *Seegang*
- *Wellenüberlauf*

Die Bewertung der jeweiligen Machbarkeit der zukünftigen Küstenschutzmaßnahmen bezieht sich im Gegensatz dazu auf diese Aspekte:

- *Betriebssicherheit*
- *Bauaufwand*
- *Landschaftsbild*
- *Naturschutz*

Da die zu untersuchenden zehn Maßnahmen von den Halligbewohnern selbst entwickelt und für weitere Untersuchungen vorgeschlagen worden sind, ist von einer allgemeinen Akzeptanz der Maßnahmen auszugehen. Aus diesem Grund wird eine weitere Bewertung der Akzeptanz hier nicht vorgenommen.

Als ein vergleichbares Kriterium für die Wirksamkeit der jeweiligen Maßnahme wird der Einfluss auf die Wellenüberlaufrate dargestellt. Dieser wird basierend auf den Formeln für die Wellenüberlaufrate bei Wellenspektren des Eurotop-Manual (Pullen, 2007) berechnet. Im Vergleich zu Formel (3.10) wird hier die vollständige Formel gezeigt und nicht die modifizierte Freibordhöhe A_C verwendet:

$$\frac{q}{\sqrt{g \cdot H_{m0}^3}} = \frac{0{,}067}{\sqrt{\tan\alpha}} \gamma_b \cdot \xi_{m-1,0} \cdot \exp(-4{,}75 \frac{R_C}{\xi_{m-1,0} \cdot H_{m0} \cdot \gamma_b \cdot \gamma_f \cdot \gamma_\beta \cdot \gamma_v}) \tag{6.1}$$

Das Maximum ist dabei definiert als:

$$\frac{q}{\sqrt{g \cdot H_{m0}^3}} = 0{,}2 \cdot \exp\left(-2{,}6 \frac{R_C}{H_{m0} \cdot \gamma_f \cdot \gamma_\beta}\right) \tag{6.2}$$

mit:

g	=	Erdbeschleunigung	[m/s²]
q	=	mittlere Wellenüberlaufrate	[m³/s · m]
H_{m0}	=	signifikante Wellenhöhe	[m]
α	=	Böschungsneigung der Luv-Seite	[°]
$\xi_{m-1,0}$	=	$\tan\alpha/(H_{m0}/L_{m-1,0})^{1/2}$ Brecherparameter	[-]
γ_b	=	Empirischer Beiwert für den Einfluss einer Berme	[-]
γ_f	=	Empirischer Beiwert für den Einfluss der Böschungsrauheit	[-]
γ_β		Empirischer Beiwert für den Einfluss der Wellenangriffsrichtung	[-]
γ_v		Empirischer Beiwert für den Einfluss einer Kronenmauer	[-]

6.4 H1 - Bepflanzung und Verbindung der Außensände

Diese Untersuchung soll Aufschluss darüber geben, in welcher Weise eine Sandaufspülung beziehungsweise Schließung des Hoogeloches zwischen den Sandplaten Japsand und Norderoogsand das Seegangsklima beeinflusst.

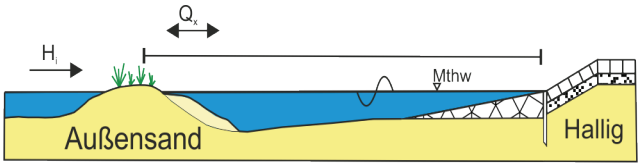


Abb. 67 Schematische Darstellung der Bepflanzung und Verbindung der Außensände

Für die Untersuchung wurde die zentral auf Hooge gelegene Hanswarft gewählt, von der aus ein sechs Kilometer langes Untersuchungsprofil in südwestliche Richtung verläuft. Der Referenzzustand (links) und die Sandaufspülung im Bereich des Hoogeloches (rechts) sind in Abb. 68 aufgezeigt.

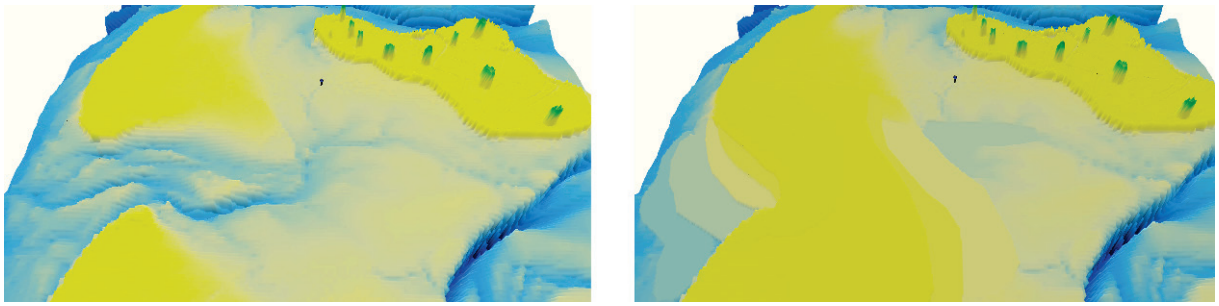


Abb. 68 Referenzzustand (links) und Sandaufspülung (rechts)

Der Anfangspunkt des Profils (vgl. Abb. 69) liegt 2 m unterhalb von Normalhöhennull (NHN) im Hoogeloch zwischen den Sandplaten Japsand und Norderoogsand. Auf den ersten zweieinhalb Profilkilometern bleibt die Geländehöhe unterhalb von NHN und ist von einem unregelmäßigem Verlauf mit bis zu einem Meter hohen Geländesprüngen gekennzeichnet.

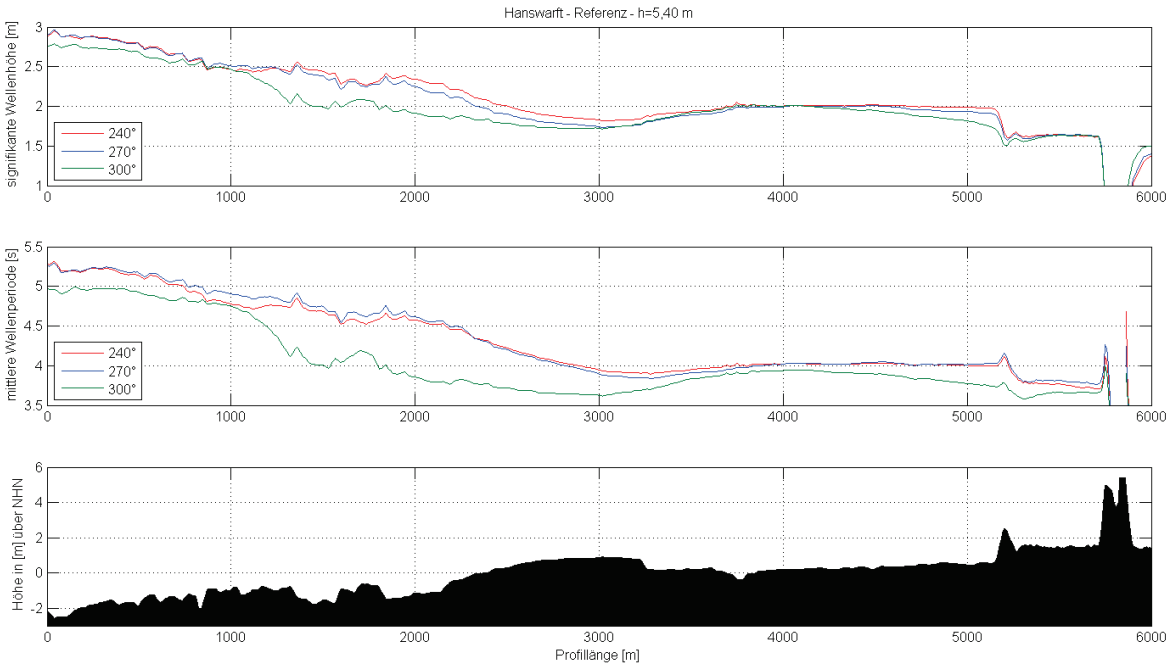


Abb. 69 Referenzzustand für die Seegangs- und Windrichtungen 240°, 270° und 300°

Zwischen den Profilstationen 2500 m und 3200 m kreuzt das Profil den südlichen Rand des Japsandes, sodass das Höhenniveau bis auf einem Meter über NHN ansteigt. Zwischen dem Sandplatenrand und der Halligkante (Profilstation 5150 m) liegt die Geländehöhe etwa auf dem Normalhöhennullpunkt, wobei eine steigende Tendenz zu beobachten ist. Die Hanswarft befindet sich etwa 500 m von dem 1,2 m hohen Sommerdeich entfernt (vgl. Abb. 69 unten).

Zur Ermittlung der maßgebenden Richtung des Seegangs und Windes werden die Verläufe der signifikanten Wellenhöhe und mittleren Wellenperiode für den Bemessungswasserstand von 5,40 m entlang des Profils ausgewertet (vgl. Abb. 69). Danach verhalten sich Wellenhöhe und -

periode für die Richtungen 240° und 270° annähernd identisch. Im Gegensatz dazu weichen die Wellenhöhen und -perioden für die Richtung 300° zwischen den Profilstationen 1000 m bis 3000 m um bis zu 25 cm beziehungsweise 0,5 s ab. Schließlich wird die Seegangs- und Windrichtung von 270° als maßgebend definiert. Wie zu erwarten, wird der einlaufende Seegang durch die Sandplaten vom Profilanfang kontinuierlich bis zur Profilstation 3200 m gedämpft. Für den Bemessungswasserstand werden die signifikanten Höhen der Wellen von 2,9 m auf 1,8 m (38 %) und die mittleren Wellenperioden von 5,3 s auf 3,9 s (26 %) reduziert. Daraufhin behalten die Wellen ihre Höhe und Periode bis zum Erreichen der Halligkante und des Sommerdeiches bei. Dort findet erneut eine Verminderung der Wellenhöhe und -periode um 0,4 m beziehungsweise 0,2 s statt.

Die westlich von Hooge gelegenen Sandplaten Japsand und Norderoogsand werden durch das Hoogeloch mit einer Breite von etwa einem Kilometer und einer mittleren Tiefe von 2 m unter NHN voneinander getrennt. Für die durchgeführte Untersuchung wird am Referenzzustand (vgl. Abb. 68 links) eine Sandaufspülung im Bereich des Loches vorgenommen, sodass die Trennung der beiden Sandplaten aufgehoben wird. Die Sandaufspülung soll auf einer Länge von etwa zweieinhalb Kilometern eingebracht werden, wodurch sich ein abgeschätztes Sandvolumen von etwa 3,6 Millionen Kubikmetern ergibt.

Die Ergebnisse der Simulationen am modifizierten System werden in Abb. 70 in Beziehung zum Referenzzustand gesetzt. Insbesondere im Bereich der durchgeführten Sandaufspülung vom Profilanfang bis zur Profilstation 2500 m ist eine erhebliche Beeinflussung der Seegangsparameter zu verzeichnen. An Profilstation 1700 m wird die maximale Geländehöhe der Sandaufspülung mit 2 m über NHN erreicht. Infolgedessen treten an dieser Stelle die niedrigsten Wellenhöhen und kürzesten Wellenperioden auf. Dort werden die signifikanten Wellenhöhen und mittleren Wellenperioden für den Bemessungswasserstand (5,40 m) um 0,8 m (35 %) beziehungsweise um 1,13 s (24 %) reduziert. Nachdem der Seegang das Maximum der Geländehöhe der Sandaufspülung passiert hat, ist eine Vergrößerung der Höhe und Periode der Wellen zu beobachten. Auf einer Strecke von 1500 m nähern sich die Seegangsparameter des modifizierten Systems wieder denjenigen des Referenzzustandes an. Folglich reicht die Übertragung der kinetischen Energie des Windes auf die Wellen entlang der vorliegenden Fetchlänge aus, um den Seegang wieder auf das ursprüngliche Niveau auszureifen. Demzufolge ist auf der Halligfläche und am Fuß der Hanswarft keine Veränderung der signifikanten Wellenhöhe und mittleren Wellenperiode infolge der Sandaufspülung festzustellen. Dies gilt neben der maßgebenden Seegangs- und Windrichtung auch für die Richtungen 270° und 300°. Des Weiteren wird die Beschränkung der hydrodynamischen Wirksamkeit auf den Bereich der Sandaufspülung in der zweidimensionalen Ebene bestätigt.

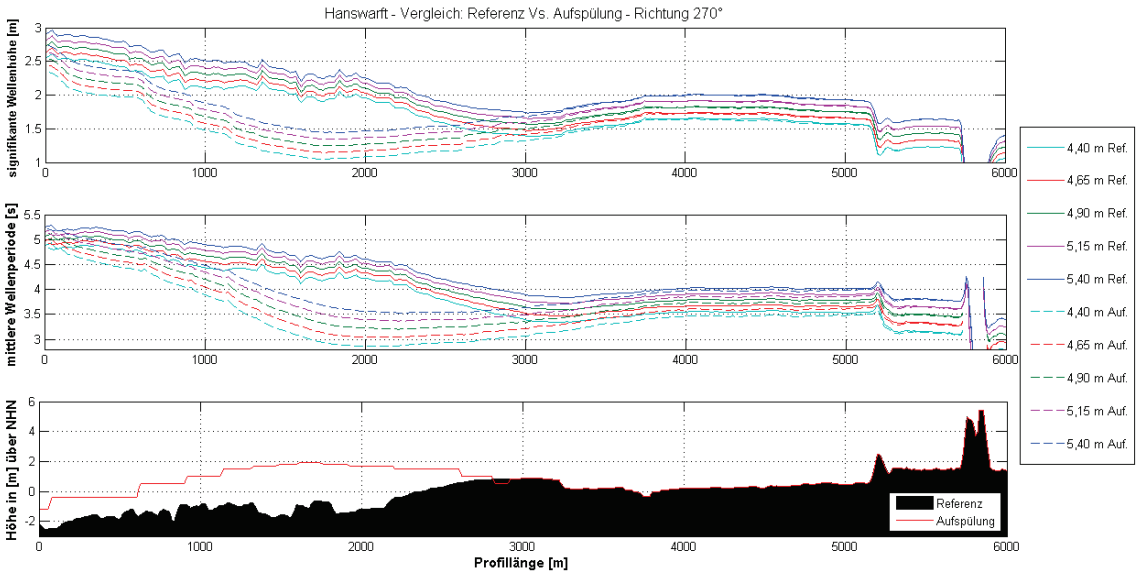


Abb. 70 Wirkung der Sandaufspülung im Vergleich zum Referenzzustand

Durch die Dämpfung der signifikanten Wellenhöhe und mittleren Wellenperiode um 38 % beziehungsweise um 26 % wird die hohe Bedeutung der westlich von Hooge gelegenen Sandplaten für die Hallig deutlich.

Die Maßnahme zielt darauf ab die hydrodynamische Wirksamkeit der Sandbänke zu vergrößern, indem die Strömung zwischen dem Japsand und Norderoogsand durch gezielte Sandaufspülung vermieden wird. Die Ergebnisse zeigen, dass eine Beeinflussung der signifikanten Wellenhöhe und mittleren Wellenperiode auf der Hallig und insbesondere am Warftfuß der Hanswarft nicht möglich ist. Als Hauptgrund hierfür wird die etwa 4 km große Distanz zwischen der Sandaufspülung an den Sandplaten und dem Ort der Beurteilung am Fuß der Hanswarft angesehen.

Unter Berücksichtigung der mittleren Wellenrichtung auf Hooge und des grundsätzlich von Westen einlaufenden Seegangs ist ein Wandern der Sandplaten nach Osten zu erwarten. Der vorgestellte Referenzzustand zeigt somit eine Momentaufnahme der hydrodynamischen Wirksamkeit der Sandplaten, die durch gezielte Sandvorspülungen und biotechnische Maßnahmen erhalten werden könnte.

In einer ersten Abschätzung wurde das aufzuspülende Sandvolumen zu 3,7 Millionen Kubikmetern bestimmt. Als Vergleichswert kann die jährliche Sandersatzmenge von 1,019 Mio. m³ mit einem Kostenvolumen von 5,9 Mio. € an der Westküste der Insel Sylt aus dem Jahr 2011 dienen (LKN-SH, 2014). Somit erfordert eine Umsetzung der Maßnahme gegenüber der Sandaufspülung vor Sylt mehr als die dreifache Menge an Material und Finanzmittel von etwa 18 Mio. €.

Abschließend lässt sich sagen, dass die hydrodynamische Wirksamkeit des Japsandes und Norderoogsandes durch die Ergebnisse des Referenzzustandes quantifiziert werden konnten. Von der vorgestellten Sandaufspülung wird auf Grund der wirtschaftlichen und technischen Dimension bei gleichzeitig geringer Wirkung der Seegangsdämpfung auf Hooge abgeraten.

6.5 H2 - Raupflasterung der Warften

Bei dieser zu untersuchenden Maßnahme werden die bereits vorhandenen Warften mit neuen Deckwerken versehen beziehungsweise Rauheitselemente an der Warftböschung aufgebracht (Abb. 71).

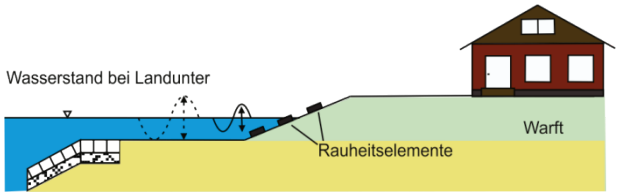


Abb. 71 Schematische Darstellung der Raupflasterung einer Warft

Hierzu werden anstelle der jetzt meist mit Gras bewachsenen Böschungen Steine oder Blöcke verbaut. Dabei hängt die hydrodynamische Wirksamkeit der Blöcke stark von deren Größe sowie dem Abstand der Elemente zueinander ab (Pullen, 2007).

Die Abb. 72 zeigt den Einfluss der Rauheit auf die relative Wellenüberlaufrate am Beispiel eines einfachen Warftprofils.

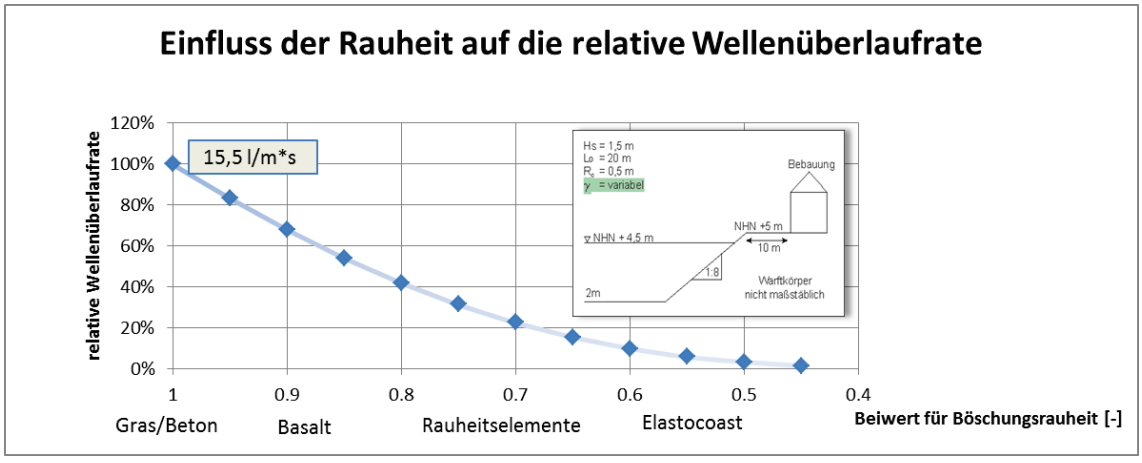


Abb. 72 Einfluss der Rauheit auf die relative Wellenüberlaufrate

So kann, ausgehend von dem dargestellten Warftprofil, bei einem Einsatz eines Basaltdeckwerkes die Wellenüberlaufrate von 15,5 l/m*s um ca. 30% auf 10,5 l/m*s verringert werden im Vergleich zur Warft mit einer Grasoberfläche. Mit Hilfe von Rauheitselementen oder

einer aufgebrachten Elastocoast-Deckschicht kann die Wellenüberlaufrate noch weiter verringert werden.

Hauptkritikpunkt an dieser Maßnahme ist der starke Eingriff in das Landschaftsbild der Halligen. So würden die Halligen ihr grünes Landschaftsbild dauerhaft verlieren und die teilweise denkmalgeschützten Warften als Fremdkörper auf der Hallig wahrgenommen werden.

Vorteil dieser Maßnahme ist die hohe Betriebssicherheit, da die Raupflasterung nicht erst im Fall einer Sturmflut aufgebaut werden müsste und durch die Erfahrungen an anderen Deckwerken auch sehr hohe Belastungen ausgehalten werden können.

6.6 H3 - Deichschlauch

Im Folgenden wird die Möglichkeit des Einsatzes eines Deichschlauches als Hochwasserschutz untersucht. In der Abb. 73 ist die Umsetzung dieser Variante schematisch dargestellt. Aufgrund der Tatsache, dass im Falle einer Sturmflut nur die Bewohner der jeweiligen Warft für den Aufbau des Systems zur Verfügung stehen, muss ein schneller selbstständiger Aufbau möglich sein.

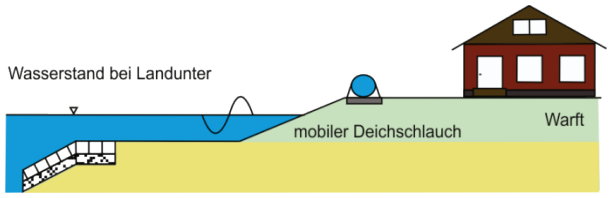


Abb. 73 Schematische Darstellung des Einsatzes eines Deichschlauches

Im Bereich der Warftkante wird hierzu ein Graben ausgehoben, in den der Deichschlauch eingelassen wird. Der Schlauch muss im Sturmflutfall mit Wasser über Pumpen rechtzeitig gefüllt werden. Um ein zuverlässigeres System zu erhalten, müssen, falls eine der Leitungen versagen sollte, mehrere Zuleitungen gelegt werden. Vor den Zuleitungen werden Gitter angebracht, um eine Verstopfung des Systems zu verhindern. Bei der Betrachtung der Wirkung auf die relative Wellenüberlaufrate wird der mobile Deichschlauch als Kronenmauer betrachtet, da für eine solche Konstruktion bislang keine durch physikalische Modellversuche abgesicherten Ergebnisse vorliegen. Die Ergebnisse dieser Untersuchung sind in der Abb. 74 dargestellt.

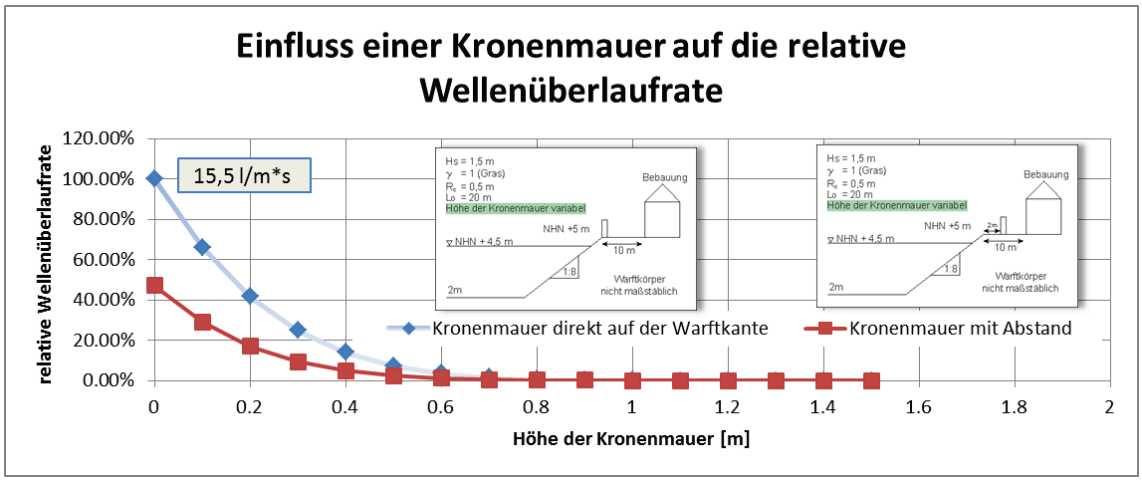


Abb. 74 Einfluss einer Kronenmauer bzw. eines Deichschlauches auf die relative Wellenüberlaufrate

Die Ergebnisse zeigen, dass zum einen die Höhe des Deichschlauches zum anderen aber auch die Entfernung des Deichschlauches zur Warftkante von Bedeutung ist. So reduziert bei dem gegebenen Profil ein 20 cm hoher Deichschlauch in zwei Metern Abstand zur Warftkante die Wellenüberlaufrate um 80%. Ein Deichschlauch, der sich direkt auf der Warftkante befindet, reduziert hingegen die Wellenüberlaufrate des gegebenen Warftprofils lediglich um 60% auf 6,5 l/m*s.

Der Hauptkritikpunkt an diesem System ist die Betriebssicherheit, da das System anfällig ist und sowohl die Pumpen als auch die Schläuche selbst im Sturmflutfall versagen könnten. Außerdem könnten während eines Eiswinters treibende Eisschollen oder anderes Treibgut die aufgepumpten Schläuche beschädigen. Die Kosten für den Aushub sind klar zu kalkulieren und nicht zu hoch bei dieser Maßnahme. Die Kosten für den Schlauch belaufen sich, abhängig von der gewünschten Stauhöhe, auf 300 bis 1.000 Euro pro Meter (Mobildeich, 2013).

Da es keine Referenzprojekte gibt, müsste eine Reihe an Voruntersuchungen stattfinden, die sich mit dem Bau dieser Maßnahme befassen. Durch die Ausführung der Hochwasserschutzwand als mobiler Schlauch wird das Landschaftsbild im Normalfall nicht beeinträchtigt. Der Schlauch ist, außer bei einer Sturmflut, nicht zu sehen, da er im Boden versenkt wird.

Eine Alternative, deren Betriebssicherheit weniger anfällig ist, stellt die in Abb. 75 gezeigte aufklappbare Hochwasserschutzwand dar. Auch diese stellt im Normallfall keinen starken Eingriff in das Landschaftsbild dar.

Abb. 75 Aufklappbares Hochwasserschutzsystem (links: aufgeklappt, rechts: abgeklappt) (ThyssenKrupp Bautechnik, 2014)

Ein Nachteil gegenüber der sich selbstaufbauenden Deichschläuche ist, dass das System von den jeweiligen Warftbewohnern selbst aufgeklappt und gesichert werden muss. Dabei kann unter Umständen starker Wind diese Arbeiten zusätzlich erschweren. Aus diesem Grund ist das aufklappbare Hochwasserschutzsystem nur auf Warften einsetzbar, auf denen genug Personal zur Verfügung steht.

6.7 H4 – Ringdeich als Wellenbrecher vor die Warft

In diesem Kapitel wird sowohl die Möglichkeit der technischen Umsetzung als auch die hydrodynamische Wirksamkeit eines Ringdeiches, der um die Warft errichtet wird, untersucht. Die Abb. 76 zeigt schematisch die Umsetzung dieser Maßnahme.

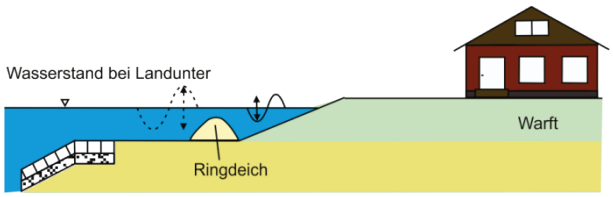


Abb. 76 Schematische Darstellung eines Ringdeiches um die Warft

An einem Untersuchungsprofil wird zunächst die Wirkung eines Längswerkes auf der Halligfläche analysiert. Dieses ist im Profil vergleichbar mit einem Ringdeich. Zur Beurteilung dient der Fuß der Christianswarft, von der aus das etwa ein Kilometer lange Profil in südwestliche

Richtung verläuft. In Abb. 77 ist die Anordnung des linearen Küstenschutzelementes Längswerk (rechts) dem Referenzzustand (links) gegenübergestellt.

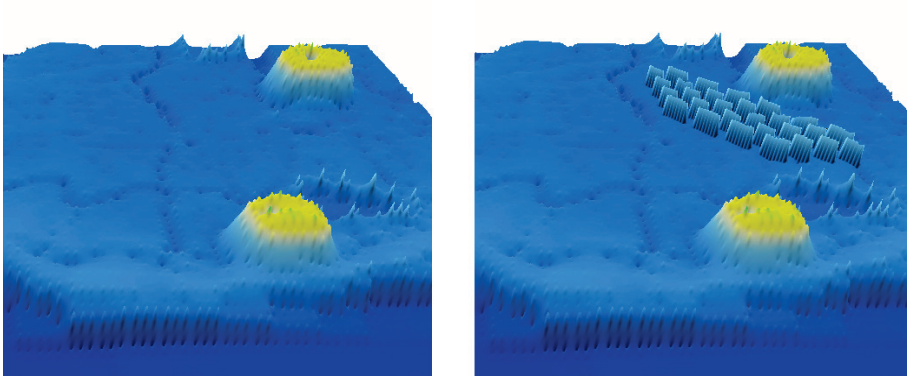


Abb. 77 Referenzzustand (links) und Anordnung von Längswerken (rechts)

Der Profilanfangspunkt (vgl. Abb. 78) liegt mit einer Höhe von 40 cm unter Normalhöhennull (NHN) auf dem Halligvorland im Watt. An Profilstation 325 m beginnt die geböschte Halligkante und geht nach wenigen Metern in ein 1,2 m hohes Deckwerk über. Daraufhin verläuft die Geländehöhe der Halligfläche von anfänglich 1,7 m über NHN mit einem leichten Gefälle in Richtung Fuß der Christanswarft, der an Profilstation 900 m eine Höhe von 1,3 m über NHN aufweist.

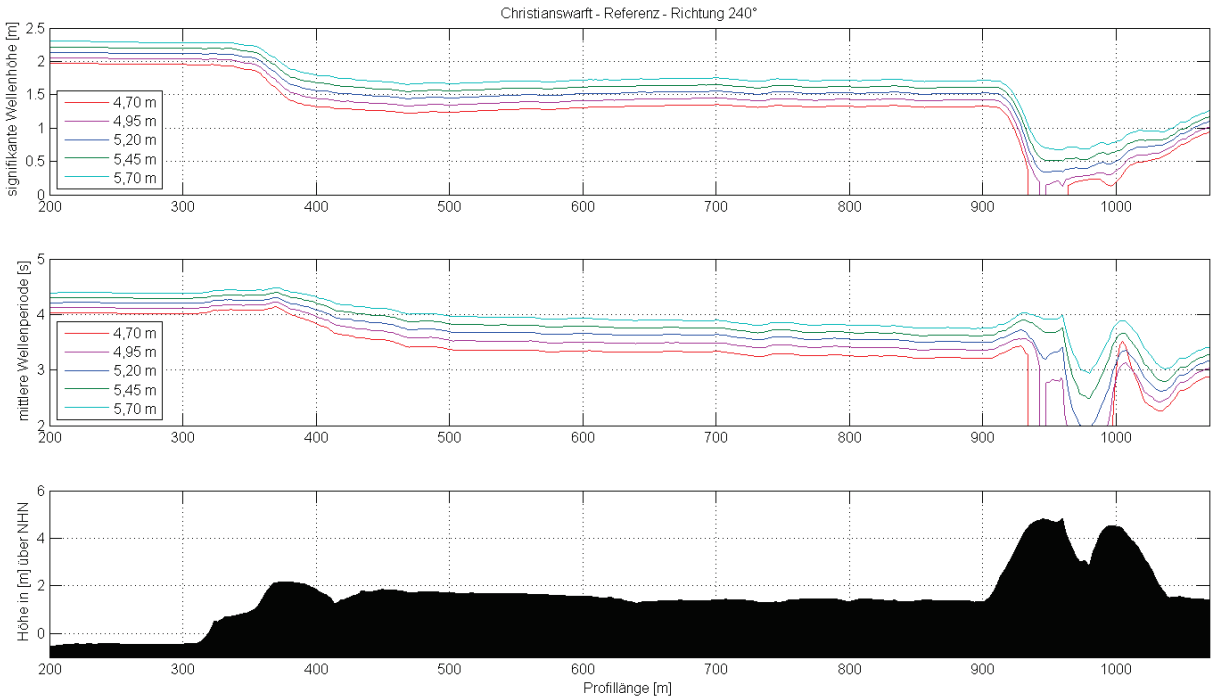


Abb. 78 Referenzzustand für eine Seegangs- und Windrichtung von 240°

Zur Bestimmung der maßgebenden Richtung des Seegangs und Windes wurden die Entwicklung der Seegangsparameter entlang des Profils für die Seegangs- und Windrichtungen von 240°, 270° und 300° für den Bemessungswasserstand von 5,70 m miteinander verglichen. Hieraus geht hervor, dass die signifikante Wellenhöhe und mittlere Wellenperiode auf dem Halligvorland und der Halligfläche für eine Richtung von 240° maximal werden. In Abb. 78 sind die Wellenhöhen und -perioden für die maßgebende Seegangs- und Windrichtung von 240 ° in Abhängigkeit von Wasserständen zwischen 4,70 m und 5,70 m wiedergegeben.

Unter der Annahme des Bemessungswasserstandes (5,70 m) ist der ausgereifte Seegang am Profilanfang durch eine signifikante Wellenhöhe von 2,3 m und eine mittlere Wellenperiode von 4,4 s gekennzeichnet. Der Seegang wird durch die Halligkante und -fläche sowie durch das Deckwerk derart gedämpft, dass die Wellenhöhe und -periode bis zum Fuß der Christianswarft (Profilstation 900 m) um 0,6 m beziehungsweise 0,7 s reduziert werden. Auf der Warft kann sich ab einem Wasserstand von 5,20 m, der somit einen halben Meter unterhalb des Bemessungswasserstandes liegt, Seegang ausbilden.

Im Südwesten der Christianswarft wurde ein System aus Längswerken angelegt (Abb. 77 rechts). Das System besteht aus fünf voneinander versetzten Reihen mit einem Abstand von 10 m. Die erste Längswerkreihe wird als zur Halligkante gelegene Reihe definiert, dementsprechend ist die Lage der fünften Reihe unmittelbar vor der Warft festgelegt. Die Anzahl der Längswerke vergrößert sich von der ersten Längswerkreihe hin zur letzten Längswerkreihe, sodass eine zunehmende Systemlänge in Richtung Warft entsteht. Die Längswerke der ersten und letzten Reihe wurden mit einer Länge von 30 m und einer Breite von 5 m konstruiert. Im Gegensatz dazu wurden die Abmessungen der Reihen zwei bis vier auf 20 m x 5 m abgewandelt. Die Untersuchungen zur hydrodynamischen Wirksamkeit des modifizierten Systems wurden für Längswerkhöhen von 1,0 m und 1,5 m durchgeführt.

Um die hydrodynamische Wirksamkeit der Maßnahme zu beurteilen, wurde in Abb. 79 ein direkter Vergleich zwischen den Seegangsparametern des Referenzzustandes und des modifizierten Systems dargestellt.

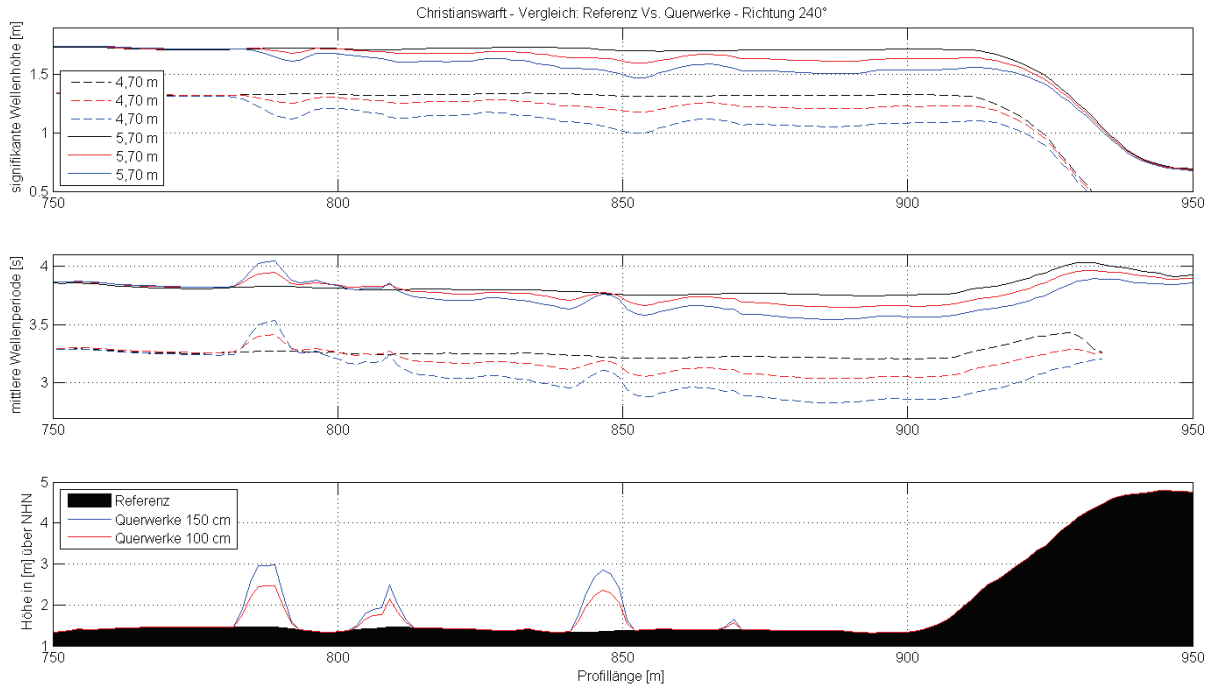


Abb. 79 Wirkung der Längswerke im Vergleich zum Referenzzustand für eine Seegangs- und Windrichtung von 240°

Für den Bemessungswasserstand (5,70 m) werden die signifikanten Wellenhöhen infolge der 1,5 m hohen Längswerke um etwa 0,2 m verringert. In diesem Fall wird die mittlere Wellenperiode um 0,2 s verkürzt. Damit liegen bezüglich der Wellenhöhe und -periode am Warftfuß hydrodynamische Wirksamkeiten der 1,5 m hohen Längswerke von 10 % beziehungsweise 5 % vor. Werden die Längswerke mit einer Höhe von 1,0 m konstruiert, halbiert sich die seegangsdämpfende Wirkung.

Hingegen wird bei einer Reduzierung des Bemessungswasserstandes um einen Meter eine Verdoppelung der hydrodynamischen Wirksamkeit erzielt. Insbesondere an der ersten Längswerkreihe ist eine Vergrößerung der mittleren Wellenperiode zu erkennen, wodurch das Brechen der Welle angekündigt wird. Dieses Phänomen tritt immer dann auf, wenn der Seegang durch parallel zur fortschreitenden Welle verlaufende Bauwerke beeinflusst wird und ist deshalb ebenfalls bei der Anordnung eines Ringdeiches um die Warft oder der Erhöhung des Sommerdeiches zu beobachten.

Aus den Abb. 79 und Abb. 80 folgt, dass eine Vergrößerung der hydrodynamischen Wirksamkeit von einer Längswerkreihe zur nächsten stattfindet. Der Anteil der Reduzierung von Wellenhöhe und -periode beträgt infolge der ersten Längswerkreihe etwa 25 % der gesamten hydrodynamischen Wirksamkeit. Nachdem der Seegang die zweite Längswerkreihe überwunden hat, sind mehr als 50 % der gesamten Wirksamkeit erreicht. Dieser Prozess setzt sich fort, bis nach der letzten Reihe die vollständige seegangsdämpfende Wirkung vorliegt. Damit erfolgt die

Reduzierung der signifikanten Wellenperiode und mittleren Wellenhöhe schrittweise, wodurch die Notwendigkeit der Anordnung hintereinandergeschalteter Längswerkreihen hervorgeht.

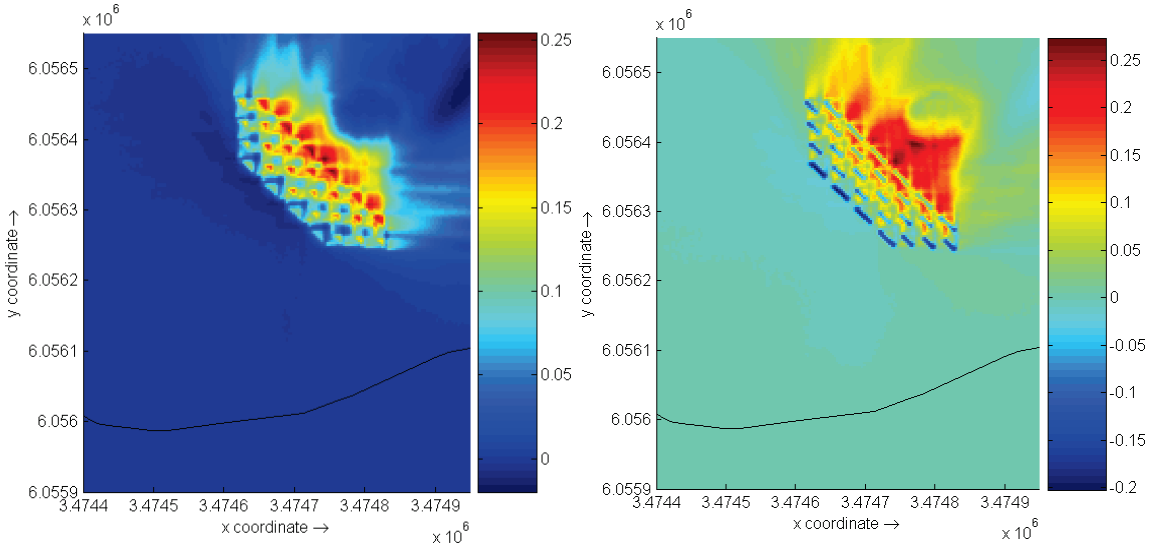


Abb. 80 Differenz der signifikanten Wellenhöhe in [m] (links) und der mittleren Wellenperiode in [s] (rechts) aus Referenzzustand und Anordnung von Längswerken mit einer Höhe von 1,5 m bei einem Wasserstand von 5,70 m für eine Seegangs- und Windrichtung von 240°

Demzufolge ist die gewählte Längswerkanordnung lediglich zur Reduzierung des Seegangsklimas an der Christianswarft für eine Seegangs- und Windrichtung von 240° geeignet und ist für die Richtungen 270° und 300° nicht zu erkennen.

Die Untersuchungen des Referenzzustandes zeigen, dass der auf die Hallig treffende Seegang infolge der Halligkante und des Deckwerks gedämpft wird. Anschließend findet auf der Halligfläche keine weitere Seegangsdämpfung statt. Im Gegensatz dazu ist vielmehr eine Tendenz zur Erhöhung der Seegangsparamter auf der Halligfläche zu erkennen.

Maßgebliche Bestimmungsgrößen sind dabei die Geschwindigkeit, Dauer und Streichlänge des einwirkenden Windes sowie der vorliegende Wasserstand. Demgemäß kommt es in besonderer Weise unter den untersuchten Worst-Case-Bedingungen zu einer erneuten Erhöhung der signifikanten Wellenhöhe und Verlängerung der mittleren Wellenperiode auf der Halligfläche. Grundidee der Anordnung eines Systems aus Ringdeichen ist eine Dämpfung des auf der Halligfläche wirkenden Seegangs unmittelbar vor der zu schützenden Warft.

Tatsächlich konnte am Fuß der Christianswarft eine Reduzierung der signifikanten Wellenhöhe um 10 % und der mittleren Wellenperiode um 5 % für den Bemessungswasserstand erzielt werden.

Die Abb. 81 und Abb. 82 stellen den Einfluss der signifikanten Wellenhöhe und der mittleren Wellenperiode auf die relative Wellenüberlaufrate dar.

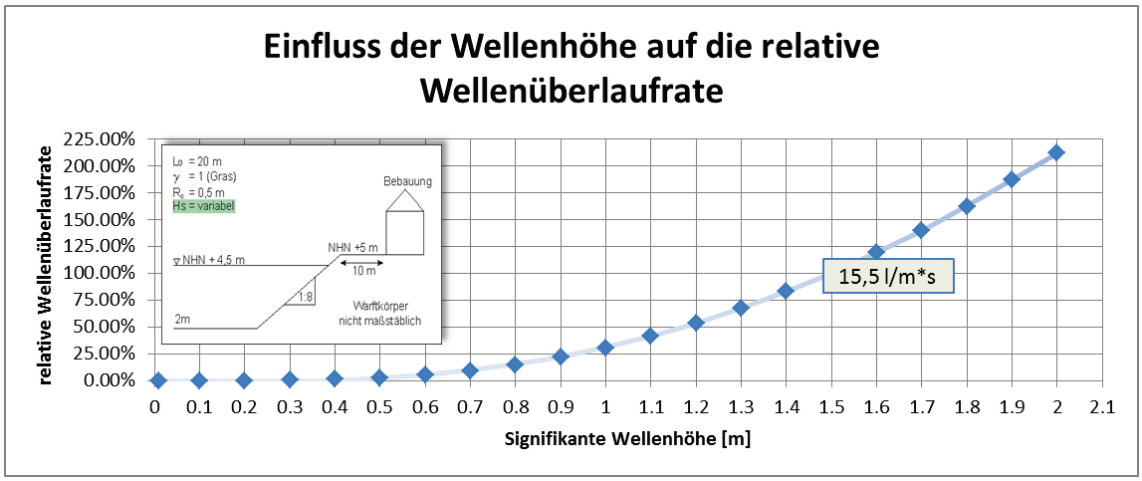


Abb. 81 Einfluss der signifikanten Wellenhöhe am Warftfuß auf die relative Wellenüberlaufrate

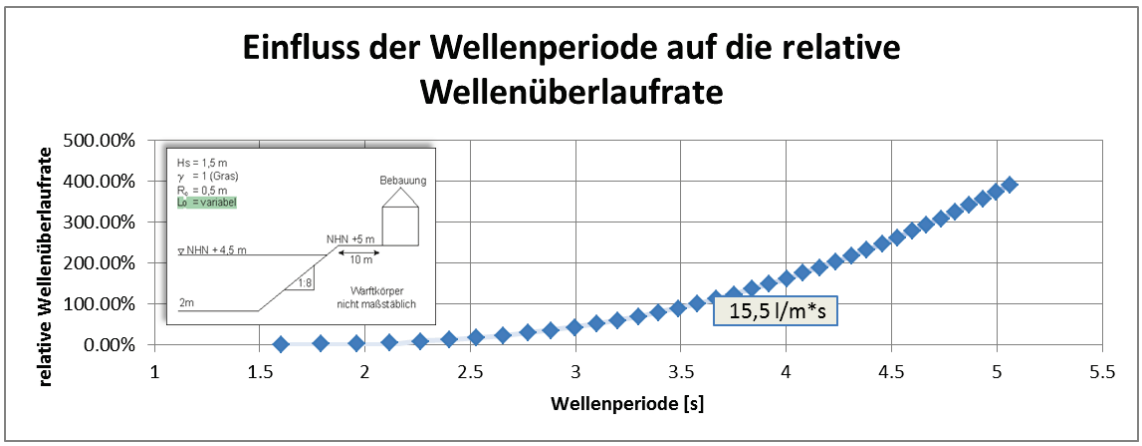


Abb. 82 Einfluss der mittleren Wellenperiode auf die relative Wellenüberlaufrate

Mit einer wie im numerischen Modell erreichten Reduzierung der signifikanten Wellenhöhe um 10% am Warftfuß könnte die Wellenüberlaufrate von 15,5 l/m*s um ca. 30% reduziert werden (siehe Abb. 81). Ähnlich verhält es sich bei der mittleren Wellenperiode. Eine Verringerung der mittleren Wellenperiode von 3,5 s auf 3 s hat nach Abb. 82 eine Reduzierung der relativen Wellenüberlaufrate um 57% auf 6,6 l/m*s zur Folge.

Neben der Dämpfung der Seegangparameter wird folgender Sachverhalt als wesentlicher Erfolg der Maßnahme bewertet. Im Referenzzustand findet Brandung der Wellen an der Warft statt, wodurch der Warftfuß auch einen Angriffspunkt für mögliche Erosionen darstellt. Durch die Anordnung der Längswerke beziehungsweise Ringdeiche kommt es zu einer Verlagerung der Brandungszone vom Warftfuß in das vorgeschaltete Längswerksystem. Dies bedeutet, dass die Wellenenergie an den Längswerken bzw. Ringdeichen umgewandelt wird und dadurch am

Warftfuß nicht mehr für Erosionsprozesse zur Verfügung steht. Eine Steigerung der Energiedissipation kann durch die Erhöhung der Bauwerke erreicht werden.

Die Höhe und Abmessungen der Längswerke im numerischen Modell wurden so gewählt, dass im Bereich der Maßnahme eine Durchgängigkeit bestehen bleibt und sich in die Umgebung einfügt. Außerdem erscheint eine Umsetzung der Maßnahme mit naturnahen Baumaterialen im Rahmen des Möglichen, sodass eine Minimierung der ökologischen Einflussfaktoren durchgesetzt werden kann.

Zwar konnte für die Seegangs- und Windrichtungen 270° und 300° für die untersuchten Längswerke keine seegangsdämpfende Wirkung der Maßnahme verifiziert werden, jedoch wäre dies bei einem System aus Ringdeichen um die Warft anders. Die Warft wäre in diesem Fall für alle Seegangsrichtungen gleich geschützt.

Ein weiterer Vorteil dieser Maßnahme ist auch in der hohen Betriebssicherheit des Systems zu sehen, da die Ringdeiche eine dauerhafte Einrichtung darstellen würden. Der Eingriff in das Landschaftsbild der Halligen wäre eher gering und die Ringdeiche wären aus größerer Entfernung zur Warft kaum zu erkennen.

6.8 H5 - Hydraulische Hochwasserschutzwand

Bei dieser Maßnahme handelt es sich um eine hydraulische Hochwasserschutzwand, die ringförmig um die Warft erstellt wird, um den Wellenüberlauf entscheidend zu vermindern und damit vorbeugend die Warfthäuser zu schützen. Die Abb. 83 zeigt den schematischen Aufbau der hydraulischen Hochwasserschutzwand.

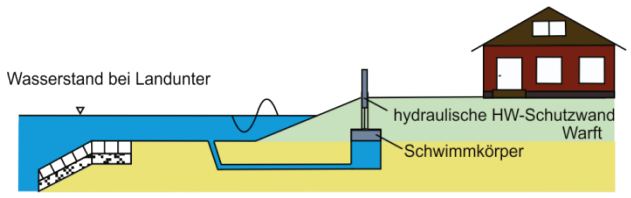


Abb. 83 Schematische Abbildung einer hydraulischen Hochwasserschutzwand

Abb. 84 stellt ein Warftprofil mit einer in ihr implementierten hydraulischen Hochwasserschutzwand dar, die sich bei einem Landunter infolge des Wasserdrucks selbstständig aufbaut.

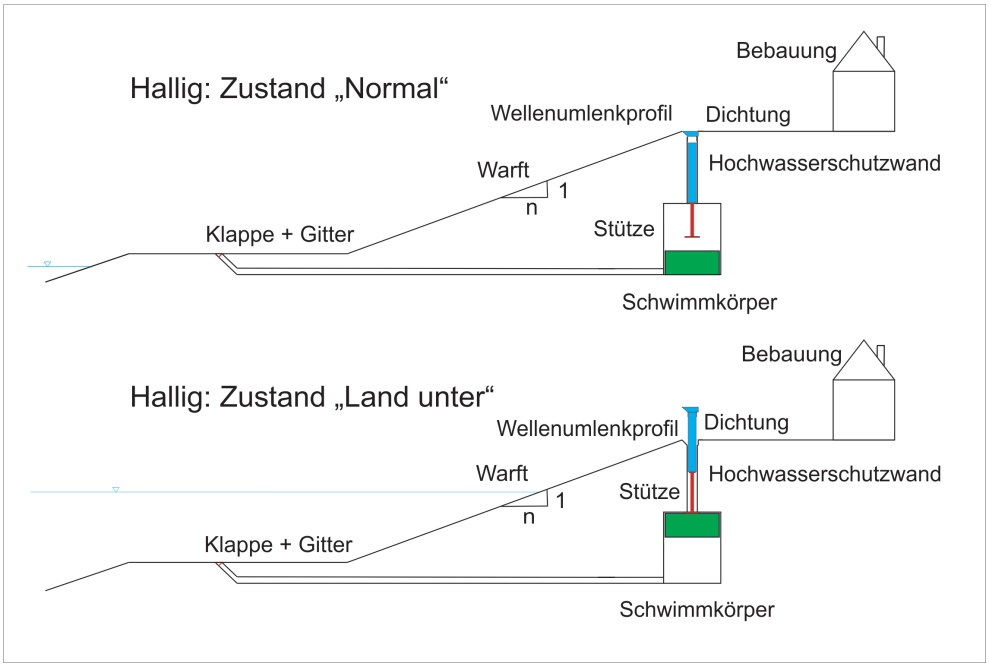


Abb. 84 Darstellung der hydraulischen Hochwasserschutzwand

Auf der Darstellung ist zu erkennen, dass sich die Hochwasserschutzwand unmittelbar hinter der Warftkrone befindet und im normalen Zustand auf dem Warftkörper nicht zu sehen ist. Der durch sie technisch erforderliche Eingriff in den Warftkörper ändert das Landschaftsbild der Warft nicht. Während eines Landunters hebt sich der im Inneren der Warft befindliche Schwimmkörper infolge Auftrieb durch die mit dem Vorland verbundene kommunizierende Röhre. Der Schwimmkörper übt ab einem bestimmten Wassereinstaugrad eine vertikale Kraft auf die Stützen aus, welche die Hochwasserschutzwand anheben. Durch die zentrische Lagerung der Hochwasserschutzwand wird das Wellenumlenkprofil beim Ausfahren über die Hochwasserschutzwand gestülpt. Es verringert merklich das über die Hochwasserschutzwand in das Innere des Warftkörpers eingetragene Wasser.

Das obere linke Bild in Abb. 85 verdeutlicht den Abdichtungsprozess auf der Binnenseite. Eine Bitumenbahn verhindert, dass Wasser durch das System von unten eindringt. Sie fungiert als Dichtung und schleift während des Aufstellungsprozesses an der Hochwasserschutzwand entlang.

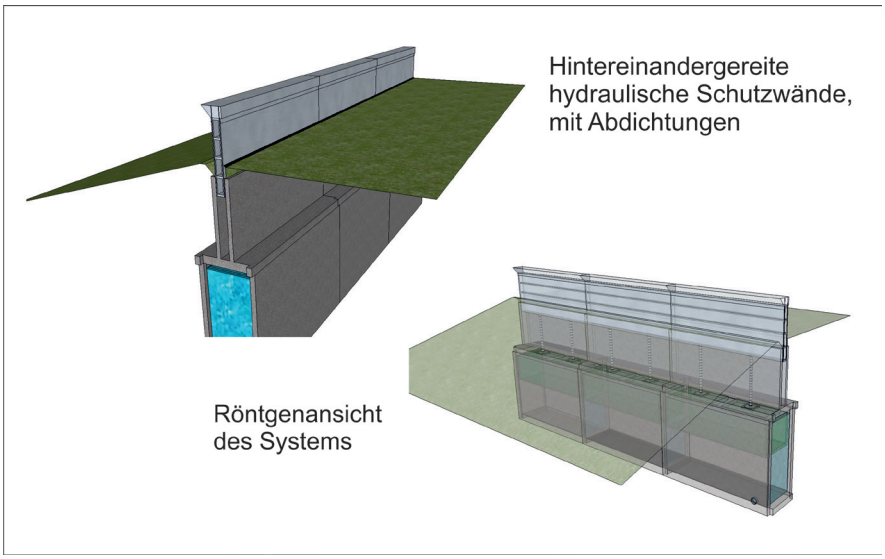


Abb. 85 Dichtung und Aneinanderreihungsprinzip des Konzeptes

Das Wasser, das dem Schwimmkörper Aufrieb verleiht, wird je nach Größe der Warft durch eine unterschiedliche Anzahl von Kanälen, die um die Warft verteilt sind, zu den Schwimmkörpern geleitet. Dabei wird an den äußeren Enden der Kanäle ein Gitter gegen Verunreinigungen und eine Frostschutzklappe installiert. Bei der Konstruktion ist darauf zu achten, dass der Kanal keine Möglichkeit hat, zuzufrieren oder zu verstopfen. Idealerweise werden die Einläufe in Prielen angeordnet, die unabhängig vom Landunter Wasser führen. Dadurch verringert sich das potentielle Verstopfungsrisiko. Da mehrere Einlässe um die Warft verteilt sind, besteht eine hohe Sicherheit, dass sich die Schwimmkörper bei Landunter heben. Die Konstruktion der hydraulischen Hochwasserschutzwand wird im Baukastenprinzip hergestellt (Abb. 86). Weitere Details zur Umsetzung dieser Maßnahme können Lüngen (2013) entnommen werden.

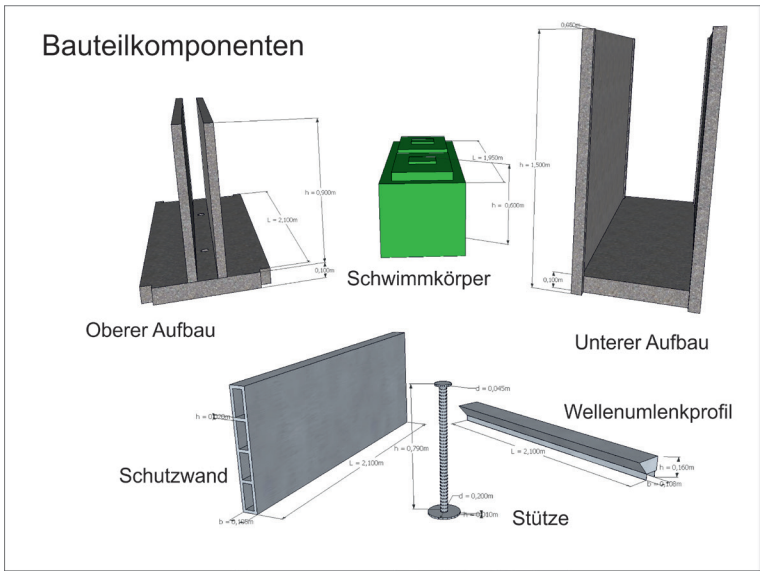


Abb. 86 Baukastenprinzip der hydraulischen Hochwasserschutzwand

Sollte die hydraulische Hochwasserschutzwand an einer Warft ausgeführt werden, sind folgende Nachweise zu führen:

- *Hydraulischer Druck und Überströmen*
- *Anprall von Treibgut*
- *Impulseintrag durch Wellenauflauf*
- *Dichtigkeit der Profile*
- *Sicherheit gegen Grundbruch*

Die dargestellte hydraulische Hochwasserschutzwand erhöht die Warftkrone im voll ausgefahrenen Zustand um 70 cm. Je nach Anforderung kann sie höher konstruiert werden, da die Auftriebskraft der Schwimmkörper für weitaus schwerere Schutzwände ausgelegt ist. Dazu ist allerdings ein größerer Aufbau der Profile erforderlich, da eine größere Hochwasserschutzwand nicht in die dargestellte Stahlbetonkonstruktion passt und somit nicht plan mit der Warftkrone abschließt. Diese Bauweise dürfte landschaftsbildtechnisch nicht erwünscht sein. Die Wirkung auf die mittlere Wellenüberlaufrate ist bereits in der Abb. 74 in Kap. 6.6 dargestellt worden.

Die hydraulische Hochwasserschutzwand stellt im Gegensatz zu den anderen Maßnahmen einen technischen Eingriff in den Warftkörper dar, der nach dem Generalplan Küstenschutz (MELUR, 2012) nicht erwünscht ist. Da der technische Eingriff allerdings nach Fertigstellung nicht mehr sichtbar ist, sollte es durchaus möglich sein, die hydraulische Hochwasserschutzwand im Konsens der Halligbewohner zu realisieren. Hauptkritikpunkt an dieser Maßnahme stellt allerdings die geringe Betriebssicherheit dar. Die Funktionalität des Systems kann gar nicht beziehungsweise nur schwer überprüft werden und kleine Einflussfaktoren wie beispielsweise Muschelbewuchs können bereits zu einem Versagen des Systems führen.

6.9 L1 - Warftverstärkung durch Abflachung, Raupflasterung und Freiborderhöhung

In diesem Kapitel werden unterschiedliche Möglichkeiten der Warftverstärkung untersucht. Da manche dieser Maßnahmen der Warftverstärkung (Rauheitselemente siehe Kap. 6.5) schon im Rahmen der auf Hallig Hooge generierten Vorschläge untersucht worden sind, wird an den jeweiligen Stellen auf das entsprechende Kapitel verwiesen.

Zu den hier zu untersuchenden Maßnahmen zählen unterschiedliche Maßnahmen an der Warft, durch die der Wellenüberlauf reduziert wird. Mögliche Verstärkungen an den Warften selber sind:

- *Erhöhung der Krone des Ringdeichs*
- *Eine Abflachung des Warftprofils*

- *Einbau einer Berme*
- *Aufschüttung der gesamten Warft*
- *Einbau von Rauheitselementen (vgl. Kapitel 6.5)*
- *Einbau einer Kronenmauer (vgl. Kap. 6.6)*

Eine Erhöhung der Deichkrone bzw. der Einbau einer Kronenmauer vergrößern die Freibordhöhe R_C und verringern bei gleichbleibender Steigung die Wellenüberlaufrate. Um eine gleichbleibende Profilsteigung bei einer erhöhten Kronenhöhe zu gewährleisten, ist eine aufwendige Massenbewegung notwendig. Der Ringdeich von Halligen sollte jedoch nicht beliebig hoch aufgeschüttet werden. Zum einen gibt es bei Warften aufgrund des bindigen Bodenaufbaus Setzungsprobleme und zum anderen sprechen sich gerade die vom Tourismus lebenden Bewohner gegen einen zu hohen Ringdeich aus. Die Abb. 87 stellt eine Abflachung des Warftprofils dar.

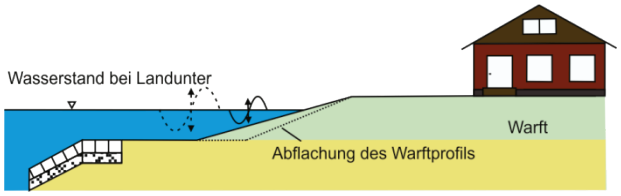


Abb. 87 Schematische Darstellung der Abflachung des Warftprofils

Eine weitere Maßnahme, die keinen Einfluss auf den Wellenüberlauf ausübt, aber dennoch hier behandelt wird, ist die Anhebung der Häuser (vgl. Abb. 88).

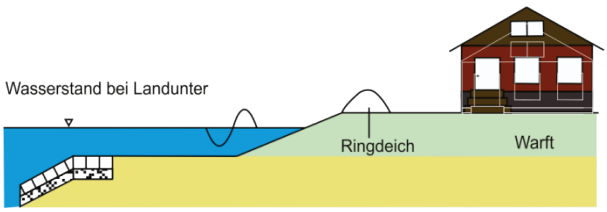


Abb. 88 Schematische Darstellung der Anhebung eines Warfthauses und eines Rindeiches

In den Abb. 89 und Abb. 90 ist der Einfluss der Warftsteigung beziehungsweise der Einfluss einer Berme auf die relative Wellenüberlaufrate dargestellt. Eine Abflachung der Warft von 1:8 auf 1:10 bewirkt beispielsweise bei den gegebenen Randbedingungen eine Reduzierung der Wellenüberlaufrate von 15,5 l/m*s auf einen Wert von 5,8 l/m*s. Je flacher ein Profil ausgebildet ist, desto mehr Energie verliert die Welle durch Wellenbrechen beziehungsweise Reibung bei der Überwindung der horizontalen Strecke und läuft daher nicht so hoch auf. Warften können jedoch

nicht beliebig flach ausgebildet werden, da aufgrund der großen Massenbewegungen der Nutzen/Kosten Faktor nicht tragbar ist.

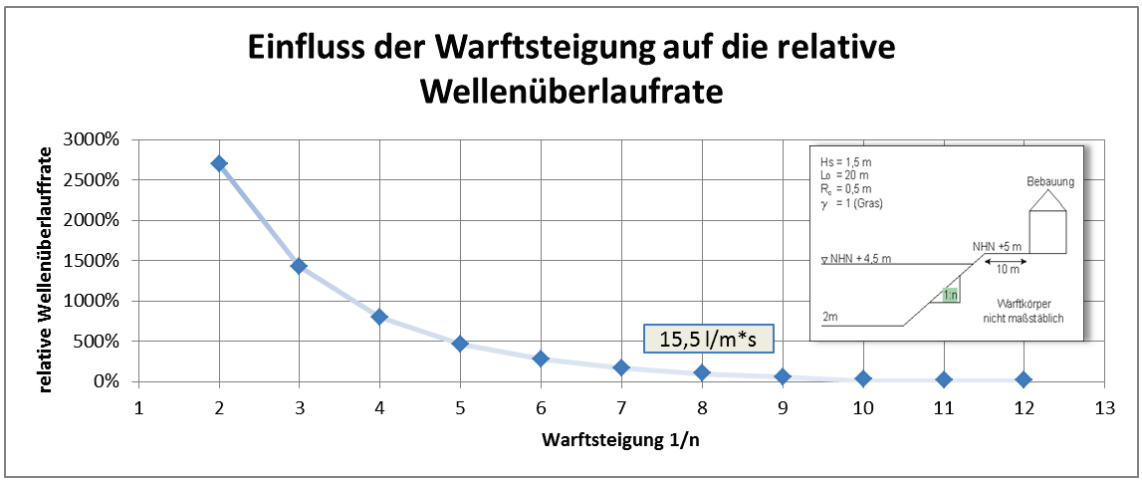


Abb. 89 Einfluss der Warftsteigung auf die relative Wellenüberlaufrate

Auch eine Berme hat einen reduzierenden Einfluss auf die Wellenüberlaufrate. So bewirkt eine Berme mit einer Länge von zwei Metern in Höhe des Bemessungswasserstandes in dem gezeigten Fall eine Reduzierung der relativen Wellenüberlaufrate um ca. 25%. Die Konstruktion und Aufschüttung einer Berme erfordert abhängig von deren Länge ebenfalls große Massenbewegungen. Sie verringert den Wellenüberlauf am effektivsten, wenn sie sich auf Höhe des maßgebenden Wasserstandes befindet.

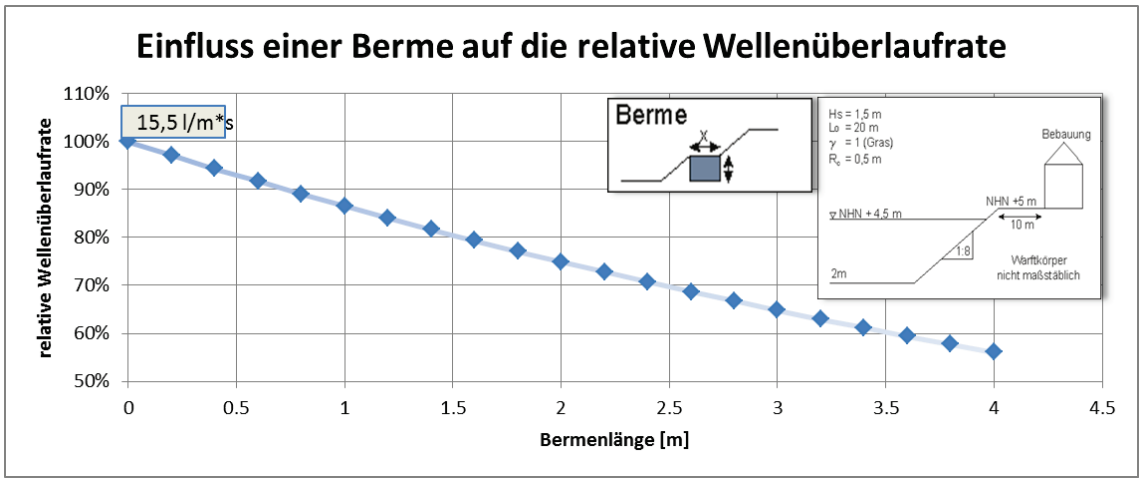


Abb. 90 Einfluss einer Berme auf die relative Wellenüberlaufrate

In diesem Kapitel werden ebenfalls die Vor- und Nachteile möglicher Verstärkungsmöglichkeiten analysiert und ihr Einfluss auf den Wellenüberlauf ermittelt. Außerdem muss beachtet werden, dass jede Maßnahme entsprechend Platz zur Umsetzung erfordert. So ist für

jede Warft eine individuelle Betrachtung notwendig. Bei der Analyse ist ebenso auf die Maßnahmenakzeptanz der Halligbewohner einzugehen, da ohne sie eine Durchführung einer Maßnahme nicht möglich ist.

Eine weitere Möglichkeit, die bei Weitem mit dem größten (finanziellen) Aufwand verbunden ist, ist die Aufschüttung der gesamten Warft (vgl. Kap. 6.11). Große Massenbewegungen sind erforderlich und die Hallighäuser müssten künstlich erhöht oder neu gebaut werden.

Die Möglichkeit des Einbaus von Rauheitselementen stellt eine weitere Alternative dar. Diese künstlichen Elemente dienen vorwiegend der Energiedissipation der Welle und der partiellen Reflexion des Auflaufschwalls, können dabei aber gegebenenfalls das grüne Landschaftsbild der Halligen negativ beeinflussen (vgl. Kap. 6.5).

Um die oben genannten verschiedenen Verstärkungsmöglichkeiten einer Warft hinsichtlich ihres Nutzens und des dafür aufzubringenden Aufwandes bewerten zu können, werden anhand eines beispielhaften Warftprofils die Änderungen der Wellenüberlaufraten und der Wellenüberlaufgeschwindigkeit in Abhängigkeit der potentiellen Verstärkungsmöglichkeit errechnet. Die Abb. 91 zeigt das verwendete Warftprofil und die Verstärkungsmöglichkeiten mittels Ringdeich, Aufschüttung der Warft, Steigungsänderung und Berme.

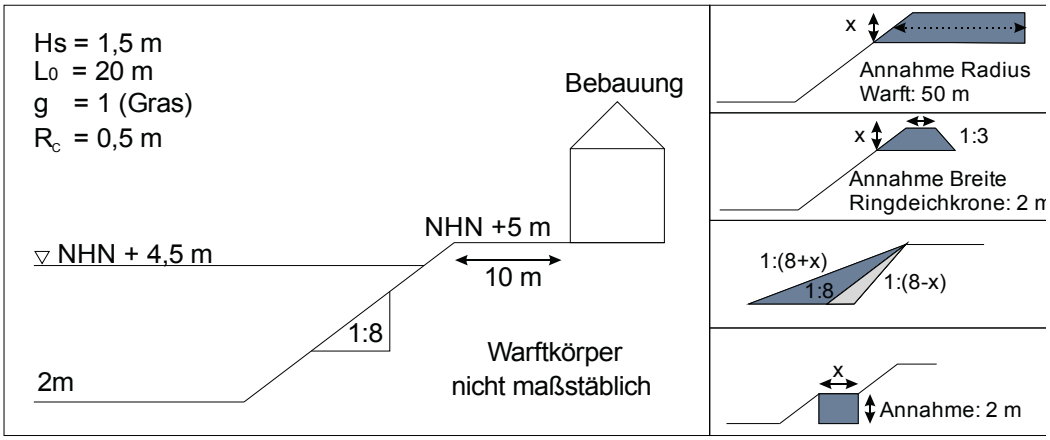


Abb. 91 Exemplarisches Warftprofil

Um eine bessere Vergleichbarkeit der Verstärkungsmöglichkeiten zu erreichen, wurden in den folgenden Berechnungen jeweils ausschließlich einzelne Parameter verändert.

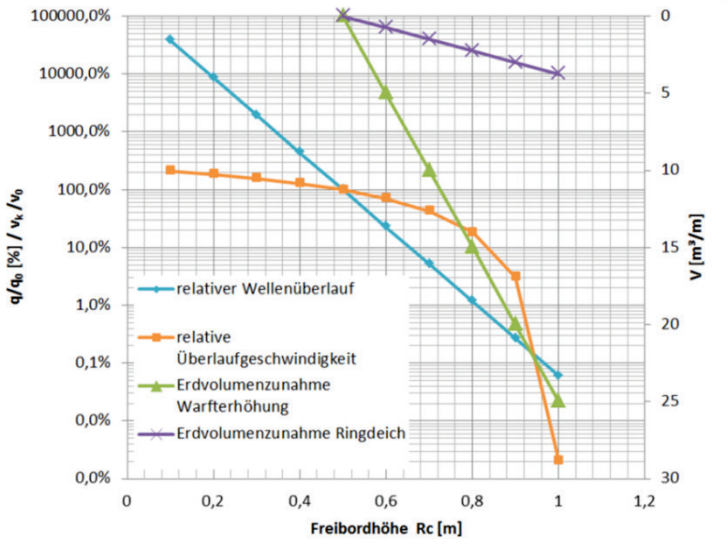


Abb. 92 Einfluss der Freibordhöhe auf die Wellenüberlaufrate, Wellenüberlaufgeschwindigkeit und Erdvolumenzunahme

In der Abb. 92 sind die Ergebnisse der Berechnungen dargestellt, bei denen die Erhöhung der Freibordhöhe variiert wurde. Bei einer Erhöhung der Freibordhöhe um 0,5 m wird die Wellenüberlaufrate q im Beispiel auf knapp 0,1 % des Ausgangswertes reduziert. Dabei erhöht sich das Erdvolumen um 25 m³/m bei einer kompletten Warfterhöhung und um 3,75 m³/m bei der Errichtung eines Ringdeiches. Ähnlich zu der Berechnung in Abhängigkeit von der Freibordhöhe wurden auch Berechnungen in Abhängigkeit der Steigung (vgl. Abb. 93) und der Bermenlänge (vgl. Abb. 94) durchgeführt. Auch dabei stellt die Erdvolumenzunahme den untersuchten Parameter zum Vergleich des möglichen Bauaufwandes dar.

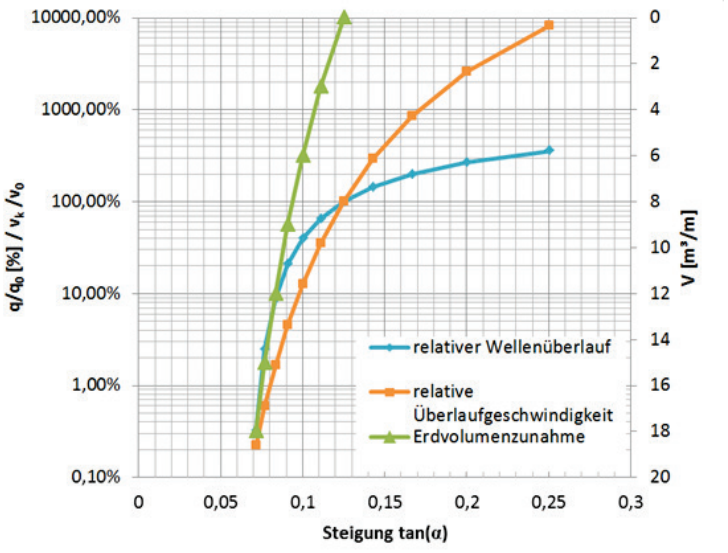


Abb. 93 Einfluss der Steigung auf die Wellenüberlaufrate, Wellenüberlaufgeschwindigkeit und Erdvolumenzunahme

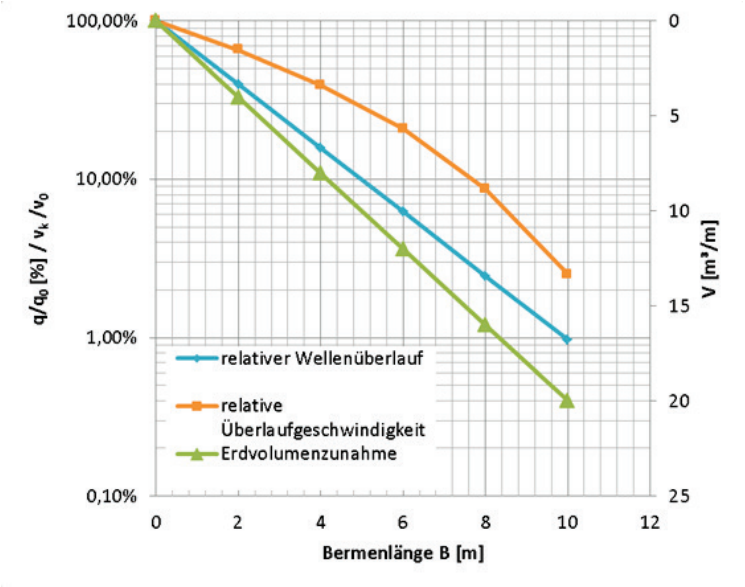


Abb. 94 Einfluss der Bermenlänge auf Wellenüberlaufrate, Wellenüberlaufgeschwindigkeit und Erdvolumenzunahme

Infolge der gesamten Untersuchung stellt sich die Erhöhung der Freibordhöhe als die effektivste Methode dar, den Wellenüberlauf und die Wellenüberlaufgeschwindigkeit bei möglichst geringer Erdvolumenzunahme zu verringern. Weiterhin ist bei der Erhöhung des Freibords der Bau eines Ringdeiches deutlich effektiver als die komplette Erhöhung einer Warft. Die Abflachung des Warftprofils stellt ebenfalls eine sinnvolle Maßnahme dar. Die benötigte Erdvolumenzunahme erhöht sich dabei allerdings im Gegensatz zur Profilerhöhung. Der Einfluss einer Berme führt zwar ebenfalls zu geringeren Wellenüberlaufraten und Geschwindigkeiten, allerdings nicht in dem Maße wie die beiden anderen Maßnahmen. Solange sich das Erdgeschoss der Hallighäuser 50 cm über der Warft befindet und dadurch ein zusätzlicher Schutz für die Bebauung gegeben ist, kann als Empfehlung für die zukünftige Verstärkung der Warften weiterhin ein Ringdeich gewählt werden. Dadurch wird die Kronenhöhe der Warft erhöht und der Wellenüberlauf verringert sich. Der Einstau von überlaufendem Wasser wird im möglichen Schadensfall dabei zwar größer, allerdings weisen die nach dem neuen Konzept erstellten Häuser genügend Widerstand auf, um diesem Schadensfall bei nicht zu großen Einstauhöhen zu widerstehen. Bei alter Bebauung könnte für die Verstärkung eine Warfterhöhung mit geringerer Steigung des Warftprofils vorgesehen werden, um erhöhten Einstau der Häuser zu vermeiden. Dies stellt aber eine deutlich kostenintensivere Maßnahme dar.

6.10 L2 - Automatische Warfterhöhung durch Wasserkraft

Das Prinzip dieser Maßnahme besteht darin, die komplette Warft hydraulisch zu lagern, sodass im Falle einer Sturmflut die Warft mit dem ansteigenden Wasser aufschwimmt. Das Prinzip

der hydraulischen Warft ist in der Abb. 95 für den Zustand während eines Landunters schematisch dargestellt.

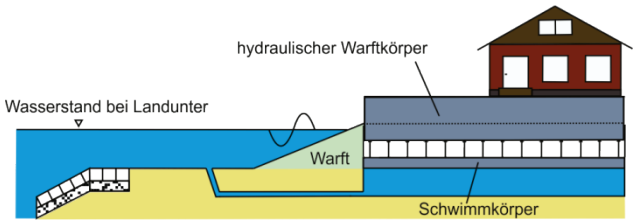


Abb. 95 Schematische Darstellung einer hydraulisch gelagerten Warft

Zur Umsetzung wird ein Schacht rund um die Warft herum ausgehoben, in den ein Hohlkörper gesetzt wird. Die Warft soll anschließend auf einem Schwimmerkörper gelagert werden, so dass dieser sich bei einer Sturmflut hebt und die Warft mit ihm aufschwimmt. Dadurch wäre die Warft erhöht und vor höheren Wasserständen geschützt. Die reduzierende Wirkung auf den Wellenüberlauf ist mit der Wirksamkeit einer Kronenmauer zu vergleichen. Die Wirkung einer Kronenmauer auf die Wellenüberlaufrate ist bereits in Kap. 6.6 beziehungsweise in der Abb. 74 dargestellt worden und soll an dieser Stelle nicht weiter erläutert werden.

Hauptkritikpunkt dieser Maßnahme ist neben dem enorm hohen Arbeitsaufwand die Betriebssicherheit dieses Systems. Da die hydraulische Warft im Normallfall nicht auf ihre Funktionalität hin überprüft werden kann, ist dieses System mit einem hohen Risiko behaftet. Bei einem Versagen des Systems und dem nicht Vorhandensein anderer Schutzmaßnahmen könnte bei Extremereignissen Wasser in die Häuser eindringen und große Schäden verursachen.

6.11 L3 - Komplette Warfterhöhung / Neubau

In diesem Kapitel wird die Maßnahme einer vollständigen Warfterhöhung genauer betrachtet. Das Prinzip dieser Maßnahme ist in der Abb. 96 dargestellt. Die auf der Warft befindlichen Gebäude müssen im Zuge dieser Maßnahme an das neue Niveau angepasst werden, wobei dies durch unterschiedliche Methoden umgesetzt werden kann.

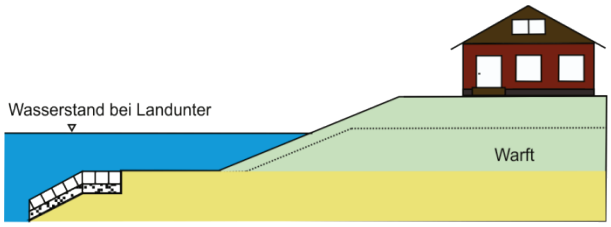


Abb. 96 Schematische Darstellung einer Aufwarftung mit anschließendem Neubau

So können die Gebäude entweder vollständig abgerissen und neugebaut oder künstlich angehoben werden. Eine weitere Möglichkeit wäre es, das untererste Stockwerk aufzugeben und die Häuser aufzustocken. Alle diese Maßnahmen sind zwar technisch möglich, aber mit einem großen Arbeitsaufwand verbunden.

Die Wirksamkeit dieser Maßnahme auf die relative Wellenüberlaufrate ist in der Abb. 100 dargestellt. So bewirkt eine Erhöhung des Freibords um 0,5 m auf 1,0 m eine Reduzierung der mittleren Wellenüberlaufrate von 15,5 l/m*s auf einen Wert von 0,5 l/m*s bei den gegebenen Bedingungen.

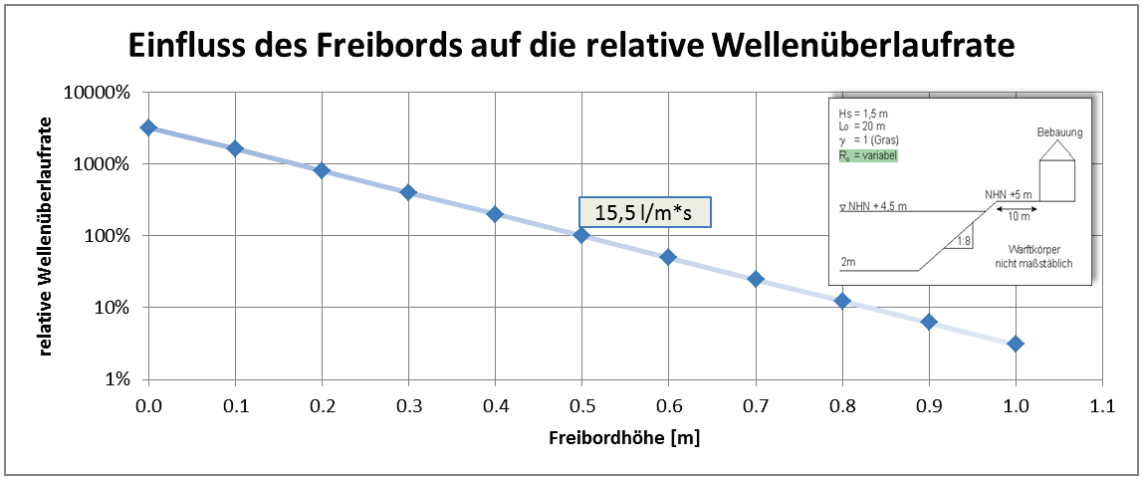


Abb. 97 Einfluss der Freibordhöhe auf die relative Wellenüberlaufrate

Abgesehen von dem hohen technischen Aufwand zur Umsetzung stellt diese Maßnahme ein wirkungsvolles Konzept dar, das eine hohe Betriebssicherheit besitzt und keinen negativen Einfluss auf das Landschaftsbild der Halligen ausübt.

6.12 L4 - Wirkungsvolle Schutzräume in den Häusern einrichten.

Schutzräume existieren bereits in fast allen Hallighäusern. Sie wurden als Konsequenz nach den schweren Sturmfluten in den Jahren 1962 und 1976 erbaut. Diese Räume sind so konzipiert, dass sie unabhängig vom Rest des Gebäudes auf vier Pfählen gegründet sind. Das bedeutet, dass selbst bei einer schweren Zerstörung des restlichen Hauses, diese Räume bestehen bleiben. Jedoch ging mit den Jahren auch die Bedeutung der Schutzräume wieder zurück. So werden sie mittlerweile häufig als Abstellräume oder ähnliches genutzt. Für die Häuser, in denen noch keine Schutzräume existieren, müssten diese noch nachgerüstet werden.

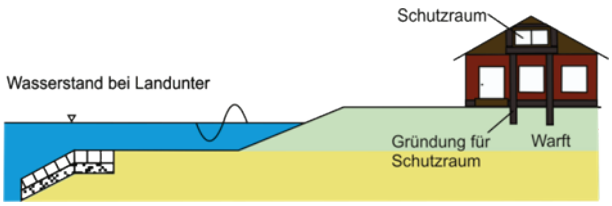


Abb. 98 Einrichtung eines Schutzraumes in einem Hallighaus

Selbst wenn alle anderen Küstenschutzmaßnahmen nicht mehr greifen, ist der Schutzraum ein Ort, der widerstandsfähig ist und in dem Menschenleben gerettet werden können. Die Schutzräume sind allerdings lediglich als letzter Zufluchtsort für die Halligbewohner gedacht und sollten lediglich als Kombination mit anderen Verstärkungsmaßnahmen angewendet werden.

6.13 L5 - Deich von Sylt bis Eiderstedt

Die Möglichkeit eines Deiches von rund 30 km Länge zwischen der Halbinsel Eiderstedt bis zur Insel Sylt wurde bereits als „Friesendamm“ in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts beschrieben. Bei der Bewertung wird hier nun das Augenmerk auf die Betrachtung als Küstenschutzmaßnahme gelegt. Der Deich würde eine Fläche von etwa 1000 km² Wattenmeer eindeichen und das gesamte Gebiet vor dem offenen Meer schützen. Folglich würden auch die Halligen in dem eingedeichten Gebiet liegen und wären vor den Einflüssen des Meeres weitestgehend geschützt.

In den Abb. 99 und Abb. 100 sind zwei mögliche Varianten einer Umsetzung dieses Projektes dargestellt. Die erste Variante (Abb. 99) basiert auf den Plänen des Friesendammes von W. Dix aus den Jahren 1927 und 1949 und hat eine Gesamtlänge von 30,5 km. Die zweite in Abb. 100 dargestellte Variante hat eine Länge von 37,2 km und umfasst im Gegensatz zur Variante 1 alle zehn Halligen.

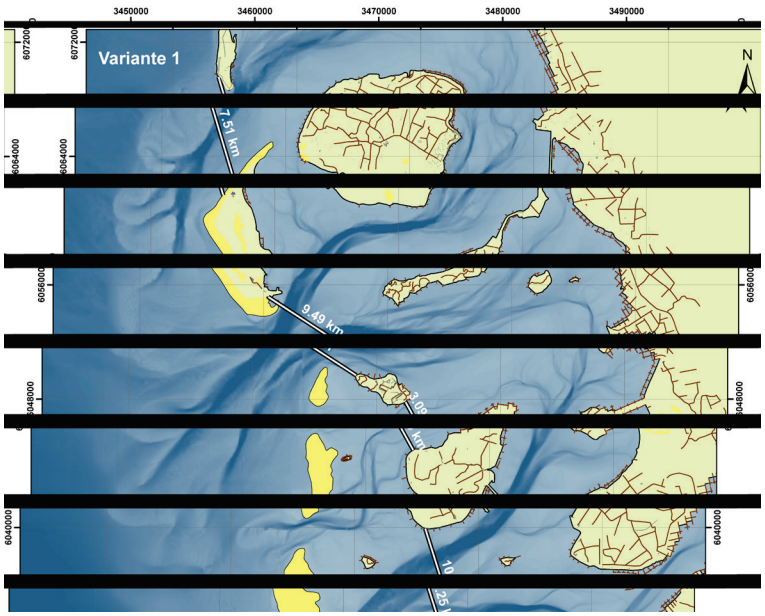


Abb. 99 Variante 1 mit einer Gesamtlänge von 30,5 km

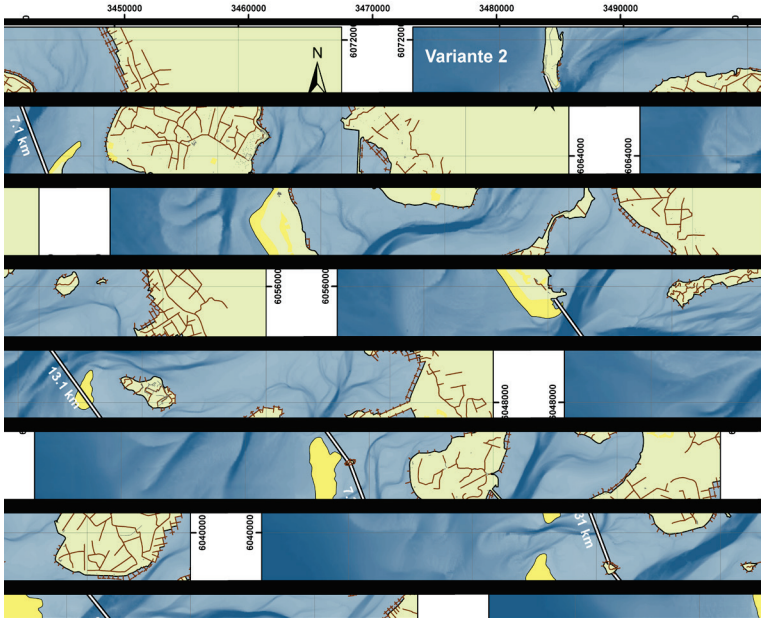


Abb. 100 Variante 2 mit einer Gesamtlänge von 37,2 km

Durch den Bau könnte direkt Einfluss auf die vorherrschenden Wasserstände genommen werden, da die Halligen durch den Deich vor Sturmfluten und steigenden Wasserständen geschützt wären.

Die Kosten dieses Projektes sind allerdings enorm hoch. Vergleichbare Projekte sind der Abschlussdeich in den Niederlanden sowie der Saemangeum Seawall in Südkorea. Letzterer wurde

in den Jahren 1991 bis 2011 konstruiert und hat bei einer Länge von etwa 33 km Kosten in einer Höhe von 1,5 Mrd. € verursacht (Cho, 2007).

Durch den Bau eines solchen Deiches würde das Ökosystem Wattenmeer eine starke Veränderung von nicht vorhersagbarem Ausmaß erfahren. Zudem besitzt das schleswig-holsteinische Wattenmeer den Status eines Nationalparks und UNESCO-Weltnaturerbes und würde durch solch ein Projekt diesen Status nicht länger behalten können.

Als Küstenschutzmaßnahme ist der Bau dieses Deiches von der hydrodynamischen Wirksamkeit zwar als positiv anzusehen, jedoch aus Sicht des Naturschutzes und den weitreichenden Veränderungen generell als nicht durchsetzbar zu bewerten.

6.14 Zusammenfassende Bewertung

In den Abb. 101 und Abb. 102 findet eine zusammenfassende Bewertung der im Rahmen der Zukunftworkshops auf Hooge und Langeneß generierten Ideen statt. Dabei wird für die folgenden Kategorien jeweils eine eigene Bewertung vorgenommen, bei der Punkte von 0 bis 4 vergeben werden:

- *Wirkung auf den Wellenüberlauf*
- *Betriebssicherheit*
- *Bauaufwand*
- *Landschaftsbild*
- *Naturschutz*

In der rechten Spalte wird das Produkt der einzelnen Bewertungen ermittelt. Erhält eine Maßnahme in nur einer Bewertungskategorie null Punkte, ergibt die Gesamtwertung somit ebenfalls null Punkte.

Bei den untersuchten Maßnahmen auf Hooge (siehe Abb. 101) erhält die Maßnahme des Ringdeiches, der um die gesamte Warft errichtet wird, mit 144 Punkten die beste Bewertung. Auf den Plätzen dahinter folgen die Raupflasterung der Warften mit 72 Punkten sowie der mobile Deichschlauch mit 16 Punkten. Alle diese drei Maßnahmen erscheinen somit im Rahmen dieser Untersuchung als wirksam und technisch machbar. Der mobile Deichschlauch könnte durch die vorgestellte Alternative der aufklappbaren Hochwasserschutzwand in der Kategorie der Betriebssicherheit noch besser bewertet werden. Die Maßnahme der Verbindung und Bepflanzung der Außensände wird aufgrund der nicht vorhandenen Wirksamkeit auf den Wellenüberlauf als bedeutungslos bewertet. Die hydraulische Hochwasserschutzwand wird aufgrund des sehr hohen

Bauaufwandes sowie der geringen Betriebssicherheit als nicht zu empfehlende Maßnahme beurteilt.

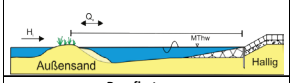
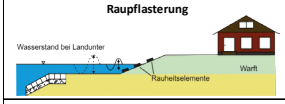
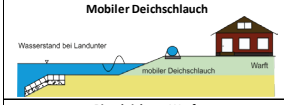
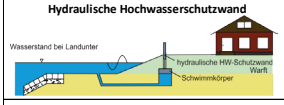
	Wirkung auf Wellenüberlauf	Betriebssicherheit	Bauaufwand	Landschaftsbild	Naturschutz	Produkt
Bepflanzung/Verbindung der Außensände 	2	2	1	1	1	4
Raupflasterung 	3	4	3	1	2	72
Mobiler Deichschlauch 	4	1	1	2	2	16
Ringdeich um Warft	3	4	3	2	2	144
Hydraulische Hochwasserschutzwand 	4	0	0	2	2	0
Legende	0: starke Erhöhung 1: leichte Erhöhung 2:kein Einfluss 3: Reduzierung 4: große Reduzierung	0: sehr fehleranfällig 1: fehleranfällig 2: gering fehleranfällig 3: zuverlässig 4: sehr zuverlässig	0: sehr großer Aufwand 1: großer Aufwand 2: mittlerer Aufwand 3: geringer Aufwand 4: sehr geringer Aufwand	0: stark negantiver Einfluss 1: negativer Einfluss 2: kein Einfluss 3: positiver Einfluss 4: sehr positiver Einfluss	0: nicht vereinbar 1: teilweise nicht vereinbar 2: kein Konflikt 3: positiv 4: sehr positiv	

Abb. 101 Zusammenfassende Bewertung der im Rahmen der Zukunftworkshops generierten Maßnahmen für die Hallig Hooge

Bei den auf Langeneß (vgl. Abb. 102) generierten Ideen fallen die Maßnahmen der hydraulischen Warft sowie die Eindeichung des Wattenmeeres jeweils aufgrund mehrerer Faktoren aus dem Bereich der zu empfehlenden Maßnahmen. Während die Eindeichung des Wattenmeeres in den Kategorien des Bauaufwandes, des Landschaftsbildes sowie des Naturschutzes gleich in drei Fällen mit null Punkten die schlechteste Bewertung erhält, erreicht die hydraulische Warft in den Kategorien der Betriebssicherheit und des Bauaufwandes jeweils null Punkte. Als technisch machbare und wirksame Maßnahmen belegen die Abflachung der Warft bzw. der Ringdeich auf der Warftkrone mit 144 Punkten, die Einrichtung geeigneter Schutzräume mit 96 Punkten und die Aufwarftung mit 64 Punkten die ersten drei Plätze. Platz 4 mit 32 Punkten erreicht die Maßnahme der technischen Anhebung der Häuser. Gerade die Maßnahme der Schutzräume sollte jedoch als Ergänzung anderer Maßnahmen angesehen werden und mit diesen kombiniert angewendet werden.

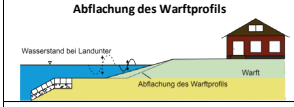
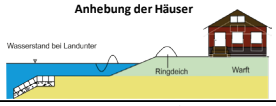
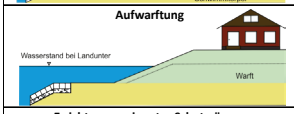
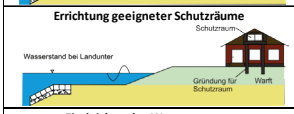
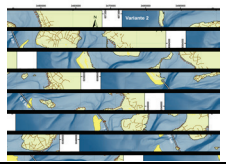
Langeneß	Wirkung auf Wellenüberlauf	Betriebs-sicherheit	Bauaufwand	Landschaftsbild	Naturschutz	Produkt
Abflachung des Warftprofils 	3	4	3	2	2	144
Anhebung der Häuser 	2	4	1	2	2	32
Hydraulische Warft	4	0	0	1	1	0
Aufwarftung 	4	4	1	2	2	64
Errichtung geeigneter Schutzräume 	2	4	3	2	2	96
Eindeichen des Wattenmeeres 	4	4	0	0	0	0
Legende	0: starke Erhöhung 1: leichte Erhöhung 2:kein Einfluss 3: Reduzierung 4: große Reduzierung	0: sehr fehleranfällig 1: fehleranfällig 2: gering fehleranfällig 3: zuverlässig 4: sehr zuverlässig	0: sehr großer Aufwand 1: großer Aufwand 2: mittlerer Aufwand 3: geringer Aufwand 4: sehr geringer Aufwand	0: stark negantiver Einfluss 1: negativer Einfluss 2: kein Einfluss 3: positiver Einfluss 4: sehr positiver Einfluss	0: nicht vereinbar 1: teilweise nicht vereinbar 2: kein Konflikt 3: positiv 4: sehr positiv	

Abb. 102 Zusammenfassende Bewertung der im Rahmen der Zukunftworkshops generierten Maßnahmen für die Hallig Langeneß

Die gezeigten Maßnahmen stellen einen Katalog möglicher Küstenschutzmaßnahmen für die Halligen dar. Diese dürfen keineswegs als Möglichkeit für jede Warft interpretiert werden, sondern müssen vielmehr von Warft zu Warft überprüft werden, so dass für jede einzelne Warft eine individuelle Lösung entwickelt werden muss.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Die aufgeführten Untersuchungen innerhalb des Teilprojektes ZukunftHallig-B stellen einen wichtigen Beitrag zur Entwicklung nachhaltiger Küstenschutzmaßnahmen und Bewirtschaftungsstrategien dar. Mit dem in Kapitel 2 vorgestellten numerischen Seegangsmodell wird zunächst ein Werkzeug geschaffen, mit dem die in den folgenden Kapiteln beschriebenen Untersuchungen durchgeführt werden. Dabei folgen diese Untersuchungen dem Profil einer Hallig von der Halligkante, über die Halligfläche bis hin zur Warft mit den darauf befindlichen Gebäuden.

In Kapitel 3 erfolgt mit der Entwicklung eines Bemessungsansatzes für Halligraustreifen die Untersuchung zur Kante der Hallig. Für diesen Bereich ist somit ein neues Verfahren zur Bemessung entwickelt worden, das in physikalischen und numerischen Modellversuchen unter instationärer Belastung weiter untersucht werden sollte.

In Kapitel 4 wird mit den Untersuchungen zur Erhöhung der Sedimentation auf den Halligflächen die Möglichkeit einer nachhaltigen Bewirtschaftungsstrategie erläutert. Dabei werden zum einen das numerische Modell des Untersuchungsgebietes verwendet und zum anderen in-situ-Messungen am Sieltor Osterwehl auf Langeneß durchgeführt. Für diesen Bereich bleibt jedoch weiterhin die Frage offen, welcher Anteil der im Wasser mitgeführten und aufgrund der erhöhten Turbidität deutlich erkennbaren Sedimente im Priel auch tatsächlich auf der Hallig abgelagert werden würde. Da es im Rahmen der in-situ-Messungen nicht zu einem Landunter gekommen ist, wäre eine Wiederholung der Versuche bei einem Wasserstand zwischen MThw +50 cm und MThw +100 cm wünschenswert. Außerdem kann das bestehende numerische Modell auch dahingehend erweitert werden, dass morphologische Prozesse wie Erosion und Sedimentation simuliert werden, um so die Nachhaltigkeit einer klimaangepassten Bewirtschaftungsstrategie langfristig untersuchen zu können.

In Kapitel 5 erfolgt eine Quantifizierung des Schutzstandards der Halligwarften. Diese dient der Priorisierung von durchzuführenden Schutzmaßnahmen und ist Grundlage der risikoorientierten Gefährdungsanalyse.

In Kapitel 6 werden unterschiedliche Küstenschutzmaßnahmen untersucht, die im Rahmen der durchgeführten Zukunft-Workshops entwickelt worden sind. Die Bewertung erfolgt anhand der Wirkung auf den Wellenüberlauf an der Warft, der Betriebssicherheit, dem Bauaufwand, dem Einfluss auf das Landschaftsbild sowie dem Naturschutz.

Die Untersuchungen innerhalb des Teilprojektes ZukunftHallig-B machen deutlich, dass für jede Warft individuelle Lösungen entwickelt werden müssen, um diese auch vor zukünftigen Sturmfluten sicher zu schützen. Dabei müssen gemeinsam mit den jeweiligen Warftbewohnern

Maßnahmen erarbeitet werden, die von diesen voll akzeptiert werden. Für eine mögliche Priorisierung von Verstärkungsmaßnahmen stellt die Quantifizierung des Schutzstandards ein wichtiges Instrument dar. Dabei sollten weiterhin Daten zu Wasserständen und Seegang auf den Halligen während eines Landunters gesammelt werden, um das bestehende numerische Seegangsmodell weiter kalibrieren zu können.

8 Schrifttum

Cho, Dong-Oh. 2007. The evolution and resolution of conflicts on Saemangeum Reclamation Project. Ocean & Coastal Management. Volume 50. Issues 11-12. Pages 930-944.

Deltares, 2010. Delft3D-Wave; Simulation of short-crested waves with SWAN; User Manual; Version 3.04.

DIN Deutsches Institut für Normung e.V., 1987. DIN 66165-1: Siebanalyse Grundlagen. Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung e.V.

EAK, 2002. Empfehlungen für die Ausführung von Küstenschutzbauwerken durch den Ausschuss für Küstenschutzbauwerke der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e.V. und der Hafenbau-technischen Gesellschaft e.V.; In: Die Küste; Heft 65.

Ehlers, J., 1988. The Morphodynamics of the Wadden Sea. Rotterdam: A.A. Balkema. ISBN 90 6191 679 8.

Erchinger, H.F.; Coldewey, H.-G.; Meyer, C., 1996. Interdisziplinäre Erforschung des Deichvorlandes im Forschungsvorhaben "Erosionsfestigkeit von Hellern"; Die Küste (58).

Ferzinger, J. H. & Peric, M., 2008. Numerische Strömungsmechanik. Berlin: Springer-Verlag. ISBN 978-3-540-67586-0.

Forkel, C., 1999. Numerische Modelle für die Wasserbaupraxis. Grundlagen, Anwendungen, Qualitätsaspekte. Habilitationsschrift. Aachen: RWTH Aachen.

Führböter, A., 1966. Der Druckschlag durch Brecher auf Deichböschungen. Hannover; Mitteilungen des Franzius-Instituts für Grund- und Wasserbau der Technischen Hochschule Hannover (28).

Hafsteinsson, H.E., 2009. Porous Media in OpenFOAM: Chalmers University. Online verfügbar unter http://www.tfd.chalmers.se/~hani/kurser/OS_CFD_2008/HaukurElvarHafsteinsson/haukurReport.pdf, zuletzt geprüft am 01.10.2013.

IPCC, 2007. Climate Change 2007: Synthesis Report.

Kobayashi, N. & de los Santos, F. J., 2007. Irregular Wave Seepage and Overtopping of Permeable Slopes. In: *JWPCOE* (133.4); S. 245–254.

Kortenhaus, A. & Oumeraci, H., 2002. Probabilistische Bemessungsmethoden für Seedeiche (ProDeich). Braunschweig: Leichtweiss-Institut für Wasserbau TU Braunschweig (877).

Kumbruck, N., 2009. Halligraustreifen (Halligigel) als Wellen- und Erosionsschutz – Funktionsweise und Bemessung; Diplomarbeit Universität Rostock; Fachgebiet Küstenwasserbau.

Lioutas, A.; Smith, G.M.; Verhagen, H.J., 2012. Spatial Distribution of Overtopping. In: *Coastal Engineering Conference; Vol.* 33 (1).

Liem, R., 1995. Konstruktion und Einsatz eines in-situ Erosionsmessgerätes zur Untersuchung kohäsiver Schlämme; Diplomarbeit, IWW, RWTH Aachen (unveröffentlicht).

LKN-SH (2009): Fachplan Küstenschutz Amrum; 1. Auflage; Husum.

LKN-SH, 2011a. Arbeitsbericht ZukunftHallig – Teilprojekt: ZukunftHalligC – Bewertung vorhandener Küstenschutzsysteme, hydrologisches Monitoring und Datenbereitstellung; (unveröffentlicht).

LKN-SH, 2011b. Erläuterungsbericht Halligdeckwerke. Erläuterungsbericht zur Verstärkung der Deckwerke auf den Halligen 2007 bis 2014. Husum: Landesamt für Küstenschutz, Naturschutz und Meeresschutz Schleswig-Holstein.

LKN-SH. 2014. Fachplan Küstenschutz Sylt. Husum: Landesamt für Küstenschutz, Naturschutz und Meeresschutz Schleswig-Holstein. Online verfügbar unter:

http://www.schleswig-holstein.de/KuestenSchutz/DE/03_Sylt/sylt_node.html (Letzter Zugriff am 23.04.2014)

Lüngen, T. 2013. Entwicklung eines Bemessungsansatzes für Warften und Häuser auf den nordfriesischen Halligen. Masterarbeit. IWW. RWTH Aachen University (unveröffentlicht).

Mai, S., Praesler, C., Zimmermann, C. 2004. Wellen und Seegang an Küsten und Küstenbauwerken mit Seegangsatlas der Deutschen Nordseeküste, Vorlesungsergänzungen des Lehrstuhls für Wasserbau und Küsteningenieurwesen Franzius-Institut, Universität Hannover, 2004.

Martin, H. & Pohl, R., 2008. Technische Hydromechanik Band 4. Hydraulische und numerische Modelle. 2. Aufl. Berlin: Verlag Bauwesen. ISBN 978-3-345-00924-2.

MELUR-SH, 2012. Generalplan Küstenschutz des Landes Schleswig-Holstein. Fortschreibung 2012.

Mobildeich. 2013. Telefonische Auskunft erhalten am 02.12.2013.

Müller, F. 1917. Das Wasserwesen an der schleswig-holsteinischen Nordseeküste. Erster Teil: Die Halligen. Band 1. Dietrich Reimer. Berlin.

Oumeraci, H.; Staal, T.; Pfoertner, S.; Ludwigs, G.; Kudella, M., 2010. Hydraulic Performance, Wave Loading and Response of Elastocoast Revetments and their Foundation. A Large Scale Model Study. Braunschweig: Leichtweiss-Institut für Wasserbau TU Braunschweig (988).

Pachauri, R. K., and A. Reisinger. 2007. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC, Geneva, Switzerland.

Petersen, M., 1981. Die Halligen: Küstenschutz – Sanierung – Naturschutz; Karl Wachholtz Verlag; Neumünster.

Petersen, M. & Rohde, H., 1991. Sturmflut – Die großen Fluten an den Küsten Schleswig-Holsteins und in der Elbe; Karl Wachholtz Verlag; Neumünster.

Pietzsch, B., 2001. In situ Untersuchungen zur Mobilität bindiger Stauraumsedimente während einer Entleerungsmaßnahme am Beispiel des Staubeckens Heimbach; Diplomarbeit, IWW, RWTH Aachen (unveröffentlicht).

Pullen, T.; Allsop, N.W.H.; Bruce, T.; Kortenhaus, A.; Schüttrumpf, H.; van der Meer, J. W., 2007. EurOtop. Wave Overtopping of Sea Defences and Related Structures: Assessment Manual. Heide i. Holstein: Boyens Medien GmbH & Co. KG (Die Küste, 73).

Schüttrumpf, H., 2001. Wellenüberlaufströmungen bei Seedeichen. Experimentelle und theoretische Untersuchungen. Dissertation. Braunschweig: Leichtweiss-Institut für Wasserbau TU Braunschweig.

Seiss, G. & Plüss, A., 2003. Tideverhältnisse in der Deutschen Bucht; Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau Nr. 86; Dienststelle Hamburg.

Shields, A., 1936. Anwendung der Aehnlichkeitsmechanik und der Turbulenzforschung auf die Geschiebebewegung; Dissertation: Berlin: TeH Berlin.

Stadelmann, R., 2008. Den Fluten Grenzen setzen – Schleswig Holsteins Küstenschutz – Westküste und Elbe; Band 1: Nordfriesland; Husum.

Swan User Manual. 2006. SWAN User Manual. The SWAN team. Delft University of Technology.

ThyssenKrupp Bautechnik. 2014. Hochwasserschutz Lieferprogramm. Online verfügbar unter: http://www.thyssenkrupp-bautechnik.de/fileadmin/Leistungen/04_Hochwasserschutz/_media/neu/040413_TKBT_HWS_Folder_DT.pdf (zuletzt geprüft am 22.07.2013)

Unsöld, G., 1984. Der Transportbeginn feinstkörnigen rolligen Sohlmaterials in gleichförmigen turbulenten Strömungen: Eine Experimentelle Überprüfung und Erweiterung der SHIELDS-Funktion; Dissertation; Universität Kiel.

van Gent, M. R.A., 1995. Wave Interaction with Permeable Coastal Structures. Dissertation. Delft, Niederlande: TU Delft. Online verfügbar

unter:http://repository.tudelft.nl/assets/uuid:7bbff8e4-215d-4bfc-a3af-51cdecb754bd/ceg_gent_19951212.PDF (zuletzt geprüft am 22.07.2013).

van Kester, D., 2009. Spatial Distribution of Wave Overtopping. M.Sc. Thesis. Online verfügbar unter

http://repository.tudelft.nl/assets/uuid:5e91b150-3d62-462e-83f0-0efe570df822/Final_report.pdf (zuletzt geprüft am 20.07.2013).

Verhagen, H.J.; Steenaard, J.; Tuan, T.Q., 2004. Infiltration of overtopping water in a breakwater crest. In: *Coastal Engineering Conference; Vol.* 29 (4).

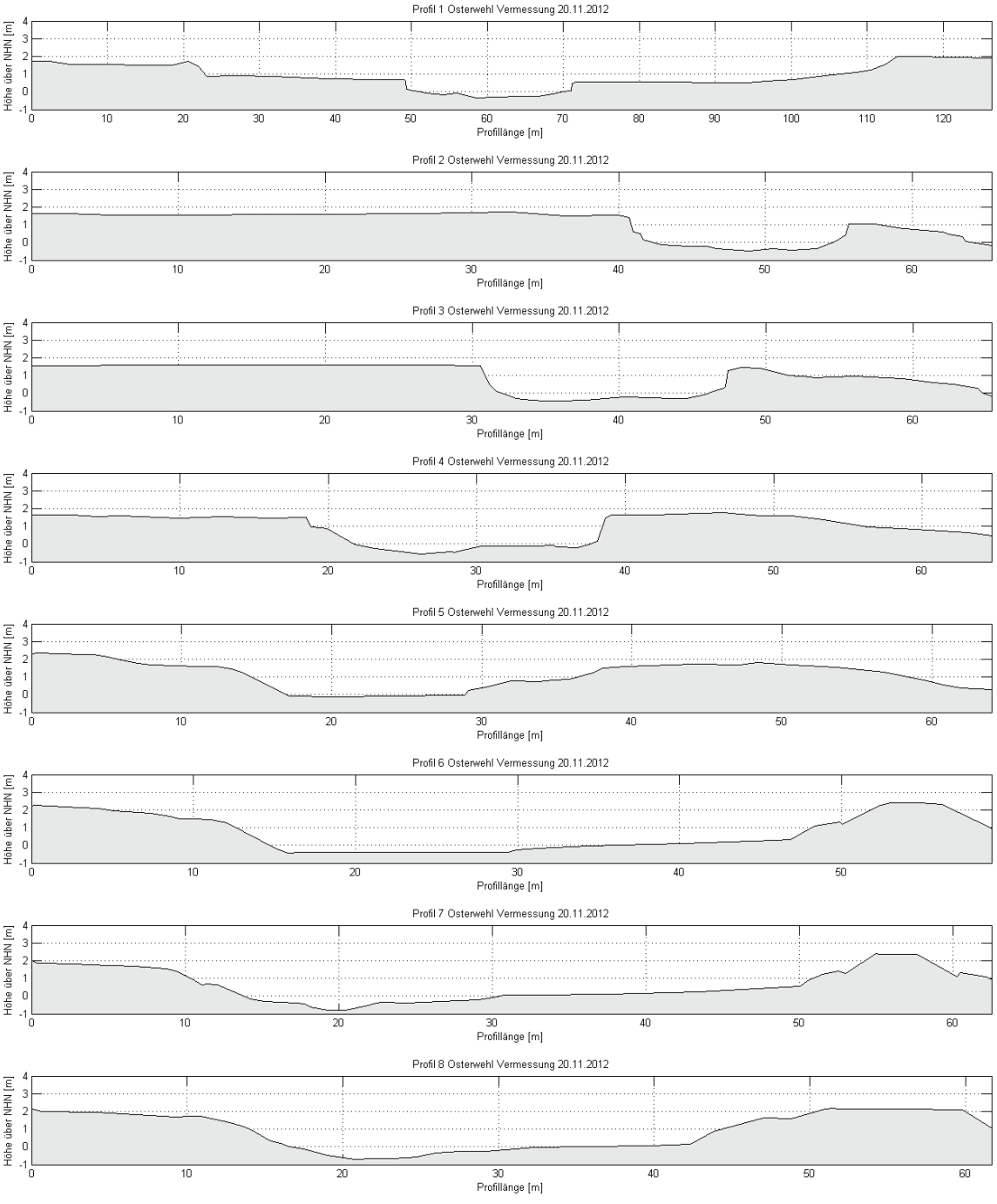
Winskowsky, U., 1998. Strömungen im nordfriesischen Wattenmeer; Landesamt für den Nationalpark Schleswig-Holsteinisches Wattenmeer; Umweltbundesamt (Hrsg.): Umweltatlas Wattenmeer – Band 1: Nordfriesisches und Dithmarscher Wattenmeer; Ulmer Verlag; Stuttgart.

Wohlbring, J. 2013. Entwicklung und Bewertung eines Bemessungsansatzes für Halligraustreifen mit Hilfe physikalischer Modellversuche und numerischer Simulationen. Masterarbeit. IWW. RWTH Aachen University (unveröffentlicht).

Zanke, U. 2002. Hydromechanik der Gerinne und Küstengewässer: Für Bauingenieure, Umwelt- und Geowissenschaftler. Vieweg/ Teubner Verlag.

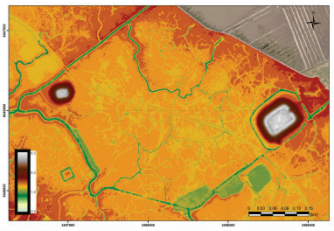
Zanke, U. 2013. Hydraulik für den Wasserbau. Springer 2013.

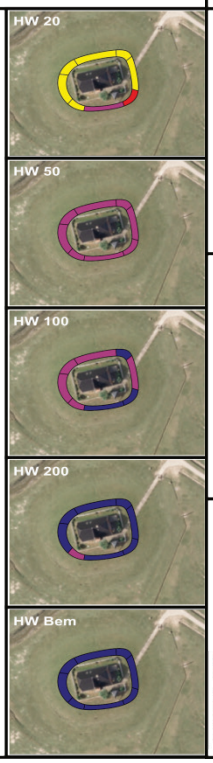
Anhang


Profil 1 Osterwehl Vermessung 20.11.2012
Höhe über NHN [m]
Profillänge [m]
Profil 2 Osterwehl Vermessung 20.11.2012
Höhe über NHN [m]
Profillänge [m]
Profil 3 Osterwehl Vermessung 20.11.2012
Höhe über NHN [m]
Profillänge [m]
Profil 4 Osterwehl Vermessung 20.11.2012
Höhe über NHN [m]
Profillänge [m]
Profil 5 Osterwehl Vermessung 20.11.2012
Höhe über NHN [m]
Profillänge [m]
Profil 6 Osterwehl Vermessung 20.11.2012
Höhe über NHN [m]
Profillänge [m]
Profil 7 Osterwehl Vermessung 20.11.2012
Höhe über NHN [m]
Profillänge [m]
Profil 8 Osterwehl Vermessung 20.11.2012
Höhe über NHN [m]
Profillänge [m]

Nordstrandischmoor
Amalienwarft

Datenbasis:
Digitales Geländemodell: Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein, DGM1, ©LVermGeo SH
Digitale Orthophotos: Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein, ATKIS®DOP20c, ©LVermGeo SH
Liegenschaftsdaten: Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein; ALK, ©LVermGeo SH



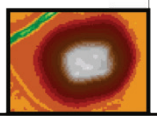


Amalienwarft

Warftinnenfläche:	**610 m²**
Warftart:	**Warft ohne Ringdeich**
Fething:	**nein**
Maximal kehrbarer Wasserstand:	**< HW20**

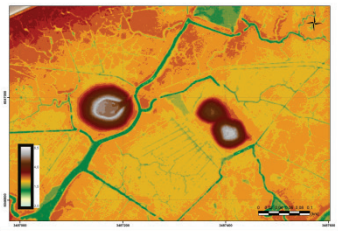
Sicherheitsstatus

- gut < 0,5 [l/sm]
- befriedigend > 0,5 & < 2 [l/sm]
- ausreichend > 2 & < 5 [l/sm]
- mangelhaft > 5 & < 10 [l/sm]
- ungenügend > 10 [l/sm]
- Überströmen



Nordstrandischmoor
Halber Weg

Datenbasis:
Digitales Geländemodell: Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein, DGM1, ©LVermGeo SH
Digitale Orthophotos: Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein, ATKIS®DOP20c, ©LVermGeo SH
Liegenschaftsdaten: Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein; ALK, ©LVermGeo SH

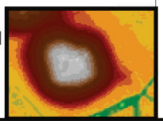


Halber Weg

Warftinnenfläche:	**1250 m²**
Warftart:	**Warft ohne Ringdeich**
Fething:	**nein**
Maximal kehrbarer Wasserstand:	**HW20**

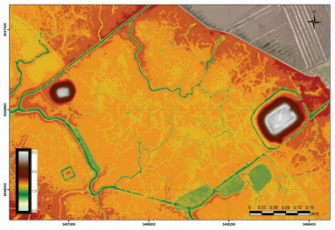
Sicherheitsstatus

- gut < 0,5 [l/sm]
- befriedigend > 0,5 & < 2 [l/sm]
- ausreichend > 2 & < 5 [l/sm]
- mangelhaft > 5 & < 10 [l/sm]
- ungenügend > 10 [l/sm]
- Überströmen



Nordstrandischmoor
Neuwarft

Datenbasis:
Digitales Geländemodell: Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein, DGM1, ©LVermGeo SH
Digitale Orthophotos: Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein, ATKIS®DOP20c, ©LVermGeo SH
Liegenschaftsdaten: Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein; ALK, ©LVermGeo SH

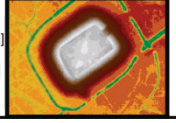


Neuwarft

Warftinnenfläche:	**680 m²**
Warftart:	**Warft mit nicht durch-gängigem Ringdeich**
Fething:	**nein**
Maximal kehrbarer Wasserstand:	**HW20**

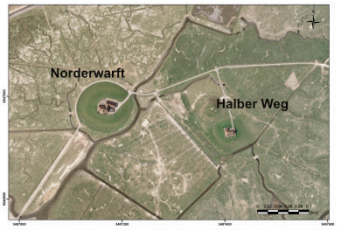
Sicherheitsstatus

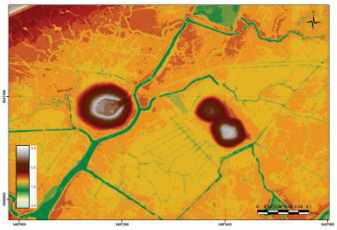
- gut < 0,5 [l/sm]
- befriedigend > 0,5 & < 2 [l/sm]
- ausreichend > 2 & < 5 [l/sm]
- mangelhaft > 5 & < 10 [l/sm]
- ungenügend > 10 [l/sm]
- Überströmen

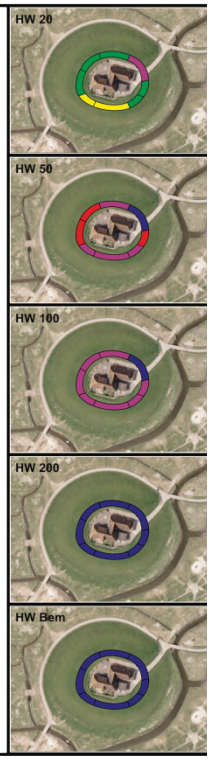


Nordstrandischmoor
Norderwarft

Datenbasis:
Digitales Geländemodell: Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein, DGM1, ©LVermGeo SH
Digitale Orthophotos: Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein, ATKIS®DOP20c, ©LVermGeo SH
Liegenschaftsdaten: Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein; ALK, ©LVermGeo SH





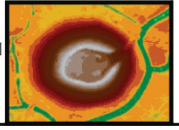


Norderwarft

Warftinnenfläche:	**1980 m²**
Warftart:	**Warft mit nicht durch-gängigem Ringdeich**
Fething:	**nein**
Maximal kehrbarer Wasserstand:	**<HW20**

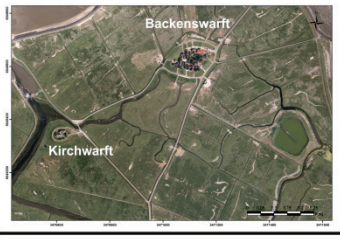
Sicherheitsstatus

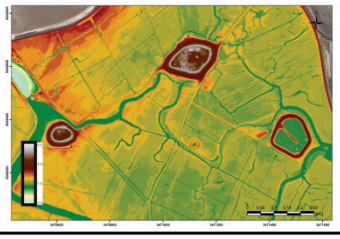
- gut < 0,5 [l/sm]
- befriedigend > 0,5 & < 2 [l/sm]
- ausreichend > 2 & < 5 [l/sm]
- mangelhaft > 5 & < 10 [l/sm]
- ungenügend > 10 [l/sm]
- Überströmen



Hooge
Backenswarft

Datenbasis:
Digitales Geländemodell: Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt
und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein; DGM1, ©LVermGeo SH
Digitale Orthophotos: Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt
und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein; ATKIS®DOP20c, ©LVermGeo SH
Liegenschaftsdaten: Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt
und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein; ALK, ©LVermGeo SH



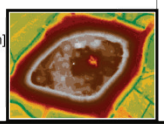


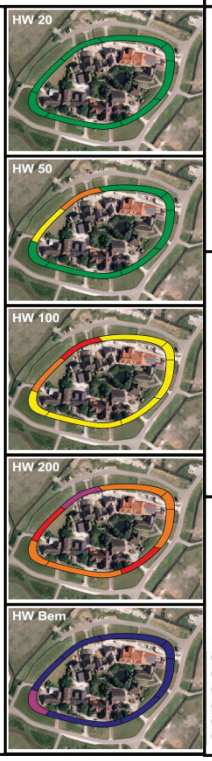
Backenswarft

Wohnfläche:	**2600 m²**
Warftinnenfläche:	**8710 m²**
Warftart:	**Warft mit durch-gehendem Ringdeich**
Fething:	**Ja**
Maximal kehrbarer Wasserstand:	**HW50**

Sicherheitsstatus

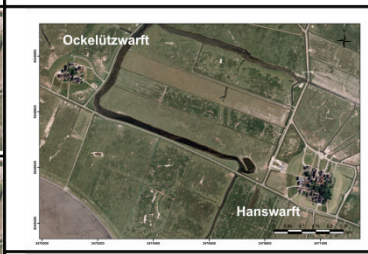
- gut < 0,1 [l/sm]
- befriedigend > 0,1 & < 0,5 [l/sm]
- ausreichend > 0,5 & < 2 [l/sm]
- mangelhaft > 2 & < 5 [l/sm]
- ungenügend > 5 [l/sm]
- Überströmen

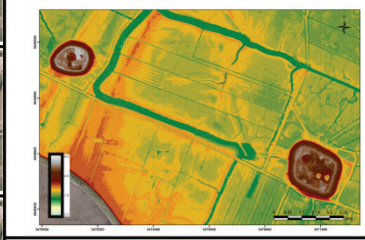




Hooge
Hanswarft

Datenbasis:
Digitales Geländemodell: Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt
und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein; DGM1, ©LVermGeo SH
Digitale Orthophotos: Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt
und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein; ATKIS®DOP20c, ©LVermGeo SH
Liegenschaftsdaten: Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt
und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein; ALK, ©LVermGeo SH



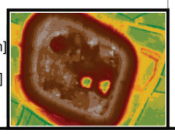


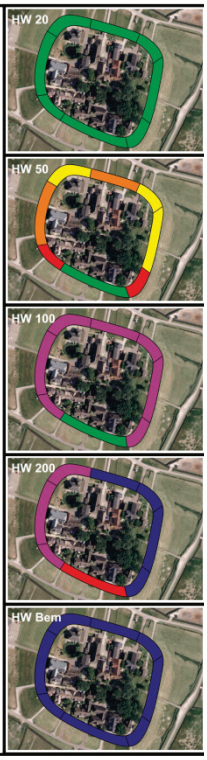
Hanswarft

Wohnfläche:	**4330 m²**
Warftinnenfläche:	**16880 m²**
Warftart:	**Warft ohne Ringdeich**
Fething:	**Ja**
Maximal kehrbarer Wasserstand:	**HW20**

Sicherheitsstatus

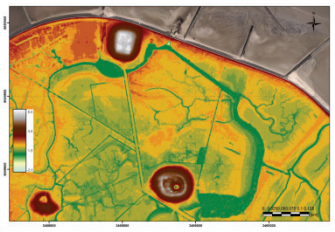
- gut < 0,5 [l/sm]
- befriedigend > 0,5 & < 2 [l/sm]
- ausreichend > 2 & < 5 [l/sm]
- mangelhaft > 5 & < 10 [l/sm]
- ungenügend > 10 [l/sm]
- Überströmen





Hooge
Ipkenswarft

Datenbasis:
Digitales Geländemodell: Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt
und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein; DGM1, ©LVermGeo SH
Digitale Orthophotos: Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt
und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein; ATKIS®DOP20c, ©LVermGeo SH
Liegenschaftsdaten: Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt
und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein; ALK, ©LVermGeo SH

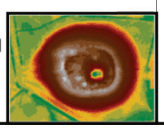


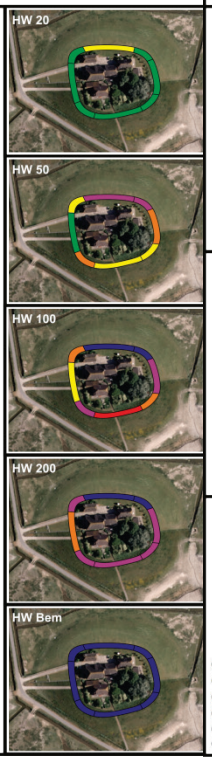
Ipkenswarft

Wohnfläche:	**570 m²**
Warftinnenfläche:	**2210 m²**
Warftart:	**Warft ohne Ringdeich**
Fething:	**Ja**
Maximal kehrbarer Wasserstand:	**HW20**
Stöpe vorhanden:	**nein**

Sicherheitsstatus

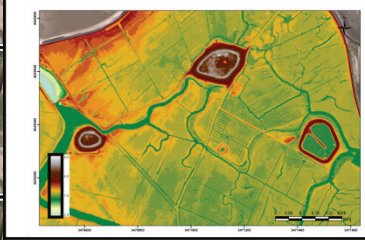
- gut < 0,5 [l/sm]
- befriedigend > 0,5 & < 2 [l/sm]
- ausreichend > 2 & < 5 [l/sm]
- mangelhaft > 5 & < 10 [l/sm]
- ungenügend > 10 [l/sm]
- Überströmen





Hooge
Kirchwarft

Datenbasis:
Digitales Geländemodell: Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt
und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein; DGM1, ©LVermGeo SH
Digitale Orthophotos: Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt
und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein; ATKIS®DOP20c, ©LVermGeo SH
Liegenschaftsdaten: Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt
und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein; ALK, ©LVermGeo SH

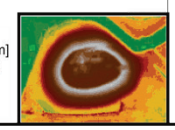


Kirchwarft

Wohnfläche:	**450 m²**
Warftinnenfläche:	**1990 m²**
Warftart:	**Warft mit durch-gängigem Ringdeich**
Fething:	**Ja**
Maximal kehrbarer Wasserstand:	**HW50**

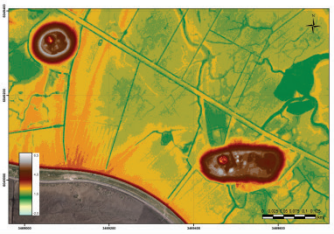
Sicherheitsstatus

- gut < 0,1 [l/sm]
- befriedigend > 0,1 & < 0,5 [l/sm]
- ausreichend > 0,5 & < 2 [l/sm]
- mangelhaft > 2 & < 5 [l/sm]
- ungenügend > 5 [l/sm]
- Überströmen



Hooge
Lorenzwarft Mitteltritt

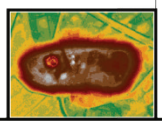
Datenbasis:
Digitales Geländemodell: Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein; DGM1, ©LVermGeo SH
Digitale Orthophotos: Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein; ATKIS®DOP20c, ©LVermGeo SH
Liegenschaftsdaten: Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein; ALK, ©LVermGeo SH



Lorenzwarft, Mitteltritt:

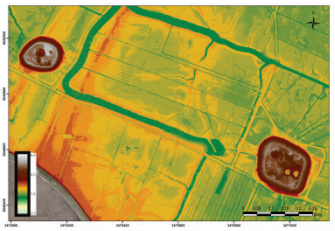
Wohnfläche:	**1220 m²**
Gesamtinnenfläche:	**7920 m²**
Warftart:	**Warft ohne Ringdeich**
Fething:	**Ja**
Maximal Kehrender Wasserstand:	**HW20**

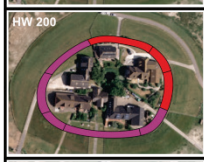
Sicherheitsstatus
- gut < 0,5 [l/sm]
- befriedigend > 0,5 & < 2 [l/sm]
- ausreichend > 2 & < 5 [l/sm]
- mangelhaft > 5 & < 10 [l/sm]
- ungenügend > 10 [l/sm]
- Überströmen



Hooge
Ockelützwarft

Datenbasis:
Digitales Geländemodell: Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein; DGM1, ©LVermGeo SH
Digitale Orthophotos: Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein; ATKIS®DOP20c, ©LVermGeo SH
Liegenschaftsdaten: Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein; ALK, ©LVermGeo SH

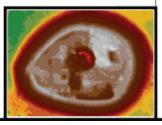




Ockelützwarft

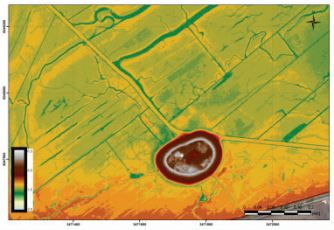
Wohnfläche:	**1580 m²**
Warftinnenfläche:	**6580 m²**
Warftart:	**Warft mit nicht durch-gängigem Ringdeich**
Fething:	**Ja**
Maximal kehrbarer Wasserstand:	**HW20**

Sicherheitsstatus
- gut < 0,5 [l/sm]
- befriedigend > 0,5 & < 2 [l/sm]
- ausreichend > 2 & < 5 [l/sm]
- mangelhaft > 5 & < 10 [l/sm]
- ungenügend > 10 [l/sm]
- Überströmen



Hooge
Ockenswarft

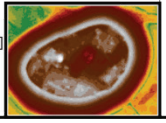
Datenbasis:
Digitales Geländemodell: Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein; DGM1, ©LVermGeo SH
Digitale Orthophotos: Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein; ATKIS®DOP20c, ©LVermGeo SH
Liegenschaftsdaten: Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein; ALK, ©LVermGeo SH



Ockenswarft

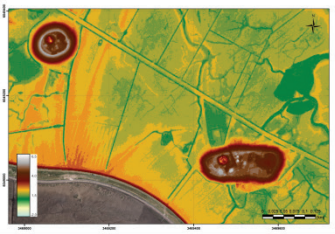
Wohnfläche:	**1900 m²**
Warftinnenfläche:	**8940 m²**
Warftart:	**Warft mit durch-gängigem Ringdeich**
Fething:	**Ja**
Maximal kehrbarer Wasserstand:	**HW100**

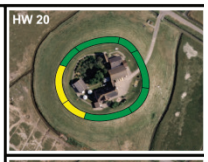
Sicherheitsstatus
- gut < 0,1 [l/sm]
- befriedigend > 0,1 & < 0,5 [l/sm]
- ausreichend > 0,5 & < 2 [l/sm]
- mangelhaft > 2 & < 5 [l/sm]
- ungenügend > 5 [l/sm]
- Überströmen

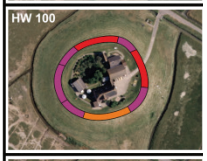


Hooge
Volkerswarft

Datenbasis:
Digitales Geländemodell: Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein; DGM1, ©LVermGeo SH
Digitale Orthophotos: Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein; ATKIS®DOP20c, ©LVermGeo SH
Liegenschaftsdaten: Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein; ALK, ©LVermGeo SH



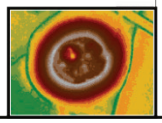




Volkerswarft

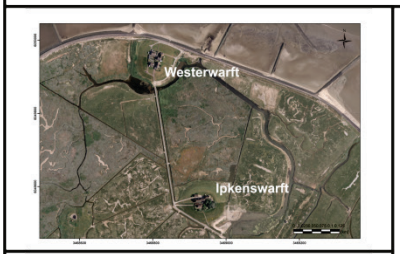
Wohnfläche:	**1010 m²**
Warftinnenfläche:	**2200 m²**
Warftart:	**Warft mit durch-gängigem Ringdeich**
Fething:	**Ja**
Maximal Kehrender Wasserstand:	**HW20**

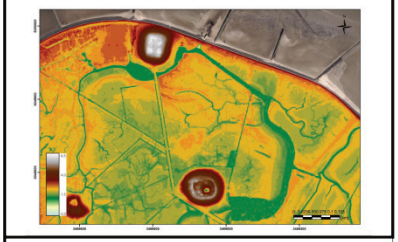
Sicherheitsstatus
- gut < 0,1 [l/sm]
- befriedigend > 0,1 & < 0,5 [l/sm]
- ausreichend > 0,5 & < 2 [l/sm]
- mangelhaft > 2 & < 5 [l/sm]
- ungenügend > 5 [l/sm]
- Überströmen

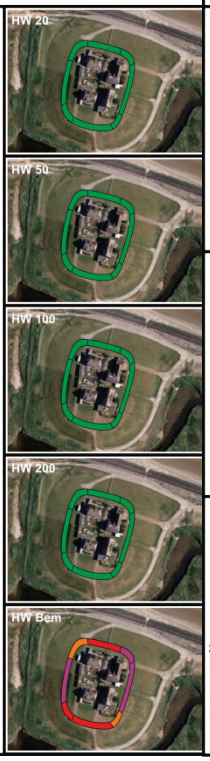


Hooge
Westerwarft

Datenbasis:
Digitales Geländemodell: Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein; DGM1, ©LVermGeo SH
Digitale Orthophotos: Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein; ATKIS®DOP20c, ©LVermGeo SH
Liegenschaftsfaldaten: Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein; ALK, ©LVermGeo SH





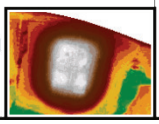


Westerwarft

Wohnfläche:	**505 m²**
Gesamtinnenfläche:	**2050 m²**
Warftart:	**Warft ohne Ringdeich**
Fething:	**nein**
Maximal Kehrender Wasserstand:	**HW200**

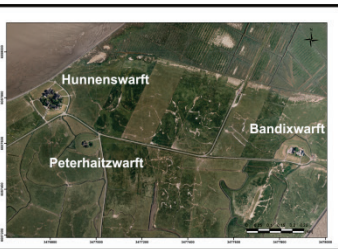
Sicherheitsstatus

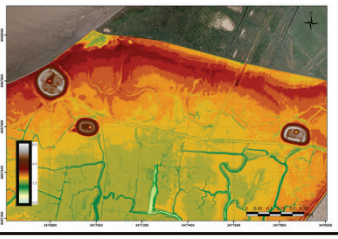
- gut < 0,5 [l/sm]
- befriedigend > 0,5 & < 2 [l/sm]
- ausreichend > 2 & < 5 [l/sm]
- mangelhaft > 5 & < 10 [l/sm]
- ungenügend > 10 [l/sm]
- Überströmen

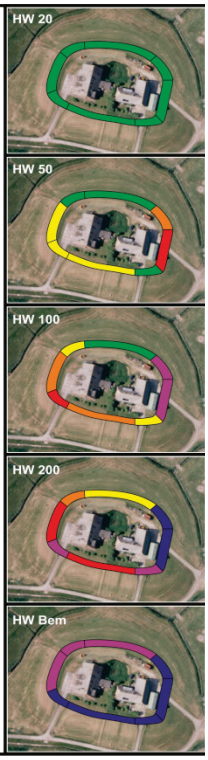


Langeness
Bandixwarft

Datenbasis:
Digitales Geländemodell: Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein; DGM1, ©LVermGeo SH
Digitale Orthophotos: Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein; ATKIS®DOP20c, ©LVermGeo SH
Liegenschaftsfaldaten: Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein; ALK, ©LVermGeo SH





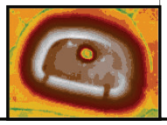


Bandixwarft

Wohnfläche:	**440 m²**
Warftinnenfläche:	**780 m²**
Warftart:	**Warft mit nicht durch-gängigem Ringdeich**
Fething:	**Ja**
Maximal kehrbarer Wasserstand:	**HW20**
Stöpe vorhanden:	**ja, im Süden**

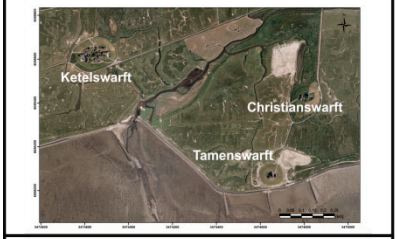
Sicherheitsstatus

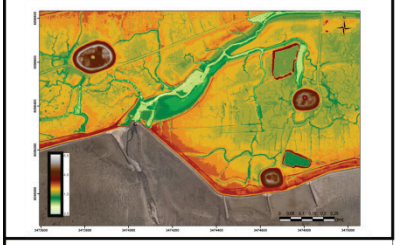
- gut < 0,5 [l/sm]
- befriedigend > 0,5 & < 2 [l/sm]
- ausreichend > 2 & < 5 [l/sm]
- mangelhaft > 5 & < 10 [l/sm]
- ungenügend > 10 [l/sm]
- Überströmen



Langeness
Christianswarft

Datenbasis:
Digitales Geländemodell: Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein; DGM1, ©LVermGeo SH
Digitale Orthophotos: Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein; ATKIS®DOP20c, ©LVermGeo SH
Liegenschaftsfaldaten: Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein; ALK, ©LVermGeo SH



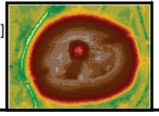


Christianswarft

Wohnfläche:	**460 m²**
Warftinnenfläche:	**480 m²**
Warftart:	**Warft ohne Ringdeich**
Fething:	**Ja**
Maximal kehrbarer Wasserstand:	**< HQ20**
Stöpe vorhanden:	**nein**

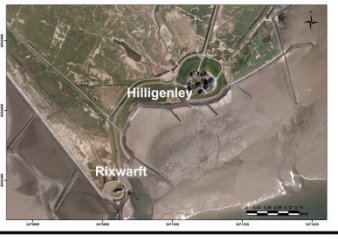
Sicherheitsstatus

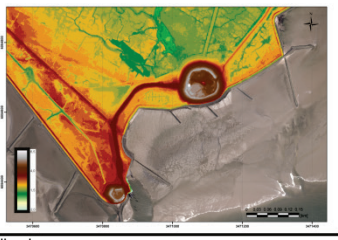
- gut < 0,5 [l/sm]
- befriedigend > 0,5 & < 2 [l/sm]
- ausreichend > 2 & < 5 [l/sm]
- mangelhaft > 5 & < 10 [l/sm]
- ungenügend > 10 [l/sm]
- Überströmen

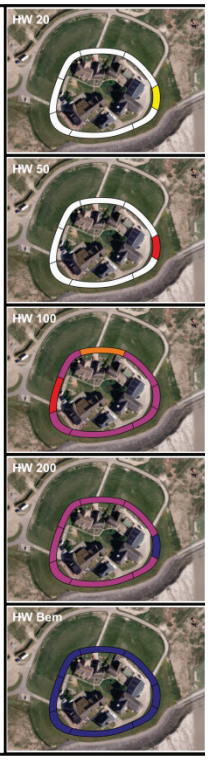


Langeness
Hilligenley

Datenbasis:
Digitales Geländemodell: Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein; DGM1, ©LVermGeo SH
Digitale Orthophotos: Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein; ATKIS®DOP20c, ©LVermGeo SH
Liegenschaftsfaldaten: Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein; ALK, ©LVermGeo SH







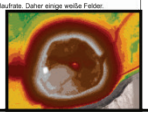
Hilligenley

Wohnfläche:	**1100 m²**
Warftinnenfläche:	**1630 m²**
Warftart:	**Warft mit nicht durch-gezogenem Ringdeich**
Fething:	**ja**
Maximal kehrbarer Wasserstand:	**aufgrund fehlender Daten nicht erfassbar**
Stöpe vorhanden:	**nein**

Sicherheitsstatus

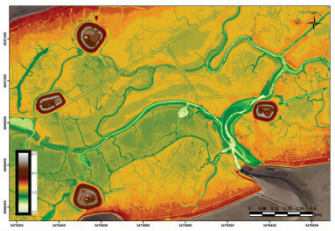
Besonderes: Fehlerhafte Ausgangsdaten aus Delft 3D bei der mittleren Weiterüberlaufrate. Daher einige weiße Felder.

- gut < 0,5 [l/sm]
- befriedigend > 0,5 & < 2 [l/sm]
- ausreichend > 2 & < 5 [l/sm]
- mangelhaft > 5 & < 10 [l/sm]
- ungenügend > 10 [l/sm]
- Überströmen



Langeness
Honkenswarft

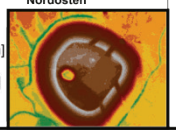
Datenbasis:
Digitales Geländemodell: Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein; DGM1, ©LVermGeo SH
Digitale Orthophotos: Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein; ATKIS®DOP20c, ©LVermGeo SH
Liegenschaftsdaten: Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein; ALK, ©LVermGeo SH



Honkenswarft

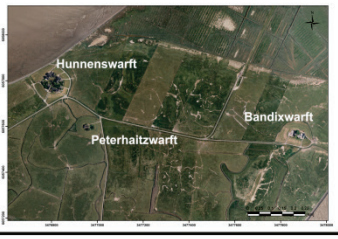
Wohnfläche:	**690 m²**
Warftinnenfläche:	**1500 m²**
Warftart:	**Warft mit nicht durch-gezogenem Ringdeich**
Fething:	**Ja**
Maximal kehrbarer Wasserstand:	**HW20**
Stöpe vorhanden:	**ja, im Südenosten und Nordosten**

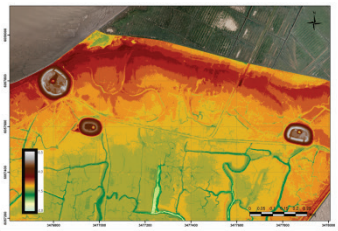
Sicherheitsstatus
- gut < 0,5 [l/sm]
- befriedigend > 0,5 & < 2 [l/sm]
- ausreichend > 2 & < 5 [l/sm]
- mangelhaft > 5 & < 10 [l/sm]
- ungenügend > 10 [l/sm]
- Überströmen



Langeness
Hunnenswarft

Datenbasis:
Digitales Geländemodell: Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein; DGM1, ©LVermGeo SH
Digitale Orthophotos: Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein; ATKIS®DOP20c, ©LVermGeo SH
Liegenschaftsdaten: Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein; ALK, ©LVermGeo SH

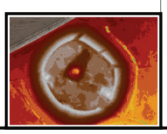




Hunnenswarft

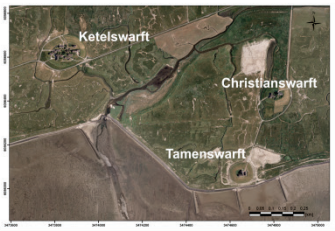
Wohnfläche:	**1000 m²**
Warftinnenfläche:	**1700 m²**
Warftart:	**Warft mit nicht durch-gezogenem Ringdeich**
Fething:	**Ja**
Maximal kehrbarer Wasserstand:	**HW20**
Stöpe vorhanden:	**nein**

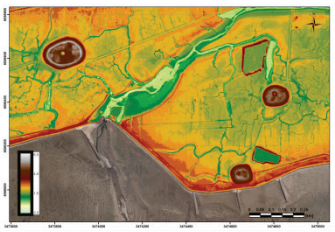
Sicherheitsstatus
- gut < 0,5 [l/sm]
- befriedigend > 0,5 & < 2 [l/sm]
- ausreichend > 2 & < 5 [l/sm]
- mangelhaft > 5 & < 10 [l/sm]
- ungenügend > 10 [l/sm]
- Überströmen

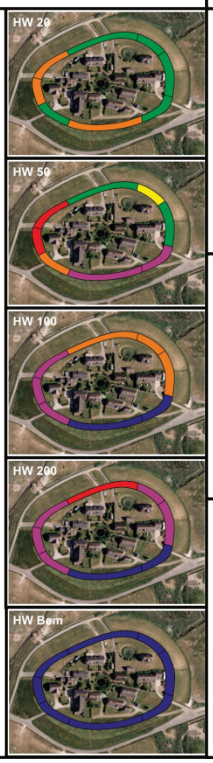


Langeness
Ketelswarft

Datenbasis:
Digitales Geländemodell: Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein; DGM1, ©LVermGeo SH
Digitale Orthophotos: Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein; ATKIS®DOP20c, ©LVermGeo SH
Liegenschaftsdaten: Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein; ALK, ©LVermGeo SH



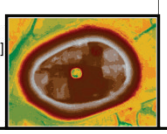




Ketelswarft

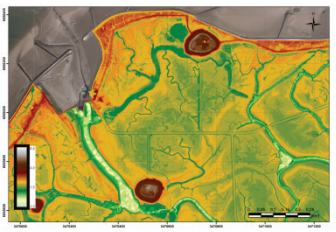
Wohnfläche:	**1490 m²**
Warftinnenfläche:	**1820 m²**
Warftart:	**Warft ohne Ringdeich**
Fething:	**Ja**
Maximal kehrbarer Wasserstand:	**HW20**

Sicherheitsstatus
- gut < 0,5 [l/sm]
- befriedigend > 0,5 & < 2 [l/sm]
- ausreichend > 2 & < 5 [l/sm]
- mangelhaft > 5 & < 10 [l/sm]
- ungenügend > 10 [l/sm]
- Überströmen



Langeness
Kirchhofswarft

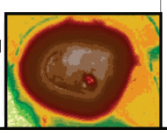
Datenbasis:
Digitales Geländemodell: Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein; DGM1, ©LVermGeo SH
Digitale Orthophotos: Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein; ATKIS®DOP20c, ©LVermGeo SH
Liegenschaftsdaten: Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein; ALK, ©LVermGeo SH



Kirchhofswarft

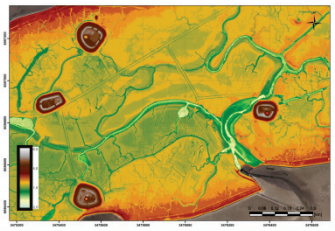
Wohnfläche:	**260 m²**
Warftinnenfläche:	**650 m²**
Warftart:	**Warft ohne Ringdeich**
Fething:	**ja**
Maximal kehrbarer Wasserstand:	**< HW20**

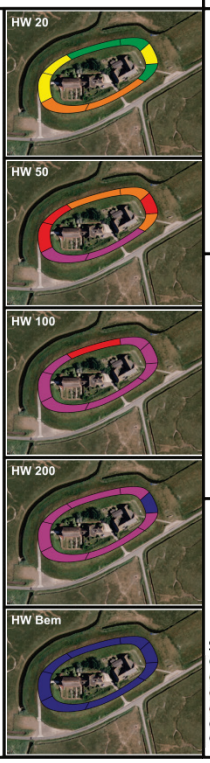
Sicherheitsstatus
- gut < 0,5 [l/sm]
- befriedigend > 0,5 & < 2 [l/sm]
- ausreichend > 2 & < 5 [l/sm]
- mangelhaft > 5 & < 10 [l/sm]
- ungenügend > 10 [l/sm]
- Überströmen



Langeness
Kirchwarft

Datenbasis:
Digitales Geländemodell: Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein; DGM1, ©LVermGeo SH
Digitale Orthophotos: Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein; ATKIS®DOP20c, ©LVermGeo SH
Liegenschaftsdaten: Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein; ALK, ©LVermGeo SH

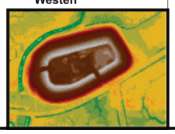




Kirchwarft

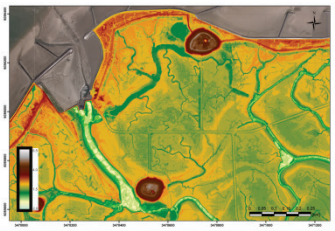
Wohnfläche:	**680 m²**
Warftinnenfläche:	**800 m²**
Warftart:	**Warft mit nicht durchgängigem Ringdeich**
Fething:	**Ja**
Maximal kehrbarer Wasserstand:	**HW20**
Stöpe vorhanden:	**ja, im Süden und Westen**

Sicherheitsstatus
- gut < 0,5 [l/sm]
- befriedigend > 0,5 & < 2 [l/sm]
- ausreichend > 2 & < 5 [l/sm]
- mangelhaft > 5 & < 10 [l/sm]
- ungenügend > 10 [l/sm]
- Überströmen



Langeness
Mayenswarft

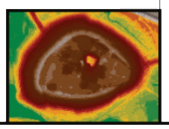
Datenbasis:
Digitales Geländemodell: Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein; DGM1, ©LVermGeo SH
Digitale Orthophotos: Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein; ATKIS®DOP20c, ©LVermGeo SH
Liegenschaftsdaten: Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein; ALK, ©LVermGeo SH



Mayenswarft

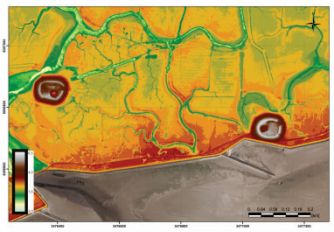
Wohnfläche:	**890 m²**
Warftinnenfläche:	**1410 m²**
Warftart:	**Warft mit nicht durchgängigem Ringdeich**
Fething:	**ja**
Maximal kehrbarer Wasserstand:	**< HQ20**
Stöpe vorhanden:	**nein**

Sicherheitsstatus
- gut < 0,5 [l/sm]
- befriedigend > 0,5 & < 2 [l/sm]
- ausreichend > 2 & < 5 [l/sm]
- mangelhaft > 5 & < 10 [l/sm]
- ungenügend > 10 [l/sm]
- Überströmen



Langeness
Neuwarft

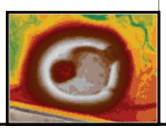
Datenbasis:
Digitales Geländemodell: Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein; DGM1, ©LVermGeo SH
Digitale Orthophotos: Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein; ATKIS®DOP20c, ©LVermGeo SH
Liegenschaftsdaten: Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein; ALK, ©LVermGeo SH



Neuwarft

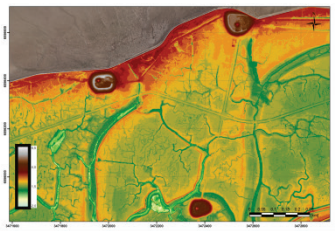
Wohnfläche:	**210 m²**
Warftinnenfläche:	**410 m²**
Warftart:	**Warft mit nicht durchgängigem Ringdeich**
Fething:	**Ja**
Maximal kehrbarer Wasserstand:	**HW20**
Stöpe vorhanden:	**nein**

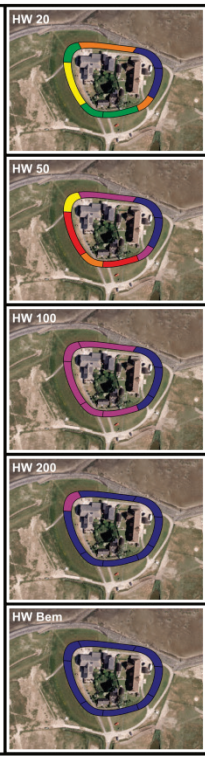
Sicherheitsstatus
- gut < 0,5 [l/sm]
- befriedigend > 0,5 & < 2 [l/sm]
- ausreichend > 2 & < 5 [l/sm]
- mangelhaft > 5 & < 10 [l/sm]
- ungenügend > 10 [l/sm]
- Überströmen



Langeness
Norderhörn

Datenbasis:
Digitales Geländemodell: Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein; DGM1, ©LVermGeo SH
Digitale Orthophotos: Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein; ATKIS®DOP20c, ©LVermGeo SH
Liegenschaftsdaten: Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein; ALK, ©LVermGeo SH

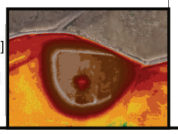




Norderhörn

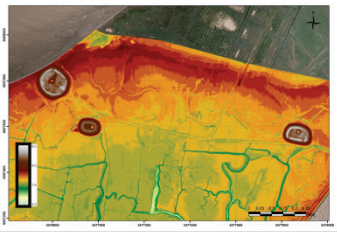
Wohnfläche:	**1120 m²**
Warftinnenfläche:	**1250 m²**
Warftart:	**Warft mit nicht durchgängigem Ringdeich**
Fething:	**Ja**
Maximal kehrbarer Wasserstand:	**< HW20**
Stöpe vorhanden:	**nein**

Sicherheitsstatus
- gut < 0,5 [l/sm]
- befriedigend > 0,5 & < 2 [l/sm]
- ausreichend > 2 & < 5 [l/sm]
- mangelhaft > 5 & < 10 [l/sm]
- ungenügend > 10 [l/sm]
- Überströmen



Langeness
Peterhaitzwarft

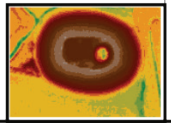
Datenbasis:
Digitales Geländemodell: Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein; DGM1, ©LVermGeo SH
Digitale Orthophotos: Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein; ATKIS®DOP20c, ©LVermGeo SH
Liegenschaftsdaten: Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein; ALK, ©LVermGeo SH



Peterhaitzwarft

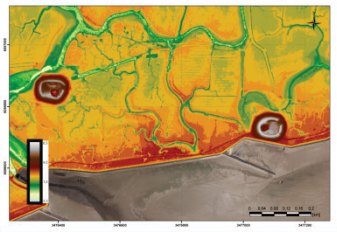
Wohnfläche:	**110 m²**
Warftinnenfläche:	**210 m²**
Warftart:	**Warft ohne Ringdeich**
Fething:	**Ja**
Maximal kehrbarer Wasserstand:	**< HW20**

Sicherheitsstatus
- gut < 0,5 [l/sm]
- befriedigend > 0,5 & < 2 [l/sm]
- ausreichend > 2 & < 5 [l/sm]
- mangelhaft > 5 & < 10 [l/sm]
- ungenügend > 10 [l/sm]
- Überströmen



Langeness
Peterswarft

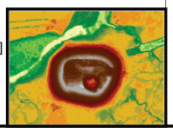
Datenbasis:
Digitales Geländemodell: Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein; DGM1, ©LVermGeo SH
Digitale Orthophotos: Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein; ATKIS®DOP20c, ©LVermGeo SH
Liegenschaftsdaten: Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein; ALK, ©LVermGeo SH

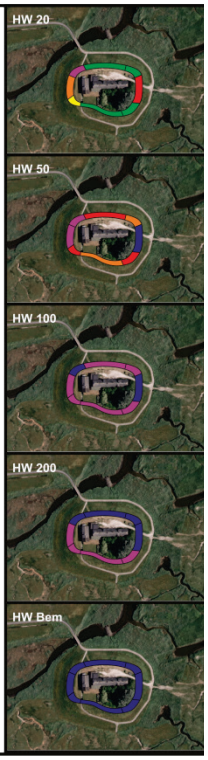


Peterswarft

Wohnfläche:	**130 m²**
Warftinnenfläche:	**550 m²**
Warftart:	**Warft mit nicht durch-gängigem Ringdeich**
Fething:	**Ja**
Maximal kehrbarer Wasserstand:	**< HW20**
Stöpe vorhanden:	**nein**

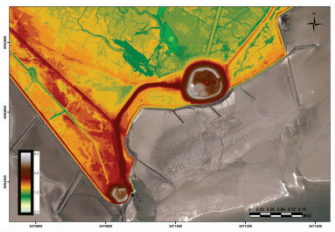
Sicherheitsstatus
- gut < 0,5 [l/sm]
- befriedigend > 0,5 & < 2 [l/sm]
- ausreichend > 2 & < 5 [l/sm]
- mangelhaft > 5 & < 10 [l/sm]
- ungenügend > 10 [l/sm]
- Überströmen





Langeness
Rixwarft

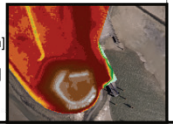
Datenbasis:
Digitales Geländemodell: Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein; DGM1, ©LVermGeo SH
Digitale Orthophotos: Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein; ATKIS®DOP20c, ©LVermGeo SH
Liegenschaftsdaten: Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein; ALK, ©LVermGeo SH



Rixwarft

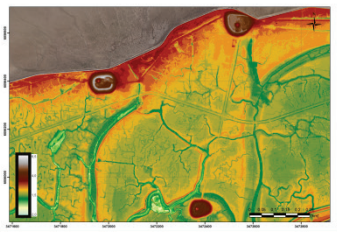
Wohnfläche:	**170 m²**
Warftinnenfläche:	**190 m²**
Warftart:	**Warft mit nicht durch-gängigem Ringdeich**
Fething:	**nein**
Maximal kehrbarer Wasserstand:	**< HW20**
Stöpe vorhanden:	**nein**

Sicherheitsstatus
- gut < 0,5 [l/sm]
- befriedigend > 0,5 & < 2 [l/sm]
- ausreichend > 2 & < 5 [l/sm]
- mangelhaft > 5 & < 10 [l/sm]
- ungenügend > 10 [l/sm]
- Überströmen



Langeness
Süderhörn

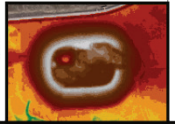
Datenbasis:
Digitales Geländemodell: Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein; DGM1, ©LVermGeo SH
Digitale Orthophotos: Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein; ATKIS®DOP20c, ©LVermGeo SH
Liegenschaftsdaten: Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein; ALK, ©LVermGeo SH

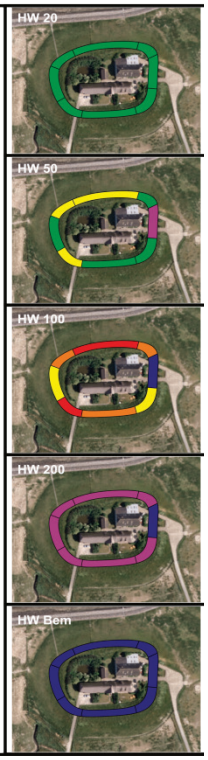


Süderhörn

Wohnfläche:	**600 m²**
Warftinnenfläche:	**700 m²**
Warftart:	**Warft mit nicht durch-gängigem Ringdeich**
Fething:	**Ja**
Maximal kehrbarer Wasserstand:	**HW20**
Stöpe vorhanden:	**nein**

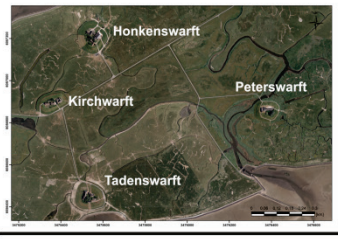
Sicherheitsstatus
- gut < 0,5 [l/sm]
- befriedigend > 0,5 & < 2 [l/sm]
- ausreichend > 2 & < 5 [l/sm]
- mangelhaft > 5 & < 10 [l/sm]
- ungenügend > 10 [l/sm]
- Überströmen

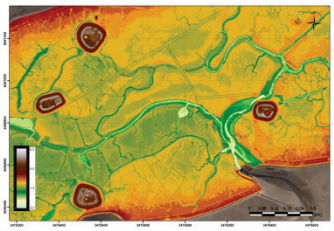


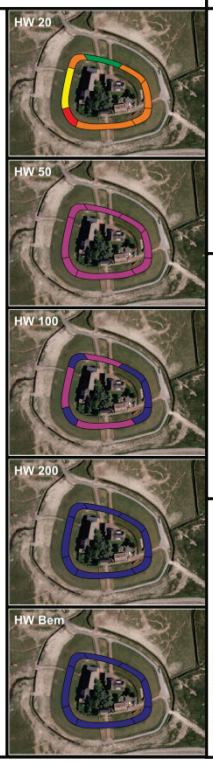


Langeness
Tadenswarft

Datenbasis:
Digitales Geländemodell: Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein; DGM1, GLVermGeo SH
Digitale Orthophotos: Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein; ATKIS®DOP20c, GLVermGeo SH
Liegenschaftsdaten: Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein; ALK, GLVermGeo SH





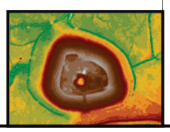


Tadenswarft

Wohnfläche:	**460 m²**
Warftinnenfläche:	**950 m²**
Warftart:	**Warft mit nicht durch-gängigem Ringdeich**
Fething:	**Ja**
Maximal kehrbarer Wasserstand:	**< HW20**
Stöpe vorhanden:	**ja, im Süden**

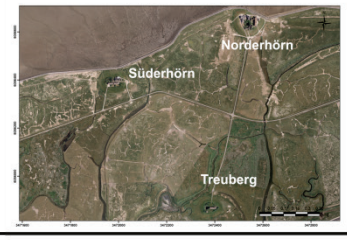
Sicherheitsstatus

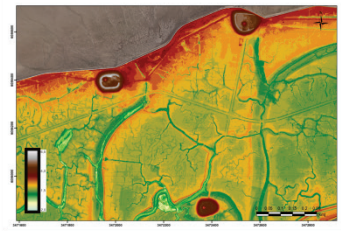
- gut < 0,5 [l/sm]
- befriedigend > 0,5 & < 2 [l/sm]
- ausreichend > 2 & < 5 [l/sm]
- mangelhaft > 5 & < 10 [l/sm]
- ungenügend > 10 [l/sm]
- Überströmen

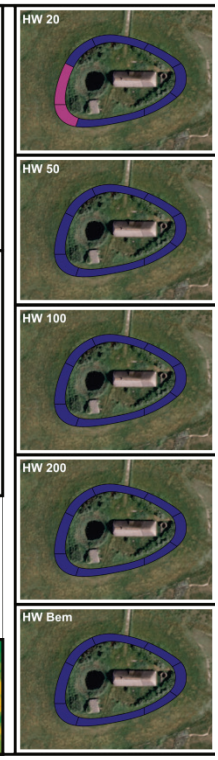


Langeness
Treuberg

Datenbasis:
Digitales Geländemodell: Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein; DGM1, GLVermGeo SH
Digitale Orthophotos: Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein; ATKIS®DOP20c, GLVermGeo SH
Liegenschaftsdaten: Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein; ALK, GLVermGeo SH





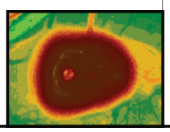


Treuberg

Wohnfläche:	**100 m²**
Warftinnenfläche:	**220 m²**
Warftart:	**Warft ohne Ringdeich**
Fething:	**Ja**
Maximal kehrbarer Wasserstand:	**<HW20**

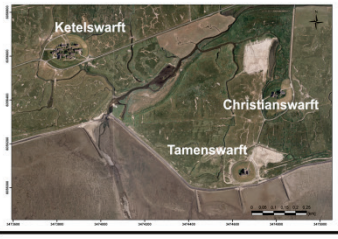
Sicherheitsstatus

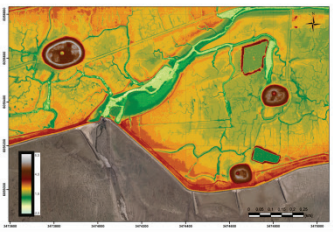
- gut < 0,5 [l/sm]
- befriedigend > 0,5 & < 2 [l/sm]
- ausreichend > 2 & < 5 [l/sm]
- mangelhaft > 5 & < 10 [l/sm]
- ungenügend > 10 [l/sm]
- Überströmen



Langeness
Tamenswarft

Datenbasis:
Digitales Geländemodell: Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein; DGM1, GLVermGeo SH
Digitale Orthophotos: Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein; ATKIS®DOP20c, GLVermGeo SH
Liegenschaftsdaten: Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein; ALK, GLVermGeo SH



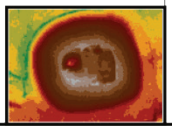


Tamenswarft

Wohnfläche:	**440 m²**
Warftinnenfläche:	**760 m²**
Warftart:	**Warft ohne Ringdeich**
Fething:	**Ja**
Maximal kehrbarer Wasserstand:	**< HW20**

Sicherheitsstatus

- gut < 0,5 [l/sm]
- befriedigend > 0,5 & < 2 [l/sm]
- ausreichend > 2 & < 5 [l/sm]
- mangelhaft > 5 & < 10 [l/sm]
- ungenügend > 10 [l/sm]
- Überströmen



ZukunftHallig B

(IfS)

gefördert durch:	BMBF
Förderkennzeichen:	03KIS094
Bearbeitungszeitraum:	01.12.2010 - 30.11.2013
Projektverlängerung:	01.12.2013 - 30.04.2014
Kassenzeichen:	810302376229

Aufgestellt von:

Prof. Dr. Roger Häußling
Nenja Ziesen, M.A.

Institut für Soziologie

Lehrstuhl Technik- und Organisationssoziologie

RWTH-Aachen

Aachen, April 2014

Kontakt: Nenja Ziesen | e-Mail: nziesen@soziologie.rwth-aachen.de

Danksagung

Seitens der soziologischen Begleitforschung möchten wir vor allem Recht herzlichen den Halligbewohnern sowie den Vertretern der Halligen danken, für Ihre Offenheit und kooperative Mitarbeit. Unser Dank gilt auch unseren Projektpartnern für den fruchtbaren interdisziplinären Austausch und die angenehme Zusammenarbeit. Darüber hinaus möchten wir für die Unterstützung unserer fleißigen Hilfskräfte, Elena Kaip und Matthias Dorgeist, danken.

Aachen, im April 2014

Prof. Dr. Roger Häußling und Nenja Ziesen, M.A.

Kurzfassung

Die Reflexion über potentielle Wasserschutzmaßnahmen – einerseits allgemein zur Gestaltbarkeit von Technik und andererseits konkret zu einer nachhaltigen Gestaltung von Wasserbautechnik – erfordert eine verstärkte interdisziplinäre Zusammenarbeit (vgl. Parodi 2007: 88 f.). Entsprechend ist die wasserbauliche Praxis nicht bloß als eine Ingenieurtechnik, sondern vielmehr als gesellschaftliches Anliegen und kulturelle Unternehmung anzusehen, indem Hochwasserschutz, Nachhaltigkeit sowie kulturelle Natur-, Technik- und Weltbilder als Zusammenhänge betrachtet werden (vgl. ebd.: 89).

Dieser interdisziplinäre Brückenschlag ist auch bei dem Verbundprojekt zur soziokulturellen Implementierung von möglichen Küstenschutz- und Bewirtschaftungsstrategien auf den Halligen ein zentrales Anliegen. Die soziologische Begleitforschung hat im Rahmen des Projektes eine Vermittlerrolle zwischen Halligbewohnern[1], den Gemeindevertretern und Bürgermeistern der Halligen, den Ingenieuren und den Vertretern des Landes Schleswig-Holstein eingenommen. Dabei standen besonders die Wünsche, Sorgen, Mitsprachebedürfnisse und die Akzeptanz der Halligbewohner im Fokus der Aufmerksamkeit.

Als Zielstellung galt es, die Alltagskulturen, Traditionen und das Wissen der Halligbewohner – entstanden in dem einzigartigen Lebensraum der Halligen sowie im Kontext wiederkehrender Sturmfluten und Meeresspiegelwechsel – aufzunehmen und zu dokumentieren. Diese Bestandsaufnahme in Form einer standardisierten Interviewbefragung der Halligbewohner fand im Jahr 2011 sowie 2012 statt. Die Interviews wurden transkribiert und ausgewertet, sodass umfangreiche Angaben und Informationen der Bewohner zu den Bereichen *Küstenschutz*, *Sturmflut und Landunter*, *Infrastruktur*, *zentrale Akteure*, *Naturschutz*, *Landwirtschaft* und *Tourismus* festgehalten werden konnten.

Um diese Ergebnisse erneut im Dialog und Wissensaustausch mit den projektbeteiligten Ingenieuren zur Sprache zu bringen, wurden Workshops in Form zweier Zukunftswerkstätten auf Hooge und Langeneß (Juni 2013) initiiert, sodass ein gemeinsamer Gestaltungsprozess zwischen den Bewohnern und den Ingenieuren stattfinden konnte. Im Kontext dessen wurden alternative Sturmflut- und Küstenschutzideen entwickelt, um zum einen den zukünftigen Bedingungen des Klimawandels Rechnung zu tragen. Zum anderen sind diese Ideen von einer hohen Akzeptanz getragen, da die Halligbewohner selbst an den Zukunftsentwürfen mitgewirkt haben. Diese Ideen wurden anschließend im Rahmen des interdisziplinären Projektes seitens der Wasserbauingenieure aufgegriffen und in Hinblick auf ihre Machbarkeit überprüft.

In einem abschließenden Schritt wurden seitens der soziologischen Begleitforschung Experteninterviews mit den beteiligten Projektpartnern und einem Vertreter der projektbegleitenden Gruppe durchgeführt und ausgewertet, um eine Gesamtevaluation des Projektes zu erzielen.

[1] Mit der Bezeichnung *Bewohner* sind im Folgenden sowohl die Bewohnerinnen, als auch die Bewohner der Halligen gemeint.

Inhalt

1	**EINLEITUNG**	**294**
2	**QUALITATIVE ANALYSE**	**295**
2.1	Langeneß	296
2.1.1	Küstenschutz	296
2.1.2	Sturmfluten und Landunter	308
2.1.3	Infrastruktur	318
2.1.4	Zentrale Akteure	325
2.1.5	Naturschutz	331
2.1.6	Landwirtschaft	337
2.1.7	Tourismus	340
2.1.8	Kulturelle Traditionen	340
2.2	Hooge	342
2.2.1	Küstenschutz	342
2.2.2	Sturmfluten und Landunter	354
2.2.3	Infrastruktur	360
2.2.4	Zentrale Akteure	363
2.2.5	Naturschutz	367
2.2.6	Landwirtschaft	371
2.2.7	Tourismus	373
2.2.8	Kulturelle Traditionen	375
2.3	Oland	377
2.3.1	Küstenschutz	377
2.3.2	Sturmfluten und Landunter	380
2.3.3	Infrastruktur	382
2.3.4	Zentrale Akteure	383
2.3.5	Naturschutz	384
2.3.6	Landwirtschaft	384
2.3.7	Tourismus	385
2.4	Nordstrandischmoor	386
2.4.1	Küstenschutz	386
2.4.2	Sturmflut und Landunter	390
2.4.3	Infrastruktur	392
2.4.4	Zentrale Akteure	393

2.4.5 Naturschutz 395
2.4.6 Landwirtschaft 396

3 ZUKUNFTSWERKSTÄTTEN 398
3.1. Die Zukunftswerkstatt auf Hooge 399
3.1.1 Kritikphase 399
3.1.2 Phantasiephase 402
3.1.3 Realisierungsphase 412
3.2 Die Zukunftswerkstatt auf Langeneß 417
3.2.1 Kritikphase 417
3.2.2 Phantasiephase 419
3.2.3 Realisierungsphase 428

4 EXPERTENBEFRAGUNG 432

5 ZUSAMMENFASSUNG UND FAZIT 435

LITERATURVERZEICHNIS 436

ANHANG

437

1 Einleitung

Die Alltagskultur der Halligbewohner[2] ist geprägt durch ihren besonderen Lebensraum, gekennzeichnet durch Strömungsschwankungen, Meeresspiegelveränderungen und Sturmflut- sowie Landunterrisiken. Diesen sich wandelnden Umgebungsbedingungen begegnen die Bewohner der einzigartigen Halligen mit ihren eingeschliffenen Traditionen und ihrem erfahrungsgenährten Wissen. Diese Alltagspraxen und Erfahrungen im Bereich des *Küstenschutzes*, der *Landunter- und Sturmflutsituationen* – aber beispielsweise auch in den Feldern *Landwirtschaft*, *Naturschutz* und *Tourismus* – zur Sprache zu bringen und den Halligbewohnern Gehör zu schenken, stand im Fokus der soziologischen Begleitforschung. Somit galt es, neben den reinen ingenieursmäßigen Herangehensweisen, die soziokulturellen und sozioökonomischen Bedingungen prospektiv und retrospektiv zu erfassen. Zukünftige Küstenschutzvorkehrungen zum Erhalt dieses besonderen Lebensraumes müssen auch einer örtlichen Akzeptanz gerecht werden, sodass ein Miteinander von Halligbewohnern und Ingenieuren seitens der soziologischen Herangehensweise forciert wurde.

Ein erster umfangreicher Bearbeitungsschritt zur Erreichung dieses Anliegens und zur Erfassung des soziokulturellen Rahmens bestand darin, Interviews auf den Halliginseln Langeneß, Hooge, Oland und Nordstrandischmoor durchzuführen. Im Vordergrund dieser Befragung standen zum einen Küstenschutz-, Landunter- und Sturmflutaspekte, aber zum anderen auch Themen wie Naturschutz, Landwirtschaft und Tourismus, um einen umfangreichen Einblick in die Alltagswelt der Bewohner zu erhalten (Siehe Kapitel 2).

In einem zweiten Schritt wurde in Form von Zukunftswerkstätten der Ideenaustausch zwischen Halligbewohnern und Ingenieuren organisiert (Siehe Kapitel 3). Mit diesen Workshops wurden ein Austausch und die Vermittlung von unterschiedlichen Wissens- und Interessenbeständen fokussiert, da die im Rahmen des Projektes gewonnenen Erkenntnisse und das Fachwissen der beteiligten wissenschaftlichen Akteure mit der erfahrungsgenerierten Expertise vor Ort sowie auch mit den erfahrungsbasierten Ideen der Halligbewohner zusammengebracht wurden. In diesem lösungszentrierten Diskurs sollten die ingenieursbezogenen Erkenntnisse hinsichtlich zukünftig potentieller Küstenschutzstrategien mit der Akzeptanz, den Anliegen sowie kritischen Befürchtungen seitens der Halligbewohner in Einklang gebracht werden.

Zur Evaluation des Projektes wurden in einem abschließenden Schritt insgesamt vier Experteninterviews mit den beteiligten Projektpartnern und einem Vertreter der projektbegleitenden Gruppe durchgeführt, um jegliche Fachexpertise der interdisziplinären Zusammenarbeit abzudecken (Siehe Kapitel 4).

[2] Mit der Bezeichnung *Bewohner* sind im Folgenden sowohl die Bewohnerinnen, als auch die Bewohner der Halligen gemeint.

2 Qualitative Analyse

Die Transkription und inhaltsanalytische Auswertung stellte nach der Phase der Interviewführung einen wesentlichen Bearbeitungsschritt in der Gesamtuntersuchung dar. Mittels theoriegeleiteter und empiriegeleiteter Kategorienbildung wurde ein *Codesystem* erstellt (Wörterbuch-basierter Ansatz), an dem sich die Analyse orientierte (Siehe Anhang 1). Entlang dieser Kriterien erfolgte eine mehrstufige qualitative Inhaltsanalyse. In einem ersten Schritt wurden alle Interviews entlang dieser Kriterien durchgelesen und vorstrukturiert. In einem zweiten Schritt wurde die Analyse des vorstrukturierten Textkorpus mittels eines Analyseprogramms durchgeführt.

Die Qualitative Auswertung der Interviews auf den Halligen Hooge, Langeneß, Nordstrandischmoor und Oland erfolgte mittels des Softwaretools *MaxQDA*, zur computergestützten qualitativen Daten- und Textanalyse und basiert methodologisch auf der Qualitativen Inhaltsanalyse nach Mayring.[3] Dieses Softwaretool wird hauptsächlich angewendet zur Unterstützung von wissenschaftlichen Projekten und Studien, bei denen Interviews, Texte und Medien inhaltlich analysiert werden. Das Programm ermöglicht qualitative Studien durchzuführen, auch in der Zusammenarbeit im Team. Ziel ist es, Einblicke in das Datenmaterial zu gewinnen, ohne dabei die inhaltliche Interpretation durch den Forscher vorwegzunehmen. Dieser kann nach der inhaltlichen Analyse theoretische Ableitungen und Aussagen über den jeweils untersuchten Forschungsgegenstand treffen.

Zu einem *Codeplan* zusammengefasst ergaben sich die folgenden Hauptkategorien bzw. *Hauptcodes*: *Code 1: Küstenschutz*; *Code 2: Sturmflut und Landunter*; *Code 3: Infrastruktur*; *Code 4: Zentrale Akteure*; *Code 5: Naturschutz*; *Code 6: Landwirtschaft*; *Code 7: Tourismus* und der Zusatzcode: *Kulturelle Traditionen*. Der Zusatzcode *Kulturelle Traditionen* wurde als Erweiterung in das Analyseverfahren aufgenommen, da sich die Bewohner häufig zu Themen in diesem Bereich äußerten und dies somit nicht unberücksichtigt bleiben sollte, obwohl diese Thematik nicht vordergründig das Vorhaben dieses Projektes tangiert.[4] Die zentrale Aufmerksamkeit galt den Themen *Küstenschutz* sowie *Sturmflut und Landunter*, da diese das Forschungsziel der Entwicklung nachhaltiger Küstenschutz- und Bewirtschaftungsstrategien hauptsächlich betreffen. Besonders den Aspekt *neue Ideen und Vorschläge* hinsichtlich neuer Küstenschutzmaßnahmen gilt es zu berücksichtigen. Jedoch wurde ein weiterer Fokus auf Überschneidungen zwischen einzelnen Themenbereichen gelegt, da hieraus auch relevante Erkenntnisse abgeleitet werden können.

Insgesamt wurden 32 Interviews auf Hooge, 31 Interviews auf Langeneß, 9 Interviews auf Nordstrandischmoor und 6 Interviews auf Oland geführt und ausgewertet.

[3] Siehe u.a.: Kuckartz, Udo 2012; Mayring, Philipp 2010 und 2005.
[4] An dieser Stelle gilt es anzumerken, dass nicht alle thematischen Bereiche auf den vier untersuchten Halligen gleichermaßen von den Interviewten zur Sprache kamen.

2.1 Langeneß

Die Hallig Langeneß umfasst eine Fläche von 956 Hektar und 105 Einwohnern, mit 84 Erwachsenen und 21 Kindern, die sich auf 58 Haushalte auf 18 Warften verteilen.[5] Insgesamt konnten auf Langeneß 31 Interviews realisiert und ausgewertet werden. [6]

2.1.1 Küstenschutz

Informationsfluss

Zu einem *bestehenden Informationstransfer* über zukünftige Küstenschutzmaßnahmen äußern sich 19 Bewohner. Dabei berichten 7 Bewohner von einer engen Verzahnung und einem gegenseitigen Austausch zwischen Akteuren im Küstenschutz, Vorarbeitern, dem Bürgermeister, der Gemeindevertretung und den Halligbewohnern, wobei diese Vernetzung auch erwartet und gewünscht sei. 5 Bewohner geben an, dass die Arbeiter im Küstenschutz über neue Küstenschutz (arbeits-) -maßnahmen durch ihre Beschäftigung bzw. ihren Arbeitgeber informiert werden. Weitere 5 Bewohner berichten von einem Informationstransfer durch Familienangehörige oder Bekannte, die im Küstenschutz arbeiten. In diesem Kontext werden von diesen Bewohnern auch (Bürger-) Versammlungen genannt. 3 Bewohner beschreiben einen bestehenden Informationstransfer durch Gerüchte, „Klatsch und Tratsch“ oder „unter der Hand“. Hingegen berichten 2 Bewohner von keinem bestehenden Informationstransfer bzw. von einem maximalen Informationserhalt durch Nachbarn oder Bekannte, die im Küstenschutz arbeiten, oder bei größeren Planungen durch die Bürgerversammlung. Ein weiterer Bewohner äußert den Wunsch nach mehr Diskussion und Transparenz über neue Küstenschutzmaßnahmen und betont ebenfalls, dass ein Informationstransfer meist erst erfolgt, wenn Küstenschutzmaßnahmen bereits umgesetzt worden sind bzw. gerade umgesetzt werden. Vereinzelt werden auch die Zeitung, die Presse und ein Rundfax als Quellen für einen Informationstransfer genannt.[7]

In diesem Themenkomplex betonen 12 Bewohner die Wichtigkeit des Einbezugs der Bevölkerung sowie eines *Mitspracherecht der Halligbewohner*: In diesem Kontext fordern 6 Bewohner ein verstärktes Mitsprachrecht und eine stärkere Berücksichtigung der Halligbewohner bei Planungen. 3 Bewohner beschreiben ein Gefühl der Fremdbestimmung sowie eine fehlende Selbstbestimmung der Halligbewohner und 2 Bewohner beschreiben das bestehende Mitspracherecht und heben

[5] Angaben entsprechend einer telefonischen Auskunft der ansässigen Bürgermeisterin.
[6] Vgl.: Biosphärereservat – Die Halligen, im Internet unter: http://halligen.de/index.php?id=457, Letzter Abruf: 07.01.2014.
[7] An dieser Stelle ist anzumerken, dass in diesem Themenkomplex Mehrfachnennungen seitens der Bewohner getätigt wurden und sich somit mehr Antwortvariablen als die Gesamtanzahl von 19 Bewohnern ergeben haben.

abermals die Relevanz des Einbezugs der Bewohner hervor. Ein weiterer Bewohner plädiert für ein stärkeres Miteinander und eine gemeinsame Kompromissfindung zwischen den Bewohnern und dem LKN.

Bezüglich einer *Lobby* der Halligen bzw. der Halligbewohner äußern sich 6 Bewohner: Dabei beschreiben 2 Bewohner die Biosphäre und die Halligstiftung als eingerichtete, aber nicht funktionierende Lobby der Halligen, vor allem nicht bei langfristiger Betrachtung. Ein weiterer Bewohner betrachtet die Biosphäre hingegen als ein wichtiges Informationspodium, wünscht sich allerdings auch einen verstärkten Informationsfluss. Laut der Aussage eines weiteren Bewohners versucht die Biosphäre die Interessen und Anliegen der Halligbewohner als Lobby zu vertreten und dieser Bewohner identifiziert auch die Halligbewohner mit der Biosphäre: „Die Biosphäre sind wir." Auch ein weiterer Bewohner betrachtet den Gründungssinn der Biosphäre als Ermöglichung sowie als einen Informationskanal zur Landespolitik nach Kiel, unterstützt durch das Interesse der Bürgermeister der Halligen am Küstenschutz. Außerdem beschreibt dieser Bewohner einen gegenseitigen Austausch der Halligbewohner untereinander und Selbstinitiativen bzw. die Selbstschaffung einer Lobby sowie die Gemeindevertretung als Lobby und als Selbstinitiative und Diskussionsplattform der Halligbewohner. Ein weiterer Bewohner sieht zwar eine Lobby, jedoch werde diese von Seiten des Naturschutzes dominiert: „Die ((*Akteure des Küstenschutzes*)) können sich gegenüber den Naturschützern nicht durchsetzen. Das ist eine Lobby, die die haben."

Im Kontext einer fehlenden Mitbestimmung wird auch von 6 Bewohnern explizit eine *fehlende Berücksichtigung und Wertschätzung der Expertise der Halligbewohner* betont. Dabei scheint vordergründig zu sein, dass man sich nicht ernstgenommen fühlt und man nicht angehört wird. Dies wird u.a. an den folgenden Aussagen deutlich: „[…] Wir sind ja die kleinen Halligdeppen"; „Ach, da hört keiner zu"; „Im Prinzip würde es schon langen, wenn man mal hören würde und fragen würde. […]"; „[…] Man ist ja im Küstenschutz beschäftigt, dass man sich wünschen würde, das man mal Leute, die hier vor Ort leben, und die kleinteiligen Beobachtungen machen, mehr zu Rate gezogen werden"; „Wenn man ein bisschen mehr auf die Erfahrungen der Halligleute hören würde, wäre schon viel."

Weitere 4 Bewohner fordern spezifischer *eine verstärkte Berücksichtigung der Bewohner bei der Warftkörpergestaltung* sowie bei Warft-Reparaturarbeiten.

Bisherige Maßnahmen im Küstenschutz und Bewertung derer

Insgesamt äußern sich 26 Bewohner zu den *Warft-Erhöhungen* und Anpassungen als Küstenschutzmaßnahme. Während 7 Bewohner die Methodik der bisherigen Warft-Erhöhung beschreiben sowie auch ihre Wichtigkeit betonen und weitere 7 Bewohner ihre Zufriedenheit mit der bisherigen Umsetzung äußern, kritisieren 11 dieser 26 Bewohner die bisherige Umsetzung –

vor allem in Bezug auf den Warftkörper und den aus ihrer Sicht fehlenden Einbezug der Halligbewohner – und wünschen sich eine Nachbesserung sowie eine Anpassung bei zukünftigen Aufwarftungen. Ein Bewohner ist hingegen der Meinung, dass eine Warfterhöhung, wie bisher, nicht mehr möglich sei, da die Grenzen dessen erschöpft seien: „[…] Die Grenze ist erreicht, dass man da noch irgendwie erhöhen könnte, das hat sich ausgedehnt. Also ich denke mal, eine Erhöhung wie damals, das wird einfach nicht mehr möglich sein."

Größtenteils kritisch äußern sich Bewohner von Langeneß zu *Elastocoast* als Küstenschutzmaßnahme: 14 Bewohner äußern ihre Skepsis und Kritik an diesem Werkstoff, u.a. aufgrund des negativen Geruchs, der Porosität, der mangelnden Natur- und Gesundheitsverträglichkeit oder der Sorge um eine Arbeitsplatzreduktion aufgrund einer weniger benötigten Arbeitsintensität mit diesem Werkstoff. 4 Bewohner haben keine Bedenken bezüglich Elastocoast und erkennen dessen Vorteile, u.a. in der Arbeitserleichterung. 3 weitere Bewohner wägen sowohl die Vor-, als auch die Nachteile ab, während weitere 3 Bewohner keine Positionierung aufgrund fehlender Kenntnisse und Erfahrungen tätigen.

23 Bewohner beschreiben und bewerten die *Holz-, Busch- und Steinlahnungen*, wobei 15 dieser 23 Bewohner die Wichtigkeit der Lahnungen sowie deren Pflege und Instandhaltung betonen. 3 Bewohner beschreiben die ehemalige Funktion der Lahnungen für die Landgewinnung. Ein Bewohner kritisiert die Aufgabe von Vorlahnungen zugunsten des Naturschutzes, ein weiterer kritisiert die fehlende Lahnungspflege und ein Bewohner gab an, keine ausreichenden Kenntnisse über die Wichtigkeit der Reparaturarbeiten an den Lahnungen zu besitzen.

Zu den *Schotten* als bisherige Küstenschutzmaßmaßnahme äußern sich 11 Bewohner: Dabei betonen 5 Bewohner deren Wichtigkeit, sagen jedoch auch aus, dass nicht jedes Haus auf den Halligen mit Schotten ausgestattet sei und diese teilweise auch nicht nachträglich angebracht werden. 2 weitere Bewohner geben Auskunft, dass Schotten bei ihnen vorhanden seien, für 2 weitere Bewohner sind diese jedoch unwichtig, u.a. weil sie in höher liegenden Häusern wohnen, und damit sind diese hier nicht vorhanden. Ein weiterer Bewohner gibt Auskunft, dass zwar Schotten vorhanden seien, aber nicht genutzt werden und ein Bewohner gibt zu bedenken, dass diese traditionelle Maßnahme zukünftige Generationen ohnehin nicht nutzen werden: „[…] Wenn unser Sohn nachher mal alleine ist, ob er das dann wieder neu machen würde, alleine schon die Fensterverschottungen. Ich glaube, da würde er bestimmt „nein" sagen. Er ist nicht für so was, dass es unbedingt sein muss." Anhand dieser Aussage wird der generationale Unterschied bezüglich der traditionellen Küstenschutzmaßnahmen ersichtlich.

Auch 11 der 31 befragten Bewohner äußern sich zu dem *Igel* als Küstenschutzmaßnahme: Hier betonen 5 Interviewte die Wichtigkeit des Igels, ein Bewohner äußert Zufriedenheit mit dem Igel, 3 Bewohner beschreiben eine fehlende Ausarbeitung des Igels, ein Bewohner beschreibt den

bisherigen Igel und stellt Überlegungen bezüglich eines neuen Igels in Verbindung mit einem höheren Deich auf und ein Bewohner äußert fehlende Kenntnisse über die Wichtigkeit oder einen Nachbesserungsbedarf des Igels.

Weitere 10 Bewohner äußern sich zu den *Steinbuhnen* und der *Steinkante*: Dabei heben 6 Bewohner die Wichtigkeit der Steinkante zum Schutz der Halligen vor Überschwemmungen und Hochwasser hervor, wobei sogar ein Interviewter betont, dass die Steinkante das Wichtigste sei, ohne die die Halligen viel kleiner seien: „Ich würde sagen, Steinkante ist am wichtigsten. Weil wenn die Steinkante nicht wäre, dann wäre die Hallig wesentlich kleiner." Ein weiterer Bewohner plädiert für notwendige Reparaturen an der Steinkante. Die Wichtigkeit der Steinbuhnen heben 4 weitere dieser 10 Bewohner hervor.

8 Bewohner befürworten und betonen die Wichtigkeit der *Deckwerke* für einen Erhalt der Hallig und empfinden diese als zur Hallig passend. Auch die Wartungsarbeiten an den Deckwerken werden in diesem Kontext als ein wichtiges Element hervorgehoben.

Weitere 6 Bewohner beschreiben die Vorteile und Funktionsweise eines *Ringdeiches*, wobei einer dieser Bewohner für eine Warft-Erhöhung in Verbindung mit einem Ringdeich plädiert.

Der Schutz des Hallig-Bodens durch den *Deich* sowie dessen Funktionsweise (und Grenzen) wird von 5 Bewohnern umschrieben, wobei ein Bewohner anmerkt, dass eine Erhöhung des Deiches aus seiner Sicht nicht mehr möglich sei. Ein Bewohner plädiert hingegen für eine Nachbesserung und Reparatur des Deiches.

Die Funktion des *Dammes* bzw. des *Lorendammes* wird von 4 weiteren Bewohnern beschrieben: Dabei beschreiben 2 Interviewte die Wasseraufstauung durch den Damm, ein Bewohner betont den Erhalt des Dammes und ein Bewohner äußert Kritik an dem Damm zwischen Langeneß und Oland, durch den eine schnellere Überflutung Olands vermutet wird.

Weitere 4 Bewohner äußern sich zu der *Schleuse* als Küstenschutzmaßnahme, wobei 2 Bewohner die Funktionsweise der Schleuse beschreiben und 2 Bewohner deren Wichtigkeit hervorheben.

Zudem beschreiben 3 Bewohner die *Bauweise der traditionellen Hallig-Häuser* als eine positive sowie beständige Küstenschutzmaßnahme.

Weitere 3 Bewohner betonen den positiven Zusammenhang zwischen einer Nachbesserung bzw. *Aufstockung der Häuser* und Küstenschutz, wobei ein Bewohner anmerkt, dass eine Aufstockung oder Nachbesserung auch finanzierbar sein müsse: „Es muss sinnvoll gemacht werden. Und auch bezahlbar gemacht werden."

Insgesamt 3 der 31 Interviewten geben Auskunft zu verwendeten *Sandsäcken* im Küstenschutz. Ein Interviewter beschreibt dabei die Sandsäcke als Schottenersatz: „Also die Sandsäcke haben wir als Schottenersatz gehabt, weil wir eben keine Schotten hatten haben wir die Säcke gemacht, um die in

die Tür zu schmeißen.“ Ein weiterer Interviewter beschreibt die Schutzfunktion der Sandsäcke bei der Sturmflut 1962 und der dritte Interviewte betont die Wichtigkeit einer Kombination von Schotten und Sandsäcken zum Schutz: „Ohne Schotten, nutzen die Sandsäcke gar nichts.“ Diese Aussage steht im Gegensatz zu der Anmerkung des ersten Interviewten, der angibt, Sandsäcke statt Schotten zu nutzen. Dadurch wird deutlich, dass kein homogenes Meinungsbild unter den Halligbewohnern bezüglich jeglicher bisheriger Küstenschutzmaßnahmen besteht.

Weiterhin äußert sich ein Bewohner als zufrieden mit der *Steindecke* und ein weiterer Bewohner beschreibt die *Schläuche* ebenfalls als eine traditionelle Küstenschutzmaßnahme.

Insgesamt werden die *traditionellen Küstenschutzmaßnahmen* nochmals von 15 Bewohnern in ihrer Relevanz sowie Angemessenheit hervorgehoben, während 2 Bewohner angeben, *keine Meinung* zur Wichtigkeit der traditionellen Küstenschutzmaßnahmen aufgrund fehlender Kenntnisse zu haben.

Neue Ideen und Vorschläge

Zu der Idee eines *hydraulischen Hauses* äußern sich insgesamt 16 der Befragten: Dabei lehnen 11 Bewohner diesen Vorschlag ab und 5 Bewohner betrachten diese Konzeption für kommende Generationen vorstellbar, wenn diese technisch machbar seien.

Die 11 Bewohner, die sich zu der Vorstellung von *schwimmenden Häusern* als künftige Küstenschutzstrategie äußern, lehnen diese Idee durchweg ab, begründet u.a. durch ein fehlendes Vertrauen in diese Art der Technik oder mit dem Argument, dass dies aufgrund der Schubkraft der Wellen nur in beruhigten Gewässern möglich sei.

Mobile Schläuche sowie *mobile Wände* werden von 11 Bewohnern als neue Ideen im Küstenschutz bewertet: Aufgrund einer vermuteten Inkompatibilität mit der alternden Bevölkerung, des fehlenden festen Untergrundes sowie aufgrund des Wellenganges und des Windes lehnen 5 dieser 11 Bewohner diese Idee ab. Ein Bewohner argumentiert hier wie folgt: „Kann man ja nur dort nutzen, wo man einen festen Untergrund hat. Die Vorrichtungen hat man ja in Hamburg. Mobile Wände oder Schläuche werden hier nie zur Anwendung kommen. Nie! Auf keinen Fall.“ 5 Bewohner halten mobile Wände oder Schläuche hingen für vorstellbar, betonen jedoch auch die potentiellen Schwierigkeiten in der Umsetzung, aufgrund der alternden Bevölkerung, der Anschaffungskosten oder wenn beispielsweise der Wind bei einer Sturmflut dreht. Einer dieser Bewohner hält mobile Küstenschutzmaßnahmen für vorstellbar, wenn gewisse Voraussetzungen erfüllt seien, die wie folgt beschrieben werden: „[…] Wenn, denke ich mal, dann müssten wir das völlig an einer Stelle ansetzen, wo es Sinn macht. Und ich denke Sinn machen würde es, wenn man denn, sage ich, die Deutsche Küstenlinie völlig wieder auf den Ursprung zurückbringt. […] Das heißt Sylt, Amrum, Hooge Außensende, Pellworm, bis Eiderstedt runter. […] Aber da muss man

natürlich vieles berücksichtigen. Da muss man ja die Priele, die Priel-Führung berücksichtigen.“ Auch ein weiterer dieser Interviewten betont zwar den potentiellen Kostenfaktor mobiler Küstenschutzmaßnahmen, empfindet diese jedoch auch als situative Ergänzung mit einer entsprechenden stabilen und technischen Konstruktion (jedoch nicht als Warftersatz): „Ja und vor allen Dingen die Kosten. […] Aber wenn es funktioniert, ist es bestimmt nicht schlecht. Ich sag mal, weil das ja auch Sachen sind, die könnte man ja wieder wegholen oder die Sachen woanders stationieren oder das ist mit den mobilen Wänden ja genauso. […] Das ist schwierig, dass dann zu dem Zeitpunkt aufzubauen. Aber vielleicht kann man die irgendwie anders technisch konstruieren […].“ Ebenso betont ein Bewohner, dass mobile Küstenschutzvorrichtungen für künftige Generationen vorstellbar sind: „Aber vielleicht in zwanzig, dreißig Jahren, dass die da mal vielleicht eine andere Entwicklung dort haben […].“ Ein weiterer Bewohner schlägt selbst im Themenkomplex mobiler Küstenschutzmaßnahmen vor, dass ein Konzept mobiler oder „aufblasbarer“ Schotten zukünftig denkbar wäre und auch eher umgesetzt würde, als fest installierte Schotten.

Ein *Hochsetzen der Häuser und/oder Neubau* wird hingegen von 8 Bewohnern als neue Idee genannt und präferiert. Ein Bewohner betont in diesem Zusammenhang die Notwendigkeit einer staatlichen Bezuschussung und ein weiterer die Notwendigkeit einer gleichzeitigen Warfterhöhung.

Der Vorschlag, „*Parterre dicht machen und ein Stock hoch bauen*“, ist zwar für 2 Bewohner derzeit nicht realisierbar und wird als unnötig erachtet, jedoch präferieren 6 Bewohner diese Idee, da diese auch der alten Vorgehensweise entspräche und eventuell eine Überlebensgarantie sein könnte. Jedoch geben diese Interviewten zugleich die Schubkraft der Wellen sowie die Frage zu bedenken, ob dies der Boden und die Statik aushalten.

Fest-Installierte Wände vor der Warft werden von allen 6 Bewohnern, die sich zu dieser neuen Küstenschutzidee äußern, abgelehnt, u.a. aufgrund des Wellenganges.

Eine *Nachbesserung der Warften und Aufwarftung* wird von 5 Bewohnern vorgeschlagen, ein weiterer Bewohner sieht in diesem Kontext – aufgrund des Gewichtes – jedoch keine weiteren Aufwarftungsmöglichkeiten.

Einen *Ringdeich* halten 5 Bewohner zur Wasserberuhigung für vorstellbar, 2 Bewohner betonen jedoch, dass dieser nicht an jeder Stelle der Hallig umsetzbar und geeignet wäre. Ein Bewohner gibt zu bedenken, dass ein Ringdeich aus Platzgründen und in Anbetracht von Naturschutzrichtlinien schwer umsetzbar wäre. Ein Bewohner präferiert in diesem Kontext einen halben Ringdeich.

Weitere 4 Bewohner betonen die *Reparatur, Pflege oder Erneuerung bisheriger Küstenschutzmaßnahmen*, wie des Igels, der Busch- und Steinlahnungen oder eine Steinkantenverstärkung.

Neue Ideen werden auch im *Zusammenhang zwischen Küstenschutz und Naturschutz* von 4 Bewohnern geäußert: Dabei befürworten 3 Interviewte eine Zusammenlegung der Küstenschutz- und Naturschutz- bzw. Ranger-Tätigkeiten, sodass schwere Küstenschutztätigkeiten von der jüngeren Generation übernommen werden und körperlich weniger belastende Tätigkeiten von älteren Bewohnern ausgeführt werden können. Ein weiterer Bewohner befürwortet ein verstärktes Zusammenarbeiten der Gemeinde- und Küstenschutzarbeiter sowie der Zivis der „Schutzstation Wattenmeer“ und betont ebenfalls eine notwendige Übernahme der schweren Küstenschutztätigkeiten seitens der jüngeren Generation. Ein weiterer Bewohner wünscht sich in diesem Themenkomplex eine stärkere Transparenz der Entscheidungen des Küsten- und Naturschutzes.

Das Konzept von *Pfahlhäusern* wird von 2 Bewohnern bewertet, wobei beide dieses ablehnen: „[…] Damit kann ich mich nicht anfreunden“; „[…] Häuser auf Pfähle stellen und all so was. Das ist alles von unserer Seite nicht machbar.“

Ein Bewohner schlägt vor, eine Steinmauer zwischen die Häuser zu bauen, wägt jedoch zugleich potentielle Probleme dieser Idee ab: „Ich liebäugle immer mit so einer Mauer, so eine Grenzmauer zwischen den Häusern. Damit tu ich dem Haus aber keinen Gefallen, weil das Wasser, das kommt ja dann an der Wand immer am Nachbarhaus vorbei. Bei so einem fiesen Sturm vorbeilaufen und dann bei uns in Garten und von da ins Haus. Da hatte ich immer die fixe Idee gehabt, wenn man eine Steinmauer baut, die so hoch ist, dann würde das Wasser am Haus vorbeigeleitet.“

Ein weiterer Bewohner schlägt eine staatliche Bezuschussung der Sandsäcke vor, da der Staat auch ein Interesse an der Bewohnung der Halligen habe.

Ein Bewohner schlägt vor, ein *Materiallager als Katastrophenvorrat* einzurichten, beispielsweise für die Lahnungen. Einen *Deich nach Holländischem Vorbild* betrachtet ein Bewohner auf dem Halligboden als nicht praktikabel. Ebenso lehnt ein Bewohner die Idee, einer *salzwasserstabilen Membran um die Halligen* ab.

Ein Bewohner sieht *keine Notwendigkeit zur Umsetzung neuer Küstenschutzmaßnahmen*: „Es gibt hier definitiv kein Sturmflutproblem. Das ist einfach nicht wahr. Das letzte Problem, welches wir hatten, war 1962.“

Infrastruktureller Küstenschutz

Bezüglich der infrastrukturellen Komponente der *Arbeitsplätze im Küstenschutz* äußern sich insgesamt 11 Bewohner. Dabei kann eine Verknüpfung zu dem Bereich *neue Ideen hinsichtlich des Zusammenhanges von Küstenschutztätigkeiten und Naturschutz* hergestellt werden, zu dem sich in diesem Kontext 3 Bewohner äußern: 2 Interviewte befürworten eine Zusammenlegung der

Küstenschutz- und Naturschutz- bzw. Ranger-Tätigkeiten, sodass schwere Küstenschutztätigkeiten von der jüngeren Generation übernommen werden und körperlich weniger belastende Tätigkeiten von älteren Bewohnern ausgeführt werden können. Ein weiterer Bewohner befürwortet ein verstärktes Zusammenarbeiten der Gemeinde- und Küstenschutzarbeiter sowie der Zivis und betont ebenfalls eine notwendige Übernahme der schweren Küstenschutztätigkeiten seitens der jüngeren Generation. Bezüglich des Zusammenhanges zwischen dem Werkstoff Elastocoast und Arbeitsplätzen äußern sich insgesamt 4 Bewohner: Dabei geben alle vier Bewohner an, keine gesundheitlichen Bedenken, sondern vielmehr Sorge um einen Arbeitsplatzverlust durch Elastocoast zu haben, aufgrund des dadurch reduzierten Arbeitsaufwandes sowie der Identifizierung mit der Arbeit im Küstenschutz, die durch Elastocoast gefährdet sein konnte. In diesem Kontext äußert einer dieser Bewohner auch den Vorschlag, dass andere Tätigkeiten als Küstenschutzarbeiten anerkannt werden, z.B. die Hilfe älterer Hallig-Bewohner bei der Absicherung und Instandhaltung der Warft.

Ein weiterer Bewohner betont in diesem Kontext die Wichtigkeit von Arbeitsplätze im Küstenschutz, ein weiterer Interviewter beschreibt die vielfältigen Arbeitsmöglichkeiten im Küstenschutz, ein weiterer Bewohner hebt einen notwendigen Fokus auf die Vereinfachung von Steinarbeiten im Küstenschutz hervor und ein Bewohner beschreibt die Problematik der infrastrukturellen Anbindung bei Sturmfluten, sodass dass beispielsweise der Arbeitsweg nicht küstenschutztechnisch abgesichert ist.

Auch die *Warften* bzw. *die Aufwarftungen* können in den Themenkomplex der infrastrukturellen Küstenschutzmaßnahmen eingeordnet werden: Eine *Nachbesserung der Warften und Aufwarftung* in Anbetracht des Meeresspiegelanstieges wird von 5 Bewohnern vorgeschlagen, ein weiterer Bewohner sieht in diesem Kontext – aufgrund des Gewichtes – jedoch keine weiteren Aufwarftungsmöglichkeiten. Ein weiterer Interviewter beschreibt eine bestehende räumliche Einschränkung auf den Warften aufgrund der Warftgröße sowie fehlende Warft-Ausweitungsmöglichkeiten. Auch ein weiterer Bewohner fordert in Anbetracht dessen eine notwendige räumliche Ausweitung der Warft für die jeweilige Wirtschaftlichkeit oder eine potentielle Betriebserweiterung. Außerdem beschreibt einer dieser Bewohner die Schwierigkeit der Instandhaltung und Warft-Pflege in Anbetracht der Überalterung auf der Hallig.

Die *Schotten und Sandsäcke* können nicht nur dem Themenbereich bisheriger Küstenschutzmaßnahnamen, sondern spezifischer auch den infrastrukturellen Küstenschutzmaßnahmen zugeordnet werden: Zu den *Schotten* äußern sich insgesamt 11 Bewohner, wobei 5 Bewohner deren Wichtigkeit betonen, aber auch darauf verweisen, dass nicht jedes Haus auf den Halligen mit Schotten ausgestattet sei und diese teilweise auch nicht nachträglich angebracht werden. 2 weitere Bewohner geben Auskunft, dass Schotten bei ihnen vorhanden seien, für 2 weitere Bewohner sind diese jedoch unwichtig, u.a. weil sie in höher

liegenden Häusern wohnen, und damit seien diese dort nicht vorhanden. Ein weiterer Bewohner gibt Auskunft, dass zwar Schotten vorhanden seien, aber nicht genutzt werden und ein Bewohner gibt zu bedenken, dass diese traditionelle Maßnahme zukünftige Generationen ohnehin nicht nutzen werden.

Zu den verwendeten *Sandsäcken* äußern sich insgesamt 3 der 31 Interviewten: Dabei beschreibt ein Interviewter die Sandsäcke als Schottenersatz, ein weiterer erklärt die Schutzfunktion der Sandsäcke bei der Sturmflut 1962 und ein dritter Interviewte betonte die Wichtigkeit einer Kombination von Schotten und Sandsäcken zum Schutz. Diese Aussage steht im Gegensatz zu der Anmerkung des ersten Interviewten, der angibt, Sandsäcke statt Schotten zu nutzen. Dadurch wird deutlich, dass kein homogenes Meinungsbild unter den Halligbewohnern bezüglich infrastruktureller Küstenschutzmaßnahmen besteht.

Die *Nutzung des Lorendammes als Transportweg* wird von insgesamt 2 Bewohnern beschrieben: Der Damm dient zwar primär als Küstenschutzmaßnahme, wird aber auch als Transportweg für (Bau-) Material sowie von den Halligbewohnern als Fahrweg verwendet (dies sei aber nach der Angabe beider Interviewten offiziell nicht genehmigt).

Auch die Forderungen zweier Interviewten nach einem *Lagervorrat für Reparaturmaterial* sowie nach *notwendigem zusätzlichen Baumaterial und Maschinen* für die Tätigkeiten im Küstenschutz können diesem Themenkomplex zugeordnet werden.

Weiterhin sind dem Bereich der infrastrukturellen Küstenschutzmaßnahmen folgende Einzelaussagen zuzuordnen:

Ein Bewohner spricht von einer *ausreichenden infrastrukturellen Grundversorgung* als Teil des eigenen Küstenschutzes, bestehend beispielsweise aus einem Stromgenerator etc.

Ein weiterer Bewohner fordert eine *Nachbesserung an der Steindecke* explizit als infrastrukturellen Küstenschutz.

Relevante Akteure im Küstenschutz[8]

Die *Halligbewohner* sowie *spezifische Halligbewohner* werden als relevante Akteure im Küstenschutz von insgesamt 23 Befragten genannt: Um an dieser Stelle eine Anonymisierung der Bewohner zu wahren, sei nur darauf hingewiesen, dass von 14 Bewohnern vor allem sechs *spezifische Hallig-Bewohner* mehrfach genannt wurden und als relevante Akteure im Küstenschutz betrachtet werden. Diese Akteure wurden entsprechend bei der Veranstaltung der „Zukunftswerkstatt“ auf der Hallig Langeneß (siehe Kapitel 3) gesondert eingeladen, um eine Mitarbeit dieser zentralen Personen zu gewährleisten.

[8] An dieser Stelle waren hinsichtlich des Antwortverhaltens Mehrfachnennungen möglich.

Die *Halligbewohner allgemein* – in Zusammenarbeit mit dem LKN – werden von 7 Bewohnern als relevante Küstenschutzakteure bezeichnet, wobei auch eine stärkere Berücksichtigung sowie ein größeres Mitspracherecht in diesem Kontext gewünscht werden.[9] Ein weiterer Bewohner hebt den Einbezug der „Alten", erfahrenen Halligbewohner in Zusammenarbeit mit den Vorarbeitern im Küstenschutz, als ergänzende Expertise, hervor. Ein weiterer Bewohner betont, dass fast alle (männlichen) Halligbewohner Akteure im Küstenschutz sind oder waren und sich die Küstenschutz-Kolonnen aus Halligbewohnern zusammensetzen.

Als relevanten Akteur im Bereich des Küstenschutzes wird das *LKN* von 20 der 31 Interviewten genannt: Dabei betrachten 15 Bewohner das LKN als zuständigen, zuverlässigen und fachkundigen Hauptakteur sowie als Entscheidungsinstanz für Küstenschutzmaßnahmen, das den Halligbewohnern hilft, Kontrollen und Reparaturen übernimmt sowie über die notwendige Expertise verfügt. 4 Bewohner betonen die Relevanz eines Zusammenspiels von LKN und Halligbewohnern sowie zwischen dem LKN und den Mitarbeitern im Küstenschutz. Ein Bewohner merkt an, dass das LKN zwar die letzte Entscheidungsinstanz in Sachen Küstenschutz ist, aber aufgrund des Naturschutzes eingeschränkt sei.

Weiterhin werden *spezifische Akteure des LKN* sowie *Vorarbeiter im Küstenschutz*, die ebenfalls dem LKN zugehörig sind, von 17 Bewohnern als relevante Akteure im Küstenschutz herausgestellt:[10] 9 Bewohner betonen die Wichtigkeit sowie die Zufriedenheit mit den Vorarbeitern im Küstenschutz, 7 Bewohner heben den Küstenschutzmitarbeiter von Föhr und 6 Bewohner den seitens des LKN für die Halligen Zuständigen hervor.

Der *Bürgermeister*[11] wird von 15 Bewohnern als relevanter Akteur, Hauptansprechpartner und Vermittlerinstanz im Küstenschutz benannt, da sich dieser mit den Gegebenheiten vor Ort auskenne und entsprechende Erfahrungen habe. 2 Bewohner betonen dabei das Interesse der Bürgermeister der Halliggemeinden an Küstenschutzangelegenheiten und deren engen Kontakt zur Landesregierung. Ein weiterer Bewohner wünscht sich den Bürgermeister als Hauptentscheidungsinstanz bezüglich Küstenschutzmaßnahmen.

Im Kontext der relevanten Akteure im Küstenschutz wurde auch von 4 Bewohnern die *Gemeindevertretung* genannt: Während 2 Bewohner die Wichtigkeit einer Abstimmung von Küstenschutzmaßnahmen mit der Gemeinde als letzte Instanz betonten, hob ein Bewohner die Expertise der Gemeindevertreter hervor und ein weiterer Bewohner bemängelte eine fehlende Entscheidungsmacht der Gemeindevertretung.

[9] Einige Interviewten nannten sowohl die Halligbewohner allgemein, als auch spezifische Halligbewohner, sodass an dieser Stelle Mehrfachnennungen möglich waren.
[10] Auch hinsichtlich dieses Bereiches waren Mehrfachnennungen möglich, sodass die Interviewten sowohl das LKN allgemein, als auch spezifische Mitarbeiter dessen genannt haben.
[11] An dieser Stelle gilt es anzumerken, dass im Laufe der Projektzeit bzw. nach der Durchführung und Auswertung der Interviews mit den Halligbewohnern ein Bürgermeisterwechsel auf Langeneß stattgefunden hat.

Küstenschutzmaßnahmen im positiven oder negativen Zusammenhang zum Naturschutz

Bezüglich des Zusammenhanges von Küstenschutz und Naturschutz beschreiben insgesamt 16 der 31 interviewten Bewohner *Einschränkungen der Küstenschutzarbeit durch Naturschutzvorgaben*: Dabei beschreiben 10 Bewohner allgemein das Spannungsfeld zwischen dem Naturschutz und Küstenschutz, Einschränkungen der Küstenschutzarbeit durch den Naturschutz bzw. Naturschutzrichtlinien, stillgelegte Baumaßnahmen aufgrund von Naturschutzvorgaben und die Vernachlässigung des Küstenschutzes zugunsten des Naturschutzes. 3 weitere Bewohner kritisieren, dass dringend notwendige Anpassungsarbeiten an den Lahnungen, an den Deckwerken und am Igel nicht durchgeführt werden können, da die Naturschutzbehörde dagegen sei. Am Beispiel einer Maßnahme an der Steinkante beschreibt ein weiterer Bewohner eine aktive Feindbild-Projizierung seitens Naturschutzes auf den Küstenschutz und kritisiert den Verlust der Landgewinnung. Ein weiterer Bewohner plädiert für den Schutz des Menschen vor der Natur, merkt jedoch auch an, dass sich Küsten- und Naturschutz nicht ausschließen müssen. Ein weiterer Bewohner spricht sich hingegen dafür aus, dass man sich entweder für Küstenschutz oder Naturschutz entscheiden müsse und man praktisch nicht beide Bereiche parallel betreiben könne. Auch anhand dieser beiden Äußerungen wird eine gewisse Inhomogenität im Meinungsbild der Halligbewohner deutlich.

Bezüglich der Küstenschutzmaßnahme Elastocoast wird eine gewisse *Unvereinbarkeit von Küstenschutz und Naturschutz bzw. Biosphärenreservat* laut 3 Bewohnern deutlich: Alle drei Interviewten sehen eine Unvereinbarkeit von Elastocoast mit einem Biosphärenreservat wie den Halligen, hinsichtlich der Aspekte Nachhaltigkeit und Naturverträglichkeit. Einer dieser Bewohner kritisiert in diesem Kontext eine fehlende Aktivität seitens der Naturschützer gegen den Einsatz von Elastocoast im Gebiet der Halligen.

Ein *positiver Zusammenhang zwischen Küstenschutz und Naturschutz* wird in dem Vorschlag deutlich, Küstenschutz- und Naturschutz- bzw. Ranger-Tätigkeiten zusammenzulegen: 2 Bewohner befürworten diesen Vorschlag, ein weiterer Bewohner befürwortet ein verstärktes Zusammenarbeiten der Gemeinde- und Küstenschutzarbeiter sowie der Zivis im Naturschutz.[12] Anhand dieser Äußerungen ist eine Vereinbarkeit beider Bereiche erkennbar.

Küstenschutz im positiven oder negativen Zusammenhang mit der Landwirtschaft

Bezüglich einer *Kompatibilität zwischen Küstenschutz und Landwirtschaft* äußern sich insgesamt 3 Bewohner: 2 Bewohner kritisieren die derzeitige Situation der Landwirtschaft aufgrund einer EU-

[12] Siehe hierzu auch das Themenfeld *Küstenschutz*, *Neue Ideen und Vorschläge*.

Richtlinie bezüglich einer Bestallung für das Vieh und die Unmöglichkeit, das Halligland mit Gülle zu bedüngen, da dies unter anderem mit dem Deich – als Küstenschutzmaßnahme – unvereinbar sei. Ein weiterer Bewohner beschreibt hingegen, dass Küstenschutz und Landwirtschaft häufig miteinander vereinbar seien, da Küstenschutz meist hinter oder am Deich beginnt und damit die Landwirtschaft wenig tangiere. Die Probleme mit dem Naturschutz seien hingegen gravierender. Auch hier wird das heterogene Meinungsbild unter den Halligbewohnern deutlich. So beschreiben weiterhin 3 Bewohner eine *Doppelfunktion von Küstenschutzmaßnahmen für die Landwirtschaft*: Ein Bewohner erklärt, dass der Deich den Schutz des Halligbodens gewährleiste, der wiederum für die Landwirtschaft wichtig ist. Ein weiterer Bewohner beschreibt die ehemalige Funktion der Warftböschung für die Landwirtschaft, z.B. als Futterstelle für die Tiere, die jedoch gegenwärtig keinen Nutzen mehr finde. Ebenso beschreibt ein weiterer Bewohner, dass die Holzlahnungen in der Vergangenheit der Landgewinnung und damit nicht nur dem Küstenschutz, sondern auch der Landwirtschaft dienten und unter anderem aufgrund dieses Bedeutungsschwundes an Relevanz eingebüßt haben.

Auch eine *Tätigkeiten-Kombination im Bereich des Küstenschutzes und der Landwirtschaft* verweist auf die Kompatibilität beider Bereiche: 2 Bewohner beschreiben, dass viele Familien allein von der Landwirtschaft nicht mehr leben können und somit Tätigkeiten im Küstenschutz und in der Landwirtschaft für eine lukrative Verdienstmöglichkeit kombinieren.

Ein weiterer Zusammenhang zwischen Küstenschutz- und Landwirtschaft wird angesichts der *Bewirtschaftungs- und Ausgleichsflächen* ersichtlich: 2 Bewohner beschreiben den Schutzstatus als Berechnung der Bewirtschaftungs- und Ausgleichsflächen.

<u>Küstenschutz im positiven oder negativen Zusammenhang zum Tourismus</u>

Über einen Zusammenhang zwischen *Tourismus und Elastocoast*, der als Klebstoff im Küstenschutz eingesetzt wird, äußern sich insgesamt 3 der 31 Interviewten: Dabei betonen alle drei Bewohner eine Ablehnung von Elastocoast seitens der Touristen, da u.a. an den Badestellen ein als unangenehm empfundener Geruch durch Elastocoast entstehe.

Eine *Vereinbarkeit von Küstenschutz und Tourismus* ist anhand der Aussagen von 3 Bewohnern zu erkennen: Zum einen dient die Straße auf dem Lorendamm – der primär als Küstenschutzmaßnahme fungiere – einer Tourismusausweitung. Zum anderen werden die Schutzräume auch von den Bewohnern als Gästezimmer genutzt und vermietet.

Ein weiterer Bewohner gibt an, dass k*eine Einschränkungen bei den Küstenschutzarbeiten durch Touristen* bestehen würden. Der Tourismus fungiere auch als *Kompensation für eine Arbeitstätigkeit im Küstenschutz*, so die Aussage eines weiteren Bewohners.

2.1.2 Sturmfluten und Landunter

Erfahrungen und Beschreibungen bisheriger Landunter

Die Erfahrungen mit der *Sturmflut im Jahre 1962* beschreiben insgesamt 8 Bewohner: Dabei betrachten 2 Bewohner diese Sturmflut als eine der schlimmsten, die je auf den Halligen stattgefunden habe und 2 weitere Bewohner beschreiben den immensen Schaden, den diese Sturmflut verursacht hat. Ein weiterer Bewohner beschreibt die fehlende Frischwasser-versorgung auf den Halligen im Kontext der schweren Sturmflut von 1962 und die Hilfe eines Schiffes aus Hamburg. Ein Interviewter erklärt, dass die Verschottung der Sturmflut standgehalten habe. Ein Bewohner betont, dass jemand, der diese Flut erlebt hat, auch wisse, was jetzt bei einer erneuten Sturmflut zu tun wäre und ein weiterer Bewohner ist der Ansicht, dass die 1962er-Sturmflut bewirkt habe, dass heute vieles einfacher sei, da nun beispielsweise Strom- und Wasserleitungen vorhanden seien.

Die *Wertschätzung der eigenen Erfahrungen mit Sturmfluten und Landunter* wird vor allem anhand der Aussagen von 8 Bewohnern deutlich: Diese betonen die Wichtigkeit der eigenen Erkenntnisse und des Wissens, das man im Laufe der Jahre gesammelt hat. 2 Bewohner erklären dabei, dass man sich auf die eigenen Erfahrungen verlasse und das Barometer zur Hilfe nehme. Einer dieser Bewohner erklärt, dass Menschen, die auf den Halligen geboren wurden oder lange dort leben, Warnungen sowie Gefahren entsprechend einschätzen können. Ein Bewohner hebt hervor, dass man auch viel die Erfahrungen älterer Halligbewohner angehört hat und versucht habe, diese umzusetzen. Ein Bewohner beklagt im Kontext dessen, dass es der jüngeren Generation häufig an Erfahrung mangelt, welche Vorkehrungen sie bei einem starken Landunter treffen müssen. Vergleichbares äußert ein weiterer Bewohner, der betont, dass die Halligbewohner keine Angst vor Wasser haben, da sie sonst nicht auf den Halligen lebten. Ein Interviewter erklärt, dass sich die Halligbewohner an Landuntersituationen gewöhnt hätten und alle Bewohner so etwas bereits kannten, im Gegensatz zu Menschen, die nicht von den Halligen kommen.

Die Erfahrungen mit der Bedeutsamkeit der *Windrichtung und Windstärke* schildern 7 Halligbewohner: Dabei betonen 3 Interviewte die bedeutende Orientierungshilfe der Windrichtung bei einer Sturmflut und ein Bewohner beschreibt seine Erfahrung, dass der Wind schnell drehen könne. Dies wird auch anhand der Aussage eines Interviewten deutlich, der von einem Landuntereignis berichtet, dem eine nahezu totale Windstille vorausgegangen sei. Im Kontext dessen betont dieser jedoch, dass Landunter nicht immer mit Wind zusammenhänge. 4 Bewohner heben hingegen die Bedeutsamkeit der Windstärke hervor. Ein weiterer Bewohner erklärt, dass er

bei einer starken Windstärke nicht mehr aufs Dach klettern konnte und auf sich selbst gestellt gewesen sei, nachdem der Wind abflachte.[13]

Von ihren *Erfahrungen mit der Wasserstand- und Wellenhöhe sowie den Sturmfluten in den 1970er, 1980er und 1990er Jahren* berichten 6 Bewohner. Ein Bewohner erklärt, dass man auf den Halligen Sturmfluten nur in Ausnahmefällen habe, so wie in den Jahren 1956, 1961, 1962, 1976, 1978, 1981 und die Riesenflut 1936, wobei in diesen Jahren das Wasser „bis zur Warftkante voll" gewesen sei. Ein Bewohner beschreibt die Jahre 1971 und 1981, in denen schwere Stürme gewütet hätten und im Jahr 1982 hingegen das Wasser nur „an der Türschwelle" gestanden habe. Auch ein weiterer Bewohner berichtet, dass bei einem dieser Ereignisse das Wasser nicht bis an die Türe gereicht habe. Ebenso berichtet ein weiterer Bewohner von einem Volllaufen der Häuser in den Jahren 1976 und 1981, wobei dieser betont, dass eine Sturmflut damit nicht vergleichbar sei. Aus Berichten anderer Bewohner weiß ein Interviewter, dass das Wasser auch im Jahre 1981 hoch gestanden habe, während dieser eigene Erinnerungen nur an eine Situation Anfang der 1990er Jahre hat, wo das Wasser bis in den Garten gekommen sei. Ein Bewohner berichtet von einem Ereignis aus seiner Kindheit, bei dem das Wasser bis zum Fenster gestanden und er dies festgestellt habe, was die Eltern anfangs nicht glauben wollten. Insgesamt beschreiben von diesen 6 Bewohnern 3 Bewohner die Heftigkeit einer solchen Sturmflut. Als Beispiele seien an dieser Stelle zwei entsprechende Interviewpassage angeführt: „1976, als die Flutwelle kam, das ist eine Welle, die spüren sie auch. In Stuttgart hat man den Aufschlag der Flutwelle registriert. So stark ist sie. So eine Welle ist ein so unglaubliches elementares Ding. Sie machen sich keine Vorstellungen davon, was da an Wasser auf Sie zurollt. Das ist der Wahnsinn. […] Da bebt es in jeder Fuge. Wenn du die Hände an die Wand legst, dann bebt diese Mauer in den Böen. Das ganze Haus ist im Beben. Die Wellen greifen meterhoch. Da geht die Gischt über die Häuser. […]" Eine vergleichbare Beschreibung findet sich bei einem weiteren Interviewten, der ebenfalls die enorme Energie beschreibt, die die Wellen bei solchen Sturmfluten bereits aufgebaut hätten: „Eine Welle ist nur Energie. Wenn wir eine Welle haben und eine Welle bewegt sich auf Sie zu, dann ist es nicht das Wasser, was sich auf Sie zu bewegt, es ist nur die Energie, das Wasser selber nicht. […]"

Zu ihren *Erfahrungen mit der Häufigkeit und Verschiedenartigkeit von Landunter* im Zusammenhang mit einem gewissen *Sicherheitsgefühl* äußern sich insgesamt 6 Interviewte: 3 Bewohner erklären, dass schwere Sturmfluten relativ selten vorkommen, wobei hier die Aussagen zwischen „alle zehn Jahre", alle „15-20 Jahre" und alle „40 Jahre" stark voneinander abweichen. In den Aussagen von 2 Bewohnern wird deutlich, dass diese ständig mit erneuten Sturmfluten rechnen und entsprechende Vorkehrungen treffen, auch wenn diese schon längere Zeit nicht mehr eingetreten sind. Jedoch erklärt einer dieser Bewohner auch, dass aufgrund des seltenen Auftretens

[13] Hier konnten die Interviewten sowohl die Windrichtung, als auch die Windstärke sowie darüber hinaus ihre spezifischen Erfahrungen mit diesen Indikatoren beschreiben, sodass Mehrfachnennungen möglich waren.

der Sturmfluten sich die Halligbewohner sicher fühlen und die „Leute wieder wach“ wären, wenn eine Sturmflut eintritt. Ein Bewohner beschreibt, dass viele jüngere Menschen schwere Sturmfluten sowie deren Gefahren nicht mehr kennen. Ein Interviewter erklärt, dass in einem Jahr 24-mal Landunter auf der Hallig gewesen sei, wobei dies schon zehn Jahre zurückliegen würde und verhältnismäßig häufig gewesen sei. Ein weiterer Bewohner erinnert sich an ein Jahr, in dem 21-mal Landunter gewesen sei, aber auch ein Jahr ohne Landunterereignisse, sodass dieser Interviewte die Verschiedenartigkeit der Landunter betont. Ein Interviewter hebt hervor, dass in der Herbst- und Winterzeit die Häufigkeit von Landunter zunehme.[14]

Der *Wasserabfluss* nach einer Sturmflut sowie nach einem Landunter wird von 4 Bewohnern beschrieben, wobei die Beschreibungen hinsichtlich der zeitlichen Komponente teilweise stark voneinander abweichen: Ein Bewohner berichtet von drei, ein anderer von achtzehn und ein weiterer von vierundzwanzig Stunden. Eine Auffälligkeit zeigt sich in der Aussage eines einzelnen Bewohners, der der Meinung ist, dass kein Sturmflutproblem auf den Halligen bestehe, da das Wasser auf keinen Widerstand treffe und einfach abfließen könne.

Erfahrungsbasiert liefern der *Wasserstand sowie die Wasserrichtung* eine bedeutsame Orientierungshilfe, so die Aussage 4 weiterer Halligbewohner.

3 Bewohner äußern ihre *Erfahrungen mit den Schotten*, wobei ein Bewohner erklärt, dass die Schotten bei der letzten schweren Sturmflut dichtgehalten haben und ein Bewohner beschreibt, ab welcher Windstärke die *Verschottung* eingesetzt wird. Ein Bewohner erklärt, dass bislang in seinem Erfahrungsschatz keine schwere Sturmflut eingetroffen wäre, bei der der Einsatz von Schotten notwendig gewesen wäre.

2 Bewohner beschreiben, dass die *Halligen als „Bremse“* für die Hauptflutströme fungieren und ein *Sturm aufgestautes Wasser* sei.

Ein Halligbewohner erklärt, dass *Stülpen* nach seinen Erfahrungen nur dann eingesetzt werden, wenn es zwingend erforderlich sei.

Ein Interviewter beschreibt, dass als erste Handlung vor einer Sturmflut bisher telefonisch der *Pegel angerufen* werde.

Laut der Erfahrungen eines weiteren Bewohners stehen auch die *Mondphasen*, insbesondere der Vollmond, in einem engen Zusammenhang mit stürmischen Wetterverhältnissen.

Ein weiterer Bewohner berichtet, dass eine *Vielzahl an Muscheln mit einem Landunter* auf das Land gelangt. Ein Bewohner erklärt, dass *Katastrophensturmfluten* erfahrungsgemäß schwer

[14] In diesem Themenkontext beschrieben die Interviewten sowohl die Häufigkeit der Landunterereignisse in den letzten Jahren, als auch deren Verschiedenartigkeit und das Sicherheitsgefühl bezüglich dieser Erfahrungen, sodass hierbei Mehrfachnennungen möglich waren.

vorhersehbar seien und ein weiterer Bewohner beschreibt aus den Erzählungen seines Vaters einen *Schutzraumbrand* sowie die *zügige Wasserversorgung vom Festland*.

Expertenwissen und Rückgriff auf (wissenschaftliche) Erkenntnisse

Als spezifisches Expertenwissen wird die *Expertise der älteren Halligbewohner* seitens zweier Interviewter genannt, da diese über entsprechende Erfahrungen mit Sturmflut- und Landuntereignissen verfügen.

Erkennungszeichen von Landunter und Hilfsmittel zur Erkennung von Landunter und Sturmfluten[15]

Das *Internet* wird von 18 Bewohnern als Hilfsmittel zur Erkennung von Landunter genannt: Dabei betonen 5 Bewohner die Wichtigkeit und Zuverlässigkeit des Internets sowie auch die Möglichkeit, unterschiedliche Informationsportale zu nutzen. In diesem Kontext wird vor allem die Option einer Vorausschau hervorgehoben. 4 Bewohner nutzen eine Kombination aus den Hilfsmitteln Internet, Barometer, eigener Erfahrungsschatz, Radio, Tidekalender etc. und 3 Bewohner betonen explizit eine Kombination des Internets mit eigenen Wetterbeobachtungen, wobei die eigenen Beobachtungen priorisiert werden. 4 Bewohner äußern Kritik an der Unzuverlässigkeit des Internets und nutzen dieses maximal als ergänzende Absicherung. Ein Bewohner betrachtet andere Hilfsmittel als wichtiger und ein weiterer Bewohner gibt an, dass seinerseits das Internet keine Verwendung findet.

Als ein Erkennungszeichen sowie Hilfsmittel zur Identifizierung eines Landunters werden von 17 Bewohnern die *Wetterbeobachtungen* genannt, wobei 12 Bewohner die Wichtigkeit einer Kombination der eigenen Beobachtungen mit weiteren Hilfsmitteln hervorheben, wie Internet, Radio, Wettervorhersagen etc. Während 3 Bewohner besonders die Bedeutsamkeit der eigenen Wetterbeobachtungen betonen, berichten 3 Bewohner darüber hinaus, dass die Wahrnehmung mit den Sinnesorganen und von Geräuschen eine weitere entscheidende Hilfsoption zur Erkennung eines nahenden Landunters darstellt.

Die *Windrichtung und die Windstärke* stellen für 13 Bewohner entscheidende Merkmale zur Erkennung von Landunter dar.

Über die Verwendung des *Barometers* als Hilfsmittel zur frühzeitigen Erkennung eines Landunters äußern sich 11 Bewohner: Dabei ist das Barometer für 4 Bewohner nach wie vor eines der wichtigsten und zuverlässigsten Hilfsmittel zur Erkennung eines Landunters und 4 weitere

[15] In diesem Themenbereich, vor allem hinsichtlich der genutzten Hilfsmittel zur Erkennung von Landunter, waren Mehrfachnennungen sowie die Nennung einer Hilfsmittelkombination möglich.

Bewohner nutzen dieses in Kombination mit anderen Erkennungsmerkmalen und Hilfsmitteln. 2 Bewohner erklären hingegen, dass die jüngere Generation eher andere, moderne Hilfsmittel verwendet, wie das Internet. Ein weiterer Bewohner gibt an, dass das Barometer zwar weiterhin genutzt werde, aber weniger wichtig als andere Hilfsmittel sei.

10 Bewohner betrachten den *Wasser- sowie Tidestand* als charakteristische Erkennungszeichen von Landunter, die man entsprechend beobachtet.

Für 9 Bewohner sind auch die *Nachrichten und Warnungen im Radio, Fernsehen und auf dem Mobiltelefon* entscheidende Vorboten eines Landunters: Für 7 Bewohner sind das Wichtigste die Nachrichten und der Wetterbericht im Radio, aber auch in Kombination mit dem Videotext im Fernsehen, dem Internet und den eigenen Erfahrungen sowie mit der Nutzung des Barometers. Jedoch kritisiert einer dieser Bewohner auch die fehlende Exaktheit der Meldungen im Rundfunk. Von 2 Bewohnern wird eher das Fernsehen, als das Internet als Hilfsmittel verwendet. Außerdem erklärt einer dieser Interviewten, dass die Pegelstände mittlerweile auf Mobiltelefone mitgeteilt werden, jedoch diese häufig nicht stimmen würden.

Weitere 8 Bewohner nennen spezifisch und explizit den *Wetterbericht und die Wettervorhersage* als Erkennungszeichen von Landunter, wobei 2 dieser Bewohner deren Bedeutung in Kombination mit eigenen Wetterbeobachtungen hervorheben.

Die *Beobachtung des Mondes und der Mondstellung* wird zur Erkennung eines Landunters von 5 Bewohnern genannt.

Die Bedeutung der *eigenen Intuition und des eigenen Gefühls*, ob ein Landunter sich anbahnt, heben 4 Bewohner hervor.

2 Bewohner nennen das *Verhalten der Tiere* als Erkennungsmerkmal von Landunter, beispielsweise das Sammeln der Vögel, wobei hingegen 2 Bewohner das Verhalten der Tiere nicht als Vorboten von Landunter betrachten.

2 weitere Bewohner heben den *Nutzen eigener Erfahrungswerte* – vor allem der älteren, sturmfluterfahrenen Generation – im Zusammenhang mit der Erkennung von Landunter hervor, auch im Zusammenhang mit der Verwendung des Barometers.

Ein Bewohner charakterisiert eine *Wellenhöhe* über fünf Meter als besonders kritisches Vorzeichen für ein Landunter.

Insgesamt lässt sich anhand der Analyse dieser Äußerungen resümieren, dass das Zusammenspiel mehrerer Faktoren, unter anderem Wasserstand und Windstärke, aber auch die eigene Intuition und Wahrnehmung sowie die Nutzung diverser Hilfsmittel, wie Barometer, Internet und Radio, entscheidend für eine rechtzeitige Erkennung von Landunter sind.

Vorkehrungen vor einem nahenden Landunter

Die *Sicherung der Tiere* als eine Vorkehrung vor einem Landunter beschreiben insgesamt 22 Bewohner: Von diesen geben 16 Bewohner an, dass sie zuerst die Tiere in Richtung Warft holen und anschließend die Maschinen und Geräte sichern, da die Tiere oberste Priorität genießen, wobei sich die Bewohner auch gegenseitig helfen. 2 Bewohner hingegen holen die Tiere zum Schluss der Vorkehrungen, unter anderem damit diese nicht im Weg bei der Sicherung der Geräte sind und in der vordersten Reihe stehen, vor den Fahrzeugen und Gegenständen. 2 Bewohner beschreiben dabei auch die Schwierigkeiten bei der Sicherung der Tiere, unter anderem aufgrund der Wetterverhältnisse bei einem Landunter. Weitere 2 Bewohner erklären, dass unterschiedliche Vorkehrungen je nach Jahreszeit bestehen, da im Sommer das Vieh auf der Weide und im Januar im Stall sei.

Die *Sicherung von Geräten und Maschinen allgemein* wird von 13 Bewohnern als Vorkehrung genannt. Dabei wird betont, dass die Maschinen und Geräte – unter anderem auch Heugeräte und Maschinenanhänger, die im Sommer zur Ernte auf dem Feld stehen – hochgeholt werden müssen, damit sie wenig Schaden von einer Sturmflut nehmen.

10 Bewohner nennen als eine weitere wichtige Vorkehrung vor einem Landunter die *Befestigung von Gegenständen*: Beschrieben wird von diesen Bewohnern das Festbinden loser Gegenstände sowie die Kontrolle, ob außerhalb des Hauses alles fest verankert ist, wie Dachpfannen, Hecken und Pforten. 2 Bewohner geben an, dass auch die Gegenstände im Haus, unter anderem auf dem Dachboden, gesichert und der Keller verriegelt werden müsse. 2 Bewohner merken jedoch an, dass es nur wenige Sache draußen gäbe, die vor einem Landunter reingeholt werden müssten, da im Unterschied zu früher bereits alles frühzeitig weggeräumt sei. Ein Bewohner erklärt, dass auch die Kinder bereits um die notwendigen Vorkehrungen bei einem Landunter wissen und ihre umliegenden Spielsachen vor einem Landunter wegräumen.

Spezifischer wird die *Sicherung von Fahrzeugen*, vornehmlich der Automobile und Fahrräder, von 9 Interviewten genannt, wobei 2 dieser Bewohner das Hochholen der Loren betonen, obwohl sich diese meistens im Winter ohnehin schon auf der Warft befinden.

Die *Befüllung der Sandsäcke und die Verschottung* werden von 7 Bewohnern als spezifische Vorkehrungen vor einem Landunter genannt: In diesem Kontext betonen 4 Bewohner die Notwendigkeit einer rechtzeitigen Verschottung und 2 Bewohner eine frühzeitige Befüllung der Sandsäcke. Ein Bewohner hebt hervor, dass vor der Existenz des Schutzraumes und damit vor dem Jahre 1963 die Verschottung der Türen und Fenster besonders existentiell gewesen sei. Ein Bewohner beschreibt eine eigene, selbstkonstruierte Verschottungsmethode, damit das Wasser

ungehindert wieder ablaufen könne und betrachtet die Verschottung generell als ein wichtiges Element, um den Wellenschlag abzuhalten.[16]

Die *frühzeitige Wahrnehmung auswärtiger Termine, auf dem Festland oder anderern Warften, sowie die Versorgung mit Lebensmittelvorräten* nennen insgesamt 7 Bewohner als wichtige Vorkehrungen vor einem Landunter. 5 Bewohner betonen in diesem Zusammenhang die Notwendigkeit eines vorausschauenden Einkaufens und die Versorgung mit Lebensmittelvorräten, unter anderem aufgrund der fehlenden Festlandanbindung während eines Landunters und einer potentiellen Übernachfrage bei dem ortsansässigen Kaufmannsladen. 2 Bewohner betonen, dass die Kinder vor einem nahenden Landunter nicht mehr in die Schule oder den Kindergarten gebracht werden können und zuhause bleiben sollten, um eine Gefahr zu vermeiden. Ein Bewohner erklärt, dass die Fahrt zu ärztlichen Terminen rechtzeitig erfolgen muss, „damit man frühzeitig wegkommt". [17]

Während ein Bewohner angibt, dass die *Frau im Haus bleibe und der Mann außerhalb des Hauses die notwendigen Sturmflutvorkehrungen trifft*, erklärt ein Bewohner hingegen, dass auch die weiblichen Bewohner bei den Vorkehrungen mithelfen würden.

Schäden bisheriger Landunter

Insgesamt äußern sich 4 Bewohner über bisherige Schäden durch Landunter oder Sturmfluten: Dabei beschreibt ein Bewohner die entstandenen Schäden nach der großen Sturmflut auf den Halligen 1962 und eine veränderte Mentalität der Bewohner, da aufgrund der staatlichen Zuschüsse eine Art Wettbewerb entstanden sei: „Ich weiß nicht, ob diese Schäden, die es nach der Sturmflut gab, die waren dermaßen groß, dass die ganzen Hallig-Leute, die ganze Tradition sich verändert hat. Jeder wollte ein schöneres Haus als der andere, jeder bekam Zuschüsse und so was und konnte sich das erlauben. Die Schäden waren eigentlich viel größer und was eigentlich nicht wichtig war. Man muss das passende Fenster haben." Ein weiterer Bewohner erklärt, dass die Zuständigkeit für Schäden an der Warft bzw. an der Warft-Struktur dem LKN obliegt, nicht aber beispielsweise für Schäden am Grundstück, wie am Zaun, wobei die Reparatur der Warft auch oberste Priorität habe. Bezüglich der Zäune beschreibt ein weiterer Bewohner eine verminderte Haltbarkeit sowie einen häufigeren Erneuerungsbedarf von Zäunen aufgrund von Sturmfluten.

[16] In diesem Zusammenhang beschreiben einige Bewohner sowohl die Befüllung der Sandsäcke, als auch die Verschottung als besonders entscheidende Vorkehrungsmaßnahmen, sodass hier Mehrfachnennungen möglich waren.
[17] In diesem Themenkontext beschreiben einige Bewohner sowohl die notwendige Beschaffung von Lebensmittelvorräten, als auch die frühzeitige Wahrnehmung außerörtlicher Termine als besonders entscheidende Vorkehrungsmaßnahmen, sodass hier Mehrfachnennungen möglich waren.

Ein vierter Bewohner sieht gar keine Probleme oder Schäden aufgrund von Sturmfluten, außer die Problematik von Deichbrüchen aufgrund von Sturmfluten, wobei diese am Festland als gravierender betrachtet werden.

Infrastrukturelle Maßnahmen und Bestände im positiven oder negativen Zusammenhang zu Sturmfluten und Landunter

Im Kontext des Zusammenhanges zwischen Landunter- bzw. Sturmflutereignissen und infrastrukturellen Maßnahmen steht die *Stromversorgung bzw. der Notstrom*, wobei sich insgesamt 5 Bewohner zu diesem Themenkomplex äußern: Dabei geben alle Bewohner an, dass jede Warft ein Notstromaggregat habe und somit genügend Elektrizität für einen potentiellen Stromausfall nach einem Landunter vorhanden sei.

Insgesamt äußern sich 3 Bewohner zur *infrastrukturellen Anbindung und Mobilität* im Zusammenhang mit Landunter und Sturmfluten: Dabei erklärt ein Bewohner, dass man den Lorendamm nur erreiche, wenn kein Landunter sei. Ein weiterer Bewohner gibt Auskunft, dass keine Verbindung zur Schule möglich sei, wenn ein Landunter stattfindet. Ein dritter Bewohner äußert den Wunsch nach einer besseren Straßenanbindung bzw. einer höheren Straße, damit man bei Hochwasser fortkommen könne und nicht mit dem Auto im Wasser stehe.

2 weitere Bewohner äußern sich zu der *(Frisch-) Wasserversorgung nach einem Landunter oder einer Sturmflut*: Beide Interviewten beschreiben, dass direkt nach der schweren Sturmflut von 1962 vom Festland Frischwasser gebracht worden sei und betonen die Wichtigkeit einer guten Trinkwasserversorgung vom Festland, auch zur Versorgung der Tiere.

Bezüglich einer *Notfallversorgung* und des *Hubschraubereinsatzes* geben 2 Bewohner Auskunft: Ein Interviewter erklärt, dass bei Landunter-Zeiten, aber auch im Alltäglichen, der Hubschrauber lange Zeit brauche, bis dieser vor Ort auf den Halligen sei. Ein weiterer Bewohner beschreibt, dass der Hubschrauber teilweise auch gar nicht erst auf den Halligen landen könne und somit unter Umständen eine Notarztversorgung ausbleiben kann.

Insgesamt bewertet ein Interviewter – aufgrund der vorhandenen Erfahrungen mit Landuntereignissen – die *bestehende Infrastruktur in diesem Zusammenhang als ausreichend und gut*.

Relevante Akteure und Management vor, bei oder nach einem Landunter bzw. einer Sturmflut[18]

Der *Bürgermeister* wird insgesamt von 13 Bewohnern als zentraler Akteur für ein Sturmflut- und Landuntermanagement genannt, wobei 4 Bewohner in diesem Kontext betonen, dass dieser gleichzeitig ein Halligbewohner sei, die Gegebenheiten kenne und deshalb besonders geeignet wäre.

Im Kontext des Managements einer Sturmflut oder eines Landunters betonen 8 Bewohner ein *Selbst-Management sowie eine gegenseitige, nachbarschaftliche Hilfe*: 7 Bewohner beschreiben gegenseitige, nachbarschaftliche Hilfeleistungen in derartigen Landunter- und Überflutungssituationen, sodass zunächst eine grundlegende (provisorische) gegenseitige Selbst-Hilfe erfolgt. Ein Bewohner spricht in diesem Zusammenhang auch von einer Gemeinschaft auf den Warften, die sich nicht im Stich lässt und ein weiterer von einer gewissen „gelebten Nachbarschaftshilfe", da jeder jedem hilft. Ein Bewohner betont, dass jeder selber in den Alltag zurückfindet und es keiner übergeordneten Stelle bedürfe.

Das *LKN* wird von insgesamt 7 Bewohnern als zentral und organisatorisch erfahren in Sachen Sturmflut- und Landuntermanagement genannt, während ein weiterer Bewohner aussagt, dass kein behördliches Sturmflut-Management bestehe und ein weiterer Interviewter sich mehr Unterstützung vom LKN bezüglich Sturmfluten und der Warften als Schutz vor einem Landunter wünscht.

Der *Katastrophenschutz* wird insgesamt von 4 Bewohnern als zentraler Akteur bei Sturmfluten genannt, der die meiste Erfahrung habe und über das LKN eingeschaltet werde.

4 Bewohner betrachten den *Kolonnenführer sowie zentrale Mitarbeiter im Küstenschutz* als relevante Akteure für ein Sturmflut- und Landuntermanagement, da diese die meiste Erfahrung haben und zugleich auch Halligbewohner seien.

Als weitere behördliche Akteure in Sachen Sturmflut- und Landuntermanagement nennen 2 Bewohner die Zuständigkeit des *Amt Pellworm* und ein Bewohner den *Kreis Husum*.

Darüber hinaus nennen 2 Bewohner die *Gemeindevertretung*, da diese sich mit den Gegebenheiten vor Ort auskenne und ein weiterer Bewohner das *Gemeindebüro* als Informationsstelle und zentralen Knotenpunkt.

2 Bewohner heben die *Feuerwehr* als zentralen Akteur für ein Sturmflutmanagement hervor, wobei ein Bewohner betont, dass in der Feuerwehr vorwiegend ältere, erfahrene Bewohner aktiv sind.

Des Weiteren lassen sich in diesem Themenkomplex die folgenden Einzelaussagen einordnen:

[18] Bei diesem Themenkomplex konnten auch mehrere Akteure als zentral für ein Sturmflut- und Landuntermanagement genannt werden.

Generell betont ein Interviewter, dass das Management nach einer Sturmflut von einem *Halligbewohner* übernommen werden müsste.

Bezüglich der Schadensbeseitigung nach den Sturmfluten 1962 und 1976 nennt ein weiterer Bewohner das *Marschbauamt*, das für eine Beseitigung der Löcher an allen Warften zuverlässig gesorgt habe. Bezüglich des Sturmflut-Managements von 1962 berichtet ein weiterer Bewohner, dass ein damaliger *politischer Akteur* die Organisation übernommen hätte.

Ein Bewohner nennt die *Bundeswehr* als zentralen Akteur bei der Sturmflut 1962 und ein weiterer Bewohner gibt an, dass dieser selbst bislang *keine Sturmflut erlebt* habe, *die einer Organisation oder Schadensbeseitigung bedurft hätte*.

Landunter und Sturmfluten im positiven oder negativen Zusammenhang zum Naturschutz

Ein Zusammenhang zwischen Landunter bzw. Sturmfluten und Naturschutz wird in den Aussagen zweier Interviewten deutlich: Ein Bewohner schlägt vor, den *Katastrophenschutz – also den Schutz vor einer Sturmflut – mit dem Naturschutz in Verbindung* zu bringen, da die Wasserstände (als Teil der Natur) zukünftig steigen werden und die daraus erwachsende Gefahr Bestandteil des Katastrophenschutzes sei. Entgegen dieser positiven Sicht auf das Verhältnis beider Bereiche, kritisiert ein weiterer Bewohner den *Naturschutz auf den Halligen als „übertrieben" hinsichtlich einer Priorität gegenüber dem Schutz vor Landunter und Sturmfluten*.

Landunter und Sturmfluten im positiven oder negativen Zusammenhang mit der Landwirtschaft

Diesem Themenkomplex lassen sich die folgenden Einzelaussagen zuordnen:

Ein Bewohner beschreibt die *Veränderungen nach der Sturmflut 1962* und im Kontext dessen eine Spezialisierung auf Rindvieh (aufgrund der Neubauten) sowie eine Technisierung der landwirtschaftlichen Abläufe, zum Beispiel bei den Melkprozessen der Kühe.

Aufgrund der extremen Situation der Landunter- und Sturmflutgefahren auf den Halligen sowie initiiert durch das Drängen der Hallig-Landwirte bestehe eine *spezielle Förderung der Hallig-Landwirtschaft*, so die Aussage eines Bewohners. Zudem beschreibt dieser Interviewte, dass die „brachliegende" Fläche, die durch das Förderprogramm finanziert wird, nicht mehr von Vieh festgetreten werde, sodass nach einer Sturmflut dieser Boden Auftrieb bekommen könne und dann „weg" sei.

Eine besondere Gefahr für die Landwirtschaft durch Landunter und Sturmfluten wird anhand der Aussage eines weiteren Bewohners deutlich: Dieser berichtet, dass besondere

Wetterbeobachtungen und Erkundungen notwendig sind, um rechtzeitig vor einem nahenden Landunter die Tiere zu evakuieren, wodurch ein höheres Maß an Verantwortung bestehe.

Landunter und Sturmfluten im positiven oder negativen Zusammenhang zum Tourismus

Im Kontext des Zusammenhanges von Tourismus und Landunter beschreiben 2 Bewohner, dass eine *besonders frühzeitige Benachrichtigung der Gäste vor einem Landunter* erforderlich ist und frühzeitigere Informationen durch die wachsende Bedeutung des Tourismusbereichs auch immer wichtiger werden. Des Weiteren gibt ein Bewohner Auskunft, dass der *Schutzraum als Tourismuszimmer* genutzt wird, statt nur in seiner ursprünglichen Funktion zum Schutz vor einem Landunter oder einer Sturmflut zu fungieren.

2.1.3 Infrastruktur

Beschreibung der bestehenden Infrastruktur

Die *Lebensmittelversorgung, Einkaufsmöglichkeiten und Gastwirtschaft* auf den Halligen werden von insgesamt 5 Bewohnern beschrieben: 2 Bewohner erklären in diesem Kontext, dass sich die Halligbewohner im Winter genügend Lebensmittelvorräte aneignen, da der ortsansässige Kaufmannsladen einen plötzlichen vermehrten Andrang nicht stemmen könne und das Schiff im Winter nicht täglich fahre. Ein weiterer Bewohner berichtet von dem ersten Kaufmannsladen auf der Honkenswarft und der Entwicklung dessen sowie die Nutzung des Loredamms in diesem Kontext. Ein weiterer Interviewter nennt ein Einkaufzentrum, als Einkaufmöglichkeit über Lebensmittel hinaus, dass von den Halligen aus erreichbar sei. Ein weiterer Bewohner berichtet von der Gastwirtschaft auf Hilligenley.

Die *Fähre und Fährverbindung* wird von insgesamt 5 Bewohnern beschrieben, wobei 3 Bewohner die seltenen Fährverbindungen zur Winterzeit nennen und ein Bewohner von den eingerichteten Sonder-Fähr-Verbindungen zu Feiertagen berichtet. Ein Bewohner betrachtet die Fähre und Lore als positive Ergänzungen zueinander.

Bezüglich des *Lorendamms* und der *Lore* äußern sich 4 Bewohner: Ein Bewohner berichtet von den Anfängen des Loredamms im Jahre 1928. Ein weiterer Bewohner beschreibt, dass nach dem Dammbau der Damm zunächst asphaltiert als Straße diente, danach aber wieder die Lore darauf gesetzt wurde, was Kritik seitens dieses Interviewten findet. Ein weiterer Interviewter befürwortet, dass der Loredamm bzw. der Verkehr darüber geduldet werde. Ein Bewohner gibt an, dass die Lore und die Fähre eine gute Ergänzung zueinander seien und viele Bewohner die Lore häufig benutzen

würden, wenn dies das Wetter zulasse. Zudem gibt dieser Bewohner Auskunft darüber, dass der Loredamm nicht immer zu benutzen sei.

4 Bewohner beschreiben die *Bildung, Schule und das Lehrpersonal* auf den Halligen und dabei den schulischen Werdegang der Hallig-Kinder sowie den Besuch weiterführender Schulen auf dem Festland, um eine Ausbildung zu erhalten. Ein Bewohner merkt dabei an, dass viele nach dem Schulbesuch auf dem Festland wieder zurück auf die Hallig kämen.

Bezüglich der *Arbeitsmöglichkeiten und Arbeitsplätze* auf den Halligen äußern sich insgesamt 4 Bewohner: Dabei beschreiben 3 Bewohner, dass die Arbeitskolonnen im Küstenschutz überwiegend aus Halligbewohnern bestünden und der Küstenschutzbereich die Haupterwerbsquelle darstelle. 2 Bewohner erklären im Kontext dessen, dass die männlichen Bewohner überwiegend beim LKN tätig seien und für die weiblichen Bewohner die Tätigkeiten in der Gästezimmervermietung sowie als Hausfrau zentral seien. Einer dieser Bewohner beschreibt zudem die wenigen Arbeitsmöglichkeiten für junge Halligbewohner, die daraus häufig resultierende Gefahr von saisonaler Arbeit sowie von Arbeitslosigkeit und die Problematik einer Vereinbarkeit des Wohnortes Hallig mit einer Arbeit auf dem Festland.

Weitere 4 Aussagen betreffen den *demographischen Wandel*: Diese 4 Bewohner beschreiben den „Überalterungsprozess“ auf den Halligen, was problematisch hinsichtlich einer pflegenden und ärztlichen Versorgung sowie für die Instandhaltung und Pflege der Warftböschung sei.

Hinsichtlich der infrastrukturellen Bestände von *Elektrizität-, Strom- und Wasserversorgung* äußern sich insgesamt 3 Bewohner: Ein älterer Bewohner beschreibt die Entwicklung der Versorgung mit elektrischen Licht statt Petroleumlampen sowie der Wasser- und Radioverbindung auf den Halligen. Auch ein weiterer Bewohner erklärt, dass eine ausreichende Versorgung mit Elektrizität auf den Halligen – notfalls durch einen Generator – bestehe, was vor allem hinsichtlich einer nahenden Sturmflut zentral sei. Ein Bewohner beschreibt die Entwicklung des Telefonanschlusses für die Halligen, der 1957 gelegt und bislang einmal erneuert worden sei.

2 Bewohner äußern sich zu der bestehenden *Häuserarchitektur* auf den Halligen: Ein Bewohner gibt Auskunft, dass „halligtypische Fliesen“ in vielen Häusern eingebaut seien und ein weiterer Interviewter erklärt, dass das Reetdach der Häuser seit der Eröffnung des Museums auf den Halligen unter Denkmalschutz stehe.

Zur bestehenden Infrastruktur auf den Halligen äußert sich ein Bewohner dahingehend, dass es einen (häufig überlasteten) *Gemeindepfleger* für die beiden Halligen Oland und Langeneß gebe, ein *Arztbesuch im vierzehn-tägigen Tonus* möglich sei und ein *Rettungshubschrauber* zu den Halligen übersetze, der jedoch häufig auf den Halligen nicht landen könne sowie spät einträfe, wetterbedingt oder aufgrund anderer, auch grenzübergreifender Notfalleinsätze.

Bestehende Schwächen und Kritik an der bisherigen Infrastruktur

Bezüglich der vorhandenen *Arbeit bzw. Arbeitsplätzen* äußern sich insgesamt 7 Bewohner kritisch: Dabei kritisieren 4 Bewohner, dass es nicht genügend Arbeitsangebote für jüngere Halligbewohner gebe und der Wohnort Halligen auch eine Barriere für eine Anstellung auf dem Festland darstelle. So wird eine deutliche Problematik in den fehlenden (Arbeits-) Perspektiven für die jetzige und auch kommende Generation gesehen, um auf den Halligen leben zu können. Einer dieser Interviewten betont auch, dass nicht genügend Baumaschinen, Dumper und Radlader für die Arbeit der Kolonnen vorhanden seien. Während ein weiterer Bewohner die derzeit bestehende beschränkte Arbeit bzw. Arbeitsauswahl und vor allem die einseitigen Tätigkeiten im Küstenschutz – u.a. bezüglich des Steinesetzens – bemängelt, obwohl mehr Arbeit seitens der Bewohner gewollt sei, kritisiert ein weiterer Bewohner, dass zu wenig Arbeiter für das vorhandene Arbeitspensum vorhanden seien. Ein weiterer Bewohner äußert Kritik dahingehend, dass die Arbeitsstellen beim LKN im Küstenschutz an vorhandenes Eigentum gebunden seien, obwohl die Hallig-Gebundenheit der Arbeitsstellen von dem Interviewten befürwortet wird.

Die *ärztliche und pflegetechnische Versorgung auf den Halligen* wird von 7 Bewohnern als eine Schwäche vor Ort beschrieben: Allgemein beklagen 3 Bewohner, dass keine ausreichenden (ärztlichen/therapeutischen) Behandlungs- und Untersuchungsmöglichkeiten auf den Halligen vorhanden seien, wobei einer dieser Bewohner hervorhebt, dass dies beispielsweise in Geburtssituationen „dramatisch“ werden könne. 2 Bewohner betonen dabei, dass keine ausreichende pflegerische und ärztliche Versorgung für die älteren Halligbewohner bestehe, unter anderem auch aufgrund der fehlenden infrastrukturellen, externen Zufahrtsmöglichkeiten bei Hochwasser. Auch ein weiterer Bewohner äußert Kritik dahingehend, dass viele Bewohner aufgrund der fehlenden ärztlichen Betreuung fortziehen, im Winter gar keine Möglichkeit für einen Arztbesuch auf dem Festland bestehe und dass es für viele ältere Menschen einen enormen Stress bedeute, einen Arztbesuch auf dem Festland mit anschließender Heimfahrt wahrzunehmen. Seitens eines Interviewten wird kritisiert, dass ein Gemeindepfleger für die beiden Halligen Langeneß und Oland sowie der im vierzehntägigen Rhythmus erfolgende Arztbesuch nicht ausreichend seien.

Die *Fähr- und Schiffverbindungen* finden von 7 Bewohnern Kritik: Dabei kritisieren 2 Bewohner, dass aufgrund der Monopolstellung die Fährverbindung zu teuer sei, vor allem hinsichtlich der Tier-, Material- und Automobiltransporte. Einer dieser Bewohner kritisiert zudem, dass die Fähre ungeeignet und unpünktlich sei. Auch ein weiterer Bewohner äußert kritisch, dass die Fähre ungeeignet sei und bei Eiswinter wochenlang nicht fahre. Ein weiterer Bewohner hebt hervor, dass sich die Fährverbindungen besonders zu Feiertagen „stauen“ und es nicht noch weniger Fährverbindungen geben dürfe, vor allem für Touristen. Ein weiterer Bewohner kritisiert, dass man aufgrund der wenigen Fährverbindungen nicht ausreichend Aufenthalt auf dem Festland habe, man gerade an arbeitsfreien Tagen nicht genügend Zeit auf dem Festland für Besorgungen verbringen

könne und auch nicht immer den Lorendamm oder ein Boot nutzen könne. Ein Bewohner äußert Kritik, dass Schiffe wieder abgeschafft worden wären, die man vor Ort entladen konnte. Zudem wird Kritik eines weiteren Interviewten dahingehend geäußert, dass Schiffe nicht direkt am Anleger andocken könnten.

Bezüglich der *Bildung*, des *Schulbereiches* sowie des *Lehrpersonals* vor Ort äußern sich insgesamt 5 Bewohner. Die „Halligschule“ und das Lernen vor Ort bekommen von 2 Bewohnern eine positive Bewertung, während sich 3 Bewohner kritisch äußern: Ein Bewohner kritisiert eine fehlende Regelung im Bildungsbereich und dass die Lehrerkörper „ganz alleine“ die Verantwortung für die Kinder und Bildung hätten. Ein Bewohner äußert die Kritik, dass das Gefühl der Zuständigkeit im Bildungsbereich fehle und hierarchische Lücken bestünden. Eine detaillierte Aussage tätigt ein weiterer Interviewter zu diesem Themenbereich und kritisiert u.a. die Führung der Schule, die fehlende Kontrolle sowie Transparenz im schulischen Bereich. Auch die kurzen Elternsprechtage (trotz geringer Schülerzahlen), die mangelnde Distanz einiger Lehrer und die fehlende Unterstützung der Eltern durch das Schulamt finden seitens dieses Interviewten Kritik. Das bemängelte fehlende Niveau der Schule sei ein Grund dafür, dass viele Menschen gar nicht erst auf die Halligen ziehen wollten. Zudem kritisiert dieser Interviewte die fehlende Unterstützung seitens der Biosphäre, dass diese sich ganz aus der hier angesprochenen Schulproblematik raushalte, obwohl sie als Sprachrohr und Unterstützungsorgan für die Halligbewohner fungieren solle.

Der *Straßenausbau und die Straßenverbindungen* werden von 3 Bewohnern kritisch betrachtet: Ein Bewohner kritisiert, dass nach der Dammerhöhung die Asphaltierung darauf nicht als Straße belassen und als solche nutzbar gemacht wurde. Ein Bewohner äußert Kritik dahingehend, dass Straßen zu tief lägen und damit kein Fortkommen von der eigenen Warft, aber auch von anderen Warften, möglich sei, ohne dass Autos oder Fahrräder durch Hochwasser beschädigt würden oder ein langer Fußmarsch seitlich der Warft eingelegt werden müsse. Ein weiterer Bewohner kritisiert die schmale Straße und das Fehlen eines Fahrradweges.

Der *Notfall- und Hubschraubereinsatz* auf den Halligen wird von 3 Bewohnern kritisch betrachtet, wobei alle drei Interviewten die Problematik beschreiben, dass der Rettungshubschrauber oft nicht landen oder aufgrund anderer Notfalleinsätze nicht kommen könne und häufig zu lange brauche, bis dieser vor Ort sei.

3 Bewohner nennen den *demographischen Wandel und Überalterungsprozess* auf den Halligen als ein Problem, vor allem hinsichtlich der Pflege und Instandhaltung der Warft sowie der Vor-und Nachsorgen bei einem Landunter.

Zu der existierenden *Internet- und Telefonverbindung* auf den Halligen äußern sich 3 Bewohner: Während 2 Bewohner die Altersschwäche und Langsamkeit der derzeitigen Telefon- und

Internetverbindung bemängeln, sieht ein weiterer Bewohner keine Notwendigkeit einer Erneuerung und nennt beispielhaft die Örtlichkeit Niebüll mit einer schlechteren Telefon- und Internetverbindung. Anhand dieser Aussagen wird auch eine gewisse Heterogenität im Meinungsbild der Bewohner deutlich.

2 weitere Bewohner beschreiben *notwendige Reparaturarbeiten* im infrastrukturellen Bereich: Die Holzbrücken auf den Hauptstraßen werden seitens eines Bewohners als renovierungsbedürftig angesehen. Ein weiterer Bewohner äußert die Kritik, dass die Stellen hinter der Steindecke nicht ausreichend in Stand gehalten würden, vor allem am Südufer.

Darüber hinaus lassen sich diesem Themenbereich die folgenden Einzelaussagen zuordnen: Ein Bewohner äußert seinen Ärger darüber, dass (kleinere) Flugzeuge nicht auf den Halligen landen dürften, aber dennoch Flugverkehr in der Luft stattfinde. Seitens der kaufmännischen Perspektive wird beklagt, dass sich das kaufmännische Geschäft nicht trage, sodass die Gemeinde dieses unterstützen müsse. Ein weiterer Bewohner kritisiert die Architektur der Häuser, dass diese nicht für Hallig-Gegebenheiten bewohnbar seien, da externe Architekten diese entworfen hätten.

Gewünschtes, Vorschläge und Ideen bezüglich der Infrastruktur[19]

Der größte Handlungsbedarf im infrastrukturellen Bereich auf den Halligen scheint hinsichtlich der *Arbeitsmöglichkeiten und Arbeitsplätze* zu bestehen, da sich insgesamt 7 Bewohner zu diesem Bereich äußern: 3 Interviewte befürworten eine Zusammenlegung der Küstenschutz- und Naturschutz- bzw. Ranger-Tätigkeiten, sodass schwere Küstenschutztätigkeiten von der jüngeren Generation übernommen werden und körperlich weniger belastende Tätigkeiten von älteren Bewohnern ausgeführt werden können. Ein weiterer Bewohner befürwortet ein verstärktes Zusammenarbeiten der Gemeinde- und Küstenschutzarbeiter sowie der Zivis der „Schutzstation Wattenmeer“ und betont ebenfalls eine notwendige Übernahme der schweren Küstenschutztätigkeiten seitens der jüngeren Generation.[20] 3 weitere Bewohner betonen die Wichtigkeit, dass mehr Arbeiter sowie mehr Arbeitsstellen für die jüngere Generation von Nöten wären, um jüngere Menschen auf den Halligen zu „halten“.

Insgesamt merken 5 Bewohner Vorschläge zu der *Fähre und Fährverbindung* an: Diese wünschen sich häufigere (vor allem auch zur Winterzeit), verlässlichere, pünktlichere und weniger kostenaufwendige Fährverbindungen.

[19] Die im Folgenden aufgeführten Ideen und Vorschläge tangieren teilweise auch andere Bereiche, wie den Küstenschutz, die Landwirtschaft oder den Tourismus, da entsprechende infrastrukturelle Maßnahmen diesen Bereichen zugutekommen oder diese beeinträchtigen. Somit sind diese Äußerungen sowohl an dieser Stelle, als auch bei den spezifischen thematischen Ausführungen aufgeführt.
[20] Siehe hierzu auch das Themenfeld *Küstenschutz, Neue Ideen und Vorschläge*.

Bezüglich der *Straßen und des Straßenausbaus* werden insgesamt 5 Vorschläge und Wünsche geäußert: Ein Interviewter wünscht sich breitere Straßen, von einem weiteren Bewohner wird der Bedarf nach einer Erhöhung der Nebenwege und Hauptstraße gesehen, ein dritter Bewohner wünscht sich Zuwege zu dem eigenen Land und ein vierter Interviewter schlägt vor, einen Fahrradweg entlang der Straße einzurichten. Ein Interviewter betont die Wichtigkeit, dass die Holzbrücken auf den Hauptstraßen renoviert werden.

Hinsichtlich eines *Pflegedienst, Gemeindepflegers und der ärztlichen Versorgung vor Ort für die älteren Halligbewohner* äußern sich 4 Bewohner: Dabei schlagen 3 Bewohner einen mobilen Pflegedienst für die älteren Halligbewohner oder einen weiteren/zweiten Gemeindepfleger vor. Ein weiterer Bewohner sieht in diesem Bereich ebenfalls Handlungsbedarf und die Notwendigkeit einer ärztlichen Betreuung vor Ort, da für die älteren Bewohner der Weg zum Festland zu beschwerlich sei und sonst nur die Option bliebe, auf das Festland zu ziehen.

Insgesamt geben 3 Bewohner an, dass sie keine Wünsche oder Ideen bezüglich der Infrastruktur hätten.

2 Bewohner äußern hingegen den Wunsch nach einer schnelleren Internetverbindung sowie nach der Verlegung eines neuen Internet- und Telefonkabels.

Hinsichtlich des *Hubschraubers* für Einsätze auf den Halligen äußern sich 2 Bewohner: Ein Interviewter wünscht sich, dass der Hubschrauber schneller vor Ort ist, wenn er gebraucht werde und ein weiterer Bewohner schlägt einen Hubschrauber-Landeplatz für jede oder jede zweite Warft vor, wobei dieser Interviewte diese Umsetzung hinsichtlich des Kostenaufwands bezweifelt.

Bezüglich der *Anlegestelle für Schiffe* äußern sich 2 Bewohner, wobei einer betont, dass der Anleger anlaufbar sein sollte und ein zweiter hervorhebt, dass die Schiffe an dem Anleger direkt andocken können sollten und in diesem Kontext die Infrastruktur für Schiffe verbessert werden sollte.

Weitere Wünsche und Vorschläge finden sich in den folgenden Einzelaussagen:

Ein Bewohner äußert den Wunsch, dass die Halligbewohner in Entscheidungen für neue Infrastrukturen und Infrastrukturmaßnahmen einbezogen und gefragt werden. Ein weiterer Interviewter wünscht sich mehr Raum für die eigene Warft und weniger Größeneinschränkungen in diesem Zusammenhang. Ein weiterer Bewohner schlägt vor, Sandsäcke zur schnellen Füllung von Löchern bzw. von entstandenen Schäden bereitzuhalten und ein zentrales Lager, wie auf dem Festland, für Katastrophenmaterial und für Reparaturarbeiten einzurichten.[21]

[21] Siehe zu dieser Idee auch das Themenfeld *Küstenschutz, Neue Ideen und Vorschläge*.

Zentrale Akteure im infrastrukturellen Bereich

Als zentrale Akteure im infrastrukturellen Bereich werden insgesamt zwei Personen genannt: Ein Interviewter nennt den *Gemeindearbeiter* mit der Zuständigkeit für Straßenarbeiten und Wasserleitungen.[22] Ein weiterer Bewohner nennt den *für die Halligen zuständigen LKN-Mitarbeiter*, der sich als zentraler Akteur im Küstenschutz zugleich für die generellen, auch infrastrukturellen, Belange der Halligbewohner einsetze, wie für die Nutzung des Lorendammes.

Vereinbarkeit von Infrastrukturmaßnahmen und Naturschutz

Der Zusammenhang zwischen der Infrastruktur und dem Naturschutz auf Langeneß wird anhand des Aspektes von *Arbeitsplätzen* deutlich, zu dem sich insgesamt 4 Bewohner äußern: 3 Bewohner befürworten eine Zusammenlegung der Küstenschutz- und Naturschutz- bzw. Ranger-Tätigkeiten, und auch ein weiterer Bewohner schlägt ein verstärktes Zusammenarbeiten der Gemeinde- und Küstenschutzarbeiter sowie der Zivis der „Schutzstation Wattenmeer“ vor.[23] Ein weiterer Bewohner merkt kritisch an, dass aufgrund von gewissen Naturschutzrichtlinien Arbeitsplätze weggefallen seien und sich durch diesen Wegfall die Landschaft negativ verändert habe.

Ein weiterer relevanter Aspekt in diesem Themenkontext stellt die *Nutzung der Lore in Verbindung mit dem Vogel- bzw. Brutgebiete-Schutz* dar: Dabei beschreibt ein Bewohner, dass die Loren im Sommer die Vögel, vor allem in der Brutzeit, stören und einige Vögel besonders gefährdet seien, da sie ihre Küken zwischen den Schienen brüten. Auch ein weiterer Bewohner betont die Wichtigkeit spezifischer Fahrzeiten der Lore, um die Vögel durch den verursachten Lärm nicht allzu sehr zu stören.

Ein weiterer Bewohner äußert sich zu einer *Flugzeuglandeerlaubnis im Zusammenhang mit dem Naturschutz*: Dieser befürwortet, dass auch Flugzeuge auf den Halligen mit Ausnahmegenehmigungen landen dürfen sollten, was derzeit hinsichtlich des Naturschutzes auf Langeneß untersagt, aber für kleinere Flugzeuge auf nördlichen sowie südlicheren Inseln erlaubt sei. Auch er verweist in seinen Ausführungen auf das Beispiel der Austernfischer, die zwischen den Schienen der Lore brüten und leben, zur Verdeutlichung einer Vereinbarkeit zwischen diesem infrastrukturellen Aspekt und dem Naturschutz.

[22] Um die Anonymität zu gewährleisten, wird an dieser Stelle auf eine Namennennung verzichtet, da der Gemeindearbeiter zugleich auch ein Halligbewohner ist.
[23] Siehe hierzu auch das Themenfeld *Küstenschutz, Neue Ideen und Vorschläge*.

Vereinbarkeit von Infrastruktur und Landwirtschaft

In diesen Themenbereich lassen sich 3 Aussagen einordnen, die das *Halligprogramm in Verbindung mit den Fährverbindungen bzw. den Fährkosten* betreffen: Dabei beschreibt ein Bewohner, dass das Betreiben der Landwirtschaft auf den Halligen zu teuer sei, aufgrund der fehlenden Technik und der zu hohen Kosten im Zusammenhang mit der Fährverbindung. Im Kontext dessen kritisiert dieser Bewohner, dass ein Vertragsnaturschutz, wie in Eiderstedt, auf den Halligen nicht angewandt werde. Auch ein weiterer Bewohner betont, dass die Fährverbindung zu kostenaufwendig für Tier-, Auto- und Materialtransporte sei und entsprechend günstiger sein müsse, da die Landwirte ansonsten ihre Aktivitäten aufgeben würden. In diesem Zusammenhang steht auch die Anmerkung eines weiteren Bewohners, der erklärt, dass aufgrund der Fährverbindungen die Milchwirtschaft sowie die Auslieferung von frischer Ware aufgegeben werden, da dies aufgrund der oben genannten Umstände auf den Halligen nicht möglich sei.

Ein weiterer Bewohner wünscht sich für eine Vereinbarkeit von Landwirtschaft und Infrastruktur *breitere Straßen für die Landwirtschaft*.

Vereinbarkeit von Infrastruktur und Tourismus

Die Wichtigkeit einer Vereinbarkeit von Infrastruktur und Tourismus wird anhand der Aussage eines Interviewten deutlich: Dieser betont, dass die *Fährverbindungen* wichtig für die Gäste seien und gerade an Feiertagen, an denen ein vermehrter Tourismusbetrieb herrsche, verstärkt Fährverbindungen eingesetzt werden.

2.1.4 Zentrale Akteure

Behörden

Das *LKN* wird von 20 der 31 Interviewten als *entscheidender Akteur im Küstenschutz sowie im Sturmflut- und Landuntermanagement* genannt, wobei 15 Bewohner das LKN als zuständigen, zuverlässigen und fachkundigen Hauptakteur sowie als Entscheidungsinstanz für Küstenschutzmaßnahmen betrachten, die den Halligbewohnern hilft, Kontrollen und Reparaturen übernimmt sowie über eine notwendige Expertise verfügt. 4 Bewohner betonen die Relevanz einer Zusammenarbeit von LKN, Halligbewohnern und den Mitarbeitern im Küstenschutz. Ein Bewohner merkt an, dass das LKN als letzte Entscheidungsinstanz in Sachen Küstenschutz seitens

des Naturschutzes eingeschränkt würde.[24] Der Zusammenhang zwischen der Nationalpark- und Küstenschutzverwaltung wird auch von 3 weiteren Bewohnern beschrieben: Ein Bewohner sagt aus, dass das LKN und der Nationalpark gegenwärtig verstärkter zusammenarbeiten, jedoch die Arbeit des LKN häufig blockiert werde und das LKN an Befehlsgewalt verloren habe. Zudem kritisiert dieser Bewohner, dass keine der beiden Parteien richtig die Verantwortung übernehmen würde. Auch ein weiterer Bewohner kritisiert, dass kontinuierlich die Küstenschutzaktivitäten des LKN blockiert werden. Eine *positive Beurteilung des LKN* äußern 12 Bewohner: Dabei wird das LKN als kooperative, organisierte, vertrauensvolle und „gute Behörde“ mit „gutem Personal“ beschrieben, ohne die es „viel schlimmer“ auf der Hallig aussähe. 3 Bewohner betonen, dass das LKN den Halligbewohnern zuhöre. *Kritik am LKN* äußern 5 Bewohner, von denen 4 Bewohner hervorheben, dass das LKN den Halligbewohnern mehr zuhören solle und deren Erfahrungen, vor allem bezüglich der Warften und deren Gestaltung, in Entscheidungen einbeziehen müsste. Hinsichtlich dieses Kritikpunktes zeigt sich erneut eine Heterogenität im Meinungsbild der Halligbewohner, da im Gegensatz dazu 3 Bewohner ein ausreichendes „Zuhören“ seitens des LKN deklarieren. Ein Bewohner merkt an, dass man mit der Bürokratie des LKN unzufrieden sei.

Das *Amt Pellworm* und der *Kreis Husum* werden von insgesamt 6 Bewohnern genannt: 2 Bewohner betrachten das Amt Pellworm als zuständigen Akteur für das Landunter- und Sturmflutmanagement, auch aufgrund des Erfahrungshorizontes der Sturmflut von 1962. Ein weiterer Bewohner bewertet das Amt Pellworm sowie den Kreis Husum bzw. einen spezifischen Mitarbeiter dessen positiv und auch 3 weitere Bewohner bewerten den Kreis Husum als zuverlässigen, vertrauensvollen und wichtigen Akteur im Küstenschutz sowie auch bei dem Landunter- und Sturmflutmanagement.

Das *Gemeindebüro*, die *Gemeindevertretung* und der *Gemeinderat* werden insgesamt von 4 Bewohnern als behördliche Einrichtungen genannt: Dabei nennt ein Bewohner das Gemeindebüro als zentralen Knotenpunkt und Informationstransferstelle. Während ein weiterer Bewohner den fehlenden Einfluss der Gemeindevertretung am Beispiel der Einführung von Elastocoast als Küstenschutzmaßnahme beschreibt und kritisiert, dass die Hauptentscheidung nicht bei der Gemeindevertretung gelegen habe, erklärt ein weiterer Bewohner, dass man eine Informationstransparenz über neue Küstenschutzangelegenheiten von der Gemeindevertretung und den Ämtern vor Ort erwarte und einfordere, wenn dies nicht der Fall sei. Ein weiterer Bewohner sieht eine Gleichstellung zwischen dem LKN und dem Gemeinderat, plädiert jedoch auch für eine stärkere Zusammenarbeit zwischen dem Gemeinderat bzw. den Kolonnen im Küstenschutz und dem LKN.

[24] Siehe zu der Beschreibung des LKN als entscheidender Akteur im Küstenschutz sowie im Sturmflut- und Landuntermanagement u.a. auch das Themenfeld *Küstenschutz, Relevante Akteure im Küstenschutz*.

Das *Schulamt* wird von 2 Bewohnern genannt: Während ein Bewohner das Schulamt dahingehend kritisiert, dass dieses den Eltern keine hinreichende Unterstützung hat zukommen lassen, lobt ein anderer Bewohner den Einsatz des Schulamtes (sowie der Gemeinde und der Biosphäre) zur Einführung so genannter „Kompetenzclusterzeugnisse“ auf den Halligen, wie auf dem Festland. Erneut wird die Heterogenität im Meinungsbild der Halligbewohner deutlich.

Zu der *Naturschutzbehörde* äußern sich 2 Bewohner: Ein Interviewter beschreibt eine unterschiedliche Bezahlungsweise, die durch die untere Naturschutzbehörde eingeführt worden sei, wobei aber keine faire Bezahlung stattfände. Ein weiterer Bewohner kritisiert die starke Lobby der „Naturschutzbehörden“ sowie deren fehlendes Erfahrungswissen vor Ort.

Darüber hinaus finden sich 2 *generelle Einstellungsäußerungen zu Behörden* seitens zweier Interviewter: Ein Bewohner kritisiert die fehlende Nähe der Behörden zu den Gegebenheiten vor Ort sowie die fehlende Flexibilität und Transparenz. Das mangelnde Vertrauen in Behörden belegt dieser zudem an dem Beispiel erstellter Gutachten (u.a. seitens der „Naturschutzverbände“) im Rahmen der Erhöhung des Lorendammes. Auch ein weiterer Bewohner kritisiert die Behörden und institutionellen Akteure dahingehend, dass diese die Halligbewohner nicht berücksichtigen würden und somit kein Einfluss seitens der Bewohner bestehe.

Politische Akteure

Als ein politischer Akteur wird der *Bürgermeister* von insgesamt 15 Bewohnern genannt: Laut 12 Bewohnern ist dieser ein relevanter (politischer) Akteur in Sachen Sturmflut- und Küstenschutzmanagement, da er sich mit den Gegebenheiten vor Ort auskenne und entsprechende Erfahrungen habe. 2 weitere Bewohner geben an, dass ein enger Kontakt zwischen den Bürgermeistern der Halligen, der Biosphäre und der Landespolitik in Kiel bestehe. Ein weiterer Bewohner wünscht sich den Bürgermeister als Hauptentscheidungsinstanz bezüglich Küstenschutzmaßnahmen.[25]

Die *Landesregierung, Landesbehörde und die Landesministerien des Landes Schleswig-Holstein* werden von 5 Bewohnern genannt: Die Interviewten betonen deren Relevanz, auch hinsichtlich des Küstenschutz- und Sturmflutmanagement als Landesangelegenheit und 2 dieser Interviewten heben hervor, dass sich die Halligbewohner direkt an die Landesregierung wenden könnten.

Der Staat wird von 3 Bewohnern als politischer Akteur genannt: Ein Interviewter fordert, dass der Staat Regelungen auferlegen solle für die Fähre, die Fährverbindungen und den Fährenverkehr. Ein Bewohner kritisiert die scheinbare Enteignung des Staates seitens der Naturschutzbehörde. Ein

[25] Siehe auch hierzu u.a. auch das Themenfeld *Küstenschutz, Relevante Akteure im Küstenschutz.*

weiterer Interviewter ist dankbar um die Unterstützung, die der Staat den Projekten sowie den wissenschaftlichen Untersuchungen auf den Halligen zukommen lasse.

Als ein weiterer politischer Akteur nennt ein Interviewter den *Gesetzgeber*, der sich den Grenzen der Natur angepasst und entsprechende Regelungen zur Bewirtschaftung auferlegt habe. Ein weiterer Bewohner äußert Kritik an den *„grünen Politikern“* und Naturschutzverbänden bezüglich der Stilllegungsflächen, die diese initiiert hätten.

Bewohner allgemein

Allgemeine Informationen zu den Halligbewohnern geben insgesamt 6 Bewohner ab: Ein Bewohner sagt aus, dass die Halligbewohner generell keine Angst vor dem Wasser (und damit auch nicht vor Landunter) hätten, da man sonst dort nicht wohne. Auch ein weiterer Bewohner merkt an, dass die Halligbewohner sich sehr gut um alles selber kümmern könnten und man wisse, wo man wohne und dass nicht jede Lösung für jede Warft passend sei. Ein Bewohner merkt an, dass die jüngeren Halligbewohner nicht – so wie die älteren Bewohner – mit den Sturmflutgefahren vertraut seien, da diese weniger Erfahrungen mit diesen hätten. Ein weiterer Bewohner sagt aus, dass die Halligbewohner vor Ort viele kleinteilige Beobachtungen tätigen und dementsprechend mehr zu Rate gezogen werden sollten. Ein weiterer Bewohner bejaht, dass die Halligbewohner generell sehr naturverbunden seien. Ein Bewohner beschreibt die Hallig als „innovativsten Punkt, wie man eine Marschfläche überhaupt besiedeln kann“, da man dem Wasser keinen Widerstand leiste, sondern es fließen lasse.

Bezüglich der *Flächenbewirtschaftung der Halligbewohner* äußern sich insgesamt 5 Interviewte und beschreiben ihre eigenen Tätigkeiten zur Pflege und Instandhaltung der Flächen und Warften. Dabei heben 2 Bewohner hervor, dass die Eigentümer der Flächen nach wie vor Autonomie über ihren Grund besitzen. Ein Bewohner postuliert, dass 98 % des Halliglandes den Halligbewohnern gehören würde.

2 Bewohner äußern sich zu den *Abwanderungen und Zuzügen auf der Hallig*: Während ein Bewohner anmerkt, dass viele Bewohner von Langeneß (und auch von Hooge) auf das Festland abwandern, sieht ein weiterer Interviewter eher ein „echtes Problem“ in den neu zugezogenen Bewohnern.

Ein Bewohner sagt aus, dass nahezu jeder männlicher Bewohner einer *Tätigkeit im Küstenschutz* nachgehe und darüber hinaus die Halligbewohner untereinander über alles reden und eigene Ideen miteinander austauschen würden, sodass die besten Mittel für Lösungen gefunden werden könnten, da eine *Gemeinschaft* auf dieser Hallig bestehe. Als *allgemeine Warft-Information* gibt ein Bewohner darüber Auskunft, dass fünf Familien auf der Tadenswarft wohnen, sodass dort Kompromisse bezüglich Entscheidungen für die Warft notwendig seien.

Nachbarn und Bewohner nahegelegener Warften

Die *nachbarschaftliche Hilfe, vor allem bei bzw. nach einem Landunter*, wird von 18 Bewohnern beschrieben, wobei in diesen Aussagen insgesamt die Wichtigkeit der Nachbarschaftshilfe deutlich wird und diese auch durchweg eine positive Bewertung findet.[26]

Weitere 7 Interviewte nennen *spezifische Nachbarn und Bewohner*, die man meist um Hilfe bittet: Dabei wird der Name eines Bewohners von 3 dieser 7 Interviewten genannt und hervorgehoben, dass dieser sehr zuverlässig sei, schon lange auf der Hallig lebe und man gut zusammenarbeiten könne.[27] Darüber hinaus werden in Einzelaussagen vier weitere Bewohner benannt, die man um Hilfe auf den Halligen frage.

Wissensakteure und Ingenieure

Bezüglich des *Erfahrungswissen der Bewohner im Gegensatz und Konflikt zu ingenieursbasierten/technikbasierten Wissen* äußern sich insgesamt 6 Bewohner: 3 Bewohner plädieren dafür, dass Ingenieure mehr auf die Erfahrungen der Halligbewohner hören und diese berücksichtigen sollten. Dabei betonen 2 von diesen Interviewten, dass eine Zusammenarbeit und Vernetzung von Ingenieuren und Halligbewohnern wichtig wäre. Auch ein weiterer Interviewter äußert Kritik an einem fehlenden Einbezug und Einfluss der Halligbewohner gegenüber den Ingenieuren. Ein weiterer Bewohner betont, dass ein Einbezug der Warftbevölkerung positiv sei, aber nur in dem Maße, in dem Ingenieure beispielsweise eine Warftgestaltung wissenschaftlich befürworten. In diesem Sinne plädiert dieser Bewohner für eine Kompromissfindung zwischen den Interessen der Halligbewohner und dem Forschungswissen der Ingenieure. Ein weiterer Bewohner betont hingegen, dass der Küstenschutz nicht von Ingenieuren, sondern von Halligbewohnern bestimmt und vollzogen werden sollte, da diese über ein notwendiges Erfahrungswissen verfügen. Zudem kritisiert dieser Interviewte die fehlende Zusammenarbeit sowie die mangelnde Erfahrung der Ingenieure und der Wissenschaftler, die vom Festland auf die Hallig kommen.

Vertreter des Naturschutzes und der Biosphäre

Insgesamt äußern sich 13 Bewohner zu der *Naturschutzbehörde*, den *Nationalparkvertretern* und den *Zivildienstleistenden der „Schutzstation Wattenmeer“*, wobei 7 Bewohner die

[26] Siehe zu diesem Aspekt auch das Themenfeld *Zentrale Akteure, Bestehende und Nichtbestehende Kooperationen der Akteure*.
[27] Zur Wahrung der Anonymität der Interviewten und der Bewohner wird auf eine namentliche Nennung verzichtet.

Zivildienstleistenden, 6 Bewohner die Naturschutzbehörde und ein Bewohner die Nationalparkvertreter nennen und bewerten.[28]

Weitere 7 Bewohner nennen und bewerten die *Biosphäre allgemein* sowie deren *Vertreter*, während 4 Bewohner eine Nennung und Bewertung zu dem *Naturschutzverband* und den *Naturschutzverbänden* abgeben.

Die *Verbindung zwischen dem Nationalpark und dem LKN* wird von 2 Bewohnern genannt und beschrieben, wobei ein Interviewter erklärt, dass der Nationalpark und das LKN gegenwärtig mehr oder weniger „Hand in Hand" arbeite. Ein zweiter Bewohner beschreibt die Zusammenlegung der Ämter des Küstenschutzes und des Nationalparks und bewertet dies positiv.

Zentrale Akteure im Bereich der Landwirtschaft

Spezifische singuläre Akteure, die zentral im Bereich der Landwirtschaft sind, werden insgesamt von 4 Bewohnern genannt. Zur Wahrung der Anonymität der Interviewten und auch der Halligbewohner, soll an dieser Stelle nur hervorgehoben werden, dass die Interviewten häufig die Haltung von Pensionsvieh seitens der Landwirte auf den Halligen beschreiben und im Kontext dessen auch betonen, dass die meisten Akteure, aus ökonomischen Gründen, die Landwirtschaft nur noch zum Teilerwerb betreiben können.

Darüber hinaus beschreibt ein weiterer Bewohner die Unterstützung, die der *Bauernverband* den landwirtschaftlichen Akteuren auf den Halligen zukommen ließ.

Bestehende und Nichtbestehende Kooperationen der Akteure

Über *generelle gegenseitige Hilfeleistungen und eine allgemeine Nachbarschaftshilfe der Bewohner untereinander* äußern sich insgesamt 18 Bewohner: Dabei geben 16 Bewohner Auskunft, dass man sich immer (bislang) gegenseitig, vor allem in Not, verlässlich helfe und dies auch für jüngere Warftbewohner oder Personen gelte, mit denen man vielleicht im Alltag sonst mal Streit habe. Im Kontext dessen wird betont, dass Nachbarschaftshilfe auf den Halligen sehr wichtig und auf Langeneß auch sehr gut sei. 2 dieser Bewohner heben jedoch auch hervor, dass es auf den Zeitpunkt und die Art der erfragten Hilfeleistung ankomme. Dies bestätigt auch ein weiterer Bewohner, sodass die zu erbringende Hilfe entscheidend dafür sei, wen man um Hilfe frage und dass man zumeist diejenigen um Hilfe bitte, zu denen die Verbindung am leichtesten sei. Ein weiterer Bewohner sagt aus, dass er zunächst versuche, sich selbst zu helfen, danach aber die Nachbarn zur Hilfe habe.

[28] Dabei nennt ein Interviewter sowohl die Naturschutzbehörde, als auch die Zivildienstleistenden der „Schutzstation Wattenmeer".

Die *Hilfeleistungen für ältere Halligbewohner* beschreiben 5 der 31 Interviewten: Diese berichten von eigenen oder Hilfeleistungen anderer Personen oder auch von Küstenschutzmitarbeitern, die älteren Bewohnern helfen, vor allem nach einer Sturmflut.

Ein Bewohner berichtet über eine *Kooperation zwischen dem Nationalpark und dem LKN* und ein weiterer über die *Zusammenarbeit des LKN mit dem Gemeinderat*. Ein weiterer Bewohner bewertet die Biosphäre als eine Art Kooperations-Knotenpunkt, da sie einen Zusammenschluss der Halliggemeinden darstelle und Vertreter der jeweiligen Hallig zusammenkommen sowie Probleme gemeinsam besprechen, sodass auch eine *Kooperation der Halliggemeinden miteinander über die Biosphäre* bestehe.

2.1.5 Naturschutz

Einstellung zum Naturschutz allgemein

Der *von den Halligbewohnern eigens geleistete Naturschutz* ist ein Indiz für deren allgemeine Einstellung zum Naturschutz. Von insgesamt 5 Bewohnern, die sich zu diesem Aspekt äußern, beschreiben 3 Bewohner die eigene Naturschutzarbeit, wie die Bemühungen um eine Artenvielfalt auf den Halligen, die die Eigentümer der Landesflächen durch ihre Bewirtschaftung betreiben und bedauern, dass der ökologische Wert der Halligen nicht ausreichend wahrgenommen werde. Einer dieser Bewohner betont auch die Verantwortung der Bewohner für das Vogelschutzgebiet und ein anderer, dass die Bewohner die Natur achteten und schützten. Ein weiterer Bewohner beklagt die fehlende Anerkennung gegenüber den Halligbewohnern bezüglich der Pflege des Naturschutzgebietes. Zudem äußert dieser Ärger über die Erlaubnis von Flugzeugen und dem „Adler-Express“ in dem Naturschutzgebiet der Halligen, da da diesem Bewohner viel am Naturschutz liege. Auch ein weiterer Bewohner erklärt, dass die Halligbewohner sehr auf die Tiere achten und aktiv für die Natur agieren, ihnen dies jedoch nicht erlaubt werde.

4 Bewohner *befürworten eine Rücksichtnahme auf die Natur*: 3 dieser Bewohner plädieren für eine Rücksichtnahme auf die Brutzeiten der Vögel, was die Halligbewohner aus ihrer Sicht auch leisten, vor allem bezüglich der vorgeschriebenen Fahrzeiten der Lore und des „Auskofferns“. Einer dieser Bewohner beschreibt auch die Pflege und Unterstützung des Nestbaus seitens der Halligbewohner bzw. der Halligkinder, damit die Brutmöglichkeiten der Vögel gesichert seien. Ein weiterer Bewohner merkt an, dass die Halligbewohner generell keine negative Einstellung gegenüber dem Naturschutz hätten, jedoch häufig die Meinung bestehe, dass der Naturschutz gewisse Tätigkeiten einschränke.

3 Bewohner beschreiben eine *„Feindbild-Projizierung“ im Kontext des Naturschutzes*: Ein Bewohner beklagt die Projizierung des Naturschutzes als Feindbild, wobei sich dies ein bisschen verändert habe. Auch ein weiterer Bewohner betrachtet die Sichtweise des Naturschutzes als eine Art „Feindbild-Stilisierung“ gegen die Halligbewohner, an die der Naturschutz seine ganze Identitätsfindung hänge. Auch ein weiterer Bewohner berichtet, dass ein Teil der Menschen auf der Hallig von den Naturschutzverbänden vergrault wurde und der Nationalpark als „übergestülpt“ empfunden werde.

Naturverbundenheit

Die Naturverbundenheit der Halligbewohner wird unter anderem in den Aussagen von insgesamt 6 Bewohnern deutlich, die eine *Koexistenz von Halligbewohnern und Natur sowie ein naturschützendes Verhalten der Halligbewohner* beschreiben: 5 Bewohner sehen explizit eine Koexistenz von Natur und Halligbewohner, wovon die Existenz der Halligen, der Tiere und der Natur abhängig sei, sodass die Bewohner in einer Art Symbiose mit der Natur leben, agieren und sich an dieser orientieren. So sieht einer dieser Bewohner die Flächen des Vogelschutzgebietes ohne eine Bewirtschaftung der Halligbewohner gefährdet und äußert den Wunsch nach einer Anerkennung der Halligbewohner als Mitakteure bei dem Schutz des Vogelgebietes. Ein weiterer Bewohner beklagt ebenfalls die fehlende Anerkennung gegenüber den Halligbewohnern bezüglich der Pflege des Naturschutzgebietes und betont, dass ihm viel am Naturschutz liege.[29] Laut der Aussage eines Bewohners achten die Halligbewohner auf ihre Umwelt, sorgen für ein Gleichgewicht und haben ein Interesse daran, die Natur auf ihrer Hallig aufrecht zu erhalten

Darüber hinaus äußern 3 Bewohner *Kritik an den Naturschutzverbänden*, wobei in diesen Äußerungen die Naturverbundenheit der Halligbewohner gleichzeitig deutlich wird: Ein Bewohner kritisiert die Naturschutzvorschriften dahingehend, dass Windräder zwar verboten, aber Flugzeuge und der „Adler-Express“ erlaubt seien. Entsprechend befürwortet dieser ein Verbot des „Adler-Express“ und betont die eigene Naturverbundenheit. Ein weiterer Bewohner hebt hervor, dass sich die Halligbewohner bei ihren Entscheidungen auf die Natur verlassen und die Vorschriften des Nationalparks überflüssig seien. Ein weiterer Bewohner akzeptiert nicht jegliche Vorgaben des Naturschutzes, obwohl er sich und die Halligbewohner insgesamt als naturverbunden betrachtet.

[29] Siehe diese Aussage auch unter dem Themenkomplex *Naturschutz, Einstellung zum Naturschutz allgemein*. In dieser Interviewpassage kommt sowohl die Naturverbundenheit, als auch die Einstellung dieses Bewohners zum Naturschutz zum Ausdruck.

Gewünschtes und Ideen im Bereich des Naturschutzes der Halligen

Eine *Einbindung der Halligbewohner in Naturschutztätigkeiten* wünschen sich 3 Bewohner: Dabei schlägt ein Bewohner vor, eine Arbeitsstelle für eine professionelle Anleitung der jugendlichen Zivildienstleistenden der Schutzstation Wattenmeer – durch einen Halligbewohner –zu schaffen, um dadurch auch die tiefe Kluft zwischen den Naturschutzakteuren und Halligbewohnern zu überwinden. Zudem schlägt dieser Bewohner vor, eine Mischform aus Küstenschutz- und Ranger-Tätigkeiten zu kreieren, um eine (körperliche) Entlastung der Küstenschutzmitarbeiter zu schaffen.[30] Auch ein weiterer Bewohner äußert den Wunsch, dass Ranger- und Küstenschutz-Tätigkeiten im Wechsel ausgeübt werden können. Ein weiterer Bewohner ist ebenfalls der Meinung, dass die Halligbewohner bereit wären, Tätigkeiten im Naturschutz zu übernehmen, um so auch einen weiteren Arbeitsplatzbereich zu erhalten.

Ein Bewohner äußert den *Wunsch nach mehr Selbstbestimmung und Freiheit* bezüglich der Einschränkungen des Naturschutzes, unter anderem hinsichtlich des Fischfanges und des Strandganges. Ein weiterer Bewohner wünscht sich eine *verstärkte Transparenz seitens des Naturschutzes*. Zudem äußert dieser Bewohner den Wunsch, dass die *„Naturschutzbehörden" verstärkt mit den Halligbewohnern in einen Dialog treten* und deren Bedenken sowie Befürchtungen stärker berücksichtigen. Dies bedeutet zugleich auch eine verstärkte Transparenz.

Bewertung bzw. Positives und Kritik am Nationalpark und an der Biosphäre

Positive und kritische Äußerungen zu der *Naturschutzbehörde*, den *Nationalparkvertretern* und den *Zivildienstleistenden der „Schutzstation Wattenmeer"* finden sich bei insgesamt 13 der 31 Interviewten, wobei sich 7 Bewohner zu den Zivildienstleistenden, 6 Bewohner zu der Naturschutzbehörde und ein Bewohner zu den Nationalparkvertretern äußern.[31] Die Zivildienstleistenden der „Schutzstation Wattenmeer" werden von 5 Bewohnern kritisiert, u.a. hinsichtlich der Durchführung der Vogelbestandszählungen. Dabei glauben 2 Bewohner an eine fehlende Übereinstimmungen dieser Zählungen mit der Realität, während jedoch 2 Bewohner sowohl positive, als auch negative Erfahrungen mit den Zivildienstleistenden auf den Halligen schildern. Ein Interviewter befürchtet, dass zukünftig lediglich die Vogelbestandszählungen im Bereich des Naturschutzes von – gegenwärtig – drei bzw. vier Personen vollzogen werden und weitere Tätigkeiten außer Acht gelassen werden könnten.

3 Bewohner äußern Kritik dahingehend, dass durch die Naturschutzbehörde Baumaßnahmen im Küstenschutzbereich verhindert würden und dadurch der Küstenschutz vernachlässigt werde. Einer dieser Bewohner kritisiert dabei, dass „dem LKN die Knüppel zwischen die Beine gelegt werden",

[30] Siehe hierzu u.a. auch das Themenfeld *Küstenschutz, Neue Ideen und Vorschläge*.
[31] Siehe hierzu u.a. auch den Themenkomplex *Naturschutz, Akteure Nationalpark und Biosphäre*.

während die Zivildienstleistenden in großen Gruppen das Vorland betreten dürften. Darüber hinaus kritisiert dieser Bewohner nicht die Zivildienstleistenden, sondern deren Vorgesetzten bzw. deren Methoden des Vorgehens, da diese aus seiner Sicht einen „Wattwurm“ über ein Menschenleben stellen. 2 Bewohner kritisieren die Naturschutzbehörde hinsichtlich der Auflage, dass die Niederungen („Pötten“) nicht mehr befüllt werden dürften. Einer dieser Interviewten spricht dabei auch von einer „Enteignung“ des Staates durch die Auflagen der Naturschutzbehörde und kritisiert den optischen Zustand des Vorlandes, auf dem keine Tiere mehr grasen dürften sowie den Wegfall von Arbeitsplätzen durch Naturschutzbestimmungen. Ein weiterer Bewohner kritisiert die starke Lobby der „Naturschutzbehörden“ sowie deren fehlendes Erfahrungswissen vor Ort und wünscht sich einen verstärkten Dialog zwischen diesen mit den Halligbewohnern.

Ein weiterer Bewohner kritisiert das (aus seiner Sicht) zu hohe Ansehen der Naturschützer sowie der Nationalparkvertreter.

Positives und Kritik an den Vertretern der Biosphäre sowie an der Biosphäre allgemein wird von 7 Bewohnern geäußert: 2 Bewohner kritisieren, dass die Biosphäre zu weit weg vom Geschehen auf den Halligen sei und keine tatsächliche Lobby für die Halligen darstelle, wobei einer dieser Bewohner auch einen spezifischen Vertreter der Biosphäre sowie den einseitigen Informationsfluss über und auf der Hallig kritisiert. Auch ein weiterer Bewohner kritisiert eine Vertreterin der Biosphäre und fühlt sich von dieser nicht als Halligbewohner vertreten. Darüber hinaus kritisiert dieser Bewohner die Biosphäre bzw. deren mangelnde Unterstützung, auch hinsichtlich der Elternschaft im Bildungsbereich. Weiterhin betrachtet dieser Bewohner die Biosphäre dahingehend negativ, dass diese nicht das transportiert, was den Halligbewohnern wichtig sei und eine zu schwache Durchsetzungskraft aufweise. Ein Bewohner kritisiert die Auflagen hinsichtlich des Fischfangs, sodass ehemalige Handlungsweisen – mit dem Gründen der Biosphäre – den Halligbewohnern untersagt worden seien. Jedoch bewertet dieser Bewohner die Biosphäre dahingehend positiv, dass über diese Informationen an die Landesbehörde weitergeleitet würden. Auch ein weiterer Bewohner äußert einerseits Kritik an der Biosphäre, dass diese sich aus wichtigen Themen heraushalte und merkt andererseits positiv an, dass die Biosphäre versuche die Interessen der Halligbewohner zu vertreten und schlussendlich die Halligbewohner („Wir“) darstelle. So identifiziert dieser Bewohner auch einen Mehrwert durch die Biosphäre, die Themen zwar behandele, jedoch nicht beeinflussen könne. Ein Bewohner bewertet die Biosphäre dahingehend positiv, dass diese ein Informationspodium darstelle. Auch ein weiterer Bewohner bewertet positiv, dass sich die Biosphäre unter anderem für die Einführung von „Kompetenzclusterzeugnissen“ (spezifische Zeugnisbewertungen) auf den Halligen eingesetzt habe.

Kritik an dem Naturschutzverband bzw. an den Naturschutzverbänden äußern 4 Bewohner: 2 Bewohner kritisieren die Naturschutzverbände sowie die WWF-Schutzstation dahingehend, dass

sie die Halligen als Werbeplattform nutzen, jedoch keine sonstigen Aktivitäten zeigen würden und von den Lobbyverbänden des Naturschutzes mittlerweile eine enorme Macht ausgehe. Ein weiterer Interviewter kritisiert die Naturschutzverbände und „grünen Politiker“ dahingehend, dass aufgrund der Stilllegungsflächen und des Vorlandes das halligtypische Erscheinungsbild verloren gehe. Ein weiterer Bewohner kritisiert die Naturschutzverbände dahingehend, dass Elastocoast und tiefliegende Flugzeuge, aber im Gegensatz dazu keine Windräder auf den Halligen geduldet und sich die Naturschutzverbände aus diesen Themen heraushalten würden.

Eine Bewertung bezüglich des *Nationalparks allgemein* geben insgesamt 3 Interviewte ab: Ein Bewohner beschreibt, dass der Nationalpark und das LKN mehr oder weniger gegenwärtig zusammen bzw. „Hand in Hand“ arbeiten würden. Ein weiterer Bewohner bewertet die Zusammenlegung der Ämter des Küstenschutzes und des Nationalparks in eine Person positiv, da der zuständige Akteur sich für die Halligbewohner einsetze.[32] Ein weiterer Bewohner beschreibt die vom Nationalpark gewollten Bewirtschaftungsformen und kritisiert unter anderem die Stilllegungsflächen, die das Erscheinungsbild der Halligen verschlechtern würden sowie eine Priorisierung der Gänse vor den Landwirten.

Vereinbarkeit von Naturschutz, Küstenschutz und Halligen-Leben

Im Kontext des Zusammenhanges von Küstenschutz und Naturschutz beschreiben insgesamt 16 Bewohner *Einschränkungen der Küstenschutzarbeit durch Naturschutzvorgaben*, eine gewisse *Unvereinbarkeit von Küstenschutz und Naturschutz bzw. Biosphärenreservat* beschreiben 3 Bewohnern. Bezüglich der Küstenschutzmaßnahme Elastocoast und hinsichtlich der Befürwortung von 3 weiteren Bewohnern – Küstenschutz- und Naturschutztätigkeiten zusammenzulegen bzw. hier eine verstärkte Zusammenarbeit zu forcieren – wird ein *positiver Zusammenhang zwischen Küstenschutz und Naturschutz* deutlich.[33]

Einschränkungen der Halligbewohner durch den Naturschutz bzw. Naturschutzrichtlinien beschreiben 15 Bewohner: Dabei kritisieren 9 Bewohner, dass der Naturschutz die Tätigkeiten der Halligbewohner einschränke, wie das ehemalige gewohnte freie Angeln, Jagen, das Einsammeln von Möweneiern, das Betreten des Vorlandes, die Viehhaltung, Bepflanzung etc. Einer dieser Bewohner ist der Meinung, dass das Leben der Vögel vor das Menschenleben gestellt werde und die Halligbewohner nicht hinreichend berücksichtigt sowie ernstgenommen werden. Zudem beschreibt einer dieser Bewohner diese Naturschutzeinschränkungen als „Entmündigung“ und erklärt, dass eine Hallig und Naturschutz nicht zusammen passen würden, die Bewohner aber dennoch einen eigenen Naturschutz betreiben.

[32] Siehe hierzu u.a. auch das Themenfeld *Naturschutz, Akteure Nationalpark und Biosphäre*.
[33] Für eine ausführliche Darstellung dieser Aspekte siehe den Themenkomplex *Küstenschutz, Küstenschutzmaßnahmen im positiven oder negativen Zusammenhang zum Naturschutz*.

Aus der Sicht 2 weiterer Bewohner geht das halligtypische Erscheinungsbild, u.a. durch Stilllegungsflächen, verloren, obwohl dieses die meisten Halligbewohner erhalten wollten.

Einen Einflussverlust der Halligbewohner durch den Naturschutz, hinsichtlich gemeinsamer Entscheidungen im Küstenschutzbereich mit dem LKN, beschreibt ein weiterer Bewohner. Ein weiterer Bewohner merkt an, dass der Schutz des Menschenlebens auf den Halligen nicht den Naturschutz, oder umgekehrt, ausschließe und sie nicht verstehen könne, dass keine Harmonie zu den Naturschutzakteuren entsteht.

Ein weiterer Bewohner betrachtet die Sichtweise des Naturschutzes als eine Art „Feindbild-Stilisierung“ gegen die Halligbewohner, an die der Naturschutz seine ganze Identitätsfindung hänge. Auch ein weiterer Interviewter beklagt die Projizierung des Naturschutzes als Feindbild, wobei sich dies aus seiner Sicht ein bisschen verändert habe.

Vereinbarkeit von Naturschutz und Landwirtschaft

Ein relevanter Aspekt zur Beschreibung einer Vereinbarkeit von Naturschutz und Landwirtschaft wird von insgesamt 13 Bewohnern angesprochen: Die *Problematik im landwirtschaftlichen Bereich sowie in der Viehhaltung aufgrund von Naturschutzauflagen hinsichtlich des Vogelschutzes, des Brachlandes und der Stilllegungsflächen*. Dabei kritisieren 5 Bewohner die Einschränkungen in der Vieh-Haltung aufgrund von Naturschutzauflagen, u.a. hinsichtlich untersagter Zonen für das Vieh zu Gunsten des Vogelschutzes. 2 dieser Bewohner äußern darüber hinaus dahingehend Kritik, dass durch die komplette Stilllegung der Flächen nicht nur die Landwirtschaft der Hallig leide, sondern auch die Vogelwelt. Zudem geben 2 weitere Bewohner an, dass die eigene Tierhaltung aufgrund dieser Einschränkungen aufgegeben wurde. Weitere 2 Bewohner äußern dahingehend Kritik, dass die Niederungen („Pötten“) nicht mehr befüllt werden dürfen, dass der Kleiboden nicht mehr in die Ländereien gefahren sowie planiert werden dürfe und Zeiten für die Viehhaltung festgelegt seien. 2 weitere Bewohner kritisieren die Auflage des Naturschutzes, einerseits Landteile brachliegen zu lassen und andererseits Vorgaben bezüglich des Mähens sowie der Pflege der Landesflächen erfüllen zu müssen. 2 weitere Bewohner kritisieren, dass die Stilllegungsflächen das halligtypische Erscheinungsbild verschlechtern und dass die Gänse eine Priorisierung gegenüber den Landwirten erfahren.

Eine Vereinbarkeit von einem selbstinitiierten Naturschutz mit der Landwirtschaft wird anhand der Aussagen von 6 Bewohnern deutlich, die den *geleisteten Naturschutz durch die Flächenbewirtschaftung der Halligbewohner* beschreiben: 2 dieser Interviewten betonen die eigenen Bemühungen um eine Artenvielfalt auf den Halligen sowie die Rücksichtnahme auf die Natur bei dem Mähen der Wiesen, sodass die landwirtschaftlichen Tätigkeiten der Natur und der Tierwelt zugutekämen. Dies wird vor allem an dem Beispiel einer Regulierung der Gras-Höhe

durch die Hallig-Landwirte verdeutlicht, die eine Nische für bestimmte Vogelarten ermögliche. Auch 2 weitere Bewohner betonen, dass durch die Bewirtschaftung der Flächen seitens der Halligbewohner die Natur sowie die Halligen überhaupt derzeit noch existieren und die Bewohner die Natur achten und schützen würden. Einer dieser Interviewten sowie ein weiterer Bewohner beklagen die fehlende Anerkennung der Halligbewohner bezüglich der Bewirtschaftung und Pflege des Naturschutzgebietes. Auch ein weiterer Bewohner beklagt die geringen finanziellen Zuschüsse, da die Halligbewohner ihre Fläche derartig gut bewirtschaftet bzw. erhalten hätten und man damit „hier schon bei der Natur ist".

3 weitere Bewohner beschreiben auch einen *Einklang zwischen Landwirtschaft und Natur* bzw. zwischen *Wirtschaftlichkeit und Ökologie*: Im Kontext dessen kritisieren 2 Bewohner die höheren Flächen-Bezuschussungen auf dem Festland und die ökologische Unterbezuschussung der Halligen sowie die alleinige Fokussierung auf den reinen Wirtschaftswert. Ein Bewohner vertritt die Meinung, dass ein Einklang zwischen den Landwirten und der Natur auf den Halligen bestehe und dieses Zusammenspiel funktioniere bzw. auch schon in der Vergangenheit funktioniert habe.

Vereinbarkeit von Naturschutz und Tourismus

Die Bewertung zweier Interviewten der *touristischen Tätigkeiten der Zivildienstleistenden* der Schutzstation Wattenmeer ist im Kontext einer Vereinbarkeit von Naturschutz und Tourismus zu betrachten: Während ein Bewohner die touristischen Tätigkeiten der Zivildienstleistenden auf den Halligen sowie den Veranstaltungskalender derer positiv bewertet, äußert ein weiterer Bewohner den Wunsch, Touristen mehr Einblick in die Hallig-Welt zu gewähren und dies durch einen Tourismusbetreuer, der auf der Hallig groß geworden ist, weil dieser authentischer sei. Zudem sieht dieser eine tiefe Kluft zwischen den Naturschützern und dem touristischen Bereich der Halligbewohner: „[…] Die Leute, die hier groß geworden sind, die finde ich dafür auch klasse als Tourismusbetreuer. Aber da gibt es eine tiefe Kluft zu den Naturschützern. […]"

2.1.6 Landwirtschaft

Geschichte der Landwirtschaft auf den Halligen

Die Entwicklung der Landwirtschaft auf den Halligen lässt sich unter anderem anhand der *Veränderungen in der Viehhaltung* beschreiben, zu der sich insgesamt 9 Bewohner äußern: Dabei beschreiben 5 Bewohner den Rückgang der eigenen Tierhaltung und die Zunahme des Pensionsvieh, das jedes Jahr wechsele sowie auch den Wandel der Tierhaltung von Rind- zu Schafhaltung. Weitere 2 Bewohner erklären, dass die Flächennutzung für die Tiere verstärkt

verboten werde, dieses Land brach liege und von Vögeln genutzt werde. Ein weiterer Bewohner sagt aus, dass sich auch die Schafhaltung nicht mehr lohne und ein weiterer Bewohner gibt Auskunft über seinen eigenen Viehbestand, bestehend aus fünf eigenen Kühen und vier eigenen Pferden.

Auch das *Halligprogramm* hat einen wesentlichen Einfluss auf den landwirtschaftlichen Bereich auf den Halligen und wird von 3 Bewohnern beschrieben: Alle drei erklären, dass man sich im Rahmen dieses Programmes unterschiedlich entscheiden könne, wie man das eigene Land nutze: Brach- bzw. Stilllegen der Fläche und Erhalt von Zuschüssen, Mähen der Flächen für weniger Zuschüsse oder eine intensive Eigenutzung.

Ein weiteres Merkmal zur Beschreibung der Geschichte der Landwirtschaft auf Langeneß ist die *Milchproduktion der 1960er Jahre*, die von 2 Bewohnern erläutert wird: Ein Bewohner beschreibt einen starken Rückgang der Milchviehhaltung bzw. der Landwirtschaft, aufgrund der Milchquote. Bei einem weiteren Bewohner findet sich eine ausführliche Beschreibung, beginnend bei der Flut von 1962, nach der es zu einer Zunahme an der Kuhhaltung kam und der Bestand sich fast verdoppelt habe. Folglich sei es zu einer größeren Milchproduktion gekommen, für die die entsprechenden Verarbeitungsmöglichkeiten erweitert werden mussten. Außerdem beschreibt dieser Interviewte, dass sich manche Landwirte der Meierei am Festland angeschlossen haben und einmal die Woche diese mit vorher eingefrorener Sahne beliefert haben, was sich wirtschaftlich rentiert habe. Die Milchproduktion auf der Hallig unterscheide sich laut dieses Halligbewohners von der Produktion auf dem Festland, da die Kühe nicht mit Kraftfutter gefüttert werden und dementsprechend die Milchleistung der Kühe natürlich bleibe (Hallig: 2.500 Liter pro Kuh im Jahr/ Festland das Vierfache). Darüber hinaus erklärt dieser Interviewte, dass es durch EU-Richtlinien zu billigen Preisen in der Milchproduktion gekommen sei und somit sich die Milchproduktion auf der Hallig aufgrund des hohen Arbeitsaufwandes nicht mehr lohne. Weiterhin beschreibt der Interviewte, dass aufgrund hoher Konkurrenz, billigere Preise und EU-Richtlinien sich die Milchproduktion auf der Hallig von der betrieblichen auf die private Ebene wandelte. Hinzu kam die Einführung der Milchquote. Diese Faktoren bewirkten seiner Ansicht nach, dass kleinere Betriebe ihre Landwirtschaft aufgegeben haben und zu Tätigkeiten im Küstenschutz wechselten. In Konsequenz dessen sei lediglich ein Milchviehhaltungs-Betrieb auf den Halligen verblieben. Dieser Interviewte betrachtet das entstandene Verbot, eingefrorene Sahne zu liefern, als „Tod für die Milchwirtschaft“ auf den Halligen, da Frischware zu liefern aufgrund der mangelnden Verbindung zum Festland kaum möglich sei. Laut dieses Interviewten scheiterte der Versuch, eine Sonderkondition zu errichten, um die negativen Auswirkungen der Milchquote aufzufangen. Des Weiteren beschreibt dieser Interviewte den Versuch, Beihilfe bzw. Förderprogramme für die Landwirtschaft mit benachteiligten Gebieten zu organisieren. Insgesamt resümiert dieser Bewohner einen starken Rückgang der Milchviehhaltung bzw. der Landwirtschaft, aufgrund der Milchquote.

Das *Allmende-Prinzip* stellt einen weiteren Bestandteil in der Geschichte der Landwirtschaft auf den Halligen dar: Ein Bewohner beschreibt das ehemalige Allmende-Prinzip auf der Hallig und bewertet dieses positiv, als ordnungsschaffend. Auch ein weiterer Bewohner beschreibt das ehemalige Allmende-Prinzip, betrachtet es jedoch eher als positiv, dass nun die Flächen in Privatbesitz übergegangen sind und man sich dementsprechend besser darum kümmern könne. Erneut wird ein divergentes Meinungsbild deutlich.

Bestehende Schwächen in der Landwirtschaft

3 Bewohner kritisieren die *höhere Flächen-Bezuschussung auf dem Festland*, die *ökologische Unterbezuschussung* der Halligen sowie die alleinige Fokussierung auf den reinen Wirtschaftswert, der auf den Halligen geringer ausfalle, da man die Hallig nur ein halbes Jahr aufgrund von Landunter bewirtschaften könne.

Kritik an der Stilllegung der Flächen äußern 3 weitere Bewohner, da dies unter anderem den Zustand des Bodens verschlechtere, das Bild der Halligen zum „Hallig-untypischen" verändere und zu wenig Raum für eine Selbstbestimmung bleibe.

Ein weiterer Bewohner kritisiert, dass *Fethinge unter Denkmalschutz* gesetzt wurden und die Halligbewohner diese nicht mehr nutzen dürften, um beispielsweise Tiere zu tränken oder Blumen einzupflanzen, sondern nur noch die Pflege der Fethinge den Halligbewohnern obliege.

Gewünschtes und Ideen im Bereich der Landwirtschaft

Ein Bewohner äußert den Vorschlag, den Halligbauern wieder mehr Selbstbestimmung zu geben sowie die starren terminlichen Vorgaben des Programmes zu flexibilisieren. Höhere bzw. mehr Zuschüsse im Rahmen des Halligprogramms fordert ein weiterer Bewohner. Ein weiterer Bewohner äußert den Vorschlag, die Flächen auf den Halligen als Ausgleichsflächen für Windenergie zu verkaufen. Dieser Vorschlag steht im Kontext der Kritik dieses Bewohners, dass die Halligbewohner immer mehr die Entscheidungsgewalt über ihre Flächen verlören.

2.1.7 Tourismus

Entwicklung des Tourismus auf den Halligen

Der Ausbau des Tourismus auf den Halligen steht teilweise in Verbindung zur *Finanzierung von Eigentum* sowie zum *Aufbau eines zweiten Standbeines im Einkommensbereich*, so die Beschreibung von 5 Bewohnern: 2 Bewohner erklären, dass einige Halligbewohner die Vermietung von Zimmern und Wohnungen für Touristen als weitere Möglichkeit nutzen, um Geld zu verdienen, da das eigene Einkommen bei vielen in den letzten Jahren reduziert wurde. Ein Bewohner betrachtet den Schritt in Richtung Tourismus als Notlösung, die den Halligbewohnern nicht ganz willkommen war. Ein Bewohner beschreibt, dass nach dem Kauf des eigenen Hauses eine gewisse Anzahl an Übernachtungen im Jahr zu realisieren sei, um durch den Tourismus auch die Finanzierung des Eigenheims zu gewährleisten. Ein Bewohner berichtet von einem nötigen Umbau der Ställe für die Gäste, da die Tierhaltung sich ökonomisch nicht bewährt habe.

Die Entwicklung des Tourismus auf den Halligen wird unter anderem auch anhand der Aussage eines Bewohners deutlich: Dieser beschreibt die *Zunahme an Ferienwohnungen* ab 1978/1979, da es zuvor nur Gästezimmer gegeben habe und erklärt die *Zuschüsse* für den Ausbau des Tourismusbereichs.

Gewünschtes und Ideen im Bereich des Tourismus

Explizit werden von 2 Bewohnern Ideen und Wünsche im Tourismusbereich hervorgebracht: Dabei betont ein Bewohner, dass weitere Fähr-Verbindungen bzw. *Sonderverbindungen für die Gäste* – vor allem zur Weihnachtszeit – erwünscht seien. Ein Bewohner äußert den Wunsch, den *Urlaubern mehr Einblick in die Halligwelt zu gewähren* sowie einen Tourismusbetreuer zu installieren, der auf der Hallig groß geworden ist, um authentisch die Halligenwelt zu erklären.

2.1.8 Kulturelle Traditionen

Da hinsichtlich der kulturellen Besonderheiten und Gegebenheiten auf den Halligen ebenfalls Aussagen getroffen wurden und diese sich nicht den bereits beschriebenen Bereichen zuordnen lassen, sind diese Interviewpassagen im Folgenden zusammengefasst, um eine Vollständigkeit zu gewährleisten.

Bezüglich der kulturellen Traditionen in der *Berufs- und Schulausbildung* sowie in der *elterlichen Erziehung* merkt ein Interviewter an, dass die Geschichte der Halligen in der Schule ausreichend

unterrichtet wurde. Ein weiterer Interviewter beschreibt in diesem Kontext die ehemaligen geschlechtsspezifischen Unterschiede bei der Berufsausbildung und -ausübung, sodass Frauen vornehmlich die Rolle der Hausfrau einnahmen.

2 Bewohner äußern sich zu den *Freizeitbeschäftigungen* im Rahmen der kulturellen Traditionen, wobei ein Bewohner die Spiele beschreibt, die in der Vergangenheit zur Beschäftigung gemeinsam gespielt wurden und ein Bewohner beklagt, dass durch das Fernsehen die Geselligkeit und Spielkultur reduziert worden sei.

Ein Bewohner beschreibt eine *Veränderung der kulturellen Traditionen* nach der Sturmflut von 1962 und eine Fokusverschiebung der Bewohner auf eine eigene Wohnraumverbesserung: „[…] Die ganze Tradition hat sich verändert. Jeder wollte ein schöneres Haus als der andere, jeder bekam Zuschüsse und so was und konnte sich das erlauben. Die Schäden waren eigentlich viel größer und was eigentlich nicht wichtig war. Man muss das passende Fenster haben."

Ein Bewohner hebt die *Bedeutung der kulturellen Geschichte* der Halligen hervor und betont, dass die Halligbewohner auf Langeneß insgesamt sehr viel Wert auf ihre kulturelle Geschichte legen: „Auf Langeneß machen wir das wirklich für alle und für alle Halligen. Wir legen Wert auf unsere gesamte kulturelle Geschichte, auf unser gesamtes Leben. Auf Hooge ist es genau andersrum."

Eine weiterer Bewohner beschreibt *sprachliche Veränderungen* – von „Platt" zu Hochdeutsch – sowie die Flüchtlingsaufnahme auf den Halligen im und nach dem zweiten Weltkrieg: „Hier waren ja mehr Flüchtlinge wie Einheimische. Und diese sprachen deutsch. Und so ist die deutsche Sprache hier her gekommen."

2.2 Hooge

Auf Hooge, mit einer Fläche von 574 Hektar, leben 103 Einwohner in 70 Haushalten auf den folgenden zehn Warften: Backenswarft, Hanswarft, Ipkenswarft, Kirchwarft, Lorenzwarft, Mitteltritt, Ockelützwarft, Ockenswarft, Volkertswarft und Westerwarft.[34] Von den 103 Einwohnern sind 95 Erwachsene und 8 Kinder.[35] Seitens der soziologischen Begleitforschung wurden 32 Hoogebewohner interviewt.

2.2.1 Küstenschutz

Informationsfluss

Zu dem *bestehenden Informationstransfer* über zukünftige Küstenschutzmaßnahmen äußern sich 25 Bewohner. Dabei berichten 8 Bewohner von einem fehlenden Diskurs, Exklusion der Halligbewohner und der fehlenden Instanzen, bei denen man sich Rat einholen oder informieren könnte. 2 Bewohner merken explizit an, dass die Teilnahme der Halligbevölkerung an den Gemeinderatsitzungen und Bürgerversammlungen in der letzten Zeit abgenommen habe: „[Halligbewohner] sind da ein bisschen träge geworden." Die Halligbevölkerung informiere sich laut einem Bewohner „auf gut Glück" durch Gespräche mit Nachbarn. Im Kontext der Exklusion der Halligbewohner wird von 5 Bewohnern besonders kritisiert, dass der Expertise, den Erfahrungen und Beobachtungen der Halligbewohner keine Beachtung geschenkt wird, wodurch sie sich nicht ernstgenommen fühlen. Es werden außerdem von 2 Bewohnern Beispiele berichtet, die verdeutlichen, dass durch die Exklusion der Halligbewohner es schon zu Fehentscheidungen im Küstenschutz gekommen sei. Von 3 Bewohnern wird ausdrücklich der Wunsch nach mehr Informationen und Informationsveranstaltungen über infrastrukturellen Küstenschutz geäußert.

19 Bewohner geben an, dass sie sich über neue Küstenschutzmaßnahmen durch bestimmte Personen, Gruppen oder Behörden informieren. Dabei weisen 11 Bewohner bei dem Erfahrungsaustausch auf die wichtige Rolle der Nachbarschaft, Warft- und Halligbewohner hin. Ein Interviewpartner betont, dass vor allem die alteingesessenen Halligbewohner aufgrund ihrer Erfahrung vertrauenswürdig seien. Von einem Bewohner wird der Wunsch nach einer stärkeren Teilnahme der Halligbewohner an den *Gemeinderatssitzungen und Bürgerversammlungen* geäußert. Die beiden Veranstaltungen werden von insgesamt 11 Bewohnern als bedeutende Informationsinstanzen genannt.

[34] Vgl.: Hallig Hooge, im Internet unter: http://hooge.de/content/lp_die-hallig.html, Letzter Abruf: 07.01.2014.
[35] Angaben entsprechend einer telefonischen Auskunft des Amt Pellworm, Stand: 01.04.2014.

4 Bewohner verweisen explizit auf das *LKN*. 3 Bewohner verweisen auf die *Küstenschutzmitarbeiter* von der Hallig. 2 Interviewpartner berichten über den Informationsfluss durch die *Verwandtschaft*, bei dem der enge, private Kreis als Erstes angesprochen werde. In diesem Kontext wird von 5 Bewohnern die *Gemeinde* genannt. Dabei betonen 2 der Bewohner, dass der Informationsfluss durch die Gemeinde lückenhaft sei und er ohne Eigeninitiative nur bedingt möglich sei. Die *Eigeninitiative* wird allgemein von 5 Bewohnern als Vorrausetzung für den optimalen Informationsfluss bzw. Informationsbeschaffung gesehen. In diesem Kontext bewertet ein Bewohner die Informationspolitik des Bürgermeisters als negativ, weil die Halligbewohner selbst die Informationen bei den Bürgerversammlungen oder Gemeinderatsitzungen abholen müssten. Dabei wird der Informationsfluss über das Rundschreiben besonders befürwortet und Selbstabholungsprinzip kritisiert. 4 Bewohner beschreiben außerdem einen *Informationstransfer durch Medien wie Radio, Internet, Fernseher und Zeitungen.*

Expertenwissen und Rückgriff auf (wissenschaftliche) Erkenntnisse

Eine *Zusammenarbeit mit Experten* sei laut den Aussagen von 3 Bewohnern nur möglich, wenn die Halligbewohner ernstgenommen und miteinbezogen würden.

Bezüglich eines Rückgriffs auf wissenschaftliche Erkenntnisse wird von 2 Bewohnern die *Notwendigkeit von Vertrauen und Glaubwürdigkeit* der Experten betont, wenn über Küstenschutzmaßnahmen entschieden werde und ein weiterer Bewohner äußert in diesem Zusammenhang sein Vertrauen gegenüber der Umsetzung des derzeitigen Küstenschutz – im Hinblick auf Umwelt- und Naturverträglichkeit – durch Experten.

Jedoch äußern weitere 3 Bewohner ihr *Misstrauen gegenüber Experten und Expertenwissen*, unter anderem aufgrund entstandener Schäden im Zuge der letzten Warfterhöhungen, die durch eine Kooperation mit den Halligbewohnern hätten vermieden werden können. Allerdings betonten 2 dieser Bewohner, dass derartige Missstände durch eine Kooperation und einen Einbezug des Erfahrungswissens der Halligbewohner verhindert werden könnten.

Ein Bewohner hebt die Bedeutung einer *Simulation von Küstenschutzmaßnahmen* hervor und dass Fachleute in diesem Kontext „auf die Hallig“ gebracht werden sollten. Ein weiterer Bewohner beschreibt wissenschaftliche Erkenntnisse in ihrer Entwicklung am Beispiel der ehemaligen Experten bezüglich der Deiche, die so genannten *Deichgrafen*.

Bisherige Maßnahmen im Küstenschutz und Bewertung derer

Zu den *Lahnungen* äußern sich insgesamt 18 Bewohner: Insgesamt werten 7 dieser Bewohner die Lahnungen als traditionelle Küstenschutzmaßnahmen allgemein als wichtig und passend zu den

Halligen und heben deren Priorität sowie die eigene Zufriedenheit mit diesen hervor. 2 weitere Bewohner priorisieren Buschlahnungen, da diese aufgrund eigener Erfahrungen effektiver seien. Für einen weiteren Bewohner sind Buschlahnungen, ohne der Funktion Land zu gewinnen, jedoch unwichtig. 2 Bewohner heben die Bedeutung der Holzlahnungen hervor und betonen deren Wichtigkeit zum Schutz vor einem Abbrechen der Halligkante. Auch ein weiterer Bewohner betrachtet Holzlahnungen als existentiell, jedoch vor allem aufgrund ihrer Bedeutung für die Landgewinnung. Auch ein weiterer Bewohner hebt die Bedeutung der Holzlahnungen hervor, um „überhaupt Land zu behalten“. Dabei sollten aus seiner Sicht die Holzlahnungen ausschließlich dort eingesetzt werden, wo eine Landgewinnung erzielt werden könne und nicht an Stellen, an denen das Wasser über einen Meter ansteige. Ein weiterer Bewohner betont die Wichtigkeit der Holz- und Steinlahnungen, da diese die Strömungsverhältnisse positiv beeinflussten und regulierten. Jedoch müsste seiner Ansicht nach hier auch über neue Konzepte nachgedacht werden. Ein weiterer Bewohner hebt speziell die Relevanz der Steinlahnungen hervor, merkt jedoch auch kritisch gegen die Holz- und Buschlahnungen an, dass diese sehr pflegeaufwendig und kostspielig seien, vor allem in Relation zu einem geringen Nutzenfaktor. Auch ein weiterer Bewohner hebt speziell die Steinlahnungen als wichtig und existenziell in ihrer Wellenbrecher-Funktion hervor und betrachtet auch die Buschlahnungen als weniger effektiv, jedoch in „einigen Teilen der Hallig ausreichend.“ Ein weiterer Bewohner betont, dass traditionelle Küstenschutzmaßnahmen, wie auch Lahnungen, ständig erneuert und gepflegt würden und dies auch gut funktioniere.

Zu der *Bauweise der Warften*, den *Aufwarftungen* und den *Warfterhöhungen* äußern sich insgesamt 14 Bewohner: 2 Bewohner beschreiben wertungsfrei die letzten Warfterhöhungen und Warftaufschüttungen und 2 weitere Bewohner geben an, mit dem Bau der Warften und der Aufwarftung zufrieden zu sein. Jedoch merkt einer dieser Bewohner auch an, keine Langzeiterfahrungen zu haben und dementsprechend die Folgen langfristig nicht einschätzen zu können. Ein weiterer Bewohner nennt die „beste Aufwarftung“ auf der Ipkenswarft. Ein weiterer Interviewter sieht die „Landerhöhung“ hinsichtlich der Warften als Kompensation für einen direkten Küstenschutz am Hause, wie in Form der Schotten. Ein weiterer Befragter gibt Auskunft, dass Restriktionen zum Warftschutz vorlägen, wie das Verbot, auf bestimmten Flächen eine Bepflanzung vorzunehmen. Jedoch äußern 7 Bewohner auch explizit Kritik: Ein Befragter sieht die Problematik der Aufwarftung dahingehend, dass diese den Sehhorizont verdrängt habe, während ein weiterer Bewohner gerade diesen Fokus einiger Bewohner auf den Erhalt des Sehhorizonts bei der Aufwarftung kritisiert. Ein anderer Befragter hebt die Problematik hervor, dass bei der Aufwarftung nicht angemessen mit dem Boden umgegangen worden sei und nun die Häuser instabil wären. Dabei seien stets höhere Warften gewünscht worden, doch dies habe keine Berücksichtigung gefunden. Auch mit dem Gefälle und der Neigung sei man nicht zufrieden und zudem seien die Erfahrungen der Halligbewohner nicht mit eingeflossen. Ein Bewohner kritisiert

vor allem die Planung des Warftbaus sowie der Warftaufschüttung und bemängelt, dass die jeweilige Höhe nicht nach Bedarf angepasst worden sei. Auch dieser Bewohner merkt kritisch an, dass die Warftverstärkung über die Köpfe der Halligbewohner hinweg entschieden worden wäre. Ein anderer Befragter kritisiert die unintendierten Nebenwirkungen, die die Warfterhöhung aufgrund der Materialentnahme aus dem Wattenmeer mit sich gebracht habe. Ein weiterer Bewohner äußert speziell Kritik an der Aufwarftung der Volkertswarft und Mitteltritt, da hier gravierende Probleme erzeugt worden wären, wie Löcher im Boden durch den verwendeten Kleiboden aus dem Watt. Ein Bewohner äußert den Wunsch nach einer Warftabflachung und kritisiert den derzeitigen Stand auf der Nordseite.

Zu *Sommer- und Ringdeichen* als bisherige Küstenschutzmaßnahmen äußern sich insgesamt 11 Bewohner: Dabei bewerten 2 Bewohner sowohl den Sommerdeich, als auch den Ringdeich als hilfreich und sehr wichtig. Einer dieser Befragten hebt die Notwendigkeit einer Optimierung dieser Küstenschutzmaßnahmen nach einer Katastrophe hervor. 4 Bewohner betrachten spezifisch den Sommerdeich als passend, notwendig und wichtig. Einer dieser Bewohner hebt hervor, dass der Sommerdeich nicht erhöht werden dürfe, da dies zu erheblichen Zerstörungen an dem Deich führen würde. Auch ein weiterer Bewohner führt aus, dass keine Sommerdeich-Erhöhung stattfinden sollte, da das Landunter auch halligspezifisch sei und es auch bleiben solle. Auch ein weiterer Bewohner betont die Wichtigkeit des Sommerdeiches, jedoch vor allem für das Vieh, denn ohne diesen müsse man das Vieh häufiger hochholen und man hätte ein Platzproblem, da gar nicht so viele Stallungen vorhanden seien, um es vernünftig zu bergen. Ein Befragter erachtet Deiche allgemein jedoch als nicht notwendig, solange nur das Umland überflutet werde und priorisiert eher einen Warftschutz. 2 Bewohner betonen spezifisch die Wichtigkeit des Ringdeiches und stellen heraus, dass man sich mit diesem sicher fühle.

Zu dem *Igel* als Küstenschutzmaßnahme äußern sich 7 Bewohner: Dabei sprechen 6 Bewohner ihre Zufriedenheit mit dem Igel aus und betonen die Wichtigkeit dessen zum Abbremsen des Wassers. Einer dieser Interviewten stellt dabei heraus, dass die Igel und auch Lahnungen ständig erneuert und gepflegt würden. Ein weiterer Bewohner gibt an, dass das Material für den Igel nicht auf der Hallig gelagert, sondern erst mit einem Schiff herangeholt werde. Dies verdeutlicht er am Beispiel der letzten Erneuerung des Igels und hebt im Kontext dessen hervor, dass es so auch gut funktioniere.

Zu den *Schotten* bzw. der *Verschottung* äußern sich insgesamt 6 der befragten Bewohner: Dabei nennen 3 Bewohner die Schotten als wesentliche und existentielle infrastrukturelle Schutzmaßnahme, die lebenswichtig sei. Jedoch merkt einer dieser Bewohner an, dass eine Verschottung nicht mehr notwendig sei, wenn es geeignete Maßnahmen auf der Warftebene gebe und betont kritisch, dass Schotten nicht überall vorhanden seien, vor allem nicht bei erneuerten Häusern. Für einen weiteren Bewohner sind Schotten zwar wichtig, aber nicht sehr wichtig, da

diese durch die letzte Aufwarftung nicht mehr notwendig geworden seien. Auch dieser Bewohner hebt hervor, dass durch bauliche Maßnahmen an der Warft infrastrukturelle Küstenschutzmaßnahmen am Haus weniger relevant seien. Ein weiterer Interviewter verlangt, dass eine „Verschottung-Schau“ jedes Jahr durchgeführt werde, um zu überprüfen, ob diese in Ordnung seien, da dies bei den Meisten nicht zutreffe. Ein weiterer Befragter schätzt Schotten als sinnvoll und nutzbringend ein, jedoch seien diese aus seiner Sicht auch sehr wartungsintensiv.

Zu der Methode *Elastocoast* äußern sich 4 Bewohner: 2 dieser Interviewten empfinden Elastocoast als nicht passender Küstenschutz für die Halligen und bemängeln den unangenehmen Geruch, der bei Wärme verursacht werde. Ein weiterer Bewohner betrachtet Elastocoast als Resultat eines Entwicklungsdrucks auf den Halligen. Ein Bewohner stuft dieses Material in dessen Potenzialität jedoch als positiv ein, wenn man vernünftig und naturschützend damit umgehe.

Zu den *Deckwerken* und der *Steindecke* äußern sich 3 der befragten Bewohner: Dabei sind 2 Bewohner mit den Deckwerken allgemein zufrieden und einer dieser beiden Bewohner räumt den Deckwerken, neben den Lahnungen, oberste Priorität ein. Jedoch merkt ein Bewohner kritisch die offenen Deckwerke an, dass diese nicht Tier- und Naturverträglich seien, während die Steindecke (als geschlossenes Deckwerk) existentiell für das „Überleben“ sei und eine enorme Wichtigkeit besäße. Allerdings sei die Innenseite der Steindecke erneuerungs- und optimierungsbedürftig.

2 Bewohner nennen die *Sandsäcke* als bisherige Küstenschutzmaßnahme, wobei einer dieser Interviewten betont, dass diese zum Schutz vor Wasser geeignet seien und ein anderer Bewohner hervorhebt, dass diese im Notfall zum Einsatz kämen.

Die *Schleuse* wird von 2 interviewten Bewohnern genannt: Ein Befragter betont, dass es „mehr“ ja nicht gebe und die Schleuse den erwünschten Effekt bringe. Auch ein zweiter Interviewter hebt hervor, dass man keine Angst vor einem Deichbruch habe und ebenso die Schleusentore funktionieren würden, sodass das Wasser nach einem Landunter wieder abfließen könne.

2 Bewohner nennen die *Buhne* als Maßnahme im Küstenschutz, wobei ein Bewohner betont, dass man mit der Buhne Gefahr laufe, die Strömung stark zu verändern und diese flacher sein müsse. Auch ein weiterer Bewohner merkt kritisch an, dass die Buhne zu steil abbräche und flacher ablaufen müsse.

Zu der *Stülpe* äußern sich 2 Bewohner: Dabei spricht ein Bewohner seine Unzufriedenheit mit der (ehemaligen), zu hohen Bauweise der Stülpe aus, während diese korrekt auf Oland angebracht wurde und dort funktioniere. Ein zweiter Interviewter betont die Funktion der Stülpe, um Wasser abzuhalten, und sieht diese auch zukünftig „im Gespräch“, vor allem in Anbetracht potentiell steigender Sturmfluten.

Bezüglich des *Schutzraumes* geben 2 Bewohner Auskunft: Dabei merkt ein Interviewter an, dass der Schutzraum wichtig sei und dieser nach 1962 eingebaut wurde. Für einen weiteren Bewohner

sind die bekannten Küstenschutzmaßnahmen, wie auch der Schutzraum, nahezu selbstverständlich und man habe sich keine weiteren Gedanken darum gemacht.

Ein weiterer Bewohner gibt Auskunft über die *Bauweise des Hauses* im Kontext des Schutzes vor Sturmfluten und Landunter: Das Haus sei aus seiner Sicht zu tief gebaut und sei dementsprechend nicht optimal geschützt.

Neue Ideen und Vorschläge

Zu *mobilen Schläuchen* und *mobilen Wänden* äußern sich insgesamt 16 Bewohner: Dabei sprechen 6 Bewohner keine Akzeptanz sowohl gegenüber mobilen Wänden, als auch gegenüber mobilen Schläuchen aus, da diese halliguntypisch seien, nicht aufbaubar bei einem schweren Sturm wären und generell dem starken Wind sowie dem Wellengang nicht standhielten. Neben dieser Argumentation hinsichtlich der nicht machbaren Praktikabilität wird weiterhin angeführt, dass zum einen junge Menschen auf den Halligen fehlten, um diese mobilen Maßnahmen aufzubauen, und zum anderen einige Bewohner in „kritischen Monaten“ im Urlaub und damit nicht auf der Hallig seien. Lediglich ein Bewohner äußert eine positive Wertung zu den mobilen Schläuchen und Wänden. Ein weiterer Bewohner ist diesen Maßnahmen dann gegenüber aufgeschlossen, wenn traditionelle Küstenschutzvorkehrungen nicht mehr helfen könnten. Explizit werden die mobilen Wände von weiteren 5 Bewohnern abgelehnt, unter anderem ebenfalls aufgrund der Wetter-, Wind- und Wasserverhältnisse, der notwendigen anderweitigen Vorkehrungen vor einer Sturmflut und der halliguntypischen Konstruktion dieser Wände. Darüber hinaus äußern 3 weitere Bewohner explizit ihre Ablehnung gegenüber dem mobilen Schlauch, unter anderem ebenfalls aufgrund der Windstärke, des Wellenganges und der demographischen Entwicklung auf den Halligen mit einer einhergehenden fehlenden Personenkraft. Einer dieser Bewohner merkt zudem kritisch an, dass ein Anbringen des mobilen Schlauches in Konflikt mit den Vorkehrungen vor einem Landunter oder einer Sturmflut trete und man zuerst das Vieh bergen müsse.

Über die Küstenschutzmaßnahmen eines *Ringdeiches* sowie einer *Deicherhöhung* äußern sich 14 Bewohner: Dabei befürworten 6 Bewohner einen Ringdeich und betrachten diesen als praktikabel, struktursichernd und sozialverträglich, auch im Hinblick auf nachfolgende Generationen. Einer dieser Bewohner nennt in diesem Kontext Gröde als Vorbild und gibt jedoch auch die Kosten- und Eigentumsfrage zu bedenken. 2 Bewohner äußern keine Akzeptanz gegenüber dieser Idee, wobei einer dieser Befragten einen Ringdeich als einen „Kessel“ um die Warft negativ wertet. Hinsichtlich einer Deicherhöhung besteht erneut ein divergentes Meinungsbild: Während 3 Bewohner eine Deicherhöhung, unter anderem aufgrund der Deichstabilität und des Kostenfaktors, ablehnen, würden 3 Bewohner einer Erhöhung unter dem Sicherheitsaspekt der Bewohner zustimmen.

Zu der Idee eines *Hydraulischen Hauses* äußern sich insgesamt 13 der befragten Bewohner: 7 Bewohner stehen dieser Idee positiv und mit Interesse gegenüber. Dabei sehen 2 dieser Bewohner diese Idee jedoch eher in Kombination mit anderen Maßnahmen, wie einer Häuseraufstockung und betonten, dass dieser Vorschlag erst denkbar wäre, wenn traditionelle Küstenschutzmaßnahmen – die im Vordergrund stehen sollten – nicht mehr weiterhelfen würden. Einer dieser Bewohner steht der Idee zwar generell offen gegenüber, äußert jedoch auch die eigene Unwissenheit über die technologische Machbarkeit und die Finanzierbarkeit. Weiterhin merkt ein Bewohner an, dass bei der Konstruktion eines hydraulischen Hauses das Halligtypische beibehalten werden sollte. Demgegenüber lehnen 4 Bewohner diesen Vorschlag ab, unter anderem hinsichtlich der Machbarkeit, des Kostenfaktors sowie der damit einhergehenden Veränderungen auf der Hallig. 2 weitere Bewohner äußern keine klare Ablehnung, jedoch eine deutliche Skepsis gegenüber hydraulischen Häusern. Einer dieser Befragten betrachtet diese Art der Technologie als hochkomplex und schwer vorstellbar und hebt hervor, dass vor allem ältere Bewohner Akzeptanzprobleme mit neuen Maßnahmen hätten. Ein Bewohner merkt an, dass im Kontext des hydraulischen Hauses auch die Umgebung entsprechend verändert und angepasst werden müsse, aber ein Festhalten an traditionellen Maßnahmen utopisch wäre.

Zu einer potentiellen *Aufwarftung* äußern sich 11 Bewohner: Dabei erachten 7 Bewohner eine Aufwarftung und Warfterhöhung als wünschenswert, notwendig und vorstellbar, um den Schutz der Halligbewohner zu optimieren. 4 Bewohner sehen dies allerdings nicht als Ideallösung und lehnen eine Aufwarftung ab, unter anderem, da dies zu teuer sei und den Sehhorizont verdränge. Einer dieser Befragten würde einer Aufwarftung erst in der nächsten Generation zustimmen und sieht derzeit keine Notwendigkeit dessen.

Über eine potentielle *Aufstockung der Häuser oder einen Neubau* äußern sich 6 der befragten Hooge-Bewohner: Dabei betrachten 3 Bewohner die Idee einer Aufstockung der Häuser für vorstellbar und priorisieren diese. Einer dieser Interviewten betont jedoch, dass dies auch abhängig von der Beschaffenheit der Häuser sei und bei älteren Häusern eher eine „Ponton-Konstruktion“ angewendet werden solle. 2 Bewohner betrachten eine Aufstockung jedoch für nicht realisierbar, unter anderem hinsichtlich der finanziellen Machbarkeit und der Gefahr eines Einsackens des Hauses und Grundes. Einer dieser Befragten plädiert stattdessen für einen Pfahlbau in Kombination mit einem Plattschieben des Kellers als einzige bauliche Maßnahmen an Häusern auf der Backenswarft. Ein Interviewter wendet sich generell gegen einen Neubau, da dieser erst kürzlich eine Komplettsanierung des eigenen Hauses durchgeführt habe.

Generell wird hinsichtlich neuer Küstenschutzmaßnahmen der *traditionelle Küstenschutz* von 6 Bewohnern herausgestellt: Dabei betonen 3 Bewohner ein Festhalten am traditionellen, halligtypischen Küstenschutz. Ein Bewohner befürchtet, dass das Halligtypische mit neuen Maßnahmen generell verloren gehe. 2 Bewohner betonen hingegen, dass das Festhalten an

traditionellem Küstenschutz nicht fokussiert werden solle, wenn diese Maßnahmen nicht mehr helfe.

Schwimmende Häuser werden von 5 Bewohnern bewertet: Dabei äußern 4 Bewohner ihre Ablehnung dieser Idee, unter anderem aufgrund der finanziellen Belastung, des Wellenganges, der Windstärke und des ungeeigneten Halligbodens. Einer dieser Befragten kritisiert diesen Vorschlag als halliguntypische „Utopie“. Ein Befragter sieht derartige Vorstellungen als generell möglich, wenn eine entsprechende Anpassung der äußeren Umstände erfolge.

Hinsichtlich *sozialstruktureller Maßnahmen* äußern 2 Bewohner Vorschläge: Ein Bewohner betont, dass hinsichtlich des Küstenschutzes Versetzungsprogramme erwünscht seien, spezifiziert diesen Vorschlag jedoch nicht eingehender. Ein weiterer interviewter Bewohner nimmt in Bezug auf die Sicherung des Lebens und der Lebensqualität auf den Halligen eine pessimistische Stellung ein und hinterfragt, ob teure neue Baumaßnahmen im Küstenschutzbereich noch vertretbar seien und ob es nicht besser wäre, ein neues Lebensumfeld aufzusuchen, da dies auch Maßnahmen gegen die Natur und die natürliche Entwicklung seien.

Explizit zu einer *Warftabflachung* äußern sich 2 Bewohner: Während ein Befragter eine Warftabflachung ablehnt, sieht ein weiterer Interviewter eine Notwendigkeit dessen. Ein weiterer Bewohner berichtet von einer selbst konstruierten *Warftverschottung*, als eine Verschottungskonstruktion an der Warft. Dies könne sich der Interviewte auch auf größerer Ebene vorstellen, sodass man keine Verschottung mehr am Hause bräuchte.

Eine *Verschottung* aller Häuser auf den Halligen sowie die Instandhaltung der vorhandenen Schotten werden von 2 Bewohnern als Vorschläge befürwortet, da dies struktursichernde Maßnahmen seien.

Darüber hinaus lassen sich die folgenden Einzelaussagen diesem Themenkomplex zuordnen: Ein Bewohner wünscht sich *Stülpen* aus einem optimierten Material (Granulat). Ein weiterer Bewohner äußert den Vorschlag, die *Priele bis zur Watthöhe abzudämmen*, damit diese nicht mit der Zeit durchreißen und die Strömung ungünstig beeinflussen würden. So könne der Strom langsam über die Watten abfließen, da die Geschwindigkeit des Wasserstroms abgebremst werde. Dieser Bewohner betrachtet in puncto Küstenschutz *Holland als Vorbild*. Ein weiterer Hooge-Bewohner schlägt vor, die *Torfschicht durch zu baggern*, sodass man Stabilität um die Warft herum aufbaue, da sich an einer bestimmten Stelle im Boden der Warft Torf befände und die Warft somit auf einer Luftblase stehe. Eine Alternative wäre komplette Pfahlbauten. Ein weiterer Bewohner schlägt vor, *die ganze Warft hochfahrbar zu gestalten*. Ein weiterer Interviewter äußert den Vorschlag einer *Mole* als Bau- und Schutzmaßnahme. Eine klare Verbesserung sieht ein weiterer Bewohner in dem Vorschlag, die *Materialien zum Warft- und Hausschutz* direkt vor Ort zu lagern, damit ein schnelles Herankommen an diese Materialen möglich sei. Ein Bewohner sieht die Notwendigkeit

einer *intensiveren Pflege und Konzeption* der Lahnungen. Eine Alternativlösung zu den mobilen Wänden sieht ein Interviewter in *Verschottungsmechanismen in Kombination mit einer Warfterhöhung*, sodass jede Auffahrt eine Schotte bekäme, durch die man hindurchfahren könne.

Ein weiterer Interviewter äußert seine *generelle Skepsis gegenüber aufwendiger Technik* im Küstenschutzbereich. Dabei sollten technische Grundlagen die Aspekte Anwendbarkeit, Nachhaltigkeit und Nutzen erfüllen. Zudem ist dieser Bewohner der Meinung, dass man im Falle von jeglichen Küstenschutzmaßnahmen *die Halligen und das Umland, wie das Wattenmeer, großflächig im Hinblick auf Nachhaltigkeit betrachten* müsse. Ein weiterer Interviewter plädiert im Falle jedweder Baumaßnahme für eine *vorab ausgearbeitete Simulation* oder ein Baumodell zur Orientierung, Fehlereinschätzung und auch, um die Meinung der Halligbewohner im Vorhinein einzuholen. Grundsätzlich wird der Wunsch artikuliert, dass die Halligbewohner aktiv am Gestaltungsprozess potentieller Küstenschutzmaßnahmen teilnehmen sollten. Ein Bewohner nennt *Glasfaserplatten*, die im Bedarfsfall an die Fenster angebracht werden könnten, um Stabilität zu erhalten. Ein weiterer Bewohner nennt die Möglichkeit eines *Neubaus der Häuser* am Beispiel Gröde nach der Sturmflut 1962, wobei man hier „alles verkehrt“ gemacht habe.

Infrastruktureller Küstenschutz

3 Bewohner äußern eine *grundsätzliche Zufriedenheit mit dem infrastrukturellen Küstenschutz*, lediglich das Abpumpen des Kleibodens aus dem Meer zur Warftaufschüttung wird kritisch seitens eines Interviewten bewertet, da dies große Veränderungen im Wattenmeer erzeuge. 2 weitere Interviewte äußern hingegen eine Unzufriedenheit mit infrastrukturellen Küstenschutzmaßnahmen, unter anderem hinsichtlich der Deichhöhe und zu hoch angebrachter Stülpen.

Hinsichtlich der *Warften* als infrastrukturelle Gegebenheiten kritisiert ein Bewohner die unterschiedliche Qualität derer und das Problem begrenzter Möglichkeiten für die Aufwarftungen, die nur zur Sommerzeit vonstattengehen könnten. Ein weiterer Bewohner bemängelt eine fehlerhafte Warfterhöhung, die zu Schäden am Haus geführt habe und ist der Ansicht, dass eine Warfterhöhung bald nicht mehr ausreichend sei. Ein dritter Bewohner ist der Meinung, dass bei den Aufwarftungen die unterschiedlichen Erfahrungsstände die Hauptproblematik sei und hier eine Berücksichtigung der Halligbewohner wünschenswert wäre.

Die *Schotten* als infrastruktureller Küstenschutz werden seitens zweier Interviewten bewertet: Dabei erachtet ein Bewohner diese weiterhin als wichtig, jedoch seien die Schotten durch die Landerhöhung der Warften nicht mehr sehr wichtig.[36] Auch ein zweiter Bewohner hebt deren

[36] Siehe hierzu auch das Themenfeld *Küstenschutz, Bisherige Maßnahmen im Küstenschutz und Bewertung derer*.

Wichtigkeit hervor, äußert aber den Vorschlag, diese jährlich zu überprüfen und sich dabei auch über die mannigfaltigen Verschottungsmöglichkeiten zu informieren.

Zu *tätigen Unternehmen im Küstenschutz* äußern sich 2 Bewohner: Ein Interviewter plädiert dafür, dass Küstenschutzangelegenheiten nur Firmen mit entsprechender Erfahrung und Expertise übernehmen dürften. Ein weiterer Bewohner betont die Notwendigkeit eines frühzeitigen Zeitmanagements bei der Vergabe von Küstenschutzaufträgen, um diese rechtzeitig beginnen zu können.

Darüber hinaus lassen sich die folgenden Einzelaussagen diesem Themenkomplex zuordnen:

Als eine infrastrukturelle Gegebenheit werden weiterhin die *Sandsäcke* von einem Interviewten genannt, die gefüllt werden müssten. Ein Bewohner nennt die Schwierigkeit, an *Kittvorräte für Küstenschutzinfrastrukturmaßnahmen* zu gelangen, da nichts gelagert werden könne. Der *Anleger* wird seitens eines Interviewten dahingehend kritisiert, dass aufgrund der Deichhöhe dieser in Position und Höhe nicht optimal sei. Ein weiterer Bewohner ist mit den *Schleusentoren* als infrastrukturelle Küstenschutzmaßnahme zufrieden, da sie einen ausreichenden Effekt erwirkten.[37] Ein Interviewter ist der Ansicht, dass *Pfahlbau* die einzige konsequente Bauweise für Häuser im Kontext des Küstenschutzes sei.

Relevante Akteure im Küstenschutz[38]

Das *LKN* wird von 18 der 32 befragten Bewohner als relevanter Akteur und Entscheidungsträger im Küstenschutz genannt, dem die Zuständigkeit für Küstenschutzangelegenheiten und deren Management obliege. Auch für Schäden und Reparaturen im Küstenschutz sei das LKN zuständig. 14 der 32 interviewten Bewohner artikulieren ihre generelle Zufriedenheit mit dem LKN sowie ihr Vertrauen in die Behörde und in dessen Fachexpertise. 5 Bewohner äußern hingegen spezifisch Kritik: 2 Bewohner merken an, dass das LKN nicht ausreichend zuhöre. Ein weiterer Interviewter kritisiert, dass das LKN keine angemessene Weitergabe von Informationen und Erfahrungen leiste. Zudem beschreibt dieser Bewohner eine Kompetenzverschiebung vom LKN hin zum Naturschutz, obwohl das LKN mehr zu sagen haben sollte. Ein weiterer Bewohner sieht keine Managementfunktion des LKN bei einer Sturmflut oder einem Landunter. Ein Interviewter meint eine Diskrepanz zu erkennen zwischen den Ergebnissen des LKN und den Erfahrungen bzw. den Beobachtungen der Halligbewohner, die nicht ernst genommen würden. Darüber hinaus werden von 2 Bewohnern *spezifische Akteure des LKN* namentlich benannt.

[37] Siehe hierzu auch das Themenfeld *Küstenschutz, Bisherige Maßnahmen im Küstenschutz und Bewertung derer*.
[38] An dieser Stelle waren hinsichtlich des Antwortverhaltens Mehrfachnennungen möglich.

Die *Halligbewohner allgemein* werden von 13 Bewohnern als relevant im Küstenschutz hervorgehoben: Dabei wird vor allem betont, dass die Halligbewohner mehr in Entscheidungen einbezogen werden müssten und das LKN den Bewohnern mehr Gehör schenken solle. Dabei wird von 2 Interviewten auch der Erfahrungsschatz der älteren Bewohner hervorgehoben.

Spezifische Halligbewohner werden ebenfalls von 13 Interviewten als relevant im Küstenschutz genannt: Zum einen wird der Warftsprecher hervorgehoben. Zum anderen nennen 6 Interviewte einen spezifischen Bewohner der Hallig, der über notwendiges Wissen, Kompetenz und Erfahrung als Ingenieur verfüge.[39] Darüber hinaus heben auch 3 weitere Befragte einen spezifischen Bewohner hervor, der Erfahrungswerte und Ideenreichtum sowie viel Lebenserfahrung auf den Halligen habe. Weiterhin werden von 3 Interviewten drei weitere Einzelpersonen genannt.

Zu *politischen Akteuren und der Verwaltung* als relevante Akteure im Küstenschutz äußern sich 6 Bewohner: Dabei nennen 2 Interviewte den Bürgermeister und ein weiterer Befragter den ehemaligen Bürgermeister, den man weiterhin um Rat bezüglich Küstenschutzangelegenheiten fragen könne, da dieser auch Vorarbeiter gewesen sei. Darüber hinaus nennt ein Bewohner einen Vertreter des Ministeriums für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume Schleswig-Holstein (MELUR). Während ein weiterer Bewohner den Gemeinderat bzw. die Gemeindevertretung als relevant für ein Küstenschutzmanagement erachtet, sieht ein weiterer Bewohner diesen als nicht kompetent an. Erneut wird ein heterogenes Meinungsbild unter den Halligbewohnern deutlich.

Ein *Zusammenspiel mehrerer Akteure* im Küstenschutzbereich wird insgesamt von 4 Bewohnern hervorgehoben: Genannt werden hierbei die Küstenschutzmitarbeiter, das LKN, der Bürgermeister und die Halligbewohner. Ein Bewohner nennt als relevantes Mitglied dieses Zusammenspiels auch die Naturschutzbehörde.

Die *Landesregierung* wird von 3 Bewohnern als relevanter Akteur im Küstenschutz genannt, insbesondere hinsichtlich der Finanzierung, der Auftragsvergabe im Küstenschutz und des Erfahrungsschatzes.

Die *Vorarbeiter im Küstenschutz* werden von 3 Bewohnern als relevant herausgestellt, da diese über Erfahrung und Kompetenz verfügten, sodass man sie auch um Rat in Küstenschutzangelegenheiten fragen könne.

Fachleute und Fachbehörden werden von 3 Bewohnern als geeignet und zuständig für ein Küstenschutzmanagement erachtet.

Die *Bürgerversammlung* wird von 2 Bewohnern als wichtig im Küstenschutz genannt, da diese erfahren sei und man sich darüber austauschen könne.

[39] Um eine Anonymität der Bewohner zu wahren, wird an dieser Stelle und im Folgenden auf eine Namensnennung verzichtet.

Küstenschutzmaßnahmen im positiven oder negativen Zusammenhang zum Naturschutz[40]

Zu dem Themenbereich der *Vereinbarkeit von Naturschutz, Küstenschutz und dem Leben auf der Hallig* äußern sich insgesamt 13 Personen.

4 Bewohner betonen, dass *Naturschutz und Küstenschutz zusammenarbeiten* müssten und 3 Bewohner wünschen sich, dass auch die Halligbewohnern in diesem Kontext mehr Verantwortung übertragen werde.

Verschiedene Aussagen nehmen Stellung zu den Auswirkungen von bestimmten Küstenschutzmaßnahmen auf die Natur. 2 Personen sprechen hierbei die *Lahnungen* an und sehen bei dieser Maßnahme keinen Konflikt mit der Natur, vielmehr böten die Lahnungen neuen Lebensraum für verschiedenste Tiere. Die Warfterhöhung sieht ein Bewohner als negativen Einfluss auf die Natur: „Wenn wir hier Warfterhöhungen haben und hier liegen diese großen Sandrohre, die den Kleiboden aus dem Watt holen und die Säbelschnäbler (…) Im nächsten Jahr brüten die nicht mehr hier." Ein weiterer Bewohner merkt an, dass seiner bzw. ihrer Ansicht nach nicht gut sei, wenn der Naturschutz die Wartungsarbeiten an den Deckwerken unterbinde und ein anderer gibt an, dass durch den Naturschutz die Landgewinnung untersagt worden sei. Generell geben 5 Personen an, dass Küstenschutzmaßnahmen entweder schon in Einklang mit der Natur seien oder in Zukunft diesen Faktor integrieren müssten. Nur ein Bewohner gibt an, dass sich die Natur immer an die verschiedensten Maßnahmen anpasse und man keine gesonderte Rücksicht nehmen müsse.

Betrachtet man den *Einfluss des Naturschutzes und des Küstenschutzes auf das Leben auf der Hallig*, geben 4 Bewohner an, dass sie diesbezüglich die Gefahr sehen, dass das traditionelle Leben immer weiter verschwinde und verdrängt werde.

Küstenschutz im positiven oder negativen Zusammenhang zum Tourismus

Über einen Zusammenhang zwischen *Küstenschutzmaßnahmen und Tourismus* äußern sich 3 Bewohner: Ein Bewohner kritisiert die Intervention einiger Halligbewohner bei der letzten Aufwarftung aufgrund der Sorge, dass ihren Gästen der Sehhorizont genommen werde. Ein anderer Interviewter merkt jedoch kritisch an, dass der Sehhorizont auch für Touristen durch die Aufwarftung verdrängt worden sei. Anhand dieser divergenten Äußerungen wird ein heterogenes Meinungsbild auf den Halligen deutlich. Ein Bewohner stimmt der Aussage zu, dass die

[40] Siehe hierzu auch den Themenkomplex *Naturschutz, Vereinbarkeit von Naturschutz, Küstenschutz und Halligen-Leben*.

Einzigartigkeit des Dammes als Küstenschutzmaßnahme verloren gehe, wenn dieser als Straße auch für Touristen nutzbar gemacht werde.

Ein Bewohner kritisiert die *Wegeinschränkungen für Touristen*, sodass Touristen einige Wege nur zu Fuß passieren dürften, jedoch Akteure aus dem Küstenschutz diese motorisiert befahren würden, da diese auch dort arbeiten. Ein Bewohner hebt eine enge Verzahnung zwischen Küstenschutz, Tourismus und Naturschutz hervor und beschreibt dies am Beispiel der Touristen-Befragung zu dem „Hallig-Taler", wobei der *Fokus der Touristen eher auf dem Naturschutz als auf dem Küstenschutz* liege.

2.2.2 Sturmfluten und Landunter

Erfahrungen und Beschreibungen bisheriger Landunter

Ein *Angst- oder Normalitätsgefühl gegenüber einem Landunter* wird in den Aussagen von 8 befragten Bewohnern deutlich: Dabei sprechen 3 Bewohner ein grundsätzliches Sicherheitsgefühl aus, unter anderem aufgrund des guten Küstenschutzes, der letzten Aufwarftung und der Tatsache, dass schon längere Zeit keine schwere Sturmflut mehr eingetroffen sei. Ein weiterer Bewohner ist der Ansicht, dass durch die letzte Warfterhöhung kein Wasser mehr ins Haus gelange, aber es eine Katastrophe wäre, wenn dies doch der Fall sei. Hier scheint kein absolutes Sicherheitsgefühl zu bestehen, sodass auch das Restrisiko seitens dieses Interviewten bedacht wird. 2 weitere Bewohner betrachten die Landunter- und Sturmflutgefahr als Normalität und Bekanntes, mit dem die Halligbewohner leben lernten. Ein weiterer Interviewter ist der Ansicht, dass nur Nicht-Halligbewohner Angst hätten. Ein Bewohner scheint jedoch unsicher und äußert die Hoffnung, dass das Wasser nicht zu hoch gehe.

Die *Sturmflut 1962* wird von 6 Bewohnern genannt und beschrieben: 3 Bewohner nennen die Mond- und Windkonstellationen sowie die Wetterlage bei der damaligen Sturmflut. Ein Bewohner beschreibt, dass man bei dieser existentiellen Bedrohung keine Hilfe während oder nach der Sturmflut haben konnte, jedoch die Feuerwehr Hilfe geleistet habe. Ein weiterer Bewohner war bei der Sturmflut 1962 noch ein Kind und erinnert sich an viel niedrigere Warften zu dieser Zeit. Ein weiterer Bewohner beschreibt die damalige Situation sowie die verursachten Schäden und bemängelt, dass man die Baumaßnahmen nach 1962 übereilt getroffen und durchgeführt habe.

Über den *Sturm Anatol* äußern sich 6 Bewohner: Dabei erklären 4 Bewohner, dass dies ein besonders schwerer Sturm gewesen sei. Ein weiterer Interviewter beschreibt, dass bei diesem Sturm das Wasser in das Haus gelaufen sei. Ein Bewohner stellt heraus, dass die Feuerwehr Sandsäcke bereitgestellt habe.

Aufgetretene Probleme durch und bei einem Landunter beschreiben 5 befragte Bewohner: Dabei merkt ein Bewohner an, dass der Vorrat an Sand gefehlt habe. Ein weiterer Befragter nennt fehlende Hilfeleistungen und eine Finanzierung durch Spenden. Ein weiterer Interviewter gibt an, dass nicht alle Vorkehrungen durchführbar gewesen seien und ein weiterer Bewohner beschreibt den Nach-Stau bei Niedrigwasser, der häufiger vorkomme. Zudem würde Landunter auf Süderoog schneller als auf Hooge eintreffen. Zudem gibt ein weiterer Bewohner über angeschwemmtes Material Auskunft und dass 1962 Süßwasser für die Tiere gefehlt habe.

Die *Sturmflut 1976* beschreiben 2 Bewohner als sehr schweren Sturm, bei dem auch das Wasser in vielen Häusern gestanden habe.

Ein Bewohner meint *Veränderungen der Stürme* zu beobachten, sodass diese in den letzten Jahren heftiger und kürzer geworden seien und die veränderte Sturmintensivität ein großes Problem im Kontext von Landunter darstelle.

Erkennungszeichen von Landunter

Zu den *Wetterverhältnissen*[41] als Erkennungsmerkmal eines Landunters äußern sich 18 Bewohner: Dabei nennen 11 Interviewte spezifisch den Wind, einen Windwechsel und die Windstärke als zentrale Merkmale zur Erkennung eines Landunters. Der Wasserstand und Wellengang wird von 7 Bewohnern als bedeutend herausgestellt. 3 Bewohner nennen als weitere Charakteristiken die Tideverhältnisse, den Wolkenzug und die Mondkonstellation. Ein Bewohner sieht als ein entscheidendes Erkennungsmerkmal einen stürmischen, lang andauernden Regen. Ein Befragter wertet eine „kristallklare“ Sicht, bei der man die Halligen und Inselwelt erkennen könne, als ein definitives Zeichen für ein herannahendes Unwetter.

Zu den *eigenen Wetterbeobachtungen* äußern sich 11 Befragte und betonen deren Wichtigkeit, auch in Bezug zu anderen genutzten Hilfsmitteln zur Erkennung eines Landunters und einer Absicherung. Dabei wird auch die Weitergabe von Erfahrungen betont, wobei ein Bewohner anmerkt, dass die jüngere Generation Vorzeichen nicht mehr deuten könne, während sich die älteren Bewohner auf ihre Erfahrungen mit den Wetterbeobachtungen verließen. Ein weiterer Bewohner beschreibt, dass andere Geräusche im Haus als Vorboten eines Landunter wahrzunehmen wären. Jedoch äußern 3 weitere Bewohner *Bedenken gegen eigene, zuverlässige Wetterbeobachtungen*, da nachts nur die Medien zur Absicherung blieben, Nachrichten erst eine Sicherheit über eine kommende Sturmflut oder ein kommendes Landunter gäben und es auch Halligbewohner gebe, die keinerlei Wetterbeobachtungen folgten.

[41] Hinsichtlich der Wetterverhältnisse waren Mehrfachnennungen möglich, sodass einige Bewohner beispielsweise sowohl die Windverhältnisse als auch die Wasserverhältnisse als Erkennungszeichen angegeben haben.

Als ein Merkmal zur Erkennung von Landunter nennen 5 Bewohner *Veränderungen in der Tierwelt*: Dabei beschreiben 2 Bewohner, dass sich die Wasservogelarten sammeln und auf die Fennen setzten. Ein weiterer Befragter meint ein Stillwerden der Vögel und ein weiterer Interviewter ein verändertes Verhalten derer in der Luft vor einem Landunter zu erkennen. Ein fünfter Befragter beschreibt eine spezifische Landuntersituation, in der die Wasserratten an Land gekommen seien.

Die *Entwicklung bis zu einer schweren Sturmflut* wird von 5 Bewohnern spezifisch beschrieben: Neben einem längerfristigen Aufbau der Sturmflut erkenne man diese vor allem an der Windentwicklung, einem Wechsel der Windrichtung, dem Wolkenbild, der Geschwindigkeit des Steigens des Wasserstandes, der Weitsicht bis nach Langeneß und an einem Übergang von Regen zu Wind.

Zur rechtzeitigen Erkennung eines Landunters dienen laut der Aussagen 3 befragter Bewohner auch *Unterhaltungen der Halligbewohner miteinander*, der Austausch mit den Nachbarn und Warftbewohnern. Ein Interviewter hebt dabei hervor, dass vor allem für Landwirte Gespräche über nahende Wetterlagen wichtig seien, da diese auch Verantwortung für die Tiere hätten.

Hilfsmittel zur Erkennung von Landunter und Sturmfluten[42]

Das *Internet* wird als ein Hilfsmittel von 13 Bewohnern genannt: Dabei betrachten acht Bewohner das Internet als eine gute, genutzte Informationsquelle, für eine frühzeitige oder vorausschauende Informationsbeschaffung, vor allem nachts, wobei dies auch gegenüber dem Barometer an Bedeutung gewinne. Ein weiterer Interviewter nennt auch amtliche Meldungen über das Internet und ein anderer Befragter fühlt sich durch das Internet rechtzeitig gewarnt. Ein weiterer Bewohner tätigt keine Internetnutzung und auch ein weiterer Befragter hebt hervor, dass nicht jeder eine Internetverbindung habe. Jedoch wendet ein Bewohner kritisch gegen das Internet ein, dass man sich nicht hundertprozentig darauf verlassen könne. Die Internetseite *Windfinder* wird speziell von 5 Bewohnern und die Seite des Bundesamtes für Seefahrt, Schifffahrt und Hydrographie (*BSH*) von 3 Bewohnern als Informationsquelle genannt. Ein Bewohner nutzt im Internet den *Deutschen Wetterdienst* und auch das *Deutsche Idiographische Institut* wird von einem weiteren Bewohner genannt.

Das *Barometer* wird von 11 Bewohnern als Hilfsmittel herausgestellt: 6 Bewohner geben an, dieses zu nutzen, wobei 2 dieser Bewohner dem Barometer auch weiterhin eine oberste Priorität einräumen. 5 Bewohner betrachten dieses jedoch als weniger wichtig und würden dieses eher selten benutzen, da die moderne Technik das Barometer zunehmend ersetze.

[42] In diesem Themenbereich, vor allem hinsichtlich der genutzten Hilfsmittel zur Erkennung von Landunter, waren Mehrfachnennungen sowie die Nennung einer Hilfsmittelkombination möglich.

Das *Radio* nennen 10 Bewohner als Erkennungshilfsmittel: Dabei nutzen acht Bewohner dieses Medium und betrachten es als wichtig. 2 Bewohner erklären das Radio darüber hinaus als priorisierte Informationsquelle.

Den *Fernseher und den Videotext* nutzen 8 befragte Bewohner als Hilfsmittel, wobei einer dieser Befragten den Videotext als Internetersatz betrachtet und ein weiterer diesen auch als relativ genau bewertet.

Die *Pegelanzeige* bzw. der Anruf des Pegels wird als Hilfsmittel von 6 Bewohnern genannt, wobei 5 Bewohner auch dessen Wichtigkeit zum Abhören direkter Wasserstände betonen. Ein Befragter betrachte das Abhören der Pegelanzeige in Abhängigkeit zu der Wettervorhersage und nutze dies, wenn eine gewisse Wetterlage aufgrund anderer Medienmeldungen wahrscheinlich scheint.

Eine *Unzufriedenheit mit dem Hilfsmitteln der Wetternachrichten* äußern 2 Bewohner: Dabei bemängelt ein Interviewter die Ungenauigkeit des Wetterberichts und ein weiterer Bewohner ist der Ansicht, dass die Seewetternachrichten aufgrund schneller klimatischer Veränderungen oftmals irren könnten.

Ein weiterer Bewohner zieht den *Jahreskalender* heran, um abzuschätzen, ob Voll- oder Neumond ist. Ein weiterer Bewohner gibt an, dass der *Tidekalender* genutzt werde, von Frauen jedoch seltener.

Vorkehrungen vor einem nahenden Landunter

Die *Sicherung der Kinder und des äußeren Hausrates* wird von 6 Bewohnern als Vorkehrung genannt: Ein Befragter erklärt, die Kinder sofort reinzuholen und den äußeren Hausrat festzubinden oder diesen ins Haus zu holen. Auch 2 weitere Bewohner geben an, äußere Gegenstände festzubinden oder reinzuholen. Ein weiterer Interviewter gibt darüber Auskunft, dass die Gemeinde öffentliches Gut, wie Strandkörbe oder Mülltonnen, vorher einsammle. Ein Bewohner hebt die Notwendigkeit hervor, Materialien und Maschinen für den Küstenschutz vorzeitig zu bergen, während der warfteigene Hausrat schnell zusammengeräumt sei. In diesem Kontext hebt ein weiterer Bewohner hervor, dass die Vorkehrungen abhängig von dem jeweiligen Beruf seien, den man ausübe.

Die *Sicherung des Viehs* wird von 4 Bewohnern als Vorkehrung genannt, die frühzeitig erfolgen müsse, wobei ein Befragter angibt, dass dies aus Erfahrung einigermaßen gut zu planen sei. Ein Interviewter berichtet, dass das Vieh auch teilweise nachts geborgen werden müsse.

Darüber hinaus werden *Vorkehrungen in Form von Informationen vor einem nahenden Landunter* von 3 Befragten herausgestellt, sodass u.a. einerseits die Touristen und anderseits die Warftobleute informiert werden müssten.

„Schotten dicht“ und das *Aufsuchen des Schutzraumes* werden von 2 Bewohnern als Vorkehrungen genannt.

Über *keine notwendigen Vorkehrungen* äußern sich 2 Bewohner: So sagt ein Befragter aus, dass bei einem gewöhnlichen Landunter keine Vorkehrungen getroffen werden müssten. Ein anderer Bewohner hebt die Notwendigkeit hervor, bereits vor einem Sturm alles in Ordnung zu bringen, da bei den vorherrschenden Windverhältnissen während eines Sturms dies nicht mehr möglich sei.

Die *Organisation von Sandsäcken* wird von 2 Bewohnern als Vorkehrung genannt, wobei bei fehlenden Vorräten auch warftübergreifend gedacht werden müsse.

Ein Befragter erklärt, dass je nach Lage und Höhe des Hauses sowie der Warft auch der *Hausrat in den unteren Stockwerken des Hauses gesichert* werden müsse. Ein weiterer Bewohner gibt an, sich *infrastrukturell für eine Sturmflut gut vorbereitet* zu fühlen.

Schäden bisheriger Landunter

Das *Privateigentum* wird im Kontext bisheriger Landunter-Schäden von 2 Bewohnern herausgestellt, wobei ein Interviewter betont, dass man zuerst sein privates Eigentum und sekundär Küstenschutzanlagen schütze. *Existentielle Schäden* habe es laut der Aussage zweier weiterer befragter Bewohner in den letzten Jahren oder bei einem herkömmlichen Landunter nicht gegeben. Im Kontext dessen hebt ein Bewohner den grundsätzlich guten Warftschutz hervor, sodass kein Wasser in die Häuser gelange. *Entstandene Schäden* bei der Sturmflut 1962 beschreiben 2 Bewohner: Dabei seien Löcher unter dem Deich und Schäden am Haus entstanden. Ein Bewohner gibt Auskunft, dass es keinen *Versicherungsschutz* gebe, wenn Wasser in die Häuser gelange.

Relevante Akteure und Management vor, bei oder nach einem Landunter bzw. einer Sturmflut[43]

Der *Bürgermeister* wird von 12 Bewohnern als zentraler Akteur im Sturmflut- und Landuntermanagement hervorgehoben: 5 Interviewte betrachten den Bürgermeister als zentralen Ansprechpartner, der Informationsveranstaltungen übernehme, die offizielle Informationsschnittstelle bei einem Landunter sei und am besten wisse, an wen man sich bei Schäden wenden könne. 4 weitere Befragte sehen einen zentralen Kooperationsbund aus dem Bürgermeister, unter anderem mit dem LKN, dem Amt Pellworm und der Gemeinde (-vertretung). 3 Bewohner sehen den Bürgermeister als weniger zentral in diesem Kontext.

[43] Bei diesem Themenkomplex konnten auch mehrere Akteure als zentral für ein Sturmflut- und Landuntermanagement genannt werden.

Im Kontext des Sturmflut- und Landuntermanagements wird das *LKN* von 12 Bewohnern genannt: 9 Befragte sehen das LKN als zuständig für das Management von Sturmfluten- und Landuntersituationen sowie für dadurch verursachte Deich- und Warftschäden an. 2 weitere Interviewte stellen sich dabei eine Kooperation, unter anderem zwischen dem LKN, der Gemeindevertretung, dem Vertreter des MELUR, erfahrenen Halligbewohnern und dem Bürgermeister vor. Ein anderer Bewohner hält ein Management seitens des LKN für nicht vorstellbar.

Die *Gemeinde (-vertretung/-verwaltung)* wird von 10 Befragten im Zusammenhang mit einem Sturmflut- und Küstenschutzmanagement benannt: Diese erachten 5 Bewohner als richtige, erfahrene Instanz und Informationsstelle in diesem Kontext. 5 weitere Interviewte sehen die Gemeinde in einem Kooperationsbündnis für ein Management, unter anderem mit dem Amt Pellworm, dem Bürgermeister und dem LKN.

Zudem werden *Akteure von der Hallig* als relevant bezüglich des Sturmflut- und Küstenschutzmanagement hervorgehoben: Dabei nennen 10 Bewohner die Nachbarschaft und (Warft-) Gemeinschaft, auf deren Hilfe man aus logistischen Gründen bzw. aufgrund der direkteren Erreichbarkeit angewiesen sei und die man auch bekomme. 3 Interviewte nennen Mitarbeiter bzw. Vorarbeiter beim LKN von der Hallig. 2 weitere Bewohner betrachten die älteren Halligbewohner als relevant, auch in Kooperation mit dem LKN und dem Ministerium. Ein weiterer Befragter hebt hervor, dass Fachleute von der Hallig zentral seien.

Darüber hinaus werden *spezifische Einzelpersonen* von den befragten Hoogebewohnern als zentral herausgestellt: Dabei nennen 3 Bewohner den Warftsprecher bzw. den Warftobmann/ die Warftobfrau. Ein spezifischer Bewohner wird von 5 Interviewten als erfahren, fachmännisch und hilfsbereit hervorgehoben.[44] Zudem werden 8 unterschiedliche Halligbewohner in Einzelaussagen benannt.

Die *Schäden alleine nach einem Landunter bzw. nach einer Sturmflut* zu beheben, geben 4 befragte Bewohner an, abhängig von der Art der verursachten Schäden.

Als relevante Akteure nach einer Sturmflut heben 4 Bewohner *externe, handwerkliche Fachleute und Firmen* hervor, die sich mit den halligspezifischen Umständen und Bauweisen auskennen würden.

Als *staatliche Organe* werden der Landrat, die staatliche Finanzierungshilfe, das Innenministerium sowie ein Vertreter des MELUR von insgesamt 4 Bewohnern als zentral im Sturmflutmanagement hervorgehoben.

[44] Um die Anonymität der Bewohner zu wahren, wird an dieser Stelle und im Folgenden auf eine Namensnennung verzichtet.

Die *Feuerwehr und der Katastrophenschutz* werden von 2 Befragten als relevante Akteure im Sturmflut- und Landunterkontext betrachtet, ebenso wie die *Bundeswehr* von 2 weiteren Bewohnern.

Landunter und Sturmfluten im positiven oder negativen Zusammenhang mit der Landwirtschaft

2 Bewohner beschreiben die Problematik der *Wasserversorgung nach einer Sturmflut* sowohl für Mensch als auch für Tier. Nach einem Landunter bzw. Sturmflut seien die Weiden stark versalzen, sodass erst wenn 2-3-mal Regen einträfe, das Vieh wieder auf die Weiden gelassen werden könne. Wenn es kein Regen gebe, müsse man als Landwirt die Tiere aus dem Heuvorrat füttern.

Landunter und Sturmfluten im positiven oder negativen Zusammenhang zum Tourismus

Auskunft über eine *Informierung der Gäste vor einem Landunter oder einer Sturmflut* geben insgesamt 3 Bewohner: Ein Bewohner erklärt, dass man die Touristen einige Tage vor einer nahenden Sturmflut bereits informiere und diese sich dann meist auch im Hause aufhielten. Ein weiterer Bewohner beschreibt, dass die Touristen vor einem anstehenden Landunter gewarnt würden, es ihnen dann aber überlassen bleibe, ob sie die Hallig verlassen. Laut der Aussage eines weiteren Interviewten müssten organisierte touristische Veranstaltungen, wie Wattwanderungen, vor einem Landunter abgesagt werden. Zu der *Fährverbindung vor, bei oder nach einem Landunter* äußern sich 2 Bewohner: Ein Interviewter schildert die Problematik, dass die Fähre bei einer Sturmflutgefahr eventuell nicht an- sowie ablege und diese Entscheidung im Ermessen des jeweiligen Kapitäns liege. So könne in diesem Kontext Touristen keine sichere Transportgarantie gegeben werden. Auch ein weiterer Bewohner bestätigt, dass einige Gäste aufgrund einer Sturmflut eher abreisen mussten, da diese sonst die Halligen nicht mehr innerhalb ihrer Urlaubszeit hätten verlassen können.

In der Aussage eines Bewohners schwingt dessen *Kritik an Tagesgästen oder „Rucksackfriesen“* mit, die aus seiner Sicht eine Sturmflut, aber nicht deren Folgen, miterleben möchten. Ein weiterer Bewohner befürchtet, dass aufgrund zukünftig potentieller *Landunter im Sommer* die Touristen fernbleiben könnten.

2.2.3 Infrastruktur

Beschreibung der bestehenden Infrastruktur

Im Kontext der bestehenden Infrastruktur kritisieren 2 Bewohner den *schlechten Bauzustand der Häuser*: „Gucken Sie sich doch hier ein paar Häuser an, die sind doch alle kaputt.“ Die Gründe

dafür werden in der früheren Eile bei den Baumaßnahmen gesehen. Ein weiterer Bewohner berichtet auch über die fehlenden Sicherheitsräume, weil sie nicht zu den ‚Muss'-Vorschriften der früheren Baumaßnahmen gehörten.

Bestehende Schwächen und Kritik an der bisherigen Infrastruktur

Die bestehende Infrastruktur im Bereich der *ärztlichen und pflegetechnischen Versorgung* auf Hooge wird von 2 Bewohnern als ausbaubedürftig beschrieben: Eine Person betont, dass die mangelnde ärztliche Versorgung, vor allem im Winter, unter anderen auch durch den eingeschränkten Fahrplan verursacht wird: „[Die ärztliche Versorgung] ist wirklich ein riesen Problem […]. Und in dem Zusammenhang aber auch der so eingeschränkte Fahrplan im Winter." Die gleiche Person beklagt außerdem, dass es kein kontinuierliches, speziell für alte Menschen ausgebildetes Pflegepersonal gibt. Ein weiterer Bewohner kritisiert den im monatlichen Rhythmus erfolgenden Arztbesuch als unzureichend und äußert den Wunsch nach einer Möglichkeit den Arzt wöchentlich aufsuchen zu können.

Die *Fähr- und Schiffverbindungen* finden von 7 Bewohnern Kritik: Dabei äußern 2 Bewohner den Wunsch nach einer täglichen Schiffsverbindung, die an einem Tag sowohl Hin- als auch Rückfahrt ermöglicht. Ein weiterer Bewohner berichtet über die positive Verkehrslage von Hooge in Notfällen, die durch Feuerwehrsboote und Hubschrauber gewährleistet wird. Ein anderer Bewohner bemängelt hingegen die nächtliche Verkehrslage bei Notfällen, da man zu lange warten müsse (z.B. 2 ½ Stunden) und wünscht sich eine Nachtflugerlaubnis für Rettungshubschrauber. Ein weiterer Interviewpartner kritisiert, dass durch die Übernahme der ganzen Kanäle durch die Schifffahrtsfirma Adlerexpress es zum Rückgang der Löhne für die Matrosen komme: „Ein Matrose, der wird bei [Adlerexpress] gleich degradiert als ein Decksmann. […] Das sind doch Banditen." Vereinzelt werden außerdem positive Rückmeldungen über das Schiff „Hauke Haien" gegeben und Bedauern geäußert, dass die Verkehrsanbindung nach Husum verloren ging, die für Hooge auch von hoher Relevanz gewesen sei. Ein weiterer Bewohner kritisiert, dass es außer Autos keine weiteren Möglichkeiten wie Busverbindungen bestehen, um sich am Festland fort bewegen zu können. Vor allem für Kinder und Jugendliche ohne Führerschein sei es ein Problem. Im Kontext der Verkehrslage wird von einem Bewohner auch der Wunsch geäußert eine Verkehrsverbindung zu der Nachbarinsel zu schaffen, damit Kinder die dortige Realschule besuchen können. Die Lage von Hooge wird als „abgeschnitten" empfunden, so dass eine Anknüpfung für die Kinder z. B. an Langeneß notwendig wäre.

Bezüglich der *Bildung* sowie des *Kindergartenbereiches* vor Ort äußern sich insgesamt 4 Bewohner. 2 Bewohner kritisieren die fehlende finanzielle Unterstützung sowohl für die

Schulausbildung allgemein als auch für das Studium an weiterbildenden Schulen, die eingeschränkten Öffnungszeiten des Kindergartens und seine in der näheren Zukunft beabsichtigte Schließung. Bezüglich des Kindergartens werden Sorgen mitgeteilt, dass es keinen neuen geben werde, weil die Gemeinde sich für diesen Fall nicht mehr einsetzen werde. In diesem Kontext wird auch eine Problematik der Anbindung mit der Fähre im Winter angesprochen. Ein weiterer Bewohner berichtet von einer Familie, die aufgrund der Unzufriedenheit mit der Schulbildung auf der Hallig aufs Festland gezogen ist, damit die Kinder da zur Schule gehen können. Weitere Kritik bezieht sich auf die Größe der Schulklassen, die im negativen Sinne als „zu klein" charakterisiert wird. Vereinzelt wird auch der Wunsch nach der Erhaltung der Schule geäußert.

Der *Straßenausbau und die Straßenverbindungen* werden von 4 Bewohnern als aufbesserungsfähig betrachtet: 3 Bewohner betonen die Notwendigkeit der Sanierung von Straßen. In diesem Kontext wird von einem Bewohner auch der Wunsch nach einem Fußgängerweg auf Hooge geäußert, damit Menschen nicht auf der befahrbarer Straße unterwegs seien. Ein weiterer Bewohner betont explizit, dass der Kantenschutz der Straßen verbessert werde, um darauf mit Viehwagen und Anhänger fahren zu können.

Gewünschtes, Vorschläge und Ideen bezüglich der Infrastruktur[45]

Der größte Bedarf im infrastrukturellen Bereich auf den Halligen scheint hinsichtlich der *Lagermöglichkeiten* zu bestehen, da sich insgesamt 3 Bewohner zu diesem Bereich äußern: Vereinzelt wünschen sie sich Lagerräume für Schotten, mobile Hilfsachen sowie schwere Materialien. Des Weiteren werden singulär Wünsche nach einer Einfügung bei den Warften, damit man das Vieh hoch treiben kann, nach einer Schau über die verschiedenen Möglichkeiten der Verschottung und nach einem Schutz durch eine Mole geäußert. Ein weiterer Bewohner schlägt vor Schweden als Vorbild zunehmen, weil da das Recht auf gleiche Anschlussbedingungen für jeden besteht. Außerdem werden für Kinder Wassertaxis und in Notfällen Hubschrauber organisiert.

Zentrale Akteure im infrastrukturellen Bereich

Einen zentralen Akteur im infrastrukturellen Bereich stellt der *Wasserverband* dar, der sich bei Schäden um die Reparatur der Wasserleitungen auf den Halligen kümmere. Dieser wird von einem Bewohner genannt. Ein weiterer Bewohner betont als weiteren zentralen Akteuren die *Feuerwehr* sowie bei Notfällen die *Rettungshubschrauber*.

[45] Die im Folgenden aufgeführten Ideen und Vorschläge tangieren teilweise auch andere Bereiche, wie den Küstenschutz, die Landwirtschaft oder den Tourismus, da entsprechende infrastrukturelle Maßnahmen diesen Bereichen zugutekommen oder diese beeinträchtigen. Somit sind diese Äußerungen sowohl an dieser Stelle, als auch bei den spezifischen thematischen Ausführungen aufgeführt.

Vereinbarkeit von Infrastrukturmaßnahmen und Naturschutz

Zum Zusammenhang zwischen dem Naturschutz und der Infrastruktur äußert sich eine Person. Sie kritisiert den personenbefördernden Linienschiffsverkehr, da dieser dem Wattenmeer schade, indem er Sand aufwühlt.

Vereinbarkeit von Infrastruktur und Tourismus

Ein Bewohner bewertet eine potentielle *Straßennutzung des Dammes* und stimmt der Aussage zu, dass die Einzigartigkeit des Dammes verloren gehe, wenn man diesen als Straße, für Touristen, nutze.[46] Ein weiterer Interviewter ist der Ansicht, dass man sich selbst *Arbeitsplätze im touristischen Bereich* schaffen könne, beispielsweise im kreativen und künstlerischen Feld.[47]

2.2.4 Zentrale Akteure

Behörden

Das *LKN* wird von 18 der 32 befragten Bewohner als relevanter Akteur und Entscheidungsträger im Küstenschutz genannt, dem die Zuständigkeit für Küstenschutzangelegenheiten und deren Management obliege. Auch für Schäden und Reparaturen im Küstenschutz sei das LKN zuständig.[48]

Politische Akteure

Die Erwähnungen zu relevanten politischen Akteuren auf der Hallig finden sich bei 14 der 31 Interviewten. Diese lassen sich in drei Kategorien aufteilen: *Landesregierung*, *Gemeinde* und *Bürgermeister*.

Insgesamt äußern sich 5 Bewohner zu der *Landesregierung*. Von diesen können Aussagen von 3 Personen so zusammengefasst werden, dass sie das Land als wichtigen Akteur im Küstenschutz sehen, da hier die Kompetenz gebündelt sei. Eine Person ist der Ansicht, dass sich die Landespolitik zu wenig um die Anliegen der Halligbewohner kümmere und man für die Menschen der Hallig kein Gehör habe. Die durch das Land geförderten staatlichen Unterstützungen werden von einem anderen Interviewten kritisiert, da er davon ausgeht, dass Subventionen die

[46] Siehe hierzu auch den Themenbereich *Tourismus, Vereinbarkeit von Küstenschutz und Tourismus*.
[47] Siehe hierzu auch die Ausführungen zu *Tourismus, Entwicklung des Tourismus auf den Halligen*.
[48] Für eine ausführliche Beschreibung sowie eine Bewertung dessen siehe Seite 64: **Relevante Akteure im Küstenschutz**.

Arbeitsmotivation unterdrückten. Ein Bewohner berichtet von dem eigenen Einsatz, damit die gesetzliche Regelung, die die Schäden nach einem Landunter betrifft, geändert werde.

Bezüglich der *Gemeindevertretung* lassen sich ebenso Aussagen von 5 Personen zuordnen. 2 Bewohner merken kritisch an, dass sich die Gemeindevertretung aus 7 Personen zusammensetze, von diesen allerdings nur 2 Personen auf der Hallig aufgewachsen seien. Ein gewisser Konflikt zwischen der Gemeindevertretung und einigen Halligbewohnern, kann den Aussagen von 2 Personen entnommen werden. Sie erwähnen, die Gemeindevertretung habe sich nicht um die Anliegen der Halligbewohner gekümmert und sei für die Anliegen nicht zugänglich.

Weitere Aussagen lassen sich dem *Bürgermeister* zuordnen. Diesbezüglich äußern sich 9 Interviewte und hier zeigt sich ein ambivalentes Meinungsbild. Während 6 Personen ein positives Bild des Bürgermeisters zeichnen, lässt sich bei 3 weiteren Personen das Gegenteil feststellen. Hervorgehoben wird von 4 Personen insbesondere die Rolle des Bürgermeisters, wenn es um Auswirkungen eines Landunters oder einer Sturmflut geht, man sich zum Beispiel um Hilfsmaßnahmen kümmern müsse. Ein Bewohner gibt an, dass sich der Bürgermeister auf der Hallig besonders bei älteren und erfahrenen Bewohnern Rat hole und ein weiterer sagt aus, dass der Bürgermeister immer ansprechbar sei und ein Ohr für die jeweiligen Anliegen habe. Kritik zeigt sich in vereinzelten Aussagen, beispielsweie in Konflikten mit einzelnen Bewohnern.

2 Bewohner äußern sich noch zu dem ehemaligen und dem stellvertretenden Bürgermeister. Ersterer sei sehr gut darin gewesen, mit den Bewohnern zu kommunizieren und letzterer habe immer gute Ideen.

Bewohner allgemein

Da aufgrund der Rücksichtnahme auf eine zu gewährleistende Anonymität der Bewohner hier keine spezifischen Namensnennungen möglich sind, wird im Folgenden lediglich die Häufigkeit der Namensnennungen aufgeführt.

Es werden *zwei spezifische Akteure* von jeweils einer Person genannt, die sich beide dadurch auszeichnen, dass man sie jeder Zeit um Rat fragen könne, da sie viel Erfahrung hätten. Einer von beiden sei zudem noch technisch versiert.

Ein Bewohner hebt die *Rolle der Bewohner* hervor, *die beim LKN beschäftigt sind*.

Die *alten Bewohner* seien auf der Hallig nach Ansicht von 3 Person wichtig, da man sie um Rat fragen könne.

Wissensakteure und Ingenieure

Dem Wissensakteur oder Ingenieur als zentralen Akteur auf der Hallig lassen sich Aussagen von 6 Bewohnern zuordnen. Inhaltlich zeigt sich bei 4 Personen die Überschneidung in der Ansicht, dass die Ingenieure sich mit den Halligbewohnern absprechen müssten, damit diese einen Blick dafür bekommen, wie das Leben auf der Hallig geführt wird und auch die guten Ideen der Bewohner integriert werden könnten. Ein Bewohner merkt diesbezüglich kritisch an, dass die Ingenieure realitätsfern agierten und ist der Ansicht, dass die Wissensakteure und Ingenieure nicht das Wohl der Hallig im Blick hätten und mehr nach dem Prinzip der eigenen Profitmaximierung agierten. Andererseits spricht sich eine weitere Person dafür aus, den Ingenieuren zu vertrauen.

Vertreter des Naturschutzes und der Biosphäre

Zum Gedanken der relevanten Akteure im Nationalpark oder der Biosphäre äußern sich 5 Halligbewohner. Von diesen geben 4 an, dass die Halligbewohner selbst zentrale Akteure in diesem Bereich seien. 2 Bewohner nennen jeweils einen speziellen Bewohner, der für die Initiierung der Idee der Biosphäre verantwortlich sei: „Er hat die Biosphäre Halligen angeschoben, dass wir hier Biosphärengebiet geworden sind.“ Während eine andere Person aussagt, die Bewohner auf der Hallig seien generell gegen die Biosphäre gewesen.

Die Zivildienstleistenden werden von 2 Bewohnern erwähnt. Sie haben eine unterschiedliche Meinung über die Arbeit die diese verrichten. Während die eine Person sie für kompetent hält, erklärt die andere, dass die Zivildienstleistenden nicht von der Hallig kommen und deshalb nicht in der Lage seien, die Natur in ihrer Gesamtheit auf der Hallig zu erkennen.

Ein Bewohner kritisiert die Touristenführer der Schutzstation, sie verfolgten monetäre Interessen.

Dass das LKN Kompetenzen an den Nationalpark abgeben habe müsse, sei aus der Sicht eines Interviewten ein Fehler gewesen.

Zentrale Akteure im Bereich der Landwirtschaft

5 Bewohner äußern sich zu den Akteuren in der Landwirtschaft. Während 2 Personen jeweils bestimmte Landwirte nennen, die eine besondere Stellung auf der Hallig Hooge einnehmen, beschreibt ein Akteur das generelle Verhalten der Landwirte bei oder vor einem Landunter. Sie seien besonders vorsichtig und beobachteten die Natur genau, da sie bei Schäden viel verlieren könnten. Eine zentrale Rolle komme einer weiteren Meinung zufolge dem Vorsitzenden des Bauernverbands auf der Hallig zu, dieser sei selbst Landwirt und kümmere sich zudem um deren Anliegen.

Doch nicht nur die Landwirte sind in der Landwirtschaft wichtige Akteure, da ein Bewohner die staatlichen Förderungen kritisiert, kommt dem Staat oder der Landesregierung ebenso eine wichtige Rolle zu.

Zentrale Akteure im Tourismus-Bereich

Zu dem *Touristik- und Fremdenverkehrsbüro* äußern sich 2 interviewte Hooge-Bewohner: Ein Interviewter nennt die Zuständigen des Tourismusbüros und der Gemeindeverwaltung, der verantwortlich für die Informationsverwaltung vor einem nahenden Landunter sei.[49] Ein weiterer Bewohner kritisiert das Touristikbüro bzw. das Fremdenverkehrsbüro und beklagt die von diesem betriebene scheinbare Bevorzugung spezifischer Ferienwohnung-Vermietung. Im Kontext dessen fordert der Befragte eine Ausgliederung des Fremdenverkehrsbüros nach Pellworm.[50]

Als entscheidender Akteur im Tourismusbereich wird von einem Bewohner der jeweilige *Kapitän der Fähre* genannt, da es in dessen Ermessen liege, ob die Fähre bei gewissen Witterungsverhältnissen an- und ablege. Ein weiterer Interviewter erachtet den *Bürgermeister* als zentralen Akteur im Tourismusbereich. Ein weiterer Bewohner nennt die „*Tagesgäste*“ und „Rucksackfriesen“ als spezifische Tourismustypen auf den Halligen, die seiner Meinung nach zwar eine Sturmflut, aber nicht deren Folgen miterleben wollten.[51] Ein Interviewter nennt die *Zivildienstleistenden der „Schutzstation Wattenmeer“*, die zur Gemeinschaft gehörten und die Wattwanderungen für die Touristen betreuen.

Bestehende und Nichtbestehende Kooperationen der Akteure

Diesem Themenbereich lassen sich Aussagen von 19 der insgesamt 31 Befragten zuordnen. Die Kooperation lässt sich besonders dadurch zeigen, wen die Interviewten angeben zu fragen, wenn es um die Mithilfe bei der Beseitigung von Schäden nach einem Landunter oder einer Sturmflut geht. Demnach ist hier die Rolle der Nachbarn sehr wichtig, denn 13 Personen geben an im Schadensfall den Nachbarn zu fragen und dort auch Hilfe zu bekommen. Verschiedene Personen geben an, dass es hierbei allerdings gewisse Einschränkungen gebe. So seien auf manchen Warften nur noch wenige Menschen oder die jüngeren fehlten, die auch in der Lage seien zu helfen. Manch einer sei auch im Winter nicht auf der Hallig sondern auf dem Festland, was die Anzahl möglicher helfender reduziere.

[49] Zur Wahrung der Anonymität wird hier auf eine Namensnennung verzichtet.
[50] Siehe hierzu auch den Themenbereich *Tourismus, Kritik und bestehende Schwächen im Tourismus auf den Halligen*.
[51] Siehe hierzu u.a. auch den Themenkomplex *Tourismus, Probleme im Tourismus durch Landunter und Sturmflutgefahr*.

6 Personen sagen, sie fragten auf der gesamten Hallig nach Hilfe und dies bezüglich erwähnt eine/r, dass man selbst dann helfe, wenn man eigentlich im Streit liege.

Auf die Hilfe ganz bestimmter Akteure setzten den Aussagen zufolge 7 Personen. Hierbei sind es die erfahrenen oder handwerklich begabten die man anspreche. Von den 7 geben 3 an, dass sie sich Rat holen und 4 Personen fragen nach handwerklicher Hilfe.

Ein Bewohner betont, sie frage nicht die Nachbarn sondern Freunde.

Gegenteilig zu der oben genannten Kooperation geben 7 Personen an, dass wenig bis keine Kooperation auf der Hallig bestehe. So äußern einzelne Bewohner zum Beispiel, dass auf der Hallig keine Solidarität bestehe und das sich dies erst mit der Zeit so entwickelt habe, denn früher habe noch eine Kooperation zwischen den Bewohnern bestanden. Man kontrolliere auch nicht, ob der Nachbar sein Haus sturmsicher gemacht habe und nicht vielleicht etwas vergessen habe. Um Rat frage ein Bewohner auch niemanden, der von der Hallig komme.

Neben der Frage nach Hilfe geben 3 Interviewte an, ihre Hilfe anzubieten und diese gerne zur Verfügung zu stellen.

2.2.5 Naturschutz

Einstellung zum Naturschutz allgemein

Die allgemeine Einstellung der Befragten auf Hooge gegenüber dem Naturschutz wird innerhalb dieses Codes zusammengefasst. Dabei konnten Aussagen von 11 verschiedenen Interviewten identifiziert werden, wovon 7 eine positive Einstellung zum Naturschutz auf der Hallig haben. Von diesen erwähnen 3 Bewohner, dass der Naturschutz generell auf Hooge Anerkennung erfahre.

2 Bewohner heben die Rolle des Naturschutzes hervor, wenn es um den Schutz von Vogeleiern geht, die rechtswidrig von Menschen auf der Hallig gesammelt würden: „Aber dass Eier gesammelt werden, um zu verkaufen, da muss der Naturschutz vermitteln, dass es nicht mehr geht."

Ein Bewohner gibt an, dass sich seiner Meinung nach der Naturschutz hauptsächlich mit der Kontrolle des naturverträglichen Verhaltens der Touristen auf der Hallig beschäftigen solle.

4 der Interviewten nehmen eine Kritische Haltung gegenüber dem Naturschutz ein. Von diesen kritisieren 3 den intensiven Schutz der Ringelgänse auf der Hallig und betonen, dass es noch andere schützenwerte Vogelarten gebe, um die man sich kümmern könne.

2 Personen sind der Ansicht, dass sich die Natur an die Bedingungen auf der Hallig, insbesondere liegt hier das Augenmerk auf Veränderungen durch Küstenschutzmaßnahmen, schon anpassen

werde und man müsse darauf nicht gesondert Rücksicht nehmen. Der Naturschutz sei nur gut, wenn er sich den halligtypischen Bedingungen des Lebens auf der Hallig anpasse, so die Ansicht einer Person.

Naturverbundenheit

Im Folgenden ist zusammengefasst, wie sich die Bewohner zu dem Leben im Einklang mit der Natur äußern. Hierbei geben 6 Bewohner an, dass man auf der Hallig im Einklang mit der Natur lebe. Man lebe unter dem Einfluss der Naturkräfte, habe Respekt vor der Natur und müsse sie zur eigenen Sicherheit beobachten und auf die Umwelt achten. So äußert sich ein Bewohner, man müsse „[m]it der Natur Eins sein und leben wollen mit der Natur. Und dann kann man hier hervorragend leben. Dann ist es ein Paradies.“ 2 Bewohner äußern eine enge Verbundenheit zum Meer und dem Wasser.

Gewünschtes und Ideen im Bereich des Naturschutzes

In diesen Kontext können Aussagen von 5 verschiedenen Bewohnern eingeordnet werden. 2 Bewohner sind dafür, dass sich auch für Halligbewohner mehr Arbeitsplätze im Küstenschutz auftun. Einer dieser schlägt vor, man könne Ranger auf der Hallig integrieren, die sich hauptberuflich um den Naturschutz auf der Hallig kümmern.

Bei 2 anderen Interviewten kann man den Wunsch ausmachen, dass die Beschränkungen hinsichtlich des Sammelns von Vogeleiern gelockert werden.

Den personenbefördernden Linienschiffsverkehr, „Adler-Express“, solle man nach Ansicht einer Person verbieten und damit das Wattenmeer schützen.

Die Entscheidungen, die den Naturschutz auf der Hallig betreffen, sollen zukünftig nach Ansicht eines Bewohners von Personen getroffen werden, die mehr Kompetenz dem Themengebiet entsprechend besitzen.

Bewertung bzw. Positives und Kritik am Nationalpark und Biosphäre

Im Kontext der positiven oder negativen Kritik gegenüber dem Nationalpark und der Biosphäre äußern sich insgesamt 15 Bewohner. 5 Personen geben an, dass der Nationalpark und die Biosphäre wichtige positive Rolle auf der Hallig einnehmen.

3 Bewohner geben an, dass die Biosphäre nicht aus dem Willen der Halligbewohner erwachsen sei und gegen deren Willen vorangetrieben werde. Hingegen betonen 2 Personen, dass die

Halligbewohner sich bewusst im Nationalpark und der Biosphäre engagieren und dies dem Zusammenhalt auf der Hallig zuträglich sei.

Die Maßnahmen, die den Schutz der Ringelgänse betreffen, werden von 2 Personen kritisiert. Es seien auch weitere Vogelarten schützenswert und die Entschädigungsleistungen für die Landwirte seien zu gering.

Das Verhältnis zwischen dem Naturschutz und dem Küstenschutz wird von 2 Personen als negativ empfunden, da der Naturschutz das Voranschreiten der Baumaßnahmen im Küstenschutz verhindere.

2 Interviewte geben an, dass aus ihrer Sicht die Naturschützer nicht das Ziel verfolgten, die Natur zu schützen, sondern vielmehr finanzielle Interessen hegen, indem so zum Beispiel mehr Touristen angelockt werden. Hierbei kann man eine Verbindung zu der Aussage eines weiteren Bewohners ziehen, dass zu viele Menschen durch die Schaffung des Nationalparks im Wattenmeer seien.

Von 3 Bewohnern wird die Rolle der Zivildienstleistenden erörtert. Nach der Ansicht zweier Personen hätten die Zivis zu wenig Kompetenzen, um ihren Aufgaben gerecht zu werden, speziell seien sie nicht mit den Bedingungen auf der Hallig vertraut. Genau gegenteilig äußert sich allerdings eine weitere Person.

Ein Bewohner hebt die positive Vorreiterrolle Hooges, die aus ihrer Sicht eingenommen werde, für den Naturschutz auf den Halligen hervor. Das Reglement, welches in Bezug auf die Begehung des Japsands durch den Naturschutz getroffen wurde, grenze nach Ansicht eines weiteren Interviewten die Halligbewohner nur geringfügig in ihrer Freiheit ein.

Vereinbarkeit von Naturschutz und Landwirtschaft

Insgesamt beschreiben 5 Bewohner die *Problematik im landwirtschaftlichen Bereich sowie in der Viehhaltung aufgrund von Naturschutzauflagen, hinsichtlich des Vogelschutzes, des Brachlandes und der Stilllegungsflächen*. 2 Bewohner beschreiben, dass durch die „übertriebene[n]“ Naturschutz-Einschränkungen sich die Landwirtschaft negativ verändert habe. Beide gehen außerdem auf das dadurch entstandene Gülleproblem ein, weil der Zeitrahmen für das Ausfahren der Gülle nicht zwischen den Vorschriften der LKN und den des Naturschutzes vereinbart werden kann. Das Endergebnis dieser Diskrepanz sei, dass die Gülle in einem engen Zeitrahmen von ca. 2-3 Monaten im Jahr ausgefahren werden dürfe, in denen es am meisten regnet. In diesem Kontext wird auch die Fremdbestimmung der Halligbewohner durch den Naturschutz angesprochen, die von beiden Bewohnern auch als Grund für den Rückgang der Landwirtschaft gesehen wird: „Da sind wir an die Wand gedrängt und wir geben auch letztendlich nicht nur aus Altersgründen auf, sondern auch weil wir einfach erschwerte Bedingungen vorfinden. Das geht einfach nicht mehr.“

Die Halligbewohner werden als naturverbunden beschrieben, weil sie ihre Umwelt seit Generationen auch bei der Bewirtschaftung der Landflächen mit berücksichtigt hätten. Diese Verantwortung werde ihnen jedoch durch den Naturschutz genommen.

Von 2 Bewohnern wird die *Vorgehensweise des Naturschutzes* kritisiert: Dabei wird betont, dass bei der Erstellung der Vorschriften der Naturschutz sich mehr um das finanzielle Eigeninteresse und weniger um die Koexistenz zwischen den Landwirten und ihrem Vieh kümmere. Diese Vorschriften werden auch als Grund für die entstandene Unvereinbarkeit zwischen der Tierhaltung und Gänsen gesehen, die auch für den Rückgang der Landwirtschaft mit verantwortlich seien.

Vereinbarkeit von Naturschutz und Tourismus

Das *Interesse der Touristen am Naturschutz* schildern insgesamt 5 Bewohner: Ein Bewohner beschreibt die ehemalige Blütenpracht auf den Halligen, die auch von den Gästen auf Dias festgehalten und geschätzt werde. Ein Bewohner spricht von einer engen Verzahnung zwischen Küstenschutz, Tourismus und Naturschutz und beschreibt dies am Beispiel der Befragung zu dem „Hallig-Taler". Hierbei werde jedoch auch deutlich, dass der Fokus der Touristen eher auf dem Naturschutz als auf dem Küstenschutz liege.[52] Darüber hinaus beschreibt dieser Bewohner das veränderte Tourismus-Publikum, das ein intensives Interesse am Naturschutz zeige und somit vermehrt „Naturschützer oder Naturfreunde" als Gäste auf die Halligen kämen. Ein Bewohner merkt kritisch an, dass die Natur und die Halligen sich aus der Sicht des Nationalparks „gut vermarkten" lassen und entsprechend Touristen angezögen.[53] Jedoch sagt ein weiterer Bewohner aus, dass die naturverbundenen Halligbewohner nicht den Naturschutz und dessen Auflagen bräuchten, sondern die Touristen, um keine „unsinnigen" Dinge zu tun. In Hinblick auf die Besetzung echter „Natur-Ranger", die sich wirklich für einen Naturschutz einsetzen, merkt ein Interviewter an, dass dadurch die Halligen neu bewertet werden könnten und interessierte, naturbewusste Gäste verstärkt als Touristen auf die Halligen kämen.[54]

Über einen Zusammenhang zwischen dem *Tourismusandrang und den Naturschutzflächen*, unter anderem zur Sommer- und Brutzeit der Vögel, äußern sich insgesamt 4 Bewohner: Ein Bewohner erklärt, dass im touristischen Bereich im Sommer mehr zu tun sei, da dann Hinweisschilder für Brutgebiete angebracht werden müssten. Zudem gibt dieser Bewohner darüber Auskunft, dass es schwer zu vermitteln sei, dass man nicht mehr mit vielen Touristen aufgrund des Naturschutzes während der Brutzeit durch die „Leitlinie" gehe. Ein weiterer Bewohner erklärt die Schutzzonen, in

[52] Siehe hierzu u.a. auch den Themenbereich *Tourismus, Vereinbarkeit von Küstenschutz und Tourismus*.
[53] Siehe hierzu auch die Ausführungen zu dem Bereich *Tourismus, Kritik und bestehende Schwächen im Tourismus auf den Halligen*.
[54] Siehe hierzu u.a. auch das Themenfeld *Tourismus, Gewünschtes und Ideen im Bereich des Tourismus*.

die der Japsand (vorgelagerte Sandbank) unterteilt sei, sodass dementsprechend teilweise Flächen nicht betreten werden dürften, da sie dem Naturschutz unterlägen. Ein Bewohner kritisiert die Fähre („Adler-Express"), mit der die Touristen reisten, dahingehend, dass dadurch die notwendige Ablagerung an den Halligen zerstört und das ganze Watten-Land ruiniert werde. Darüber hinaus kritisiert dieser Bewohner, dass die Touristenführer von der Schutzstation nicht auf die Vogeleier achten und diese unbewusst zerstörten, da die Menschen nicht aufmerksam genug für die Natur seien. In diesem Kontext empfindet er die „Natur-Schützer" als „Landschafts-Nutzer" mit dem Fokus auf eine monetäre Bereicherung. Ein Bewohner ist hingegen der Meinung, dass die Natur durch die Wattwanderungen mit Touristen nicht zu Schaden komme. Erneut wird hierbei ein heterogenes Meinungsbild deutlich.

Ein weiterer Bewohner spricht von einer stützenden Gemeinschaft auf den Halligen, auch mit den Zivildienstleistenden des Watten-Hauses, wobei die *„Schutzstation Wattenmeer" sowohl eine touristische, als auch eine Einrichtung des Naturschutzes* sei. Zudem merkt dieser an, dass *der Tourismus und der Naturschutz nicht das „Halligtypische"* sowie die Landwirtschaft mit eigenen Produkterzeugnissen verdrängen dürften.

2.2.6 Landwirtschaft

Geschichte der Landwirtschaft auf den Halligen

Das *Halligprogramm* hat einen wesentlichen Einfluss auf den landwirtschaftlichen Bereich auf den Halligen und wird von 3 Bewohnern beschrieben: Alle drei erklären, dass man sich im Rahmen dieses Programmes unterschiedlich entscheiden könne, wie man das eigene Land nutze: Brach- bzw. Stilllegen der Fläche und Erhalt von Zuschüssen, Mähen der Flächen für weniger Zuschüsse oder eine intensive Eigenutzung. 3 weitere Bewohner beschreiben den *Wandel der Funktion der Landwirtschaft* für die Halligbevölkerung, der darin gesehen wird, dass man von der monetär losen Selbstversorgung mittels Landwirtschaft zur Landwirtschaft als wirtschaftlicher Nebenerwerb wechselt: „Also früher […], da war man Selbstversorger durch die Landwirtschaft." „[…] die Landwirtschaft ist ja nur noch ein Nebenerwerb." Ein weiterer Bewohner betont, dass Landwirtschaft nur in Ausnahmefällen als Möglichkeit der Finanzierung genutzt worden sei. Ausschließlich bei finanziellen Problemen fuhr man zum Husumer Viehmarkt, um seine eigene Tiere verkaufen zu können.

In enger Verknüpfung mit dem Halligprogramm wird auch die *Veränderung in der Viehhaltung* genannt, zu der sich insgesamt 5 Bewohnern äußern: Dabei beschreiben 2 Bewohner den Rückgang der eigenen Tierhaltung und die Zunahme des Pensionsviehs: „Früher waren das alles eigene

Viecher auf Hooge und heute ist es zum größten Teil ja Pensionsvieh.“ Diese Veränderung wird außerdem als unerwartet gekennzeichnet und als eine Lösung für das durch das Halligprogramm verursachte Brachliegen der Flächen beschrieben: „Für uns ist es wichtig, dass wir Vieh bekommen […], um unsere Ländereien zu bewirtschaften.“ Ein Bewohner äußert seine Bedenken bezüglich des Brachliegens, weil ohne die Bewirtschaftung der Flächen durch das Vieh sich die Segmente nicht absetzen können. Ein weiterer Bewohner weist explizit auf den Wandel der Tierhaltung von Rind- zu Schafhaltung, der laut seinem Empfinden zum Verschwinden des ‚typischen‘ Halligbildes führte. 2 weitere Bewohner beschreiben allgemein die Begrenzung des Viehs und die unterschiedliche Regelung bezüglich der Flächennutzung für das eigene und das Pensionsvieh.

Ein weiteres Merkmal zur Beschreibung der Entwicklung der Landwirtschaft auf Hooge ist die *Milchproduktion der 1960er Jahre*, die von 6 Bewohnern erläutert wird: 5 Bewohner beschreiben einen starken Rückgang der Milchviehhaltung bzw. der Landwirtschaft, aufgrund der hohen Investitionskosten, der komplexen Hygieneverordnung, der Milchquote und der geringer Abnahme. Ein weiterer Bewohner beschreibt den Vorteil der Landwirtschaft auf der Hallig für die Kühe, der darin begründet wird, dass es auf der Hallig im Vergleich zum Festland keine schädlichen Mückenarten gebe, die die Milchproduktion bei Kühen verhindern. In diesem Kontext kann auch auf die Butterproduktion auf Hooge eingegangen werden, zu der sich insgesamt 2 Bewohner äußern. Beide Bewohner beschreiben den Rückgang der Butterproduktion: „ Heute macht ja keiner mehr Butter hier.“ Im Kontext der Entwicklung der Landwirtschaft wird auch das *Problem der Stallhaltung* von 3 Bewohnern angesprochen: Dabei wünschen sie sich, dass die Ställe gerecht für das Vieh ausgebaut und mehr Anbinde-Stellen ermöglicht werden.

Bestehende Schwächen in der Landwirtschaft

7 Bewohner kritisieren den *Staat* und die *Landwirte*, weil einerseits die staatliche Bewilligung des Halligprogramms Menschen zur Passivität bewege und andererseits das finanzielle Eigeninteresse der Landwirte bei der Bewirtschaftung der Landflächen den Bodenzustand verschlechtere. 5 Bewohner heben hervor, dass Landwirte mit den Landbesitzern gleichzusetzen seien, weil die Landwirtschaft ausschließlich aufgrund der Subventionen betrieben werde. Ein weiterer Bewohner betont hingegen die Wichtigkeit der Zuschüsse für die Landwirte, die durch den Gemeinderat und den Bürgermeister unterschätzt würden.

Vereinbarkeit von Landwirtschaft und Tourismus

Über eine *Verdrängung des landwirtschaftlichen Bereiches durch den Tourismus* äußern sich insgesamt 3 Interviewte: Ein Bewohner betont, dass der Tourismus nicht allein ein Standbein sein sollte und die Landwirtschaft verdrängen dürfe, da Landwirtschaft mit dem Halligtypischen

verbunden sei. Ein weiterer Befragter erklärt, dass man zwar Landwirtschaft weitergemacht habe, aber mit dem Tourismusbereich leichter Geld zu verdienen sei. Auch ein weiterer Interviewter gibt Auskunft darüber, dass es wirtschaftlich lukrativer sei, in den Ausbau des touristischen Bereiches, wie in Ferienwohnungen, zu investieren und somit teilweise die Landwirtschaft aufgegeben, aber auch von wenigen Landwirten beibehalten werde, da beispielsweise die Viehhaltung auch für den Tourismus wichtig sei. Zudem ist dieser Interviewte der Meinung, dass es nicht störe, dass das Pensionsvieh erst nach der Abreise der Touristen auf die Hallig geholt werde.

2.2.7 Tourismus

Entwicklung des Tourismus auf den Halligen

Über *entstandene Arbeitsplätze im Tourismusbereich* äußern sich 2 Bewohner: Ein Bewohner sagt aus, dass man zwar Landwirtschaft weitergemacht habe, aber mit dem Tourismusbereich leichter Geld zu verdienen sei. Ein Bewohner merkt an, dass man sich selbst Arbeitsplätze im touristischen Bereich schaffen könne.

Darüber hinaus lassen sich die folgenden Einzelaussagen diesem Themenkomplex zuordnen:

Ein Bewohner beschreibt *ehemalige Tätigkeiten* als Gruppenführer über die Halligen, Amrum, Sylt und Föhr. Ein Bewohner ist der Meinung, dass sich die Bereitschaft nicht verändert habe, „moderne“ *Küstenschutzmaßnahmen neben den traditionellen Maßnahmen im Hinblick auf einen Anstieg des Tourismus* auf den Halligen zu verwenden.

Kritik und bestehende Schwächen im Tourismus auf den Halligen

Der *touristische Andrang auf den Halligen* wird von insgesamt 6 Bewohnern bewertet: Ein Interviewter beschreibt, dass einigen Bewohnern der touristische Andrang auf den Halligen zu viel geworden sei, er selbst es aber als weniger, als nach dem Berliner Mauerfall, empfindet. In der Aussage eines weiteren Interviewten schwingt dessen Kritik an der „Vermarktung“ der Natur und der Halligen seitens des Nationalparks mit. Zudem merkt dieser Interviewte auch an, dass einige Halligbewohner keine Gäste mehr sehen möchten. Hinsichtlich dieser beiden Äußerungen zeigt sich ein heterogenes Meinungsbild der Halligbewohner. Ein Ehepaar äußert Befürchtungen bezüglich des zunehmenden Automobil-Verkehrs auf den Halligen durch Touristen. Ein Bewohner merkt an, dass es zu wenige internationale Touristen auf den Halligen gebe. In der Aussage eines Interviewten wird sein Unmut darüber deutlich, dass ein Fernsehteam sich viel auf den Halligen aufgehalten habe und das ausgestrahlte Filmmaterial nicht dem entsprach, was ursprünglich

gesendet werden sollte. Darüber hinaus merkt dieser Interviewte zum einen an, dass er sich durch die vielen Kameras in seiner Privatsphäre eingeschränkt fühle und zum anderen, dass Touristen persönlich die Halligen anschauen sollten und nicht mittels Fernsehen.

Über eine *Arbeitsplatz-Problematik im Tourismusbereich* äußern sich insgesamt 2 Bewohner: Ein Befragter beschreibt die Problematik in der Gästezimmervermietung dass keine zusätzlichen externen Arbeitskräfte eingestellt werden könnten, während in dem Gastronomiebereich in der Saison Arbeitskräfte gesucht würden. Ein weiterer Interviewter beschreibt, dass einige Betriebe im gastronomischen Bereich vor der Insolvenz stünden und seiner Meinung nach dort zu viel Geld investiert werde.

Zu dem *„Hallig-Taler"* äußern sich 2 der interviewten Bewohner: Ein Bewohner ist der Meinung, dass der eingeführte „Hallig-Taler" langfristig den Tourismus zunichtemache. Demgegenüber bewertet ein weiterer Bewohner den eingeführten „Hallig-Taler" positiv und sieht keinen Rückgang des Tourismus aufgrund des Talers. Hinsichtlich dieses Aspektes wird erneut ein heterogenes Meinungsbild der Halligbewohner deutlich.

Darüber hinaus gibt ein weiterer Bewohner Auskunft darüber, dass *Versammlungen und Veranstaltungen mit den Halligbewohnern bzw. über die Halligen* sich in der Presse wiederspiegeln sollten, aber die Halligbewohner diesbezüglich etwas träge geworden seien. Ein Bewohner kritisiert die *Ansicht einiger Touristen*, vornehmlich älterer Generation, dass auf den Halligen kein Fahrzeugverkehr herrsche. Ein Bewohner äußert Kritik am *Touristikbüro bzw. am Fremdenverkehrsbüro* und beklagt die von diesem scheinbar betriebene Bevorzugung spezifischer Ferienwohnung-Vermietung. Ein Bewohner gibt darüber Auskunft, dass es schwer zu vermitteln sei, dass man nicht mehr mit vielen Touristen aufgrund des Naturschutzes während der Brutzeit durch die „*Leitlinie*" gehen könne.

Gewünschtes und Ideen im Bereich des Tourismus

Die folgenden Einzelaussagen umfassen Wünsche, Vorschläge und Ideen der Halligbewohner: Ein Bewohner wünscht sich näher beieinander liegende *Sitzgelegenheiten und Bänke*, damit die (älter werdenden) Besucher der Halligen diese für eine Pause nutzen könnten. Ein weiterer Interviewter wünscht sich *Unterstellmöglichkeiten*, wie auf Amrum. Ein Bewohner merkt an, dass man sich selbst *Arbeitsplätze im touristischen Bereich* schaffen könne, beispielsweise im kreativen und künstlerischen Bereich.[55] Ein weiterer Bewohner äußert sich zu einer *stärkeren Fokussierung auf das naturverbundene, ruhesuchende Tourismuspublikum*: In Hinblick auf die Besetzung echter „Natur-Ranger", die sich wirklich für einen echten Naturschutz einsetzen würden, merkt dieser Interviewte an, dass dadurch die Halligen neu bewertet werden könnten und interessierte,

[55] Siehe hierzu auch die Ausführungen zu *Tourismus, Entwicklung des Tourismus auf den Halligen*.

naturbewusste Gäste so verstärkt als Touristen auf die Halligen kämen. Ein Bewohner fordert eine *Ausgliederung des Fremdenverkehrsbüros* nach Pellworm.

2.2.8 Kulturelle Traditionen

Da hinsichtlich der kulturellen Besonderheiten und Gegebenheiten auf der Hallig Hooge ebenfalls Aussagen getroffen wurden, sind diese Interviewpassagen im Folgenden zusammengefasst.

Ein Bewohner sagt aus, dass er sich an den *alten Traditionen* und „an unserer Kultur, vielleicht auch Eigenheiten“ orientiere. In diesen Kontext sind auch die Aussagen der Bewohner einzuordnen, die neue Maßnahmen, aber auch Bereiche wie Landwirtschaft, Naturschutz und Tourismus angesichts des *Halligtypischen* bewerten.

Ebenso finden sich in den Interviewpassagen *spezifische sprachliche Besonderheiten*: So berichtet ein Bewohner, dass man den Warfthügel als „Büll“ bezeichnet. Ein weiterer Bewohner erklärt, dass der Begriff „Friese“ von „Freisein“ abstamme und das Leben auf der Hallig mit einer freien Lebensweise verbunden sei. Ein weiterer Interviewter nennt den Begriff „Schietholer“ für aufkommenden Wind und gibt zudem einen Segler-Spruch wieder, der Windrichtung und Windwechsel beschreibt, zur Ankündigung einer Sturmflut: „Kommt erst der Wind und dann der Regen, dann kannst du dich ins Bettchen legen. Kommt erst der Regen und dann der Wind, dann hol die Segel rein, geschwind.“

Als Kulturgüter werden die *Fethinge* von einem Interviewten genannt, die früher als Trinkwasserspende für die Tiere fungiert hätten. Auch ein weiterer Bewohner erklärt, dass Trinkwasser aus den Fethingen gekommen sei, das man abkochen musste. Zudem gibt dieser Interviewte Auskunft, dass es erst seit vierzig Jahren Wasserleitungen auf Hooge gebe.

Ein weiterer Interviewter berichtet von einer patriarchalisch geprägten Gesellschaft und Geschlechtertrennung mit einer *klaren Arbeitsteilung*, die teilweise noch immer bestehe. Auch ein weiterer Bewohner beschreibt die Arbeitsteilung von Männern und Frauen auf den Halligen.

Ein weiterer Interviewter nennt *Veränderungen des Zusammenlebens durch das Aufkommen des Fernsehers*, sodass dadurch weniger Kommunikation und soziales Miteinander stattfänden. Auch ein weiterer Bewohner erklärt, dass eine besondere Form des Zusammenkommens auf Hooge bestehe, das sich aber mit der neuen Generation verändert habe. Zudem ist dieser Bewohner der Meinung, dass die älteren Bewohner mit ihren Vorstellungen nicht mehr so wie früher akzeptiert würden. Ein weiterer Bewohner beschreibt, dass sich die Hallig und das Hallig-Leben durch die Erbauung von Straßen 1957 verändert hätten und die Hallig „total anders“ geworden sei.

Ein befragter Bewohner erklärt und beschreibt den *Deichbau* ab 1920/1930 und das Ausprobieren unterschiedlicher Deichbaumethoden bzw. unterschiedlicher Deiche. Dafür seien damals so genannte „*Deichgrafen*“ zuständig gewesen, die sehr wohlhabend gewesen seien. *Traditionelle Erkenntnisse im Kontext des Lahnungsbaus* benennt ein weiterer Bewohner.

Ein Interviewter beschreibt die *Epoche der großen Seefahrt* vom 16. bis 18. Jahrhundert und den Walfang sowie Walhandel. Nach dieser Phase habe man sich dann der Landwirtschaft, insbesondere der Butter-Produktion, gewidmet. Ein weiterer Bewohner beschreibt ebenfalls im Kontext des 18. Jahrhunderts, dass es dort bereits *Bockmühlen zur Energiegewinnung* gegeben habe und dies nichts Neues sei. Ein weiterer Bewohner beschreibt die ehemalige *Selbstversorgung auf der Hallig*, sodass sich jeder Bewohner eigenes Brot gebacken habe.

Während ein Bewohner von den kürzlich eingeführten „*Lamm-Tagen*“ auf den Halligen berichtet, die in gesamt Schleswig-Holstein bereits länger durchgeführt würden, nennt und beschreibt ein weiterer Interviewter *halligtypische Fleischgerichte*.

Ein Bewohner berichtet, dass man in der Kindheit auf den Halligen mit Spannung *Möweneier* gesammelt habe, wenn genug vorhanden gewesen seien.

2.3 Oland

Die Hallig Oland umfasst 96 Hektar mit 29 Einwohnern, mit 24 Erwachsenen und 5 Kinder, die sich auf 14 Haushalte auf einer Warft verteilen.[56] Von den 24 Erwachsenen wurden 6 interviewt.

2.3.1 Küstenschutz

Informationsfluss

Zu einem *bestehenden Informationstransfer* über zukünftige Küstenschutzmaßnahmen äußern sich 5 Bewohner: Dabei betonen 2 die Relevanz der Arbeitskollegen: „Durch meine Arbeitskollegen". Weitere 2 Bewohner berichten von einem Informationstransfer durch lokale Medien: das per Post ausgetragene Informationsschreiben und die Zeitung „Nordfrieslandtageblatt". Ein weiterer Befragter nennt die Gemeindevertretung und den Bürgermeister. Dabei berichtet dieser auch, dass die Bewohner die meisten Informationen über neuangedachte Küstenschutzmaßnahmen des LKN Zuständigen für die Halligen erhielten. Vereinzelt wird außerdem von einem gegenseitigen Austausch zwischen den Halligbewohnern berichtet: „Spricht sich rum". Einmal werden auch Firmen und Verbände (z.B. Sielverband) genannt, die primär durch größere Projekte informiert werden und die enthaltenen Informationen weiter an die Halligbewohner leiten. Hinsichtlich des Sielverbandes wird außerdem von einer Person berichtet, dass die Halligbewohner in die Diskussionen eingebunden werden: „da mussten wir auch Stellung dazu nehmen und alle sagen, das geht ja nicht, dass wir das nicht wissen". Während in diesem Themenkomplex die Wichtigkeit des Einbezugs der Bevölkerung sowie eines Mitspracherechts der Halligbewohner bei anderen Inseln wie Langeneß ausdrücklich betont werden, kann auf Oland keine explizite bzw. einheitliche Meinung beobachtet werden. Ein Befragter berichtet, dass man auf Oland mit neuen Maßnahmen überwältigt werde. Ein Bewohner kann sich hingegen der Meinung, dass der Küstenschutz den Halligbewohnern wenig zuhört, nicht anschließen und betont umgekehrt das offene Ohr des Küstenschutzes. „Was wir wollen, das sagen sie schon so ungefähr. Die haben eigentlich für alle Probleme ein offenes Ohr".

Bisherige Maßnahmen im Küstenschutz und Bewertung derer

Insgesamt äußern sich 3 Bewohner zu den *Warft-Erhöhungen.* Sie betonen die Wichtigkeit der bisherigen Warft-Erhöhung. Dabei berichtet eine Person von der Notwendigkeit einer neuen Warft-

[56] Diese Angaben entsprechen den Äußerungen der befragten Bürgermeisterin der Hallig Oland.

Erhöhung und weist darauf hin, dass der Boden und seine Höhe dabei nicht aus dem Blickfeld verloren gehen dürfen.

Kritisch äußern sich 2 Bewohner von Oland zu *Elastocoast* als Küstenschutzmaßnahme, aber weniger hinsichtlich der Gesundheitsverträglichkeit, sondern primär bezüglich der Sorge um eine Arbeitsplatzreduktion aufgrund einer weniger benötigten Arbeitsintensität mit diesem Werkstoff: „Er nimmt Arbeitsplätze weg, weil das ziemlich schnell geht". Ein weiterer Befragter empfindet explizit den Verlust an Arbeitsplätzen belastender als die durch diesen Werkstoff entstehenden gesundheitlichen Schäden.

2 Bewohner beschreiben und bewerten die *Busch- und Steinlahnungen*. Ein Bewohner betont die Wichtigkeit der Steinlahnungen sowie deren Pflege und Instandhaltung: „[…] die müssen erhalten […] und in Ordnung gehalten werden". Ein weiterer Bewohner äußert seine Unentschlossenheit hinsichtlich der Funktion der Buschlahnungen für die Landgewinnung und vertritt die Meinung, dass sie primär für die Beruhigung des Wassers eingesetzt werden.

Ein Bewohner befürwortet und betont die Wichtigkeit der *Deckwerke* als Küstenschutzmaßnahme für den Erhalt der Hallig.

Der Schutz des Hallig-Bodens durch den *Deich* sowie dessen Funktionsweise (und Grenzen) werden von 2 Bewohnern umschrieben, wobei ein Bewohner anmerkt, dass man bei einer Erhöhung noch über den Deich sehen können soll, da man sich schon gegenwärtig auf die Zehenspitzen stellen müsse, um drüber zu schauen. Ein Bewohner betont neben der Wichtigkeit der hohen Deiche auch das Problem der künstlich angelegten Deiche, das darin besteht, dass das Wasser von Halligbewohnern selbst beseitigt werden müsse.

Die Wichtigkeit des *Dammes* bzw. des *Lorendammes* für den Schutz der Halligen wurde von 2 Bewohnern betont. Vereinzelt wurde auch über die Wichtigkeit des *Igels* als Küstenschutzmaßnahme berichtet. Hinsichtlich der *Schleuse* berichtet ein Bewohner, dass er sie nicht als eine Küstenschutzmaßnahme betrachtet, sondern als Wasserregulirungsmechanismus. Weiterhin äußert sich ein Bewohner als zufrieden mit der *Abflachung* und ein weiterer Bewohner kann dazu keine klare Position äußern, weil er Bedenken hinsichtlich der Stabilität des Bodens aufgrund seiner spezifischen Zusammensetzung aus Lehm und Torf hat.

Insgesamt werden die *traditionellen Küstenschutzmaßnahmen* nochmals von 2 Bewohnern in ihrer Wichtigkeit sowie Angemessenheit hervorgehoben.

Neue Ideen und Vorschläge

Zu der Idee eines *hydraulischen Hauses* äußern sich insgesamt 3 Befragte: Dabei lehnen 2 Bewohner diesen Vorschlag ab und ein Bewohner betrachtet diese Konzeption zwar als vorstellbar,

aber es fehlt ihm ein konkretes Wissen zur genaueren Funktionsweise, um eine explizite Entscheidung treffen zu können. Als mögliche Gründe für die Ablehnung werden primär die hohe Wartungbedürftigkeit und problematische Orientierung während eines Landunters im Dunkeln genannt.

Die 2 Bewohner, die sich zu der Vorstellung von *schwimmenden Häusern* als künftige Küstenschutzstrategie äußern, lehnen diese Idee ab, begründet u.a. durch ein fehlendes Vertrauen in diese Art der Technik.

Der Vorschlag, „*Parterre dicht machen und ein Stock hoch bauen*“, wird von einem Bewohner als vorstellbar charakterisiert. Ein weiterer Bewohner lehnt jedoch diese Methode ab, da die Gefahr bestehe, dass die untere Bodenschicht aus Torf den Druck nicht aushalte: „das schwimmt ja weg, wenn zu viel Druck kommt. […] Dann wird das absacken […]“.

Mobile Schläuche sowie *mobile Wände* werden von 2 Bewohnern als neue Idee im Küstenschutz bewertet und aufgrund des Wellenganges und des Windes lehnen beide Bewohner diese Idee ab. Ein Bewohner kann sich aber vorstellen, dass in 20 oder 30 Jahren dieser Vorschlag umsetzbar wäre.

Einen *Ringdeich* lehnen 3 Bewohner aufgrund des Platzmangels bzw. der Einengung und der Zerstörung des Wattenmeers aufgrund der Wegnahme des Bodens als Baumaterial für die Deiche ab.

Infrastruktureller Küstenschutz

Bezüglich der *Arbeitsplätze im Küstenschutz* äußern sich insgesamt 2 Bewohner. Die beiden Bewohner betonen den Wunsch stärker in die Arbeiten des KS einbezogen zu werden und für das vorhandene Arbeitspensum mehr Arbeitskräfte einzustellen. Der Mangel an Arbeitsplätzen wird damit begründet, dass die Arbeitsplätze an die großen Firmen ausgeschrieben werden. Eine weitere Person berichtet ihre Unsicherheit bezüglich der Notwendigkeit von bestimmten infrastrukturellen Maßnahmen für den Küstenschutz: „Wahrscheinlich braucht man was“.

Relevante Akteure im Küstenschutz

Als relevanten Akteur im Bereich des Küstenschutzes wird das *LKN* von 6 der 6 Interviewten genannt: Dabei betrachten 6 Bewohner das LKN als zuständigen, zuverlässigen und fachkundigen Hauptakteur sowie als Entscheidungsinstanz für Küstenschutzmaßnahmen, die den Halligbewohnern helfe, wobei 2 Bewohner besonders den seitens des LKN für die Halligen Zuständigen hervorheben.

Im Kontext der relevanten Akteure im Küstenschutz wird auch von 2 Bewohnern die *Gemeindevertretung* genannt: Während ein Bewohner ihre Wichtigkeit in Bezug auf die Deichproblematik betont, hebt der andere explizit die Person Herr Kühn hervor.

Die *Halligbewohner* werden als relevante Akteure im Küstenschutz von insgesamt 3 Befragten genannt: „Die Halligbewohner sind sehr wichtig." Dabei wird von einem Bewohner der Wunsch geäußert, dass LKN und Halligbewohner gemeinsam entscheiden sollen.

Weiterhin werden *spezifische Akteure des LKN* sowie *Vorarbeiter im Küstenschutz*, die ebenfalls dem LKN zugehörig sind, von 4 Bewohnern als relevante Akteure im Küstenschutz hervorgehoben:[57] Ein Bewohner betont die großen Erfahrungen von den Arbeitern des Küstenschutzes. Die Verteilung der Relevanz geschieht am meisten aufgrund bestimmter Charakterstärken wie der Bereitschaft die Hallig zu schützen, Führungskraft, Einsatz, Fähigkeit zu Kommunikation mit Halligbewohnern und personale Repräsentation.

Der *ehemalige Bürgermeister von Langeneß* wurde von einem Bewohner als relevanter Akteur im Küstenschutz genannt: Dabei berichtet dieser, dass der Bürgermeister in bestimmten Fällen wichtiger als das LKN sei. Ein weiterer Bewohner betont die Wichtigkeit des *Bürgermeisters von Oland*: Dabei betont er seine engagierte politische Einstellung, die Praxiserfahrungen mit dem Halligleben und seine Herkunft von der Hallig: „ […] das ist ein richtiger Halliger."

Küstenschutzmaßnahmen im positiven oder negativen Zusammenhang zum Naturschutz [58]

Ein Bewohner betont die günstige Lage von dem Küstenschutz für *den Zusammenhang des Küstenschutzes zum Naturschutz*, weil die Ämter des Nationalparks und des Küstenschutzes unter einer Person zusammengelegt worden seien.

2.3.2 Sturmfluten und Landunter

Erfahrungen und Beschreibungen bisheriger Landunter

Insgesamt äußern sich 2 Bewohner über die *bisherigen Schäden durch Landunter oder Sturmfluten*: Dabei beschreiben beide Bewohner die entstandenen Schäden nach der großen Sturmflut auf den Halligen 1962 und 1976. Ein weiterer Bewohner berichtet über die Gefahr für die Tiere während

[57] Auch hinsichtlich dieses Bereiches waren Mehrfachnennungen möglich, sodass die Interviewten sowohl das LKN allgemein, als auch spezifische Mitarbeiter dessen genannt haben.
[58] Siehe hierzu auch die Ausführungen zu *Naturschutz, Vereinbarkeit von Naturschutz, Küstenschutz und Halligenleben*.

einer Sturmflut durch das Salzwasser und berichtet über einen Fall, bei dem alle Tiere nach einer Sturmflut gestorben seien, weil sie dabei zu viel Salzwasser geschluckt hätten.

Erkennungszeichen von Landunter

Über die Erfahrungen bezüglich der Bedeutsamkeit der *Windrichtung und Windstärke* berichten 3 Halligbewohner: Dabei betonen 2 Interviewte die bedeutende Orientierungshilfe der Intensität des Windes vor einer Sturmflut. Ein weiterer Bewohner hebt hingegen die Bedeutsamkeit der Windrichtung hervor. Als weitere Erkennungszeichen von Landunter werden vereinzelt *die Mondphasen*, *allgemeine Wetterlage und Wellenlänge* genannt.

Hilfsmittel zur Erkennung von Landunter und Sturmflut

Die *Nutzung von Internet, Videotext bzw. Nachrichten und Radio zur Bestimmung einer Sturmflut- und Landuntergefahr* wird von insgesamt 2 Bewohnern als trivial charakterisiert. Ein weiterer Bewohner beschreibt hingegen, dass das Internet als Informationsquelle zur Wasserstandvorhersage nur gering benutzt werde.

Über die Verwendung des *Barometers* als Hilfsmittel zur frühzeitigen Erkennung eines Landunters äußern sich 3 Bewohner: Dabei beschreiben sie den *Verlass auf das Barometer* als besonders wichtig und verlässlich: „ […] Das Barometer ist eines der Wichtigsten. […] Das ist bombensicher."

Vereinzelt werden auch *Nachbarn* genannt, auf deren Meinung man sich verlasse. Ein Bewohner berichtet bei der Nutzung der Hilfsmittel von einem Unterschied zwischen den beiden Generationen (alt und Jung). Die ältere Generation nutze primär ihr Erfahrungswissen und das Barometer, während die jüngere sich vorrangig auf die technischen Hilfsmittel wie Internet verlasse.

Vorkehrungen vor einem nahenden Landunter

Das *Hochholen der Loren* als eine Vorkehrung vor einem Landunter betonen insgesamt 3 Bewohner. Vereinzelt werden auch die *Sicherung der Tiere* und *der frei stehenden Möbel,* die bei einer Sturmflut weg schwimmen könnten, genannt. Wobei bei den Tieren betont wird, dass sie zuerst in Richtung Warft geholt werden, da die Tiere oberste Priorität genießen.

Infrastrukturelle Maßnahmen und Bestände im positiven oder negativen Zusammenhang zu Sturmfluten und Landunter

Im Kontext der infrastrukturellen Maßnahmen wird von einem Bewohner der Vorschlag geäußert, primär für ältere Menschen eine *Rampe zu errichten*, um das Hochholen der Lore auf die Warft zu erleichtern. Dabei könne man sich laut dem Bewohner an Nordstrandischmoor orientieren. Ein weiterer Bewohner betont den *Mangel an jungen Menschen*, die den Älteren vor allem bei der Sicherung der Tiere helfen könnten.

Relevante Akteure und Management vor, beim oder nach einem Landunter bzw. einer Sturmflut

Als relevanten Akteur im Bereich des *Managements vor, beim oder nach einem Landunter bzw. einer Sturmflut* werden von 2 Bewohnern die *Halligbewohner* selbst genannt: Dabei wird von beiden betont, dass man während eines Landunters bzw. einer Sturmflut primär auf sich alleine gestellt sei. Ein weiterer Bewohner erwähnt als relevanten Akteur den *Katastrophenschutz*.

Landunter und Sturmfluten im positiven oder negativen Zusammenhang mit der Landwirtschaft

Im Kontext des Zusammenhanges zwischen Landwirtschaft und Landunter beschreibt ein Bewohner, dass man auf der Hallig auf *chemische Dünger aufgrund der Überschwemmungsgefahr verzichten* müsse.

2.3.3 Infrastruktur

Beschreibung der bestehenden Infrastruktur

Bezüglich der bestehenden Infrastruktur wird von 2 Bewohnern die *Problematik des demografischen Wandels* betont: Dabei betonen beide Bewohner die deutliche Abnahme der Bevölkerungszahl und den Mangel an jüngeren Menschen.

Bestehende Schwächen und Kritik an der bisherigen Infrastruktur

2 Bewohner äußern Kritik an der *Verkehrsanbindung* zu den Nachbarninseln und zum Festland und beschreiben sie als verbesserungsbedürftig. Ein weiterer Bewohner kann sich hingegen der Meinung der mangelnden Verkehrsanbindung nicht anschließen und charakterisiert sie insgesamt als hinreichend: „Also der Hubschrauber hier ist in zwanzig Minuten da. Also schneller ist man mit Krankenwagen da auch nicht. Also da hätte ich keine Bedenken. Bei meiner Tochter bin auch in einer guten dreiviertel Stunde, wenn was ist.“

Vereinzelt werden auch die Kritikpunkte hinsichtlich des Mangels an *Sekundarschulen* auf Oland, an beschränkten Einkaufs- und Ausgehmöglichkeiten, an unzureichenden Internetverbindungen und an leer stehenden Häusern bzw. Ferienwohnungen geäußert. Dabei kann eine Verknüpfung zu dem Bereich *Tourismus* hergestellt werden, zu dem sich in diesem Kontext 2 Bewohner äußern: Beide betonen, dass die Ferienwohnungen unzureichend besucht werden. Außerdem wird die schwache Internetverbindung in Bezug auf das Homeoffice kritisiert.

Zentrale Akteure im infrastrukturellen Bereich

Als zentrale Akteure im infrastrukturellen Bereich werden von einem Bewohner der/die *Lehrer/in* und ein/e *Mitarbeiter/in des gastronomischen Sektors* genannt.

Vereinbarkeit von Infrastruktur und Tourismus

Kritik an der Verkehrsanbindung zu den Nachbarninseln sowie zum Festland äußern 2 Bewohner und sehen hier Verbesserungsbedarf. Ein weiterer Bewohner beschreibt diese hingegen als hinreichend.

2.3.4 Zentrale Akteure

Wissensakteure und Ingenieure

2 Befragte äußern sich explizit zu dem bestehenden *Verhältnis zwischen den Halligbewohnern und Ingenieuren*. Es kann allgemein als befriedigend charakterisiert werden, da keine Kritik von den 6 Befragten getätigt wird. Eine Person beschreibt das Verhältnis als kooperativ: „Der ist ja Ingenieur, und der kommt dann da, dann hört er sich das an und dann, wenn das dann möglich ist, setzt er das dann ja auch um dann.“ Ein weiterer Befragter ist der Meinung, dass Ingenieure den Halligbewohnern nicht zuhören würden.

Bestehende und Nichtbestehende Kooperationen der Akteure

Die *gegenseitige, nachbarschaftliche Hilfe bzw. Gemeinschaftlichkeit auf der Hallig* wird von insgesamt 5 Bewohnern genannt und in ihrer Wichtigkeit betont. Ein Bewohner hebt hervor, dass die Nachbarschaftshilfe meistens spontan organisiert werde, indem man diejenigen nach Hilfe frage, die anwesend seien. Die spontane Nachbarschaftshilfe wird als Alltagssituation beschrieben.

Außerdem wird der Eindruck erwähnt, dass die gegenseitige Hilfe in den letzten Jahren nachgelassen habe.

2.3.5 Naturschutz

Hinsichtlich des Naturschutzes auf Oland wurden überwiegend Aussagen über den *Zusammenhang zwischen Küstenschutz und Naturschutz* getätigt. Dabei beschreiben 3 Bewohner Einschränkungen in der Kooperation zwischen den Halligbewohnern und dem Naturschutz. 2 Bewohner heben im Kontext dessen allgemein das *Spannungsfeld zwischen dem Naturschutz und den Halligbewohnern* hervor, das dadurch gekennzeichnet sei, dass die Halligbewohner sich in ihrem Selbstbestimmungsrecht bezüglich ihrer Umwelt eingeschränkt fühlten. Ein Bewohner betont, dass der Naturschutz geringe praxisnahe Erfahrungen über das Halligleben habe. Zugleich lehnt er auch die Rangertätigkeiten ab, weil diese sich ausschließlich am Naturschutz orientierten.

Dabei kann eine Verknüpfung zu dem Bereich *Naturverbundenheit* hergestellt werden, zu der sich 2 Bewohner äußern: Beide betonen, dass die achtsame Koexistenz zwischen der Hallig-Natur und den Halligbewohnern ein selbstverständlicher Bestandteil ihrer Existenz sei. Ein Bewohner kann sich hingegen der Meinung, dass der Naturschutz das Hallig-Leben stark einschränke, nicht anschließen und betrachtet den Naturschutz als Investor. Ein weiterer Bewohner betont die günstige Lage des Küstenschutzes im Zusammenhang von Küstenschutz und Naturschutz, da die Ämter des Nationalparks und des Küstenschutzes zusammengelegt worden seien.[59]

2.3.6 Landwirtschaft

Die Entwicklung der Landwirtschaft auf den Halligen lässt sich unter anderem anhand der *Veränderungen in der Viehhaltung* beschreiben, zu der sich insgesamt 3 Bewohner äußern: Dabei beschreiben 2 Bewohner den Rückgang der eigenen Tierhaltung und die Zunahme des Pensionsvieh, das jedes Jahr wechselte. Ein weiterer Bewohner erzählt, dass ein von ihm bekannter Bauer einen Bio-Hof habe und dafür das Heu für das Vieh vom Festland hole. Außerdem wird von einem Bewohner erwähnt, dass das *Allmende-Prinzip* einen weiteren Bestandteil in der Geschichte der Landwirtschaft auf Oland darstelle. Dabei beschreibt er kurz das ehemalige Allmende-Prinzip und bewertet dieses positiv und zuverlässig.

[59] Siehe auch hierzu auch das Themenfeld *Küstenschutz, Küstenschutzmaßnahmen im positiven oder negativen Zusammenhang zum Naturschutz*.

Auch das *Halligprogramm* hat einen wesentlichen Einfluss auf den landwirtschaftlichen Bereich auf den Halligen und wird von 2 Bewohnern beschrieben: Ein Bewohner beschreibt explizit, dass man sich im Rahmen dieses Programmes unterschiedlich entscheiden könne, wie man das eigene Land nutze: Brach- bzw. Stilllegen der Fläche und Erhalt von Zuschüssen, Mähen der Flächen für weniger Zuschüsse oder eine intensive Eigenutzung.

2.3.7 Tourismus

Kritik an der Verkehrsanbindung zu den Nachbarninseln und zum Festland äußern 2 Bewohner und beschreiben diese als verbesserungsbedürftig. Ein weiterer Bewohner kann sich hingegen der Meinung der mangelnden Verkehrsanbindung nicht anschließen und bezeichnet diese insgesamt als hinreichend.[60]

Ebenfalls 2 Interviewte betonen, dass die *Ferienwohnungen* unzureichend besucht seien. Vereinzelt werden auch die Kritikpunkte an beschränkten Einkaufs- und Ausgehmöglichkeiten sowie an leer stehenden Häusern bzw. Ferienwohnungen geäußert.

[60] Siehe hierzu auch den Themenbereich *Infrastruktur, Vereinbarkeit von Infrastruktur und Tourismus*.

2.4 Nordstrandischmoor

Auf Nordstrandischmoor mit einer Fläche von 175 Hektar leben 21 Einwohner, darunter sind 15 Erwachsene und 6 Kinder, die sich auf fünf Haushalte auf vier Warften (Neuwarft, Amalienwarft, Halberwarft, Norderwarft) verteilen.[61] Befragt wurden seitens der soziologischen Begleitforschung 9 Bewohner.

2.4.1 Küstenschutz

Informationsfluss

Bezüglich des *Informationsflusses* über zukünftige Küstenschutzmaßnahmen äußern sich insgesamt 7 Bewohner. 3 Bewohner geben an, durch eigene Initiative an Informationen zu gelangen. 2 Bewohner beziehen ihre Informationen über den Küstenschutz von anderen Bewohnern.

Während 2 Bewohner die *Kommunikation mit den zuständigen Behörden* als gut empfinden, äußern sich ebenso 2 Bewohner gegenteilig und wünschen sich einen besseren Kontakt zu den Behörden und mehr Aufmerksamkeit für die Anliegen der Halligbewohner.

Als *Informationsquellen* geben 3 Bewohner die Gemeindeversammlung, Halligschau und Informationspapiere der Biossphäre an.

Bisherige Maßnahmen im Küstenschutz und Bewertung derer

Insgesamt äußern sich 9 Bewohner zu den *Warft-Erhöhungen und Anpassungen* als Küstenschutzmaßnahme. Während 7 Bewohner die Methodik der bisherigen Warft-Erhöhungen und Anpassungen beschreiben, betonen 6 Bewohner die Wichtigkeit dieser Küstenschutzmaßnahmen und 2 Bewohner kritisieren die bisherige Umsetzung der Warft-Erhöhung. 3 Bewohner äußeren Bedenken bzgl. der Finanzierung, da eine Warft-Erhöhung sehr teuer sei und deshalb nicht von Bewohnern der Warft getragen werden könne. 3 Bewohner sind der Meinung, dass eine Warft-Erhöhung nur noch bedingt möglich sei und man hierfür auf das Gewicht und den Untergrund achten müsse: „Also eine Warft-Erhöhung kann man auch machen, aber es kommt darauf an, wie die Warft beschaffen ist“.

Die Äußerungen in Bezug auf *Elastocoast* sind überwiegend gespalten. Insgesamt äußern sich 5 Bewohner zu dieser Maßnahme, die alle eine positive Einstellung gegenüber dieser Küstenschutzmaßnahme kundtun. Hervorzuheben ist hier, dass keine Beeinträchtigungen durch das

[61] Diese Angaben entsprechen einer telefonischen Befragung der Halligvertreterin.

Elastocoast genannt werden und die Verarbeitung des Materials von 4 Bewohner als einfach charakterisiert wird. Von diesen 5 Bewohnern äußern 3 Bewohner Kritik an der Haltbarkeit des Materials, da es schnell Schaden nehme.

5 Bewohner beschreiben und bewerten die *Holz-, Busch- und Steinlahnungen*, wobei jeder die Wichtigkeit dieser Maßnahmen nennt. 3 Bewohner betonen die Funktion der Lahnungen, den Wellenschlag zu verringern. Ebenso äußern 3 Bewohner Kritik an der Regelung, große Ausgleichsflächen im Gegenzug für den Lahnungsbau bauen zu müssen.

Die *Schotten* werden von 4 Bewohner bewertet, wobei alle vier Befragten die Wichtigkeit dieser Maßnahme betonen, besonders bei einer Sturmflut. Zudem geben die Interviewten an, Verschottungsmaßnahmen im Haus integriert zu haben. Ein Bewohner sagt, dass nicht alle Bewohner auf Nordstrandischmoor im Besitz von Schotten seien.

8 Bewohner beschreiben die Funktion des *Deckwerks und des Igels*, um die Halligkante zu sichern und betonen, dass sie gut funktionieren und ebenso wichtig seien. 3 Bewohner äußern sich in der Richtung, dass die Deckwerke und der Igel mehr Pflege bedürften und man den Bau erweitern müsse.

Die *Schleusen* werden von 2 Bewohnern genannt und für wichtig gehalten. Diese dienten dazu, um die Hallig nach einem Landunter zu entwässern und wenn dies langsam geschehe, trage es zum Wachstum der Hallig bei: „Und die Hallig soll ja auch aufwachsen. Und jedes Mal werden ja Sedimente auf die Hallig gespült und wenn man das Wasser lange stehen lässt, können die sich auch schön absetzen“.

2 Bewohner äußern sich dahingehend einen *Schutzraum* im Haus zu haben.

Neue Ideen und Vorschläge

Zu der Idee eines *hydraulischen Hauses* äußern sich insgesamt 8 der Befragten: Dabei lehnen 7 Bewohner diesen Vorschlag ab und ein Bewohner befürwortet den Vorschlag. Der Grund für die Ablehnung ist größtenteils das technische Risiko: „Und was ist, wenn die Hydraulik nicht funktioniert?“ Deshalb vermuten sie, dass das System sehr wartungsintensiv sei.

Von den 6 Bewohnern, die sich zu der Vorstellung von *schwimmenden Häusern* als künftige Küstenschutzstrategie äußern, lehnen 4 Bewohner diese Maßnahme ab und 2 Bewohner können sich eine solche Strategie vorstellen. Die Kritik äußert sich in dem geringen Vertrauen an die Funktionalität und in der Vorstellung, dass ein schwimmendes Haus nicht in das halligtypische Bild passe.

Mobile Wände werden von 5 Bewohner als neue Idee im Küstenschutz bewertet. Jeder von ihnen lehnt diese Maßnahme ab und die Bewohner argumentieren in der Hinsicht, dass die Wände nicht

die nötige Stabilität für die rauen Verhältnisse an der Küste mit Wellenschlag und starkem Wind besäßen.

Ein *Hochsetzten der Häuser oder Aufstocken* wird von 5 Bewohner genannt, davon äußern sich 3 positiv zu dieser Idee und einer von diesen habe bereits sein Haus dafür vorbereitet. 2 Bewohner äußern Bedenken, zum Beispiel: „Das hängt ab davon, wie alt das Haus ist“, oder: „Das Haus aufstocken ist für mich relativ – es würde das Fundament nicht mehr tragen“.

Zu der *Idee fest installierter durchsichtiger Wände* äußern sich 4 Bewohner. Von diesen lehnt ein Bewohner diese Idee ab, „[d]a würde man sich wie in einem Terrarium fühlen“. 3 Bewohner können sich solche Wände vorstellen. Sie merken aber an, dass diese dicht sein sollten, man die spezielle Beschaffenheit des Bauumfeldes beachten müsse und die Übereinstimmung mit dem Naturschutz und der Landwirtschaft gegeben sein sollte.

Einen *Ringdeich* um die Warft, speziell um die Wellen vor der Warft zu brechen, halten 2 Bewohner für vorstellbar.

Das Konzept von *Pfahlhäusern* wird von 4 Bewohner bewertet. 2 Bewohner können sich dieses Konzept als Küstenschutzstrategie nicht vorstellen, die beiden anderen Bewohner allerdings schon und sie sehen dies auch als Alternative zur Warft-Erhöhung.

Ein Bewohner äußert sich dahingehend, die *Schleusen* aktiv zu gebrauchen, um das Wachstum der Hallig zu fördern.

Gesetzliche Regelungen sollten nach Ansicht von einem Bewohner dem Küstenschutz mehr Rechte verleihen.

Ein Bewohner spricht sich dafür aus, die *Ausgleichzahlungen* direkt in den Küstenschutz fließen zu lassen.

Vor der Berme einen Igel zu bauen, schütze nach der Ansicht eines Bewohners die Halligkante vor weiteren Schäden.

Infrastruktureller Küstenschutz

4 Bewohner äußern sich zu den infrastrukturellen Maßnahmen, hierbei geben 3 Bewohner an, dass es wichtig sei, die *Straßen* zu sanieren und zu erhöhen. Es wird ebenso Bezug auf die *Brücken* genommen: „Bei uns auf der Hallig sind die Brücken alle marode“. Ein Bewohner kann sich Notstromaggregate auf der Hallig vorstellen.

Relevante Akteure im Küstenschutz

Die *Halligbewohner* sowie *spezifische Halligbewohner* werden als relevante Akteure im Küstenschutz von insgesamt 7 Befragten genannt: Um an dieser Stelle eine Anonymisierung der Bewohner zu wahren, sei nur darauf hingewiesen, dass von 4 Bewohnern vor allem 5 *spezifische Hallig-Bewohner* mehrfach genannt wurden und als relevante Akteure im Küstenschutz betrachtet werden.

Als relevanten Akteur im Bereich Küstenschutz sehen 7 Bewohner *das LKN.* Von diesen betonen 4 Bewohner die nötige Rücksprache mit den Halligbewohnern. Dem gegenüber hebt ein Bewohner hervor: „Und ansonsten das LKN, wo wir wirklich eine zuverlässige Instanz haben. Wo auch die Fachleute sitzen".

Auf eine *geteilte Entscheidungskompetenz* zwischen Halligbewohnern, dem LKN und Küstenschutzmitarbeitern legen 4 Bewohner wert. Ein Bewohner schließt explizit die Beteiligung von Politikern bei der Entscheidung über den Küstenschutz aus und ein Halligbewohner nennt die Halligschau und Gemeindeversammlung als wichtige Akteure im Küstenschutz.

Gesondert werden von 4 Bewohnern die *ehemaligen oder aktiven Küstenschutzmitarbeiter*, welche durch ihre Erfahrung besondere Entscheidungskompetenz hätten, als relevante Akteure im Küstenschutz bezeichnet.

Küstenschutzmaßnahmen im positiven oder negativen Zusammenhang zum Naturschutz[62]

Bezüglich des *Zusammenhangs zwischen Küstenschutz und Naturschutz* äußern sich 6 Bewohner. Von diesen Berfragten erwähnen 4 Bewohner, dass der *Küstenschutz immer schon im Einklang mit der Natur* gewesen sei und auch weiterhin bleiben müsse. Ein weiterer Bewohner fügt hinzu, dass ohne den Küstenschutz und die dazugehörigen Deckwerke, gar keine Natur da sei, die es zu schützen gelte. In diesem Zusammenhang kritisieren 2 Bewohner die vermeintlich ablehnende Haltung der Naturschützer gegenüber dem Ausbau und der Sanierung der *Deckwerke*. 2 Bewohner können die Kritik des Naturschutzes an der Verwendung des Teers in den Deckwerken verstehen, doch könnte dies nicht mehr beim Elastocoast geltend gemacht werden, diese Methode sei naturverträglich. Ebenso wird vereinzelt ein Konflikt zwischen dem Naturschutz und dem Küstenschutz beschrieben, wenn es um die *Entwässerung* der Hallig geht: „Und dieses Wasserloch, da gibt es auch Leute, die sagen, das muss nicht entwässert werden. Das muss entwässert werden, sonst wird es immer größer".

[62] Siehe hierzu auch den Themenkomplex *Naturschutz, Vereinbarkeit von Naturschutz, Küstenschutz und Halligen-Leben*.

Küstenschutzmaßnahmen im positiven oder negativen Zusammenhang zur Landwirtschaft

Bezüglich des Zusammenhangs zwischen Küstenschutz und Landwirtschaft äußert sich ein Bewohner, wonach die Methode eines *schwimmenden Hauses* nicht mit der Landwirtschaft zu vereinen sei, denn Tiere oder Maschinen ließen sich dann nicht unterbringen.

Küstenschutzmaßnahmen im im positiven oder negativen Zusammenhang zum Tourismus

Über den Zusammenhang zwischen Küstenschutz und Tourismus äußert sich ein Bewohner und ist der Meinung, dass *ein schwimmendes Haus* nicht in das typische Bild einer Hallig passe und so dem Tourismus schaden könne, weil Gäste abgeschreckt werden könnten.

2.4.2 Sturmflut und Landunter

Erfahrung und Beschreibung bisheriger Landunter

Insgesamt äußern sich 7 Bewohner zu den Erfahrungen und Beschreibungen bisheriger Landunter. Von diesen äußern sich 4, dass nur noch die älteren Bewohner sich der *Gefahr einer Sturmflut* bewusst seien, die jüngere Generation jedoch nicht. 2 Bewohner sagen, ein *Landunter im Sommer* sei für die Halligbewohner problematischer, weil man dann noch keine Vorkehrungen getroffen habe. 2 Bewohner äußern sich dahingehend, dass es sehr lange dauere bis man die Straßen nach einem Landunter wieder benutzen könne.

Weiterhin lassen sich die folgenden Einzelaussagen festhalten: Der *Rettungshubschrauber* sei, wenn einmal ein Notfall eintreffe, schnell bei der Warft. Ein Landunter sei in der modernen Zeit mit der Hilfe neuartiger und *zuverlässiger Wasserstandsvorhersagen* weniger gefährlich, da man sich besser vorbereiten könne. Für die Warft sei besonders der *Wellenschlag* während eines Landunters problematisch, da durch diesen die Warft beschädigt werde und man schneller Wasser im Haus habe.

Erkennungszeichen eines Landunter und Hilfsmittel zur Erkennung von Landunter und Sturmfluten[63]

Zu diesem Thema äußern sich 8 Bewohner. Um die Anzeichen eines Landunters zu erkennen, geben von diesen 8 alle an, sich hauptsächlich auf die *eigene Beobachtung* zu stützen, ebenso

[63] In diesem Themenbereich, vor allem hinsichtlich der genutzten Hilfsmittel zur Erkennung von Landunter, waren Mehrfachnennungen sowie die Nennung einer Hilfsmittelkombination möglich.

informieren sich alle beim *Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie*. 7 Bewohner geben an, sich mit Hilfe des *Internets* über die Wetterlage zu informieren.

Ein Bewohner gibt an, sich auf die Äußerungen *erfahrener Halligbewohner* zu verlassen und ein anderer Bewohner nutze das *Barometer* um Veränderungen der Wetterlage zu beobachten.

Als wichtiger Hinweis gilt bei 8 Bewohnern der Wasserstand und 5 Bewohner geben an auch die *Windrichtung und Windstärke* zu berücksichtigen.

Vorkehrungen vor einem nahenden Landunter

Insgesamt äußerten sich 7 Bewohner zu den Vorkehrungen vor einem nahenden Landunter. Hierbei wird ersichtlich, dass besonders *Landwirte* viele Vorkehrungen treffen müssen, so äußern sich 5 Bewohner, dass sie *zuerst die Tiere* und dann die *Maschinen* auf die Warft schaffen müssten und ein Bewohner gibt an, er habe nicht viele Vorkehrungen zu treffen, weil er kein Landwirt sei. 2 Bewohner geben an, die *losen Gegenstände* auf der Warft f*est zu machen* und das *Haus abzudichten*. Der Aussage einer weiteren Person ist zu entnehmen, dass man die *Gäste* warnen müsse.

Schäden bisheriger Landunter

Zu den Schäden bisheriger Landunter äußern sich 2 Bewohner. Einer von diesen spricht die regelmäßigen Schäden an den *Deckwerken* an, die es gelte zu reparieren, da die Hallig sonst mehr Schaden nehme. Die andere Person berichtet von einer Sturmflut, nach der viele Häuser zerstört gewesen seien und daraufhin neu gebaut worden wären.

Infrastrukturelle Maßnahmen und Bestände im positiven oder negativen Zusammenhang zu einer Sturmflut bzw. einem Landunter

Zu diesem Themenfeld äußert sich ein Bewohner und beschreibt, dass der *Rettungshubschrauber* sehr schnell zur Stelle sei, wenn man mal einen Notfall habe und das es gut sei ein Notstromaggregat vor Ort zu haben, sollte es einmal dazu kommen, dass der Strom während eines Landunters ausfalle.

Relevante Akteure und Management vor, beim oder nach einem Landunter

Bezüglich der relevanten Akteure, die bei einem oder nach einem Landunter das Management übernehmen könnten, um die Hallig wieder in einen normalen Zustand zurückzuführen, äußern sich

4 Bewohner. Alle von ihnen nennen hierbei das *LKN* als wichtigen Akteur. 3 Bewohner sagen, sie könnten sich auch ein *Team von Halligbewohnern* vorstellen. Um an dieser Stelle eine Anonymisierung der Bewohner zu wahren, sei nur darauf hingewiesen, dass vor allem 3 *spezifische Hallig-Bewohner* mehrfach genannt werden und als relevante Akteure im Küstenschutz betrachtet werden, da sie entweder ihres Alters wegen erfahren seien oder ihr Beruf ihnen eine gewisse Kompetenz verschaffe.

Landunter und Sturmfluten im positven oder negativen Zusammenhang zur Landwirtschaft

Ein Bewohner sagt, es sei für die *landwirtschaftliche Praxis* wichtig, wie viele Landunter sich über den Winter ereignen, da diese Schlick auf die Hallig tragen und sich dies auf das Wachstum des Grases auswirke und man dementsprechend überlegen müsse, welche und wie viele Tiere man auf die Weide stellen könne. Ein Bewohner spricht von der *Relevanz der Uferbefestigung für den Erhalt der landwirtschaftlichen Nutzflächen*, es bestehe sonst die Gefahr, dass Teile dieser Flächen bei einer Sturmflut abbrechen.

Sturmflut und Landunter im positven oder negativen Zusammenhang zum Tourismus

Einem Bewohner zufolge komme es vor, dass man vor einem Landunter die *Gäste* vor eben jenem warnen müsse. Besonders registrierte *Wattwanderer* gelte es rechtzeitig nach Hause zu schicken, so ein weiterer Bewohner.

2.4.3 Infrastruktur

Beschreibung der bestehenden Infrastruktur sowie bestehende Schwächen und Kritik an der bisherigen Infrastruktur

Insgesamt äußern sich 3 Bewohner zu der bestehenden Infrastruktur und Kritik an dieser: Die *Straßen* seien zu tief und würden regelmäßig sowie lange überflutet. Dabei bliebe Schlick auf der Straße zurück, der das Befahren gefährde. Ein Bewohner fügt noch hinzu, dass die *Brücken* auf der Hallig marode seien und dringend repariert werden müssten, man könne keine schweren Baumaschinen darüber transportieren. Ein Bewohner äußert sich zu der schwierigen und teuren *Schulsituation* für die Kinder und zu der schwierigen *ärztlichen Versorgung* besonders in der Nacht. Allerdings wird auch betont: „Man darf nicht erwarten, ich weiß, […] dass ich bei vielen Sachen Abstriche machen muss. Man muss immer wissen: Ich wohne hier freiwillig“.

Gewünschtes, Vorschläge und Idee bezüglich der Infrastruktur

Die *Sanierung der Straßen* und Brücken nennen 3 Bewohner. Des Weiteren äußert ein Bewohner, dass ein *Notstromaggregat* auf der Warft gut sei.

Vereinbarkeit von Infrastruktur und Naturschutz

Ein Bewohner führt aus, dass bei der Sanierung der Wasserleitungen hohe *Ausgleichszahlungen* erforderlich gewesen seien und das es ab und zu dazu komme, dass der Friedhof gesperrt werden müsse, weil auf ihm Vögel nisten.

Vereinbarkeit von Infrastruktur und Landwirtschaft

Die Infrastruktur auf der Hallig sei nach der Ansicht eines Bewohners sehr *teuer* in Stand zu halten, dies gelte insbesondere für landwirtschaftliche Gebäude.

2.4.4 Zentrale Akteure

Behörde

Innerhalb des Themenfeldes Behörde steht das *LKN* im Zentrum der Betrachtung, zu dem sich insgesamt 6 Bewohner äußern. 5 Bewohner betonen, dass das LKN immer *mit den Halligbewohnern zusammenarbeiten müsse*, dies sei besonders wichtig, wenn es um den Küstenschutz gehe. Dementsprechend äußern 4 Bewohner, dass das LKN ein *kompetenter und verlässlicher Akteur* im Küstenschutz sei. Ein Bewohner hebt diesbezüglich einen spezifischen Akteur des LKN hervor. Im Bereich des Küstenschutzes und der Erhöhung der Deckwerke setze sich das LKN mit dem Naturschutz auseinander, so die Aussage eines Bewohners.

Den Äußerungen von 3 Bewohnern ist zu entnehmen, dass das LKN ein zentraler Akteur ist, wenn es um die *Warfterhöhung* gehe. Ein Bewohner betont, dass er während der Erhöhung mit dem LKN über die letztliche Höhe der Warft hätte streiten müssen.

2 Bewohner betonen die wichtige Position des LKN auf der Hallig, da die Behörde für viele Bewohner der *Arbeitgeber* sei.

Bewohner allgemein

4 Bewohner betonen die Rolle derjenigen Bewohner, die im Küstenschutz tätig sind, diese sollten über den Küstenschutz mitentscheiden. Ein Bewohner hebt hervor, dass der Naturschutz nur funktioniere, wenn die Halligbewohner das Prinzip unterstützen.

Bewohner der spezifischen Hallig[64]

Es werden vier spezifische Bewohner namentlich von 3 Interviewten als besonders erfahren im Bereich des Küstenschutzes und Sturmfluten genannt, die *man um Rat fragen* könne.

Eine Person betont, dass auf Nordstrandischmoor alle Halligbewohner *hilfsbereit* seien.

Wissensakteure und Ingenieure

Bezüglich des *Erfahrungswissen der Bewohner im Gegensatz und Konflikt zu ingenieursbasierten/technikbasierten Wissen* äußern sich insgesamt 2 Bewohner. Sie plädieren dafür, dass Ingenieure mehr mit den Halligbewohnern zusammenarbeiten sollten.

Vertreter des Naturschutzes und der Biosphäre

Den Aussagen einer Person ist zu entnehmen, dass dieser die Naturschützer kritisiert. Nach ihm oder ihr seien sie nur in *geringem Maße kompromissfähig* und sie denken zu sehr an die technische Umsetzung ihrer Projekte, während sie die Auswirkungen dieser Projekte auf das Leben auf der Hallig vernachlässigen, was der Person zufolge, dem Umstand geschuldet sei, dass viele Naturschützer vom Festland kommen.

Zentrale Akteure im Bereich der Landwirtschaft

Spezifische einzelne Akteure werden von 2 Personen genannt. Dabei hebt eine Person die Relevanz der *jungen Landwirte* auf der Hallig Nordstrandischmoor hervor, diese setzten sich für die Landwirtschaft auf der Hallig ein.

Ebenso wird der *Bauernverband* genannt, der auf jeder Hallig einen Vertreter habe und sich damals für das Halligprogramm eingesetzt habe.

[64] Da aufgrund der Rücksichtnahme auf eine zu gewährleistende Anonymität der Bewohner hier keine spezifischen Namensnennungen möglich sind, wird im Folgenden lediglich die Häufigkeit der Namensnennungen aufgeführt.

Nach Ansicht einer Person sei der Kommunikationsweg mit dem *Landwirtschaftsministerium* für die einzelnen Landwirte sehr gut.

Bestehende und Nichtbestehende Kooperation der Akteure

Über *generelle gegenseitige Hilfeleistungen und eine allgemeine Nachbarschaftshilfe der Bewohner untereinander* äußern sich insgesamt 5 Bewohner: Diese geben Auskunft, dass man sich gegenseitig, vor allem in Not, verlässlich helfe und man jeden auf der Hallig fragen könne, um Hilfe zu bekommen. Dabei geben allerdings 4 Personen an, zuerst die Familie und Freunde zu fragen und man sich dann erst an einen erweiterten Kreis wende. Der Aussage eines Bewohners ist zu entnehmen, dass er selbst nachsehe, ob der Nachbar vor einem Landunter oder Sturmflut sein Haus sturmsicher gemacht habe.

2.4.5 Naturschutz

Einstellung zum Naturschutz allgemein und Naturverbundenheit

Man lebe *im Einklang mit der Natur* und nur so sei auch ein Leben auf der Hallig möglich, ist den aussagen von 3 Bewohner zu entnehmen.

Ein Bewohner betont, dass die eigene Familie schon lange auf der Hallig lebe, schon immer im Einklang mit der Natur gewesen sei und wenn man die Hallig durch Küstenschutzmaßnahmen vor Schäden bewahre, sei dies immer Naturschutz.

Der Angabe einer Person zufolge, werde auf den CO^2 Ausstoß geachtet.

Bewertung bzw. Positives und Kritik am Nationalpark und an der Biosphäre

Insgesamt geben zu diesem Themenbereich 3 Bewohner eine Bewertung ab: 2 äußern *Kritik an der Einstellung des Naturschutzes gegenüber den Küstenschutzmaßnahmen*. Der Naturschutz unterbinde beispielsweise den Bau oder die Reparatur der Deckwerke.

Des Weiteren werden verschiedene Einzelmeinungen geäußert. So empfindet ein Bewohner es als positiv, dass durch die Institution der Biosphäre die Halligen untereinander besser kommunizieren und *gemeinsam an Problemlösungen* arbeiten. Ein weiterer Bewohner hebt die *Jahresberichte* der Biosphäre hervor, die sehr informativ seien und mit denen man immer auf dem neuesten Stand sei, über das was im Küstenschutz geplant sei.

Gut sei aus der Sicht eines Bewohners, dass die gewählten *Bürgermeister* der Halligen die Leitung der Biosphäre inne hätten und die Angestellten zum größten Teil von den Halligen finanziert seien, sodass die Biosphäre von der Hallig kontrolliert werde.

Ein Bewohner betont, dass er es als schwierig empfinde, wenn die Naturschützer vom Festland kommen und nicht mit dem typischen Leben auf der Hallig vertraut seien. Dies führe des Öfteren zu Konflikten.

Eine Kritik richtet sich noch gegen die Maßnahmen, die die *Ringelgänse* betreffen. Wenn man das Gras lang wachsen lasse, hielten sich dort auch keine Gänse mehr auf.

Vereinbarkeit von Naturschutz und Landwirtschaft

Ein Bewohner schildert ausführlich die *Bedingungen*, die für die Landwirte bestünden, wann und wo welche Tiere auf die Weide gelassen werden können. Für die Zeit in der das Land brach liegen müsse, erhalte man *Entschädigungsleistungen*, hierzu merkt ein weiterer Bewohner an, das die Landwirtschaft ohne Subventionen und Entschädigungsleistungen auf der Hallig nicht mehr rentabel sei. Die erste Person merkt noch an, dass man inzwischen den Landwirten mehr *Kompetenzen* einräume, wenn es um die Entscheidung geht, die Tiere auf die Weide zu lassen.

Vereinbarkeit von Naturschutz und Tourismus

Zu diesem Bereich äußern sich 2 Personen. Die eine betont, dass die gesunde Natur auf der Hallig die Touristen locke, man aber auf der Hallig extra Bereiche habe, die nicht von Touristen betreten werden dürften, um die Natur zu schützen. Eine andere Person betont, dass der Tourismus auf der Hallig der Natur nicht schade.

2.4.6 Landwirtschaft

Geschichte der Landwirtschaft auf den Halligen

Zu der Geschichte der Landwirtschaft äußern sich 3 Bewohner. Diese sind allerdings einzelne Stellungnahmen. Eine Person beschreibt *Bewirtschaftungsrichtlinien* für die Anzahl der Schafe, die man pro Hektar Land halten dürfe. Ebenso wird erwähnt, dass sich damals die Landwirte im Bauernverband zusammengeschlossen hätten und sich für das Halligprogramm einsetzten. Früher sei die *Allmende* auf der Hallig rechtskräftig gewesen, inzwischen habe sich dies geändert und

jeder Landwirt habe seinen Privatbesitz. In früheren Zeiten habe man noch Kühe gehalten, doch sei dies nach in Kraft treten verschiedener *Gesetze* auf der Hallig nun nicht mehr möglich.

Bestehende Schwächen in der Landwirtschaft

Zu den bestehenden Schwächen der Landwirtschaft auf der Hallig äußern sich 3 Bewohner. Ein Kernbereich stellen hierbei die *Entschädigungsleistungen* und Subventionen. Zwar seien sie notwendig, da ohne sie die Landwirtschaft kaum rentabel sei: „Aber ohne dem, ist die Landwirtschaft kaum möglich. Man kann kein Geschäft mehr damit machen. Da muss man richtig viel Vieh haben. Wenn man Schafe haben wollte, dann müsste man 1000 Schafe und eine große Halle, wo man die abladen könnte. Das ist ja nicht möglich auf der Hallig. Dazu ist die Warft viel zu klein.“, doch führten die Subventionen, nach der Ansicht einer weiteren Person, auch zu Konflikten unter den Halligbewohnern, da manche davon ausgingen, dass die Landwirte Geld bekommen, obwohl sie nichts dafür täten.

Ein Bewohner betont, dass Rinder nicht mehr rentabel seien und man deswegen Schafe habe. Außerdem wäre es auf der Hallig kaum möglich, die *gesetzlichen Vorgaben* in der Landwirtschaft einzuhalten, da zum Beispiel Baumaßnahmen viel teurer wären, als auf dem Festland.

Gewünschtes und Ideen im Bereich der Landwirtschaft

Zu diesem Bereich gibt es eine Äußerung, die sich auf die *Mähprämie* bezieht. Nach der Ansicht von einer Person solle man sie anders Staffeln und leistungsbezogener umstrukturieren.

Vereinbarkeit von Landwirtschaft und Tourismus

Ein Bewohner äußert sich dahingehend, dass man als Landwirt zusätzliche Einkommensquellen erschließen müsse und hierbei das Vermieten von Ferienwohnungen für Touristen wichtig sei.

3 Zukunftswerkstätten

Die Workshops auf den Halligen Hooge und Langeneß wurden in Anlehnung an das Konzept der Zukunftswerkstatt konzipiert. Diese von den Zukunftsforschern Robert Jungk, Rüdiger Lutz und Norbert R. Müllert begründete Methode fokussiert eine Anregung der Phantasie, um mit neuen Ideen Lösungen für gesellschaftliche Probleme zu entwerfen. Die Entwickler der Methodik der Zukunftswerkstatt können beispielhaft an Erfahrungen aus der Praxis zeigen, welche Vorteile diese Methode zur kreativen Einbringung der Beteiligten hat.[65] Dabei ist die Zukunftswerkstatt besonders geeignet für die Gestaltung regionaler Prozesse, kann auf Gemeinde- bzw. Lokalverwaltungsebene hervorragend angewandt werden und ist ein wirkungsvolles demokratisches Bürgerbeteiligungsverfahren. Die Werkstätten sind als Foren der Artikulation und als Ermächtigung von denjenigen, die von Planung betroffen sind, gedacht. Menschen sollen so vom Objekt der Zukunftsplanung zum Subjekt ebendieser Planung werden und sich ausgehend vom lokalen Handlungskontext mit den technischen Möglichkeiten auseinandersetzen.

In einer Zukunftswerkstatt wird – im übertragenen Sinne, mit Vorstellungen und kreativen Ideen – an der Zukunft „gewerkt“, indem Beteiligte mit ihren Erfahrungen, ihren Wünschen und ihrem Wissen in die Entscheidungsfindung miteinbezogen werden und phantasievoll, frei sowie zukunftsorientiert Lösungen entfalten können.[66] Eine typische Zukunftswerkstatt beginnt mit der Vorbereitungsphase, in der die Gruppen gegründet, Themen sowie ein Zeitplan festgelegt, thematische Interessen ausgelotet und praktische Vorbereitungen getroffen werden. An diese Vorbereitungsphase schließen die drei Werkstattphasen an, beginnend mit der Kritikphase zur freien, ungezwungenen Äußerung von Unmut und negativen Erfahrungen. In der anschließenden Phantasiephase werden auf positive, kreative Weise Ideen, Vorschläge und Lösungen gesammelt. Nach der sowohl emotionalen als auch kreativen Entfaltung in der Kritik- und Phantasiephase stehen planerische und strategische Tätigkeiten in der Verwirklichungs- und Realisierungsphase im Vordergrund (Siehe Anhang 2).[67] Das Ziel dieser abschließenden Phase besteht darin, die Beteiligten zur Entwicklung von Projektentwürfen zu motivieren, indem gemeinsam abgeschätzt und geprüft wird, welche Vorhaben konkret Realisierungs- und Durchsetzungschancen haben.

Entsprechend dieser Methodik wurde ein Dialog zwischen den Halligbewohnern und den Ingenieuren hergestellt, damit das wertvolle Erfahrungswissen der Halligbewohner in die wissenschaftliche Expertise einfließen kann. Daraus können dann nachhaltige Strategien des Küstenschutzes und der Bewirtschaftung zukünftig entwickelt werden, die von hoher Akzeptanz auf der Hallig getragen sind, da die Halligbewohner selbst an dem Gestaltungsprozess mitwirken.

---

[65] Vgl. Jungk, Robert und Norbert R. Müllert. 1981: Zukunftswerkstätten. Hamburg: Hoffmann und Campe-Verlag.
[66] Vgl. Ebd.
[67] Vgl. Stracke-Baumann, Claudia. 2009: Nachhaltigkeit von Zukunftswerkstätten. Bonn: Stiftung MITARBEIT.

3.1. Die Zukunftswerkstatt auf Hooge

Insgesamt nahmen 22 Halligbewohner an dem Workshop auf Hooge am 17.06.2013 teil.

3.1.1 Kritikphase

In der Kritikphase galt es aufzuzeigen, was aus der Sicht der Workshop-Teilnehmer nicht passieren dürfe, wenn man nachhaltige Sturmflut- und Küstenschutzmaßnahmen auf der Hallig umsetzt. Die Teilnehmer konnten ihre Bedenken frei auf dazu ausgehändigten Zetteln notieren. An dieser Stelle gilt es darauf hinzuweisen, dass die seitens der Bewohner geäußerten Kritikpunkte teilweise im Widerspruch zueinander standen und im Folgenden somit Einzelmeinungen aufgezeigt sind, da kein homogenes Meinungsbild aller Bewohner geäußert wurde.

Im Nachhinein wurden die Kritikpunkte, ohne sie zur Diskussion zu stellen, direkt durch die Mitarbeiter des Instituts für Soziologie kategorisiert und zu positiven Rahmenbedingungen umformuliert.

Bei der Kategorisierung haben sich sechs Bereiche herausgebildet: Finanzen, Behörden, Landschaftsbild, Natur, Bevölkerung und Sonstiges.

Finanzen:

- Mit den vorab kalkulierten finanziellen Mitteln solle man die Küstenschutzmaßnahmen finanzieren können.
- Eingriffe in die wirtschaftlichen Verhältnisse der Hallig sollten nur durchgeführt werden, wenn die wirtschaftliche Gesamtsituation stabil bleibe. Die Hallig solle weiterhin effektiv zu bewirtschaften sein.
- Die finanzielle Belastung für die privaten Haushalte bzw. für die Warft-Bewohner solle nicht zu hoch ausfallen.

Behörden:

- Der Küstenschutz solle von Personaländerungen verschont bleiben, da dies ein wichtiges Berufsfeld für die Bewohner sei. Jeder Bürger solle von der Kreisverwaltung und dem Amt für ländliche Räume *((Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume/LLUR) gleich behandelt* werden.

Landschaftsbild:

- Bei der Umsetzung von nachhaltigen Sturmflut- und Küstenschutzmaßnahmen sollten die Folgen für das Landschaftsbild bedacht werden. Die Deiche und geplante Trennwände

sollten möglichst niedrig sein, damit der Effekt einer ‚Badewanne' ausbleibt. Zum Lebensgefühl gehöre, dass man das Meer sehen könne ((Dies bezieht sich vermutlich auf das Niedrighalten der Deiche sowie potentieller Trennwände)) und man sich mit dem Meer arrangieren müsse.

- Bauliche Maßnahmen sollten an das Lebensgefühl auf der Hallig angepasst werden und keinem Bollwerk gleichen. *((Hiermit ist vermutlich eine Vermeidung baulich massiver Küstenschutzmaßnahmen gemeint))*
- Bei Aufwarftungen solle Rücksicht auf traditionelle Bauwerke genommen werden, um die Wohn- und Baukultur der Hallig zu erhalten.
- Das natürliche Wachstum der Hallig solle beim Bau massiver Schutzmaßnahmen mitbedacht werden.
- Die für das Wachstum notwendige Sedimentation müsse mit dem Anstieg des mittleren Tidehochwassers gleichsam wachsen.
- Die Situation regelmäßig wiederkehrender Landunter gehöre unzertrennlich zum Landschaftsbild dazu.
- Zukünftige Küstenschutzmaßnahmen sollten sich nicht nur auf die Hallig beschränken, sondern die davor lagernden Sandbänke mitberücksichtigen.

Natur:

- Die Anzahl der jährlichen Landunter müsse mindestens konstant bleiben, da die Landunter wichtig für das Wachstum der Hallig seien.
- Die Salzwiesen müssten erhalten bleiben.
- Von dem Bau neuer Deiche solle man absehen, um mehr Landunter zuzulassen.
- Eingriffe in die Flora und Fauna sowie in die Vogelwelt der Halligen sollten möglichst vermieden werden.
- Küstenschutzmaßnahmen müssten immer mit der nötigen Rücksicht auf etwaige Folgen geschehen und in ihren Konsequenzen für die Natur niemals extrem sein.
- Wichtig sei auch das Wattenmeer, welches von negativen Auswirkungen unbelastet sein soll.
- Die Bedürfnisse der Hallig-Bevölkerung sollten im Zentrum bei den Überlegungen bezüglich neuer Schutzmaßnahmen stehen, erst danach folge der Naturschutz.
- Die Priele sollten weiterhin unter Kontrolle bleiben und sich nicht natürlich weiterentwickeln.

Bevölkerung:

- Die Planung neuer Maßnahmen bedürfe der Beteiligung der Halligbewohner.
- Die gleiche Behandlung für alle Halligbewohner solle gewährleistet werden.
- Die Wohnsituation, besonders in Gebäuden mit kultureller und historischer Tradition, könne durch Küstenschutzmaßnahmen gefährdet werden. *((Dies bezieht sich auf den Aspekt, dass diese Gebäude durch neue Maßnahmen nicht verändert werden sollten))*
- Die Menschen müssten bei Sturmfluten in Sicherheit sein.
- Das Bewusstsein für die Gefahren einer Sturmflut müsse den Halligbewohnern erhalten bleiben.
- Der Erhalt der sozialen Strukturen auf der Hallig sei wichtig.

Einige Aussagen konnten den oben genannten Kategorien nicht zugeordnet werden und sind im Folgenden unter dem Aspekt *Sonstiges* aufgeführt:

- Man solle nicht zu kleinteilig planen, sondern das Problem im Gesamten betrachten.
- Sturmfluten und Küstenschutz ständen in Verbindung zu vielen anderen Bereichen, die man beachten müsse, um adäquat zu handeln.
- Für Küstenschutzmaßnahmen sollten Firmen beauftragt werden, die ‚ok' sind. *((Dahinter verbirgt sich vermutlich eine Kritik an einigen bislang mit Küstenschutzmaßnahmen beauftragten Firmen))*
- Jede Warft brauche einen individuellen Küstenschutz.
- Die Planungen sollten bedacht geplant werden.
- Das Leben auf der Hallig und die Möglichkeit eines normalen Lebens sollten erhalten bleiben.
- Eine Hallig sei keine ‚Museumslandschaft'. *((Dieser Aspekt lässt sich mit der vorherigen Aussage inhaltlich verbinden, dass ein „normales" Lebens auf der Hallig erhalten bleiben sollte, ohne zu viele Einschränkungen))*
- Man solle die Folgen des Meeresspiegelanstiegs sachlich vermitteln und den Blick auf die Vorsorge und Sicherheit richten.

3.1.2 Phantasiephase

In der Phantasiephase galt es, den Ideen ohne Einschränkungen freien Lauf zu lassen. Die Teilnehmer sollten aufführen, was ihnen zu der Frage einfällt: „Was wären die besten nachhaltigen Sturmflut-/ und Küstenschutzmaßnahmen auf der Hallig, die dem Klimawandel Rechnung tragen?“ Auch ungewöhnliche bzw. vermutlich abwegige Ideen wurden explizit willkommen geheißen. Hierbei wurden die Teilnehmer in Kleingruppen von circa vier Personen eingeteilt und jeder bekam ein DIN-A4-Blatt, auf dem jeder zwei Ideen in jeweils eine Spalte aufschreiben konnte. Dieser Zettel sollte dann an den Nächsten in der Gruppe weitergegeben werden. Der Nächste konnte dann der Spalte nach die Ideen des Vorigen fortführen oder davon angeregt neue Ideen formulieren. So konnte in kürzester Zeit eine Vielzahl von Ideen generiert werden. Diese Ideenzettel sind im Folgenden ausgeführt, wobei a) und b) die jeweiligen Spalten kennzeichnen:

1. a) Eine sinnvolle Maßnahme sei es, das natürliche Wachstum der Hallig zu fördern.

– Das könne man, indem man mehr Landunter zulässt.

– Zusätzlich solle das Wasser langsam ablaufen, sodass mehr Sedimente sich setzten können.

b) Der Meeresspiegelanstieg solle verhindert werden.

– Dafür könne man ganz tiefe Löcher bauen, in die das Wasser hineinfließen kann.

– Indem man den Klimaschutz weltweit verbessere, wäre ein konstanter Meeresspiegel auch zu erreichen.

2. a) Eine schwimmende Warft solle errichtet werden.

– Oder man richte für die gesamte Warft ein hydraulisches Prinzip ein, das bei einer Sturmflut die Warft in eine sichere Höhe hievt.

– Nicht die Warften, sondern die Häuser sollten schwimmen können.

– Man könne in die Höhe bauen und die Häuser aufstocken.

b) Das Land hinter dem Deich solle erhöht werden.

– Die Sedimentation solle durch Landunter beschleunigt werden.

– Unter der Prämisse, die Bewohner nicht zu beeinträchtigen, solle das Wasser länger auf den Wiesen stehen gelassen werden.

– „Wovon sollen die Landwirtschaft und der Naturschutz existieren?“

3. a) Mit der gesamten Hallig solle man in die Südsee abwandern.

– Den Küstenschutz solle man schon auf den Sandbänken mit einem Wall beginnen.

– Erlebnistourismus auf den künstlichen Sandbänken solle ermöglicht werden, während das Naturschutzgebiet allerdings erhalten bleibe.

– Wälder sollten auf der Hallig angepflanzt werden, diese könnten auch als Rohstoff dienen.

b) Um den Wind abzufangen und den Tourismus zu fördern, könnte man Palmen auf der Hallig pflanzen.

– Die Sandbänke könnte man befestigen und die Wanderungen stoppen.

– Halligsand könne aufgeschüttet werden.

– Wenn man hundert Jahre warten würde, läge Japsand auf Hooge und Hooge würde dadurch wachsen.

4. a) Idee der hydraulischen Häuser: Dieser Vorschlag habe auch schon einen Ideenwettbewerb gewonnen.

– Diese Häuser könne man so errichten, dass diese durchspülbar sind.

– Bei dem Bau dieser Häuser könne man ein Wasserkraftwerk integrieren, um Strom zu erzeugen.

b) Eine flexible Ringdeicherhöhung könne gebaut werden, mit Aufsätzen, die wieder abgenommen werden können.

– Einen kleinen Deich könne man vor den Warften bauen, dieser könne vor allem den Wellenschlag minimieren.

– Die Wasserströmungen auf den Halligen könne man reduzieren, indem man zum Beispiel einen Wald oder einen Deich baue.

5. a) Die Sommerdeiche könne man komplett abschaffen und so gäbe es mehr Landunter, die dann Sediment mitbringen würden.

–Die Landwirte müssten für die Einkommensverluste entschädigt werden.

–Man könne die Häuser auf Platten bauen und diese dann bei einem hohen Landunter hochstemmen.

b) Die Sieltore solle man entfernen, um die Priele zu öffnen.

– Dann fördere man den natürlichen Rhythmus von Ebbe und Flut in den Prielen.

– Alle Bürger der Hallig sollten auf Boote umgesiedelt werden.

– Die ganze Hallig solle schwimmtauglich sein.

6. a) Man könne künstlich Eisberge im Nordpol schaffen, die Wassermassen binden.

– Die Eisberge würden Lebensraum für Tiere schaffen.

– Landunter habe man auch nur bei einer Flut: Warum schaffe man nicht Ebbe und Flut ab, um einen konstanten Meeresspiegel zu haben?

b) Die Wassermassen könne man bei erhöhtem Meeresspiegel kanalisieren und für ein Gezeitenkraftwerk nutzen.

– Die Energie könne man verkaufen und damit neue Maßnahmen finanzieren.

– Gezeitenkraftwerke könnten eine Alternative zu Offshore-Windparks im Nationalpark sein.

– Die Hallig könne dann autark mit Strom versorgt werden.

7. a) Das Hallig-Wachstum solle durch größere Sedimentablagerungen gefördert werden.

– Man könne die Sturmfluten effektiver nutzen, wenn man die Sieltore öffnet.

– Oder man könne das Wasser für unterirdische Gezeitenkraftwerke nutzen.

– Der Deich solle abgebaut werden, das fördere dann die Sedimentation und Stromproduktion.

b) Das Deich- und/oder Warftprofil solle man verändern, um die Kraft der Wassermassen zu mindern.

– Die Kraft könne man durch Wasser- und Sediment-durchlässige Igel verringern.

– Man könne Verdunstungsanlagen entwickeln, um das Wasser schnell los zu werden und das Sediment auf der Hallig zu halten.

– Dafür könne man unterirdische Heizungen auf den Fennen errichten.

– Man könne eine Modellregion schaffen für ein klimaangepasstes, nachhaltiges Leben auf den Halligen.

8. ***((****Eigene Zusammenfassung der vierten Gruppe:))* Wir lassen das Wasser auf der Hallig und nutzen dafür kleine Gezeitenkraftwerke, z.B. Turbinen anstelle von Sieltoren.

– Das eingebrachte Sediment fördere so das Halligwachstum.

– Für die Bewohner könnten angepasste Häuser entwickelt werden oder Hausboote.

– Wirtschaftsgrundlage sei die Entwicklung einer Modellregion für ein klimaangepasstes Leben an Gezeitenküsten: Internet, Tourismus, Ertrag aus Gezeitenkraftwerken.

9. a) Komplett wasserdichte Häuser solle man errichten, die Landunter verkraften.

– Das äußere Baumaterial sollte wasserdicht sein, z.B. durch spezielle Beschichtungen mit Aufsätzen für Fenster und Türen.

– Das traditionelle Äußere sollte nicht verändert werden und die Schotten solle man versteckt bauen.

– Die Häuser solle man höher bauen und hierfür alle Möglichkeiten nutzen und zusätzlich moderne Schotten integrieren.

b) Ausfahrbahre Ringdeiche solle man bauen, die nur bei zu hohen Sturmfluten hochfahren und nach einem Landunter wieder verschwinden.

– Der Ringdeich könnte mit Luftdruck und einer Pumpe betrieben werden.

– Der Ringdeich könnte mit Adaptern flexibel an die jeweiligen Wasserstände angepasst werden.

– Man solle mobile Hochwasserschutzwände auf den Warften nutzen.

10. a) Hydraulische Wände könnten mit dem Wasserstand hochschwimmen und die Warften schützen.

– Bei verschiedenen Wasserständen könnten die Wände diesen angepasst werden.

– Wände könnten bei Sturmflut um die Warften herum gebaut werden, die bei normalen Wasserständen im Boden verschwinden.

– Man könne die Wände schief errichten und mit den Dächern der Häuser verbinden, so hätte man einen kompletten Schutz,

b) Die Deckwerke des Deiches könne man auch flexibilisieren und der jeweiligen Belastung durch die Wellen anpassen.

– Die Steinhaube könnte dann höher werden, wenn hohe Wasserstände abzusehen sind.

– Oder durch flexible Deiche könnte man bei hohen Wasserständen gezielt einzelne Bereiche der Hallig fluten.

11. a) Die Warften könnten bei einer Sturmflut mit einer wasser- und sturmfesten Kuppel geschützt werden.

– Das Zelt könne in Form eines Schlauches bei normalen Gezeiten am Rand der Warft verstaut werden, sodass sich das Landschaftsbild nicht verändert.

– Der Schlauch könne dann bei Flut mit Wasser gefüllt werden, damit das Zelt nicht wegschwimmt.

– Die Zeltplane könne über Häuser und Autos verlegt werden und man müsse darauf achten, dass der Druck auf die Kuppel nicht zu stark werde.

b) Luftpolster um die Warft könne man errichten, die bei Bedarf aufgepumpt werden könnten.

– Eine aufpumpbare Schlauchwehr könne man an der Warftkante errichten.

– Den Schlauch könne man mit dem Wasser des Landunters füllen.

– Dann solle man allerdings einen Filter in die Pumpe einbauen, der die Tiere aus dem Meer schützt.

12. a) Die Außensände könne man bepflanzen und dadurch befestigen.

– An der Warftkante könne man dichte Büsche anpflanzen, die die Wellen brechen und die Warft schützen.

– Die Steinkante könne man bepflanzen.

– An die Außensände könne man Lahnungen bauen, damit diese schneller wachsen und die Hallig schützen.

b) Die Häuser der Hallig solle man mit dem Meeresspiegelanstieg mit wachsen lassen.

– Ausfahrbare Häuser könne man bauen, ähnlich den Pfahlbauten, die bei Bedarf hochgefahren werden könnten.

– Ein System für die Häuser könne man entwickeln, sodass an diese, wie bei „Lego“, beliebig angebaut oder höher gebaut werden könne.

– Hydraulische Häuser könne man bauen.

13. a) Wasserdichte Sockel könne man unter die Häuser bauen und vor den Häusern und Ställen könne man wasserdichte Schotten zum hochdrehen errichten.

– Mobile Schutzwände könne man zur Verfügung stellen, die ohne großen zeitlichen Aufwand auf- und abgebaut werden könnten und wenig Stauraum benötigen würden.

– Schotten und Wände solle man bauen, die dem Druck der Wellen und des Wassers standhalten.

b) Wenn die unterste Etage oft überflutet wird, solle man das Haus aufstocken und einen Ringdeich um die Warft in ausreichender Entfernung bauen.

– Eine Bootsverbindung solle man zwischen den Warften einrichten, wenn die Wasserstände hoch bleiben.

14. a) Je nach Bedarf könne man auf den Warften bei der nächsten Aufwarftung ausfahrbare Stahlwände anbringen.

– Auf die Außensände solle mehr Sand gespült werden, nach der Methode, wie es auf Sylt geschieht.

– Große Sandaufspülungen könnten als Wellenbrecher die Halligen schützen.

b) Wasserdichte Beschichtungen könne man auf die Häuser auftragen und Schotten an den Türen und Fenstern integrieren.

– Automatisierte Mechanismen könne man einrichten, die die Häuser bei hohen Wasserständen wasserdicht abschotten.

– Diese Systeme bräuchten einen manuellen Notfallauslöser.

15. a) Mobile Schutzwände könne man für jede Warft zur Verfügung stellen.

– Jedes Haus und die ganze Warft sollten damit geschützt werden können.

b) Die Sedimentablagerung vor der Hallig solle man fördern.

– Deiche an der Halligkante solle man zurückbauen.

– Deiche könne man so hoch wie möglich bauen, sowohl an der Halligkante als auch die Ringdeiche vor den Warften.

16. a) Die Warften müsse man an die höheren Wasserstände anpassen und Vorkehrungen treffen, um den Wellenschlag an der Warft zu verringern.

– Eine Berme könne man an der Warft bauen und einen Wall vor der Warft errichten.

– Einen Ringdeich solle man bauen.

b) Die Häuser solle man mit der Zeit an die höheren Wasserstände anpassen und höher bauen.

– Dabei müsse die halligtypische Bauweise beibehalten werden.

– Es solle vorher geklärt werden, was halligtypisch ist.

– Die Häuser könne man verstärken und flexible Schutzwände bauen, außerdem könne man das Land auf der Hallig bewirtschaften.

17. a) Mit Solarenergie könne man das Haus oder die ganze Warft hydraulisch hochfahren.

– Unter die Häuser könne man eine Vorrichtung zum Anheben bauen.

– Mobile, hydraulische oder mit dem Wasser auftreibende Schutzwände könne man auf der Warft integrieren.

b) In der Höhe könne man verstellbare Deiche um die Hallig bauen, die den Zu- und Ablauf des Wassers regulieren.

– Deiche solle man abhängig von den Pegelständen erhöhen.

18. a) Die Warften solle man mit der Zeit unter Einhaltung der halligtypischen Bauweise erhöhen.

– Um die halligtypische Substanz zu erhalten, könne man die Häuser aufstocken und das Untergeschoss verstärken.

– Die Häuser könne man auf eine Hebevorrichtung bauen.

b) Die Schleusen könne man manuell öffnen, um Landunter zu zulassen.

– Das Wasser bei einem Landunter solle man länger auf der Hallig halten und nur langsam ablaufen lassen.

– Durch das kontrollierte Öffnen der Schleusen könne das Halligwachstum gefördert werden.

– Sommerdeiche solle man auf MTHW +50cm begrenzen.

19. a) Einen Ringdeich könne man um die Warft errichten.

– Mit Hilfe von Buhnen könnten die Priele von der Halligkante ferngehalten werden.

– Den Ringdeich solle man in das Landschaftsbild integrieren.

– Eine Berme am Warftfuß könne man errichten.

– Einen Ringdeich könne man um die Warft bauen, der die gleiche Höhe wie die Warftkrone hat.

b) Den Wellenschlag an der Warft könne man durch raue Elemente an der Warftböschung verringern.

– Raue Elemente könne man auch auf der Fläche vor der Warft bauen.

20. a) Die Warft solle man soweit erhöhen, dass ein ausreichender Schutz bestehe.

b) Die Häuser solle man erhöhen und durch Neue ersetzen.

– Wenn es möglich ist, könne man die neuen Häuser mit hydraulischen Vorrichtungen versehen, um sie hochfahren zu können.

21. **a)** Auf der Hallig könne man Bäume anpflanzen, um die Wellen zu brechen. Holunderbäume hielten auch die Belastung durch das Salzwasser aus.

– Ein Wald auf der Hallig könnte Brennholz liefern.

– Einen Ringdeich um die Warften könnte man bauen.

b) Sandvorspülungen vor der Hallig könnte man schaffen, z.B. mit Sand aus der Elbvertiefung.

– Gezielt sollten neue Außensände geschaffen werden.

22. a) Neue Warften solle man bauen.

– Warften mit einer Höhe von 8m über MTHW solle man bauen.

– Häuser könne man auf Pfählen errichten.

b) Sandvorspülungen vor der Hallig zum Schutz dieser könne man errichten.

– Der Sand für diese dürfe nicht aus dem Wattenmeer stammen.

23. a) Das Wasser nach einem Landunter könne man mit Barrieren auf der Hallig halten, damit die Hallig schneller wachse.

– Häuser könne man bauen, die sich der Situation anpassen und auch ein Landunter überstehen könnten.

– Mit den Niederlanden könnte man kooperieren, um sich Ideen zu holen und nicht alleine vor dem Problem zu stehen.

– Die Hallig als Modellregion für alternative und dem Klimawandel angepasste Baukonzepte könne man anstreben.

b) Den Klimawandel müsse man verhindern, damit die Halligen nicht wachsen müssten.

– Mit der Menschheit solle man in den Weltraum ziehen.

– Bei neuen Maßnahmen müsse man möglichst ökologisch und klimafreundlich handeln, um den Klimawandel nicht zu beschleunigen.

– Klimaneutrale Baukonzepte müsse man entwickeln.

Nach dieser Phase sollten die Kleingruppen sich jeweils für vier Ideen von diesen Ideenzetteln entscheiden, um eine reduzierte Auswahl gezielt in der nächsten Phase diskutieren zu können. Dabei wurden die Gruppen aufgefordert, die betreffende Idee noch weiter auszuarbeiten bzw. mit anderen Ideen zu kombinieren.

Entstanden ist die folgende Liste:

1) Die Häuser unter Berücksichtigung der jeweiligen Bauweise und der typischen Struktur verstärken und anheben.

2) Sedimentation durch regelmäßiges Öffnen der Schleusen fördern, dadurch mehr Landunter zulassen und das Anwachsen der Hallig künstlich erhöhen.

3) Den Wellenschlag auf die Warften durch Raupflasterung der Deckwerke, eine hydraulische Erhöhung der Außenböschung oder Installationen am Warftfuß vermindern.

4) Einen Ringdeich, wie auf Gröde, um die Warft bauen, um den Wellenschlag zu verringern.

5) Bäume vor den Warften oder hinter dem Deich anpflanzen, die dann als Wellenbrecher fungieren.

6) Das „Wasser mit Wasser“ bekämpfen, indem man einen Schlauch an der Warftkante befestigt, der sich bei steigenden Wasserständen füllt.

7) Einen Sandwall vor den Sandbänken errichten, sodass dort die Wellen gebrochen werden.

8) Komplett neue Warften errichten, die mit einem hydraulischen System ausgestattet sind.

9) Die Warft mit ausfahrbaren Stahlwänden ausrüsten, die im Fall einer Sturmflut die Warft schützen. Diese könnten bei der nächsten Aufwarftung eingebaut werden.

10) Japsand und Norderoog könnten durch große Sandmengen vergrößert werden.

11) Mobile Schutzwände für die Warften zur Verfügung stellen, damit einzelne Objekte geschützt werden können.

12) Hochleistungspumpen auf den Warften zur Verfügung stellen und dazu einen Notfallgenerator, um diese zu betreiben und auch den Strombedarf der Bewohner sicher zu stellen.

13) Die Hallig als Modellregion integrieren: Dabei mehr Landunter zulassen und das ablaufende Wasser mit Gezeitenkraftwerken als Wirtschaftsfaktor nutzen.

14) Bei regelmäßigem Landunter die Häuser an diese Situation hydraulisch oder durch Hausboote anpassen.

15) Die Hallig Hooge als Modellregion für nachhaltigen Küstenschutz bekannt machen und dadurch einen ausschlaggebenden Wirtschaftsfaktor schaffen.

16) *- ((Diese Idee glich einer bereits vorgestellten Idee und wurde von der Gruppe zurückgezogen.))*

17) Als Wellenbrecher einen Ringdeich vor die Warft bauen.

18) Hydraulische Häuser bauen, die je nach Bedarf oder durch Wind- und Wasserkraft angehoben werden können.

19) Die Hallig im Winter in die Südsee abschleppen lassen.

20) Ausfahrbare Wände oder eine Kuppel um die Warft herum anbringen.

21) Die Häuser komplett abdichten, indem wasserfestes Material verwendet wird und Fenster und Türen abgeschottet werden.

22) Die Außensände verbinden und durch Bepflanzung verstärken. Dadurch die Sedimentation anregen und sie als Wellenbrecher nutzen.

Nach dieser Vorstellung wurden aus dem entstandenen reichhaltigen Ideen-Pool die fünf Vorschläge herausgegriffen, die am meisten Zustimmung von allen Teilnehmern der Zukunftswerkstatt fanden. Hierfür erhielten die Teilnehmer drei Karten mit drei Farben: Rot, Gelb und Grün. Rot bedeutete: Diese Idee lehne ich ab; Gelb: Dieser Idee stimme ich nicht ganz zu, aber in Teilen; Grün: Dieser Idee stimme ich zu.

Für jede Idee gab es eine Abstimmung. Um die Abstimmung auszuwerten, wurde jeder Farbe ein Punktwert zugeordnet: Rot = 0 Punkte, Gelb = 1 Punkt, Grün = 2 Punkte. Die Auszählung der Abstimmung ergab dann das folgende Ranking der fünf Ideen, die am besten abgeschnitten haben und die meiste Punktzahl bzw. Zustimmung erhielten:

1) Idee 22 mit 36 Punkten: Die Außensände verbinden und durch Bepflanzung verstärken. Dadurch die Sedimentation anregen und sie als Wellenbrecher nutzen.

2) Idee 3 mit 32 Punkten: Den Wellenschlag auf die Warften durch Raupflasterung der Deckwerke, eine hydraulische Erhöhung der Außenböschung oder Installationen am Warftfuß vermindern.

3) Idee 6 mit 32 Punkten: Das „Wasser mit Wasser" bekämpfen, indem man einen Schlauch an der Warftkante befestigt, der sich bei steigenden Wasserständen füllt und die Warft schützt.

4) Idee 17 mit 32 Punkten: Als Wellenbrecher einen Ringdeich vor die Warft bauen.

5) Idee 9 mit 30 Punkten: Die Warft mit ausfahrbaren Stahlwänden ausrüsten, die im Fall einer Sturmflut die Warft schützen. Diese könnten bei der nächsten Aufwarftung eingebaut werden.

3.1.3 Realisierungsphase

In der abschließenden Phase der Zukunftswerkstatt sollten die Teilnehmer den „Blick des Realisten" annehmen und die fünf präferierten Ideen spezifischer hinsichtlich einer Konkretisierung und potentiellen Umsetzung diskutieren. Dabei konnten die Gruppen die jeweilige Idee noch einmal ausführlich darstellen. Daraufhin konnte über die Idee diskutiert sowie mögliche Vor- und Nachteile angesprochen werden. Im Folgenden ist die Diskussion der Ideen dargestellt:

1. Idee: Die Bepflanzung der „Außensände"

Diese Maßnahme könne man bereits auf Norderoog beobachten und böte den Vorteil, dass sie neben dem Küstenschutz auch zum Naturschutz beitrage. Der Küstenschutz könne nicht nur auf die Warft beschränkt werden, sondern müsse (allein geografisch gesehen) früher beginnen, also bei den Sänden, da deren Erhaltung von besonderer Wichtigkeit sei.

Ein Problem, welches sich ergeben könne, entstehe bei vielen Sturmfluten, die die Sände gefährden. Trotz einer möglichen Bepflanzung könne der Sand nicht gehalten werden und werde so abgetragen. Die Frage sei dann, ob sich der Aufwand lohne.

Auf Sylt könne man es schon in positiver Hinsicht beobachten, dass mithilfe von Sand die Küste geschützt werden könne. Dort sei dies auch der einzig vernünftige Schutz. Allerdings müsse der Sand immer wieder neu aufgeschüttet werden. Um dem entgegen zu wirken, könne man über Beton als Befestigung nachdenken, welcher besonders gegen die tiefer liegenden Strömungen schütze, sodass der Sand nicht abgetragen werde. Die Verwendung von Steinen werde als schädlich betrachtet.

Diese Idee trage auch dazu bei, dass nicht nur die Warften geschützt werden, sondern ganz besonders auch das Wattenmeer, dessen erhalt das „A und O“ darstelle.

Damit der Sand nicht abgetragen werde, sei die Beachtung unterer Strömungen wichtig, welche hauptverantwortlich für das Abtragen des Sandes seien.

In diese Richtung müsse weiter geforscht werden. Auch über Pflanzen müsse man nachdenken, die bei Sand und Salzwasser genug Halt finden und überleben (evtl. Mangroven).

Der Sand, der zur Hallig kommt, müsse qualitativ hochwertig sein und dürfe das Ökosystem nicht angreifen (kein Hafenschlick).

Durch mehr Sand könnten sich die Sedimente im Wattenmeer verteilen. Wohin würde er dann bei einer Sturmflut gespült? Dies könne eventuell Verkehrswege behindern.

Hier werde Forschung benötigt, die sich mit Sand (-aufschüttung, -bepflanzung etc.) als Möglichkeit des Küstenschutzes beschäftigt.

2. Idee: Raue Deckwerke und hydraulische Erhöhung der Warft

Wenn man es „draußen“ nicht schaffe, die Welle aufzuhalten, sei diese Idee eine zweite Möglichkeit. Denn der Wellenauflauf sei auch bei niedrigem Wellengang massiv an der Warft. Wichtig hierbei sei, dass durch raue Deckwerke die Welle gebrochen werde und dadurch den Auflauf auf die Warft verringere.

Der Igel funktioniere auf eine ganz ähnliche Weise und müsse nun genau dorthin gebaut werden, wo der Wellenauflauf sei. Man könne auch den Igel erhöhen, sodass nur noch etwas Wasser rüber schwappe. Allerdings brauche die Hallig das Landunter.

Eine Berme habe sich in dieser Hinsicht bewährt.

Um die Wellen zu brechen, könne man auch Bäume anpflanzen (Holunderbäume sollten die Bedingungen aushalten).

An der Warft könne man auch, um die Wellen zu brechen, sogenannte „Wellenumlenker“ einbauen. Diese, wie eine Halbröhre konstruiert, könne man an der betroffenen Seite anbringen. Man ließe die Welle so reinlaufen und könne sie durch einen Mechanismus wieder zurückführen.

Man brauche dahingehend Versuchsstrecken, um eine optimale Lösung zu finden.

Die Raupflasterung solle nicht in alle Richtungen angebracht werden, sondern nur dort, wo sie besonders nötig sei. Sinnvoll sei dies im Bereich Nordwesten / Südwesten.

Dies solle nicht am Warftfuß, sondern am Warftkörper angebracht werden, denn dort komme die Welle an.

Mit der Idee der Erhöhung der Rauigkeit seien sichtbare und unsichtbare Lösungen beinhaltet.

Um die Optik zu wahren, solle sie bei Bedarf hydraulisch ausfahrbar sein.

Nicht jede Warft benötige den gleichen Schutz und so könne man verschiedene Sachen ausprobieren.

3. Idee: Einen Schlauch an der Warftkante, der sich bei steigendem Wasser auffüllt

Dieser müsse nicht zwingend rund sein, sondern könne der Warft entsprechend angepasst werden.

Ein Schlauch könne schnell aufgebaut werden und sei kostengünstig. Doch könne der Aufbau bei einer akuten Sturmflut sehr schwierig werden, da sehr viel Wind bestehe und diese Arbeit erschwere. Auch seien auf vielen Warften nicht genügend Menschen, um den Schlauch aufzubauen.

Zu bedenken sei, dass in einen Schlauch sehr viel Wasser passe. Wenn das Hochwasser kommt, sei es oft zu spät, weil es so schnell passiere und die Pumpen dafür zu schwach seien, rechtzeitig genügend Wasser in die Schläuche zu pumpen. So bräuchte man riesige Hochleistungspumpen, wenn diese mit „Sturmwasser“ gefüllt werden sollten. Ansonsten dauere das Auffüllen viel zu lange.

Könne man dies mit Windkraft verbinden und so die im Sturm vorhandene Energie nutzen?

Die Pumpen könnten sich mit Dreck vollsaugen und schnell kaputt gehen, dann wäre die Gefahr für die Warft sehr groß.

Man könne den Schlauch fest installieren.

Eine Alternative könne sein, die Schläuche mit Luft zu füllen.

Man müsse nun im Zuge einer Machbarkeitsstudie feststellen, wie viel Wasser man brauche und wo man es her bekomme.

4. Idee: Ein Ringdeich vor der Warft als Wellenbrecher

Man könne einen kleinen Wall vor der Warft aufbauen, der als weiterer Deich diene. Dies gebe es schon auf Gröde. Der Wall solle besonders die Welle brechen und sehe dazu noch gut aus. Wenn das Wasser zu hoch steige, sei innen eine Ablaufrille vorhanden. Die Wellen fielen hinein, darum solle dieser Wall recht dicht vor den Warften angebracht werden. Im Sommer habe man den Vorteil, auch gemütlich und (wind-)geschützt sitzen zu können.

Der Wasserstand in der Hallig dürfe allerdings keinesfalls höher werden als draußen.

Die Maßnahme könne den Vorteil haben, dass es ein Bauwerk sei, das sich an das Landschaftsbild anpasse und die Gebäude sowie sonstige Bauwerke unberührt blieben.

Ein Vorteil bestehe dadurch, dass nur einmal gebaut werden müsse und der Deich wäre dann so gut wie wartungsfrei; es kämen also nur geringe laufende Kosten auf einen zu.

Es hätte auch einen Vorteil für die Landwirtschaft, denn man könne das Vieh sichern. Es ließe sich darüber treiben.

Ein Problem könne sein, dass die Bebauung zu schwer für die Hallig sei.

5. Ausfahrbare Stahlwände zum Schutze der gesamten Warft

Man könne Stahlwände im Zuge einer nächsten Aufwarftung installieren, die hydraulisch geregelt aus dem Boden kämen, wenn ein Hochwasser bevorsteht. Diese könnten entweder an der Warftkante oder auf dem Ringdeich errichtet werden. Diese Idee ähnelt der „Schlauch-Idee“ bzw. der dritten diskutierten Idee.

Diese Idee könne sehr teuer sein, vor allem in der Wartung des Systems und so hohe Folgekosten mit sich bringen. Doch wären die Kosten höher, als bei einem Deich?

Ein Beispiel für solch eine Konstruktion finde man an der Donau.

An den Flüssen seien es allerdings mobile Stützwände, die nur bei Bedarf eingesetzt werden. Hier sei jedoch von einem vollautomatisierten hydraulischen Mechanismus die Rede.

Die Technik (Hydraulik) dürfe auf keinen Fall fehlerhaft sein! Somit sei generell die Fehleranfälligkeit ein großes Problem, wenn Strom oder Menschen benötigt werden. Eher solle es durch den Außendruck automatisch dazu angehalten sein, hoch zu fahren.

Wie hoch solle die Konstruktion werden? Reiche die Höhe von einem Meter? Man müsse sich zudem die Frage nach der Konstruktionstiefe stellen.

In Bezug auf mobile Wände müsse man daran denken, dass diese nicht aufgebaut werden könnten, da zu wenige Leute vorhanden seien.

Die Konstruktion könne nur aus Halterungsschienen und Plexiglaswänden beschaffen sein. Dies wäre schnell gemacht, müsse jedoch bereits vorher, bei Windstille, aufgebaut werden.

Die Wände könnten beispielsweise Ende September in die Halterungsschienen eingesteckt werden. Im Falle von Sturmfluten müssten dann lediglich die Zufahrten blockiert werden.

Es müsse leichtes Material sein, das auch ältere Leute tragen könnten.

Man könne sich fest installierte Doppel-T-Schienen vorstellen, in welche Wände gesteckt werden könnten. Dazu müsse evtl. ein Gerät vorhanden sein, welches die Montage unterstützt. Der Aufbau würde bei Wind sehr kompliziert werden.

Die Konstruktion müsse gerade dort aufgebaut werden, wo der Wellenschlag aufgehalten werden soll.

Das wäre dann aber kein Schutz für die Warft, sondern ein reiner Innenschutz, sodass kein Wasser ins Haus gelange.

Probleme könnten sich dadurch ergeben, dass Stahlwände bei Binnengewässern funktionieren, die Hallig jedoch von offenem Meer umgeben ist, sodass man die Wellen mitberücksichtigen müsse. Die Wände müssten also den Druck der Wellen aushalten.

Resümee Prof. Dr. Schüttrumpf (IWW RWTH-Aachen):

Die fünf ausgewählten Ideen könnten in einer Machbarkeitsstudie ausgewertet werden. Dabei könnten sich auch Kombinationsmöglichkeiten der verschiedenen Maßnahmen ergeben. Es gebe auch Möglichkeiten die Ideen zu erweitern, z.B. die Idee der „schwimmenden Schläuche“ mit der Schlauchwehr-Produktion in Aachen. Man müsse sich dabei auch folgende Fragen stellen: Wie lange könne bzw. müsse man aufpumpen? Wie schwer dürften diese Schläuche sein? usw.

Für den Ringdeich könne ein Unterwasser-Wellenbrecher als Vergleichsmodell dienen. Hier könne man sich auch den vorhandenen Küstenschutz auf Gröde ansehen.

Im Falle der Raupflasterung sei der Wellengang das zu beseitigende Problem, weniger der Wasserstand an sich. Wo seien hier die Bereiche an der Warft, die für solch eine Pflasterung in Frage kämen?

Auch könne man prüfen, wie die Maßnahmen zu finanzieren seien.

Prof. Dr. Häußling (IfS RWTH-Aachen) stellt ein Wiederkommen in Aussicht und dass die ausgewerteten Informationen zugänglich gemacht werden.

3.2 Die Zukunftswerkstatt auf Langeneß

Insgesamt haben 31 Personen an dem Workshop auf der Hallig Langeneß am 18.06.2013 teilgenommen.

3.2.1 Kritikphase

In der Kritikphase galt es aufzuzeigen, was aus der Sicht der Workshop-Teilnehmer nicht passieren dürfe, wenn man nachhaltige Sturmflut- und Küstenschutzmaßnahmen auf der Hallig umsetzt. Die Teilnehmer konnten ihre Bedenken frei auf dazu ausgehändigten Zetteln notieren. An dieser Stelle gilt es darauf hinzuweisen, dass die seitens der Bewohner geäußerten Kritikpunkte teilweise im Widerspruch zueinander standen und im Folgenden somit Einzelmeinungen aufgezeigt sind, da kein homogenes Meinungsbild aller Bewohner geäußert wurde.

Im Nachhinein wurden die Kritikpunkte, ohne sie zur Diskussion zu stellen, direkt durch die Mitarbeiter des Instituts für Soziologie kategorisiert und zu positiven Rahmenbedingungen umformuliert. Bei der Kategorisierung haben sich acht Bereiche herausgebildet: Bauliches, Sicherheit, Landschaftsbild, Natur, Wirtschaft und Finanzen, Organisatorisches, Wohnsituation, Sonstiges.

Bauliches:

- Die Deckwerke, besonders die aus Elastocoast, sollten stabil sein und zusammenhalten.
- Die Warftböschung sowie die Deckwerke sollten weniger steil gebaut werden, damit der Wellenschlag an Kraft verliere.
- Die Baumaßnahmen sollten sich in das typische Bild der Hallig einfügen. *((Diese Aussage lässt sich verbinden mit geäußerten Meinungen unter der Kategorie „Landschaftsbild“))*
- Die Baumaßnahmen sollten das Anwachsen der Hallig fördern.
- Die Deckwerke sollten niedrig bleiben, damit die Aussicht auf das Meer gesichert ist.

Sicherheit:

- Aus Sicherheitsgründen solle der Küstenschutz an erster Stelle stehen, erst nachdem die Sicherheit gewährleistet sei, solle man über den Naturschutz nachdenken.
- Die Menschen sollten auch weiterhin bei einer Sturmflut in Sicherheit sein.

- Die Schutzmaßnahmen sollten wirksam sein, aber weiterhin das Leben auf der Hallig ermöglichen. *((Dies betrifft den Wunsch, wenige Einschränkungen sowie Veränderungen im alltäglichen Leben auf den Halligen durch neue Küstenschutzmaßnahmen zu erfahren))*

Landschaftsbild:

- Das Typische der Hallig sei, dass sie aus verschiedenen Warften bestehe und ein bestimmtes Erscheinungsbild habe, dies solle gewahrt bleiben.
- Das Landschaftsbild solle so bleiben, wie es ist.
- Die Hallig müsse weiterhin eine Hallig bleiben und ihre typischen Merkmale behalten.

Natur:

- Der Naturschutz und die Lebensqualität sollten erhalten bleiben.
- Bei der Durchführung von Küstenschutzmaßnahmen solle an die Natur gedacht werden.
- Die Arbeiten am Küstenschutz sollten besonders in der Brutzeit Rücksicht auf die Vögel nehmen.
- Weiterhin sollten sich Bruterfolge bei der Vogelpopulation ergeben. *((Diese Aussage lässt sich mit dem vorherigen Aspekt verbinden, dass bei Küstenschutzarbeiten Rücksicht auf die Brutzeiten der Vögel genommen werden sollte))*

Wirtschaft und Finanzen:

- Der Kostenaufwand für private Haushalte solle gering sein.
- Die finanziellen Mittel sollten in die Forschung und den Küstenschutz fließen, aber ebenso in die Bereiche Bildung, Arbeit, Gesundheitswesen und Infrastruktur.
- Die Flächen für die landwirtschaftliche Nutzung sollten ihre derzeitige Größe beibehalten.
- Die wirtschaftliche Nutzung der Hallig solle gewährleistet sein.

Organisatorisches:

- Das Interesse der Gemeinschaft solle bei den Planungen im Vordergrund stehen.
- Es solle mit den Bewohnern der Hallig über geplante Maßnahmen gesprochen werden und Ratschläge auch angenommen werden, wenn sie gemacht würden.

- Die Planungen sollten fehlerfrei sein.
- Die Bewohner sollten in die Entscheidung über Küstenschutzmaßnahmen einbezogen werden.
- Die Behörden sollten die Erfahrungen der Halligbewohner nutzen.
- Die Halligbewohner sollten über die Küstenschutzmaßnahmen befragt werden.

((Die in dieser Kategorie geäußerten Meinungen beziehen sich überwiegend auf einen Einbezug der Halligbewohner in Küstenschutzangelegenheiten und stehen überwiegend im Einklang zueinander))

Wohnsituation:

- Die Hallig solle weiterhin Lebensraum für Menschen bieten.
- Die Küstenschutzmaßnahmen sollten den Alltag der Halligbewohner unbeeinflusst lassen. *((Ähnliches wurde bereits in Bezug zu der Kategorie „Sicherheit" ausgesagt))*
- Die Hallig solle weiterhin bewohnbar sein.
- Auf der Hallig sollten lebensfähige Bedingungen herrschen.

Einige Aussagen konnten den oben genannten Kategorien nicht zugeordnet werden und sind im Folgenden unter dem Aspekt *Sonstiges* geführt:

- In der Zukunft solle es immer noch Landunter geben.
- Die wissenschaftliche Begleitforschung solle weitergeführt werden.
- Ein Abtrag der Hallig durch Strömungen solle verhindert werden.

3.2.2 Phantasiephase

In der Phantasiephase galt es, den Ideen ohne Einschränkungen freien Lauf zu lassen. Die Teilnehmer sollten aufführen, was ihnen zu der Frage einfällt: „Was wären die besten nachhaltigen Sturmflut-/ und Küstenschutzmaßnahmen auf der Hallig, die dem Klimawandel Rechnung tragen?" Auch ungewöhnliche bzw. vermutlich abwegige Ideen wurden explizit willkommen geheißen. Hierbei wurden die Teilnehmer in Gruppen von je vier Personen eingeteilt und jeder bekam ein DIN-A4-Blatt, auf dem jeder zwei Ideen in jeweils eine Spalte eintragen konnte. Dieser Zettel sollte dann an den Nächsten in der Gruppe weitergegeben werden. Der Nächste konnte dann der Spalte nach die Ideen des Vorigen fortführen oder davon angeregt neue Ideen formulieren. Mit

dieser Methode konnte in kürzester Zeit eine Vielzahl von Ideen generiert werden. Diese Ideenzettel sind im Folgenden ausgeführt, wobei a) und b) die jeweiligen Spalten kennzeichnen:

1. a) Es könne ein doppelter Ringdeich als Wellenbrecher errichtet werden.
– Dabei solle der Ringdeich aber nicht höher werden als die Warft, um so den Blick auf das Meer zu bewahren.
– Durch automatische Schutzwände auf dem Ringdeich, an der dem Meer zugewandten Seite, könne dieser noch effektiver werden.
b) Die Igel könnten mit rauem Pflaster versehen werden, um so der Welle Kraft zu nehmen.
– Die Igel könnten flacher gebaut werden, um den Wellenschlag zu verringern und auch vor der Warft könnte ein Igel eingesetzt werden.

2. a) Die Warften könnten erhöht werden.
– Zusätzlich könnten sie abgeflacht werden, um den Wellenlauf zu reduzieren.
– Außerdem könnten Ringdeiche um die Warften gebaut werden.
– Die Ringdeiche bräuchten dann im Osten einen Auslauf, denn die Angriffsfläche sei im Westen.
b) Man könne auch passiv verbleiben und die Natur selbst wirken lassen.
– Das Sichern der Halligkante und die Warftverstärkung seien äußerst wichtig.
– Es müsse etwas gegen die Kräfte der Natur, die die Hallig gefährden, getan werden.

3. a) Es könnten Hubwände in die Warften eingebaut werden, die bei Sturmflut automatisch hochfahren.
– Hubwände seien technisch viel zu kompliziert.
b) Man könne einen Ringdeich um die Warften bauen.
– Die Häuser, die diese Möglichkeit zulassen, könne man neu bauen und aufwarften.
– Die Aufwarftung solle mindestens anderthalb Meter betragen, könne aber durchaus auch noch höher ausgeführt werden, wenn es denn ins Warftbild passe.

4. a) Bei der Verstärkung der Warften könne ein flacherer Böschungswinkel gewählt werden.
– Bei küstennahen Warften könne flach und rau gepflastert werden und vorgelagerte Lahnungen sollten großzügig erhöht werden.
– Für die Verstärkung der Warften könnten auch Häuser eingerissen werden.
– Diese könnten dann zusätzlich wasserdicht wieder aufgebaut werden.
b) Man könne einen Ringdeich errichten.
– Warften könnten höher und flacher gebaut werden, die Häuser könnten dann auf den circa anderthalb Meter höhergelegenen Warften neu errichtet werden.

– Die flacher angelegten Igel sollten rau gepflastert werden.
– Hubwände könnte man an der Warftkante einbauen.

5. a) Es könnten regulierte Schleusentore aufgebaut werden, die zu zielgerichteter Überflutung, Sedimentation und Ablauf des Wassers eingesetzt würden.
– Sedimentreiches Wasser könne nach einem Landunter auf der Hallig gelassen werden, welches die Sedimentation fördere.
b) Lahnungen könnten vor der Hallig errichtet werden, um diese besser gegen den Wellenauflauf zu schützen.
– Diese könnten auch verstellbar sein, um sie zielgerichteter einsetzen zu können.
– Die Strömungen vor der Hallig könnten durch Hindernisse verlängert werden, umso mehr Sediment abfangen zu können.
– Kleine Wellenbrecher könnten im Vorland aufgebaut werden sowie größere Lahnungen.

6. a) Die Sedimentation auf den Halligen sollte verstärkt werden.
– Dies könne durch gezielte Be- und Entwässerung bei Landunter erreicht werden.
– Bei ablaufendem Wasser könne mit Sieben das Sediment herausgefiltert werden.
b) Es könne der Schutz der Warften und der sich darauf befindenden Häuser verbessert werden.
– Die Warft könne durch neue Ringdeiche, um die gesamte Warft, geschützt werden.
– Man könne die Warften verbreitern, um den Wellen-Auslauf zu ermöglichen und die Hauser sollten erhöht werden sowie der übrige Raum innerhalb der Warft aufgeschüttet werden.
– Mobile Spundwände bzw. Hochwasserschutzwände könnten bei Sturmfluten auf den Warften zur Verfügung stehen.

7. a) Es sollten sturmflutfeste Häuser auf den Warften errichtet werden.
–Die Häuser könne man durch eine Pfahlkonstruktion sichern.
–Die Wohnungen könnten auf der Pfahlkonstruktion neu aufgebaut werden, während Parterre und Keller zugebaut werden sollten.
b) Die Landsicherung könne verstärkt vorangetrieben werden und durch eine zusätzliche Landgewinnung im Vorland ergänzt werden.
– Das Vorland könne auch durch Bepflanzung gesichert werden.
– Ergänzt werden könne die Landgewinnung durch den Bau zusätzlicher Lahnungen.
– Es wäre möglich die Lahnungen flexibel zulassen, um sie den Strömungen anzupassen und so eine höhere Effektivität zu gewinnen.

8. a) Die Warften könne man bis zur derzeitigen Höhe der Ringdeiche erhöhen und verbreitern.

– Die Häuser müssten dann neu errichtet werden.
– Bei einem Neubau könnten die Häuser auf einem vertikal verschiebbaren Mechanismus gegründet sein.
– Bei der Bemessung der Höhe könne ein ausreichender Sicherheitspuffer eingeplant werden.
b) Um Sedimente anzulagern, sei es möglich, das Wasser am schnellen Ablaufen zu hindern und mehr Sedimentfallen in Gräben einzurichten.
– Man könne sicherstellen, dass besonders Wasser mit hohem Sedimentgehalt auf die Hallig strömt und dieses dann am schnellen Ablaufen hindern, damit sich die Sedimente setzten könnten.
– Eine gezielte Bepflanzung könne die Ablagerung von Sediment befördern und so ein Wachstum der Hallig begünstigen.
– Durch die Einrichtung von Staubecken könne die Hallig auch gezielt und unabhängig von Landunter überflutet werden, um so das sedimentäre Wachstum zu beschleunigen.

9. a) Die Mittel zum Schutz der Warften könnten auch temporär errichtet werden.
– Man könne internationale Baufirmen kontaktieren, die Erfahrung mit der Verbauung von Naturmaterialien vorweisen könnten.
– Es könne auf den Warftböschungen auch Material ausgeflockt werden.
b) Der Bau von höhenverstellbaren Häusern wäre eine Möglichkeit.
– Diese Höhenveränderung könne durch Hydraulik erreicht werden.
– Alternativ könnten schwimmende Häuser gebaut werden, so wie es sie im Nildelta und in Bangladesch gebe und sich mit den Menschen dort austauschen.
– Es solle viel Holz verwendet werden, also weiche Baustoffe (Stichwort Ständehäuser).

10. **a)** Die Warftböschungen könne man abflachen.
– Man könne Baggerlöcher und Gräben sichern.
– Das Deckwerk könne durchlässig angelegt werden.
– Eine weitere Sicherung könne durch eigenverantwortliche Bewirtschaftung erreicht werden.
b) Es könnten Ringdeiche angelegt werden.
– Bei einer Sicherung der Häuser könnten Fethinge (Wasserspeicher) zum Problem werden.
– Möglich wäre auch eine Konstruktion mit Pfahlbauten.
– Eine Erhöhung der Warften als Ganzes sei eine Maßnahme.

11. a) Um die komplette Hallig könne eine Elastocoast-Steinkante gezogen werden.
– Alternativ könne nicht nur eine komplette Steinkante errichtet werden, sondern das ganze Deckwerk durch eine Erhöhung dem Klimawandel angepasst werden.
– Es sei möglich, das Deckwerk bis ins Watt zu ziehen, um den Wellenschlag zu verringern.

b) Wenn das Land die Kosten übernehme, sei eine Warfterhöhung inklusive Neubau des Hauses möglich.

– Die Häuser könnten auch auf einer an Sturmfluten angepassten Ständerkonstruktion errichtet werden.

12. a) Durch eine Erhöhung der Warften könne der Schutz vor einer Sturmflut optimiert werden.

– Diese Erhöhungen könnten mit einem Zwei-Komponenten-Deckwerk im oberen Bereich versehen werden.

– Alternativ könne eine Warftverstärkung auch durch leichtere Baustoffe erreicht werden, damit das Gewicht der Warft verringert werde.

b) Eine weitere Möglichkeit sei die Konstruktion mobiler Schutzwände für den Einsatz auf den Warften.

– Diese könnten eingesetzt werden, wenn sie einfach zu handhaben seien.

– Hilfreich sei auch eine selbstständige Höhenregulierung der Schutzwände durch Rohrverbindungen.

13. a) Es könne ein Deich von Sylt bis Eiderstedt errichtet werden.

– Ergänzt werden könne dieser durch schwimmende Sturmflut-Tore.

– Er solle mit vielen großen Schleusen versehen werden, die nur bei Sturmflut geschlossen werden. So blieben Ebbe und Flut erhalten.

– Außerdem könnten durch gezielte Bewässerung Sedimente auf die Hallig gespült werden.

b) Die Warften könnten durch auftreibende Wände erhöht werden.

– Man bräuchte schöne große Warften mit viel Platz für Mensch und Tier.

14. a) An der Halligkante und an den Warften könnten Gabionen angebracht werden.

–Hinter den Körben solle mit Erde aufgefüllt werden.

–Man solle Sand für den Wattsockel einfangen, mit dem die Halligkante gesichert werden könnte.

b) Das Wasser könne bei einem Landunter durch Buschlahnungen auf der Hallig beruhigt werden.

– Die Sedimentation könne durch Muschelbänke im Watt gefördert werden.

– Um die Sedimentation auf der Hallig zu fördern, könne man das Wasser während des Landunters beruhigen.

15. a) Man könne die Sieltore öffnen, um sedimentreiches Flutwasser auf die Hallig zu bringen.

– Die Halligkanten könnten renaturalisiert werden, sodass sich Sedimente zum Beispiel in Muschelbänken fangen.

– Man setze auf natürlichen Schutz, indem der Muschelbestand geschützt wird. Dafür schränke man die Muschelfischerei ein.

b) Man könne den Sommerdeich neubauen.

– Im Sommerdeich könnten Durchlässe eingebaut werden.

16. a) Die bestehenden Häuser könnten aufgestockt werden, sodass die jetzigen Erdgeschosse der Häuser als Keller genutzt werden könnten.

– Die Heizungen müsse man dann allerdings nach oben verlegen.

– Ölheizungen solle man wasserdicht machen, damit kein Öl das Meer verschmutzen könnte.

– Neubauten könnten als Pfahlbauten errichtet werden, so wie das ‚Seglerheim' auf Hooge.

b) Die Warften bzw. die Menschen auf den Warften könne man durch den Einsatz von Spundwänden schützen.

– Diese Spundwände oder Schotten könne man so errichten, dass sie maschinell verschließbar wären, so wie in der Hafencity in Hamburg.

– Es könnten auch mobile Schutzwände eingesetzt werden, so wie z.B. an der Elbe.

– Die Schutzwände könne man auch automatisieren, sodass sie ohne menschliches Eingreifen ausführen.

17. a) Der Küstenschutz könne im Einklang mit den Gegebenheiten des Meeres gestaltet werden: Dazu überdenke man das Konzept der Sommerdeiche und Sieltore und lasse vielleicht wieder mehr Überflutungen zu.

– Bedenkenswert wäre auch, die Sieltore umzudrehen, sodass Wasser auf die Hallig gelassen und das Abfließen gebremst werde.

– Die Steuerung der Sieltore könne dafür verbessert werden. Vielleicht könne eine Fernsteuerung eingebaut werden.

b) Es könne die Sedimentierung durch ein gezieltes Auftragen beschleunigt werden.

– Besonders die tiefliegenden Flächen könnten mit Baggergut aufgefüllt werden.

– Die hierfür notwendigen Sedimente könne man durch die Ansiedlung von Muschelbänken gewinnen.

18. a) Die Häuser könne man im Erdgeschoss überflutbar gestalten.

– Alternativ könne man die Häuser im Erdgeschoss auch komplett abdichten.

– Oder man könne sie auf Stelzen stellen.

– Man könne mobile Schutzwände für besonders hohe Sturmfluten bereithalten, so wie es heute auch schon an einigen Flüssen praktiziert werde.

b) Man könne Schutzräume errichten, die auch tatsächlich einen wirkungsvollen Schutz bieten würden, selbst bei Komplettüberflutung der Warften.
– Es sei auch zu überlegen, ob bei extremen, katastrophalen Überflutungen nicht auch eine Evakuierung möglich wäre, wofür dann wirkungsvolle Pläne aufgestellt werden müssten.
– Möglichkeiten der Selbstrettung könne man bereitstellen.

19. a) Es könne ein Deich von Eiderstedt bis Sylt gebaut werden.
– In die Warftkronen könne man hydraulische Spundwände einbauen.
– Vor den Warften ließen sich Wellenbrecher errichten.
– Eine weitere Möglichkeit wären hydraulische Häuser.

20. a) In die Warftkronen könne man hydraulische Spundwände einbauen.
– Weitere Sandbänke könne man errichten.
– Ein Rettungsboot könne in jedem Haus vorhanden sein.
b) Außerdem könnten künstliche Sandvorspülungen hilfreich sein.

21. a) ***((****Um die sehr knappen Ausführungen des einundzwanzigsten Ideen-Papiers nicht fehlerhaft zu interpretieren, werden diese Notizen nachfolgend als Stichpunkte wiedergegeben, wie sie auch notiert wurden:))* Wasserwand – Spundwände – mehr Landgewinnung – Rettungsinsel – Rettungsmaßnahmen.

22. a) Vor den Warften könne man Wellenbrecher errichten.
– Die Warften könne man stärker abflachen.
– Wellenbrecher könne man auch vor den Halligen und Inseln errichten.
– Es könne ein Deich von Eiderstedt bis Sylt gebaut werden.

23. a) Die Häuser könne man so umrüsten, dass sie hydraulisch versiegelbar sind.
– Die Raupflasterung könne verbreitert und erhöht werden.
– Weitere Wellenbrecher könne man errichten.

24. a) Das Deckwerk könne durch Pflanzen verstärkt werden.
– Tetrapoden könnten am Deckwerk angebracht werden.
– Außerdem könne man mehr Schleusen im Deckwerk einbringen.
– Die Schleusen könne man gezielt managen.
b) Es bestehe die Möglichkeit, die Warften zu erhöhen.
– Die Häuser könnten mit einem Schutzmantel umgeben werden.

– Weiterhin solle das Wasser wieder öfter hereingelassen werden, da häufigeres Landunter für mehr Sedimentierung sorge.

25. a) Es könne ein Deich von Amrum bis nach Sylt gebaut werden.
– Oder es könne ein Deich von Sylt bis Eiderstedt erbaut werden, in den ein Gezeitenkraftwerk integriert werden könne.
– Sandvorspülungen könnten einen zusätzlichen Schutz für die Hallig bieten.
b) Vor den Warften könne man Wellenbrecher errichten.
– Die Halligen könnten auch künstlich aufgeschlickt werden, indem zusätzlicher Schlick bei Landunter dem Wasser zugeführt werde.
– Die Priele könnten mit künstlichen Seitendeichen versehen werden, um die Sedimentierung zu befördern.

26. a) Die Warften könnten mit klappbaren Schutzwänden umgeben werden.
– Mehr Sediment könne auf die Hallig gebracht werden.
b) Der Warftsockel könne erhöht werden.
– Man könne mehr Lahnungen verbauen.
– Hochklappbare Deckwerke könne man errichten.

Nach dieser Phase sollten die Kleingruppen sich jeweils für vier Ideen von diesen Ideenzetteln entscheiden, um eine reduzierte Auswahl gezielt in der nächsten Phase diskutieren zu können. Dabei wurden die Gruppen aufgefordert, die betreffende Idee noch weiter auszuarbeiten bzw. mit anderen Ideen zu kombinieren.
Entstanden ist die folgende Liste:

1) Der Bau eines Deiches von Sylt bis Eiderstedt.
2) Eine automatische Erhöhung der gesamten Warft mittels Wasserkraft.
3) Optimierung der Warftverstärkung durch Abflachung, Rauhigkeitselemente / Wellenauflauf reduzieren und Häuser anheben.
4) Das Errichten einer Elastocoast-Kante um die gesamte Hallig.
5) Muschelfischerei einschränken, sodass sich die Schutzwälle regenerieren können.
6) Durchlässige Sommerdeiche.
7) Flexible Schutzwände auf den Warften, am besten hydraulisch gesteuert.
8) Wirkungsvolle Schutzräume in den Häusern errichten.
9) Eine schonende Erhöhung des Vorlandes, z.B. durch eine stärkere Bepflanzung.
10) Verstärkung der Sedimentation durch Stützbecken und regulierende Tore.

11) Konstruktiver Schutz der Warft und der Häuser durch mobile Spundwände und erhöhte Pfahlbauten.
12) Hydraulische Spundwände auf der Warft.
13) Wellenbrecher vor den Warften.
14) Hydraulisch anhebbare Häuser.
15) Priele eindeichen, damit das Wasser länger steht; einströmendes Wasser anreichern.
16) Bewachsene Deckwerke.
17) Schleusen managen, um den Zu- und Abfluss bei Landunter zu kontrollieren.
18) Deich von Sylt bis Eiderstedt, Öffnung mit Gezeitenkraftwerken.
19) Starke Abflachung der Warften mit höheren Häusern.
20) Kontakt mit anderen Ländern, die dieselbe Problematik aufweisen.
21) Doppelter Ringdeich, hauptsächlich auf der Westseite.
22) Komplette Warfterhöhung (mindestens um 1,5 Meter).
23) Abbremsen der Wellen durch flachere Igel.

Nach dieser Vorstellung wurden aus dem entstandenen reichhaltigen Ideen-Pool die fünf Vorschläge herausgegriffen, die am meisten Zustimmung von allen Teilnehmern der Zukunftswerkstatt fanden. Hierfür erhielten die Teilnehmer drei Karten mit drei Farben: Rot, Gelb und Grün. Rot bedeutete: Diese Idee lehne ich ab; Gelb: Dieser Idee stimme ich nicht ganz zu, aber in Teilen; Grün: Dieser Idee stimme ich zu.
Für jede Idee gab es eine Abstimmung. Um die Abstimmung auszuwerten, wurde jeder Farbe ein Punktwert zugeordnet: Rot = 0 Punkte, Gelb = 1 Punkt, Grün = 2 Punkte. Die Auszählung der Abstimmung ergab dann das folgende Ranking der fünf Ideen, die am besten abgeschnitten haben und die meiste Punktzahl bzw. Zustimmung erhielten:

1) Idee 3 mit 57 Punkten: Optimierung der Warftverstärkung durch Abflachung, Rauhigkeitseinfluss / Wellenauflauf reduzieren und Häuser anheben.
2) Idee 2 mit 49 Punkten: Automatische Warfterhöhung durch Wasserkraft.
3) Idee 22 mit 47 Punkten: Komplette Warfterhöhung / Neubau.
4) Idee 8 mit 45 Punkten: Wirkungsvolle Schutzräume in den Häusern einrichten.
5) Idee 18 mit 44 Punkten: Einen Deich von Sylt bis Eiderstedt und Öffnung desselben mit Gezeitenkraftwerken.

3.2.3 Realisierungsphase

In der abschließenden Phase der Zukunftswerkstatt sollten die Teilnehmer den „Blick des Realisten“ annehmen und die fünf präferierten Ideen spezifischer hinsichtlich einer Konkretisierung und potentiellen Umsetzung diskutieren. Dabei konnten die Gruppen die jeweilige Idee noch einmal ausführlich darstellen. Daraufhin konnte über die Idee diskutiert sowie mögliche Vor- und Nachteile angesprochen werden. Im Folgenden ist die Diskussion der Ideen dargestellt:

1. Idee: Optimierung der Warftverstärkung durch Abflachung, Rauhigkeitseinfluss / Wellenauflauf reduzieren und Häuser anheben

Der Wellenauflauf auf der Warft solle reduziert oder verhindert werden. Die Warft müsse man in jedem Fall erhöhen, so sollten auch direkt die Häuser in diesem Zuge angepasst werden.

Doch wer übernehme die Kosten für den Bau? Es könne extrem teuer werden, wenn die Häuser neu gebaut werden müssten.

Daraufhin wendet ein Teilnehmer ein, dass im Jahr 1962 die Baumaßnahmen auch bezahlt worden seien bzw. vielleicht gebe es auch dieses Mal günstige Kredite durch das Land.

Ein Problem sei, dass die jetzigen Häuser teilweise unter Denkmalschutz stünden.

Es wurde die Frage an die anwesenden Wasserbau-Ingenieure gestellt: Müsse man etwas einbauen, um den Wellenauflauf zu reduzieren? Und wie wirksam seien eine Abflachung und raue Deckwerke? Ein anwesender Wasserbauexperte hielt die Idee für durchführbar: Der Wellenauflauf könne reduziert werden; das sei bewiesen und auf der Ockenswarft habe man, um dem Problem zu begegnen, eine Berme eingebaut.

Was sei jedoch mit dem Gewicht des Warftkörpers? Dieser könne durch das gestiegene Gewicht nachgeben und die Häuser könnten Risse bekommen.

Man könne doch Polyesterkörner einbauen oder Lufträume zur Gewichtsreduktion.

Ein doppelter Ringdeich löse dieses Problem des Wellenauflaufs, aber wie viel koste ein Ringdeich plus die Häuser?

Ein Neubau wäre wohl günstiger, als ein extremer Umbau der Warften.

Gehe es bei Idee 1 und Idee 3 nicht um die gleichen Maßnahmen?

Wo nehme man die Erdmassen zur Realisierung dieser Idee her?

2. Idee: Automatisches Anheben der Warft durch Wasserkraft

Die Warft solle so bleiben, wie sie sei. Rundherum solle ein Schacht ausgehoben werden, wo ein Hohlkörper reingebaut werde. Dann solle die Warft durch eine Art Schwimmer hochgetrieben werden. So verändere sich nicht das Äußere. Vorteil der Konstruktion wäre, dass man dies immer wieder aufrüsten könne.

Man müsse an die Auffahrten denken. Die Lösung dafür sei, dass die Auffahrten teilweise mit angehoben werden könnten.

Ein Problem könne auch sein, dass die Warft durch das Wasser aus der Fassung gerate oder die Erde zu instabil werde oder es klemme (technisches Risiko). Das Material müsse auch sehr stabil sein. Man sei demensprechend skeptisch gegenüber der Wirksamkeit der Technik. Was, wenn es nicht funktioniere? Man fühle sich nicht sicher, wenn das System störungsanfällig sei.

Eine regelmäßige Kontrolle und Wartung sei selbstverständlich notwendig. Was sei mit einem Betonschacht, wie zum Beispiel an der Kirchwarft?

Was geschehe, wenn das Rohr verstopft?

Die Wartungskosten seien ein zentrales Problem.

Das Wasser, welches bei einer Sturmflut dann das Haus anheben solle, habe nicht genügend Druck, um die Häuser anzuheben. Wie schwer seien letztlich die Wände und welche Auswirkung könne das haben? Wie solle so ein Getriebe funktionieren, sodass es den enormen Wasserdruck ausgleichen könne?

Die Häuser seien durch die Maßnahme geschützt, aber was sei mit der restlichen Hallig? Diese werde bei der Maßnahme außer Acht gelassen.

3. Idee: Komplette Warfterhöhung / Neubau

Dies sei eine bekannte Methode, bei der man schon viele Erfahrungen gemacht habe und welche bis jetzt funktioniere. Die Häuser und Warften müssten neu gebaut werden.

Doch man könne die Erde der Hallig nicht unendlich belasten.

Wenn alle Häuser auf der Warft neu gebaut werden müssten, gäbe es das Problem, dass einige Häuser unter Denkmalschutz stünden, wiederum andere Neubauten seien. Der Denkmalschutz und die Koordination bei mehreren Häusern bzw. Hausbesitzern pro Warft könnten dann Schwierigkeiten bereiten. Bei dem Neubau müsse man auf eine leichte Bauweise achten, allerdings ohne billiges Material zu verwenden.

Es bliebe – wie bei dem Ringdeich – ein Kostenfaktor.

Beim Ringdeich solle man den Sand nicht aus dem Wattenmeer, sondern woanders herholen. Der Küstenschutz solle den Naturschutz integrieren, ansonsten könnten Probleme für den Küstenschutz durch Auflagen des Naturschutzes aufkommen.

4. Idee: Wirkungsvolle Schutzräume in den Häusern einrichten

Durch Schutzräume werde zwar die Warft und die Hallig nicht geschützt und das Problem nicht gelöst, ein Schutzraum helfe auch nicht, wenn man „Papptüren und -fenster“ in den Häusern habe, doch sollten alle Stricke reißen, habe man einen Ort, an dem man auf Hilfe warten könne. Dieser Schutzraum könne zum Beispiel durch feste Stahltüren, die mehr Schutz böten als die Bisherigen, Sicherheit gewährleisten.

Dies *((die Besorgung von Türen und Fenster))* könne doch jeder selber organisieren.

Die Bauweise der gesamten Warft und der dem Küstenschutz dienlichen Bauwerke auf der Hallig seien wichtiger als Stahltüren.

Es könne etwas die Tür versperren, sodass man nicht mehr heraus kommt. Dann müsse ein großer Vorrat *((Essen und Trinken))* in den Schutzräumen vorhanden sein.

Die seit 1962 bestehenden Schutzräume seien erfahrungsgemäß zweckentfremdet worden.

5. Idee: Einen Deich von Sylt bis Eiderstedt und Öffnung desselben mit Gezeitenkraftwerken

Dies sei eine alte Idee, die schon in der ersten Hälfte des zwanzigsten Jahrhunderts aufgekommen sei.

Die Verbindungslinie Sylt – Eiderstedt sei gar nicht so abwegig.

Die Idee sei mit dem Wattenmeer und dem Nationalpark nicht vereinbar.

Das Landschaftsbild sei dadurch gefährdet. Es hieß *((in den kategorisierten Formulierungen aus der Kritikphase))*, „das Landschaftsbild soll erhalten bleiben“ und genau dies sei dann nicht gegeben.

Der Vorteil sei aber doch, dass durch diese Idee die Natur auf der Hallig, der Schutz der Warft und die halligtypischen Häuser auf einen Schlag gesichert wären.

Eine Alternative könne ein Deich sein, der nicht komplett dicht sei, sondern an ausgewählten Stellen mit hochfahrbaren Toren versehen wäre.

Man könne den Deich vielleicht nicht ganz bauen, sondern sektionsweise.

Eine Teilnehmer-Gruppe plädierte während der Diskussion für integrierte Sturmfluttore. Dazu seien keine Eingriffe in die Natur nötig. Insgesamt habe niemand durch diese Baumaßnahme mit Einschränkungen zu rechnen. Es wäre eine große, umfassende Lösung.

Der springende Punkt komme mit den Kosten. In Venedig habe das bei einer viel kleineren Fläche bereits 4 Mrd. Euro gekostet.

Ein negatives Beispiel sei der Pellwormer-Damm, der durch Interessengruppen verhindert worden sei, sodass auch bei dieser Idee der Einigungsprozess sehr schwierig werden könne.

Für Gezeitenkraftwerke sei der Tidedruck zu gering.

Resümee Prof. Dr. Jensen (fwu Siegen):

Die Ideen seien sehr interessant und man werde sich mit ihnen auseinandersetzten. Er wolle aber den Fokus auf einen anderen Punkt lenken: In Anbetracht der Lage, werde der direkte Schutz der Warften und Halligen nicht ausreichen, denn die Halligen wüchsen nicht schnell genug mit. Also sei es ebenso wie der Schutz der Halligen und Warften wichtig, Maßnahmen in Betracht zu ziehen, die sich damit beschäftigen, die Sedimentation und das Anwachsen der Hallig zu fördern. Hierbei müsse man auch daran denken, dass besonders die Landunter wichtig seien, um Sedimente auf die Hallig zu tragen. Doch müsse man auch weiter erforschen, wo diese Sedimente herkämen und wie sie sich mit dem Ansteigen des Meeresspiegels verändern.

Resümee Prof. Dr. Schüttrumpf (IWW RWTH-Aachen):

Die fünf ausgewählten Ideen könnten in einer Machbarkeitsstudie ausgewertet werden. Dabei könnten sich auch Kombinationsmöglichkeiten der verschiedenen Maßnahmen ergeben. Es gäbe auch Möglichkeiten die Ideen zu erweitern. Auch könne man prüfen, wie die Maßnahmen zu finanzieren seien.

Prof. Dr. Häußling (IfS RWTH-Aachen) stellt ein Wiederkommen in Aussicht und dass die ausgewerteten Informationen zugänglich gemacht werden.

4 Expertenbefragung

Zur Evaluation des Projektes wurden in der Endphase der Projektlaufzeit insgesamt vier Experteninterviews mit den beteiligten Projektpartnern und einem Vertreter der projektbegleitenden Gruppe durchgeführt. Um jegliche Fachexpertise der interdisziplinären Zusammenarbeit abzudecken, wurden die Interviews im Bereich des Wasserbauingenieurwesens, der Geologie/Sedimentologie und mit der landesbehördlichen Zuständigkeit durchgeführt.

Dabei orientierten sich die Fragestellungen an einer *Bewertung der Projektzusammenarbeit*, *einer Bewertung der Projekterkenntnisse* und an den *Zukunftsperspektiven für die Halligen*. Im Folgenden ist die Auswertung der Interviewaussagen zu den *Zukunftsperspektiven für die Halligen* wiedergegeben, da diese im Hinblick auf das Forschungsvorhaben besonders relevant sind.

Die *Zukunftschancen der Halligen*, *unter Berücksichtigung des Klimawandels und unter den derzeitigen Küstenschutz- und Bewirtschaftungsstrategien*, wurden unterschiedlich bewertet. Auf die Frage nach den Zukunftschancen für die Halligen (unter den derzeitigen Bewirtschaftungs- und Küstenschutzstrategien und in Anbetracht des Klimawandels) gibt der interviewte Sedimentologe zwei Antworten: Zum einen könne dieser die Frage – nach insgesamt sechs Jahren Forschung auf den Halligen – nicht ernsthaft und ehrlich beantworten, zumindest nicht mit „gut“, „schlecht“, „50%“ oder „90%“. Was der Interviewte sagen könne, sei, dass es verschiedene Probleme gebe, mit denen die Halligen sich auseinandersetzen müssten, um weiter als bewohntes Habitat zu existieren. Dabei sei entscheidend, dass junge Leute auf den Halligen gehalten werden und auch Offenheit gegenüber Hinzuziehenden bestehe, um die Halligen als bewohnbar aufrecht zu erhalten. Zum anderen sei ein Aspekt die technische Sicherheit, um dort zu wohnen, unter sich verändernden hydrologischen Rahmenbedingungen, wie den faktisch ansteigenden Meeresspiegel. Im Kontext dessen könnten mehr oder weniger schlimme Sturmfluten sowie ein häufigeres Landunter eintreten. Jedoch ist der Interviewte optimistisch und sieht eine gute Prognose für die Halligen, zumindest für die nächsten Dekaden. Eine Einschätzung für die Zeit darüber hinaus hält der Interviewte für unseriös und schwierig, sodass man die Situation weiter beobachten müsse, um irgendwann eine grundlegende Entscheidung treffen zu können, ob man die Warften weiter erhöhe, Deiche baue oder einen anderen Weg finde, den natürlichen Anpassungsprozess mit der Landunter-Sedimentation so zu nutzen, dass die Halligen langfristig weiterhin in einem Gleichgewicht mit dem Meeresspiegel stünden, wie das die letzten fünfhundert Jahre gewesen sei.

Der interviewte Wasserbauingenieur ist der Überzeugung, dass die Halligen, wie auch Sylt, nie aufgegeben werden, da dies politisch nicht gewollt sei und diese Gebiete aus verschiedenen Aspekten interessant seien und dazugehören würden. So werde man auch den Küstenschutz auf den Halligen weiter fördern und Wege finden, um die Halligen zu erhalten, auch wenn die Belastung in den kommenden Jahren steigen werde. Jedoch ist der Interviewte auch der Meinung, dass man die

Halligen besser schützen könne und dies auch kommen werde. Dabei hinterfragt er, ob man die Warften wirklich weiter erhöhen wolle oder man nicht mit mobilen, aufschwimmbaren Wänden die Warften versuchen solle zu schützen. Dies sei eine Akzeptanzfrage, sodass die wissenschaftliche Seite Angebote und Konzepte empfehlen könne, diese aber schlussendlich das LKN und die Halligbewohner umsetzen würden. Wenn dieser Interviewte an den Klimawandel denke, gehe er von einer halben bis einen Meter Wasserstandsteigung in den nächsten siebzig, achtzig Jahren aus, wobei man dies anpassen könne. Alles darüber hinaus wisse er und „wir auch alle nicht".

Aus der Sicht des LKN-Mitarbeiters haben die Halligen eine Zukunft, solange es noch Menschen gebe, die dort leben wollen, auch in Anbetracht des Klimawandels. Dabei müsse auch unter anderem seitens der Verantwortlichen des LKN die Schaffung einer Bewirtschaftungsgrundlage unterstützt werden, gerade im Bereich des Tourismus. Zudem sollten auch größere Anstrengungen unternommen werden, damit die Halligen mit einem vermeintlichen Meeresspiegelanstieg mitwachsen könnten. Insgesamt ist dieser Interviewte der Meinung, dass auch im Hinblick auf den Klimawandel und Meeresspiegelanstieg ein Leben auf der Hallig möglich sei. Jedoch müsse man sich um die Warften, Gebäude und besonders die Schutzräume kümmern, damit kommende Generationen auf den Halligen leben könnten.

Der interviewte Ministerialvertreter der projektbegleitenden Gruppe schätzt die gegebenen örtlichen Schutzmaßnahmen als nicht ausreichend ein, vor allem hinsichtlich einer potentiellen, alles bisherige übertreffenden Sturmflut. Dieses Restrisiko, unabhängig vom Klimawandel, sei auf den Halligen vorhanden und man müsse abwarten. Als Beispiel nennt er die Vorhersagen bei der Sturmflut „Xaver", die über einen Zeitraum derartig gravierend gewesen seien, dass man sich ernsthafte Sorgen gemacht habe und es am Ende niedriger abgelaufen sei, als vorhergesagt. Jedoch sei dadurch deutlich geworden, dass es keine absolute Sicherheit, vor allem nicht für die Warften, gebe und die Menschen Eigenverantwortung übernähmen und dies auch müssten. Für die Zukunft wird seitens dieses Interviewten in Anbetracht des gegenwärtigen Systems ein Erfordernis gesehen, gemeinsam mit den Halligbewohnern, den politischen Institutionen und der Verwaltung zu agieren.

Abschließend wurden folgende Aspekte zu *alternativen Küstenschutz- und Bewirtschaftungsstrategien, unter Berücksichtigung des Klimawandels und der Projektergebnisse,* genannt: Der interviewte Sedimentologe plädiert dafür zu sorgen, dass die Halligen regelrechter bewässert werden und dass man Landunter zulasse sowie nutze, um die ankommenden Sedimente effektiv verteilen zu können. Dies bedeute, dass die Sedimente, die über die Hallig-Kante hauptsächlich eingetragen werden, nicht von dieser Hallig-Kante abgehalten werden dürften. In diesem Kontext müsse man die Rau-Streifen, die so genannten Hallig-Igel, kritisch überprüfen und möglicherweise niedriger bzw. rückbauen, um beispielsweise Erosionsschäden zu vermeiden.

Als die beste alternative Küstenschutzstrategie werden seitens des interviewten Wasserbauingenieurs die „aufschwimmbaren Wände“ genannt, die durch den Wasserdruck erhöht werden, hochgehen und um die Halligen gebaut werden könnten, beispielsweise in Form von Schlauchsystemen oder auch Stahlwände, die aufschwimmen. Bedingungen für ein funktionieren dessen sind aus seiner Sicht, dass diese Systeme von einer Person händelbar, robust und kostengünstig seien. Zudem gibt dieser Interviewte Auskunft, dass für die Halligbewohner auch eine neue Warft oder ein neues Gebäude denkbar wären, da auch viele der Gebäude nicht unter Denkmalschutz stünden und energetisch nicht rentabel seien. Im Kontext dessen spiele jedoch auch die Akzeptanz und der Kostenfaktor eine relevante Rolle, da eine weitere Erhöhung der Warft und ein neues Gebäude unter Umständen kostengünstiger wären, als die aufschwimmbaren Wände.

Für den interviewten LKN-Mitarbeiter ist ein wichtiger Punkt das Sedimentationsverhalten und dass die Halligen mitwachsen sollten. So werden seitens dieses Befragten der Ein-Stau-Versuch und eine Bauweise der Deckwerke im Hinblick auf eine größtmögliche Sedimentation als sinnvoll erachtet. Dies sei aus seiner Sicht auch machbar, wobei man auch darüber nachdenken könne, die Halligen künstlich zu erhöhen.

Der befragte Ministerialvertreter der projektbegleitenden Gruppe habe aus dem Verbundprojekt keine innovativ neuartigen Küstenschutz- und Bewirtschaftungsstrategien erkannt, sondern sehe eine tiefere Erforschung bekannter Maßnahmen und Bausteine, die dann auch entsprechend zur Anwendung kommen müssten. So sei der existierende riesige „Bausteinkasten“ weiter verfeinert worden und durch die soziologische Begleitforschung seien die Erkenntnisse der Halligbewohner eingeflossen. Insgesamt sei jedoch kein neues Verfahren oder neues Instrument entstanden. Eine besondere Alternative möchte der Interviewte nicht herausstellen, betont aber, dass die Verwaltung gerne zu einem selber erbrachten Vorschlag seitens der Halligbewohner fachtechnisch Stellung nehmen werde, da man es vermeiden wolle, den Halligbewohnern zu sagen, was „gut für sie“ sei.

5 Zusammenfassung und Fazit

Die Einbindung der Soziologie hat wesentliche und zentrale Aspekte für die Entwicklung von nachhaltigen Küstenschutz- und Bewirtschaftungsstrategien offenbahrt, die die Akzeptanz der Bevölkerung betreffen, die in dem einzigartigen und besonderen Lebensraumes der Halligen lebt. In diesem Kontext zeigt eine Auswertung der durchgeführten standardisierten Interviews der Halligbewohner der Inseln Langeneß, Hooge, Oland und Nordstrandischmoor, dass die Bereiche Küstenschutz und Landunter auch andere Bereiche, wie Naturschutz, Infrastruktur oder Landwirtschaft tangieren und hier Überschneidungen bestehen, die man bei etwaigen Maßnahmen und Strategien berücksichtigen sollte.

Weiterhein hat die soziologische Begleitforschung als Übersetzungsinstanz fungiert, wie im Falle der durchgeführten Zukunftswerkstätten. So wurden ein Dialog und ein Austausch zwischen den Wissensbeständen der Ingenieure und der Halligbewohner initiiert und es konnten im Rahmen dessen jeweils fünf Ideen pro Workshop generiert werden, die daraufhin von den projektbeteiligten Wasserbauingenieuren auf ihre Machbarkeit hin überprüft wurden. Im Kontext dessen zeigt sich auch die Notwendigkeit, dass man mit den beteiligten Akteuren vor Ort im Gespräch bleibt und diese miteinbezieht, um eine höhere Akzeptanz und Kooperation zu erhalten.

Zur Evaluation des Projektes wurden abschließend insgesamt vier Experteninterviews mit den beteiligten Projektpartnern und einem Vertreter der projektbegleitenden Gruppe durchgeführt. Dabei wurde auch deutlich, dass eine derartige interdisziplinäre Zusammenarbeit erwünscht und geschätzt wird und Potentiale für weitere Projekte in diesem Kontext bestehen. Gerade ein interdisziplinärer Brückenschlag verleiht eine umfassendere Einsicht in ein Untersuchungsgebiet sowie ein grundlegenderes Verständnis für die Alltagskultur in einem besonderen Lebensraum, in dem aufgrund von Veränderungen, unter anderem klima- aber auch soziodemographisch bedingt, neue ingenieursbezogene Konzepte notwendig werden, um die Halligen zu erhalten.

Insgesamt kann aus den gewonnenen Erkentnnissen der Schluss gezogen werden, dass ein heterogenes Meinungsbild auf den Halligen besteht und entsprechend individualisierte Küstenschutzmaßnahmen diesem am ehesten entsprechen können. So könnten beispielsweise individuell vorgetragene Küstenschutzvorschläge seitens der Bewohner auf ihre Machbarkeit – in technischer, nachhaltiger, sozialer etc. Sicht – hin überprüft werden.

Literaturverzeichnis

Jansen, Dorothea. 2006. Einführung in die Netzwerkanalyse. Grundlagen, Methoden, Forschungsbeispiele. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften.

Jungk, Robert & Müllert, Norbert R. 1981. Zukunftwerkstätten. Wege zur Wiederbelebung der Demokratie. Hamburg: Hoffmann und Campe.

Küsters, Ivonne. 2009. Narrative Interviews. Grundlagen und Anwendungen. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften.

Kuckartz, Udo. 2012. Qualitative Inhaltsanalyse. Methoden, Praxis, Computerunterstützung. Weinheim: Beltz.

Mayring, Philipp. 2010. Qualitative Inhaltsanalyse. Grundlagen und Techniken. Weinheim/ Basel: Beltz Verlag.

Mayring, Philipp. 2005. Einführung in die qualitative Sozialforschung: Eine Anleitung zu qualitativem Denken. Weinheim/ Basel: Beltz Verlag.

Parodi, Oliver. 2007. Massivwasserbau und Naturnaher Wasserbau. Weltbilder, Nachhaltigkeit, Ethik. *Technikfolgenabschätzung – Theorie und Praxis* 16. Jahrgang (Heft 2): 88-94.

Stracke-Baumann, Claudia. 2009. Nachhaltigkeit von Zukunftswerkstätten. Bonn: Stiftung Mitarbeit.

Anhang

Abbildung 1: Codesystem bzw. Kodierungssystem zur Qualitativen Auswertung

Abbildung 2: Phasenablauf einer Zukunftswerkstatt

ZukunftHallig C

gefördert durch:	BMBF
Förderkennzeichen:	03KIS095
Bearbeitungszeitraum:	01.12.2010 - 30.11.2013
Projektverlängerung:	01.12.2013 - 30.04.2014

Aufgestellt von: Henrike Strack
Frerk Jensen

Landesbetrieb für Küstenschutz,
Nationalpark und Meeresschutz
Schleswig-Holstein

Husum, Mai 2014

Kontakt: Frerk Jensen | e-Mail: frerk.jensen@lkn.landsh.de

Inhalt

1 PROBLEMSTELLUNG 445

2 BESTANDSAUFNAHME 446
2.1 Vorhandene Küstensicherungs- und Hochwasserschutz-einrichtungen 446
2.2 Bauwerkskatalog 455

3 GEWÄSSERKUNDLICHES MONITORING 456
3.1 Allgemeines 456
3.2 Parameter 458
3.3 Hydrologisches Monitoring 461
3.4 Fazit 467

4 WIRKSAMKEIT DER KÜSTENSCHUTZANLAGEN AUF DEN HALLIGEN 467

5 QUALITATIVE ERGÄNZUNG DES SCHUTZSTANDARDS 471
5.1 Auswertung der Fragebögen 472
5.2 Methodik der Bewertung 473
5.3 Bewertung der qualitativen Schutzausrüstung 473
5.4 Weiterer Ermittlungsbedarf 475

6 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK 476

LITERATUR 478

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Abbruchkante der Hallig Hooge 1906 445

Abbildung 2: Regelprofil gemäß Warftverstärkungsrichtlinie (MELUR 2013) 448

Abbildung 3: Wellenauflauf auf der Hallig Langeneß 449

Abbildung 4: Regelquerschnitt eines Deckwerks auf den Halligen 450

Abbildung 5: Grundriss des Sieltores Osterwehl auf Langeneß 452

Abbildung 6: Regelprofil Buhnen (Hooge) 453

Abbildung 7: Schematische Darstellung der Vorlandarbeiten 454

Abbildung 8: Ausschnitt aus dem Bauwerkskatalog Langeneß 455

Abbildung 9: Halligpegel 459

Abbildung 10: Mobile Drucksonde für die Seegangsmessung 460

Abbildung. 11: Seegangsboje des LKN-SH 461

Abbildung 12: Verlauf des Sturmflutereignisses am 31.01.2013 auf der Hallig Hooge 462

Abbildung 13: Kumulierte Verweilzeit auf Hallig Hooge 463

Abbildung 14: Verlauf des Sturmflutereignisses Xaver vom 04.12 bis 08.12.2013 464

Abbildung 15: Veränderung des mittleren Tidehoch- und des mittleren Tideniedrigwassers im Bereich der Halligen 465

Abbildung 16: Standorte der hydrologischen Messstationen im Bereich der Halligen 466

Abbildung 17: Schutzraum und Verschottungen auf den Halligwarften 471

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Überblick Schutzsystem auf den Halligen 446

Tabelle 2: Halligen und Warften im Nordfriesischen Wattenmeer 447

Tabelle 3: Jahr der letzten Bauwerksvermessung 456

Tabelle 4: Statistische Wasserstände auf den Halligen (IWAG) 457

Tabelle 5: Anstiegs- und Ablaufgeschwindigkeit Landunter Hooge 463

Tabelle 6: Handlungsbedarfe Warftverstärkung (nach AG Hallig 2050) 469

Tabelle 7: Bewertung der Schutzeinrichtung "Schutzraum" 474

Tabelle 8: Bewertung der Schutzeinrichtung "Verschottung an Gebäuden" 474

Tabelle 9: Bewertung der Schutzeinrichtung "Sandsäcke" 475

1 Problemstellung

Bis in das 20. Jahrhundert hinein waren die Halligen der Nordsee ungeschützt ausgesetzt, was einen starken Rückgang der Halligfläche bedeutete. 1874 betrug die gesamte Halligfläche gerade mal 30 km². Um weiteren Rückgang der Halligen zu verhindern bzw. zu minimieren wurde deshalb Anfang des 20. Jahrhunderts mit dem Bau von Deckwerken als Küstensicherungsbauwerke begonnen (MELUR 2013). Im Laufe der Zeit wurden die Küstenschutzmaßnahmen weiter entwickelt und optimiert, sodass sich bis heute ein umfassendes Schutzsystem auf den Halligen etabliert hat.

Aufgrund der exponierten Lage im Wattenmeer ist die Sicherung der Halligen mittels Deckwerke und weiterer Küstensicherungs- und Hochwasserschutzmaßnahmen eine große Herausforderung. Dabei muss beachtet werden, dass die hydrologischen und morphologischen Rahmenbedingungen ein differenziertes Vorgehen bedingen. An exponiert liegenden Halligkanten werden die Deckwerke beispielsweise durch Buhnen zusätzlich gesichert, während an anderen Abschnitten Lahnungsfelder zum Einsatz kommen. Doch wie sicher sind diese Anlagen heutzutage und zukünftig, gerade vor dem Hinblick eines steigenden Meeresspiegels?

Im Teilprojekt C des Verbundvorhabens ZukunftHallig sollen die verschiedenen Schutz- und Sicherungsmaßnahmen in ihrer Funktion und Wirksamkeit untersucht und analysiert werden. Hierfür werden die vorhandenen morphologischen und hydrologischen Daten im Bereich der Halligen aufbereitet und ausgewertet. Dies geschieht mit Hilfe eines Geographischen

Abbildung 1: Abbruchkante der Hallig Hooge 1906

Informationssystems (ArcGIS 9.3 der Firma Esri), in dem die Daten aufbereitet, visualisiert und dokumentiert werden. Die Ergebnisse werden im Kapitel 2 dargestellt. Die Auswertung dieser Ergebnisse erfolgt im 4. Kapitel. Hier wird die Wirksamkeit der Schutzanlagen beschrieben, und auf Schutzstandards eingegangen. Bevor die Wirksamkeit der Anlagen angegangen wird, erfolgt eine Beschreibung des gewässerkundlichen Monitorings. Im Rahmen dieses Projektes wurden vorerst die Halligen Hooge, Langeneß und Nordstrandischmoor betrachtet.

2 Bestandsaufnahme

2.1 Vorhandene Küstensicherungs- und Hochwasserschutz-einrichtungen

Um die verschiedenen Maßnahmen in ihrer Funktion und Wirksamkeit zu analysieren, wurde im ersten Schritt eine Bestandserfassung der vorhandenen Anlagen durchgeführt.Auf den Halligen Hooge, Langeneß und Nordstrandischmoor wurden acht verschiedene Bauwerkstypen erfasst, wobei nicht jeder Bauwerktyp auf jeder Hallig vorkommt. Die Tabelle 1 gibt einen Überblick über die vorhandenen Bauanlagen:

Tabelle 1: Überblick Schutzsystem auf den Halligen

Küstensicherungsanlage	***Wirkung***	***Hallig***
Deckwerke (inkl. Halligigel)	Schutz der Halligkanten vor Erosion	Hooge, Langeneß, Nordstrandischmoor
Buhnen	Reduzierung der erodierenden Strömung	Hooge, Langeneß, Nordstrandischmoor
Lahnungen	Vorlandbildung, Erosionsschutz	Hooge, Langeneß, Nordstrandischmoor
Überschlagssicherung	Schutz vor Erosion durch Wellenschlag	Langeneß
Küstenhochwasserschutzanlage	***Wirkung***	***Hallig***
Regionaldeiche (Sommerdeiche)	Schutz des Hinterlandes vor Überschwemmungen (zur Verbesserung der landwirtschaftlichen Nutzung)	Hooge, Langeneß
Dämme	Schutz vor Überschwemmungen	Langeneß, Nordstrandischmoor
Siele	Schutz vor Überschwemmungen, Entwässerung	Hooge, Langeneß,
Warften	Schutz der Häuser vor Überschwemmungen	Hooge, Langeneß, Nordstrandischmoor

Im Folgenden werden die wesentlichen Informationen der Bauanlagen zusammengefasst. Dabei wird auf die Bemessung der jeweiligen Anlage eingegangen, da dieser maßgeblich für die Funktionalität des Bauwerks ist.

Warften

Die Warften stellen den Siedlungsmittelpunkt einer Hallig dar und dienen dem Schutz des Menschen und seines Eigentums vor Sturmfluten. In der Regel sind sie als homogene Kleiwarften gebaut, es gibt aber auch Sandwarften oder Warften mit Sandkern und Kleiabdeckung.

Tabelle 2: Halligen und Warften im Nordfriesischen Wattenmeer

Name der Hallig	Halliggröße	Warftname	bewohnt	Einwohner (*)		Letzte Verstärkung
	in ha			Warf	Hallig	Jahr
Gröde	252,0	Kirchwarf	ja	2	11	1978
(11)		Knutzwarf	ja	9		1978
Habel	3,6	Warf	im Sommer			1983
Hamburger Hallig	110,0	Hauptwarf	im Sommer			1977
Hooge	578,0	Backenswarf	ja	16	92	1990
(92)		Hanswarf	ja	36		2001
		Ipkenswarf	ja	4		1998
		Kirchwarf	ja	2		1993
		Lorenzwarf/	ja	4		2007
		Mitteltritt	ja	2		
		Ockelützwarf	ja	8		1993
		Ockenswarf	ja	12		1995
		Volkertswarf	ja	2		1993
		Westerwarf	ja	6		1998
		Pohnswarf	nein			
Langeneß	984,0	Bandixwarf	ja	4	115	1997
(115)		Christianswarf	ja	4		2000
		Hilligenley	ja	10		1992
		Honkenswarf	ja	12		1996
		Hunnenswarf	ja	17		1994
		Ketelswarf	ja	16		1994
		Kirchhofwarf	ja	7		1999
		Kirchwarf	ja	6		1996
		Mayenswarf	ja	9		1987
		Neuwarf	ja	5		1992
		Norderhörn	ja	13		1987
		Peterheitzwarf	ja	1		1997
		Peterswarf	ja	3		1988
		Rixwarf	ja	1		1992
		Süderhörn	ja	1		1992
		Tadenswarf	ja	5		2005
		Tamenswarf	ja	1		2005
		Treuberg	ja	0		1961
		Neue Peterswarf	nein			
Nordstrandischmoor	179,0	Amalienwarf	ja	1	21	1973
(21)		Halberweg	ja	3		1978
		Neuwarf	ja	12		
		Norderwarf	ja	5		
		Warf (Kruse)	nein			
Norderoog	11,0		im Sommer			
Oland (27)	117,0	Warf	ja	27	27	1980
Süderoog (2)	62,0	Warf	ja	2	2	1968
Südfall	56,0	Warf	im Sommer			1968

Nach der Sturmflut im Febrauar 1962 wurde ein Warftverstärkungsprogramm durchgeführt, die letzte Warftverstärkung erfolgte im Jahre 2007 auf Hooge. Der Sturmflutscheitel des damaligen Ereignisses ist dabei der maßgebliche Wasserstand $W_{maßg}$, sodass alle bewohnten Warften

heutzutage eine Höhe von 4,50 bis 5,80 m NHN aufweisen. Neben der Höhe ist auch das Profil der Warft angepasst worden. Die schwächer geneigten Außenböschungen bieten einen wirksameren Schutz beim Wellenauflauf bei Sturmfluten. Bei den überwiegenden Warften wurde bis zur Höhe von $W_{maßg}$ – 1 m wird die Neigung auf 1:6 angepasst, dann flacht sie bis zur Warftkrone auf 1:8 bzw. auch teilweise bis zu 1:15 ab. Zu dem beschriebenen Profil wurde die Warftkrone auf vielen Warften um einen Ringdeich erweitert, der eine Kronenbreite von 1 m aufweisen soll und auf der binnenseitigen Böschung eine Neigung von 1:3 hat (MLR 1999).

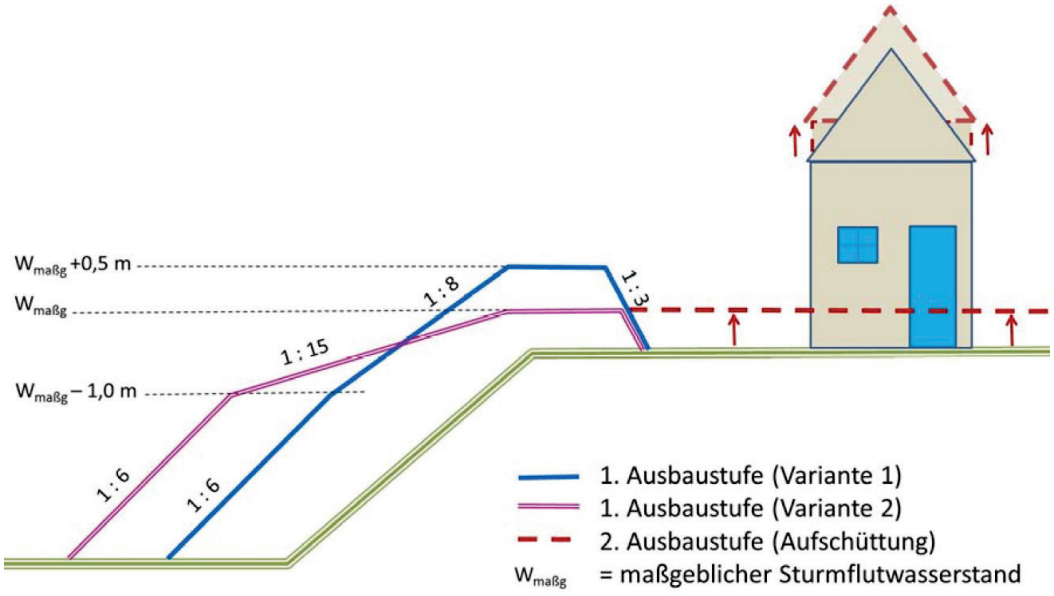


Abbildung 2: Regelprofil gemäß Warftverstärkungsrichtlinie (MELUR 2013)

Teilweise wurde in die Böschung beim Übergang der Böschungsneigung von 1:6 zu 1:8 eine Berme als Überschlagssicherung von 4 m eingebaut. Wege sollen über die Warftoberkante zu den Bebauungen führen, es zeigt sich jedoch, dass dies bei manchen Warften nicht durchführbar war und z.B. die Ringdeiche durch die Wege unterbrochen sind.

Auf allen bewohnten Warften wurden Schutzräume in die Häuser eingebaut. Die Warftverstärkungen wurden in der Zeit von 1986 bis 2007 durchgeführt. Es zeigt sich aber, dass sie teilweise, gerade vor dem Hintergrund des Klimawandels, neu angepasst werden müssen. Das Projekt „ZukunftHallig“ soll hierbei Aussagen dazu treffen, die Bemessung der Warften zu optimieren, sodass diese auch in Zukunft sicher bleiben. In der Masterthesis, welche im Rahmen des Projektes an der RWTH Aachen erstellt wurde, wurden mit Hilfe eines numerischen Modells Wellenauf – und –überlaufraten ermittelt und ein Bemessungsansatz für die Warften vorgeschlagen. Maßgebendes Kriterium bilden hierbei die Wellenüberlaufrate und die Wellenüberlaufgeschwindigkeit. (siehe Teil B).

Abbildung 3: Wellenauflauf auf der Hallig Langeneß

Deckwerk/ Halligraustreifen

Deckwerke werden zum Schutz vor Erosion an exponierte Halligkanten errichtet, wo die Angriffsintensität der See hoch ist. Die Halligkante wird so vor allem vor Strömung, Wellenschlag und Eisgang geschützt. Die Deckwerke sind so konstruiert, dass sie den Wellenauflauf reduzieren, beständig gegen einwirkende Belastungen und setzungsunempfindlich sind. Daneben können sie mit verhältnismäßigem Aufwand und größtenteils in Eigenregie gebaut werden, der Unterhaltungsaufwand ist im Allgemeinen gering und der Eingriff in die Natur ist auf ein Minimum reduziert. Folgende Abbildung 4 zeigt ein Regelprofil eines Deckwerks. Ursprünglich waren die Deckwerke auf den Böschungsbereich reduziert, bis man diesen Bereich teilweise um eine etwa 3 m breite Überschlagssicherung erweitert hat. Den Erfordernissen entsprechend wurde dieser Bereich zum Teil um die heute üblichen Raustreifen ergänzt.

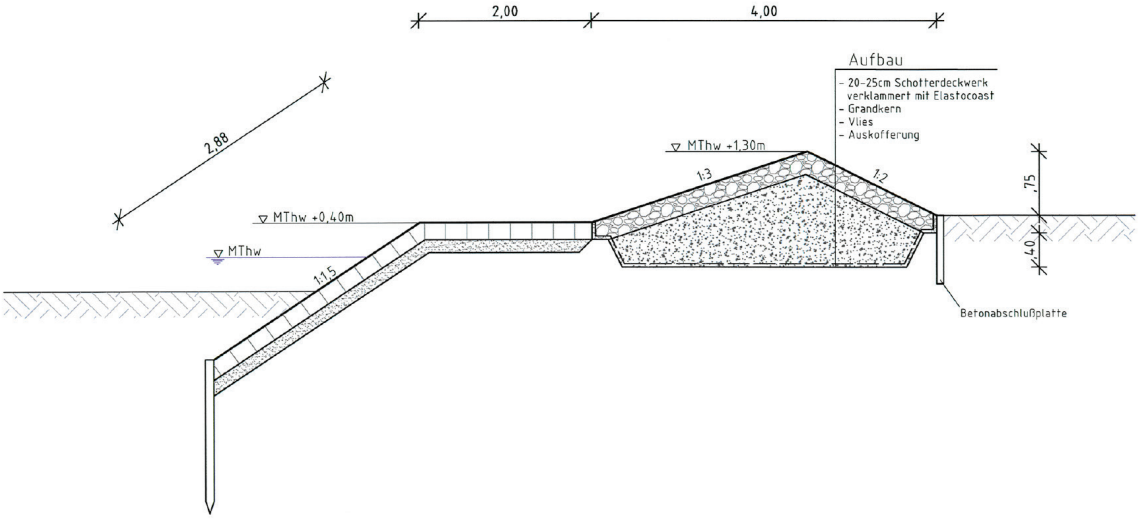


Abbildung 4: Regelquerschnitt eines Deckwerks auf den Halligen

Bei den regelmäßigen Landunter-Phasen setzt sich das Feinmaterial der Nordsee vor allem unmittelbar hinter den Deckwerken ab. Dadurch wächst das Gelände hinter den Deckwerken stärker in die Höhe als auf dem Rest der Hallig. Die Folge ist, dass überschlagende Wellen schneller zu Auskolkungen führen, wodurch langfristig die Deckwerke unterspült werden können und das Erosionen auf der Halligfläche auftreten können. Aus diesem Grund sind die Deckwerke rechtzeitig in ihrer Geometrie anzupassen, wobei zu berücksichtigen ist, dass das Höhenwachstum der Hallig durch die Deckwerke möglichst nicht reduziert wird. Daher untersucht die Technischen Universität Hamburg Harburg im Auftrag des Landesbetriebs für Küstenschutz, Meeresschutz und Naturschutz Schleswig-Holstein (LKN-SH) bei unterschiedlichen Halligdeckwerken die Durchströmbarkeit, Durchströmverhalten, Porenraum, Sedimentrückhalt, Sedimentlösung welches auch die Verwendung neuer Materialien einschließt.

Für die Bemessung der Halligdeckwerke wurden bislang verschiedene Berechnungsverfahren angewendet, die teilweise aus Erfahrungswerten und teilweise auch wissenschaftlichen Überlegungen hervor gingen. Sie führten bislang aber zu keinem befriedigenden Ergebnis. Die Implementierung eines Halligraustreifens (sogenannter „Halligigel“) vermindert offenkundig die Erosion des Hinterlandes, jedoch fehlt auch hier ein wissenschaftlich fundierter Bemessungsansatz. Ein vereinfachtes Verfahren zur Bemessung des Halligigels wurde im LKN-SH entwickelt und seit etwa 2005 angewendet. Die Höhe des Halligigels resultiert dabei aus der Addition der maximalen Wellenhöhe (h_{max}) und der Bemessungswassertiefe d. Letztere resultiert aus der Differenz der Watthöhe (H_1) und des Hinterlandes (H_2). Für die Berechnung der maximalen Wellenhöhe wird angenommen, dass diese die Hälfte der Bemessungswassertiefe d entspricht (KUMBRUCK, 2009).

$$h_{Igel} = h_{max} + d$$

$d = H_2 - H_1$

$h_{max} = d/2$

Regionaldeich / Sommerdeich

Regionaldeiche (auch als Sommerdeiche bezeichnet) haben auf den Halligen die Aufgabe, sommerliche Hochwasser zurückzuhalten. Sie sind nicht dafür ausgelegt, Sturmfluten zu kehren, mindern aber den Seegang und den Wellenauflauf bei Sturmfluten. Damit haben sie einen geringeren Schutzstandard als Landesschutzdeiche, welche einen Wasserstand eines Extremereignisses mit einer Wiederkehrwahrscheinlichkeit von 200 Jahren kehren sollen. Bei den Regionaldeichen wurden bislang wegen der örtlich unterschiedlichen Sicherheitsbedürfnisse noch keine generellen Sicherheitsstandards eingeführt, vielmehr erfolgt bei Bedarf eine Verstärkung. (MELUR 2013)

Siele

Um die Hallig vor frühzeitigen Landunter zu schützen und diese nach einem Landunter besser zu entwässern gibt es verschiedene Bauwerke. In der Regel sind es Siele, wie beispielhaft in Abbildung 5dargestellt. Sie sind in die Regionaldeiche eingelassen und besitzen oft mehrere selbsttätig wirkende Tore. Bei zunehmendem Wasserdruck infolge höherer Außenwasserstände schließen sie sich und öffnen sich erst, wenn der Außenwasserstand sinkt. Der Baugrund besteht vor allem aus Klei und Sand. Das Fundament des Bauwerks besteht aus Magerbeton. In den Boden werden Pfähle eingelassen, um die Lasten des Bauwerks aufzufangen (Pfahlgründung).

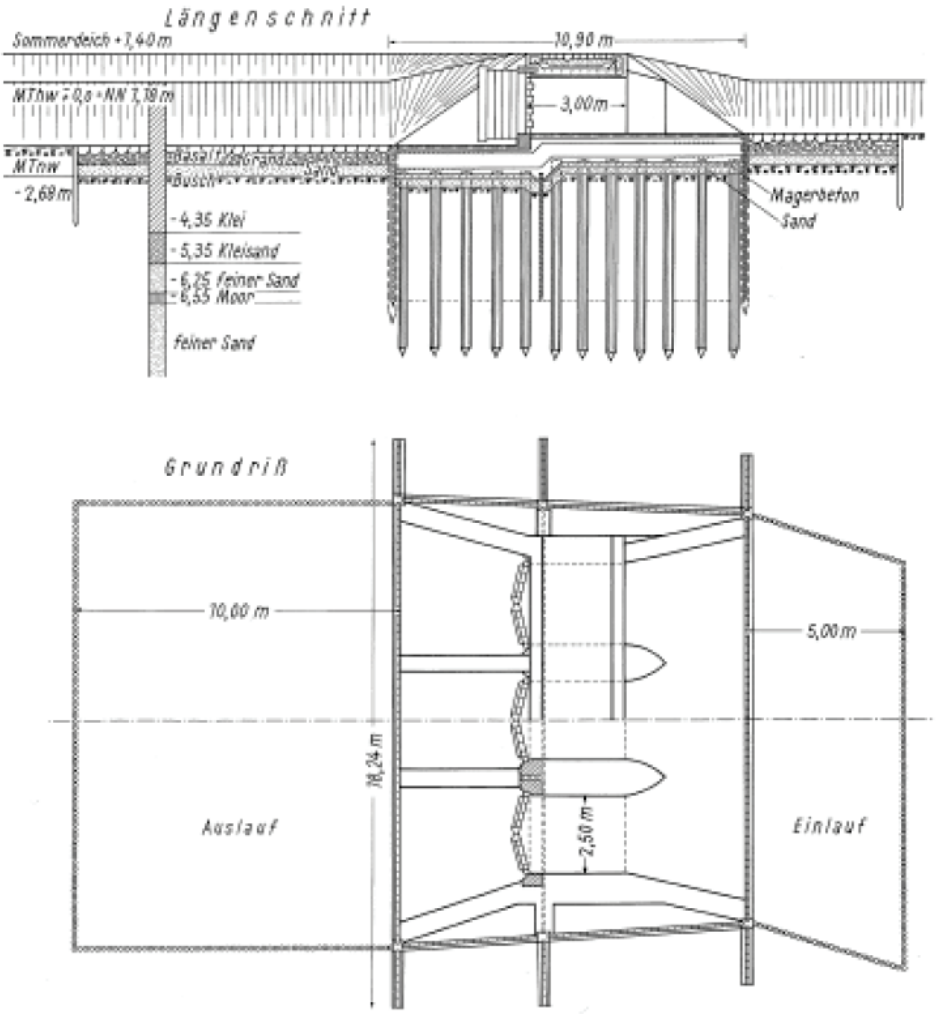


Abbildung 5: Grundriss des Sieltores Osterwehl auf Langeneß

Darüber hinaus wird die Warft über Deckwerksverschlüsse mit Kunststoffklappen und Rückschlagklappen geschützt und entwässert. Durchlässe ohne Verschluss dienen der besseren Entwässerung der Hallig, fördern durchweg auch das Fluten dieser.

Dämme

Die Halligen Oland/Langeneß, Hamburger Hallig und Nordstrandischmoor sind durch Wattsicherungsdämme mit dem Festland verbunden. Dämme dienen dazu Umströmungen der Halligen zu unterbinden und bewirken somit eine Reduzierung bzw. Verhinderung von Watterosionen. Sie erfüllen damit nicht nur gegenüber den Halligen einen Schutzzweck, sondern dienen der Stabilität des Wattenmeeres. Der Damm zwischen Dagebüll und Oland wurde 1925 gebaut und 1928 war auch Langeneß über Oland an das Festland angeschlossen. Bis 2009 wurde der Damm bis Oland erneuert, die Erneuerung des Abschnitts Oland-Langeneß erfolgte bis 2012.

Dabei wurde für den Abschnitt Oland–Langeneß von der Erdbauweise abgesehen und der Damm mit Schüttsteinen gebaut. Der Steindamm nach Nordstrandischmoor wurde ursprünglich vom Cecilienkoog ausgehend im Jahr 1934 gebaut. Infolge von Eindeichungsmaßnahmen wurde der Ausgangbahnhof 1998 auf Lüttmoorsiel verschoben.

Die Höhe der Dämme wurde nach dem jeweiligen MThw ausgerichtet mit einem Zuschlag, so dass nur erhöhte Tiden die Dämme überströmen. Bei der Verstärkung der Dämme würden auch die Höhenlagen angepasst.

Buhnen

Buhnen setzt man vor allem an stärker belasteten Abschnitten ein, wo sie die Strömung mindern und damit die Belastung der See auf die Deckwerke reduzieren. Durch die Verminderung der Strömung können sie sie Sedimentation an der Halligkante fördern.

Buhnen werden dammähnlich überwiegend in Setzstein- oder Schüttsteinbauweise angelegt. Die Bemessung richtet sich nach der Lage der Buhne. Sie werden in der Regel senkrecht zur Küste angelegt, manche Buhnen sind mit Querbuhnen versehen.

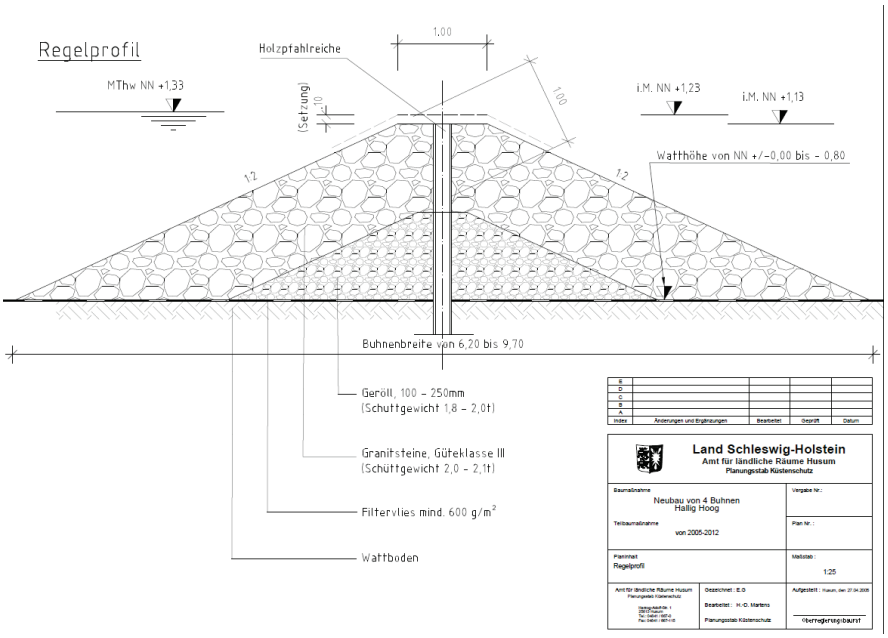


Abbildung 6: Regelprofil Buhnen (Hooge)

Lahnungen

Lahnungsfelder unterstützen die natürliche Auflandung des Watts und die Bildung des Vorlandes. Das Vorland erfüllt eine wichtige Aufgabe im Küstenschutz: es mindert die Wellenhöhen und reduziert dadurch die hydrodynamische Belastung, welche auf die Halligen einwirken. Sie werden in der Regel auf der seeabgewandten Seite der Hallig gebaut. Bei einem hohen Vorland ist oftmals kein Deckwerk an der Halligkante erforderlich wie auf den Halligen Nordstrandischmoor und Langeneß vorzufinden.

Durch die Vorlandarbeiten werden naturschutzfachlich hochwertige Lebensräume, die Salzwiesen, geschaffen. Außerdem werden im Vorland Grassoden für Ausbesserungsarbeiten an den Deichen entnommen. Der überwiegende Teil der Salzwiesen wurde durch menschliche Unterstützung geschaffen.

In folgender Abbildung sind die Vorlandarbeiten schematisch dargestellt.

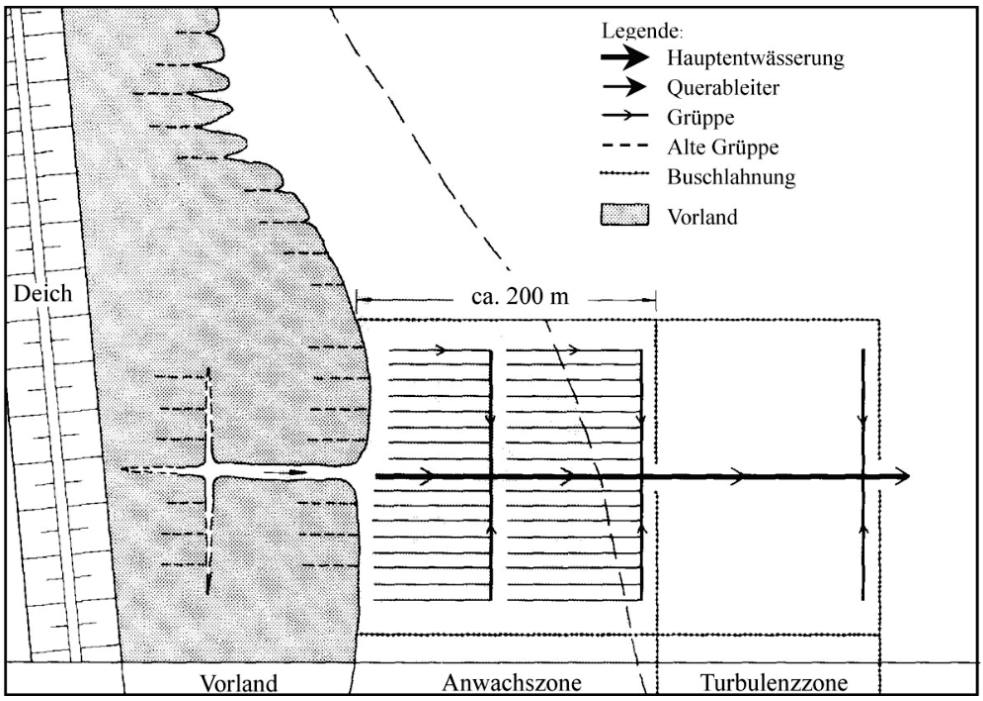


Abbildung 7: schematische Darstellung der Vorlandarbeiten

Das über 100 Jahre alte Konzept der Vorlandarbeiten wurde an die heutigen Anforderungen angepasst, hat aber bis heute Bestand. Im seeseitigen Lahnungsfeld, der Turbulenzzone, wird die Energie des Wassers reduziert. In der Anwachszone, welche ebenfalls von Buschlahnungen umgeben ist, wird die Strömung noch weiter reduziert, wodurch die Sedimentakkumulation gefördert wird. Durch die Grüppen und die Entwässerungsgräben wird eine optimale Entwässerung

erreicht. In Folge des Sedimentaufwuchses siedeln sich hier vor allem Queller als Pionierpflanze an.

2.2 Bauwerkskatalog

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde eine Dokumentation der auf den Halligen Hooge, Langeneß und Nordstrandischmoor vorhandenen Bauwerke erstellt. Sie dient als Grundlage für weitergehende Planungen und Fragestellungen zum Küstenschutz auf den Halligen. Alle hierfür relevanten Informationen wurden aus dem Küsteninformationssystem KIS des LKN- SH und den Antragsunterlagen zur Deckwerkverstärkung 2007-2014 herausgefiltert und mit Hilfe des Geographischen Informationssystem ArcGIS 9.3 aufbereitet. Anschließend wurden diese Informationen in Form eines Kataloges für jede Hallig zusammengefasst. Dieser Katalog befindet sich im Anhang dieses Dokuments. Folgende Abbildung 8 zeigt einen Ausschnitt aus dem Bauwerkskatalog Langeneß. Neben den vorhandenen Informationen sind auch fehlende Informationen kenntlich gemacht, um dem Benutzer einen Handlungsbedarf zu signalisieren. So wurde z.B. die Deckwerksbreite i.d.R. nur für die Bereiche gemessen, in denen Regelprofile aufgenommen wurden. Diese Regelprofile gelten jedoch nur für einen bestimmten Abschnitt und decken nicht die ganze Halligkante ab.

Kilometer: 1+550 bis 2+065

Bauwerksinformationen		***Regelquerschnitt***
Bauweise:	*Blocksteinpflasterung, Pflasterung mit Granitquadern*	*Kein Regelquerschnitt vorhanden*
Ø-Höhe:	*1,90m NN*	
Ø-Breite:	*Keine Angaben*	
Raustreifen:	*Setzsteindeckwerk (Hand)*	
Ø-Höhe:	*2,81m NN*	
Ø-Breite:	*Keine Angaben*	
Watthöhe:	*0,91m NN*	
Schäden:	*Keine*	
Anmerkungen:	*Fußsicherung vorhanden*	
Baujahr:	*1933/34*	
Letzte Verstärkung:	*fertige Deckwerkverstärkung*	

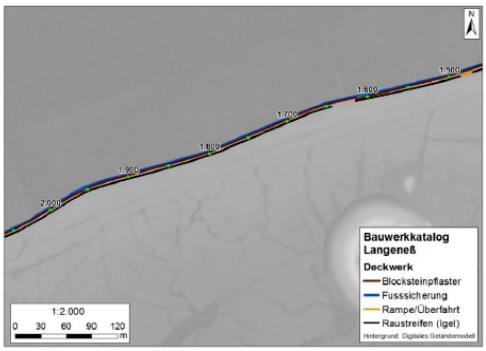
Foto und Lage	***Details in Karte***
	

Abbildung 8: Ausschnitt aus dem Bauwerkskatalog Langeneß

Es wurde festgestellt, dass die Daten aus dem KIS teilweise älteren Datums sind. In folgender Tabelle sind die Vermessungsjahre der Bauwerke auf den Halligen gegenüber gestellt:

Tabelle 3: Jahr der letzten Bauwerksvermessung

Bauwerk	*Hallig*	*Jahr der letzten Vermessung*
Regionaldeich	Hooge	1999
Regionaldeich	Langeneß	1999 2009/2010
Deckwerk	Hooge	2001,2003 und 2009 wurde zwischen Lorenzwarft und Ockelützwarft nachvermessen
Deckwerk	Langeneß	2005, 2009/2010 wurden Bereiche an der Hunnenswarft, Tadenswarft, Tamenswarft und Mayenswarft nachvermessen
Deckwerk	Nordstrandischmoor	2000, 2001

Im Rahmen der regelmäßigen Monitoringmessungen des LKN-SH wird überprüft. Ob es hier einer Aktualisierung der Vermessungen bedarf. Der Bauwerkkatalog wird zukünftig weitergeführt. Er wird als Grundlage für die weiteren Küstenschutzplanungen auf den Halligen dienen und eine Priorisierung der durchzuführenden Arbeiten erleichtern. Dabei wird sich v.a. auf die Bereiche fokussiert werden, die Schäden aufweisen. In der jährlich durchgeführten Deich- bzw. Warftschau werden auf den Halligen neben den Deichen auch die Warften und Deckwerke in Augenschein genommen. Dabei werden Schäden aufgenommen und ein entsprechender Handlungsbedarf abgeleitet. Die rasche Umsetzung der Ausbesserungsmaßnahmen kann dabei nicht immer sofort erfolgen, da z.B. auch naturschutzfachliche Belange berücksichtigt werden müssen. Schäden am Bauwerk oder Erosionsschäden im Hinterland wurden ebenfalls im Bauwerkskatalog dokumentiert.

3 Gewässerkundliches Monitoring

3.1 Allgemeines

Für die Planung von Küstenschutzanlagen auf und an den Halligen sowie als Grundlage für die gewässerkundliche Sicherheitsüberprüfung sind hydrologische Daten in guter Qualität und hinreichender räumlicher Dichte erforderlich. Um die benötigten Daten für die Überprüfung der Wirksamkeit der Schutz- und Sicherungsanlagen zu erheben, ist ein umfassendes hydrologisches Messnetz notwendig. Die Daten dienen der Berechnung jener Faktoren, die zur Ermittlung der Bemessungsgrößen der Schutz- und Sicherungsanlagen benötigt werden. So sind bei der

Bemessung die stark variierenden hydrodynamischen Belastungen und deren zeitliche Entwicklung, sowie die starke Morphodynamik zu betrachten.

Tabelle 4: Statistische Wasserstände auf den Halligen (IWAG)

stat. Wasserstände NHN Halligen					
	HW_{20}	HW_{50}	HW_{100}	HW_{200}	HW_{200} + 50
Hallig					
Langeneß Ost, Mitte	455	485	505	520	570
Langeneß West	440	465	485	510	560
Hooge West	430	460	475	490	540
Hooge Ost	430	460	475	490	540
Oland	465	495	515	530	580
Gröde	470	500	520	540	590
Südfall	480	510	530	550	600
Nordstrandisch Moor	485	520	540	560	610
Norderoog	430	460	475	490	540
Süderoog	445	475	480	490	540
Habel	475	505	530	540	590
Hamburger Hallig	485	515	535	555	605

In Tabelle 4 sind die statistischen Wasserstände an den Halligen für verschiedene Wiederkehrintervalle angegeben. Diese Werte wurden im Rahmen der Fortschreibung des Generalplans Küstenschutz Schleswig-Holstein von dem Ingenieurbüro IAWG ermittelt. (IAWG 2011). Auch im Projekt ZukunftHallig wurden vom Forschungsinstitut für Wasser und Umwelt(IWU) der Uni Siegen, statische Wasserstände ermittelt (siehe Teilprojekt A). Durch die Anwendung unterschiedlicher Methoden bei der Berechnung weichen die Ergebnisse geringfügig von den im Land SH verwendeten statistischen Daten ab. Da für die Ermittlung der Referenzwasserstände an der gesamten Nordsee- und Ostseeküste die Ergebnisse nach IAWG 2011 verwendet wurden, werden diese Daten auch vorerst für die Küstenschutzplanungen auf den Halligen verwendet.

3.2 Parameter

Nur eine gute Datengrundlage ermöglicht eine wirtschaftliche und nachhaltige Bemessung von Küstenschutzanlagen. Hierbei ist die Vollständigkeit homogener Daten mit langen Zeitreihen besonders wichtig. Durch lange, kontinuierliche Messung von Wasserständen lassen sich Änderungen von Sturmflutintensitäten oder Trends hinsichtlich hydrologischer Größen, wie Tidenhub und Veränderungen der Tidehoch- oder Tideniedrigwasser erfassen. Durch das rechtzeitige Erkennen von Veränderungen können diese in die Planung von Küstenschutzmaßnahmen einfließen.

Eine weitere wichtige Komponente zur Beschreibung der Belastungsintensität, die auf ein Bauwerk einwirkt, ist die Strömung. Sie bewirkt die Sediment- und Schwebstofftransporte, welche sich in Materialeinträgen und Materialabträgen darstellen. Strömungen treten gezeiten- und windbedingt auf. Sie können langfristig zu starken morphologischen Veränderungen führen. Allerdings ist die Messung von Strömungen und die entsprechende Aufbereitung der Daten äußerst schwierig, aus dem Grund werden hier vielfach Ergebnisse aus numerischen Modellen verwendet.

Kenntnisse über den Seegang sind für die korrekte und nachhaltige Bemessung von Bauwerken unverzichtbar. Neben der Grundlage für die Bemessung von Küstenschutzanlagen ist die Kenntnis des Seeganges (Wellenhöhe, Wellenperiode) für das Verständnis der hydromorphologischen Vorgänge im Wattenmeer von großer Bedeutung. Für die Bemessung von z. B. Warfthöhen sind detaillierte Kenntnisse des Wellenauflaufes von grundlegender Bedeutung. Neben Naturmessungen werden für die Ermittlung von Seegangsdaten auch numerische Modelle eingesetzt (siehe Abschnitt B).

Durch die regelmäßige Vermessung des Watts werden Veränderungen hinsichtlich der Morphodynamik aufgenommen. Zusammen mit den Parametern Wasserstand, Strömung, Seegang / Wellenauflauf und Wind werden damit alle Komponenten umfasst, um einen Bereich ausreichend hydro- morphologisch zu charakterisieren.

Im Folgenden wird das hydrologische Messnetz des LKN-SH vorgestellt und anschließend wird auf die gewässerkundliche Überwachung des LKN-SH eingegangen.

Im Rahmen des hydrologischen Messdienstes werden Wasserstands- und Seegangsmessungen und die entsprechenden Auswertungen durchgeführt. Die Wasserstandsdaten werden sowohl digital aufgezeichnet und abgerufen als auch analog aufgezeichnet. Die Wasserstandsdaten werden somit redundant aufgezeichnet. Da das hydrologische Messnetz auch nach Beendigung des Projektes ZukunftHallig weiter geführt werden soll, werden zukünftig an den Wasserstandspegeln neben dem Schwimmersystem auch redundante Drucksysteme eingebaut, die die Aufbereitung und Auswertung erleichtern. Neben dem vom LKN-SH installierten Wasserstandsmessstationen werden

auch Daten der Stationen der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung (WSV) für die Untersuchungen genutzt.

Abbildung 9: Halligpegel

Für die Messung des Seegangs (Wellenhöhe, Wellenperiode und teiweise auch Wellenanlaufrichtung) werden Drucksonden sowie Seegangsmessbojen eingesetzt. Um den einlaufenden Seegang von der Nordsee in das Wattenmeer bzw an die Küste zu erfassen, wurden vom LKN-SH eine vor Sylt und weitere drei Wellenmessbojen im Mündungsbereich der großen Ströme (Rütergat, Süderhever, Süderpiep) betrieben. Im Rahmen der Messnetzoptimierung werden die Bojen Rütergat und Süderpiep zukünftig nicht weiter betrieben. Zwei weitere Seegangsmessbojen werden in den Tideströmen Norderhever und Süderau eingesetzt. Im Rahmen des vom LKN-SH durchgeführten Seegangsmessprogramms im Zusammenhang mit der Datenerhebung für den Generalplan Küstenschutz werden noch weitere fest installierte Messstationen, die die Strömung, den Seegang und teilweise auch den Wellenauflauf am Deich messen (z. B. Pellworm). Die Messung des Wellenauflaufs dient der Überprüfung bzw. der Verfizierung der im LKN-SH durchgeführten Wellenauf- und -überlaufberechungen im Rahmen

der Sicherheitsüberprüfung und Bemessung von Küstenschutzwerken. Die Abbildung 10 zeigt eine mobile Drucksonde, mit welcher der Seegang gemessen wird. Vorteil dieses Messsystems sind der einfache Aufbau und Installation der Geräte. Es sind außerdem keine Seekabel oder Stromanschlüsse nötig, da die Geräte per Akku und internen Datenspeicher betrieben werden. Durch diese Mobilität ist ein Umsetzen der Geräte sehr leicht möglich um gegebenenfalls von weiteren Standorten Daten zu gewinnen. Zukünftig sollen diese mobilen Drucksonden mit einer Datenfernübertragung ausgerüstet werden, um Betrieb und Wartung zu optimieren, durch Fehlererkennung die Datenqualität zu erhöhen und somit auch eine Effizienz der Datenerhebung und –auswertung ergibt.

Abbildung 10: mobile Drucksonde für die Seegangsmessung

Für die Untersuchungen im Rahmen dieses Projektes konnten die Windinformationen der Windmessstation des DWD auf der Hallig Hooge verwendet werden, sodass keine weitere Windmessstation installiert werden musste.

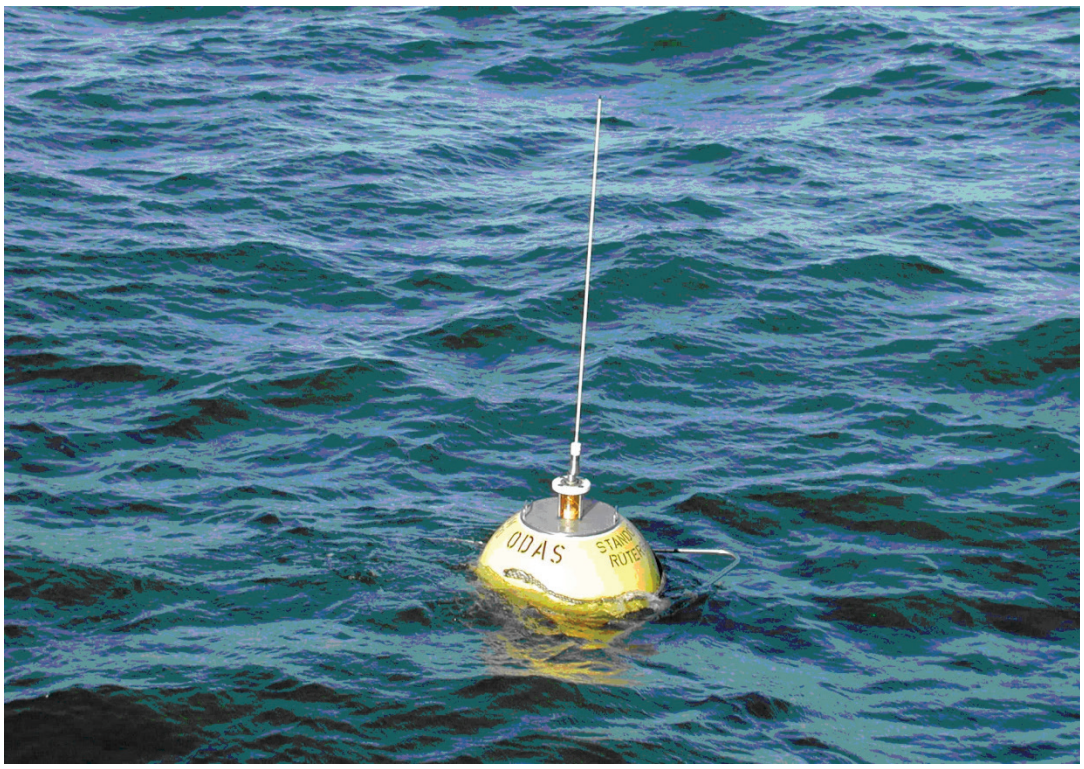


Abbildung. 11: Seegangsboje des LKN-SH

3.3 Hydrologisches Monitoring

Die im Rahmen des gewässerkundlichen Monitorings im LKN-SH gemessenen, aufbereiteten und ausgewerteten Daten zu den Parameter Wasserstand, Seegang und Wellenauflauf wurden den Projektpartner der Unversitäten Aachen, Göttingen und Siegen für deren Untersuchungen zu Verfügung gestellt. Die entsprechenden weitergehenden Auswertungen sind in den jeweiligen Teilprojekten beschrieben.

Um für möglichst alle Halligen Aussagen zu Wasserständen zu erhalten, sind derzeit allein im Bereich der Halligen rund 15 Pegel des LKN-SH aktiv, welche durch die Pegel der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung (WSV) ergänzt werden.

Auch stillgelegte Pegel wurden reaktiviert, so z.B. der Pegel Hilligenley an der Südwestspitze von Langeneß. Außerdem werden jedes Jahr neben den dauerhaft betriebenen Pegel Sommerpegel ausgebracht. Da sie an Stellen ausgebracht werden, wo sie im Winter durch Sturmfluten und Eisgang leicht zerstört werden können, liefern diese in den Monaten März bis Oktober Daten (außerhalb der Sturmflutsaison).

Dabei wurde das Monitoringprogramm des LKN-SH regelmäßig geprüft und weiterentwickelt, um Antwort auf verschiedenste Fragestellungen geben zu können. So wurden im Rahmen des Projektes „Hallig 2050“ (und damit auch für das Projekt „ZukunftHallig“ nutzbar) auf den Halligen Langeneß, Hooge, Gröde und Nordstrandischmoor „Binnenpegel“ installiert, welche den Wasserstand vor allem bei Landunter aufzeichnen sollen. Anhand dieser Aufzeichnung zeigt sich, ab welchem Wasserstand oder Zeitpunkt in Verbindung mit dem Außenwasserstand eine Hallig überflutet wird und wie lange das Wasser auf der Hallig zurückgehalten wird. Die Abbildung 12 veranschaulicht am Beispiel der Sturmflut im Januar 2013 für Hooge, dass die Hallig nach einer Überflutung (ab etwa 250 cm NHN Außenwasserstand) erst nach mehreren Tiden wieder „trocken“ ist. Ebenfalls ist der Einfluss des Sommerdeichs gut erkennbar. Dieser hat auf Hooge eine durchschnittliche Höhe von 2,9 m NHN. Während die Hallig etwa ab Erreichen der Bauwerkshöhe innerhalb von 2h 21min den Höchstwasserstand erreicht, bedarf es mit 46 h knapp drei Tiden, bis das Landunter vollständig abgeklungen ist. Ab Erreichen der Deckwerkshöhe reduziert sich die Ablaufgeschwindigkeit auf von anfänglich 1,10 cm/min (vgl. Tabelle 5 Ablaufgeschwindigkeit Hooge Anleger) auf 0,14 cm/min. Aufgrund der besseren Lesbarkeit wird hier von der Standardeinheit für Fließgeschwindigkeiten m/s abgewichen. Die verringerte Geschwindigkeit hat zur Folge, dass sich hierdurch mehr Sediment auf der Hallig ablagern kann.

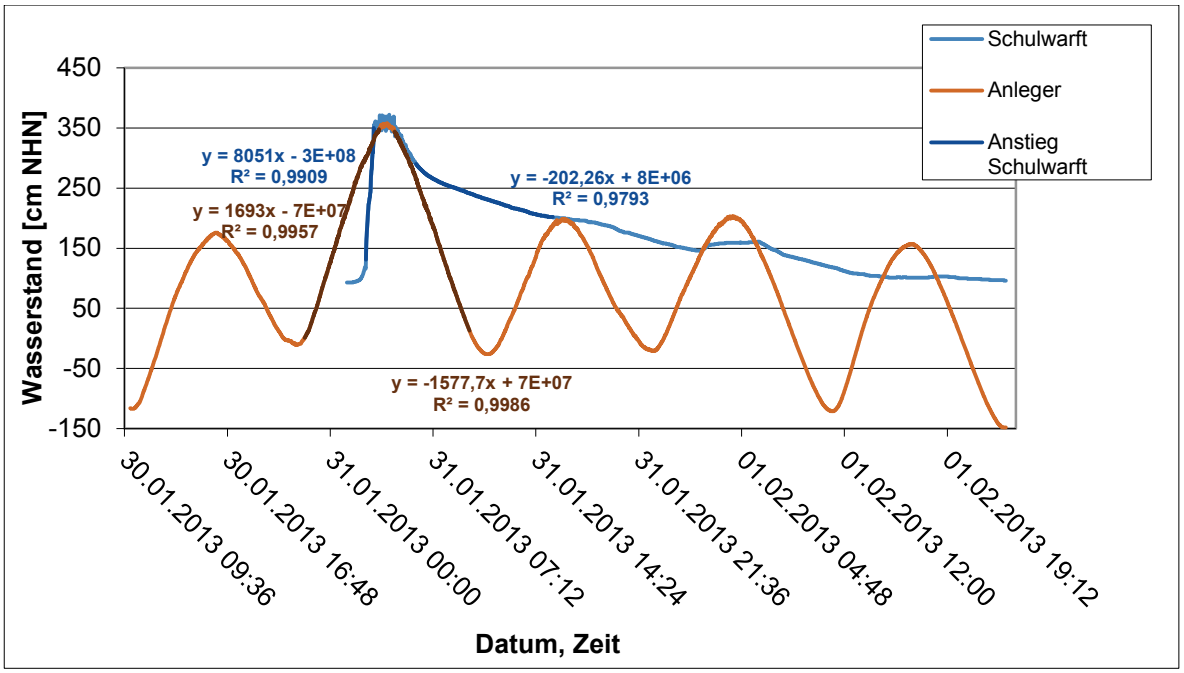


Abbildung 12: Verlauf des Sturmflutereignisses am 31.01.2013 auf der Hallig Hooge

Tabelle 5: Anstiegs- und Ablaufgeschwindigkeit Landunter Hooge

	Anstieg/Ablaufgeschwindigkeit Schulwarft			*Anstieg/Ablaufgeschwindigkeit Anleger*		
	[cm/min]	[cm/h]	[m/s]	[cm/min]	[cm/h]	[m/s]
Anstieg	5,59	335,46	0,000931829	1,18	70,54	0,00019595
Abfall	0,14	8,43	2,34097E-05	1,10	65,74	0,0001826

In der folgenden Grafik ist die kumulierte Verweilzeit des Wassers auf der Hallig Hooge dargestellt. Die Verweilzeit ist dabei abhängig vom Scheitelwert während der Überflutung. Die Klassen – ∞ bis 75 cm NHN sind nicht aufgeführt, da die Berechnung erst ab einem Wasserstand von 93 cm (tiefster Wasserstand am Pegel Hooge Schulwarft) anfängt.

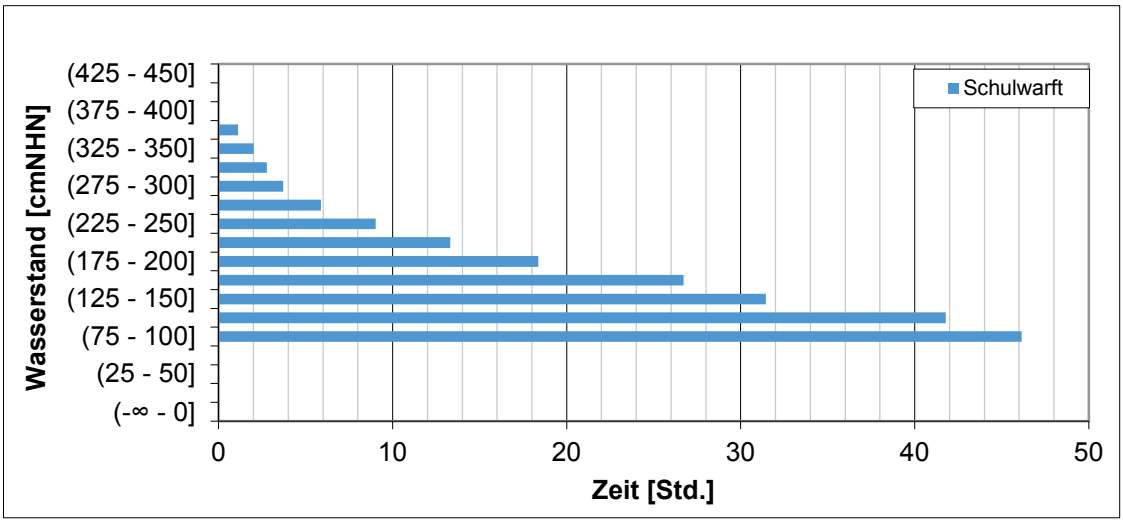


Abbildung 13: kumulierte Verweilzeit auf Hallig Hooge

Für die Sturmflut Xaver vom Dezember 2013 sind in Abbildung 14 die Wasserstände der Pegelstationen der Halligpegel Langeneß-Kirchwarft, Langeneß-Kirchhofwarft, Oland sowie die Tidepegel Langeneß Hilligenley und Schlüttsiel dargestellt. Auch hier ist abzulesen, dass es einen Zeitraum von ca. 4 Tiden bedarf, bis sich die Wasserstände auf den Halligen wieder normalisiert haben.

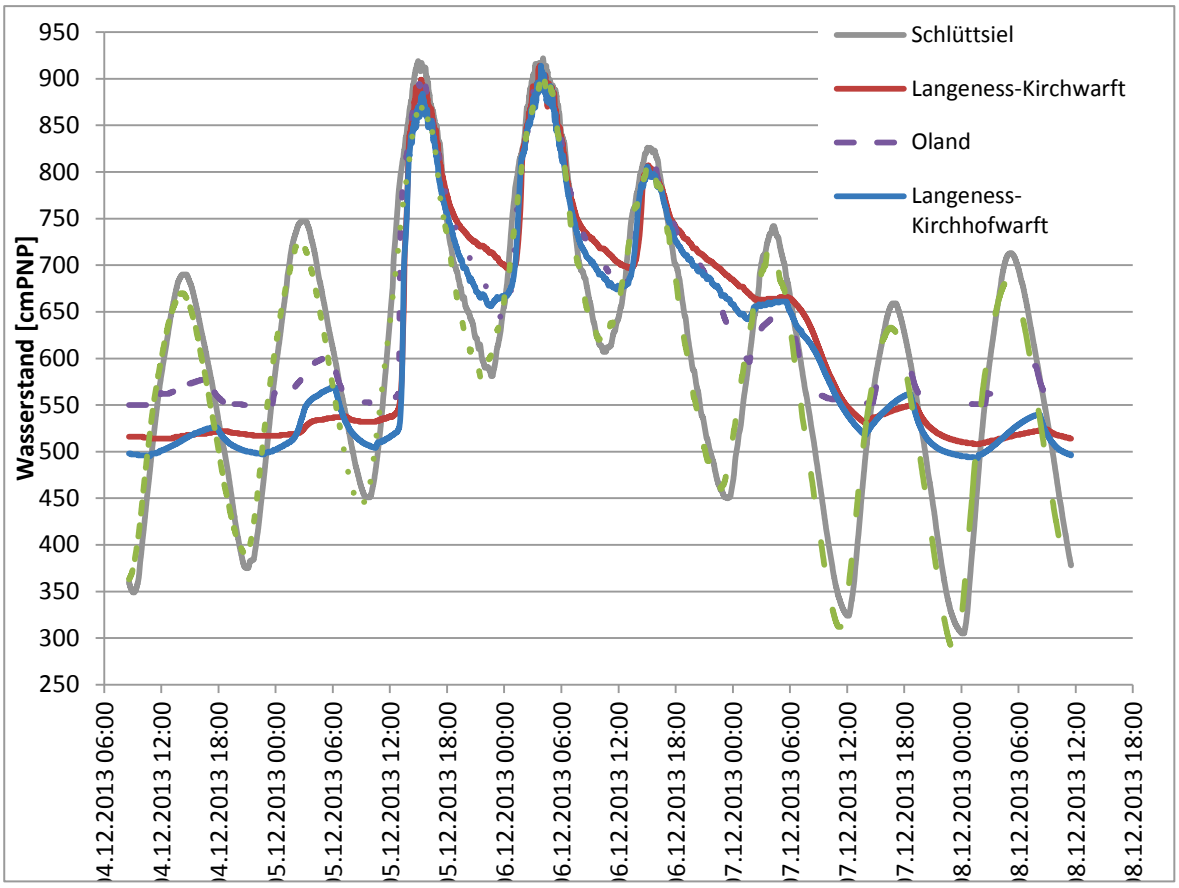


Abbildung 14: Verlauf des Sturmflutereignisses Xaver vom 04.12 bis 08.12.2013

Auch die Veränderung von Wasserstandsparameter kann auf der Grundlage der durchgeführten hydrologischen Messungen ermittelt und dargestellt werden. Bespielhaft sind die Zeitreihen der Mittleren Tidehochwasser (MThw) und Mittleren Tideniedrigwasser (MTnw) dargestellt. So zeigen die Trends der Pegel Schlüttsiel, Strucklahnungshörn und Hooge-Anleger, dass im Bereich der Halligen eine Zunahme des mittleren Tidehochwassers um 0,31 (Hooge-Anleger) bis 0,5 cm/Jahr (Schlüttsiel und Strucklahnungshörn) zu erwarten ist. Strucklahnungshörn weist ebenfalls seit Aufzeichungsbeginn Anfang der 1960 er Jahre eine deutliche Zunahme des MTnw um 0,32 cm/Jahr auf, allerdings steigt in keinem Fall das MTnw ähnlich stark wie das MThw. Damit ist eine Zunahme des mittleren Tidenhubs nachgewiesen und ist auch weiterhin zu erwarten.

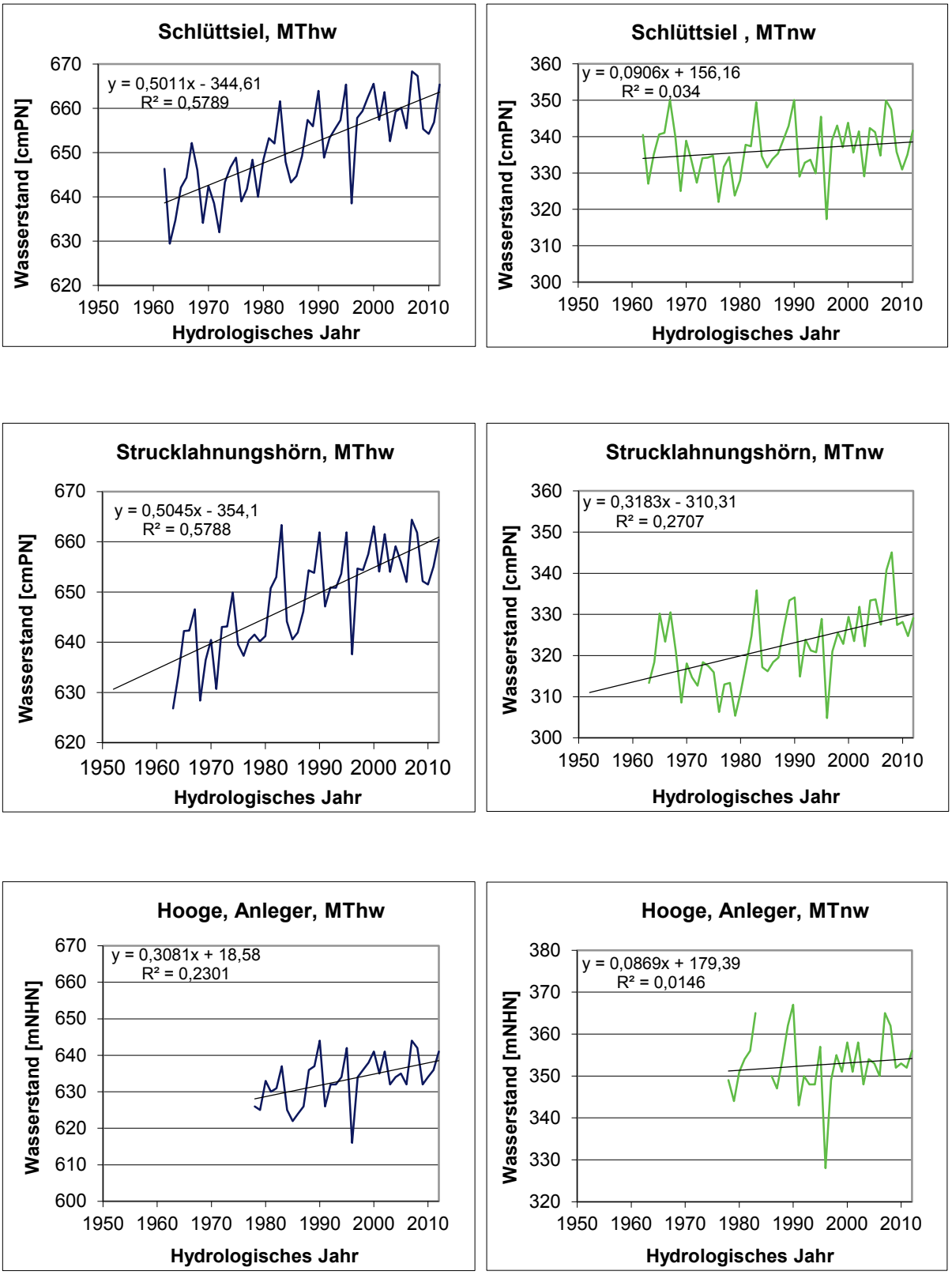


Abbildung 15: Veränderung des mittleren Tidehoch- und des mittleren Tideniedrigwassers im Bereich der Halligen

Leider liegen nicht für jeden Pegel lange Zeitreihen (über 50 Jahre) vor (vgl. Hooge-Anleger), was für eine belastbare hydrologische Analyse mit entscheidend ist. Aus diesem Grund wurden Daten der Pegel der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung (WSV) mit einbezogen.

Weitergehende hydrologische Auswertungen sind in den jeweiligen Teilprojekten ausführlich beschrieben.

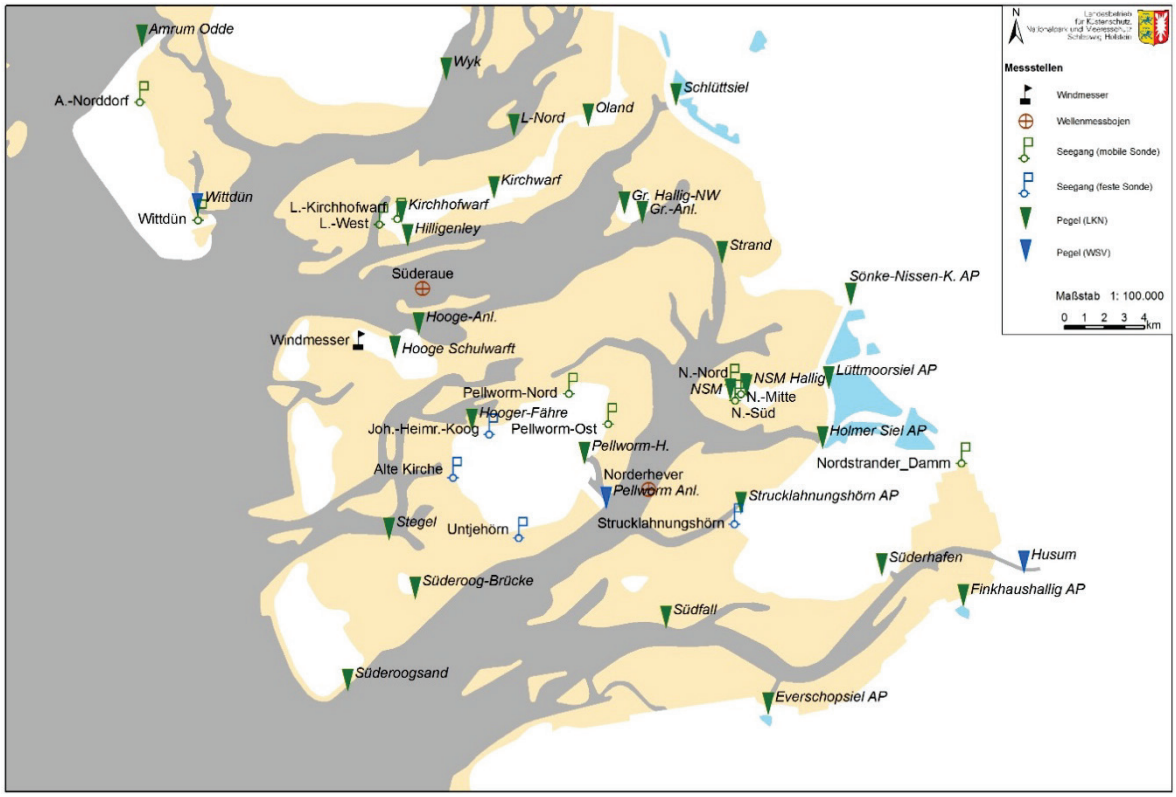


Abbildung 16: Standorte der hydrologischen Messstationen im Bereich der Halligen

Neben dem hydrologischen Monitorring wird für die wichtigen Aussagen zur Topographie und Morphologie vom LKN-SH regelmäßig das Wattenmeer vermessen, um u. a. Veränderungen der Wattflächen, der Wattströme oder auch der Außensände zu dokumentieren. Die Daten wurden den Projektpartnern für deren Untersuchungen zur Verfügung gestellt. Auch die Oberfläche der Halligen wurde vermessen um u. a. zu ermitteln, ob die Halligen mit dem Anstieg des Meeresspiegels mitwachsen. Weiterhin wurden Küstenschutzwerke auf den Halligen aufgemessen für die Aufbereitung und Archivierung im KIS (Küsteninformationssystem des LKN-SH). Für diese Datenerhebungen wurden neben den herkömmlichen terretrischen und nautischen Vermessungen auch Laserscanvermessungen verwendet.

Für die Durchführung des Einstauversuches Osterwehl auf Langeneß (siehe Abschnitt B und D) wurden für den engeren Bereich des Osterwehls Querprofile aufgenommen um mögliche Veränderungen der Topographie zu dokumentieren.

3.4 Fazit

Für die Bemessung von Bauwerken müssen umfangreiche hydrologische Daten ermittelt werden. Wichtig ist die Berechnung, Ermittlung und Validierung der Daten bezogen auf die Parameter Windgeschwindigkeit, Windrichtung, Wasserstand, mittlere Tide, Wellenrichtung, Wellenhöhe, Watthöhen und Geländehöhen.

Zudem werden regelmäßige terrestrische und nautische Vermessungen werden durchgeführt, um Veränderungen der Bathymetrie zu dokumentieren. Zum einen können Bauwerke an den Halligen Einfluss auf die Bathymetrie haben, zum anderen können frühzeitig z.B. Prielverlagerungen in Richtung der Halligen erkannt werden, die ggf. Einfluss auf die Halligkanten haben.

Weiterhin wird geprüft ob es sinnvoll ist, langfristige Grundwassermessstellen auf den Halligen einzurichten, um u. a. den Grundwasserstand auf den Halligen zu beobachten und gegebenenfalls Veränderungen des Salzgehaltes zu ermitteln. So kann geprüft werden, ob durch eine Deckwerkerhöhung und - eine gegebenenfalls damit verbundene seltenere Überflutung der Halligen- eine Aussüßung des Grundwassers auf den Halligen eintritt.

Im Ergebnis lässt sich festhalten, dass die im Kapitel 3 beschriebene differenzierte Betrachtung des Gebiets ein umfassendes Verständnis für die ablaufenden Prozesse im Bereich der Halligen ermöglicht und damit einen umfassenden Küstenschutz gewährleisten kann.

4 Wirksamkeit der Küstenschutzanlagen auf den Halligen

In Schleswig-Holstein sind für die Landesschutzdeiche Referenz- und Bemessungswasserstände für eine Sicherheitsüberprüfung und Bemessung von Küstenschutzwerken ermittelt worden.

Gemäß dem Generalplan Küstenschutz wurden für die Landesschutzdeiche in Schleswig- Holstein Bemessungswasserstände auf der Grundlage eines Referenzwasserstandes HW_{200} zuzüglich eines Klimazuschlags von 50 cm festgelegt. Der Referenzwasserstand ergibt sich für die Nordseeküste aus statistisch errechneten Sturmflutwasserständen mit einer Eintrittswahrscheinlichkeit von 200 Jahren (siehe auch Tabelle 4). Alle Deichabschnitte, die bei Eintritt dieses Referenzwasserstandes einen Wellenüberlauf von 2 l/sec *m² unterschreiten, gelten als „wirksam“.

Für die Halligen ist bislang noch kein Referenzwasserstand bzw. Bemessungswasserstand festgelegt. Z. Z. wird die Entwicklung möglichst einheitlicher Sicherheitskriterien zur Quantifizierung des Sicherheitsstandards für Halligwarften erarbeitet. Auf der Grundlage dieser Ermittlungen soll auch bei den sehr unterschiedlich aufgebauten und exponierten Warftkörpern eine Vergleichbarkeit der jeweiligen Gefährdung infolge von Sturmflutereignissen hergestellt werden. Anschließend soll eine Quantifizierung des derzeitigen Sicherheitsstatus aller Halligwarften anhand dieser Sicherheitskriterien durchgeführt werden.

Der Erhalt der Halligen und damit verbunden die langfristige Bewohnbarkeit hängt entscheidend von seinen wirksamen Schutzanlagen ab. Vor allem die Warften rücken dabei in den Mittelpunkt, da sie die einzige Siedlungsmöglichkeit auf der Hallig darstellen und damit für die Bewirtschaftung und Bewohnbarkeit der Halligen maßgeblich sind.

Im Teilprojekt B wurden von der RWTH Aachen hierzu bereits 2013 erste Überlegungen und Berechnungen durchgeführt.

Im Rahmen der Arbeitsgruppe Hallig 2050 wurden unter Beteiligung u. a. der Halligbürgermeister, der Amtsverwaltung, dem MELUR und dem LKN-SH in einem ersten Entwurf Handlungsbedarfe für eventuelle Warftverstärkungen formuliert. In der Anlage 1 ist der Bericht der AG Hallig 2050 beigefügt.

Zurzeit werden von der Technischen Universität Hamburg-Harburg (TUHH) Untersuchungen u. a. an Polyurethan verklammerten Halligdeckwerken (Elastocoast-Deckwerk/Schüttsteindeckwerkwerk mit 2-Komponenten-Verklebung) durchgeführt. Diese Halligdeckwerke unterscheiden sich im Wesentlichen durch den Gebrauch von kleineren Schüttsteinen, welche mit einem Kunststoff dünn ummantelt und verklebt werden. So entsteht ein durchlässiger Bauwerkskörper, durch den Wasser bei steigender Flut auf die Hallig dringen und ein Wasserpolster auf der Hallig bilden kann. Durch die Bildung des Wasserpolsters wird die Energie überschlagender Wellen gemindert. Zusätzlich soll diese Bauweise die einwirkende Energie reduzieren, sodass die Belastung auf das Bauwerk dezimiert wird. Weiterhin stellt sich die Frage, ob der Sedimenteintrag durch diese innovative Bauweise gefördert werden kann. Der Eintrag von Sediment fördert das Wachstum der Hallig. Durch Erhöhung der Bauwerke wird die Halligüberflutung gegebenenfalls reduziert und damit verbunden ist eine geringere Sedimentation auf den Halligen (vgl. Teilprojekt D). Um diese teilweise in Feldversuchen und bei bereits installierten Deckwerken festgestellten Annahmen zu bestätigen, werden die Elastocoast- Deckwerke hinsichtlich ihrer Durchlässigkeit, ihres Porenraums, ihres Sedimentrückhalts, ihrer Abrasionsprozesse und gegebenenfalls ihrer Transmissionseffekte untersucht.

Tabelle 6: Handlungsbedarfe Warftverstärkung (nach AG Hallig 2050)

Hallig	Warft	Ist-Höhe	HW_{100}	HW_{200}	Handlungsbedarf
Gröde (11)	Kirchwarf	5,16	5,20	5,40	erheblicher Handlungsbedarf
	Knutzwarf	5,28	5,20	5,40	erheblicher Handlungsbedarf
Nordstrandischmoor (21)	Amalienwarf	5,29	5,40	5,60	erheblicher Handlungsbedarf
	Halberweg	5,26	5,40	5,60	erheblicher Handlungsbedarf
	Neuwarf	5,78	5,40	5,60	
	Norderwarf	5,80	5,40	5,60	
Hooge (92)	Backenswarf	5,43	4,75	4,90	betroffen bei höheren Fluten
	Hanswarf	4,96	4,75	4,90	weiniger betroffen bei höheren Fluten
	Ipkenswarf	5,24	4,75	4,90	weiniger betroffen bei höheren Fluten
	Kirchwarf	5,42	4,75	4,90	
	Lorenzwarf	4,94	4,75	4,90	betroffen bei höheren Fluten
	Mitteltritt	4,94	4,75	4,90	betroffen bei höheren Fluten
	Ockelützwarf	5,27	4,75	4,90	betroffen bei höheren Fluten
	Ockenswarf	5,56	4,75	4,90	
	Volkertswarf	5,32	4,75	4,90	weiniger betroffen bei höheren Fluten
	Westerwarf	5,39	4,75	4,90	besonders exponierte Randlage
Oland (27)		5,87	5,15	5,30	Handlungsbedarf
Langeneß (115)	Bandixwarf	5,54	5,05	5,20	
	Christianswarf	4,74	5,05	5,20	
	Hilligenley	5,26	4,85	5,10	erheblicher Handlungsbedarf
	Honkenswarf	5,19	5,05	5,20	
	Hunnenswarf	5,41	5,05	5,20	
	Ketelswarf	5,37	5,05	5,20	
	Kirchhofwarf	4,64	4,85	5,10	
	Kirchwarf	5,36	5,05	5,20	
	Mayenswarf	4,89	4,85	5,10	erheblicher Handlungsbedarf
	Neuwarf	5,28	5,05	5,20	
	Norderhörn	4,86	4,85	5,10	erheblicher Handlungsbedarf
	Peterheitzwarf	4,85	4,85	5,10	
	Peterswarf	5,14	5,05	5,20	erheblicher Handlungsbedarf
	Rixwarf	4,95	4,85	5,10	erheblicher Handlungsbedarf
	Süderhörn	5,44	4,85	5,10	erheblicher Handlungsbedarf
	Tadenswarf	5,14	5,05	5,20	
	Tamenswarf	4,95	5,05	5,20	besonders exponierte Randlage
	Treuberg	3,94	4,85	5,10	

Zurzeit werden von der Technischen Universität Hamburg-Harburg (TUHH) Untersuchungen u. a. an Polyurethan verklammerten Halligdeckwerken (Elastocoast-Deckwerk/ Schüttstein-deckwerkwerk mit 2-Komponenten-Verklebung) durchgeführt. Diese Halligdeckwerke unterscheiden sich im Wesentlichen durch den Gebrauch von kleineren Schüttsteinen, welche mit einem Kunststoff dünn ummantelt und verklebt werden. So entsteht ein durchlässiger Bauwerkskörper, durch den Wasser bei steigender Flut auf die Hallig dringen und ein Wasserpolster auf der Hallig bilden kann. Durch die Bildung des Wasserpolsters wird die

Energie überschlagender Wellen gemindert. Zusätzlich soll diese Bauweise die einwirkende Energie reduzieren, sodass die Belastung auf das Bauwerk dezimiert wird. Weiterhin stellt sich die Frage, ob der Sedimenteintrag durch diese innovative Bauweise gefördert werden kann. Der Eintrag von Sediment fördert das Wachstum der Hallig. Durch Erhöhung der Bauwerke wird die Halligüberflutung gegebenenfalls reduziert und damit verbunden ist eine geringere Sedimentation auf den Halligen (vgl. Teilprojekt D). Um diese teilweise in Feldversuchen und bei bereits installierten Deckwerken festgestellten Annahmen zu bestätigen, werden die Elastocoast- Deckwerke hinsichtlich ihrer Durchlässigkeit, ihres Porenraums, ihres Sedimentrückhalts, ihrer Abrasionsprozesse und gegebenenfalls ihrer Transmissionseffekte untersucht.

Außerdem wird der Frage nachgegangen, ob sich durch die geplanten Deckwerksverstärkungen eine Veränderung der Vegetation auf den Halligen einstellt und es gegebenenfalls zu einer Minimierung oder sogar zum Verlust der Salzwiesen kommt, bzw. es zu einer Aussüßung der wertvollen Salzwiesen kommt mit einer möglichen Vegetationsveränderung. Die Universität Oldenburg untersucht im Auftrage des LKN-SH, ob die Überflutungshäufigkeit und –dauer einen Effekt auf die Salzwiesenausprägung hat und ob durch eine Verringerung der Überflutung die Salzwiesen aussüßen können. Hierzu soll u. a. das anstehende Grundwasser untersucht werden, da die Annahme besteht, dass die Versalzung über das Grundwasser erfolgt und damit unabhängig von Überflutungen ist. Dieser Punkt korreliert mit der Vorstellung ein Deckwerk zu entwickeln, welches durch die Förderung des Sedimenteintrag (und damit des salzigen Meereswassers) das Halligland mitwachsen lässt, ohne dabei den Schutz der Bewohner zu mindern.

5 Qualitative Ergänzung des Schutzstandards

Neben der quantitativen Beurteilung der Schutzgüte sollten weitere qualitativ bewertbare Parameter in die Betrachtung einbezogen werden, die als Ergänzung zum Schutzstandard hinzugezogen werden. So können die Bewohner z.B. durch Verschottungen ihr Haus und ihr Leben schützen, selbst wenn die Warft überspült wird. Es wird z. Z. eine Bestandsaufnahme hinsichtlich der vorhandenen Verschottungen durchgeführt mit dem Ziel entsprechende Grundlagen für die Beschaffung und Installation zu erstellen. Die qualitativen Schutzausrüstungen beschränken sich dabei auf die Warft als Siedlungs- und Bewirtschaftungsschwerpunkt der Hallig.

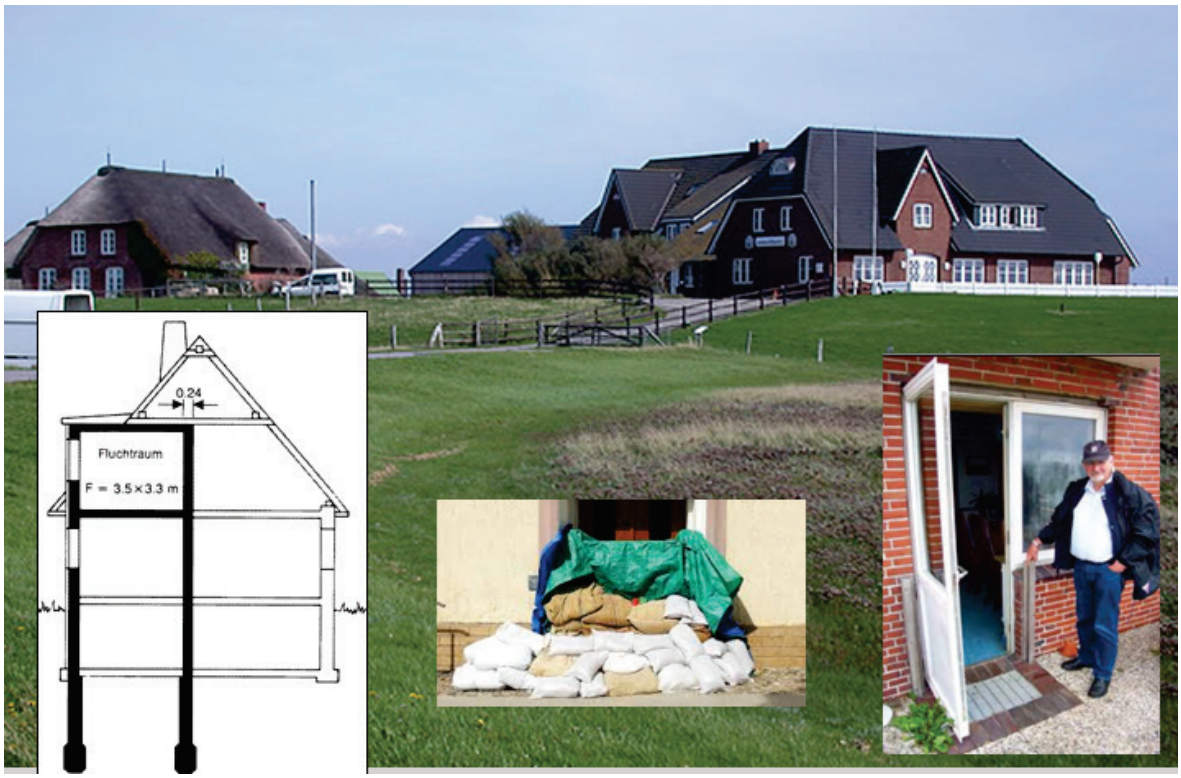


Abbildung 17: Schutzraum und Verschottungen auf den Halligwarften

Um herauszufinden, welche Schutzeinrichtungen auf den Warften vorhanden sind und um einschätzen zu können, welche Qualität sie haben, wurde ein Fragebogen entworfen und an die Haushalte auf den Halligen verteilt. Dieser Fragebogen beinhaltete folgende Fragen:

- Sind Verschottungsmöglichkeiten (Balken, Schaltafeln, Metallkonstruktionen etc.) für die Häuser zum Abdichtung von z.B. Fenstern und Türen vorhanden?

- Sind Verschottungsmöglichkeiten (Balken, Schaltafeln, Metallkonstruktionen etc.) für die Warften zum Abdichten von z.B. Stöpen oder Vertiefungen (bei Auffahrten) vorhanden?
- Sind auf jeder Warft bzw. für jedes Haus Sandsäcke vorhanden?
- Sind die Schutzräume groß genug, um allen Bewohnern einer Warft Schutz zu bieten? Sind diese gut erreichbar?
- Sind weitere Schutzeinrichtungen auf den Warften vorhanden? Wenn ja, welche?

5.1 Auswertung der Fragebögen

Da nicht für alle Warften die Fragen beantwortet wurden, kann die Auswertung der Fragebögen nur eine Tendenz aufzeigen. Eine Übertragbarkeit von den Aussagen einzelner Warften auf die ganze Hallig ist nicht generell gegeben. Im Wesentlichen lassen sich die Angaben der Bewohner wie folgt zusammenfassen:

- Es sind nicht alle Gebäude auf den Warften mit Verschottungen versehen und meist befinden diese sich nur an den Türen, nicht an den Fenstern.
- Dort, wo Stöpen auf den Warften sind, können diese auch abgedichtet werden.
- Sandsäcke sind teilweise vorhanden, aber meist ist kein Sand vorrätig und die Anzahl wird ebenfalls als zu gering erachtet. Es wird bezweifelt, dass Sandsäcke die Warft oder die Gebäude sichern können, da diese bei schwerer See schnell weggeblasen werden und die Gebäude nicht richtig abdichten.
- Auf Hooge wird die Frage nach der ausreichenden Größe und Erreichbarkeit von Schutzräumen für alle Warften mit „teilweise“ beantwortet. Auf Langeneß geben 50% an, die Schutzräume seien ausreichend groß und erreichbar, auf 4 Warften wird die Größe als nicht ausreichend empfunden. Hier wird vor allem bemängelt, dass bei hohem Besucheraufkommen die Größe nicht ausreicht und die Erreichbarkeit der Schutzräume als problematisch gesehen wird. In zwei Fällen wird die Funktionsfähigkeit der Schutzräume aufgrund des Alters und der Beschaffenheit angezweifelt.
- Auf zwei Warften wurden hochgezogene Lüftungsrohre am Kellerfenster und Entwässerungsrohre sowie Rückstauklappe am Fething als weitere Schutzeinrichtung angegeben, alle anderen gaben an, dass es keine weiteren Schutzeinrichtungen auf den Warften gibt.

Demnach lassen sich neben den quantitativen Hochwasserschutz- und Küstensicherungsbauwerken folgende Schutzeinrichtungen auf den Warften feststellen:

1. Schutzräume

2. Verschottungseinrichtung für Gebäude (i.d.R. Bretter oder Schaltafeln)
3. Verschottungseinrichtung für Stöpen (z.B. Vierkanthölzer)
4. Sandsäcke
5. Entwässerungsrohre und Rückstauklappen am Fething

5.2 Methodik der Bewertung

Die Bewertung der qualitativen Schutzausrüstung erfolgt in verbal-argumentativer Form auf Grundlage der Aussagen der Halligbewohner. Da an der Befragung leider nicht alle Halligbewohner teilgenommen haben und die Aussagen teilweise subjektiv sind (für einen jüngeren Bewohner ist das Erreichen eines Schutzraumes ggf. leichter, als für ältere Bewohner), spiegelt die Bewertung nicht unbedingt eine vollständige Realität wider, sondern zeigt lediglich Tendenzen auf, wo Handlungsbedarf besteht. Darüber hinaus wird die Bedeutung der Schutzausrüstung für die Halligbewohner schlussgefolgert. Um die Ergebnisse dieser Umfrage zu validieren oder zu widerlegen, ist eine Erfassung der Schutzeinrichtungen vor Ort essentiell. Dies kann im Rahmen dieses Projektes nicht erfolgen, da zum Teil Privateigentum tangiert wird. Diese Begehung wird daher von offizieller behördlicher Seite durchzuführen sein, gegebenenfalls im Zusammenhang mit den regelmäßigen Warftschauen. Wie schon unter Kapitel 5 angemerkt, wird in 2014 eine Bestandsaufnahme der Verschottungen an den Gebäuden durchgeführt.

5.3 Bewertung der qualitativen Schutzausrüstung

Die **Schutzräume** sind auf allen bewohnten Warften vorhanden, werden von den Halligbewohnern sehr differenziert beantwortet. Fünf der neun Fragebögen auf Langeneß besagten, dass die Schutzräume

- sehr alt (aus den Anfang 1960er),
- von schlechter Ausgestaltung,
- zu klein (v.a. bei hohen Besucherzahlen) und
- die Erreichbarkeit nicht immer gewährleistet ist (v.a. bei hohen Besucherzahlen).

Obwohl Schutzräume auf benachbarten Warften in ausreichender Größe und gutem Zustand vorhanden sind, wird die Schutzgüte trotzdem mit **mittel** bewertet, auch aufgrund der o. a Punkte. Auf der Hallig Hooge wird angegeben, dass die Schutzräume nur teilweise gut erreichbar aber wohl in ausreichender Größe vorhanden sind. Aufgrund dieser Aussage wird die Schutzeinrichtung mit **mittel** bewertet. Auf Nordstrandischmoor ist die mit Abstand einwohnerreichste Warft auf der

Hallig, die Neuwarft, mit Schutzräumen in ausreichender Größe und guter Erreichbarkeit ausgestattet, wodurch sie die Einstufung **gut** bekommt.

Tabelle 7: Bewertung der Schutzeinrichtung "Schutzraum"

Hallig	Bewertung Funktionalität und Zustand
Hooge	mittel
Nordstrandischmoor	gut
Langeneß	mittel

Viele Wohnhäuser sind auf Langeneß mit **Verschottungseinrichtungen** (zumindest für die Türen) ausgestattet. Andererseits wird angegeben, dass keine Verschottungen vorhanden oder diese älter als 30 Jahre sind. Der Zustand wird in dem Fall als schlecht empfunden und die Funktionalität bezweifelt. Daher wird der Zustand und die Funktionalität der Schutzeinrichtungen auf Langeneß mit **mittel** bewertet. Auf Nordstrandischmoor sind die Häuser überwiegend mit Verschottungskonstruktionen ausgestattet. Da negative Hinweise fehlen, wird die Verschottungsmöglichkeit an Gebäuden auf Nordstrandischmoor mit **gut** bewertet. Auf Hooge wird die Situation mit der Benennung „teilweise“ grob zusammengefasst, woraus sich eine **mittlere** Bewertung ergibt.

Tabelle 8: Bewertung der Schutzeinrichtung "Verschottung an Gebäuden"

Hallig	Bewertung Funktionalität und Zustand
Hooge	mittel
Nordstrandischmoor	gut
Langeneß	mittel

Die Bewertung der Funktionalität der **Warftverschottung** gestaltet sich anhand der Fragebögen als nur eingeschränkt bewertbar, da nicht eindeutige Antworten gegeben wurden. So schrieben auf Langeneß viele, dass keine Verschottungen der Warft vorhanden sind. Jedoch muss hier differenziert werden, ob dies denn auch notwendig ist. Dort, wo z.B. keine Stöpen vorhanden sind, ist auch kein Bedarf an einer Verschottungseinrichtung. Aus den Aussagen kann nur anhand vierer Aussagen abgeleitet werden, dass dort, wo sich Stöpen befinden, diese auch abgedichtet werden

können und in einem Fall keine Verschottungsmöglichkeiten vorhanden sind, weil es keine Stöpen auf der Warft gibt. Alle weiteren Aussagen sind nicht zuzuordnen.

Auf den Halligen Hooge und Nordstrandischmoor sind keine Stöpen vorhanden, daher entfällt dieser Parameter bei der Bewertung.

Der Schutz durch **Sandsäcke** scheint hingegen keine geeignete Schutzmöglichkeit zu sein, da oft benannt wurde, dass entweder keine Sandsäcke vorhanden sind oder diese zwar vorhanden sind, aber kein Sand zur Verfügung stehe. Darüber hinaus wird konstatiert, dass sie keine Türen abdichten und durch den Seegang schnell abgetragen werden.

Tabelle 9: Bewertung der Schutzeinrichtung "Sandsäcke"

Hallig	Bewertung Funktionalität und Zustand
Hooge	schlecht
Nordstrandischmoor	schlecht
Langeneß	schlecht

Weitere Schutzeinrichtungen, wie Entwässerungsrohre und Rückstauklappen am Fething scheinen, wenn man nach der Häufigkeit der Nennung geht, eine geringe Bedeutung zu haben. Das kann aber damit zusammenhängen, dass diese Einrichtungen nicht als Schutzeinrichtung wahrgenommen werden, da sie erst benötigt werden, wenn die Warftoberkante überströmt worden ist. Da sie das Wasser schneller ableiten und damit das Gebäude möglicherweise schneller trocken legen und höhere Wasserstände vermeiden, können sie dennoch den Schutzeinrichtungen zugeordnet werden.

5.4 Weiterer Ermittlungsbedarf

Da nicht für jede Warft genaue Angaben vorliegen und auf Hooge die Aussagen relativ allgemein gehalten wurden, können keine allgemeingültigen Aussagen über eine qualitative Ergänzung zum Schutzstandard für die einzelnen Warften getroffen werden.

Es lassen sich jedoch folgende allgemeine Aussagen ableiten:

- Sandsäcke als Schutzelement werden als geringwertig empfunden
- v.a. auf Langeneß scheint der Bedarf an Überprüfung und ggf. Neubau/Ausbau von Schutzräumen groß
- die Verschottungseinrichtungen an Gebäuden sollte v.a. auf Hooge und Langeneß verbessert werden.

Um eine umfassende Aussage zur den nicht quantifizierbaren Schutzeinrichtungen treffen zu können, sind weitere Erhebungen erforderlich und wurden schon teilweise im Rahmen der AG Hallig 2050 initiiert. Im Folgenden werden Empfehlungen für eine weitere Erhebung gegeben, die eine Bewertung der qualitativen Schutzausrüstungen ermöglichen könnten:

Aus den Angaben lässt sich schließen, dass Schutzräume einen hohen Stellenwert haben, da hierzu die umfassendsten Angaben (Besorgnis über Zustand, schlechte Erreichbarkeit und Größe kundgetan) gemacht wurden. Aufgrund der Bedeutung der vorhandenen Schutzausrüstungen sollte eine Überprüfung der Schutzräume hohe Priorität haben. Da die Angaben aus der Befragung nicht immer vollständig und sehr differenziert sind, sollte unter Beteiligung der Halligbewohner eine Begehung mit einer Bestandsaufnahme der Schutzräume durchgeführt werden. So können zum einen der tatsächliche Bestand und zum anderen der Zustand, die Zugängigkeit und die Größe der Räume erfasst und optimiert werden. Vorab sind für die bauliche und betriebliche Ausrüstung der Schutzräume entsprechende Kriterien und Standards festgelegt werden werden.

Es wäre sinnvoll, die Höhenlage der Gebäude (Fußbogen, Fenster) auf den Warften zu ermitteln.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen des vom BMFT geförderten KFKI Forschungsvorhaben ZukunftHallig wurde vom Landesbetrieb für Küstenschutz, Nationalpark und Meeresschutz des Landes Schleswig-Holstein (LKN-SH) eine Bestandsaufnahme aller Küstenschutzwerke auf den Halligen vorgenommen und in einem Bauwerkskatalog systematisch aufbereitet und dokumentiert. Diese Zusammenstellung ermöglicht den LKN-SH seine Küstenschutzarbeiten effizienter zu planen und durchzuführen. Weiterhin kann auf der Grundlage dieser vorliegenden Daten die Wirksamkeit der einzelnen Küstenschutzmaßnahmen ermittelt und dokumentiert werden. Außerdem wurden im Rahmen eines Fragebogens qualitative Schutzausrüstungen auf den Halligen erfasst und hinsichtlich Ihrer Funktion bewertet. Hierbei wurde deutlich, dass es weitergehende Erhebungen bedarf z. B. zu Verschrottungen an den Gebäuden und zu den Schutzräumen. Diese Anregung wurde teilweilweise bereits aufgenommen, z. Z. wird eine Bestandaufnahme der vorhandenen Verschottungen an den Halliggebäuden vorgenommen sowie eine Bedarfsermittlung für noch zu beschaffende und einzurichtende Bauteile.

In Zusammenarbeit mit der AG Hallig 2050 wurde im Projekt ZukunftHallig ein hydrologisches Messkonzept entwickelt und installiert. Die Daten wurden aufbereitet und den Projektpartnern für die jeweiligen Untersuchungen zu Verfügung gestellt. Die hydrologischen

Daten dienen als Grundlage für die Bemessung von Schutz- und Sicherungsbauwerken auf den Halligen. Weiterhin sollen damit auch Trendänderungen hydrologischer Parameter zum Meeresspiegelanstieg und in der Sturmflutintensität erkannt werden.

Die im Projekt zusammen mit den Partnern entwickelten Ansätze wie z. B. Bemessung der Halligdeckwerke, Quantifizierung des Sicherheitsstandards für Halligwarften, Verbesserung des Halligwachstums werden aufgegriffen und fortgeführt.

Literatur

MELUR 2013: Generalplan Küstenschutz des Landes Schleswig-Holstein, Fortschreibung 2012, Ministerium für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein, April 2013

MLR 1999:Richtlinie für die Förderung von Warftverstärkungen, Ministerium für ländliche Räume, Ernährung und Tourismus des Landes Schleswig-Holstein, Juli 1999

KUMBRUCK 2009: Halligraustreifen (Halligigel) als Wellen- und Erosionsschutz - Funktionsweise und Bemessung, Diplomarbeit Nina Kumbruck ,November.2008

IAWG 2011: Regionalisierung der statistischen Sturmflutwasserstände an der West- und Ostküste Schleswig-Holsteins, Dr. Winfried Willems, IAWG März 2011 (Auftrag LKN-SH)

AG Hallig 2050; Möglichkeiten zur langfristigen Erhaltung der Halligen im Klimawandel, Bericht der Arbeitsgruppe HALLIGEN 2050, April 2014

ZukunftHallig D

gefördert durch:	BMBF
Förderkennzeichen:	03KIS096
Bearbeitungszeitraum:	01.12.2010 - 30.11.2013
Projektverlängerung:	01.12.2013 - 30.04.2014
Kassenzeichen:	810302376229

Aufgestellt von:

Dr. Volker Karius
Dipl. Geograph Malte Schindler
Dr. Matthias Deicke
Prof. Dr. Hilmar von Eynatten

Abteilung
Sedimentologie/Umweltgeologie
am GZG der Universität Göttingen

Göttingen, Mai 2014

Kontakt: Volker Karius | e-Mail: vkarius@uni-goettingen.de

Danksagung

Wir danken in erster Linie allen Einwohnern und Einwohnerinnen und besonders den Besitzern der Fennen der Halligen Hooge, Langeness und Nordstrandischmoor für Ihre Gastfreundschaft und Bereitschaft ihre Weiden für unsere Messgeräte zur Verfügung zu stellen. Ohne Ihr Mitwirken wäre dieses Projekt unmöglich gewesen. Besonderer Dank gebührt den amtierenden und ehemaligen Halligbürgermeistern bzw. Vorstehern Matthias Piepgras, Fiede Nissen und Ruth Kruse sowie der Schutzstation Wattenmeer namentlich Michael Klisch, Ilka Hoppe und ihren unzähligen Helferinnen und Helfern für vielfältige, unbürokratische Hilfe, manch guten Rat und Ermahnung, sowie Unterkunft bei Sonne und etlichen Stürmen.

Ohne die Mitarbeit des LKN-SH wäre nichts gegangen – ein grosses Dankeschön an Frerk Jensen stellvertretend für viele weitere Mitarbeiter.

Weiterer Dank geht an unsere Projektpartner in Husum, Aachen und Siegen, mit denen eine inhaltlich wie atmosphärisch wirklich gute Zusammenarbeit gelungen ist, sowie an die Mitglieder der projektbegleitenden Gruppe, die durch Ihre Anregungen die Arbeit mannigfaltig befruchtet haben.

Vielen Dank an Jürgen Jensen für seine Leistung als Projektkoordinator und an Arne Arns, der das Rückgrat dieser Leistung war!

Ein wichtiger Dank gebührt Irina Ottenbacher, Judit Dunklné-Nagy, Cornelia Friedrich, sowie Marja Kröger, Stefanie Jähnig, Anna Arsenijevic, David Schomberg und Katarina Willim für Ihre Hilfe bei allen Feld- und Laborarbeiten sowie dem Team vom Isolab Göttingen für die Radionuklidmessungen.

Ein weiterer Dank geht an Marc Carson (Universität Hamburg) für die Bereitstellung der regionalen Meerspiegelprojektionen des IPCC AP5 Berichtes.

Schließlich bedanken wir uns ganz herzlich beim KFKI und BMBF für die Finanzierung des Projektes.

Göttingen, im Mai 2014

Volker Karius, Malte Schindler, Matthias Deike, Hilmar von Eynatten

Kurzfassung

Die nordfriesischen Halligen und niedrige Bereiche der ostfriesischen Inselmarschen stehen vor der Herausforderung steigender Wasserstände (RMSL, MThw, HThw). Quantitative Aussagen zu treffen über das natürliche Anpassungspotential der regelmäßig überfluteten Bereiche war Gegenstand des vorliegenden Berichtteils. Mittlere Sedimentaufwachsraten im Zeitraum 1986-2011 belaufen sich auf 1.4 ± 0.6 mm/a (Hooge), 1.6 ± 0.7 mm/a (Langeness) und 3.2 ± 1.6 mm/a (Nordstrandischmoor). Auf den ostfriesischen Inseln wurden im Zeitraum 2011-2013 mittlere Raten von 2.4 ± 1.0 mm/a (Norderney, östlicher Grohdepolder) und 0.75 ± 0.25 mm/a (Juist, südlicher Billpolder) gemessen. Dem steht ein Anstieg des RMSL gegenüber, der derzeit 2.6 mm/a (Pegel Wyk auf Föhr) beträgt bzw. ein Anstieg des MThw von 5.0 mm/a (Pegel Wyk auf Föhr). Durch die Diskrepanz zwischen Höhenentwicklung der Halligmarschen und der Wasserstandsentwicklung resultieren steigende hydrodynmische Belastungen auf die Marschen und die Warften. Diese bestehen aus höheren Wasserständen während eines Landunters sowie einem potentiell höheren Wellengang. Die Sedimentakkumulation auf den Halligen Hooge und Langeness wird maßgeblich von der Anzahl an Sturmfluten gesteuert, die eine Höhe von 1.54 m über MThw überschreiten. Die Hallig Nordstrandischmoor profitiert dagegen auch von Überflutungen mit geringeren Wasserständen. Sedimente werden auf Langeness bevorzugt dicht hinter der Uferlinie abgelagert, auf Hooge liegen die Gebiete mit hoher Sedimentdeposition in der Nähe der Sieltore, während auf Nordstrandischmoor die Sedimente weitgehend gleichmäßig über die Fläche verteilt werden. Ältere im morphologischen Modell sichtbare Hochakkumulationsgebiete entlang der Binnenpriele werden dagegen heute nicht mehr bevorzugt mit Sedimenten versorgt. Es scheint angebracht, kurzfristige Maßnahmen zur technischen Sicherung und Verstärkung der Warften zu ergreifen und mittelfristig durch noch zu evaluierende Maßnahmen (z.B. Änderung der Be- und Entwässerungsstrategie an Deckwerken und Sieltoranlagen) dafür zu sorgen, dass die Sedimentdeposition an die Wasserstandsentwicklung angeglichen wird.

Inhalt

ZukunftHallig D **481**

1 Einleitung **491**

2 Methoden **493**

2.1 Häufigkeit von Landunter Ereignissen 493
2.2 Bestimmung der Bodendichte und des organischen Anteils 501
2.3 Messung der vertikalen Aufwachsraten 501
2.4 Sedimentverteilung und Morphologie 509

3 Ergebnisse **510**

3.1 Häufigkeit von Landunter Ereignissen 510
3.2 Bodendichte und Gehalt an organischer Substanz 516
3.3 Sedimentaufwachsraten und Sedimentakkumulation 518
3.4 Sedimentverteilung 528

4 Diskussion **532**

5 Schlußfolgerungen **537**

Literatur **539**

A Anhang **542**

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Karte des Untersuchungsgebietes. Dargestellt ist das Nordfriesische Wattenmeer zwischen der Insel Föhr und der Halbinsel Eiderstedt. Die untersuchten Halligen sind hervorgehoben. N=Norwegen, S=Schweden, DK= Dänemark, NL= Niederlande, D=Deutschland, B=Belgien, F=Frankreich, GB=Großbritannien, schwarzes Quadrat = Untersuchungsgebiet. 492

Abbildung 2 Lageskizze des Nordfriesischen Wattenmeeres zwischen der Halbinsel Eiderstedt (Süden) und Insel Föhr (Norden). Die drei in der vorliegenden Studie behandelten Halligen sind hervorgehoben. Die Nummerierungen der Pegelstandorte entsprechen der Auflistung in Tabelle 1 494

Abbildung 3 Digitales Höhenmodell (DGM1) der Hallig Langeneß nach der Extraktion aller künstlichen Geländestrukturen (Deiche, Deckwerke, Warften). Die schwarze Linie unterteilt das heutige Langeneß in die Bereiche der ursprünglichen Halligen Nordmarsch (Westen) und Alt-Langeneß (Westen). 496

Abbildung 4 Konservativer, wasserdurchlässiger Rauhstreifen (Halligigel) auf Nordstrandischmoor. Foto: Schindler 2011 497

Abbildung 5 Moderner wasserdurchlässiger Halligigel auf Langeneß. Schotter wird mittels eines Zwei-Komponenten-Klebers (Elastocoast®, BASF) zu einem Rauhstreifen modelliert. Dem Igel vorgelagert eine wasserundurchlässiges Pflaster aus Blöcken. Foto: Deicke 2014 498

Abbildung 6 Alter Rauhstreifen auf Nordstrandischmoor. Das Niveau der binnenseitigen Salzmarsch wächst über die Höhe des Rauhstreifens hinaus. Foto: Schindler 2012. 499

Abbildung 7 Verwendete Sedimentfallen. (A)1 Liter LDPE-Flasche im Marschboden eingelassen. (B1) Fussmatte Typ 1, (B2) Fussmatte Typ 2, (B3) Kunstrasen 502

Abbildung 8 Darstellung der untersuchten Halligen mit den Positionen der Sedimentfallen (Pluszeichen, 61 (Langeness), 36 (Hooge), 12 (Nordstrandischmoor)), den Bohrpositionen (Quadrate) und den Standorten der methodischen Untersuchungen (Kreise). 503

Abbildung 9 Unsupported ^{210}Pb (schwarze Linie) und ^{137}Cs (graue Linie) Aktivitäten aller 12 Rammkerne. Horizontale Fehlerbalken repräsentieren den 1 sigma Fehler der Gammaspektrometrischen Messung. Tiefen beziehen sich auf den Mittelpunkt der datierten Kernabschnitte, korrigiert um die bohrungsbedingte Kompaktion. Das obere ^{137}Cs Maximum wird auf den Reaktorunfall Thernobyl (1986) zurückgeführt. Das untere Maximum markiert das Ende der oberirdischen Atomwaffentests in 1963. 505

Abbildung 10 Die drei Flügeltore der Sielanlage am Osterwehl sind mittels Balkensperren für den Zeitraum der Freilandmessungen fixiert. 507

Abbildung 11 Übersichtskarte über das Einzugsgebiet des Osterwehl an der Peterswarf. Dargestellt sind die Standorte der Sedimentfallen sowie der Fallentransekte entlang des Binnenprielsystems. 508

Abbildung 12 Übersichtskarte über das Einzugsgebiet der Leye am Treuberg. Dargestellt sind die Standorte der Sedimentfallen sowie der Fallentransekte entlang des Binnenprielsystems 508

Abbildung 13 Mittlere Bezugshöhen der Halligen Hooge, Langeneß und Nordstrandischmoor über Normalnull (NN). Dargestellt sind das mittlere Tidehochwasser (MThw), die mittlere Geländeoberfläche (GOF) und die mittlere Höhe der Sommerdeiche (Hooge und Langeneß) bzw. nicht Wasser permeablen Deckwerke (Nordstrandischmoor). 511

Abbildung 14 Langjährige Überflutungshäufigkeiten der Hallig (a) Hooge. Dargestellt sind sowohl die absoluten jährlichen Anzahlen der Land unter (LU) als auch der vollständigen Land unter (vLU) Ereignisse sowie der Trend anhand des 9-jährigen, gleitenden Mittels der jährlichen Anzahlen. 513

Abbildung 15 Langjährige Überflutungshäufigkeiten der Halligen (b) Nordmarsch, (c) Alt-Langeneß. Dargestellt sind sowohl die absoluten jährlichen Anzahlen der Land unter (LU) als auch der vollständigen Land unter (vLU) Ereignisse sowie der Trend anhand des 9-jährigen, gleitenden Mittels der jährlichen Anzahlen. 514

Abbildung 16 Langjährige Überflutungshäufigkeiten der Hallig (d) Nordstrandischmoor. Dargestellt sind sowohl die absoluten jährlichen Anzahlen der Land unter (LU) als auch der vollständigen Land unter (vLU) Ereignisse sowie der Trend anhand des 9-jährigen, gleitenden Mittels der jährlichen Anzahlen. 515

Abbildung 17 Mittlere BDD und LOI Werte als Proxies für organische Bodensubstanz bestimmt an Rammkernen von 2011 (a) Hooge, n = 4, (b) Langeness, n = 6 (b) Nordstrandischmoor, n = 2. Auflösung in 1 cm Abschnitten bis 25 cm Teufe, darunter 5 cm. Der Horizont von 1915 markiert den Deichbau auf den Halligen und damit einhergehende hydraulische und sedimentologische Veränderungen. 516

Abbildung 18 Siliziklastische Sedimentmenge in Sedimentfallen (Typ A, Flasche) unterschiedlicher Einbautiefe. Der Aufbau der Fallen erfolgte an zwei Arealen (1,5 * 2,0 m) mit unterschiedlicher Vegetation (Weide/Brache). Die Fehlerbalken zeigen die Standardabweichng einer Dreifachbestimmung. 518

Abbildung 19 Vergleich der Sedimentsammeleffizienz verschiedener Mattentypen (Ms = Gesamtsedimentmenge). PVC-Fussmatte (B1), PVC-Fussmatte (B2), Kunstrasen (B3). Die Korelation zwischen B3 und B1 ($P < 0.005$; $R^2 = 0.65$; $n = 12$) sowie zwischen B3 und B2 ($P < 0.005$; $R^2 = 0.62$; $n = 12$) ist hochsignifikant. 521

Abbildung 20 Klastische Sedimentdeposition (Mc) im Winterhalbjahr 2011/2012 in Abhängigkeit zur Entfernung von: (a) Uferlinie binnenseitig des Rauhstreifens auf Nordstrandischmoor, (b) Binnenpriel „Leye“ auf Langeneß. Es werden Mittelwerte aus (a) 3 Fallentransekten Typ A (Flasche) und (b) 6 Fallentransekten Typ A (Flasche) dargestellt. 522

Abbildung 21 Mediane Sedimentaufwachsraten für drei Beobachtungszeiträume (jeweils Oktober bis März , 2010 bis 2013) im Vergleich mit der Überflutungsanzahl. 523

Abbildung 22 Vergleich der mittleren Sedimentaufwachsraten (a) Hooge, (b) Langeness and (c) Nordstrandischmoor mit der Sturmfluthäufigkeit. Die Sturmfluthäufigkeit beruht auf dem 19 jährigen gleitenden Mittel der jährlichen Überschreitungsanzahlen (1,54 m ü MThw) am Pegel Wyk auf Föhr 524

Abbildung 23 Sedimentaufwachs (nach ^{210}Pb Alter) im Bohrkern Langeness 2, verglichen mit der Anzahl an Sturmfluten über 1,54 m über MThw (MThw (Hooge) = 1,36 m über NHN im Zeitraum 2001-2010) 524

Abbildung 24 Suspensionsgehalt des Wassers am Sieltor Osterwehl [mg/l], gemessen bei geöffneten Sieltoren mittels ASM-IV Trübemessgerät ca. 50m binnenseitig des Siels. Maximale Reflektionswerte sind Luftreflektionen oder auf Treibsel zurück zu führen, welches die Sensoren blockiert. 525

Abbildung 25 Suspensionsgehalt des Wassers am Sieltor Osterwehl [mg/l] während Tide Nr. 2. Gut zu erkennen ist der Zeitpunkt an dem suspensionsreiches Meerwasser in den Priel strömt. 526

Abbildung 26 Verteilungskarten der Sedimentaufwachsraten für die untersuchten Halligen. Dargestellt sind die Mittelwerte der Sedimentfallenuntersuchungen aus drei Jahren. Isolinien wurden mit linearem Krigging ohne Drift berechnet. 530

Abbildung 27 Digitales Geländemodell der Halligen Hooge, Langeneß und Nordstrandischmoor basierend auf LIDAR Daten (2005) mit einer Auflösung von 1 x 1 m. 531

Abbildung 28 Gemessene (1952 – 2009) und projezierte (2009 – 2100) Wasserstände basierend auf den "Representative Concentration Pathway" (RCP) Szenarios 4.5 und 8.5 des IPCC "Fifth assessment Report" (AP5, 2013) im Vergleich mit den Sedimentaufwachsraten von Hooge, Langeness und Nordstrandischmoor. Da keine belastbaren Abschätzungen für die Wasserstandsentwicklung in der Deutschen Bucht verfügbar sind, wurden die RMSL Projektionen zu den heutigen MThw und HThw Niveaus addiert (rote und blaue Linien mit Unsicherheitsbereich 5 bis 95 %). Zusätzlich wurde die beobachtete Differenz zwischen den Wasserständen RMSL und MThw / HThw (1952 – 2009) zu der RMSL-Projektion addiert (gestrichelte Linien) (Abbildung wurde von Arne Arns, Universität Siegen angefertigt und zur Verfügung gestellt). 534

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Aufstellung der Binnenpegel sowie der zugeordneten Außenpegelstandorte nebst den Zeiträumen verfügbarer, digitaler Wasserstandsdaten. Die Standorte sind entsprechen der Nummerierung in der Lageskizze (Abbildung 2) verortet. 493

Tabelle 2 Referenzhöhen der Binnenpegelschwellenwerte für Land unter (LU) sowie vollständige Land unter Ereignisse (vLU) bezogen auf Normalnull (NN) sowie das mittlere Tidehochwasser (MThw). 512

Tabelle 3 Außenpegelschwellenwerte $HA\,(LU/vLU)$ bezogen auf den Pegelnullpunkt (PNP) zur Berechnung langjähriger Überflutungshäufkeiten für Land unter (LU) und vollständige Land unter (vLU) Ereignisse anhand der den Halligen zugeordneten Außenpegel. (RSD) Variationskoeffizient der angepassten Schwellenwerte. (n) Anzahl der zur Berechnung genutzten Wasserstände am Außenpegel 512

Tabelle 4 Dekadische Aufstellung der mittleren jährlichen Häufigkeit von Land unter (LU) und vollständigen (vLU) Ereignissen auf den Halligen, sowie des MThw nach der Pegelhaupttabelle (Wyk/Föhr). 516

Tabelle 5 Tiefe des Markerhorizontes (Deichbau 1915), mittlere BDD, sowie Gehalte organischer Substanz im Boden (LOIsoil, Werte für den Zeitraum 1915-2011) und in den Sedimentfallen (Typ A) (LOI trap). BDD and LOI finden Eingang in die Berechnung der Sedimentaufwachsraten. 517

Tabelle 6 Sedimentdeposition in kleinräumigen Bereichen der Halligen Hooge, Langeness und Nordstrandischmoor (n=5, Fallentyp A, Abstand zwischen den Fallen 10m), Mc=Siliziklastischer Anteil 520

Tabelle 7 Sedimentaufwachsraten für unterschiedliche Zeiträume nach Radionukliddatierung sowie nach den Ergebnissen der Sedimentfallen. 523

Tabelle 8 Vertikales Marschwachstum [mm/a] auf Juist und Norderney im Zeitraum von 2011 – 2013. Die angegebenen Daten sind Mittelwerte der beiden Sedimentfallentypen A (Flasche) und B (Matte) 527

Tabelle 9 Vergleich der Küstenlängen, Halligflächen und Sedimenttransportraten. 533

1 Einleitung

Die vom Geowissenschaftlichen Zentrum Göttingen, Abteilung Sedimentologie und Umweltgeologie durchgeführten Arbeiten befassten sich mit dem natürlichen Anpassungspotential der nordfriesischen Halligmarschen sowie ausgewählter Bereiche der ostfriesischen Inseln an steigende Wasserstände. Konkret sollten folgende Fragen beantwortet werden.

- *Wie hoch ist das mittlere vertikale Marschwachstum durch Sedimentablagerung (Sedimentaufwuchs)?*
- *Welche Parameter steuern das Sedimentationsgeschehen auf den Halligen und Inseln?*
- *Wie ist die räumliche Verteilung der Sedimentablagerungen?*
- *Was tragen regionale Setzungsprozesse und Krustenbewegungen zu vertikalen Landbewegung bei?*

Dazu wurden im Zeitraum von November 2010 bis März 2013 Sedimentfallen auf den Halligen Nordstrandischmoor, Hooge und Langeneß sowie den Inseln Juist und Norderney installiert und die Sedimentdeposition der stattgefundenen Sturmfluten quantitativ erfasst. Weiterhin wurden Rammkernsondierungen auf allen Halligen durchgeführt, die der Altersdatierung älterer Schichten dienten. Es wurden digitale Geländemodelle der Halligen ausgewertet und Wasserstandsdaten betrachtet, insbesondere um Kriterien für ein Landunter festzulegen und deren Anzahl für die Vergangenheit quantifizieren zu können. Fachliteratur wurde ausgewertet zur Einschätzung des regionalen Landsenkungspotentials und rezenter Landsenkungsprozesse. Mit der in situ Erfassung von Wasser- und Sedimentbewegungen auf den Halligmarschen während Sturmflutereignissen wurde ein weiterführender Forschungsschwerpunkt zum Prozessverständnisses bezüglich der Transportmechanismen von Sturmflutsedimenten formuliert. Das hauptsächliche Arbeitsgebiet der nordfriesischen Halligen ist in Abbildung 1 dargestellt.

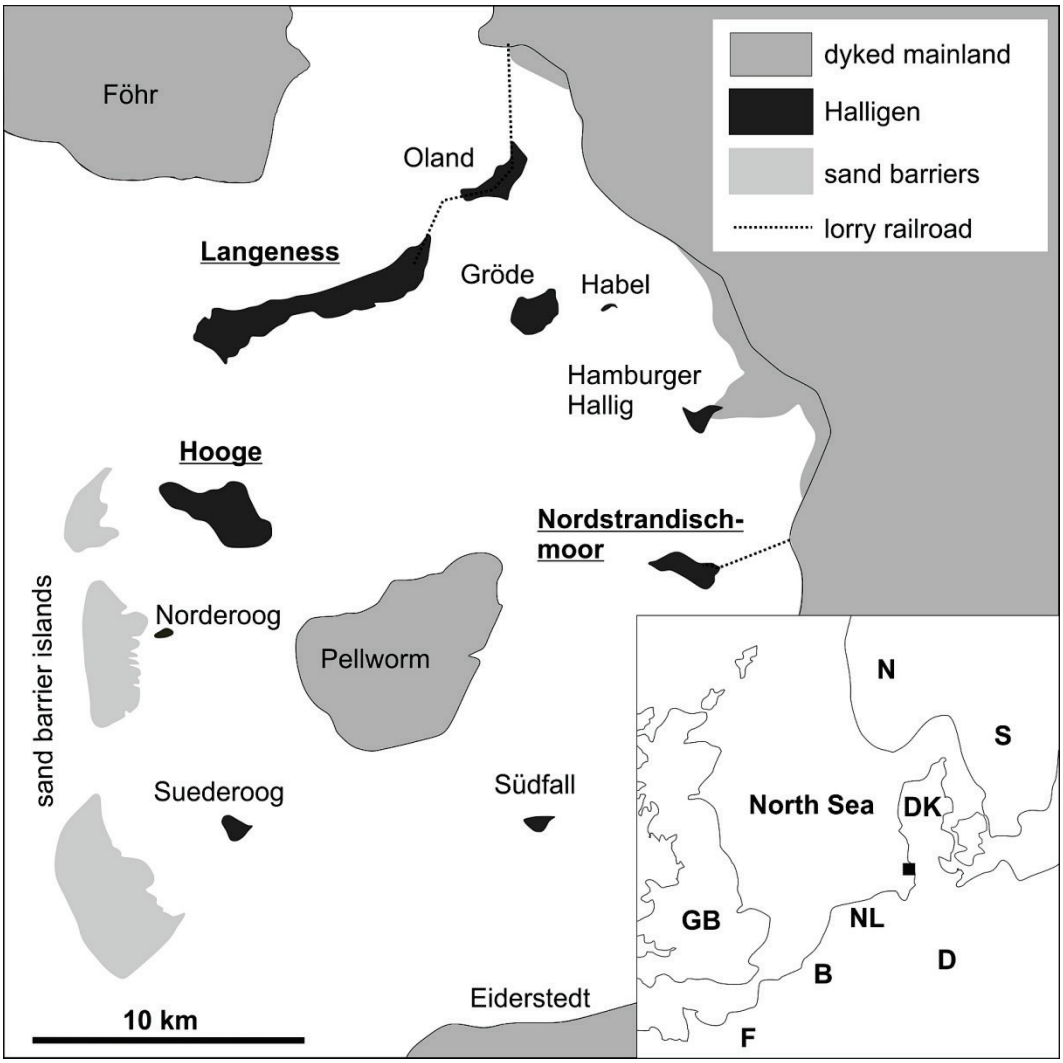


Abbildung 1 Karte des Untersuchungsgebietes. Dargestellt ist das Nordfriesische Wattenmeer zwischen der Insel Föhr und der Halbinsel Eiderstedt. Die untersuchten Halligen sind hervorgehoben. N=Norwegen, S=Schweden, DK= Dänemark, NL= Niederlande, D=Deutschland, B=Belgien, F=Frankreich, GB=Großbritannien, schwarzes Quadrat = Untersuchungsgebiet.

2 Methoden

2.1 Häufigkeit von Landunter Ereignissen

2.1.1 Datengrundlage

Die verwendeten Wasserstandsdaten in Form von Scheitelwerten der Tidenhochwässer (Thw) wurden vom LKN-SH aufbereitet und zur Verfügung gestellt. Die Standorte aller für die vorliegende Arbeit genutzten Pegel sind der Abbildung 2 zu entnehmen. Unterschieden werden Binnenpegel, welche wenig bis keine Tidebeeinflussung zeigen und die zugehörigen Außenpegel, welche tidebeeinflusst sind. Digitale Binnenpegel wurden auf Halligen erst im Jahr 2009 installiert. Somit wurde auch auf benachbarte Außenpegel zurückgegriffen, deren Daten teilweise bis in die 50er Jahre zurückreichen (Pegel Wyk auf Föhr). Tabelle 1 gibt eine Aufstellung der genutzten Binnen- und Außenpegel sowie deren Datenverfügbarkeit. Die Daten der Außenpegel Langeneß/Hilligenley und Nordstrandischmoor sind aufgrund der schlechten Qualität nicht nutzbar. Stattdessen wurden die Binnenpegel Langeneß/Kirchhofwarf und Langeneß/Kirchwarf dem Außenpegel Wyk/Föhr sowie der Binnenpegel Nordstrandischmoor dem Außenpegel Strucklahnungshörn/Nordstrand gegenüber gestellt.

Tabelle 1 Aufstellung der Binnenpegel sowie der zugeordneten Außenpegelstandorte nebst den Zeiträumen verfügbarer, digitaler Wasserstandsdaten. Die Standorte sind entsprechen der Nummerierung in der Lageskizze (Abbildung 2) verortet.

Hallig	Binnenpegel	Außenpegel
Hooge	1 Schulwarft: Thw: 11.2009- 04.2012	5 Anleger: Thw: 12.1976- 04.2012
Langeneß (Nordmarsch)	2 Kirchhofwarft: Thw: 12.2009- 05.2012	6 Wyk/Föhr: Thw: 11.1951- 04.2012
Langeneß (Alt-Langeneß)	3 Kirchwarft: Thw: 12.2009- 05.2012	6 Wyk/Föhr: Thw: 11.1951- 04.2012
Nordstrandischmoor	4 N. Moor Hallig: Thw: 11.2009- 04. 2012	7 Strucklahnungshörn: Thw: 11.1994- 03.2012

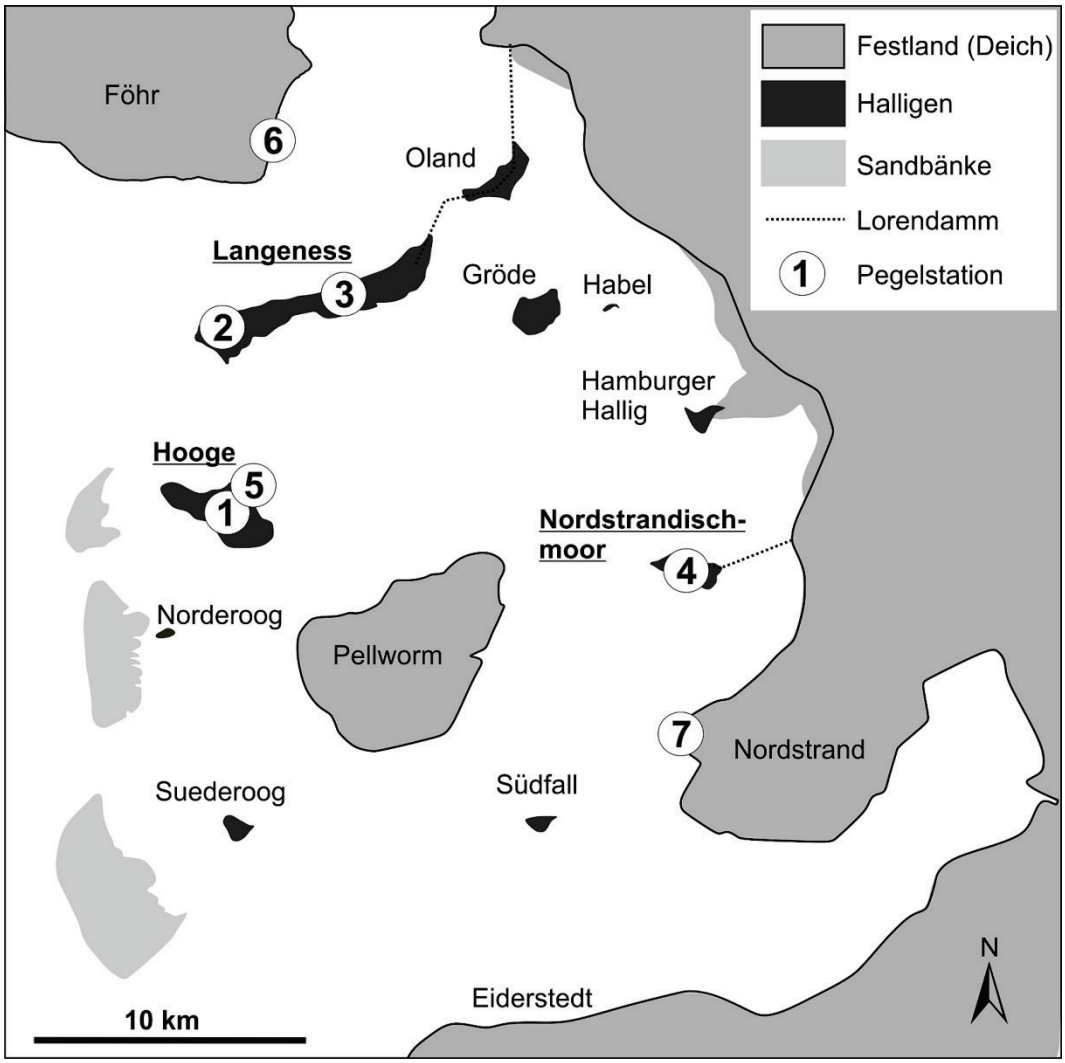


Abbildung 2 Lageskizze des Nordfriesischen Wattenmeeres zwischen der Halbinsel Eiderstedt (Süden) und Insel Föhr (Norden). Die drei in der vorliegenden Studie behandelten Halligen sind hervorgehoben. Die Nummerierungen der Pegelstandorte entsprechen der Auflistung in Tabelle 1

Digitale Geoinformationsdaten des Landesamtes für Vermessung und Geoinformation Schleswig-Holstein (LVermA-SH) wurden ebenfalls über das LKN-SH bezogen. Hierzu zählen Ausschnitte des digitalen Geländemodells (DGM1, 2005) und digitale Orthophotos (DOP) des Amtlichen Topographisch-Kartographischen Informationssystems (ATKIS) sowie Daten der Automatisierten Liegenschaftskarte (ALK). Differentielle GPS-Vermessungen (d-GPS) der Küstenschutzbauwerke und Warften wurden seitens des LKN-SH vorgenommen. Die genutzten Vermessungsdaten der Sommerdeichlinien stammen aus den Jahren 1999 (Hooge) und 2010 (Langeneß). Alle digitalen kartographischen Arbeiten wurden mittels der Software ArcGis 9.3 und 10.1 (Esri Inc.) ausgeführt.

2.1.2 Schwellenwerte der Überflutungsereignisse

Die bisherige Dokumentation von Überflutungshäufigkeiten auf den einzelnen Standorten sowie die Definition von Referenzhöhen beruht vor allem auf Beobachtungen und mündlich überlieferten Richt- und Schätzwerten. Dibbern & Müller-Navarra (2009) legten erstmals für die Halligen Hooge, Gröde und Nordstrandischmoor Richtwerte in Form von Pegelständen für beginnende, sowie vollständige Überflutungen fest. Diese begründen sich sowohl auf Mitteilungen der Halligbewohner und des LKN-SH, als auch auf die Topographie der Halligen und deren Deckwerke. Die hier vorgestellte Arbeit zur Berechnung langjähriger Überflutungshäufigkeiten übernimmt den Ansatz von Dibbern & Müller-Navarra (2009) und definiert Schwellenwerte sowohl für beginnende Land unter Ereignisse (im Folgenden als LU bezeichnet sowie vollständige Land unter Ereignisse (im Folgenden als vLU bezeichnet). Es wurde jedoch besonders darauf geachtet, dass die alternativen Schwellenwerte in Form von Referenzhöhen mathematisch begründet und bei topographischen Änderungen leicht reproduzierbar sind.

1. Land unter Ereignis

Als Schwellenwert eines LU Ereignisses wurde die mittlere Höhe der Geländeoberfläche (GOF) der betreffenden Hallig gewählt. Erreicht der Binnenwasserstand das mittlere Niveau der GOF, sind weite Bereiche der Marsch bereits überflutet. Als Datengrundlage dient das DGM1 basierend auf der landesweiten, luftgestützten LIDAR-Vermessung (light detection and ranging) mit einer Gitterweite von 1 x 1 m und einer Höhengenauigkeit von ± 15 cm aus dem Jahr 2005. Vorbereitend erfolgte die Identifizierung und Eliminierung von fehlerhaften Datenpunkten mittels des ArcGis eigenen Tools „Ausreißer identifizieren“. Da anthropogen geformte Geländeerhöhungen und artifizielle Strukturen wie Deckwerke, Deiche und Warften bei der Berechnung mittlerer Geländehöhen unberücksichtigt bleiben sollten, wurden diese Strukturen mittels der ALK identifiziert und aus dem DGM1 extrahiert (Abbildung 3).

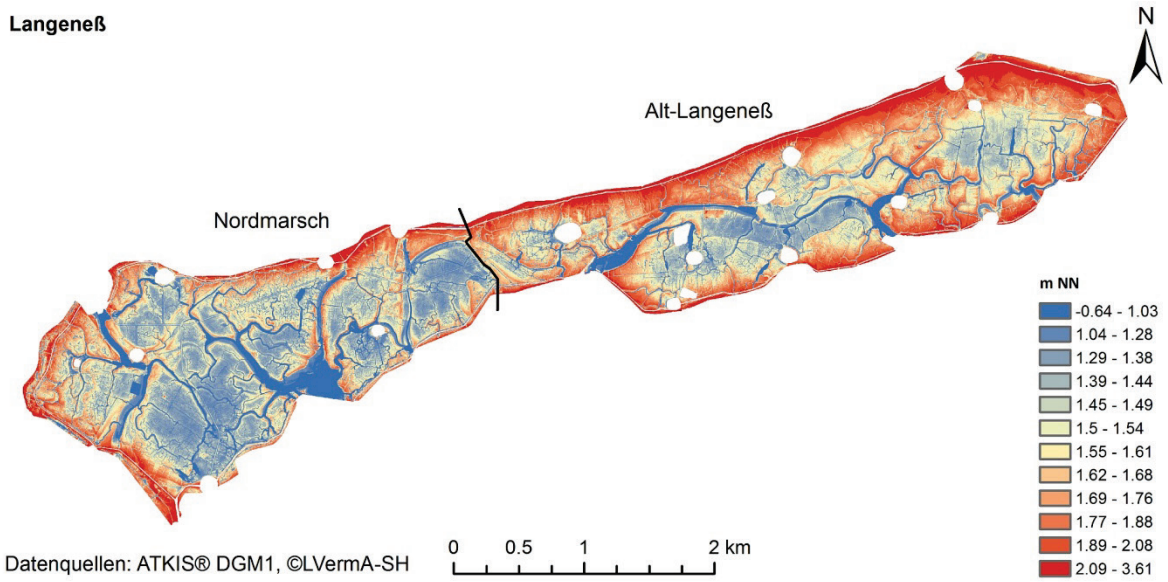


Abbildung 3 Digitales Höhenmodell (DGM1) der Hallig Langeneß nach der Extraktion aller künstlichen Geländestrukturen (Deiche, Deckwerke, Warften). Die schwarze Linie unterteilt das heutige Langeneß in die Bereiche der ursprünglichen Halligen Nordmarsch (Westen) und Alt-Langeneß (Westen).

2. *Vollständiges Land unter Ereignis*

Ein vLU Ereignis tritt ein, wenn der Wasserstand am Binnenpegel das Niveau der nicht Wasser permeablen Deckwerke der Hallig erreicht und somit eine vollständige Füllung der Hallig vorliegt. Als nicht permeable Deckwerke werden Sommerdeiche und Steinpflaster angesehen. Halligrauhstreifen, umgangssprachlich als „Halligigel“ bezeichnet, schließen sich binnenseitig der Steinpflaster an. Sie sind als permeable Deckwerke konzipiert und werden somit bei der Berechnung der Höhe der nicht durchströmbaren Deckwerke nicht berücksichtigt. Sie bestehen zumeist aus verkanteten Blöcken welche mit Bitumen oder Beton verklammert sind (Abbildung 4) bzw. in jüngerer Zeit aus verklebtem Granitschotter (Elastocoast®, BASF, Abbildung 5) und dienen lediglich der Wellendämpfung. Die Berechnung der mittleren Kronenhöhe der Sommerdeiche auf Hooge und Langeneß basieren auf den d-GPS Vermessungen des LKN-SH. Nordstrandischmoor verfügt weder über einen Sommerdeich noch ist es vollständig von einem Deckwerk umschlossen. Das nordöstliche Ufer in Richtung des Lorendamms geht in ein offenes Lahnungsfeld über. Zudem ist dort wo Deckwerke und Halligrauhstreifen das Ufer befestigen die Marschoberfläche oftmals über das Niveau des Deckwerks oder sogar der älteren Rauhstreifen hinaus gewachsten (Abbildung 6). Somit muss die mittlere Höhe der Marschoberfläche binnenseitig der Rauhstreifen als maßgebendes Überflutungshindernis angesehen werden. Die entsprechende Höhe wurde näherungsweise aus dem DGM1 abgeleitet. Den räumlichen Bezug gibt

eine editierte Linie vor, welche direkt binnenseitig der Rauhstreifen die Marschfläche der Hallig umfasst. Zu beachten ist der Höhenfehler der LIDAR basierten DGM Daten von ± 15 cm im Gegensatz zu d-GPS Vermessungen mit einer Genauigkeit im Millimeterbereich.

Abbildung 4 Konservativer, wasserdurchlässiger Rauhstreifen (Halligigel) auf Nordstrandischmoor. Foto: Schindler 2011

Abbildung 5 Moderner wasserdurchlässiger Halligigel auf Langeneß. Schotter wird mittels eines Zwei-Komponenten-Klebers (Elastocoast®, BASF) zu einem Rauhstreifen modelliert. Dem Igel vorgelagert eine wasserundurchlässiges Pflaster aus Blöcken. Foto: Deicke 2014

Abbildung 6 Alter Rauhstreifen auf Nordstrandischmoor. Das Niveau der binnenseitigen Salzmarsch wächst über die Höhe des Rauhstreifens hinaus. Foto: Schindler 2012.

2.1.3 Berechnung der Überflutungshäufigkeiten

Alle Berechnungen anhand von Pegeldaten basieren auf Wasserwirtschaftsjahren (WW, 1.11. - 31.10). Die Berechnung der langjährigen Überflutungshäufigkeiten, sowohl für LU als auch vLU, erfolgt anhand der Außenpegeldaten, da diese eine wesentlich längere Zeitspanne abdecken als die 2009 installierten Binnenpegel. Eine direkte Anwendung der Binnenpegelschwellenwerte auf die assoziierten Außenpegel ist jedoch nicht möglich. Aufgrund der nicht permeablen Deckwerke, erfolgt die Reaktion des Binnenpegels auf einen erhöhten Außenwasserstand erst, wenn Pegel und Seegang vor der Hallig die kritische Größe erreichen, ab welcher ausreichend Überflutungswasser; zunächst durch Wellenschlag; auf die Hallig gelangt. Die Überschreitung der definierten Schwellenwerte für ein Überflutungsereignis erfolgt daher je nach Außenwasserstand extrem verzögert bzw. bleibt vollständig aus, wenn der kritische Außenwasserstand nicht überschritten wird. Die Berechnung des Außenpegelschwellenwertes (H_A) kann näherungsweise anhand von Wasserstandsdaten des Zeitraums 2009 - 2012 vorgenommen werden, welche sowohl für Binnen- als auch Außenpegel vorliegen. Die gesuchte Größe (H_A) entspricht der Summe von

Binnenpegelschwellenwert (H_B) und der mittleren Höhendifferenz ($\overline{\Delta_h}$) zwischen Außenwasserstand h_A und Binnenwasserstand h_B zum Zeitpunkt t (H_B) Es gilt:

$$H_A = H_B + \overline{\Delta_h} \quad , \qquad \text{Formel 2.1}$$

$$\overline{\Delta_h} = \frac{\sum(h_A - h_B)}{n} \quad , \qquad \text{Formel 2.2}$$

$H_{A\,(LU/vLU)}$: Schwellenwert des Außenpegels für ein Überflutungsereignis (LU/vLU)

h_A:Außenwasserstand

$H_{B\,(LU/vLU)}$: Schwellenwert des Binnenpegels für ein Überflutungsereignis (LU/vLU)

h_B:Binnenwasserstand

$\overline{\Delta_h}$:mittlere Pegeldifferenz

Bei der Berechnung von $H_{A\,(LU)}$ wurde lediglich die erste Tide einer Überflutung als Ereignis gewertet. Oftmals erfolgte während der Folgetiden eine erneute Pegelüberschreitung des Schwellenwertes $H_{B\,(LU)}$ um wenige Zentimeter, welche aufgrund eines niedrigen Außenwasserstandes h_A nicht auf Wellenschlag zurück zu führen ist. Um sicher zu stellen, dass h_A während der Folgetiden signifikant niedriger ausfallen, wurden diese in zwei Datenkollektiven unterteilt. (1) Wasserstände h_A zum Zeitpunkt der Schwellenwertüberschreitung $H_{B\,(LU)}$ während der ersten Tide eines Ereignisses. (2) Wasserstände h_A zum Zeitpunkt der Schwellenwertüberschreitung $H_{B\,(LU)}$ während einer Folgetide eines Ereignisses. Mittels Zweistichproben-T-Test bei normal verteilten Datenkollektiven bzw. Mann-Whitney-U-Test bei nicht normal verteilten Datenkollektiven konnte nachvollzogen werden das Wasserstände h_A in Abhängigkeit von Folgetiden signifikant niedriger ausfallen. Bei der Berechnung der Außenpegelschwellenwerte $H_{A\,(vLU)}$ werden alle Außenpegelwasserstände h_A sowohl der Ersten als auch der Folgetiden in einem Datenkollektiv zusammen gefasst, da diese im Gegensatz zu den LU Ereignissen nicht signifikant unterschiedlich sind.

Abschließend erfolgte die Berechnung der jährlichen Überschreitungshäufigkeiten anhand der berechneten Außenpegelschwellenwerte $H_{A\,(LU)}$ und $H_{A\,(vLU)}$ und den assoziierten Außenpegeldaten (vgl. Tabelle 1). Da Pegelzeitreihen oftmals zu kurz sind um Trendanalysen der jährlichen Häufigkeit mittels 19-jährigem gleitenden Mittel und damit unter Berücksichtigung eines möglichen Einflusses der Nodaltide anzufertigen (Houston & Dean 2011, Woodworth 2011), wurde ein 9-jähriges gleitendes Mittel angewandt.

2.2 Bestimmung der Bodendichte und des organischen Anteils

Zur Bestimmung der halligspezifischen Bodendichte wurden 1,20 m lange Rammkernbohrungen (d=100 mm) in die Halligmarsch abgeteuft (Langeness, n=6), Hooge (n=4), Nordstrandischmoor (n=2). Der obere Bereich der Bohrkerne wurde bis zu einer Teufe von 25 cm jeweils in Abschnitte von 1 cm Mächtigkeit unterteilt. Ab einer Teufe >25 cm wurden immer 5 cm Abschnitte gebildet. An diesen Abschnitten wurde die Trockenraumdichte (Bulk Dry Density, BDD) nach Trocknen bei 105°C bis zur Gewichtskonstanz durch Wägung bestimmt. Der Organikgehalt wurde als Glühverlust (Loss on ignition, LOI) der getrockneten Abschnitte bei 425°C ermittelt. Wegen des Kristallwasserverlustes der Tonminerale kommt es bei dieser Methode zu einer Überschätzung des organischen Anteils. Der relative Fehler nimmt dabei mit zunehmendem Organikgehalt der Proben ab und beträgt bei den für die untersuchten Überflutungssedimente typischen mittleren Organikgehalten von 5-8 Gew% ca. 20-60%.

2.3 Messung der vertikalen Aufwachsraten

Zur Messsung der Sedimentaufwachsrate wurden zwei verschiedene Sedimentfallentypen eingesetzt.

2.3.1 Methodische Untersuchungen

Es wurden unterschiedliche Sedimentfallentypen getestet. Anfänglich wurden zwei unterschiedliche Fussmatten (B1, B2) sowie ein Kunstrasentyp (B3) getestet. Die drei Mattentypen wurden mit einem Abstand von 1 m auf einer Weide mit kurzer Grasvegetation installiert. Insgesamt 12 solcher dreifach Kombinationen wurden im Abstand von 2 m installiert. Weiterhin wurden Versuche mit 1 L LDPE-Flaschen gemacht, die in unterschiedlicher Einbautiefe in den Marschboden mit Hilfe eines Stechzylinders eingelassen wurden. Weitere Untersuchungen wurden unternommen zur Prüfung der kleinräumigen Variabilität der Sedimentakkumulation. Dazu wurden je 5 Flaschen im Abstand von 10 m in zwei Bereichen auf jeder Hallig installiert. Weiterhin wurden Fallentransekte an typischen Reliefstrukturen wie Uferwällen von Prielen und hinter Deckwerken installiert, um den Einfluss des morphologischen Gradienten und der Entfernung von dem potentiellen Sedimentliefergebiet (Halligkante bzw. Halligpriel) zu untersuchen.

2.3.2 Standardmessprogramm

In den Winterhalbjahren 2010-2013 wurden auf den zu untersuchenden Halligen im November jeweils 61 (Langeness), 36 (Hooge), 12 (Nordstrandischmoor) Sedimentfallen des Typ A (1l LDPE-Weithalsflasche) und Typ B (Kunstrasen (B3)) ausgebracht und zur Laboranalyse im März des Folgejahres wieder entfernt (Abbildung 7). Während der Kunstrasen plan auf der Marschoberfläche befestigt wurde, wurde die mit Wasser gefüllte, geöffnete Weithalsflasche mit

einem Stechzylinder im Boden versenkt. Die Fallentypen A und B wurden in einem Raster von ca 400 x 400 m (Abbildung 8) jeweils parallel installiert. Die gewonnenen Sedimente wurden im Labor durch Filtration oder Dialyse entsalzt, bei 105°C getrocknet und anschließend bei 425°C verascht und gewogen. Aus der Gewichtsdifferenz der getrockneten und veraschten Proben wurden der siliziklastische und der organische Anteil der Sedimente quantifiziert.

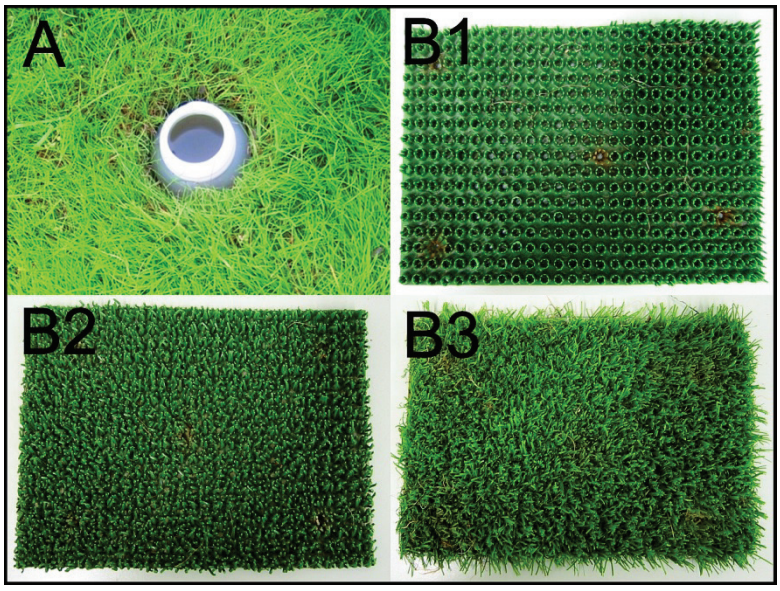


Abbildung 7 Verwendete Sedimentfallen. (A)1 Liter LDPE-Flasche im Marschboden eingelassen. (B1) Fussmatte Typ 1, (B2) Fussmatte Typ 2, (B3) Kunstrasen

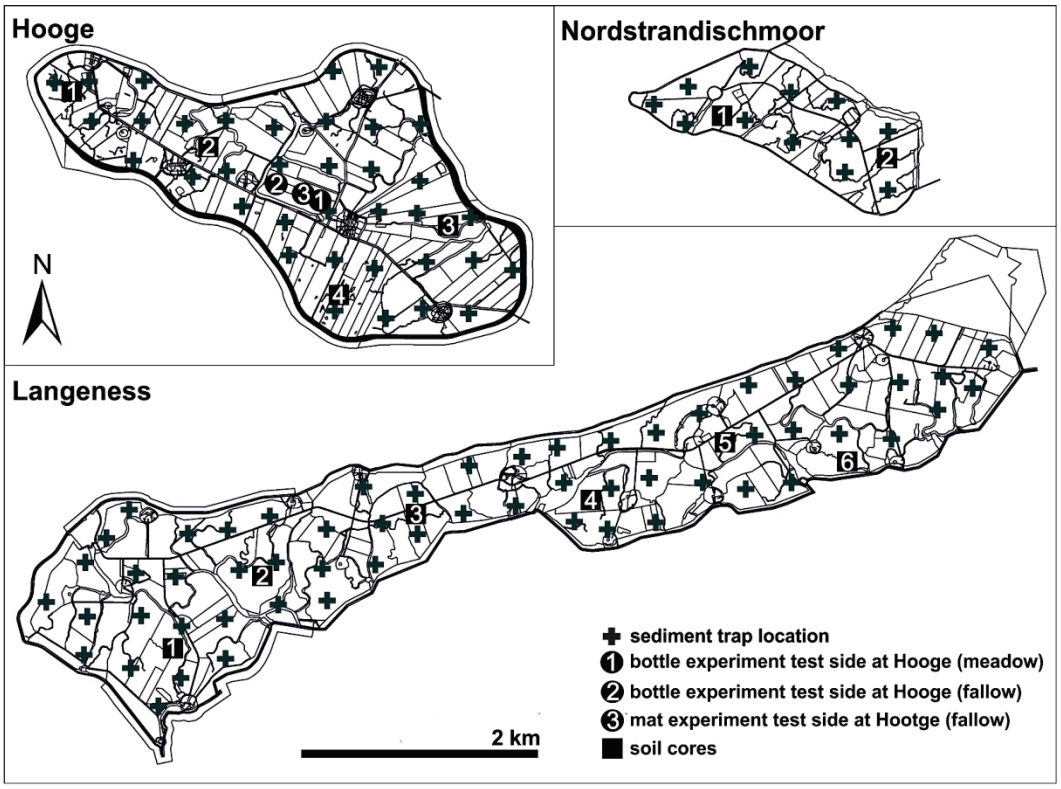


Abbildung 8 Darstellung der untersuchten Halligen mit den Positionen der Sedimentfallen (Pluszeichen, 61 (Langeness), 36 (Hooge), 12 (Nordstrandischmoor)), den Bohrpositionen (Quadrate) und den Standorten der methodischen Untersuchungen (Kreise).

Die Ergebnisse der Fallentypen A+B wurden für die Berechnung der Sedimentaufwachsrate an jeder Position gemittelt. Bei der Berechnung des Höhenwachstums (ΔH) wurde der mittlere Organikanteil im Boden berücksichtigt (Formel 2.3 - Formel 2.5)

$$Mc_{trap} = Ms_{trap} \cdot \frac{100 - LOI_{trap}}{100} \quad , \qquad \text{Formel 2.3}$$

Mc_{trap}: Siliziklastischer Anteil Typ A/B [g]

Ms_{trap}: Gesamt Sedimentmasse inkl. Organik Typ A/B [g]

LOI_{trap}: Glühverlust (LOI) Typ A (Flasche) [Gew%]

$$M_{accretion} = \frac{Mc_{trap} \cdot 100}{100 - Loi_{soil}} \quad , \qquad \text{Formel 2.4}$$

$M_{accretion}$: Zum Höhenwachstum beitragende effektive Masse Typ A/B [g]

Loi_{soil}: Mittlerer halligspezifischer Glühverlust (seit 1915) [%]

$$\Delta H = \frac{M_{accretion}}{A} \cdot BDD^{-1} \cdot 10 \quad , \qquad \text{Formel 2.5}$$

ΔH: Sedimentaufwachsrate [mm/a]

A: effective Fläche der Sedimentfalle (Type A, Bodenfläche der Flasche (70,88 cm²), Typ B, Gesamtfläche der Matte (600cm²) [cm²]

BDD: Trockenraumdichte [g/cm^3]

Ein halligspezifischer Mittelwert wurde durch Mittelung aller Fallenstandorte über den gesamten Beobachtungszeitraum von drei Jahren berechnet.

2.3.3 Sedimentdatierungen

Sedimentdatierungen wurden mit der ^{137}Cs sowie der ^{210}Pb Methode durchgeführt. Aliquote der getrockneten und gemörserten Bohrkernabschnitte (35-70g) wurden in Platikdosen (39.3 cm^3) gepresst und mit gasdichter Folie versiegelt (Parafilm®, Pechiney Plastic Packaging). Für kleinere Probenvolumina (meist organikreiche Schichten des Oberbodens) wurden Röhrchen mit 6.9 cm^3 benutzt. Alle Proben wurden vor der gammaspektrometrischen Analyse mindestens 3 Wochen gelagert, um ein ausreichendes Gleichgewicht zwischen ^{226}Ra und seinen Zerfallsprodukten zu gewährleisten (Goodbred & Kuehl 1998).

Die Gammaspektrometrie wurde ISOLAB, Universität Göttingen durchgeführt. Es wurden die Aktivitäten der folgenden Radionuklide bestimmt ^{137}Cs (661.7 keV), ^{210}Pb (46.6 keV) und ^{214}Pb (295.2 and 351.9 keV). Es wurden drei low background Ge(Li) Detektoren verwendet. Die Messdauer betrug 250000s (2,9 Tage)

Das Radionuklide ^{137}Cs ($t_{1/2}$ = 30.2 a) weist in der Region der Nordsee im Allgemeinen zwei Anreicherungshorizonte auf, die auf den atmospherischen Fallout von Tschernobyl (1986) sowie auf dem durch oberirdische Atomwaffentests (Maximum 1963) hervorgerufenen Fallout beruhen (Callaway et al. 1996, Kirchner & Ehlers 1998, Schuerch et al. 2012)

Das Radionuklide ^{210}Pb ($t_{1/2}$ = 22.3 a) wird kontinuierlich in der Atmosphäre durch radioaktiven Zerfall von ^{222}Rn ($t_{1/2}$ = 3.8 days) und dessen kurzlebigen Tochterisotopen ^{214}Pb ($t_{1/2}$ = 26.8 min) und ^{214}Bi ($t_{1/2}$ = 19.9 min) gebildet und mit ≈ 50 Bq/(m^2 a) auf Böden und Sedimentoberflächen durch trockene oder nasse Deposition abgelagert (unsupported lead) (Appleby 2001). Eine zweite Quelle für ^{210}Pb stellt der Zerfall von ^{222}Rn, welches aus im Boden befindlichen ^{226}Ra entsteht (supported lead) (Appleby & Oldfield 1978, Appleby & Oldfield 1983).

Während "supported lead" kontinuierlich im Boden entsteht, wird "unsupported lead" mit zunehmender Zeit zerfallen und in der Konzentration mit der Tiefe abnehmen. „Unsupported lead"

wird berechnet aus der Differenz von ^{210}Pb (gesamt) und dem mit ^{210}Pb (supported) im Gleichgewicht befindlichen ^{214}Pb. Wegen der diskontinuierlichen Sedimentation auf den Halligmarschen wurden die Pb-Alter nach dem CRS-Modell (constant rate of supply) berechnet (Appleby & Oldfield 1978, Appleby & Oldfield 1983).

Die gemessenen Aktiviäten von 137Cs, die berechneten Aktiviäten von 210Pb (unsuported) sowie die daraus abgeleitete Alter-Tiefenkurve sind in Abbildung 9 dargestellt.

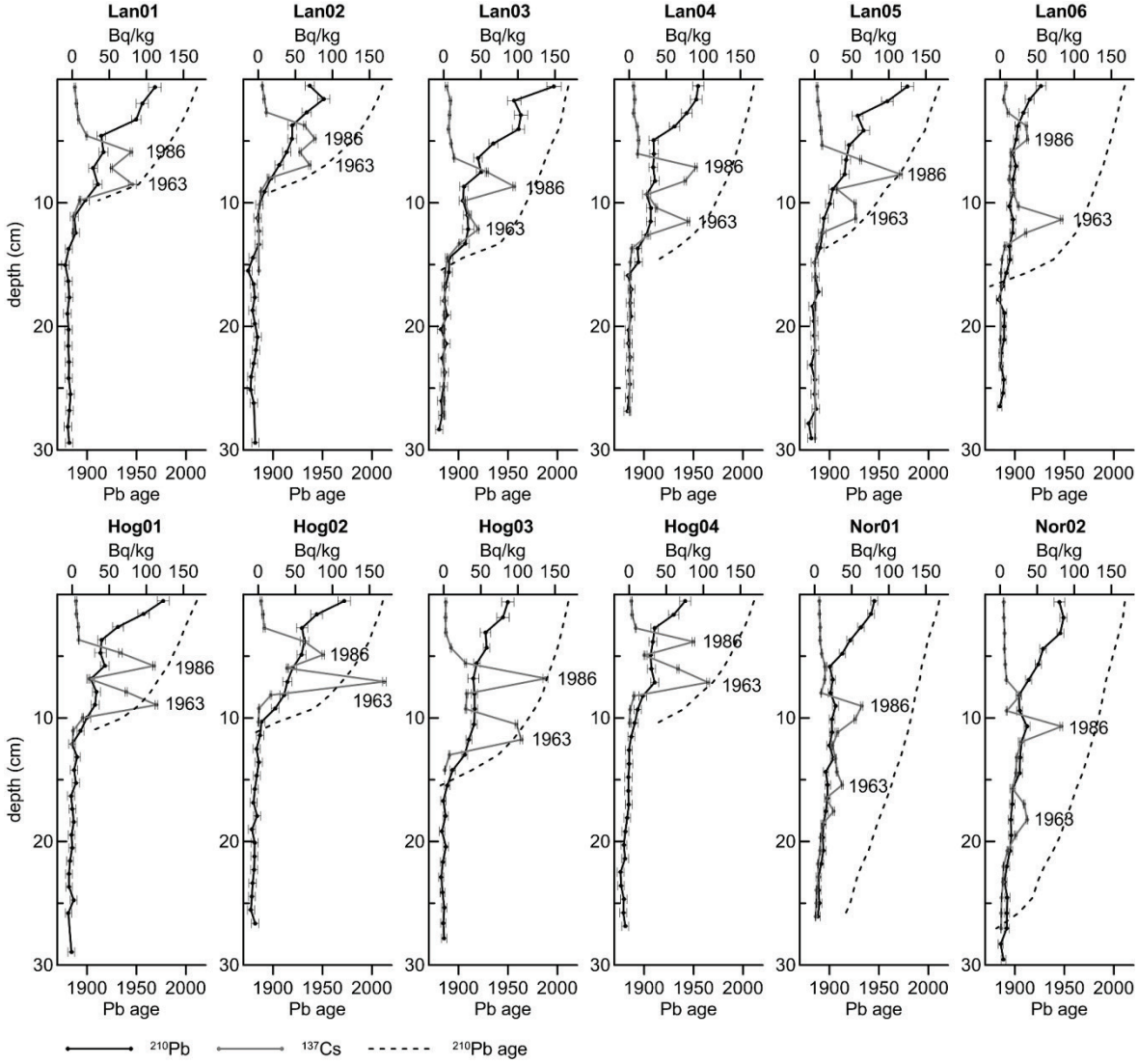


Abbildung 9 Unsupported ^{210}Pb (schwarze Linie) und ^{137}Cs (graue Linie) Aktivitäten aller 12 Rammkerne. Horizontale Fehlerbalken repräsentieren den 1 sigma Fehler der Gammaspektrometrischen Messung. Tiefen beziehen sich auf den Mittelpunkt der datierten Kernabschnitte, korrigiert um die bohrungsbedingte Kompaktion. Das obere ^{137}Cs Maximum wird auf den Reaktorunfall Thernobyl (1986) zurückgeführt. Das untere Maximum markiert das Ende der oberirdischen Atomwaffentests in 1963.

Bei der Berechnung von Sedimentaufwachsraten auf Basis der Bohrkerne wurde die Mächtigkeit der einzelnen Kernabschnitte um die bei der Rammkernbohrung unvermeidliche Stauchung korrigiert. Wegen der mit der Tiefe zunehmenden Bodendichte und dem abnehmenden Organikgehalt würden tiefere Sedimentbereiche geringere Sedimentaufwachsraten ergeben als höhere. Um eine Vergleichbarkeit zu den mit den Sedimentfallen ermittelten Werten herzustellen, wurde im folgenden mit einheitlichen Werten für BDD und LOI_{Soil} gerechnet (vergl. Tabelle 5).

2.3.4 Trübemessungen

Zur Bestimmung des Schwebstoffgehaltes im Überflutungswasser wurde ein Trübemesser vom Typ ASM-IV-L der Fa. Argus Environmental Instruments eingesetzt. Das Instrument arbeitet mit 192 infrarot (850 nm) Rückstreusensoren, die im vertikalen Abstand von 1 cm in einer Edelstahlstange eingebettet sind. Über eine Wassersäule von 192 cm kann die Partikelkonzentration in einer Distanz von ca. 0-100 mm vom Sensor bestimmt werden. Zusätzliche Sensoren messen Wassertemperatur, Wasserdruck und den Neigungswinkel des Gerätes.

2.3.5 Sieltorexperiment „Osterwehl“

Das Sieltorexperiment Osterwehl wurde durchgeführt, um den Effekt einer aktiven Bewässerung der Hallig Langeneß durch das bei hohem Tidestand bzw. Landunter geöffnete Sieltor zu ermitteln. Da das vertikale Marschwachstum auf Hallig Langeneß augenscheinlich einer Transportlimitierung unterliegt (vgl. Kap. 3.4.1), ist das Ziel der Maßnahme die Steigerung der Sedimentdeposition auf derzeit benachteiligten Binnenflächen geringer vertikaler Wachstumsraten durch die Reaktivierung des Binnenprielsystems als Transportweg für suspendierte Überflutungssedimente. Während der Versuchsdurchführung wurden die Sieltore der Sielanlage mittels Balkensperren offen gehalten und fixiert (Abbildung 10).

Abbildung 10 Die drei Flügeltore der Sielanlage am Osterwehl sind mittels Balkensperren für den Zeitraum der Freilandmessungen fixiert.

Arbeiten an der Sielanlage wurden in Kooperation mit dem LKN-SH durchgeführt. Die Freilandmessungen erfolgten in Kooperation mit dem IWW Aachen. Seitens des GZG wurde die Suspensionsfracht im Prielsystem gemessen, sowie die flächenhafte Erfassung der Sedimentdeposition vorbereitet. Suspensionsfrachtmessungen erfolgten mit dem ASM-IV Trübemessgerät (Argus GmbH) ca. 50 m binnenseitig der Sieltoranlage. Die Messung der Sedimentdeposition mit Sedimentfallen Typ A. Um Aussagen bezüglich der Wirksamkeit der Maßnahme im Hinblick auf eine mögliche Steigerung der Sedimentdeposition treffen zu können, wurde das Binnenprielsystem der Leye nahe der Warf Treuberg als Referenzgebiet genutzt. Die Fallenstandorte sind in Abbildung 11 und Abbildung 12 dargestellt.

Abbildung 11 Übersichtskarte über das Einzugsgebiet des Osterwehl an der Peterswarf. Dargestellt sind die Standorte der Sedimentfallen sowie der Fallentransekte entlang des Binnenprielsystems.

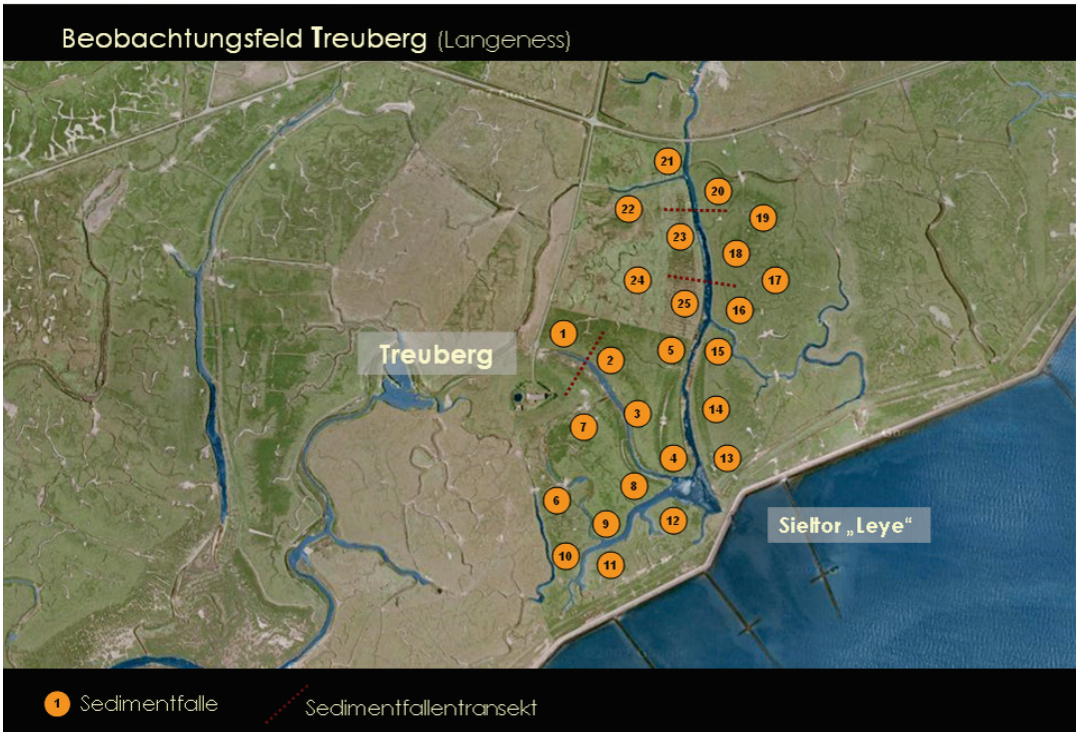


Abbildung 12 Übersichtskarte über das Einzugsgebiet der Leye am Treuberg. Dargestellt sind die Standorte der Sedimentfallen sowie der Fallentransekte entlang des Binnenprielsystems

Um Beschädigungen an der Sieltoranlage auszuschließen, sollten Versuche bei schrittweise steigenden Wasserständen von MThw über Springtide bis zu einem maximalen Wasserstand von +1,0 m über MThw durchgeführt werden. Nach den Freilandmessungen bei entsprechendem Wasserstand wurden die hydrologischen Belastungen für Gerinne und Prielsystem durch das IWW Aachen für den nächst höheren Wasserstand im numerischen Modell berechnet.

2.3.6 Isostatische Landbewegungen und Kompaktion tieferer Schichten

Die Abschätzung vertikaler Landbewegungen im Untersuchungsgebiet aufgrund isostatischer Ausgleichsbewegungen wurde basierend auf der verfügbaren Literatur vorgenommen. Baugrundgutachten aus dem Jahren 1976 - 2009, bereitgestellt vom LKN-SH, geben punktuell Auskunft über die Zusammensetzung des holozänen Sedimentkörpers. Für den Bereich der Halligen Hooge, Langeneß und Nordstrandischmoor stehen insgesamt 10 Gutachten zur Verfügung. Informationen bezüglich der Korngrößenverteilung als auch zu dem Vorhandensein organischer Horizonte (Torf) liegen oftmals nur quantitativ vor.

2.4 Sedimentverteilung und Morphologie

Um die räumliche Variabilität der durch Sedimentfallen quantitativ erfassten Sedimentdepositionen darzustellen, wurde ein Punkt-Kriging-Verfahren angewendet. Nach Asselman & Middelkoop (1995) sichert dieser Ansatz die besten Ergebnisse, wenn Punktinformationen auf einem semi-regulären Gitter basieren. Alle Berechnungen sowie die Visualisierung der 2D-Isolinienkarten wurden mittels der Softwarepakete Surfer 9 (Golden Software, Inc.) und unter Zuhilfenahme von ArcGis 10 (Esri Inc.) ausgeführt. Weitere raumbezogene Daten stellte das LKN-SH bereit. Diese beinhalten neben Geobasisdaten des Amtlichen Topographisch-Karthographischen Informationssystems (ATKIS) sowie des Amtlichen Liegenschaftskatasters (ALK) das digitale Geländemodell (DGM1) aus dem Jahr 2005 auf Basis von LIDAR Daten. Mit einem durchschnittlichen Höhenfehler von ± 15 cm und einer Gitterweite von 1 x 1 m lässt sich die Topograhie der Halligen detailliert abbilden, und erlaubt somit Rückschlüsse auf morphologische Prozesse wie die Sedimentverteilung auf der Marschoberfläche. Kleinräumige morphologische Prozesse auf den vorgelagerten Wattarealen konnten nicht dagestellt werden, da es für den Bereich der Hallig vorgelagerten Watten keine LIDAR basierten Referenzdatensätze existieren. Eigene flächendeckende Kartierungsarbeiten mittels d-GPS Vermessungen konnten im Rahmen des Projektes nicht gewährleistet werden.

3 Ergebnisse

3.1 Häufigkeit von Landunter Ereignissen

3.1.1 Binnenpegelschwellenwerte

In Abbildung 13 werden die mittleren Gelände- und Deich/Deckwerkshöhen über Normalnull (NN) sowie das regionale MThw als Mittel der letzten Dekade (2001 - 2010) dargestellt. Die absolute Geländehöhe ist auf Hooge (151 cm NN) im Vergleich zu Langeneß (153 cm NN) nur geringfügig niedriger. Für beide Halligen wird ein MThw von 136 cm NN angenommen, was dem mittleren 10-jährigen Hochwasser (2001 - 2010) des Pegels „Hooger Anleger“ entspricht. Daten des Pegels Langeneß Hilligenley sind lückenhaft und erlauben keine Berechnung eines 10-jährigen MThw. Die GOF sowie das MThw auf Nordstrandischmoor (Pegel Strucklahnungshörn 2001 - 2010) liegen mit 192 cm NN (GOF) und 155 cm (MThw) deutlich höher. Der Gradient der mittleren Deich/Deckwerkshöhen beschreibt einen entgegengesetzten Verlauf von 290 cm NN (Hooge) über 234 cm NN (Langeneß) bis 225 cm NN (Nordstrandischmoor).

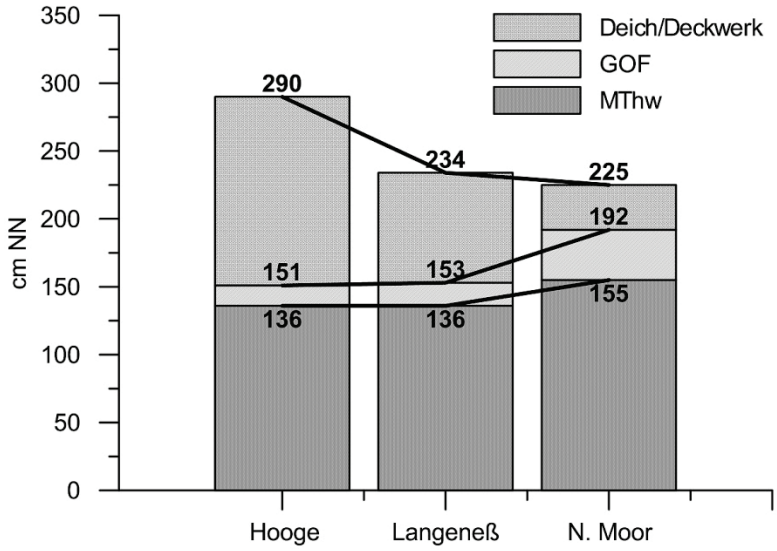


Abbildung 13 Mittlere Bezugshöhen der Halligen Hooge, Langeneß und Nordstrandischmoor über Normalnull (NN). Dargestellt sind das mittlere Tidehochwasser (MThw), die mittlere Geländeoberfläche (GOF) und die mittlere Höhe der Sommerdeiche (Hooge und Langeneß) bzw. nicht Wasser permeablen Deckwerke (Nordstrandischmoor).

Um die Referenzhöhen der Binnenpegelschwellenwerte objektiv nach hydrologischen Gesichtspunkten bewerten zu können, ist deren Konvertierung in relative Höhen mit Bezug auf das regionale MThw notwendig (Tabelle 2). Da auf Langeneß die berechnete mittlere Geländehöhe eine große Standardabweichung besitzt, wurde die Fläche der Hallig nochmals in die Areale der ehemaligen Halligen Nordmarsch (westlicher Teil) und Alt-Langeneß (östlicher Teil, vgl. Müller und Fischer 1917) unterteilt. Das DGM1 in Abbildung 2 veranschaulicht den Gradienten steigender GOF von West nach Ost durch den Farbwechsel von blau (tief) zu rot (hoch). Die schwarze Trennlinie unterteilt Langeneß in Nordmarsch und Alt-Langeneß. Auch wenn Langeneß einheitlich betrachtet mit 17 cm ü. MThw geringfügig höher liegt als Hooge, ist das westlich gelegenen Nordmarsch mit lediglich 7 cm ü. MThw die am tiefsten gelegene aller betrachteten Halligmarschen.

Tabelle 2 Referenzhöhen der Binnenpegelschwellenwerte für Land unter (LU) sowie vollständige Land unter Ereignisse (vLU) bezogen auf Normalnull (NN) sowie das mittlere Tidehochwasser (MThw).

Hallig	**Geländehöhe (LU)**		**Deich / Deckwerk (vLU)**	
	cm NN	**cm MThw**	**cm NN**	**cm MThw**
Hooge	151 ± 24	15	290 ± 21	154
Langeneß	153 ± 40	17	234 ± 19	98
(Alt-Langeness)	162 ± 38	26	240 ± 16	104
(Nordmarsch)	143 ± 38	7	227 ± 20	91
Nordstrandischmoor	192 ± 28	37	225 ± 19	70

3.1.2 Außenpegelschwellenwerte

Für die Berechnung der Außenpegelschwellenwerte $H_{A\,(LU)}$ und $H_{A\,(vLU)}$ anhand parallel vorhandener Zeitreihen von Außen- und zugehörigen Binnenpegeln standen jeweils Zeitreihen von 30 Monaten zur Verfügung (vgl. Tabelle 1). Die Anzahl der im Zeitraum beobachteten Überschreitungen der Binnenpegelschwellenwerte für LU und vLU sowie die nach Formel 2.1 und Formel 2.2 berechneten Außenpegelschwellenwerte bezogen auf den Pegelnullpunkt (PNP) sind der Tabelle 3 zu entnehmen. Eine größere Summe an vLU im Vergleich zu LU (Alt-Langeneß und Nordstrandischmoor) ist auf die Eliminierung der Folgetiden bei der Berechnung der LU Außenpegelschwellenwerte zurück zu führen. Auffällig ist die kleine Varianz von $H_{A\,(LU/vLU)}$, welche oftmals unter 1 % liegt. Die maximale Varianz beträgt 4.6 % für den Außenpegelschwellenwert $H_{A\,(LU)}$ auf Alt-Langeneß (n = 17).

Tabelle 3 Außenpegelschwellenwerte $H_{A\,(LU/vLU)}$ bezogen auf den Pegelnullpunkt (PNP) zur Berechnung langjähriger Überflutungshäufkeiten für Land unter (LU) und vollständige Land unter (vLU) Ereignisse anhand der den Halligen zugeordneten Außenpegel. (RSD) Variationskoeffizient der angepassten Schwellenwerte. (n) Anzahl der zur Berechnung genutzten Wasserstände am Außenpegel

	HA (LU)	**RSD**	**n**	**HA (vLU)**	**RSD**	**n**
	cm ü. PNP	**%**		**cm ü. PNP**	**%**	
Hooge						
(Hooger Anleger)	772,7	2,1	13	806,0	0,3	3
Alt-Langeness (Wyk/Föhr)	740,4	4,6	17	772,7	0,9	15
Nordmarsch (Wyk/Föhr)	737,0	0,7	14	758,5	0,8	17
Nordstrandischmoor (Strucklahnungshörn)	744,6	0,9	32	761,4	2,1	35

3.1.3 Überflutungshäufigkeiten

Die jährlichen Überflutungsanzahlen der einzelnen Halligen sind innerhalb der betrachteten Zeiträume sehr variabel. Sowohl auf Hooge (1979, 1987,1996, 2003, 2006, Abbildung 14) als auch auf Nordmarsch und Alt-Langeneß (1960, Abbildung 15) gibt es Wasserwirtschaftsjahre ohne Überflutungsereignis.

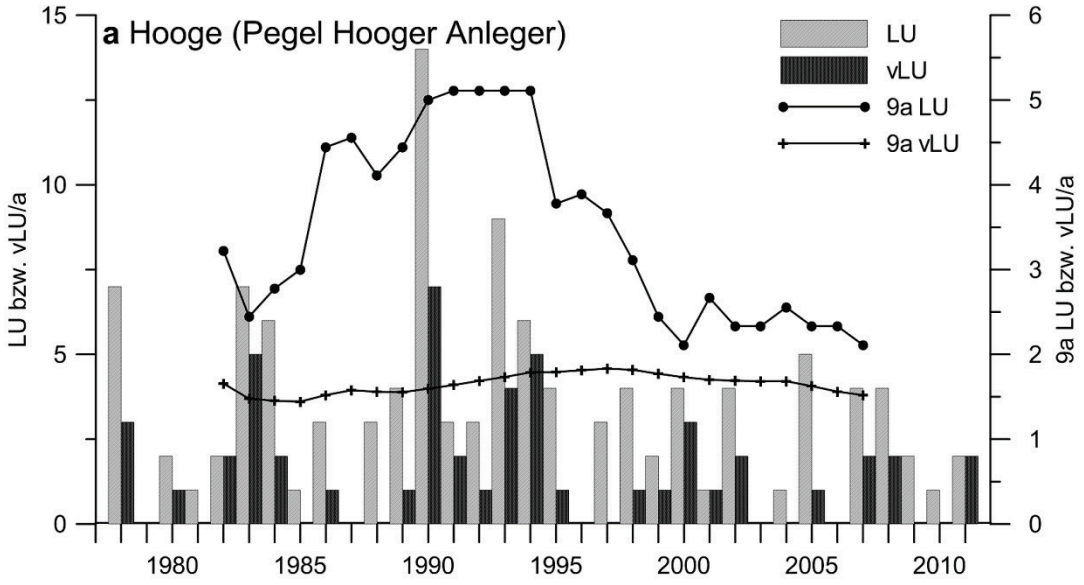


Abbildung 14 Langjährige Überflutungshäufigkeiten der Hallig (a) Hooge. Dargestellt sind sowohl die absoluten jährlichen Anzahlen der Land unter (LU) als auch der vollständigen Land unter (vLU) Ereignisse sowie der Trend anhand des 9-jährigen, gleitenden Mittels der jährlichen Anzahlen.

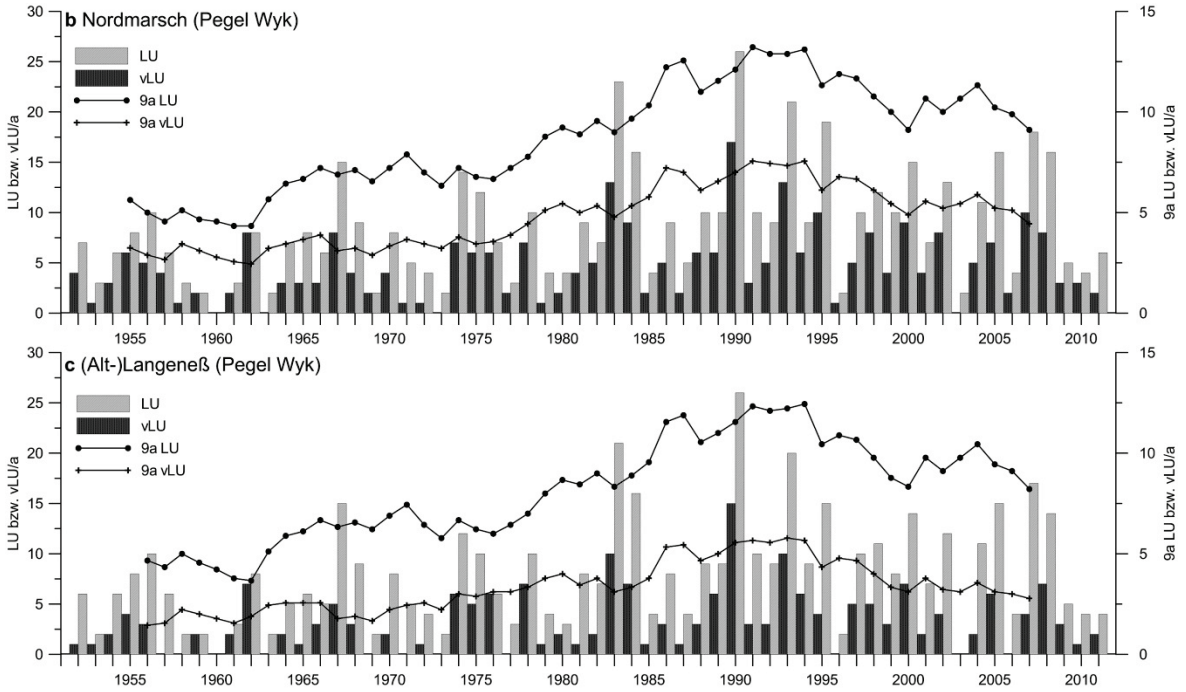


Abbildung 15 Langjährige Überflutungshäufigkeiten der Halligen (b) Nordmarsch, (c) Alt-Langeneß. Dargestellt sind sowohl die absoluten jährlichen Anzahlen der Land unter (LU) als auch der vollständigen Land unter (vLU) Ereignisse sowie der Trend anhand des 9-jährigen, gleitenden Mittels der jährlichen Anzahlen.

Die bisher sturmflutaktivste Periode mit 14 (Hooge) bzw. 26 (Langeneß) LU pro Jahr ist das WW 1990. Prozentual erreichen auf Langeneß 58% (Alt-Langeneß) bis 65% (Nordmarsch) aller LU Ereignisse das Niveau eines vLU mit einer kompletten Füllung der Hallig bis zur mittleren Deichhöhe. Auf Hooge entwickeln sich lediglich 50% aller Ereignisse zu einem vLU.

Der Pegel Strucklahnungshörn, welcher als nächster verfügbarer Außenpegel der Hallig Nordstrandischmoor zugeordnet ist, stellt lediglich für die WW 1995 - 2011 Wasserstandsdaten bereit. Das überflutungsreichste Jahr im Beobachtungszeitraum ist das WW 2007 mit 28 LU (Abbildung 16). 64% aller Ereignisse erreichen das Niveau einer vollständigen Überflutung (vLU).

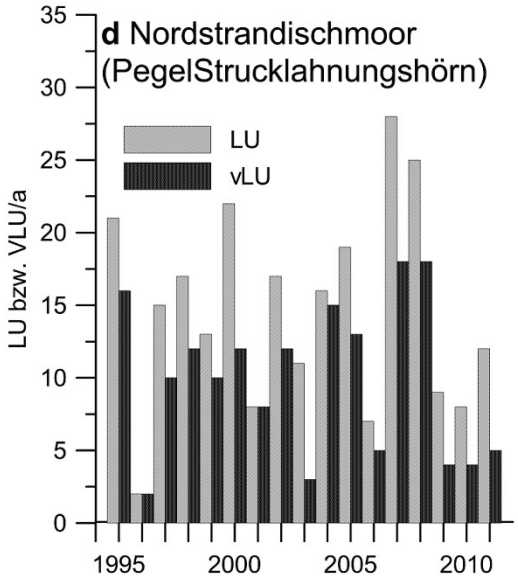


Abbildung 16 Langjährige Überflutungshäufigkeiten der Hallig (d) Nordstrandischmoor. Dargestellt sind sowohl die absoluten jährlichen Anzahlen der Land unter (LU) als auch der vollständigen Land unter (vLU) Ereignisse sowie der Trend anhand des 9-jährigen, gleitenden Mittels der jährlichen Anzahlen.

Trendanalysen der jährlichen Überflutungshäufigkeiten (9-jähriges gleitendes Mittel) zeigen auf Hallig Langeneß eine Verdopplung der LU Anzahlen von 6 auf max. 12 Ereignisse in einem Zeitraum seit beginn der Pegelaufzeichnungen 1951 bis Mitte der 1980er Jahre. Mit Ende der 1990er kehrt sich dieser Trend um. Hallig Hooge zeigt eine vergleichbare Trendentwicklung der LU Ereignisse. Sowohl Zunahme als auch erneutes Sinken der LU Häufigkeiten um den Zeitraum häufiger Überflutungen (1985 - 2000), fallen wesentlich sprunghafter aus als auf Langeneß. Innerhalb einer Zeitspanne von lediglich 5 Jahren (1994 - 1999) fällt das 9-jährige Mittel der Überflutungsanzahlen (LU) von 5 auf 3 Ereignisse pro Jahr. Die mittlere Anzahl der vLU folgt dem Trend der LU im Rahmen der allgemeinen Differenz zwischen LU und vLU Häufigkeiten. Aufgrund der kurzen Zeitreihe des Pegels Strucklahnungshörn von lediglich 16 Jahren 1995 - 2011 konnte für Nordstrandischmoor keine Trendanalyse der Überflutungshäufigkeiten erstellt werden.

Die Darstellung mittlerer Überflutungshäufigkeiten als 10-jähriges Mittel in dekadischer Form (Tabelle 4) ermöglicht sowohl einen einfachen visuellen Vergleich der Halligen untereinander als auch den Vergleich mit Referenzwasserständen der Pegelhaupttabellen betreffender Außenpegel. Der Vergleich der Halligen untereinander zeigt eine deutliche Zunahme der Überflutungsanzahlen von Hooge über Langeneß zu Nordstrandischmoor. Während die jährlichen Überflutungsanzahlen zwischen Nordstrandischmoor und Alt-Langeneß/Nordmarsch im Zeitraum (2001 - 2010) lediglich um den Faktor 1,5 (LU) bis 2 (vLU) variieren, wurde Nordstrandischmoor 7- bis 10-fach häufiger überflutet als Hooge. Auch die dekadische Darstellung

der Überflutungshäufigkeiten von Hooge und Langeneß verweist auf eine erhöhte Überflutungsfrequenz während der 1980er und 1990er Jahre. Das dekadische Mittel der höchsten jährlichen Tidehochwasserstände (MHThw) am Pegel Wyk auf Föhr zeigt im selben Zeitraum einen deutlichen Anstieg der Extremwasserstände.

Tabelle 4 Dekadische Aufstellung der mittleren jährlichen Häufigkeit von Land unter (LU) und vollständigen (vLU) Ereignissen auf den Halligen, sowie des MThw nach der Pegelhaupttabelle (Wyk/Föhr).

	1961-1970	**1971-1980**	**1981-1990**	**1991-2000**	**2001-2010**
	LU (vLU) /a	**LU (vLU) /a**	**LU (vLU) /a**	**LU (vLU) /a**	**LU (vLU) /a**
Hooge			4 (2)	4 (2)	2 (1)
Alt-Langeness	6 (3)	6 (5)	11 (5)	11 (3)	9 (3)
Nordmarsch	7 (4)	7 (3)	12 (7)	12 (6)	10 (5)
Nordstrandischmoor					15 (10)
MHThw Wyk (cm NN)	315	308	343	346	312

3.2 Bodendichte und Gehalt an organischer Substanz

Die Halligböden sind als junge, grundwasserbeeinflusste Gleye zu klassifizieren. Oberhalb ca. 80 cm ist der Boden nicht permanent wassergesättigt und durch braun-rote Oxidationsfarben gekennzeichnet. Die Trockenraumdichte und der Glühverlust varieren deutlich mit der Tiefe (Abbildung 17).

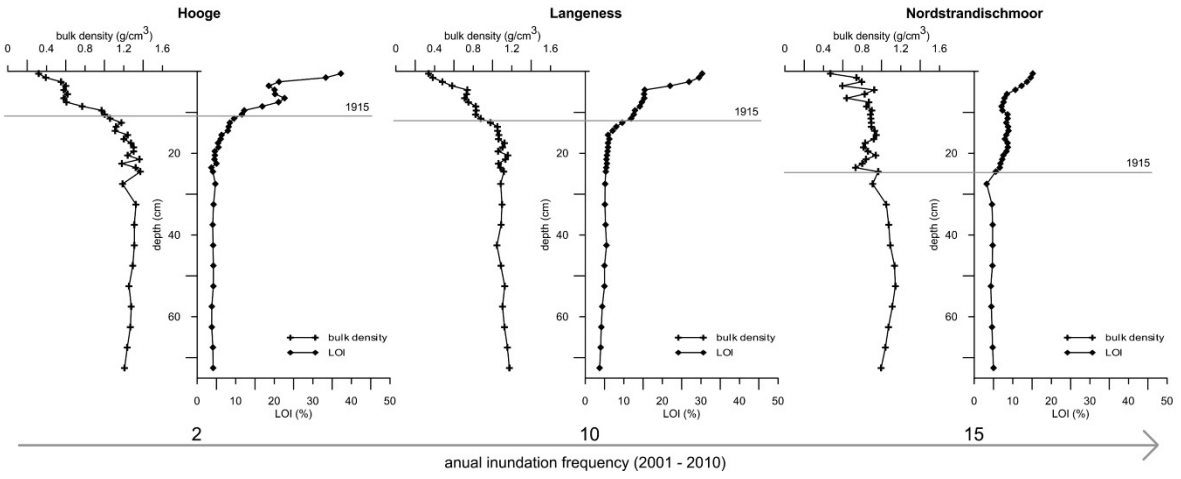


Abbildung 17 Mittlere BDD und LOI Werte als Proxies für organische Bodensubstanz bestimmt an Rammkernen von 2011 (a) Hooge, n = 4, (b) Langeness, n = 6 (b) Nordstrandischmoor, n = 2. Auflösung in 1 cm Abschnitten bis 25 cm Teufe, darunter 5 cm. Der Horizont von 1915 markiert den Deichbau auf den Halligen und damit einhergehende hydraulische und sedimentologische Veränderungen.

Während in den Bohrkernen von Hooge und Langeness beide Parameter mit deutlicher Krümmung nach unten hin zu (BDD) bzw. abnehmen (LOI) ist diese Tendenz auf Nordstrandischmoor weniger stark ausgeprägt. BDD Werte variieren zwischen ca. 0,3 g/cm^3 an der Oberfläche bis zu ca. 1,4 g/cm^3 in größerer Tiefe. Der Gehalt an organischer Substanz ist deutlich höher in den Böden von Hooge und Langeness (> 30%) als von Nordstrandischmoor (>15%). Wegen der hohen Korrelation zwischen LOI undBDD ($R^2 = 0.93$, $p < 0.001$), ist es wahrscheinlich, dass Abbauprozesse organischer Substanz in den oberen Bodenhorizonten die Zunahme der Trockenraumdichte bedingt. (Bartholdy et al. 2010) finden ähnliche Zusammenhänge für vergleichbare Marschen im dänischen Wattenmeer. Unterhalb von 30 cm unter GOK zeigen BDD und LOI in den Halligböden nur noch geringe Variation. LOI Werte sind mit 4-5% nahezu constant. Unter Einbeziehung des Kristallwasserfehlers tendiert der Gehalt an organischer Substanz gegen null.

Der organische Anteil im Boden rührt einerseits von abgestorbener Vegetation her, andererseits bringen Überflutungswässer ebenfalls organische Substanz mit. Die Gehalte an Organik in den Sedimentfallen sind allerdings deutlich niedriger als die Gehalte in den oberen 30 cm des Bodens (Tabelle 5).

Tabelle 5 Tiefe des Markerhorizontes (Deichbau 1915), mittlere BDD, sowie Gehalte organischer Substanz im Boden (LOIsoil, Werte für den Zeitraum 1915-2011) und in den Sedimentfallen (Typ A) (LOI trap). BDD and LOI finden Eingang in die Berechnung der Sedimentaufwachsraten.

	Tiefe (1915) (cm unter GOK)	**BDD> 1915 (g/cm^3)**	**LOI$_{soil}$ > 1915 (%)**	**LOI trap (Typ A) (%)**
Hooge	10.8 ± 1.6	0.64 ± 0.17	21.4 ± 6.6	8.0 ± 9.0
Langeness	12.0 ± 2.6	0.67 ± 0.16	18.4 ± 5.9	7.0 ± 2.8
N. Moor	24.9 ± 0.7	0.83 ± 0.09	9.0 ± 1.4	5.7 ± 2.0

Auffällig ist der Organikgehalt der Sedimente vor dem Deichbau von 1915 (Müller & Fischer 1917), der deutlich nierigere Werte aufweist als in der Zeit danach. Dieses Ergebnis ist in guter Übereinstimmung mit Untersuchungen von Marschböden durch (Craft et al. 1993), wobei Marschen, die nur gelegentlich überflutet werden, einen höheren Organikgehalt aufweisen als solche, die regelmäßig überflutet werden. Durch den Deichbau auf den Halligen Hooge und Langeness bzw. der Uferbefestigung auf Nordstrandischmoor kam es vermutlich zu einer deutlichen Reduzierung der Überflutungshäufigkeiten, die mit den gefundenen Organikgehalten in Einklang zu bringen sind.

3.3 Sedimentaufwachsraten und Sedimentakkumulation

In den folgenden Kapiteln werden die Ergebnisse der dreijährigen Sedimentfallen untersuchungen dargestellt sowie die aus Sedimentdatierungen abgeleiteten längerfristigen Sedimentaufwachsraten der untersuchten Halligen Hooge, Langeness und Nordstrandischmoor sowie der ostfriesischen Inseln Juist und Norderney.

3.3.1 Methodische Untersuchungen

1. Einbautiefe der Flaschen

Art und Tiefe des Einbaus der Sedimentfallen (Typ A) könnte theoretisch Einfluss auf die Sammeleffizienz der Falle haben. Dies wäre insbesondere dann der Fall, wenn Sedimente sehr bodennah transportiert werden, oder wenn beim Einbau der Flaschen gelockertes Bodenmaterial beim Landunter in die Flaschen geschwemmt worden wäre. Die Ergebnisse des Einbautiefenversuchs sind in Abbildung 18 dargestellt. Die siliziklastische Sedimentmenge ist demnach nicht signifikant von der Einbautiefe der Flaschen abhängig. Deutlich erkennbar ist ein Unterschied der Sedimentmenge zwischen kurzgefressener Weide und einer Brachefläche mit etwas höherer Vegetation. Auf der Weide wird demnach mehr Sediment akkumuliert als auf der Brache. Inwieweit dieser Effekt aber auf der Vegegationshöhe basiert oder andere Ursachen hat, konnte hier nicht geklärt werden, da die Flächen hinsichtlich Ihrer topographischen Höhe und Entfernung zum nächsten Priel nicht vergleichbar sind.

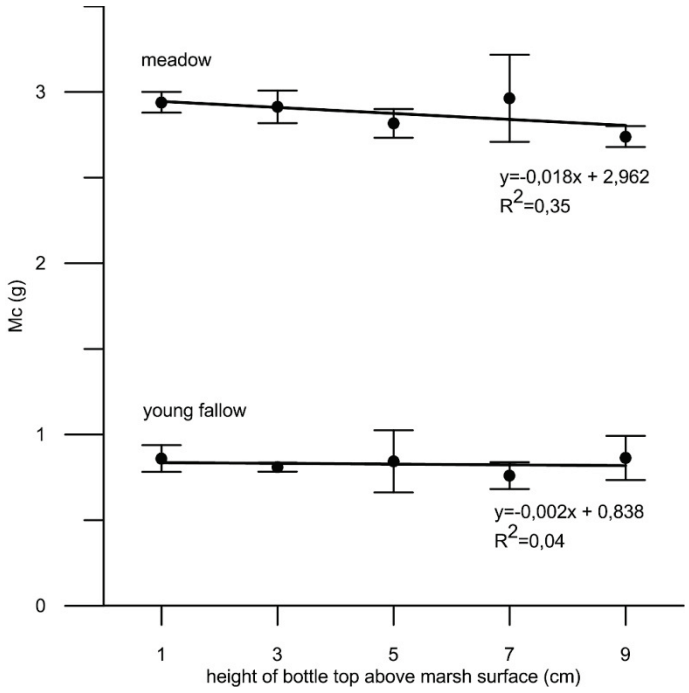


Abbildung 18 Siliziklastische Sedimentmenge in Sedimentfallen (Typ A, Flasche) unterschiedlicher Einbautiefe. Der Aufbau der Fallen erfolgte an zwei Arealen (1,5 * 2,0 m) mit unterschiedlicher Vegetation (Weide/Brache). Die Fehlerbalken zeigen die Standardabweichng einer Dreifachbestimmung.

2. Kleinräumige Variabilität der Sedimentdeposition

Die Ergebnisse der Versuche mit Sedimentfallen zur Bestimmung der kleinräumigen Variabiliät und Reproduzierbarkeit der Werte sind in Tabelle 6 dargestellt. Es zeigt sich, dass die Relative Standardabweichung (RSD) in den kleinräumigen Bereichen zwischen 0.5% – 27.1% liegt. Vergleicht man diesen Wert mit der Variabiliät Sedimentdeposition auf der ganzen Hallig so fällt dort die RSD mit Werten von 26.6% – 81.9% deutlich höher aus. Das bedeutet, die Sedimentfallen sind geeignet, die räumliche Variabilität der Sedimentdeposition abzubilden.

Tabelle 6 Sedimentdeposition in kleinräumigen Bereichen der Halligen Hooge, Langeness und Nordstrandischmoor (n=5, Fallentyp A, Abstand zwischen den Fallen 10m), Mc=Siliziklastischer Anteil

Hooge cluster 2	**2010 - 2011**		**2011 - 2012**		**2012 - 2013**	
	Mc (t/ha)	**Δh (mm/a)**	**Mc (t/ha)**	**Δh (mm/a)**	**Mc (t/ha)**	**Δh (mm/a)**
	cluster (Hallig)		**cluster (Hallig)**		**cluster (Hallig)**	
average	13.3 (4.7)	2.7 (1.0)	4.3 (10.3)	0.9 (2.1)	12.5 (7.2)	2.5 (1.4)
RSD	27.1 (70.1)		11.4 (63.4)		14.2 (42.1)	
min	7.2 (1.5)	1.4 (0.3)	3.5 (2.3)	0.7 (0.5)	9.8 (2.5)	2.0 (0.5)
max	16.5 (14.1)	3.3 (2.8)	4.7 (26.9)	1.0 (5.4)	14.4 (17.0)	2.9 (3.4)
Langeneß cluster 1	**2010 - 2011**		**2011 - 2012**		**2012 - 2013**	
	Mc (t/ha)	**Δh (mm/a)**	**Mc (t/ha)**	**Δh (mm/a)**	**Mc (t/ha)**	**Δh (mm/a)**
	cluster (Hallig)		**cluster (Hallig)**		**cluster (Hallig)**	
average	2.9 (4.0)	0.5 (0.7)	9.2 (10.1)	1.7 (1.8)	6.7 (6.1)	1.2 (1.1)
RSD	5.4 (81.9)		5.4 (56.8)		4.2 (61.8)	
min	2.7 (1.2)	0.5 (0.2)	8.5 (4.1)	1.5 (0.8)	6.5 (2.5)	1.2 (0.5)
max	3.1 (20.2)	0.6 (3.7)	9.7 (32.7)	1.8 (6.0)	7.1 (20.2)	1.3 (3.7)
Langeneß cluster 2	**2010 - 2011**		**2011 - 2012**		**2012 - 2013**	
	Mc (t/ha)	**Δh (mm/a)**	**Mc (t/ha)**	**Δh (mm/a)**	**Mc (t/ha)**	**Δh (mm/a)**
	cluster (Hallig)		**cluster (Hallig)**		**cluster (Hallig)**	
average	5.9 (4.0)	1.1 (0.7)	8.6 (10.1)	1.6 (1.8)	5.5 (6.1)	1.0 (1.1)
RSD	8.0 (81.9)		8.2 (56.8)		10.1 (61.8)	
min	5.6 (1.2)	1.0 (0.2)	7.8 (4.1)	1.4 (0.8)	4.8 (2.5)	0.9 (0.5)
max	6.7 (20.2)	1.2 (3.7)	9.7 (32.7)	1.8 (6.0)	6.3 (20.2)	1.1 (3.7)
N.Moor cluster 1	**2010 - 2011**		**2011 - 2012**		**2012 - 2013**	
	Mc (t/ha)	**Δh (mm/a)**	**Mc (t/ha)**	**Δh (mm/a)**	**Mc (t/ha)**	**Δh (mm/a)**
	cluster (Hallig)		**cluster (Hallig)**		**cluster (Hallig)**	
average	8.8 (13.4)	1.1 (1.6)	27.9 (33.1)	3.7 (4.4)	9.7 (13.5)	1.3 (1.8)
RSD	0.5 (57.6)		4.8 (26.6)		3.0 (37.7)	
min	8.8 (5.1)	1.1 (0.6)	25.6 (22.2)	3.4 (2.9)	9.5 (6.0)	1.3 (0.8)
max	8.9 (29.6)	1.1 (3.6)	28.8 (53.0)	3.8 (7.0)	10.2 (20.8)	1.3 (2.8)

3. Unterschiedliche Mattentypen

Die drei getesteten Mattentypen unterscheiden sich deutlich hinsichtlich ihrer Sedimentsammeleffizienz. Der Kunstrasen (B3) weist die höchste Effizienz auf, die Fussmatten des Typs B2 (hohe Borstenanzahl) und die des Typs B1 (niedrige Borstenanzahl) folgen mit jeweils geringerer Effizienz (Abbildung 19). Die Sammeleffizienz der Matte Typ B3 korreliert hochsignifikant mit den Typen B1 und B2. Dies ermöglicht eine, wenn auch mit einem Fehler behaftete, Umrechung der Daten eines Mattentyps in einen anderen. Wegen der besten Sammeeffizienz und der größten strukturellen Ähnlichkeit mit der natürlichen Vegetation wurde der Kunstrasen (Typ B3) für die folgenden Standardmessungen ausgewählt.

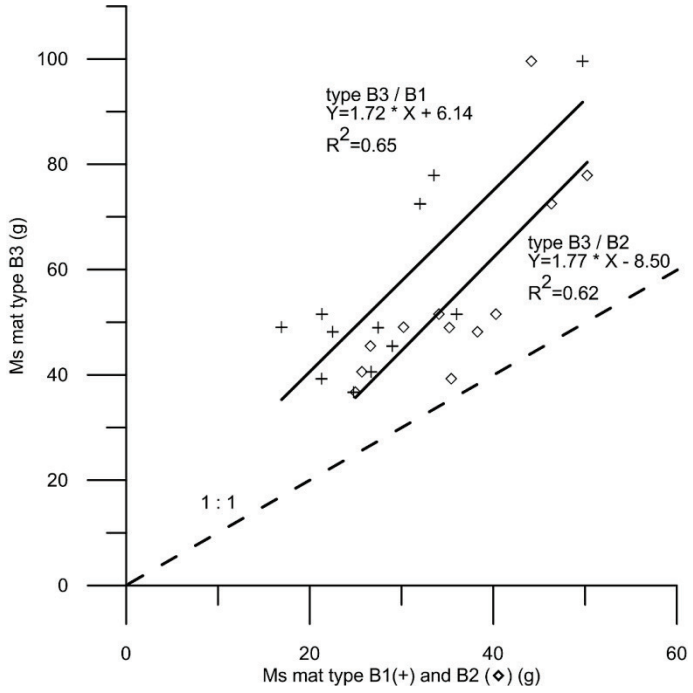


Abbildung 19 Vergleich der Sedimentsammeleffizienz verschiedener Mattentypen (Ms = Gesamtsedimentmenge). PVC-Fussmatte (B1), PVC-Fussmatte (B2), Kunstrasen (B3). Die Korelation zwischen B3 und B1 ($P < 0.005$; $R^2 = 0.65$; $n = 12$) sowie zwischen B3 und B2 ($P < 0.005$; $R^2 = 0.62$; $n = 12$) ist hochsignifikant.

4. Transekten

Die deponierte Sedimentmenge in Abhängigkeit von dem Abstand zum potentiellen Sedimentliefergebiet ist in Abbildung 20 exemplarisch für je eine Transekte auf Nordstrandischmoor und Langeness dargestellt. Generell ist eine Abnahme der Sedimentmenge mit zunehmender Entfernung von der Uferlinie (Nordstrandischmoor) bzw. vom Halligpriel (Langeness) zu beobachtet. Erhöhte Sedimentakkumulation findet auf Nordstrandischmoor im Bereich 0 – 14 m (max. 24 m) hinter dem Halligrauhstreifen statt. Bei dem Priel auf Langeness ist

spätestens ab 5 m Entfernung keine Beeinflussung der Sedimentakkumulation durch den Priel mehr zu erkennen. Diese Beobachtung ist höchstwahrscheinlich durch Korngrößeneffekte zu erklären. Der Großteil der Überflutungssedimente besteht nur aus Silt und Ton, die mit dem einströmenden Überflutungswasser weit ins Halliginnere transportiert werden können. Sandanteile im suspendierten Material des Überflutungswassers fallen dagegen wegen der rasch nachlassenden Strömungsgeschwindigkeit direkt hinter der Hallig oder Prielkante aus und tragen damit zu einer höheren Sedimentakkumulation bei.

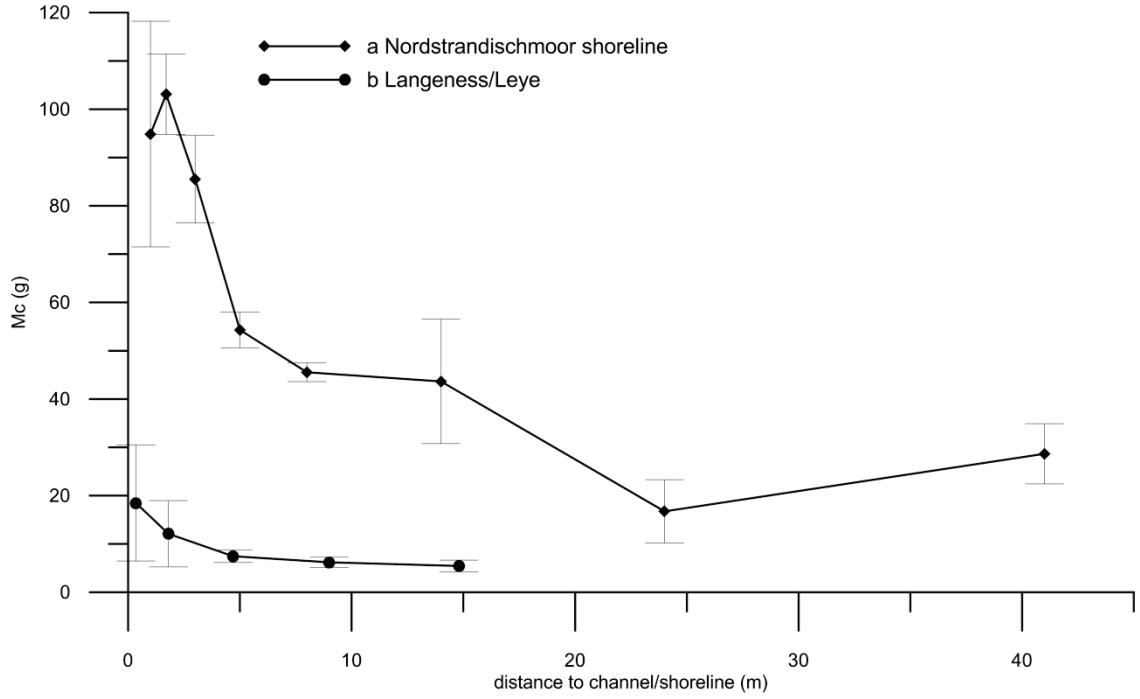


Abbildung 20 Klastische Sedimentdeposition (Mc) im Winterhalbjahr 2011/2012 in Abhängigkeit zur Entfernung von: (a) Uferlinie binnenseitig des Rauhstreifens auf Nordstrandischmoor, (b) Binnenpriel „Leye“ auf Langeneß. Es werden Mittelwerte aus (a) 3 Fallentransekten Typ A (Flasche) und (b) 6 Fallentransekten Typ A (Flasche) dargestellt.

3.3.2 Halligen Hooge, Langeness und Nordstrandischmoor

Es besteht ein deutlicher Unterschied zwischen den Raten der bedeichten Halligen Hooge und Langeness gegenüber der nur mit einem Rauhstreifen umgebenen Hallig Nordstrandischmoor. Nordstrandischmoor wächst derzeit auf Basis des Zeitraumes 2010-2013 pro Jahr ca. 1 mm schneller als die beiden anderen Halligen (Tabelle 7). Die Ergebnisse der Radionukliddatierungen sind im Rahmen des Fehler seit 1963 praktisch identisch mit den Raten aus den Sedimentfallenuntersuchungen. Wird der längere Zeitraum seit dem Deichbau betrachtet, so ergeben sich im Mittel geringfügig geringere Raten, da die Sedimentaufwachsraten in der ersten Hälfte des 20. Jhd. niedriger waren als heute (vergl. Abbildung 22).

Tabelle 7 Sedimentaufwachsraten für unterschiedliche Zeiträume nach Radionukliddatierung sowie nach den Ergebnissen der Sedimentfallen.

	Radionukliddatierung #1	**Radionukliddatierung** #1	**Radionukliddatierung** #2	**Sedimentfallen** #3
[mm/a]	**1963-1986**	**1986-2011**	**1915-2011**	**2010-2013**
Hooge	1.3 ± 0.7	1.4 ± 0.6	1.0 ± 0.3	1.5 ± 0.9
Langeness	1.9 ± 0.9	1.6 ± 0.7	1.2 ± 0.3	1.2 ± 0.8
N. Moor	3.1 ± 1.9	3.2 ± 1.6	2.6 ± 0.9	2.6 ± 0.9

#1: Raten nach ^{137}Cs und ^{210}Pb wurden gemittelt; #2: Raten nach ^{210}Pb; #3: Mediane Raten Fallentypen A und B wurden gemittelt.

Der Sedimentaufwachs der einzelnen Halligen variiert deutlich von Jahr zu Jahr (Abbildung 21) wobei kein eindeutiger Zusammenhang zwischen Überflutungshäufigkeit und Sedimentakkumulation besteht. Es zeigt sich, dass die Rangfolge der Halligen in allen untersuchten Jahren gleich bleibt Langeness < Hooge < Nordstrandischmoor und dass ein sturmflutreicher Winter wie 2011/2012 tendenziell mehr Sediment bringt als ein sturmflutärmerer. Ein scheinbarer Widerspruch besteht jedoch zwischen der Beobachtung, dass Langeness stets gleiche oder geringere Wachstumsraten als Hooge aufweist, wohingegen die Überflutungsanzahl immer deutlich höher liegt. Die Differenz zwischen MThw und dem nicht permeable Deckwerk ist auf Langeness im Mittel 58 cm niedriger als auf Hooge (vergl. Abbildung 13). Dies kann als Hinweis interpretiert werden, dass kleinere Landunter, deren Pegelstände zwar ausreichen um Langeness zu überfluten (Hooge aber noch trocken liegt) keine oder nur sehr geringe Sedimentmengen mit sich bringen, während die Hauptsedimentmenge nur während höherer Sturmfluten abgelagert wird, die sowohl Langeness als auch Hooge überfluten.

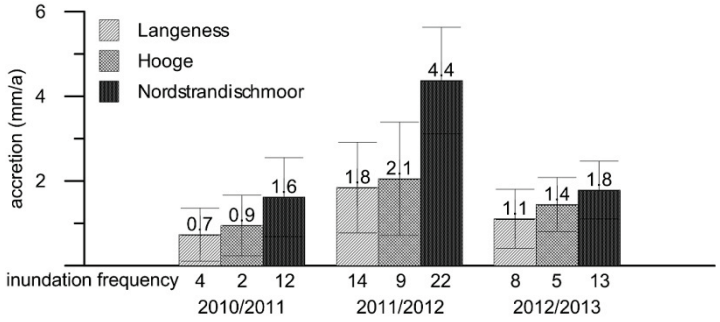


Abbildung 21 Mediane Sedimentaufwachsraten für drei Beobachtungszeiträume (jeweils Oktober bis März , 2010 bis 2013) im Vergleich mit der Überflutungsanzahl.

Vergleicht man die durch ein 19 jähriges geleitendes Mittel geglättete Kurve der jährlichen Anzahl der Sturmfluten > Deckwerkshöhe Hooge, 1,54 m NHN mit den Sedimentaufwachraten auf Basis der ^{210}Pb Datierungen so ergibt sich ein augenfälliger Zusammenhang (Abbildung 22), der bei 4 von 12 Rammkernen statistisch signifikant ($p < 0.1$) ist (exemplarisch Abbildung 23).

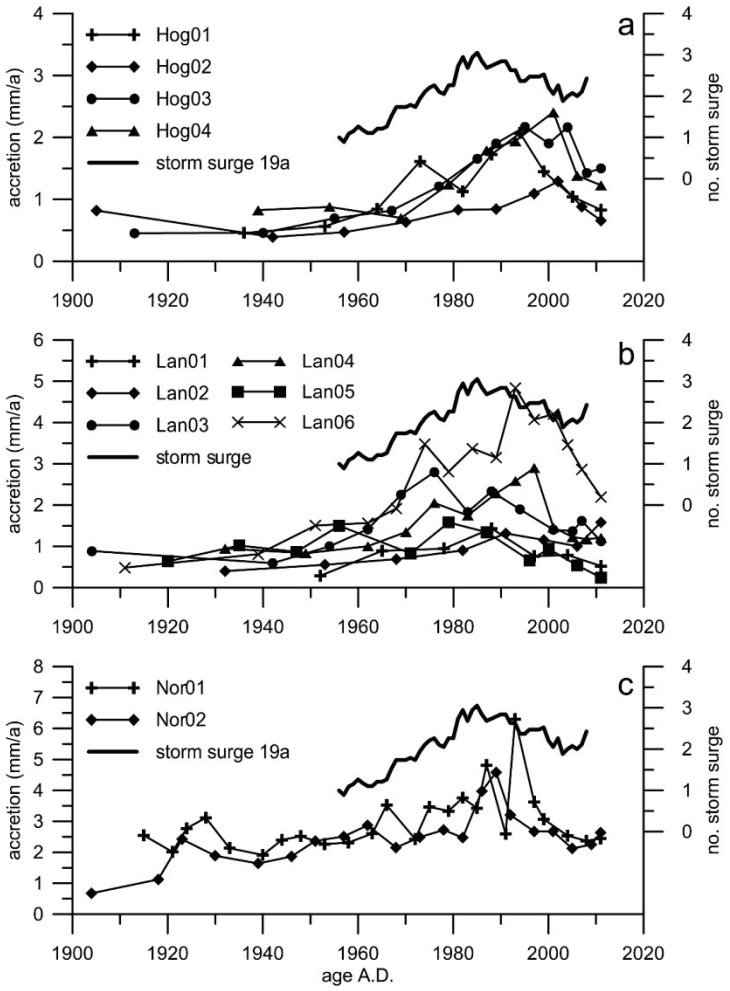


Abbildung 22 Vergleich der mittleren Sedimentaufwachsraten (a) Hooge, (b) Langeness and (c) Nordstrandischmoor mit der Sturmfluthäufigkeit. Die Sturmfluthäufigkeit beruht auf dem 19 jährigen gleitenden Mittel der jährlichen Überschreitungsanzahlen (1,54 m ü MThw) am Pegel Wyk auf Föhr

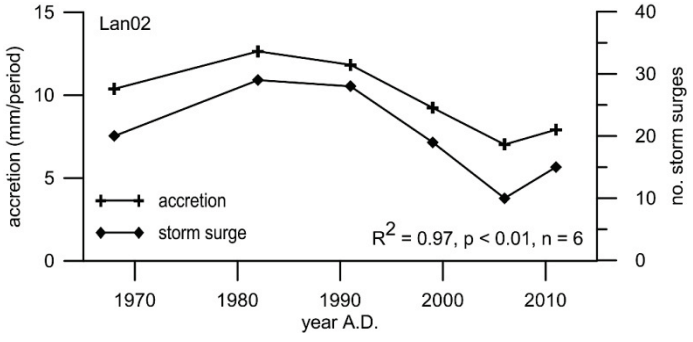


Abbildung 23 Sedimentaufwachs (nach ^{210}Pb Alter) im Bohrkern Langeness 2, verglichen mit der Anzahl an Sturmfluten über 1,54 m über MThw (MThw (Hooge) = 1,36 m über NHN im Zeitraum 2001-2010)

3.3.3 Sieltorexperiment am Osterwehl auf Hallig Langeness

Im Zeitraum 21.02. – 27.02.2013 wurde gemeinsam mit dem IWW (Aachen) die erste Messkampagne „Osterwehl“ bei MThw-Bedingungen durchgeführt. Am 25.02.2013 wurden die drei Flügeltore durch Kanthölzer fixiert, sodass Seewasser bei Flut ungehindert in das Prielsystem strömen konnte. Insgesamt wurden 5 Tidezyklen bei geöffneter Sieltoranlage gemessen, wobei der ASM-IV Trübesensor ca. 50 m landeinwärts des Siels positioniert war. Eine Überflutung des Einzugsgebietes bzw. der angrenzenden Marschflächen am Osterwehl sowie des Referenzgebietes Leye am Treuberg erfolgte nicht. Die ASM-IV Daten zeigen bei einströmendem Seewasser in das Prielsystem Partikelkonzentrationen zwischen 100 – 200 mg/l (Abbildung 24). Die Detailaufnahme von Tide Nr. 2 (Abbildung 25) zeigt deutlich, ab welchem Zeitpunkt suspensionsreiches Seewasser in den Priel strömt. Um den Zeitpunkt der Umkehr der Strömungsrichtung sedimentieren die Partikel sehr schnell, da das ausströmende Wasser deutlich klarer ist. Es kann geschlussfolgert werden, dass ein Sedimenteintrag in das Prielsystem stattfindet. Rote Reflektionsbänder mit maximalen Konzentrationswerten sind auf Treibsel zurück zu führen, das sich am Messpfahl verfängt und die Sensoren blockiert. Auffällig ist, dass während der ersten drei Tiden offenbar mehr Partikel transportiert werden während der letzten beiden. Eine Beeinflussung der Messergebnisse durch Eisgang zu Beginn der Messungen (Tide 1-3) kann nicht ausgeschlossen werden.

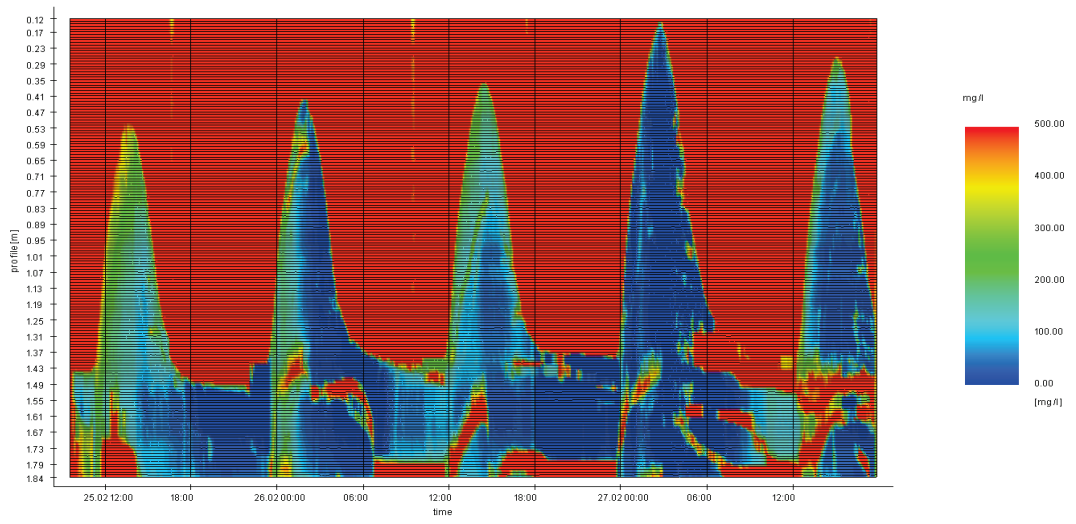


Abbildung 24 Suspensionsgehalt des Wassers am Sieltor Osterwehl [mg/l], gemessen bei geöffneten Sieltoren mittels ASM-IV Trübemessgerät ca. 50m binnenseitig des Siels. Maximale Reflektionswerte sind Luftreflektionen oder auf Treibsel zurück zu führen, welches die Sensoren blockiert.

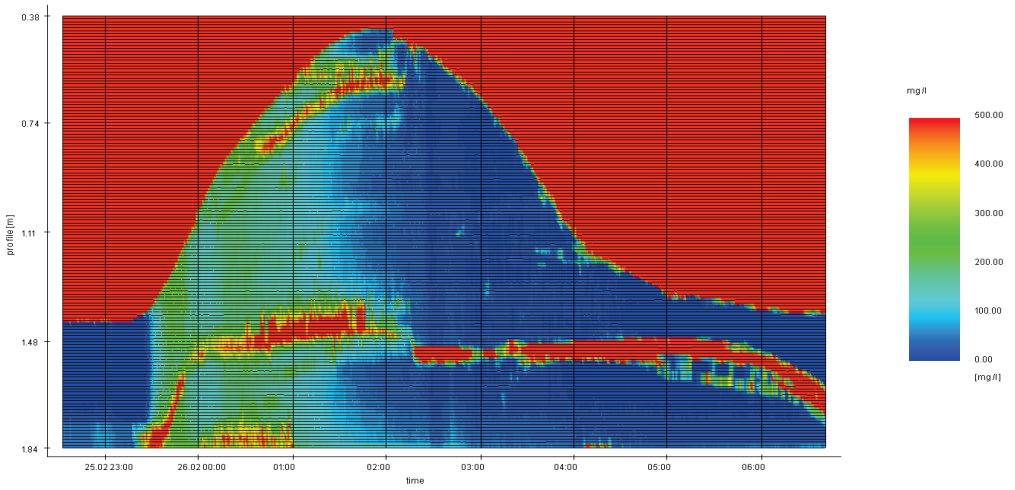


Abbildung 25 Suspensionsgehalt des Wassers am Sieltor Osterwehl [mg/l] während Tide Nr. 2. Gut zu erkennen ist der Zeitpunkt an dem suspensionsreiches Meerwasser in den Priel strömt.

Die zweite Messkampagne erfolgte vom 10.01. – 13.01.2014 ohne die Beteiligung des IWW. Der maximale Tidehochwasserstand betrug ca. +50 cm über MThw, sodass deutlich mehr Wasservolumen durch das geöffnete Tor auf die Hallig transportiert wurde. Die maximale Suspensionsfracht während Tide Nr. 2 betrug ca. 400 – 500 mg/l und ist damit deutlich höher als während der ersten Messkampagne unter MTHW-Bedingungen. Der maximale Wasserstand auf der Hallig war jedoch wiederum nicht ausreichend, um flächenhafte Sedimentationsmessungen in den Einzugsgebieten vor zu nehmen. Eine dritte Messkampagne bei MTHW + 1 m konnte mangels geeigneter Wetterbedingungen nicht durchgeführt werden, sodass die Kernfrage nach einer deutlichen, flächenhaften Steigerung der Sediementdeposition durch die Maßnahme nicht abschließend beantwortet werden konnte. Generell zeigt sich jedoch eine positive Rückkopplung zwischen Suspensionsfracht und Wasserstand und ein deutlicher Transport von Feststoffen in das geöffnete Prielsystem.

3.3.4 Ostfriesische Inseln Juist und Norderney

Messungen der Sedimentdepositionsraten wurden auf Juist und Norderney in den Winterhalbjahren 2011 – 2012 und 2012 – 2013 durchgeführt. Das entsprechende Versuchsfeld liegt auf Juist südlich des eingedeichten Billpolders, auf Norderney östlich des Grohdepolders. Beide Flächen werden bei hohen Tidewasserständen überflutet. Exakte Informationen bezüglich der Überflutungswasserstände und Überflutungshäufigkeiten lagen zum Zeitpunkt der Berichtslegung nicht vor. Die Anzahl sowie die Anordnung der Sedimentfallen variierte zwischen den Jahren. Während in 2011 – 2012 lediglich 5 Fallenkombinationen A + B installiert waren, wurde das Messnetz im folgenden Winterhalbjahr auf 14 Standorte (Norderney) sowie 20 Standorte (Juist) erweitert. Da nur ungenügende Informationen bezüglich bodenphysikalischer Parameter

vorlagen, wurden zur Berechnung der vertikalen Wachstumsraten BDD und LOI Werte der Hallig Hooge adaptiert. Die Wachstumsraten der beprobten Inselmarschflächen liegen im Bereich weniger Milimeter pro Jahr und entsprechen somit denen der Halligen (Tabelle 8). Das Gelände südlich des Billpolders auf Juist liegt topographisch höher über dem MThw als die Fläche östlich des Grohdepolders auf Norderney. Somit fallen bei letzt genanntem die mittleren Aufwachsraten wesentlich geringer aus.

Tabelle 8 Vertikales Marschwachstum [mm/a] auf Juist und Norderney im Zeitraum von 2011 - 2013. Die angegebenen Daten sind Mittelwerte der beiden Sedimentfallentypen A (Flasche) und B (Matte)

[mm/a]	**2011 – 2012**	**2012 - 2013**
Norderney (östl. Grohdepolder)	2.5 ± 1.0	2.3 ± 0.9
Juist (südl. Billpolder)	1.3 ± 0.4	0.2 ± 0.1

3.3.5 Isostatische Landbewegung und Kompaktion tieferer Schichten

Vink et al. (2007) errechnen für den Zeitraum der letzten 8000 Jahre eine maximale isostatische Krustenbewegung von ca. -7,5 m entlang einer gedachten Linie von der niedersächsischen Nordseeküste bis zur Dogger Bank. In Richtung des ehemaligen Fennoskandinavischen Eischildes, nordöstlich der Linie maximaler Subsidenz und damit in Richtung des Untersuchungsgebietes, nimmt die Rate der isostatischen Krustenbewegung ab, bis sich deren Bewegungsrichtung schließlich umkehrt. Mörner (1980) verortet die Kippachse der beiden gegenläufigen Bewegungsrichtungen entlang einer gedachten Linie von Rügen zur nordwestlichen Küste Dänemarks. Die isostatische Krustenbewegung im Bereich des Untersuchungsgebietes lässt sich somit auf eine Wertespanne zwischen 0 und -7.5 m (0 – 0.9 mm/a) für einen Zeitraum der letzten 8000 Jahre eingrenzen. Wird nun noch berücksichtigt, dass sich die Bewegungsgeschwindigkeit zusehends verlangsamt, kann der Prozess der isostatischen Krustenbewegung für die rezente Betrachtung vertikaler Landbewegungen im Bereich der Nordfriesischen Wattenmeer Küste lediglich von marginaler Bedeutung sein. Vink et al. (2007) errechnen für die kürzere Zeitspanne der letzten 5000 Jahre für die Deutsche Küste lediglich Subsidenzraten von ≈ 0,4 mm/a.

Setzungsprozesse junger Marschsedimente sind eng mit dem Vorkommen von Torflagen verknüpft, welche im Zuge steigender Auflast einer Kompaktion unterliegen (Long et al. 2006). Die Auswertung der verfügbaren Baugrundgutachten, welche Informationen bezüglich der Zusammensetzung des Holozänen Sedimentkörpers unterhalb der Halligen liefern, zeigen lediglich unterhalb Nordstrandischmoor Torflagen mit einer Mächtigkeit von 0.7 bis maximal 2.2 m.

Unterhalb der Hallig Hooge und Langeneß konnten organische Einschaltungen lediglich mit einer Mächtigkeit von wenigen Dezimetern verortet werden. Es muss jedoch darauf hingewiesen werden, dass der Datenbestand lediglich punktuelle Informationen für den Bereich des Sedimentkörpers unterhalb einzelner Warften zulässt und Aussagen somit nicht als allgemeingültig für die betreffende Hallig gelten können. Vom derzeitigen Wissensstand würden für den Sedimentkörper unterhalb von Nordstrandischmoor ein größeres Senkungspotential relativ zu Hooge und Langeness erwartet werden. Stellungnahmen zu erwarteten Senkungsprozessen im Rahmen baulicher Maßnahmen (Verfüllung von Fethingen, Warftabflachung) unterstützen diese These.

3.4 Sedimentverteilung

3.4.1 Sedimentverteilung

Die Sedimentverteilung wurden als dreijähriges Mittel der vertikalen Aufwuchsraten aus den Sedimentfallenkombinationen A und B berechnet (Abbildung 26). Die Verteilungskarten zeigen unterschiedliche Verteilungsmuster der Überflutungssedimente auf den Halligen. Obwohl die Distanz zwischen den Fallenstandorten mit 400 x 400 m recht groß ist, zeigen sich Verteilungsmuster, welche teilweise mit naturbelassenen Tidenmarschen vergleichbar sind. Im Allgemeinen verringern sich die Raten mit steigender Entfernung des Beobachtungspunktes zur Uferlinie und den Sediment führenden Binnenprielen (Temmerman et al. 2003, D‘Alpaos et al. 2007, Bartholdy et al. 2010)

Hallig Hooge zeigt einen Gradienten ansteigender Wachstumsraten vom südwestlichen Ufer in Richtung Nordosten. Somit sind die Bereiche der höchsten Depositionsraten zwar in Ufernähe gelegen, auffällig ist aber, dass diese sich nicht in Hauptwindrichtung (Südwesten) befinden, sondern auf der Leeseite (Nordosten) exponiert sind. In Hauptwindrichtung befindet sich ein küstenparalleler Bereich der binnenseitig des Deckwerks untypisch niedrige Aufwuchsraten (0.7 bis 1.1 mm/a) aufweist. Im westlichen und östlichen Langeness sind Bereiche hoher Wachstumsraten direkt binnenseitig hinter den Deckwerken gelegen. Maximalwerte wurden jeweils in der Nähe der größten Siele gemessen, welche die Hallig nach einer Überflutung entwässern. Diese sind das Osterwehl (3.8 mm/a) sowie der Jelf (3.4 mm/a). Mit zunehmneder Entfernung zu den Deckwerken sinken die jährlichen Wachstumsraten auf Werte < 1 mm/a. Im mittleren Bereich der Hallig, wo die Distanz zwischen Nord- und Südufer lediglich 600 m entspricht, beträgt der jährliche Sedimentaufwuchs ebenfalls < 1 mm/a.

Regressionsanalysen bezüglich eines möglichen Zusammenhangs zwischen der punktuell erfassten Sedimentdeposition und räumlichen Variablen (Überflutungshöhe, Distanz zu Ufer, Deckwerken und Sielen) zeigen, dass besonders zwei Variablen einen nachweisbaren Einfluss auf die Sedimentdeposition haben. Diese sind die Distanz zwischen Sielen und Observationspunkt

sowie die Distanz zwischen Uferlinie und Observationspunkt. In beiden Fällen resultiert die Zunahme der Distanz in einer signifikanten Abnahme der Sedimentdeposition und damit des vertikalen Wachstums ($p < 0.05$). Es bleibt jedoch festzustellen, dass die Beziehung für die Distanz zu den Sieltoren lediglich auf Hooge signifikant ist, während auf Langeneß die Sedimentverteilung über die Distanz zwischen Observationspunkt und der Uferlinie gesteuert wird ($p < 0.05$). Weiter zeigen Observationspunkte, welche in großer Entfernung zur Uferlinie liegen, jedoch direkt zu einem Binnenpriel benachbart sind, keine höheren Aufwuchsraten als Observationspunkte, welche sowohl entfernt zur Uferline als auch den Prielen gelegen sind. Somit kann Langeneß nach D'Alpaos et al. (2007) zu den transportlimitierten Landschaften gezählt werden. Die Entkopplung der Binnenpriele vom Tidengeschehen durch automatisch schließende Sieltore verhindert einen effektiven Sedimenttransport und damit die Verteilung von Überflutungssedimenten im Hinterland. Observationspunkte an denen die höchsten Aufwuchsraten beobachtet werden liegen sowohl auf Hooge als auch auf Langeneß benachbart zu großen Sielanlagen (Abbildung 26). Für diese Beobachtung erscheinen zwei Überlegungen plausibel. (i) Zu Beginn eines Überflutungsereignisses strömt Seewasser über das Deckwerk und sammelt sich zunächst im sielnahen Binnenpriel. Durch turbulente Strömungsbedingungen werden Sediemente der Prielsohle mobilisiert und zum Zeitpunkt des Überlaufens des Gerinnes auf benachbarten Flächen deponiert. (ii) Nach einer Überflutung wird die Hallig primär über die großen Sielanlagen entwässert. Eine Umlagerung von Überflutungssedimenten durch abfließendes Wasser in Richtung der Sielanlagen kann nicht vollständig ausgeschlossen werden.

Aufgrund der kleinen Fläche von lediglich 1.6 km^2 besitzt Nordstrandsichmoor lediglich 12 Observationspunkte und zeigt eine eher chaotische Sedimentverteilung (Abbildung 26). Ein Zusammenhang zwischen Sedimentverteilung und räumlichen Parametern konnte nicht nachgewiesen werden.

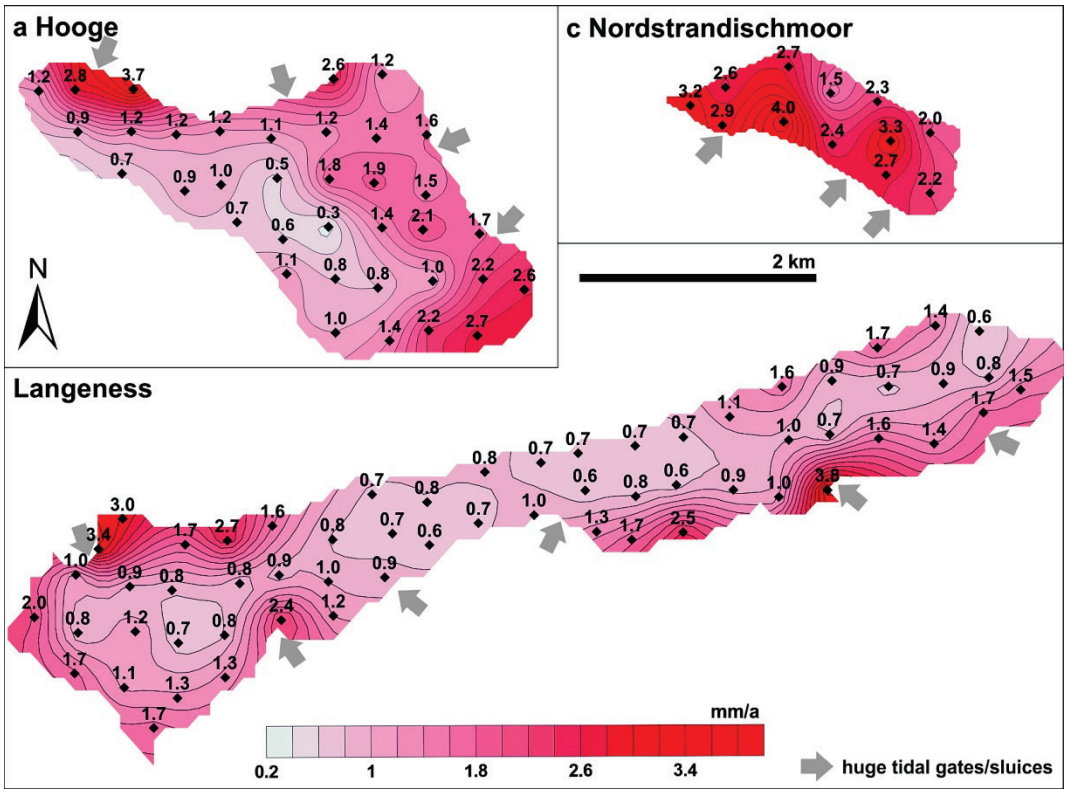


Abbildung 26 Verteilungskarten der Sedimentaufwachsraten für die untersuchten Halligen. Dargestellt sind die Mittelwerte der Sedimentfallenuntersuchungen aus drei Jahren. Isolinien wurden mit linearem Krigging ohne Drift berechnet.

3.4.2 Morphologie

Digitale Geländemodelle der Halligen (Abbildung 27) basieren auf LIDAR Befliegungen des Jahres 2005 und zeigen deutliche Reliefunterschiede auf den Halligen. Mit einer Auflösung von 1 x 1 m und einer Höhengenauigkeit von ± 15 cm können selbst mikroskalige Reliefelemente wie beispielsweise Uferwallstrukturen an Binnenprielen, deren Höhe im unteren Dezimeterbereich liegt, abgebildet werden. Neben den Uferwallstrukturen sind die Bereiche binnenseitig der Deckwerke in einem Bereich von 100 bis 200 m deutlich gegenüber den zentralen Flächen überhöht. Somit wäre die generelle Topographie der Halligmarsch mit denen einer natürlichen Salzmarsch vergleichbar (vgl. Temmerman et al. 2003, D'Alpaos et al. 2007, Bartholdy et al. 2010). Diese Erkenntnis deckt sich mit den Befunden der räumlichen Variabilität der Sedimentdeposition (vgl. Kap. 3.4.1), welche im Fall Langeness höchste Raten stets in Deckwerksnähe aufweisen. Allerdings weisen die Ergebnisse der Transektenversuche darauf hin, dass die heutigen Unterschiede im Sedimentaufwuchs wesentlich kleinskaliger auftreten, als die im Geländemodell auftretenden, erhöhten Strukturen. Dies spricht eher dafür, dass die im Geländemodell zu boabachtenden morphologischen Strukturen älteren Datums sind und heute in dieser Form nicht mehr von der Sedimentation unterstützt werden.

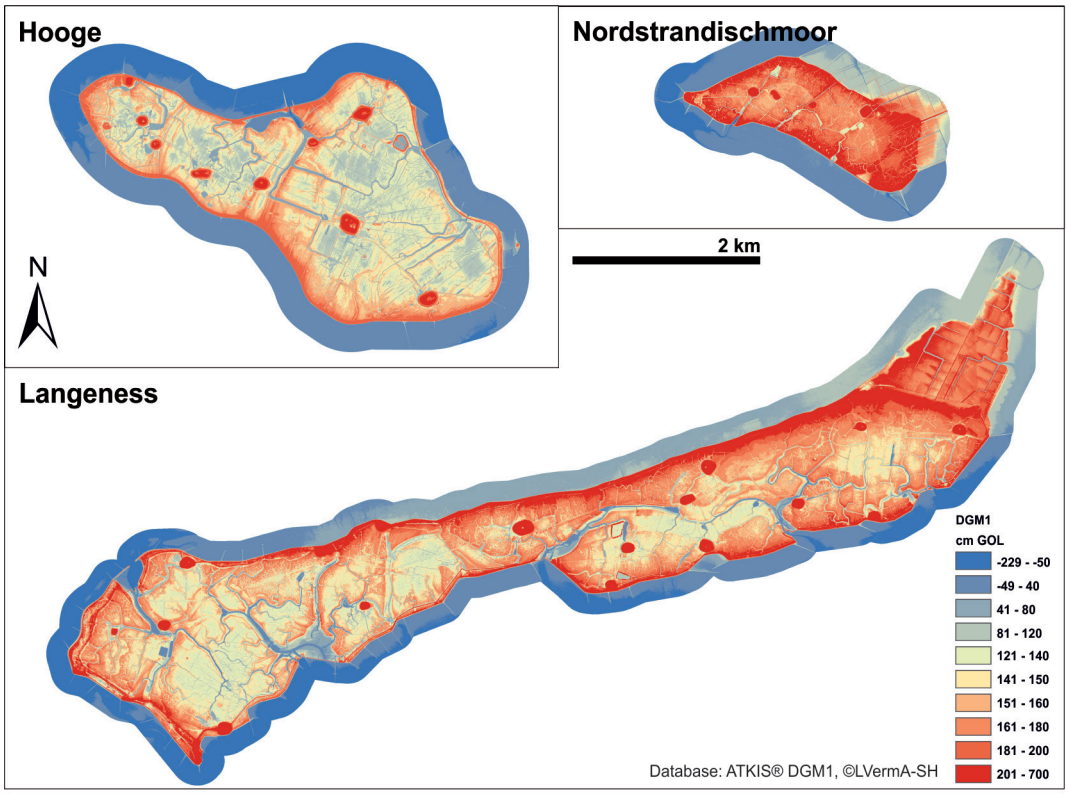


Abbildung 27 Digitales Geländemodell der Halligen Hooge, Langeneß und Nordstrandischmoor basierend auf LIDAR Daten (2005) mit einer Auflösung von 1 x 1 m.

4 Diskussion

Nach der ^{137}Cs und der ^{210}Pb Methode gemessene Sedimentaufwachsraten lieferten vergleichbare Ergebnisse. Die Ergebnisse der Sedimentfallenuntersuchungen ergaben ebenfalls mit den Radionuklidatierungen vergleichbare Ergebnisse. Durch die ausführlichen methodischen Untersuchungen bezüglich der verwendeten Methoden und Materialien besteht eine große Sicherheit hinsichtlich der Belastbarkeit der gemessenen Sedimentaufwachsraten. Verglichen mit anderen Studien in vergleichbaren Marschen liegen die hier gemessenen Werte in einem typischen Bereich. Für Salzmarschen entlang der Schleswig-Holsteinischen Küste berechneten Suchrow et al. (2012) Aufwachsraten von 0.6 mm/a für einen Zeitraum von 19 – 21 Jahren. Bartholdy et al. (2004) bestimmten vergleichbare 2 – 4 mm/a auf der Halbinsel Skallingen sowie Andersen et al. (2011) 1.9 mm/a durch $^{210}Pb/^{137}Cs$ Datierungen. Schuerch et al. (2012) berichten über 1.0 - 2.8 mm/a für die SE Küste von Sylt während des 20. Jhd. bei einem deutlichen Anstieg der Raten während der Zeit um 1980 – 1990. Stock (2011) misst etwas höhere Raten auf der Hamburger Hallig von 6.18 mm/a mit Sedimentation Erosion Tables (SET) und Sedimentation Erosion Bars (SEB). Hierbei könnten Lahnungsfelder östlich der Hallig als Liefergebiet für die erhöhten Sedimentaufwachsraten dienen.

Der deutliche Anstieg der Raten im Zeitraum 1980 – 1990 korreliert offenbar mit der Anzahl der Sturmfluten (> 1.54 m über MThw) im selben Zeitraum. Lineare Regressionsanalysen an radionukliddatierten Aufwachsraten an 12 Rammkernen ergaben in 4 Fällen einen statistisch signifikanten Zusammenhang (2 auf Hooge, 2 auf Langeness, $p < 0.1$). Auf Nordstrandischmoor konnte ein solcher Zusammenhang stastistisch nicht nachgewiesen werden. Dies kann in der Tatsche begründet sein, dass der Abstand zwischen dem nichtpermeablen Deckwerk und dem MThw auf Nordstrandischmoor nur 70 cm beträgt und die Hallig deshalb von einer ganzen Reihe niedrigerer Überflutungen mit Sedimenten versorgt wird. Einen Zusammenhang zwischen Sturmflutaktivität und Salzmarschentwicklung konnte auch in früheren Arbeiten bestätigt werden (Stumpf 1983, Andersen & Pejrup 2001, Schuerch et al. 2013). Einen nicht unerheblichen Einfluss könnte ich diesem Zusammenhang die Konstruktion und Permeabilität von Halligdeckwerken haben wozu es bisher noch keine Untersuchungen gibt.

Ein weiterer Aspekt ist das Verhältnis von Küstenlänge zu Halligfläche (LA), welches durch Verteilungsphänomene die Sedimentdeposition beeinflussen könnte

Tabelle 9. Auf Hooge und Langeness ist das Verhältnis mit 2.04 km/km² (Hooge) und 2.27 km/km² (Langeness) sehr ähnlich. Die jährliche Transportrate von Sedimenten über die Küstenlinie auf die Halligfläche ist ebenfalls vergleichbar. Auf Nordstrandischmoor ist LA ca. um denFaktor 2 höher als auf Hooge, während die Transportrate um den Faktor 1.3 höher liegt. Der höhere Wert für LA könnte die gleichmäßigere Verteilung der Sedimente auf Nordstransdischmoor erklären. Da die Transportrate aber ebenfalls höher liegt als auf Hooge und Langeness, kann so ausgeschlossen werden, dass Nordstrandischmoor nur wegen seiner geringeren Fläche einen höheren Sedimentaufwuchs erfährt als die flächenmäßig größeren Halligen. Die Gründe für die höheren Aufwachsraten sind folglich in den Unterschieden der Deckwerkskonstruktionen und/oder in Variabilitäten der Feststoffkonzentrationen im Überflutungswasser zu suchen. Hier besteht weiterer Forschungsbedarf.

Tabelle 9 Vergleich der Küstenlängen, Halligflächen und Sedimenttransportraten.

	shoreline length (L)	**Area (A)**	**LA-ratio**	**transport rate**
	(km)	**(km^2)**	**($km \cdot km^{-2}$)**	**($t \cdot km^{-1} \cdot a^{-1}$)**
Hooge	11.1	5.46	2.04	364
Langeness	21.2	9.24	2.27	293
N. Moor	6.8	1.63	4.17	479

Die Ergebnisse zur räumlichen Verteilung der Sedimente sowie die morphologische Beschaffenheit der Halligoberfläche legen den Schluss nahe, dass die heute bestehenden (vermutlich seit Beginn der Uferbefestigung/Deichbau, 1915) Sedimentverteilungsmuster nicht durchgängig geeignet sind, die prominenten morphologischen Erhebungen der Halligmarsch zu erklären. Insbesondere Uferwallstrukturen entlang der Binnenpriele der Hallig scheinen heute nicht mehr entsprechend durch bei Landunter aus den Prielen austretende Sedimente beliefert zu werden. Da sowohl bei normaler Tide als auch bei Landunter die Sieltore ein Einströmen suspensionsreichen Wassers verhindern, besteht hier möglicherweise ein Potential, welches genutzt werden kann, um mehr Sedimente auf die Halligfläche zu transportieren. Die während des Osterwehlexperimentes gemessenen Trübekonzentrationen bestätigen dies grundsätzlich. Der Beweis, dass bei geöffnetem Sieltor während eines Landunters tatsächlich mehr Sedimente abgelagert werden steht allerdings derzeit noch aus, weil für einen entsprechenden Versuch die notwendigen Wetter- und logistischen Rahmenbedingungen im Winter 2012/13 nicht gegeben waren.

Alle im Rahmen des Projektes erhobenen Daten zur Sedimentdeposition zeigen das die Halligen derzeit im Ungleichgewicht zum aktuellen Meeresspiegelanstieg stehen. Hydrologische Rahmenbedingungen und die Sedimentverteilungsmuster sind durch menschliche Eingriffe

beeinflusst. Der Bau von Deichen, Deckwerken und Sieltoren vor rund 100 Jahren hat einerseits zu einer besseren Nutzbarkeit des Marschlandes und einer veringerten Überflutungshäufigkeit geführt (Mai 1998). Andererseits gibt es klare Belege dafür, dass die Küstenschutzmaßnahmen die natürliche Balance zwischen Meeresspiegelschwankungen und Höhenentwicklung der Marschoberflächen stören. Grundsätzlich müssen die Rahmenbedingungen im nordfriesischen Wattenmeer als günstig angesehen warden. Ein Gezeitenhub von bis zu 3 m und eine hohe Konzentration von Trübstoffen im Meerwasser sollten ein hohes Anpassungspotential der Marschflächen gegenüber steigenden Wasserständen bedingen (Kirwan & Guntenspergen 2010). Dennoch zeigt die vorliegende Studie erhebliche Differenzen zwischen Höhenentwicklung der Marschoberfläche und Anstieg der verschiedenen Wasserstandsperzentilen (Abbildung 28).

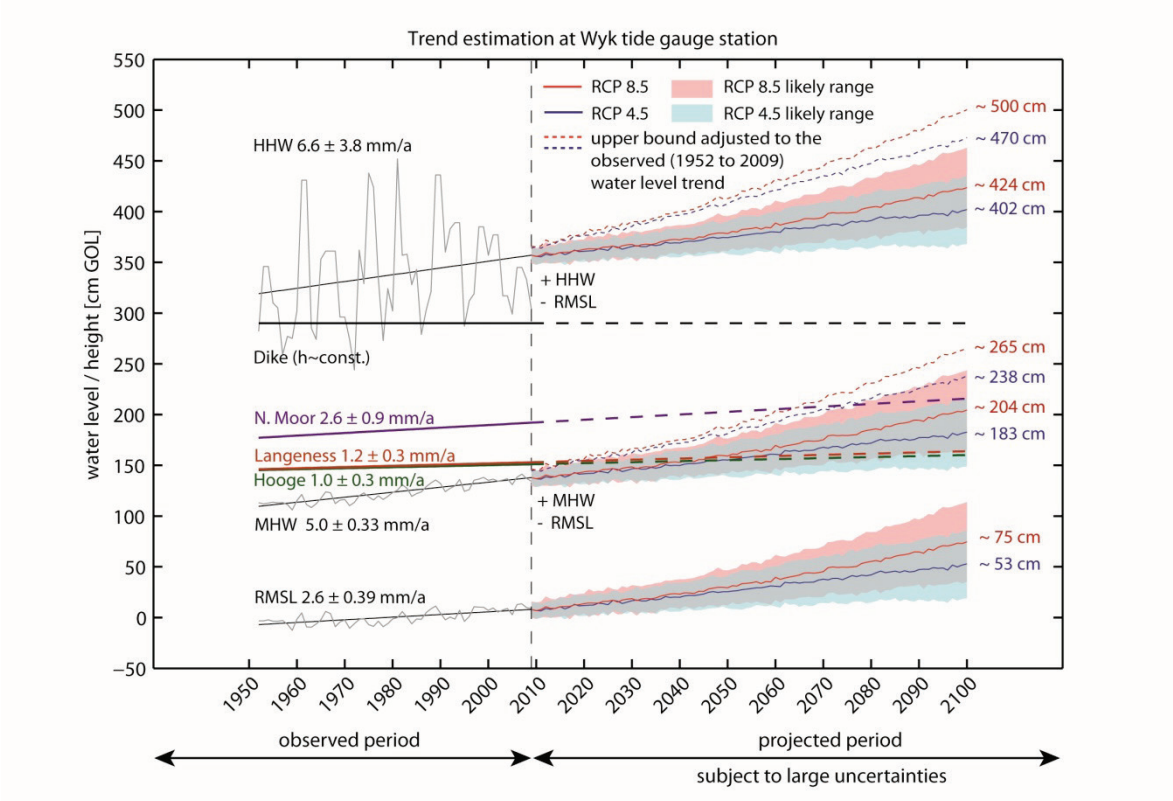


Abbildung 28 Gemessene (1952 – 2009) und projezierte (2009 – 2100) Wasserstände basierend auf den “Representative Concentration Pathway” (RCP) Szenarios 4.5 und 8.5 des IPCC “Fifth assessment Report” (AP5, 2013) im Vergleich mit den Sedimentaufwachsraten von Hooge, Langeness und Nordstrandischmoor. Da keine belastbaren Abschätzungen für die Wasserstandsentwicklung in der Deutschen Bucht verfügbar sind, wurden die RMSL Projektionen zu den heutigen MThw und HThw Niveaus addiert (rote und blaue Linien mit Unsicherheitsbereich 5 bis 95 %). Zusätzlich wurde die beobachtete Differenz zwischen den Wasserständen RMSL und MThw / HThw (1952 – 2009) zu der RMSL-Projektion addiert (gestrichelte Linien) (Abbildung wurde von Arne Arns, Universität Siegen angefertigt und zur Verfügung gestellt).

Die Abbildung verdeutlicht die für die Vergangenheit am Pegel Wyk auf Föhr beobachteten Änderungen in RMSL, MThw und HThw im Zeitraum 1952 – 2009 (i.e. drei Nodaltidezyklen) Der MThw Trend (5.0 ± 0.33 mm/a) zeigt etwa die doppelte Anstiegsrate wie der RMSL Trend (2.6 ± 0.39 mm/a). Der HThw Trend (6.6 ± 3.8 mm/a) ist sogar noch größer, wenn auch mit einem deutlich höheren Unsicherheitsfakor behaftet. Grundsätzlich zeigen höhere Wasserstandsperzentile einen größeren Unsicherheitsbereich als geringere (vergl. Mudersbach 2013). Zum Vergleich sind die konstante angenommene Höhe des Hooger Sommerdeichs sowie die mittleren Sedimentaufwachsraten der Halligen seit 1915 dargestellt Hallig Hooge (1.0 ± 0.3 mm/a), Hallig Langeness (1.2 ± 0.3 mm/a) und Hallig Nordstrandischmoor (2.6 ± 0.9 mm/a). Abbildung 28 verdeutlicht, dass die beobachtete Änderung der Marschhöhe weder die Trend in den höheren Wasserständen noch in den mittleren kompensieren kann.

Ebenfalls in Abbildung 28 dargestellt sind die modellierten zukünftigen Wasserstandsentwicklungen für den RMSL basierend auf zwei unterschiedlichen Szenarien des fünften IPCC Berichtes (Slangen et al. 2014). Die RMSL Projektion zeigt einen beschleunigten Anstieg, der heute beobachtet Anstiegsraten übersteigt. Diese Projektionen sind nur gültig für den RMSL. Für die deutsche Bucht muss davon ausgegangen werden, das höhere Wasserstandsperzentile wie MThw und HThw sich abgekoppelt von dem globalen RMSL Trend entwickeln (Arns, Mudersbach 2013) und derzeit gibt es keine belastbaren Prokejtionen für diese Wasserstandsgrößen. Deshalb wurden in dieser Studie die MSL Projektionen des AR5 linear auf die heutigen MThw und HThw Höhen übertragen (vergl. blaue und rote Linie mit 5-95% Unsicherheitsbereich in Abbildung 28). Um nichtlineare Effekte in den Wasserstandsentwicklungen zu berücksichtigen wurden die in der Vergangenheit beobachteten Diffferenzen zwischen MSL und MThw/HThw zu der oberen Grenze des Unsicherheitsbereiches addiert (gestrichelte Linien). Dieses ergibt eine Abschätzung über die möglichen Wasserstandsentwicklungen bis 2100 unter Berücksichtigung von nichtlinearen Effekten. Eine Fortschreibung der beobachteten Marschlandentwicklung (was einer einfachen Annahme, die mölicherweise für die Zukunft nicht zu halten ist entspricht) verdeutlicht das zunehmende Ungleichgewicht zwischen Wasserstands- und Marschentwicklung. Die Konsequenz aus diesem möglichen Szenario wären höhere Wasserstände auf den Marschflächen während eines Landunters mit entsprechend höheren hydrodynamischen Belastungen auf Marschoberfläche wie auch auf die Warften. Weiterhin wäre mit einer zunehmenden Wellenhöhe zu rechnen, die die Belastungen weiter erhöht.

Um die Halligen gegen steigende Wasserstände zu sichern erscheint daher eine Doppelstrategie sinnvoll.

- *Kurzfristig sollten Warften durch geeignete technische Maßnahmen verstärkt und gesichert werden, um Einwohner und bewegliches wie unbewegliches Gut zu schützen.*
- *Mittelfristig muss dafür gesorgt werden, dass die Balance zwischen Marschentwicklung und Wasserständen wiederhergestellt oder verbessert wird. Dazu sind Veränderungen an den bestehenden Einrichtungen des Küstenschutzes an den Halligkanten zu prüfen.*

5 Schlußfolgerungen

Die Haupziele der vorliegenden Studie waren die Beantwortung der eingangs gestellten Fragen:

- *Wie hoch ist das mittlere vertikale Marschwachstum durch Sedimentablagerung (Sedimentaufwuchs)?*
- *Welche Parameter steuern das Sedimentationsgeschehen auf den Halligen und Inseln?*
- *Wie ist die räumliche Verteilung der Sedimentablagerungen?*
- *Was tragen regionale Setzungsprozesse und Krustenbewegungen zu vertikalen Landbewegung bei*

Basierend auf den Ergebnissen der Studie lassen sich folgende Schlußforderungen ziehen:

1. *Der Sedimentaufwuchs auf den Halligen reicht derzeit nicht aus, die aktuelle Wasserstandsentwicklung von MThw zu kompensieren, das bedeutet der Abstand zwischen MThw und Halligoberfläche wird zukünftig weiterhin zunehmen, wenn keine geeigneten Maßnahmen gefunden werden, um das System Hallig wieder ins Gleichgewicht mit der Meeresspiegeländerung zu bringen. Daraus ergeben sich Risiken für Warften und Bewohner auf Grund der zu erwartenden höheren hydrodynamischen Belastungen*
2. *Die Sedimentdeposition der einzelnen Halligen ist unterschiedlich und wird auf den Halligen Hooge und Langeness maßgeblich von der auftretenden Anzahl von Sturmfluten gesteuert, die das Niveau des Hooger Sommerdeiches übersteigen. Nordstrandischmoor dagegen profitiert auch von geringeren Überflutungshöhen.*
3. *Die Sedimente lagern sich derzeit auf der Hallig Langeness bevorzugt in ufernahen Bereichen ab, auf Hooge scheint eine Beziehung zu den Sieltorauslässen zu bestehen, während die Verteilung der Sedimente auf Nordstrandischmoor weitgehend gleichmäßig über die gesamte Fläche geschieht. Ehemalige Sedimentakkumulationsgebiete entlang der Ufer von Binnenprielen sind heute nicht mehr aktiv, dies resultiert wahrscheinlich aus um 1915 erfolgten Küstenschutzmaßnahmen (Deich- und Deckwerksbau, Entwässerung über Sieltore).*

4. *Die durch Isostasie verursachten Subzidenzraten lassen sich für die vergangenen 8000 Jahre im Untersuchungsgebiet auf 0 – 0.9 mm/a bzw. für die vergangenen 5000 Jahre auf nur noch 0.4 mm/a. Da diese Raten zudem abnehmen, ist der Effekt für das Untersuchungsgebiet vermutlich zu vernachlässigen. Setzungen, die durch Torfablagerungen im Untergrund bedingt werden, lassen sich nicht quantifizieren, sollten nach den vorliegenden Daten aber höchstens auf Nordstrandischmoor einen geringen flächenhaften Effekt haben.*

Literatur

Andersen, T.J., Pejrup, M.: Suspended sediment transport on a temperate, microtidal mudflat, the Danish Wadden Sea. Marine Geology **173**(1-4), 69–85 (2001)

Andersen, T.J., Svinth, S., Pejrup, M.: Temporal variation of accumulation rates on a natural salt marsh in the 20th century — The impact of sea level rise and increased inundation frequency. Marine Geology **279**(1–4), 178–187 (2011). doi: 10.1016/j.margeo.2010.10.025

Appleby, P., Oldfield, F.: The assessment of 210Pb data from sites with varying sediment accumulation rates. Hydrobiologia **103**(1), 29–35 (1983). doi: 10.1007/BF00028424

Appleby, P.G.: Chronostratigraphic Techniques in Recent Sediments. In: Last, W., Smol, J. (Hrsg.) Tracking Environmental Change Using Lake Sediments. Developments in Paleoenvironmental Research, S. 171-203. Springer Netherlands (2001)

Appleby, P.G., Oldfield, F.: The calculation of lead-210 dates assuming a constant rate of supply of unsupported 210Pb to the sediment. CATENA **5**(1), 1–8 (1978). doi: 10.1016/S0341-8162(78)80002-2

Arns, A.W.T.D.S.J.J.: The impact of sea level rise on extreme water levels in the northern part of the German Bight: (submitted). Coastal Engineering

Asselman, N.E.M., Middelkoop, H.: Floodplain sedimentation: Quantities, patterns and processes. Earth Surf. Process. Landforms **20**(6), 481–499 (1995). doi: 10.1002/esp.3290200602

Bartholdy, A.T., Bartholdy, J., Kroon, A.: Salt marsh stability and patterns of sedimentation across a backbarrier platform. Marine Geology **278**(1–4), 31–42 (2010). doi: 10.1016/j.margeo.2010.09.001

Bartholdy, J., Christiansen, C., Kunzendorf, H.: Long term variations in backbarrier salt marsh deposition on the Skallingen peninsula - the Danish Wadden Sea. Marine Geology **203**(1-2), 1–21 (2004)

Callaway, J.C., Delaune, R.D., Patrick, W.H.: Chernobyl 137Cs used to determine sediment accretion rates at selected northern European coastal wetlands. Limnology and Oceanography **41**(3), 444-450 (1996). doi: 10.4319/lo.1996.41.3.0444

Craft, C.B., Seneca, E.D., Broome, S.W.: Vertical Accretion in Microtidal Regularly and Irregularly Flooded Estuarine Marshes. Estuarine, Coastal and Shelf Science **37**(4), 371–386 (1993). doi: 10.1006/ecss.1993.1062

D'Alpaos, A., Lanzoni, S., Marani, M., Rinaldo, A.: Landscape evolution in tidal embayments: Modeling the interplay of erosion, sedimentation, and vegetation dynamics. Journal of Geophysical Research F: Earth Surface **112**(1) (2007)

Dibbern, S., Müller-Navarra, S.H.: Wasserstände bei Sturmfluten entlang der nordfriesischen Küste. Die Küste **76** (2009)

Goodbred, S.L., Kuehl, S.A.: Floodplain processes in the Bengal Basin and the storage of Ganges-Brahmaputra river sediment: an accretion study using 137Cs and 210Pb geochronology. Sedimentary Geology **121**(3-4), 239–258 (1998)

Houston, J.R., Dean, R.G.: Accounting for the Nodal Tide to Improve Estimates of Sea Level Acceleration: Journal of Coastal Research. Journal of Coastal Research, 801–807 (2011). doi: 10.2112/JCOASTRES-D-11-00045.1

Kirchner, G., Ehlers, H.: Sediment Geochronology in Changing Coastal Environments: Potentials and Limitations of the 137Cs and 210Pb Methods. Journal of Coastal Research **14**(2), 483-492 (1998)

Kirwan, M.L., Guntenspergen, G.R.: Influence of tidal range on the stability of coastal marshland. J. Geophys. Res **115**(F2), F02009 (2010). doi: 10.1029/2009JF001400

Long, A.J., Waller, M.P., Stupples, P.: Driving mechanisms of coastal change: Peat compaction and the destruction of late Holocene coastal wetlands. Marine Geology **225**(1-4), 63–84 (2006)

Mai, S.D.K.-F.Z.C.: Wellentransmission an Sommerdeichen. Wasser & Boden **11** (1998)

Mörner, N.-A.: The northwest European "sea-level laboratory" and regional holocene eustasy. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology **29**, 281–300 (1980)

Mudersbach, C.W.T.H.I.J.J.: Trends in extreme high sea levels along the German north sea coastline compared to regional mean sea level changes: (in press). Continental Shelf Research (2013)

Müller, F., Fischer, O.: Das Wasserwesen an der schleswig-holsteinischen Nordseeküste: Teil 1, Die Halligen (1917)

Schuerch, M., Rapaglia, J., Liebetrau, V., Vafeidis, A., Reise, K.: Salt Marsh Accretion and Storm Tide Variation: an Example from a Barrier Island in the North Sea. Estuaries and Coasts **35**(2), 486–500 (2012). doi: 10.1007/s12237-011-9461-z

Schuerch, M., Vafeidis, A., Slawig, T., Temmerman, S.: Modeling the influence of changing storm patterns on the ability of a salt marsh to keep pace with sea level rise. J. Geophys. Res. Earth Surf. **118**(1), 84–96 (2013). doi: 10.1029/2012JF002471

Slangen, A.B.A., Carson, M., Katsman, C.A., van de Wal, R.S.W., Köhl, A., Vermeersen, L.L.A., Stammer, D.: Projecting twenty-first century regional sea-level changes. Climatic Change, 1-16 (2014). doi: 10.1007/s10584-014-1080-9

Stock, M.: Patterns in surface elevation change across a temperate salt marsh platform in relation to sea level rise. Coastline Reports **17**, 33–48 (2011)

Stumpf, R.P.: The process of sedimentation on the surface of a salt marsh. Estuarine, Coastal and Shelf Science **17**(5), 495–508 (1983)

Suchrow, S., Pohlmann, N., Stock, M., Jensen, K.: Long-term surface elevation changes in German North Sea salt marshes. Estuarine, Coastal and Shelf Science **98**(0), 71–83 (2012). doi: 10.1016/j.ecss.2011.11.031

Temmerman, S., Govers, G., Wartel, S., Meire, P.: Spatial and temporal factors controlling short-term sedimentation in a salt and freshwater tidal marsh, Scheldt estuary, Belgium, SW Netherlands. Earth Surf. Process. Landforms **28**(7), 739–755 (2003). doi: 10.1002/esp.495

Vink, A., Steffen, H., Reinhardt, L., Kaufmann, G.: Holocene relative sea-level change, isostatic subsidence and the radial viscosity structure of the mantle of northwest Europe (Belgium, the Netherlands, Germany, southern North Sea). Quaternary Science Reviews **26**(25-28), 3249–3275 (2007)

Woodworth, P.L.: A Note on the Nodal Tide in Sea Level Records: Journal of Coastal Research. Journal of Coastal Research, 316–323 (2011). doi: 10.2112/JCOASTRES-D-11A-00023.1

A Anhang

Sedimentfallen 2010 – 2013

Abkürzungsverzeichnis

Ms	Masse der Feststoffe
Org	Organik
Mc	Masse der klastischen Feststoffe
Acc	Vertikales Marschwachstum
EZ	Einzelfallenstandort
FF	Fallenfeld
TR	Fallentransekt

Hallig	**Jahr**
Langeneß	2010/2011

Probe	**Verteilung**	**Typ A (Flasche)**					**Typ B (Matte)**			
		Ms [g]	**Org [%]**	**Mc [g]**	**Mc [t/ha]**	**Acc [mm/a]**	**Ms [g]**	**Mc [g]**	**Mc [t/ha]**	**Acc [mm/a]**
Lan-11-F-01	EZ	2.53	9.14	2.30	3.25	0.59	12.03	10.93	1.82	0.33
Lan-10-F-02	EZ	2.25	14.50	1.92	2.71	0.49	9.11	7.79	1.30	0.24
Lan-10-F-03	EZ									
Lan-10-F-04	EZ						9.99	9.30	1.55	0.28
Lan-10-F-05	EZ	1.52	10.02	1.37	1.93	0.35	8.72	7.84	1.31	0.24
Lan-10-F-06	EZ	1.43	10.52	1.28	1.81	0.33	9.96	8.91	1.49	0.27
Lan-10-F-07	EZ	2.10	8.39	1.92	2.71	0.49	12.88	11.80	1.97	0.36
Lan-10-F-08	EZ	3.15	6.57	2.94	4.15	0.76	17.24	16.11	2.68	0.49
Lan-10-F-09	EZ	5.42	8.03	4.98	7.03	1.28	39.89	36.68	6.11	1.11
Lan-10-F-10	EZ	1.10	5.83	1.04	1.46	0.27	12.51	11.78	1.96	0.36
Lan-10-F-11	EZ	1.45	11.55	1.28	1.81	0.33	10.18	9.01	1.50	0.27
Lan-10-F-12	EZ	1.33	11.21	1.18	1.67	0.30	5.38	4.77	0.80	0.14
Lan-10-F-13	EZ	1.62	7.45	1.50	2.11	0.38	7.11	6.58	1.10	0.20
lan-10-F-14	EZ						24.50	22.79	3.80	0.69
Lan-10-F-15	EZ	2.05	10.17	1.84	2.60	0.47	18.76	16.85	2.81	0.51
Lan-10-F-16	EZ	3.77	7.02	3.50	4.94	0.90	82.20	76.42	12.74	2.32
Lan-10-F-17	EZ	4.42	5.44	4.18	5.89	1.07	42.12	39.82	6.64	1.21
Lan-10-F-18	EZ	6.35	5.23	6.02	8.49	1.55	40.28	38.18	6.36	1.16

Lan-10-F-19	EZ	1.93	5.60	1.83	2.58	0.47	14.84	14.01	2.34	0.43
Lan-10-F-20	EZ	1.80	8.65	1.64	2.32	0.42	9.00	8.22	1.37	0.25
Lan-10-F-21	EZ	1.58	10.69	1.41	2.00	0.36	10.63	9.49	1.58	0.29
Lan-10-F-22	EZ						15.23	14.17	2.36	0.43
Lan-10-F-23	EZ	1.75	10.74	1.56	2.20	0.40	16.63	14.84	2.47	0.45
Lan-10-F-24	EZ	1.57	8.69	1.43	2.02	0.37	12.53	11.44	1.91	0.35
Lan-10-F-25	EZ	1.47	4.71	1.40	1.97	0.36	13.48	12.85	2.14	0.39
Lan-10-F-26	EZ	3.02	9.52	2.73	3.85	0.70	15.44	13.97	2.33	0.42
Lan-10-F-27	EZ	3.57	8.26	3.27	4.62	0.84	34.23	31.40	5.23	0.95
Lan-10-F-28	EZ	13.94	6.07	13.09	18.47	3.36	139.76	131.28	21.88	3.99
Lan-10-F-29	EZ	6.89	3.74	6.63	9.35	1.70	39.06	37.60	6.27	1.14
Lan-10-F-30	EZ	7.47	3.33	7.22	10.19	1.86	66.19	63.99	10.66	1.94
Lan-10-F-31	EZ	2.15	5.94	2.02	2.85	0.52	11.94	11.23	1.87	0.34
Lan-10-F-32	EZ									
Lan-10-F-33	EZ	4.53	6.06	4.26	6.01	1.09	25.26	23.73	3.96	0.72
Lan-10-F-34	EZ	1.40	7.22	1.30	1.83	0.33	9.21	8.54	1.42	0.26
Lan-10-F-35	EZ	1.47	6.95	1.37	1.93	0.35	16.55	15.40	2.57	0.47
Lan-10-F-36	EZ	1.57	8.69	1.43	2.02	0.37	11.01	10.06	1.68	0.31
Lan-10-F-37	EZ	2.25	6.46	2.11	2.97	0.54	18.56	17.36	2.89	0.53
Lan-10-F-38	EZ	3.22	4.93	3.06	4.32	0.79	20.84	19.81	3.30	0.60
Lan-10-F-39	EZ	3.82	4.79	3.63	5.13	0.93	41.19	39.22	6.54	1.19
Lan-10-F-40	EZ	4.93	3.01	4.79	6.75	1.23	56.85	55.14	9.19	1.67
Lan-10-F-41	EZ	6.05	3.52	5.84	8.24	1.50	91.39	88.17	14.70	2.68
Lan-10-F-42	EZ	2.13	7.51	1.97	2.78	0.51	11.70	10.82	1.80	0.33
Lan-10-F-43	EZ	1.87	9.27	1.69	2.39	0.44	16.80	15.25	2.54	0.46
Lan-10-F-44	EZ	1.40	10.74	1.25	1.76	0.32	8.85	7.90	1.32	0.24
Lan-10-F-45	EZ	1.53	1.35	1.51	2.13	0.39	9.33	9.21	1.53	0.28
Lan-10-F-46	EZ	1.60	1.35	1.58	2.23	0.41	9.42	9.29	1.55	0.28
Lan-10-F-47	EZ	1.58	4.46	1.51	2.13	0.39	18.61	17.78	2.96	0.54
Lan-10-F-48	EZ	2.17	5.90	2.04	2.88	0.52	17.54	16.51	2.75	0.50
Lan-10-F-49	EZ						34.60	32.19	5.36	0.98
Lan-10-F-50	EZ	1.68	5.25	1.60	2.25	0.41	15.14	14.35	2.39	0.44
Lan-10-F-51	EZ	4.70	4.15	4.51	6.36	1.16	55.51	53.21	8.87	1.62
Lan-10-F-52	EZ	1.60	5.46	1.51	2.13	0.39	9.68	9.15	1.53	0.28
Lan-10-F-53	EZ	1.95	10.62	1.74	2.46	0.45	9.77	8.73	1.46	0.27
Lan-10-F-54	EZ						18.91	17.59	2.93	0.53
Lan-10-F-55	EZ	2.07	6.12	1.94	2.74	0.50	65.91	61.87	10.31	1.88
Lan-10-F-56	EZ	5.40	3.48	5.21	7.36	1.34	27.81	26.84	4.47	0.81
Lan-10-F-57	EZ	3.15	3.96	3.03	4.27	0.78	23.30	22.38	3.73	0.68
Lan-10-F-58	EZ	3.45	9.93	3.11	4.39	0.80	17.23	15.52	2.59	0.47
Lan-10-F-59	EZ	3.85	6.90	3.59	5.06	0.92	23.35	21.74	3.62	0.66
Lan-10-F-60	EZ	5.15	4.86	4.90	6.91	1.26	61.58	58.59	9.76	1.78
Lan-10-F-61	EZ									
Lan-10-F-62	FF	2.60	5.14	2.47	3.48	0.63	13.91	13.19	2.20	0.40
Lan-10-F-63	FF	2.57	5.19	2.43	3.43	0.63	17.48	16.58	2.76	0.50
Lan-10-F-64	FF	2.38	4.11	2.29	3.23	0.59	14.45	13.86	2.31	0.42
Lan-10-F-65	FF	2.28	6.39	2.14	3.02	0.55	15.10	14.14	2.36	0.43
Lan-10-F-66	FF	2.30	4.92	2.19	3.09	0.56	16.46	15.65	2.61	0.47
Lan-10-F-67	FF	3.52	6.49	3.29	4.64	0.85	43.64	40.80	6.80	1.24
Lan-10-F-68	FF	2.88	5.34	2.73	3.85	0.70	52.77	49.95	8.33	1.52
Lan-10-F-69	FF	2.62	4.49	2.50	3.53	0.64	47.79	45.64	7.61	1.39
Lan-10-F-70	FF	2.92	7.55	2.70	3.81	0.69	47.84	44.23	7.37	1.34
Lan-10-F-71	FF	2.90	8.72	2.65	3.74	0.68	63.34	57.82	9.64	1.76

Hallig	**Jahr**
Hooge	2010/2011

Probe	Verteilung	Typ A (Flasche)					Typ B (Matte)			
		Ms [g]	Org [%]	Mc [g]	Mc [t/ha]	Acc [mm/a]	Ms [g]	Mc [g]	Mc [t/ha]	Acc [mm/a]
Hog-11-F-01	EZ	2.32	40.38	1.38	1.95	0.39	38.44	22.92	3.82	0.76
Hog-10-F-02	EZ	10.82	3.78	10.41	14.69	2.94	27.60	26.55	4.43	0.89
Hog-10-F-03	EZ	9.02	7.00	8.39	11.83	2.37	77.82	72.38	12.06	2.41
Hog-10-F-04	EZ	4.58	4.22	4.39	6.20	1.24	28.93	27.71	4.62	0.92
Hog-10-F-05	EZ	4.17	5.69	3.93	5.55	1.11	15.61	14.72	2.45	0.49
Hog-10-F-06	EZ	2.22	1.35	2.19	3.09	0.62	19.30	19.04	3.17	0.63
Hog-10-F-07	EZ	3.18	2.38	3.11	4.39	0.88	8.07	7.88	1.31	0.26
Hog-10-F-08	EZ	2.95	2.46	2.88	4.06	0.81	11.08	10.81	1.80	0.36
Hog-10-F-09	EZ	4.53	1.35	4.47	6.31	1.26	12.11	11.94	1.99	0.40
Hog-10-F-10	EZ	4.12	9.34	3.73	5.27	1.05	13.93	12.63	2.10	0.42
Hog-10-F-11	EZ									
Hog-10-F-12	EZ	5.60	9.86	5.05	7.12	1.42	11.54	10.41	1.73	0.35
Hog-10-F-13	EZ	8.04	8.51	7.35	10.37	2.07	73.10	66.88	11.15	2.23
Hog-10-F-14	EZ	3.32	2.83	3.22	4.55	0.91	11.48	11.15	1.86	0.37
Hog-10-F-15	EZ						14.34	13.19	2.20	0.42
Hog-10-F-16	EZ	2.10	7.61	1.94	2.74	0.55	8.84	8.16	1.36	0.27
Hog-10-F-17	EZ	1.48	9.11	1.35	1.90	0.38	6.53	5.93	0.99	0.20
Hog-10-F-18	EZ	5.27	9.78	4.75	6.71	1.34	54.42	49.10	8.18	1.64
Hog-10-F-19	EZ	3.07	4.56	2.93	4.13	0.83	16.26	15.52	2.59	0.52
Hog-10-F-20	EZ	3.33	9.73	3.01	4.25	0.85	12.26	11.06	1.84	0.37
Hog-10-F-21	EZ	1.55	41.66	0.90	1.28	0.26	21.24	12.39	2.07	0.41
Hog-10-F-22	EZ	1.25	13.19	1.09	1.53	0.31	12.27	10.65	1.77	0.35
Hog-10-F-23	EZ	1.33	12.45	1.17	1.65	0.33	8.63	7.56	1.26	0.25
Hog-10-F-24	EZ	4.18	9.99	3.77	5.31	1.06	19.91	17.92	2.99	0.60
Hog-10-F-25	EZ	5.23	6.69	4.88	6.89	1.38	22.39	20.90	3.48	0.70
Hog-10-F-26	EZ	4.92	4.02	4.72	6.66	1.33	19.45	18.67	3.11	0.62
Hog-10-F-27	EZ	2.27	4.97	2.15	3.04	0.61	27.88	26.49	4.42	0.88
Hog-10-F-28	EZ	1.62	6.43	1.51	2.13	0.43	11.24	10.52	1.75	0.35
Hog-10-F-29	EZ	1.20	4.09	1.15	1.62	0.32	10.77	10.33	1.72	0.34
Hog-10-F-30	EZ	1.78	6.88	1.66	2.34	0.47	11.02	10.26	1.71	0.34
Hog-10-F-31	EZ	4.12	2.55	4.01	5.66	1.13	39.59	38.58	6.43	1.29
Hog-10-F-32	EZ	8.45	6.99	7.86	11.09	2.22	54.44	50.63	8.44	1.69
Hog-10-F-33	EZ	2.08	1.35	2.06	2.90	0.58	28.21	27.83	4.64	0.93
Hog-10-F-34	EZ	3.47	7.51	3.21	4.52	0.91	29.42	27.21	4.53	0.91
Hog-10-F-35	EZ	5.62	1.35	5.54	7.82	1.56	83.60	82.47	13.75	2.75
Hog-10-F-36	EZ	8.85	3.39	8.55	12.07	2.41	101.00	97.58	16.26	3.25
Hog-10-F-37	FF	4.80	24.98	3.60	5.08	1.02				
Hog-10-F-38	FF	4.38	11.48	3.88	5.48	1.10				
Hog-10-F-39	FF	4.97	8.96	4.52	6.38	1.28				
Hog-10-F-40	FF	5.70	10.00	5.13	7.24	1.45				
Hog-10-F-41	FF	5.10	9.41	4.62	6.52	1.30				
Hog-10-F-42	FF	5.32	3.82	5.11	7.22	1.44				
Hog-10-F-43	FF	12.20	4.45	11.66	16.45	3.29				
Hog-10-F-44	FF	10.47	6.37	9.80	13.83	2.77				
Hog-10-F-45	FF	9.89	4.34	9.46	13.34	2.67				
Hog-10-F-46	FF	11.49	4.93	10.92	15.41	3.08				

Hallig	Jahr
N.Moor	2010/2011

Probe	Verteilung	Typ A (Flasche)					Typ B (Matte)			
		Ms [g]	Org [%]	Mc [g]	Mc [t/ha]	Acc [mm/a]	Ms [g]	Mc [g]	Mc [t/ha]	Acc [mm/a]
Nor-11-F-01	EZ	21.72	3.50	20.96	29.57	3.56				
Nor-10-F-02	EZ	8.59	5.12	8.15	11.50	1.39				
Nor-10-F-03	EZ	7.91	6.32	7.41	10.45	1.26				
Nor-10-F-04	EZ	3.96	6.06	3.72	5.25	0.63				
Nor-10-F-05	EZ	4.03	8.19	3.70	5.22	0.63				
Nor-10-F-06	EZ	18.21	4.12	17.46	24.63	2.97				
Nor-10-F-07	EZ	14.06	3.91	13.51	19.06	2.30				
Nor-10-F-08	EZ	10.67	3.94	10.25	14.46	1.74				
Nor-10-F-09	EZ	7.12	6.04	6.69	9.44	1.14				
Nor-10-F-10	EZ	3.98	10.05	3.58	5.05	0.61				
Nor-10-F-11	EZ	11.25	3.82	10.82	15.26	1.84				
Nor-10-F-12	EZ	8.69	7.25	8.06	11.37	1.37				
Nor-10-F-14	FF	6.54	4.89	6.22	8.78	1.06				
Nor-10-F-13	FF	6.63	5.43	6.27	8.85	1.07				
Nor-10-F-15	FF	6.61	4.84	6.29	8.87	1.07				
Nor-10-F-16	FF									
Nor-10-F-17	FF	6.66	5.56	6.29	8.87	1.07				
Nor-10-F-18	FF	3.63	8.82	3.31	4.67	0.56				
Nor-10-F-19	FF	3.64	7.42	3.37	4.75	0.57				
Nor-10-F-20	FF									
Nor-10-F-21	FF	2.82	7.80	2.60	3.67	0.44				
Nor-10-F-22	FF	3.26	7.06	3.03	4.27	0.52				

Hallig	Jahr
Langeneß	2011/2012

Probe	Verteilung	Typ A (Flasche)					Typ B (Matte)			
		Ms [g]	Org [%]	Mc [g]	Mc [t/ha]	Acc [mm/a]	Ms [g]	Mc [g]	Mc [t/ha]	Acc [mm/a]
Lan-11-F-01	EZ	7.64	11.62	6.75	9.53	1.73	64.02	56.57	9.43	1.72
Lan-11-F-02	EZ	4.46	24.65	3.36	4.74	0.86	28.67	21.60	3.60	0.66
Lan-11-F-03	EZ									
Lan-11-F-04	EZ	10.94	10.83	9.76	13.76	2.51	108.42	96.68	16.11	2.93
Lan-11-F-05	EZ	5.01	14.33	4.29	6.05	1.10	65.89	56.44	9.41	1.71
Lan-11-F-06	EZ	6.81	24.02	5.17	7.30	1.33	34.49	26.21	4.37	0.80
Lan-11-F-07	EZ	7.21	12.58	6.30	8.89	1.62	49.39	43.17	7.20	1.31
Lan-11-F-08	EZ									
Lan-11-F-09	EZ	8.47	10.87	7.55	10.65	1.94	90.10	80.30	13.38	2.44
Lan-11-F-10	EZ	2.70	13.36	2.34	3.30	0.60	33.93	29.39	4.90	0.89
Lan-11-F-11	EZ	4.68	18.77	3.80	5.36	0.98	38.53	31.30	5.22	0.95
Lan-11-F-12	EZ	4.95	16.19	4.15	5.85	1.07				
Lan-11-F-13	EZ	9.02	14.77	7.69	10.85	1.98	55.29	47.13	7.85	1.43
lan-11-F-14	EZ	6.57	12.31	5.76	8.13	1.48	45.20	39.63	6.61	1.20
Lan-11-F-15	EZ	3.70	13.15	3.21	4.53	0.83	44.09	38.29	6.38	1.16
Lan-11-F-16	EZ	6.43	9.91	5.79	8.17	1.49	81.77	73.66	12.28	2.24
Lan-11-F-17	EZ	7.40	12.28	6.49	9.16	1.67	70.38	61.73	10.29	1.87
Lan-11-F-18	EZ	9.13	17.92	7.49	10.57	1.93	96.83	79.48	13.25	2.41
Lan-11-F-19	EZ	4.11	7.67	3.79	5.35	0.98	38.29	35.35	5.89	1.07
Lan-11-F-20	EZ	6.04	13.58	5.22	7.36	1.34	55.68	48.12	8.02	1.46

Lan-11-F-21	EZ	5.92	12.58	5.18	7.30	1.33	57.70	50.44	8.41	1.53
Lan-11-F-22	EZ	4.04	12.80	3.52	4.97	0.91	51.69	45.07	7.51	1.37
Lan-11-F-23	EZ	3.12	13.33	2.70	3.81	0.69	42.10	36.49	6.08	1.11
Lan-11-F-24	EZ	5.29	11.90	4.66	6.58	1.20	48.98	43.15	7.19	1.31
Lan-11-F-25	EZ	4.46	11.98	3.93	5.54	1.01	41.06	36.15	6.02	1.10
Lan-11-F-26	EZ	7.24	12.83	6.31	8.90	1.62	49.03	42.73	7.12	1.30
Lan-11-F-27	EZ	5.65	13.60	4.88	6.89	1.25	67.88	58.65	9.78	1.78
Lan-11-F-28	EZ	14.77	6.21	13.85	19.54	3.56	150.02	140.71	23.45	4.27
Lan-11-F-29	EZ	18.47	9.43	16.73	23.60	4.30	243.62	220.65	36.77	6.70
Lan-11-F-30	EZ	18.00	5.70	16.97	23.95	4.36	185.24	174.68	29.11	5.30
Lan-11-F-31	EZ	13.68	10.48	12.25	17.28	3.15	95.37	85.38	14.23	2.59
Lan-11-F-32	EZ	12.23	6.45	11.44	16.14	2.94	83.90	78.49	13.08	2.38
Lan-11-F-33	EZ	11.09	8.09	10.19	14.38	2.62	85.97	79.01	13.17	2.40
Lan-11-F-34	EZ	6.32	12.12	5.55	7.84	1.43	54.26	47.69	7.95	1.45
Lan-11-F-35	EZ	4.26	13.50	3.68	5.20	0.95	52.19	45.14	7.52	1.37
Lan-11-F-36	EZ	5.23	12.30	4.59	6.47	1.18	40.16	35.22	5.87	1.07
Lan-11-F-37	EZ	4.74	11.64	4.19	5.91	1.08	44.88	39.65	6.61	1.20
Lan-11-F-38	EZ	6.12	12.41	5.36	7.56	1.38	55.95	49.01	8.17	1.49
Lan-11-F-39	EZ	7.13	10.57	6.38	9.00	1.64	64.29	57.50	9.58	1.75
Lan-11-F-40	EZ						75.64	66.68	11.11	2.02
Lan-11-F-41	EZ	13.83	6.99	12.86	18.15	3.31	120.50	112.08	18.68	3.40
Lan-11-F-42	EZ	7.04	8.83	6.42	9.05	1.65	57.68	52.58	8.76	1.60
Lan-11-F-43	EZ	7.02	11.79	6.19	8.74	1.59	48.76	43.01	7.17	1.31
Lan-11-F-44	EZ	6.80	11.41	6.02	8.50	1.55	62.88	55.71	9.28	1.69
Lan-11-F-45	EZ	7.31	10.47	6.54	9.23	1.68	47.80	42.79	7.13	1.30
Lan-11-F-46	EZ	6.80	12.21	5.97	8.42	1.53	42.73	37.51	6.25	1.14
Lan-11-F-47	EZ	7.85	10.87	7.00	9.87	1.80	56.75	50.58	8.43	1.54
Lan-11-F-48	EZ	6.66	8.08	6.12	8.64	1.57	55.05	50.60	8.43	1.54
Lan-11-F-49	EZ	10.47	7.14	9.72	13.72	2.50	86.89	80.68	13.45	2.45
Lan-11-F-50	EZ	5.29	8.73	4.83	6.81	1.24	39.08	35.67	5.94	1.08
Lan-11-F-51n	EZ	7.68	11.43	6.80	9.60	1.75	54.19	48.00	8.00	1.46
Lan-11-F-52	EZ						46.18	40.71	6.78	1.24
Lan-11-F-53	EZ	7.03	11.99	6.19	8.73	1.59	53.18	46.80	7.80	1.42
Lan-11-F-54n	EZ	24.92	9.22	22.62	31.91	5.81	220.93	200.55	33.43	6.09
Lan-11-F-55	EZ	5.67	10.95	5.05	7.12	1.30	62.92	56.02	9.34	1.70
Lan-11-F-56	EZ	10.20	8.31	9.35	13.19	2.40	104.44	95.75	15.96	2.91
Lan-11-F-57	EZ	6.83	9.76	6.16	8.69	1.58	59.63	53.80	8.97	1.63
Lan-11-F-58	EZ	9.39	11.35	8.32	11.74	2.14	59.74	52.96	8.83	1.61
Lan-11-F-59	EZ	10.42	11.18	9.26	13.06	2.38	72.95	64.80	10.80	1.97
Lan-11-F-60	EZ	7.49	13.17	6.50	9.17	1.67	99.52	86.41	14.40	2.62
Lan-11-F-61	EZ	6.62	14.77	5.64	7.96	1.45	49.43	42.13	7.02	1.28
Lan-11-F-62	FF	7.86	7.71	7.25	10.23	1.86	59.77	55.16	9.19	1.67
Lan-11-F-63	FF	8.13	8.77	7.42	10.46	1.91	55.88	50.98	8.50	1.55
Lan-11-F-64	FF	7.61	8.44	6.97	9.83	1.79	55.78	51.07	8.51	1.55
Lan-11-F-65	FF	7.04	8.87	6.42	9.05	1.65	57.79	52.66	8.78	1.60
Lan-11-F-66	FF	7.30	6.98	6.79	9.58	1.74	47.32	44.01	7.34	1.34
Lan-11-F-67	FF	5.37	12.16	4.72	6.65	1.21	61.53	54.04	9.01	1.64
Lan-11-F-68	FF	5.34	10.88	4.76	6.71	1.22	72.29	64.42	10.74	1.96
Lan-11-F-69	FF	5.48	11.11	4.87	6.87	1.25	63.07	56.06	9.34	1.70
Lan-11-F-70	FF	5.58	13.82	4.81	6.78	1.24	87.34	75.27	12.54	2.28
Lan-11-F-71	FF	5.20	10.95	4.63	6.53	1.19	72.81	64.84	10.81	1.97
Lan-11-F-72	TR	11.79		11.79	16.63					
Lan-11-F-73	TR	6.98		6.98	9.85					
Lan-11-F-74	TR	7.28		7.28	10.27					
Lan-11-F-75	TR	7.02		7.02	9.90					
Lan-11-F-76	TR	6.60		6.60	9.31					
Lan-11-F-77	TR	5.87		5.87	8.28					
Lan-11-F-78	TR	6.80		6.80	9.59					

Lan-11-F-79	TR	5.69	5.69	8.03
Lan-11-F-80	TR	5.68	5.68	8.01
Lan-11-F-81	TR	4.87	4.87	6.87
Lan-11-F-82	TR	38.06	38.06	53.69
Lan-11-F-83	TR	17.25	17.25	24.34
Lan-11-F-84	TR	7.37	7.37	10.40
Lan-11-F-85	TR	5.98	5.98	8.44
Lan-11-F-86	TR	4.62	4.62	6.52
Lan-11-F-87	TR	11.27	11.27	15.90
Lan-11-F-88	TR	6.81	6.81	9.61
Lan-11-F-89	TR	8.84	8.84	12.47
Lan-11-FT90	TR	7.71	7.71	10.88
Lan-11-F-91	TR	7.21	7.21	10.17
Lan-11-F-92	TR	32.03	32.03	45.19
Lan-11-F-93	TR	25.06	25.06	35.35
Lan-11-F-94	TR	9.32	9.32	13.15
Lan-11-F-95	TR	4.61	4.61	6.50
Lan-11-F-96	TR	3.67	3.67	5.18
Lan-11-F-97	TR	11.83	11.83	16.69
Lan-11-F-98	TR	9.76	9.76	13.77
Lan-11-F-99	TR	6.22	6.22	8.78
Lan-11-F-100	TR			
Lan-11-F-101	TR	5.65	5.65	7.97
Lan-11-F-102	TR	12.39	12.39	17.48
Lan-11-F-103	TR	11.06	11.06	15.60
Lan-11-F-104	TR	8.40	8.40	11.85
Lan-11-F-105	TR	8.09	8.09	11.41
Lan-11-F-106	TR	8.47	8.47	11.95
Lan-11-F-107	TR	11.64	11.64	16.42
Lan-11-F-108	TR	9.66	9.66	13.63
Lan-11-F-109	TR	9.14	9.14	12.89
Lan-11-F-110	TR	7.75	7.75	10.93
Lan-11-F-111	TR	7.94	7.94	11.20
Lan-11-F-112	TR	7.33	7.33	10.34
Lan-11-F-113	TR	7.46	7.46	10.52
Lan-11-F-114	TR			
Lan-11-F-115	TR			
Lan-11-F-116	TR	7.32	7.32	10.33
Lan-11-F-117	TR			
Lan-11-F-118	TR	8.27	8.27	11.67
Lan-11-F-119	TR	8.34	8.34	11.77
Lan-11-F-120	TR	7.67	7.67	10.82
Lan-11-F-121	TR	6.64	6.64	9.37
Lan-11-F-122	TR	8.24	8.24	11.62
Lan-11-F-123	TR	7.95	7.95	11.22
Lan-11-F-124	TR	6.66	6.66	9.40
Lan-11-F-125	TR	7.14	7.14	10.07
Lan-11-F-126	TR	7.30	7.30	10.30
Lan-11-F-127	TR	9.56	9.56	13.49
Lan-11-F-128	TR	7.63	7.63	10.76
Lan-11-F-129	TR	7.75	7.75	10.93
Lan-11-F-130	TR	5.27	5.27	7.43
Lan-11-F-131	TR	7.21	7.21	10.17

Hallig **Jahr**

Hooge 2011/2012

Probe	Verteilung	Typ A (Flasche)					Typ B (Matte)			
		Ms	Org	Mc	Mc	Acc	Ms	Mc	Mc	Acc
		[g]	[%]	[g]	[t/ha]	[mm/a]	[g]	[g]	[t/ha]	[mm/a]
Hog-11-F-01	EZ	7.74	13.75	6.68	9.42	1.88	64.54	55.67	9.28	1.86
Hog-11-F-02	EZ	16.82	8.15	15.45	21.80	4.36	139.60	128.22	21.37	4.27
Hog-11-F-03	EZ	19.25	13.75	16.60	23.42	4.69	209.10	180.36	30.06	6.01
Hog-11-F-04	EZ	16.06	6.62	15.00	21.16	4.23	209.10	195.25	32.54	6.51
Hog-11-F-05	EZ	5.61	11.72	4.95	6.99	1.40	58.54	51.68	8.61	1.72
Hog-11-F-06	EZ	5.09	20.76	4.03	5.69	1.14	37.64	29.82	4.97	0.99
Hog-11-F-07	EZ	7.91	11.55	7.00	9.87	1.97	76.82	67.94	11.32	2.27
Hog-11-F-08	EZ	8.37	12.69	7.31	10.31	2.06	56.17	49.04	8.17	1.63
Hog-11-F-09	EZ	6.98	11.07	6.21	8.76	1.75	49.35	43.89	7.31	1.46
Hog-11-F-10	EZ	4.90	12.29	4.30	6.06	1.21	29.27	25.67	4.28	0.86
Hog-11-F-11	EZ	5.16	13.75	4.45	6.28	1.26	47.29	40.79	6.80	1.36
Hog-11-F-12	EZ	11.27	15.22	9.55	13.48	2.70	70.78	60.01	10.00	2.00
Hog-11-F-13	EZ									
Hog-11-F-14	EZ	3.17	15.64	2.67	3.77	0.75	21.94	18.51	3.09	0.62
Hog-11-F-15	EZ	5.31	14.31	4.55	6.42	1.28	38.84	33.28	5.55	1.11
Hog-11-F-16	EZ	5.88	17.90	4.83	6.81	1.36	36.19	29.71	4.95	0.99
Hog-11-F-17	EZ	2.46	13.45	2.13	3.00	0.60	36.19	31.32	5.22	1.04
Hog-11-F-18	EZ	10.53	16.43	8.80	12.41	2.48	60.31	50.40	8.40	1.68
Hog-11-F-19	EZ	16.96	18.38	13.84	19.53	3.91	124.32	101.46	16.91	3.38
Hog-11-F-20	EZ	11.77	11.96	10.36	14.62	2.92	81.51	71.76	11.96	2.39
Hog-11-F-21	EZ	2.72	15.77	2.29	3.23	0.65	22.33	18.81	3.13	0.63
Hog-11-F-22	EZ	1.90	16.35	1.59	2.24	0.45	16.57	13.86	2.31	0.46
Hog-11-F-23	EZ									
Hog-11-F-24	EZ	9.19	13.75	7.93	11.18	2.24	73.75	63.61	10.60	2.12
Hog-11-F-25	EZ	14.14	7.95	13.02	18.36	3.67	96.52	88.85	14.81	2.96
Hog-11-F-26	EZ	14.80	13.29	12.83	18.10	3.62	76.19	66.07	11.01	2.20
Hog-11-F-27	EZ	2.34	11.78	2.06	2.91	0.58	17.53	15.46	2.58	0.52
Hog-11-F-28	EZ	4.95	19.21	4.00	5.64	1.13	32.22	26.03	4.34	0.87
Hog-11-F-29	EZ	4.58	13.75	3.95	5.57	1.11	44.99	38.80	6.47	1.29
Hog-11-F-30	EZ						50.21	43.32	7.22	1.44
Hog-11-F-31	EZ	14.98	12.82	13.06	18.42	3.69	119.62	104.28	17.38	3.48
Hog-11-F-32	EZ	15.14	14.23	12.99	18.32	3.66	105.28	90.30	15.05	3.01
Hog-11-F-33	EZ	2.80	12.28	2.46	3.47	0.69	24.38	21.39	3.56	0.71
Hog-11-F-34	EZ	7.81	21.90	6.10	8.61	1.72	44.93	35.09	5.85	1.17
Hog-11-F-35	EZ	8.14	11.32	7.22	10.18	2.04	88.90	78.83	13.14	2.63
Hog-11-F-36	EZ	10.01	8.87	9.12	12.87	2.57	92.06	83.89	13.98	2.80
Hog-11-F-37	FF	9.29	9.75	8.38	11.83	2.37	49.76	44.91	7.49	1.50
Hog-11-F-38	FF						53.55	46.21	7.70	1.54
Hog-11-F-39	FF	12.17	13.75	10.50	14.81	2.96	79.57	68.64	11.44	2.29
Hog-11-F-40	FF	8.42	13.42	7.29	10.28	2.06	79.57	68.90	11.48	2.30
Hog-11-F-41	FF	8.00	12.82	6.97	9.84	1.97	62.58	54.55	9.09	1.82
Hog-11-F-42	FF	3.01	23.76	2.29	3.24	0.65	29.06	22.16	3.69	0.74
Hog-11-F-43	FF	3.82	12.58	3.34	4.71	0.94	26.45	23.12	3.85	0.77
Hog-11-F-44	FF	3.63	13.75	3.13	4.42	0.88	28.27	24.38	4.06	0.81
Hog-11-F-45	FF						32.88	28.37	4.73	0.95
Hog-11-F-46	FF	3.89	11.09	3.46	4.88	0.98	28.37	25.22	4.20	0.84

Hallig **Jahr**

N.Moor 2011/2012

Probe	Verteilung	Typ A (Flasche)					Typ B (Matte)			
		Ms [g]	Org [%]	Mc [g]	Mc [t/ha]	Acc [mm/a]	Ms [g]	Mc [g]	Mc [t/ha]	Acc [mm/a]
Nor-11-F-01	EZ	24.48	8.37	22.43	31.65	4.19	138.35	126.77	21.13	2.80
Nor-11-F-02	EZ	29.54	8.59	27.00	38.09	5.04	233.94	213.83	35.64	4.72
Nor-11-F-03	EZ	33.43	10.13	30.04	42.38	5.61	196.30	176.40	29.40	3.89
Nor-11-F-04	EZ	17.45	13.50	15.10	21.30	2.82	160.36	138.72	23.12	3.06
Nor-11-F-05	EZ	36.88	10.63	32.96	46.50	6.15	234.96	209.99	35.00	4.63
Nor-11-F-06	EZ	19.64	7.98	18.07	25.50	3.37	188.25	173.22	28.87	3.82
Nor-11-F-07	EZ	52.27	10.48	46.79	66.01	8.74	267.63	239.59	39.93	5.28
Nor-11-F-08	EZ						178.71	159.99	26.66	3.53
Nor-11-F-09	EZ	43.41	11.72	38.32	54.06	7.15	189.62	167.40	27.90	3.69
Nor-11-F-10	EZ	27.21	14.32	23.31	32.89	4.35	127.58	109.31	18.22	2.41
Nor-11-F-11	EZ	25.29	9.55	22.87	32.27	4.27	201.38	182.14	30.36	4.02
Nor-11-F-12	EZ	24.13	9.99	21.72	30.64	4.05	194.05	174.67	29.11	3.85
Nor-11-F-14	FF	22.77	13.26	19.75	27.86	3.69	161.35	139.95	23.33	3.09
Nor-11-F-13	FF	22.48	9.40	20.37	28.73	3.80	177.24	160.58	26.76	3.54
Nor-11-F-15	FF	26.79	10.34	24.02	33.89	4.48	153.77	137.87	22.98	3.04
Nor-11-F-16	FF	23.97	10.52	21.45	30.26	4.00	182.83	163.60	27.27	3.61
Nor-11-F-17	FF	25.42	9.50	23.01	32.46	4.29	166.06	150.29	25.05	3.31
Nor-11-F-18	FF	18.85	12.98	16.40	23.14	3.06	172.11	149.77	24.96	3.30
Nor-11-F-19	FF	31.17	14.31	26.71	37.68	4.99	151.07	129.45	21.57	2.86
Nor-11-F-20	FF	17.19	12.91	14.97	21.12	2.80	152.00	132.38	22.06	2.92
Nor-11-F-21	FF	17.25	12.90	15.02	21.20	2.81	179.64	156.47	26.08	3.45
Nor-11-F-22	FF	16.72	8.79	15.25	21.51	2.85	156.23	142.49	23.75	3.14
Nor-11-F-23	FF	33.75		30.23	42.65					
Nor-11-F-24	FF	29.93		26.81	37.82					
Nor-11-F-25	FF	30.81		27.60	38.93					
Nor-11-F-26	FF	30.57		27.38	38.63					
Nor-11-F-27	FF	19.10		17.11	24.14					
Nor-11-F-28	TR	41.16		36.87	52.01					
Nor-11-F-29	TR	28.83		25.82	36.43					
Nor-11-F-30	TR	24.61		22.04	31.10					
Nor-11-F-31	TR	38.38		34.38	48.50					
Nor-11-F-32	TR	28.75		25.75	36.33					
Nor-11-F-33	TR	120.78		108.18	152.62					
Nor-11-F-34	TR	41.04		36.76	51.86					
Nor-11-F-35	TR	34.79		31.16	43.96					
Nor-11-F-36	TR	17.33		15.52	21.90					
Nor-11-F-37	TR	25.49		22.83	32.21					
Nor-11-F-38	TR	70.53		63.17	89.12					
Nor-11-F-39	TR									
Nor-11-F-40	TR	81.63		73.12	103.15					
Nor-11-F-41	TR	56.79		50.87	71.76					
Nor-11-F-42	TR	52.71		47.21	66.61					
Nor-11-F-43	TR	34.35		30.77	43.41					
Nor-11-F-44	TR									
Nor-11-F-45	TR	41.48		37.15	52.42					
Nor-11-F-46	TR	38.11		34.14	48.16					
Nor-11-F-47	TR	37.27		33.38	47.10					
Nor-11-F-48	TR	132.63		118.80	167.60					
Nor-11-F-49	TR	105.79		94.76	133.68					
Nor-11-F-50	TR	99.20		88.85	125.35					
Nor-11-F-51	TR	58.80		52.67	74.30					

Nor-11-F-52	TR	52.05	46.62	65.77
Nor-11-F-53	TR			
Nor-11-F-54	TR	26.02	23.31	32.88
Nor-11-F-55	TR	24.98	22.37	31.57
Nor-11-F-56	TR	32.17	28.81	40.65
Nor-11-F-57	TR	35.50	31.80	44.86
Nor-11-F-58	TR	114.57	102.62	144.78
Nor-11-F-59	TR	124.40	111.43	157.20
Nor-11-F-60	TR	105.63	94.61	133.48
Nor-11-F-61	TR	66.31	59.39	83.79
Nor-11-F-62	TR	47.79	42.81	60.39
Nor-11-F-63	TR	63.11	56.53	79.75
Nor-11-F-64	TR	11.37	10.18	14.37
Nor-11-F-65	TR	29.55	26.47	37.34
Nor-11-F-66	TR	28.77	25.77	36.36
Nor-11-F-67	TR	25.88	23.18	32.70

Hallig	**Jahr**
Juist	2011/2012

Probe	**Verteilung**	**Typ A (Flasche)**					**Typ B (Matte)**			
		Ms [g]	**Org [%]**	**Mc [g]**	**Mc [t/ha]**	**Acc [mm/a]**	**Ms [g]**	**Mc [g]**	**Mc [t/ha]**	**Acc [mm/a]**
Jus-11-F-01	FF	6.02	12.91	5.24	7.40	1.48	35.63	31.03	5.17	1.03
Jus-11-F-02	FF	3.97	13.74	3.42	4.83	0.97	31.50	27.17	4.53	0.91
Jus-11-F-03	FF	4.30	15.53	3.63	5.12	1.03	27.43	23.17	3.86	0.77
Jus-11-F-04	FF	4.95	13.36	4.29	6.05	1.21	35.77	30.99	5.16	1.03
Jus-11-F-05	FF	4.53	12.82	3.95	5.57	1.11	23.81	20.76	3.46	0.69
Jus-11-F-06	EZ	4.97	12.38	4.35	6.14	1.23	42.15	36.93	6.15	1.23
Jus-11-F-07	EZ	2.44	14.53	2.09	2.94	0.59	20.17	17.24	2.87	0.57
Jus-11-F-08	EZ	6.80	13.31	5.89	8.32	1.66	47.56	41.23	6.87	1.37
Jus-11-F-09	EZ	6.54	11.52	5.79	8.16	1.63	55.93	49.48	8.25	1.65
Jus-11-F-10	EZ	6.55	13.00	5.70	8.04	1.61	35.84	31.18	5.20	1.04

Hallig	**Jahr**
Norderney	2011/2012

Probe	**Verteilung**	**Typ A (Flasche)**					**Typ B (Matte)**			
		Ms [g]	**Org [%]**	**Mc [g]**	**Mc [t/ha]**	**Acc [mm/a]**	**Ms [g]**	**Mc [g]**	**Mc [t/ha]**	**Acc [mm/a]**
NNe-11-F-01	EZ	Sedimentdeposition zu hoch								
NNe-11-F-02	EZ	Sedimentdeposition zu hoch								
NNe-11-F-03	EZ	Sedimentdeposition zu hoch								
NNe-11-F-04	EZ	Sedimentdeposition zu hoch								
NNe-11-F-05	EZ	Sedimentdeposition zu hoch								
NNe-11-F-06	EZ	10.67	11.48	9.45	13.33	2.67	157.05	139.02	23.17	4.63
NNe-11-F-07	EZ	8.08	12.26	7.09	10.00	2.00	140.35	123.13	20.52	4.10
NNe-11-F-08	EZ	8.07	12.89	7.03	9.92	1.98	113.51	98.88	16.48	3.30
NNe-11-F-09	EZ	5.26	12.10	4.62	6.52	1.30	39.23	34.48	5.75	1.15
NNe-11-F-10	EZ	7.78	11.77	6.86	9.68	1.94	61.34	54.12	9.02	1.80

Hallig **Jahr**

Langeneß 2012/2013

Probe	Verteilung	Typ A (Flasche)					Typ B (Matte)			
		Ms [g]	Org [%]	Mc [g]	Mc [t/ha]	Acc [mm/a]	Ms [g]	Mc [g]	Mc [t/ha]	Acc [mm/a]
Lan-12-F-01	EZ	8.84	8.42	8.10	11.42	2.08	69.01	63.20	10.53	1.92
Lan-12-F-02	EZ	3.03	13.20	2.63	3.71	0.68	20.71	17.97	3.00	0.55
Lan-12-F-03	EZ									
Lan-12-F-04	EZ	8.07	11.27	7.16	10.10	1.84	56.90	50.48	8.41	1.53
Lan-12-F-05	EZ						32.09	28.59	4.77	0.87
Lan-12-F-06	EZ	2.99	11.86	2.64	3.72	0.68	26.64	23.48	3.91	0.71
Lan-12-F-07	EZ	3.27	11.08	2.91	4.10	0.75	28.40	25.26	4.21	0.77
Lan-12-F-08	EZ	3.78	9.52	3.42	4.82	0.88	34.03	30.79	5.13	0.93
Lan-12-F-09	EZ	4.75	9.78	4.29	6.05	1.10	48.46	43.72	7.29	1.33
Lan-12-F-10	EZ	4.17	11.19	3.70	5.22	0.95	46.98	41.72	6.95	1.27
Lan-12-F-11	EZ	3.38	10.65	3.02	4.26	0.78	34.54	30.86	5.14	0.94
Lan-12-F-12	EZ	3.85	11.86	3.39	4.79	0.87	35.53	31.32	5.22	0.95
Lan-12-F-13	EZ	6.69	11.11	5.95	8.39	1.53	47.39	42.12	7.02	1.28
lan-12-F-14	EZ	3.86	18.81	3.13	4.42	0.81	37.85	30.73	5.12	0.93
Lan-12-F-15	EZ	2.75	11.27	2.44	3.44	0.63	24.34	21.60	3.60	0.66
Lan-12-F-16	EZ	5.02	10.14	4.51	6.36	1.16	55.74	50.09	8.35	1.52
Lan-12-F-17	EZ	4.67	9.77	4.21	5.94	1.08	48.00	43.32	7.22	1.31
Lan-12-F-18	EZ	5.28	13.45	4.57	6.45	1.17	67.54	58.46	9.74	1.77
Lan-12-F-19	EZ									
Lan-12-F-20	EZ	3.15	12.26	2.76	3.90	0.71	23.30	20.44	3.41	0.62
Lan-12-F-21	EZ	3.08	10.10	2.77	3.91	0.71	29.04	26.10	4.35	0.79
Lan-12-F-22	EZ	2.83	16.55	2.36	3.33	0.61	27.37	22.84	3.81	0.69
Lan-12-F-23	EZ	2.23	12.11	1.96	2.77	0.50	23.79	20.91	3.49	0.63
Lan-12-F-24	EZ	3.20	13.13	2.78	3.92	0.71	23.57	20.48	3.41	0.62
Lan-12-F-25	EZ	1.92	11.52	1.70	2.40	0.44	20.75	18.36	3.06	0.56
Lan-12-F-26	EZ	3.02	13.25	2.62	3.70	0.67	29.03	25.18	4.20	0.76
Lan-12-F-27	EZ	2.90	14.38	2.48	3.50	0.64	31.90	27.31	4.55	0.83
Lan-12-F-28	EZ	10.87	4.51	10.38	14.64	2.67	162.32	154.99	25.83	4.70
Lan-12-F-29	EZ	11.66	5.02	11.07	15.62	2.85	121.40	115.30	19.22	3.50
Lan-12-F-30	EZ	8.46	5.30	8.01	11.30	2.06	79.18	74.99	12.50	2.28
Lan-12-F-31	EZ						68.31	60.87	10.14	1.85
Lan-12-F-32	EZ									
Lan-12-F-33	EZ	6.26	8.19	5.75	8.11	1.48	47.51	43.62	7.27	1.32
Lan-12-F-34	EZ	2.29	13.42	1.98	2.80	0.51	21.80	18.87	3.15	0.57
Lan-12-F-35	EZ	2.73	10.99	2.43	3.43	0.62	22.94	20.42	3.40	0.62
Lan-12-F-36	EZ	2.13	10.85	1.90	2.68	0.49	16.04	14.30	2.38	0.43
Lan-12-F-37	EZ	2.27	11.35	2.01	2.84	0.52	15.62	13.85	2.31	0.42
Lan-12-F-38	EZ	3.07	9.06	2.79	3.94	0.72	27.50	25.01	4.17	0.76
Lan-12-F-39	EZ	4.74	12.71	4.14	5.84	1.06	54.01	47.14	7.86	1.43
Lan-12-F-40	EZ	6.60	6.39	6.18	8.72	1.59	68.52	64.14	10.69	1.95
Lan-12-F-41	EZ	8.44	4.17	8.09	11.41	2.08	79.60	76.28	12.71	2.32
Lan-12-F-42	EZ	4.41	6.12	4.14	5.84	1.06	39.08	36.69	6.11	1.11
Lan-12-F-43n	EZ	3.14	10.83	2.80	3.95	0.72	26.63	23.74	3.96	0.72
Lan-12-F-44	EZ	2.58	14.34	2.21	3.12	0.57	20.51	17.57	2.93	0.53
Lan-12-F-45	EZ	2.24	19.28	1.81	2.55	0.46	19.92	16.08	2.68	0.49
Lan-12-F-46	EZ	3.04	13.82	2.62	3.70	0.67	42.20	36.37	6.06	1.10
Lan-12-F-47	EZ	3.80	12.14	3.34	4.71	0.86	32.42	28.48	4.75	0.86
Lan-12-F-48	EZ	2.65	11.83	2.34	3.30	0.60	25.18	22.20	3.70	0.67
Lan-12-F-49	EZ	9.17	3.81	8.82	12.44	2.27	101.82	97.94	16.32	2.97
Lan-12-F-50	EZ									

Lan-12-F-51n	EZ	3.06	10.46	2.74	3.87	0.70	27.52	24.64	4.11	0.75
Lan-12-F-52	EZ	2.30	16.09	1.93	2.72	0.50	18.61	15.62	2.60	0.47
Lan-12-F-53	EZ	2.06	15.77	1.74	2.45	0.45	17.96	15.13	2.52	0.46
Lan-12-F-54n	EZ	3.07	10.75	2.74	3.87	0.70	22.34	19.93	3.32	0.61
Lan-12-F-55	EZ	3.65	9.12	3.32	4.68	0.85	31.51	28.64	4.77	0.87
Lan-12-F-56	EZ	5.73	6.47	5.36	7.56	1.38	47.12	44.08	7.35	1.34
Lan-12-F-57	EZ	4.18	8.10	3.84	5.42	0.99	44.12	40.55	6.76	1.23
Lan-12-F-58	EZ									
Lan-12-F-59	EZ	3.91	9.90	3.52	4.97	0.91	33.51	30.19	5.03	0.92
Lan-12-F-60	EZ	5.23	8.73	4.77	6.73	1.23	57.55	52.53	8.75	1.59
Lan-12-F-61	EZ	8.17	11.89	7.20	10.16	1.85	84.78	74.70	12.45	2.27
Lan-12-F-62	FF									
Lan-12-F-63	FF	4.96	5.86	4.67	6.59	1.20	48.49	45.65	7.61	1.39
Lan-12-F-64	FF	4.75	7.58	4.39	6.19	1.13	44.21	40.86	6.81	1.24
Lan-12-F-65	FF	4.98	11.04	4.43	6.25	1.14	45.68	40.63	6.77	1.23
Lan-12-F-66	FF	4.72	6.03	4.44	6.26	1.14	44.52	41.83	6.97	1.27
Lan-12-F-67	FF	3.75	21.28	2.95	4.16	0.76	41.78	32.89	5.48	1.00
Lan-12-F-68	FF	3.26	10.74	2.91	4.11	0.75	42.98	38.37	6.39	1.16
Lan-12-F-69	FF	3.63	11.75	3.20	4.52	0.82	41.68	36.78	6.13	1.12
Lan-12-F-70	FF	3.82	18.11	3.13	4.41	0.80	51.88	42.49	7.08	1.29
Lan-12-F-71	FF	3.60	11.26	3.19	4.51	0.82	54.53	48.39	8.06	1.47

Hallig	**Jahr**
Hooge	2012/2013

Probe	**Verteilung**	**Typ A (Flasche)**					**Typ B (Matte)**			
		Ms	**Org**	**Mc**	**Mc**	**Acc**	**Ms**	**Mc**	**Mc**	**Acc**
		[g]	**[%]**	**[g]**	**[t/ha]**	**[mm/a]**	**[g]**	**[g]**	**[t/ha]**	**[mm/a]**
Hog-12-F-01	EZ	4.15	13.10	3.61	5.09	1.02	44.96	39.07	6.51	1.30
Hog-12-F-02	EZ	9.46	7.93	8.71	12.29	2.46	65.86	60.63	10.11	2.02
Hog-12-F-03	EZ	13.58	7.91	12.51	17.64	3.53	105.89	97.52	16.25	3.25
Hog-12-F-04	EZ	5.36	7.99	4.93	6.96	1.39				
Hog-12-F-05	EZ									
Hog-12-F-06	EZ	4.05	9.65	3.66	5.16	1.03	29.57	26.72	4.45	0.89
Hog-12-F-07	EZ	4.05	11.40	3.59	5.06	1.01	26.52	23.50	3.92	0.78
Hog-12-F-08	EZ	4.81	11.48	4.26	6.01	1.20	31.96	28.29	4.72	0.94
Hog-12-F-09	EZ	4.64	12.12	4.08	5.75	1.15	31.75	27.90	4.65	0.93
Hog-12-F-10	EZ	6.46	11.77	5.70	8.04	1.61	40.42	35.66	5.94	1.19
Hog-12-F-11	EZ	5.08	15.50	4.29	6.06	1.21	38.29	32.36	5.39	1.08
Hog-12-F-12	EZ	4.40	12.25	3.86	5.45	1.09				
Hog-12-F-13	EZ	4.80	13.78	4.14	5.84	1.17	33.78	29.12	4.85	0.97
Hog-12-F-14	EZ	3.26	11.11	2.90	4.09	0.82				
Hog-12-F-15	EZ	4.41	12.89	3.84	5.42	1.08	37.08	32.30	5.38	1.08
Hog-12-F-16	EZ	4.56	13.07	3.96	5.59	1.12	48.94	42.55	7.09	1.42
Hog-12-F-17	EZ	2.51	13.10	2.18	3.08	0.62	13.75	11.95	1.99	0.40
Hog-12-F-18	EZ	9.01	12.90	7.85	11.07	2.21	52.95	46.12	7.69	1.54
Hog-12-F-19	EZ						47.98	42.61	7.10	1.42
Hog-12-F-20	EZ	5.84	18.40	4.77	6.72	1.34	38.25	31.21	5.20	1.04
Hog-12-F-21	EZ	4.61	11.71	4.07	5.74	1.15	38.63	34.11	5.68	1.14
Hog-12-F-22	EZ	5.30	11.85	4.67	6.59	1.32	27.80	24.51	4.09	0.82
Hog-12-F-23	EZ									
Hog-12-F-24	EZ	5.22	11.79	4.60	6.50	1.30	37.97	33.49	5.58	1.12
Hog-12-F-25	EZ	7.86	11.19	6.98	9.85	1.97	62.21	55.25	9.21	1.84
Hog-12-F-26	EZ	5.08	11.87	4.48	6.32	1.26	44.21	38.96	6.49	1.30
Hog-12-F-27	EZ						71.88	63.84	10.64	2.13

Hog-12-F-28	EZ	4.63	12.17	4.07	5.74	1.15	27.64	24.27	4.05	0.81
Hog-12-F-29	EZ	3.84	11.92	3.38	4.77	0.95	24.76	21.81	3.63	0.73
Hog-12-F-30	EZ	5.35	11.26	4.75	6.70	1.34	33.29	29.54	4.92	0.98
Hog-12-F-31	EZ	6.97	9.00	6.34	8.95	1.79	55.94	50.91	8.48	1.70
Hog-12-F-32	EZ	8.12	6.59	7.59	10.70	2.14	85.90	80.24	13.37	2.67
Hog-12-F-33	EZ	5.90	9.18	5.36	7.56	1.51	52.33	47.52	7.92	1.58
Hog-12-F-34	EZ	7.09	8.17	6.51	9.19	1.84				
Hog-12-F-35	EZ	8.28	8.64	7.56	10.67	2.13	78.10	71.35	11.89	2.38
Hog-12-F-36n	EZ	8.74	6.23	8.20	11.56	2.31	91.48	85.78	14.30	2.86
Hog-12-F-37	FF	5.72	12.28	5.02	7.08	1.42	34.02	29.84	4.97	0.99
Hog-12-F-38	FF	5.22	10.79	4.66	6.57	1.31	35.39	31.57	5.26	1.05
Hog-12-F-39	FF	5.36	9.74	4.84	6.83	1.37	35.05	31.64	5.27	1.05
Hog-12-F-40	FF	5.42	14.47	4.64	6.54	1.31	32.83	28.08	4.68	0.94
Hog-12-F-41	FF									
Hog-12-F-42	FF	5.30	11.85	4.67	6.59	1.32	88.69	78.18	13.03	2.61
Hog-12-F-43	FF	10.35	4.96	9.84	13.88	2.78	93.55	88.91	14.82	2.96
Hog-12-F-44	FF	9.32	5.86	8.77	12.38	2.48	86.61	81.53	13.59	2.72
Hog-12-F-45	FF	8.43	5.12	8.00	11.28	2.26	78.39	74.37	12.40	2.48
Hog-12-F-46	FF	9.73	4.99	9.24	13.04	2.61	89.92	85.43	14.24	2.85

Hallig	**Jahr**
N.Moor	2012/2013

Probe	**Verteilung**	**Typ A (Flasche)**					**Typ B (Matte)**			
		Ms [g]	**Org [%]**	**Mc [g]**	**Mc [t/ha]**	**Acc [mm/a]**	**Ms [g]**	**Mc [g]**	**Mc [t/ha]**	**Acc [mm/a]**
Nor-12-F-01	EZ	15.18	5.68	14.32	20.20	2.67	114.01	107.53	17.92	2.37
Nor-12-F-02	EZ	9.34	7.63	8.63	12.17	1.61	59.81	55.25	9.21	1.22
Nor-12-F-03	EZ	13.67	8.60	12.49	17.63	2.33	100.25	91.63	15.27	2.02
Nor-12-F-04	EZ	5.51	14.48	4.71	6.65	0.88	44.59	38.13	6.36	0.84
Nor-12-F-05	EZ	5.74	15.18	4.87	6.87	0.91	35.60	30.20	5.03	0.67
Nor-12-F-06	EZ	12.29	8.06	11.30	15.94	2.11	101.37	93.20	15.53	2.06
Nor-12-F-07	EZ	16.52	6.00	15.53	21.91	2.90	125.94	118.38	19.73	2.61
Nor-12-F-08	EZ	11.19	6.39	10.48	14.78	1.96	95.32	89.23	14.87	1.97
Nor-12-F-09	EZ									
Nor-12-F-10	EZ									
Nor-12-F-11	EZ	10.49	9.28	9.52	13.43	1.78	112.85	102.37	17.06	2.26
Nor-12-F-12	EZ	7.96	12.06	7.00	9.88	1.31	63.54	55.88	9.31	1.23
Nor-12-F-14	FF	9.04	11.85	7.97	11.24	1.49	61.63	54.33	9.05	1.20
Nor-12-F-13	FF	8.02	7.49	7.42	10.47	1.39	54.39	50.32	8.39	1.11
Nor-12-F-15	FF	8.22	8.25	7.54	10.64	1.41	59.93	54.99	9.17	1.21
Nor-12-F-16	FF	7.49	9.44	6.78	9.57	1.27	63.04	57.09	9.51	1.26
Nor-12-F-17	FF	8.21	8.34	7.53	10.62	1.40	56.70	51.97	8.66	1.15
Nor-12-F-18	FF	9.36	11.38	8.29	11.70	1.55	71.20	63.09	10.52	1.39
Nor-12-F-19	FF	8.38	9.63	7.57	10.68	1.41	66.81	60.38	10.06	1.33
Nor-12-F-20	FF	8.29	10.02	7.46	10.52	1.39	68.86	61.96	10.33	1.37
Nor-12-F-21	FF	7.81	20.60	6.20	8.75	1.16	59.00	46.84	7.81	1.03
Nor-12-F-22	FF	9.01	12.84	7.85	11.08	1.47	61.47	53.57	8.93	1.18

Hallig	Jahr
Juist	2012/2013

Probe	Verteilung	Typ A (Flasche)					Typ B (Matte)			
		Ms [g]	Org [%]	Mc [g]	Mc [t/ha]	Acc [mm/a]	Ms [g]	Mc [g]	Mc [t/ha]	Acc [mm/a]
Jus-12-F-01	EZ	1.29	12.58	1.13	1.59	0.32	17.81	15.57	2.59	0.52
Jus-12-F-02	EZ	0.82	27.84	0.59	0.83	0.17	7.36	5.31	0.88	0.18
Jus-12-F-03	EZ	0.82	18.09	0.67	0.95	0.19	8.91	7.30	1.22	0.24
Jus-12-F-04	EZ	0.73	18.18	0.60	0.84	0.17	8.25	6.75	1.13	0.23
Jus-12-F-05	EZ	0.05	18.06	0.04	0.06	0.01	5.33	4.37	0.73	0.15
Jus-12-F-06	EZ	0.27	19.05	0.22	0.31	0.06	7.45	6.03	1.00	0.20
Jus-12-F-07	EZ	0.64	13.82	0.55	0.78	0.16	8.06	6.95	1.16	0.23
Jus-12-F-08	EZ	0.72	13.33	0.62	0.88	0.18	10.55	9.14	1.52	0.30
Jus-12-F-09	EZ	1.90	11.01	1.69	2.39	0.48	23.80	21.18	3.53	0.71
Jus-12-F-10	EZ	0.15	18.92	0.12	0.17	0.03	10.45	8.47	1.41	0.28
Jus-12-F-11	EZ	0.65	13.51	0.56	0.79	0.16	7.92	6.85	1.14	0.23
Jus-12-F-12	EZ	0.53	13.43	0.46	0.65	0.13	8.95	7.74	1.29	0.26
Jus-12-F-13	EZ	1.21	14.50	1.03	1.46	0.29	11.67	9.98	1.66	0.33
Jus-12-F-14	EZ	0.35	19.15	0.28	0.40	0.08	5.11	4.13	0.69	0.14
Jus-12-F-15	EZ	0.42	13.43	0.36	0.51	0.10	6.38	5.52	0.92	0.18
Jus-12-F-16	EZ	0.74	15.09	0.63	0.89	0.18	8.31	7.05	1.18	0.24
Jus-12-F-17	EZ	0.64	12.59	0.56	0.79	0.16	10.89	9.52	1.59	0.32
Jus-12-F-18	EZ	0.81	16.67	0.68	0.95	0.19	5.19	4.33	0.72	0.14
Jus-12-F-19	EZ	0.28	13.58	0.24	0.34	0.07	5.55	4.80	0.80	0.16
Jus-12-F-20	EZ	0.98	26.50	0.72	1.02	0.20	5.75	4.23	0.70	0.14

Hallig	Jahr
Norderney	2012/2013

Probe	Verteilung	Typ A (Flasche)					Typ B (Matte)			
		Ms [g]	Org [%]	Mc [g]	Mc [t/ha]	Acc [mm/a]	Ms [g]	Mc [g]	Mc [t/ha]	Acc [mm/a]
NNe-12-F-01	EZ	13.63	13.41	11.80	16.65	3.33	79.61	68.93	11.49	2.30
NNe-12-F-02	EZ	4.19	11.36	3.71	5.24	1.05	34.30	30.41	5.07	1.01
NNe-12-F-03	EZ	5.51	1.56	5.42	7.65	1.53	63.07	62.08	10.35	2.07
NNe-12-F-04	EZ	4.00	10.19	3.59	5.07	1.01	38.42	34.51	5.75	1.15
NNe-12-F-05	EZ	4.48	13.68	3.87	5.46	1.09	30.14	26.02	4.34	0.87
NNe-12-F-06	EZ	2.86	12.62	2.50	3.53	0.71	27.29	23.85	3.97	0.79
NNe-12-F-07	EZ	2.13	19.47	1.72	2.42	0.48	11.70	9.42	1.57	0.31
NNe-12-F-08	EZ	19.67	14.70	16.78	23.67	4.73	103.42	88.21	14.70	2.94
NNe-12-F-09	EZ	5.31	12.96	4.62	6.52	1.30	55.68	48.46	8.08	1.62
NNe-12-F-10	EZ	2.98	13.78	2.57	3.62	0.73	27.66	23.85	3.98	0.80
NNe-12-F-11	EZ	3.65	12.55	3.19	4.50	0.90	54.28	47.47	7.91	1.58
NNe-12-F-12	EZ	3.87	10.51	3.46	4.89	0.98	39.57	35.41	5.90	1.18
NNe-12-F-13	EZ	5.87	30.86	4.06	5.73	1.15	26.91	18.60	3.10	0.62
NNe-12-F-14	EZ	5.52	12.32	4.84	6.83	1.37	38.61	33.85	5.64	1.13

Bohrkerndatierungen

Akkürzungsverzeichns

depth korr	bereinigt Tiefe
^{210}Pb	Aktivität der ^{210}Pb-Isotope
^{214}Pb	Aktivität der ^{214}Pb-Isotope
^{137}Cs	Aktivität der ^{137}Cs-Isotope
BDD	Trockenraumdichte
LOI	Glühverlust
t	Datiertes Jahr der Sedimentdeposition

Bohrkern	depth korr	^{210}Pb	^{214}Pb	^{137}Cs	BDD	LOI	t
Hog-11-K-01	[cm]	[Bq/kg]	[Bq/kg]	[Bq/kg]	[g/cm^3]	[%]	[year]
Hog-11-K 01-01	0.24	137.05	14.39	5.24	0.36	36.56	2011
Hog-11-K 01-02	0.79	114.79	18.33	5.89	0.39	25.14	2005
Hog-11-K 01-03	1.45	79.86	17.98	8.33	0.42	20.84	1999
Hog-11-K 01-04	2.47	59.67	19.78	8.94	0.73	13.53	1994
Hog-11-K 01-05	3.66	53.65	15.57	65.09	0.60	16.36	1988
Hog-11-K 01-06	4.71	63.99	19.96	110.09	0.62	19.85	1982
Hog-11-K 01-07	5.90	41.39	16.26	23.08	0.74	14.04	1973
Hog-11-K 01-08	7.05	50.36	17.69	72.83	0.57	21.09	1964
Hog-11-K 01-09	8.02	46.08	15.14	113.57	0.60	22.35	1953
Hog-11-K 01-10	9.22	35.16	15.33	14.39	0.82	17.20	1936
Hog-11-K 01-11	10.75	29.84	18.40	1.38	0.87	10.20	1905
Hog-11-K 01-12	12.68	18.35	18.35	0.72	1.12	5.82	
Hog-11-K 01-13	15.30	24.19	17.41	<	1.51	4.80	
Hog-11-K 01-14	18.19	23.29	20.67	<	1.38	5.44	
Hog-11-K 01-15	20.76	22.54	17.45	<	1.20	5.08	
Hog-11-K 01-16	23.26	19.21	20.70	<	1.30	5.16	
Hog-11-K 01-17	25.81	20.74	20.26	<	1.25	5.25	
Hog-11-K 01-18	28.34	19.34	17.19	<	1.28	5.22	
Hog-11-K 01-19	31.08	16.22	16.95	<	1.45	4.42	
Hog-11-K 01-20	33.83	15.28	15.23	<	1.29	4.20	
Hog-11-K 01-21	36.83	14.16	17.08	<	1.68	4.03	
Hog-11-K 01-22	39.62	14.11	18.28	<	1.09	4.13	
Hog-11-K 01-23	42.12	12.61	16.65	<	1.37	2.81	
Hog-11-K 01-24	44.92	18.96	16.90	<	1.39	4.75	
Hog-11-K 01-25	47.49	10.94	16.00	<	1.16	3.77	
Hog-11-K 01-30	56.05	15.80	16.76	<	1.45	3.26	
Hog-11-K 01-35	70.82	12.94	17.68	<	1.44	2.72	
Hog-11-K 01-40	85.69	17.99	19.11	<	1.46	2.83	
Hog-11-K 01-45	100.44	21.35	25.62	<	1.42	3.06	
Hog-11-K 01-50	114.63	13.39	21.33	<	1.36	3.28	
Hog-11-K 01-55	128.94	18.01	16.72	<	1.45	2.87	
Hog-11-K 01-60	143.54	17.43	18.42	<	1.41	2.74	

Bohrkern	depth korr	^{210}Pb	^{214}Pb	^{137}Cs	BDD	LOI	t
Hog-11-K-02	[cm]	[Bq/kg]	[Bq/kg]	[Bq/kg]	[g/cm^3]	[%]	[year]
Hog-11-K 02-01	0.12	128.77	12.68	3.79	0.22	47.46	2011
Hog-11-K 02-02	0.49	93.01	14.13	6.28	0.40	45.09	2007
Hog-11-K 02-03	1.02	76.34	17.18	8.36	0.39	29.46	2002
Hog-11-K 02-04	1.75	71.75	9.38	61.97	0.52	23.52	1997
Hog-11-K 02-05	2.54	71.97	13.67	87.48	0.46	29.17	1989
Hog-11-K 02-06	3.36	60.13	13.80	39.21	0.57	24.71	1981
Hog-11-K 02-07	4.22	51.83	12.47	170.18	0.50	29.94	1970
Hog-11-K 02-08	4.97	46.27	11.31	17.20	0.48	29.00	1957
Hog-11-K 02-09	6.06	37.26	14.34	1.07	0.79	16.15	1942
Hog-11-K 02-10	7.96	22.64	18.30	0.52	1.16	6.65	1905
Hog-11-K 02-11	10.50	24.01	21.37	<	1.33	5.61	1876
Hog-11-K 02-12	13.09	17.68	19.86	<	1.20	5.63	
Hog-11-K 02-13	15.60	21.98	21.14	<	1.25	6.11	
Hog-11-K 02-14	18.22	21.90	23.66	<	1.31	5.34	
Hog-11-K 02-15	20.84	19.14	23.56	<	1.25	5.69	
Hog-11-K 02-16	23.41	16.44	22.70	0.46	1.26	5.76	
Hog-11-K 02-17	26.01	20.90	22.33	<	1.26	4.76	
Hog-11-K 02-18	28.69	14.50	22.82	<	1.32	4.67	
Hog-11-K 02-19	31.37	17.74	22.42	<	1.25	4.13	
Hog-11-K 02-20	34.03	17.42	22.40	<	1.29	3.25	
Hog-11-K 02-21	36.63	18.16	23.66	<	1.19	3.60	
Hog-11-K 02-22	39.21	15.80	23.25	<	1.28	3.91	
Hog-11-K 02-23	42.01	10.55	18.98	<	1.39	2.73	
Hog-11-K 02-24	44.80	14.26	24.02	<	1.26	3.83	
Hog-11-K 02-25	47.42	19.13	23.23	<	1.25	4.36	

Bohrkern	depth korr	^{210}Pb	^{214}Pb	^{137}Cs	BDD	LOI	t
Hog-11-K-03	[cm]	[Bq/kg]	[Bq/kg]	[Bq/kg]	[g/cm^3]	[%]	[year]
Hog-11-K 03-01	0.26	96.45	9.88	2.84	0.32	35.24	2011
Hog-11-K 03-02	0.77	94.34	14.33	2.62	0.32	36.37	2008
Hog-11-K 03-03	1.44	74.66	18.21	2.77	0.44	23.78	2004
Hog-11-K 03-04	2.36	77.77	19.81	9.89	0.51	20.72	2000
Hog-11-K 03-05	3.46	67.27	22.57	29.72	0.59	17.61	1995
Hog-11-K 03-06	4.46	62.47	22.43	137.19	0.43	24.64	1989
Hog-11-K 03-07	5.54	61.45	19.94	31.23	0.67	17.78	1985
Hog-11-K 03-08	6.84	58.05	16.29	29.87	0.61	19.67	1977
Hog-11-K 03-09	7.93	57.88	16.76	98.15	0.51	25.35	1967
Hog-11-K 03-10	8.93	52.25	18.28	104.82	0.54	21.02	1955
Hog-11-K 03-11	10.06	47.28	18.97	7.76	0.61	18.21	1940
Hog-11-K 03-12	11.39	31.64	19.41	1.72	0.68	14.89	1913
Hog-11-K 03-13	13.30	27.67	22.85	0.99	1.04	7.86	1882
Hog-11-K 03-14	15.71	24.71	24.97	0.51	1.06	7.28	
Hog-11-K 03-15	18.18	25.76	23.10	<	1.08	6.97	
Hog-11-K 03-16	20.73	22.88	25.14	0.70	1.13	7.02	
Hog-11-K 03-17	23.19	24.54	21.43	<	1.01	6.71	
Hog-11-K 03-18	25.76	22.12	23.15	0.40	1.21	6.04	
Hog-11-K 03-19	28.37	19.10	22.35	<	1.05	6.65	
Hog-11-K 03-20	30.81	21.62	23.10	<	1.06	6.21	
Hog-11-K 03-21	33.49	23.67	22.88	<	1.24	5.81	
Hog-11-K 03-22	36.13	22.65	23.12	<	1.01	5.49	
Hog-11-K 03-23	38.51	21.45	20.82	<	1.02	5.48	
Hog-11-K 03-24	41.20	23.86	21.70	<	1.26	4.79	
Hog-11-K 03-25	44.03	23.76	23.63	<	1.15	5.22	

Hog-11-K 03-30	51.93	22.42	23.89	0.46	1.12	5.14	
Hog-11-K 03-35	65.13	21.76	25.58	<	1.13	4.84	
Hog-11-K 03-40	78.41	22.44	20.35	<	1.13	4.90	
Hog-11-K 03-45	91.68	24.62	26.18	<	1.12	4.51	
Hog-11-K 03-50	104.69	27.21	24.64	<	1.07	4.28	
Hog-11-K 03-55	116.83	21.57	24.54	<	0.98	4.51	
Hog-11-K 03-60	128.04	28.55	22.06	<	0.92	4.77	

Bohrkern	**depth korr**	**^{210}Pb**	**^{214}Pb**	**^{137}Cs**	**BDD**	**LOI**	**t**
Hog-11-K-04	**[cm]**	**[Bq/kg]**	**[Bq/kg]**	**[Bq/kg]**	**[g/cm^3]**	**[%]**	**[year]**
Hog-11-K 04-01	0.28	91.15	15.60	3.20	0.37	29.75	2011
Hog-11-K 04-02	0.93	72.37	12.30	4.07	0.46	26.75	2006
Hog-11-K 04-03	2.23	47.35	13.06	8.98	0.96	10.93	2001
Hog-11-K 04-04	3.75	50.04	17.94	86.67	0.64	16.67	1993
Hog-11-K 04-05	5.04	46.55	17.56	20.56	0.75	14.14	1987
Hog-11-K 04-06	6.37	47.15	17.11	65.77	0.70	18.58	1979
Hog-11-K 04-07	7.54	52.05	17.63	106.34	0.64	22.19	1969
Hog-11-K 04-08	8.73	37.36	18.96	6.63	0.71	16.67	1954
Hog-11-K 04-09	10.45	29.97	18.49	1.41	1.08	9.57	1939
Hog-11-K 04-10	12.87	25.09	17.34	0.59	1.30	5.32	1913
Hog-11-K 04-11	15.51	22.99	20.22	<	1.25	5.77	
Hog-11-K 04-12	18.24	23.51	23.75	<	1.38	5.26	
Hog-11-K 04-13	20.88	23.54	23.44	<	1.17	6.40	
Hog-11-K 04-14	23.38	23.92	24.82	<	1.26	6.54	
Hog-11-K 04-15	26.07	21.12	22.17	<	1.37	6.71	
Hog-11-K 04-16	28.73	22.02	22.41	<	1.23	6.12	
Hog-11-K 04-17	31.54	18.07	20.60	<	1.48	4.67	
Hog-11-K 04-18	34.44	19.47	24.61	0.49	1.31	6.07	
Hog-11-K 04-19	37.25	11.53	18.60	<	1.38	2.98	
Hog-11-K 04-20	40.16	14.37	19.89	<	1.37	4.29	
Hog-11-K 04-21	42.95	12.93	24.44	<	1.30	5.28	
Hog-11-K 04-22	45.87	15.65	26.50	<	1.47	2.96	
Hog-11-K 04-23	48.99	17.85	25.03	<	1.47	3.00	
Hog-11-K 04-24	51.79	19.09	26.84	<	1.19	5.41	
Hog-11-K 04-25	54.28	21.85	27.06	<	1.21	5.67	
Hog-11-K 04-30	63.07	14.87	21.90	<	1.44	4.32	
Hog-11-K 04-35	77.52	16.54	19.95	<	1.32	4.28	
Hog-11-K 04-40	91.87	15.49	17.63	<	1.42	4.30	
Hog-11-K 04-45	106.24	17.18	23.25	<	1.33	4.71	
Hog-11-K 04-50	120.19	16.55	19.32	<	1.33	3.63	
Hog-11-K 04-55	133.51	20.22	22.96	<	1.21	4.64	
Hog-11-K 04-60	147.09	20.41	24.41	<	1.39	4.32	

Bohrkern	**depth korr**	**^{210}Pb**	**^{214}Pb**	**^{137}Cs**	**BDD**	**LOI**	**t**
Lan-11-K-01	**[cm]**	**[Bq/kg]**	**[Bq/kg]**	**[Bq/kg]**	**[g/cm^3]**	**[%]**	**[year]**
Lan-11-K 01-01	0.17	128.95	17.70	3.26	0.23	37.60	2011
Lan-11-K 01-02	0.64	118.67	24.39	5.66	0.37	33.19	2004
Lan-11-K 01-03	1.29	109.42	23.34	8.30	0.41	25.91	1997
Lan-11-K 01-04	2.37	66.80	27.77	19.32	0.71	14.92	1988
Lan-11-K 01-05	3.69	69.79	27.85	79.39	0.61	18.09	1978
Lan-11-K 01-06	4.85	58.86	30.84	52.76	0.60	20.34	1965
Lan-11-K 01-07	6.01	57.18	22.90	81.09	0.63	20.99	1952
Lan-11-K 01-08	7.26	42.01	24.51	9.78	0.65	15.27	1911

Lan-11-K 01-09	9.09	31.24	28.52	1.58	1.08	8.69	
Lan-11-K 01-10	11.44	25.18	20.52	1.16	1.07	6.45	
Lan-11-K 01-11	13.77	21.49	26.29	<	1.02	6.44	
Lan-11-K 01-12	15.99	23.92	33.44	<	0.99	7.54	
Lan-11-K 01-13	18.21	22.09	27.45	<	1.02	7.28	
Lan-11-K 01-14	20.33	19.88	24.01	<	0.89	7.03	
Lan-11-K 01-15	22.34	17.93	24.52	<	0.94	7.73	
Lan-11-K 01-16	24.45	20.37	25.39	<	0.97	7.02	
Lan-11-K 01-17	26.57	18.01	23.53	<	0.94	6.75	
Lan-11-K 01-18	28.56	22.49	26.87	<	0.84	6.90	
Lan-11-K 01-19	30.53	20.65	25.50	<	0.93	7.10	
Lan-11-K 01-20	32.40	24.77	27.08	<	0.76	6.93	
Lan-11-K 01-21	34.23	19.76	23.58	<	0.87	6.21	
Lan-11-K 01-22	36.15	19.17	25.19	<	0.86	6.90	
Lan-11-K 01-23	38.09	21.65	25.85	<	0.89	6.96	
Lan-11-K 01-24	40.13	21.52	27.02	<	0.95	6.65	
Lan-11-K 01-25	42.25	25.29	25.43	<	0.95	6.73	

Bohrkern	**depth korr**	**^{210}Pb**	**^{214}Pb**	**^{137}Cs**	**BDD**	**LOI**	**t**
Lan-11-K-02	**[cm]**	**[Bq/kg]**	**[Bq/kg]**	**[Bq/kg]**	**[g/cm^3]**	**[%]**	**[year]**
Lan-11-K 02-01	0.40	93.16	23.62	5.62	0.53	22.67	2011
Lan-11-K 02-02	1.13	113.42	25.02	8.25	0.45	25.50	2006
Lan-11-K 02-03	1.91	87.25	21.76	11.22	0.59	20.60	1999
Lan-11-K 02-04	2.99	72.05	26.09	62.58	0.77	16.98	1991
Lan-11-K 02-05	4.24	68.45	22.73	76.33	0.79	18.85	1982
Lan-11-K 02-06	5.39	62.67	23.97	56.29	0.64	17.90	1968
Lan-11-K 02-07	6.49	50.34	21.82	69.44	0.72	15.81	1953
Lan-11-K 02-08	7.76	41.29	23.97	14.00	0.82	15.54	1932
Lan-11-K 02-09	9.22	33.78	25.31	3.69	0.91	10.96	1898
Lan-11-K 02-10	11.00	24.96	22.95	1.98	1.10	8.09	
Lan-11-K 02-11	12.85	23.56	24.33	0.63	0.97	8.65	
Lan-11-K 02-12	14.59	24.70	23.61	<	0.99	10.09	
Lan-11-K 02-13	16.35	21.54	20.69	<	1.02	10.04	
Lan-11-K 02-14	17.93	18.71	25.78	<	0.78	9.99	
Lan-11-K 02-15	19.58	18.08	31.59	0.75	1.08	8.17	
Lan-11-K 02-16	21.53	18.57	24.69	<	1.08	6.71	
Lan-11-K 02-17	23.57	21.41	26.02	<	1.16	6.66	
Lan-11-K 02-18	25.59	17.95	25.69	<	1.06	6.65	
Lan-11-K 02-19	27.48	20.40	24.71	<	1.01	6.16	
Lan-11-K 02-20	29.50	22.24	23.09	<	1.21	6.35	
Lan-11-K 02-21	31.54	23.06	25.89	<	1.03	5.72	
Lan-11-K 02-22	33.44	18.98	24.86	<	1.04	6.47	
Lan-11-K 02-23	35.40	19.17	28.57	<	1.11	5.35	
Lan-11-K 02-24	37.55	18.14	28.27	<	1.24	6.31	
Lan-11-K 02-25	39.63	23.06	28.89	<	1.03	6.01	
Lan-11-K 02-30	45.96	17.84	21.63	<	1.16	4.65	
Lan-11-K 02-35	56.58	24.26	27.24	<	1.13	4.80	
Lan-11-K 02-40	66.85	23.43	24.45	<	1.08	4.64	
Lan-11-K 02-45	77.30	21.22	27.39	<	1.16	4.09	
Lan-11-K 02-50	87.87	16.16	29.79	<	1.11	4.66	
Lan-11-K 02-55	98.30	20.18	23.80	<	1.13	4.09	
Lan-11-K 02-60	109.20	18.03	25.43	<	1.20	3.80	

Bohrkern	depth korr	^{210}Pb	^{214}Pb	^{137}Cs	BDD	LOI	t
Lan-11-K-03	[cm]	[Bq/kg]	[Bq/kg]	[Bq/kg]	[g/cm^3]	[%]	[year]
Lan-11-K 03-00	0.20	159.57	11.01	3.81	0.31	37.96	2011
Lan-11-K 03-01	0.59	110.76	15.62	9.22	0.28	37.40	2007
Lan-11-K 03-02	1.04	121.21	17.00	8.22	0.40	35.95	2005
Lan-11-K 03-03	1.79	116.15	15.32	6.67	0.61	24.99	2001
Lan-11-K 03-04	2.85	89.44	22.50	10.14	0.66	17.88	1994
Lan-11-K 03-05	4.01	67.93	21.66	14.12	0.67	17.01	1988
Lan-11-K 03-06	5.24	73.04	22.73	58.87	0.71	14.56	1983
Lan-11-K 03-07	6.84	48.79	21.51	95.13	1.05	12.35	1976
Lan-11-K 03-08	8.58	43.03	16.85	28.28	0.88	16.30	1969
Lan-11-K 03-09	9.98	50.13	18.12	34.13	0.73	17.81	1962
Lan-11-K 03-10	11.22	51.50	18.39	46.54	0.69	17.17	1954
Lan-11-K 03-11	12.93	46.60	17.50	21.20	1.20	11.65	1942
Lan-11-K 03-12	15.17	25.88	18.41	5.14	1.16	7.21	1904
Lan-11-K 03-13	17.32	26.36	19.29	2.09	1.01	5.05	1879
Lan-11-K 03-14	19.32	22.53	19.92	1.23	1.03	8.70	
Lan-11-K 03-15	21.59	22.81	22.17	1.93	1.31	7.33	
Lan-11-K 03-16	23.82	24.73	20.16	0.73	0.97	6.76	
Lan-11-K 03-17	25.83	20.89	24.14	0.77	1.08	6.97	
Lan-11-K 03-18	28.03	26.12	22.51	0.64	1.15	6.16	
Lan-11-K 03-19	30.33	18.89	20.97	<	1.18	6.04	
Lan-11-K 03-20	32.47	23.19	21.47	0.44	0.98	6.24	
Lan-11-K 03-21	34.56	22.86	23.08	0.44	1.12	5.82	
Lan-11-K 03-22	36.99	19.78	22.88	0.46	1.31	4.66	
Lan-11-K 03-23	39.41	17.05	19.13	0.59	1.10	5.25	
Lan-11-K 03-24	41.55	13.82	19.93	<	1.06	6.19	
Lan-11-K 03-25	48.17	22.27	24.85	0.42	1.12	5.83	

Bohrkern	depth korr	^{210}Pb	^{214}Pb	^{137}Cs	BDD	LOI	t
Lan-11-K-04	[cm]	[Bq/kg]	[Bq/kg]	[Bq/kg]	[g/cm^3]	[%]	[year]
Lan-11-K 04-01	0.17	107.01	13.88	5.89	0.27	36.04	2011
Lan-11-K 04-02	0.53	108.32	18.00	7.45	0.28	33.88	2008
Lan-11-K 04-03	0.97	93.42	15.72	6.04	0.38	33.49	2005
Lan-11-K 04-04	1.49	78.93	17.82	10.80	0.38	29.68	2001
Lan-11-K 04-05	2.38	47.74	14.88	12.73	0.73	15.25	1997
Lan-11-K 04-06	3.55	46.28	12.71	11.63	0.64	11.86	1993
Lan-11-K 04-07	4.73	46.66	14.24	90.18	0.70	12.40	1989
Lan-11-K 04-08	5.98	52.54	17.71	75.71	0.73	12.53	1983
Lan-11-K 04-09	7.22	42.37	18.59	24.58	0.70	13.97	1976
Lan-11-K 04-10	8.37	48.40	19.15	37.03	0.64	13.78	1970
Lan-11-K 04-11	9.56	44.94	15.83	79.94	0.73	12.03	1962
Lan-11-K 04-12	10.90	43.14	20.12	25.29	0.78	8.89	1949
Lan-11-K 04-13	12.64	27.85	16.34	3.54	1.10	6.19	1932
Lan-11-K 04-14	14.68	29.17	16.62	1.75	1.05	4.36	1910
Lan-11-K 04-15	16.79	14.77	16.17	1.00	1.16	3.84	
Lan-11-K 04-16	18.97	20.13	17.16	1.21	1.12	3.74	
Lan-11-K 04-17	21.14	19.81	18.27	0.59	1.14	4.37	
Lan-11-K 04-18	23.37	20.65	18.18	<	1.19	3.49	
Lan-11-K 04-19	25.44	15.56	16.26	<	0.98	5.15	
Lan-11-K 04-20	27.40	20.57	21.68	0.64	1.09	4.74	
Lan-11-K 04-21	29.42	20.98	19.69	0.53	1.03	4.62	
Lan-11-K 04-22	31.44	18.84	18.94	<	1.08	4.71	
Lan-11-K 04-23	33.63	19.74	18.53	<	1.22	3.91	
Lan-11-K 04-24	35.60	18.04	18.43	<	0.84	5.17	

Lan-11-K 04-25	37.44	18.39	20.60	0.61	1.09	4.04	

Bohrkern	depth korr	^{210}Pb	^{214}Pb	^{137}Cs	BDD	LOI	t
Lan-11-K-05	[cm]	[Bq/kg]	[Bq/kg]	[Bq/kg]	[g/cm^3]	[%]	[year]
Lan-11-K 05-01	0.07	142.53	17.48	3.27	0.13	53.63	2011
Lan-11-K 05-02	0.28	112.02	13.84	4.32	0.20	33.17	2006
Lan-11-K 05-03	0.61	75.25	17.40	6.88	0.27	37.06	2000
Lan-11-K 05-04	1.11	85.44	19.19	8.61	0.40	26.18	1996
Lan-11-K 05-05	1.92	67.10	20.37	10.13	0.56	19.02	1987
Lan-11-K 05-06	3.09	65.47	23.09	62.11	0.76	16.70	1979
Lan-11-K 05-07	4.37	61.09	20.60	116.11	0.67	17.89	1971
Lan-11-K 05-08	5.68	44.59	19.99	30.20	0.80	16.68	1956
Lan-11-K 05-09	6.91	42.00	21.63	54.69	0.56	16.66	1947
Lan-11-K 05-10	8.18	40.24	27.53	55.24	0.83	15.81	1935
Lan-11-K 05-11	9.68	35.05	24.42	9.40	0.81	13.55	1920
Lan-11-K 05-12	11.31	30.90	23.23	3.11	0.89	9.63	1897
Lan-11-K 05-13	13.52	23.74	23.54	0.58	1.33	6.10	
Lan-11-K 05-14	15.98	24.87	23.57	0.67	1.10	6.41	
Lan-11-K 05-15	18.05	29.32	24.28	<	0.97	8.01	
Lan-11-K 05-16	20.03	21.17	23.86	0.67	1.02	7.68	
Lan-11-K 05-17	22.30	23.53	24.28	<	1.25	7.11	
Lan-11-K 05-18	24.46	21.46	21.73	<	0.90	7.30	
Lan-11-K 05-19	26.45	24.27	23.63	<	1.07	6.74	
Lan-11-K 05-20	28.58	21.35	26.01	<	1.05	6.99	
Lan-11-K 05-21	30.62	23.55	23.14	<	0.98	6.31	
Lan-11-K 05-22	32.56	22.41	22.42	<	0.94	5.79	
Lan-11-K 05-23	34.81	24.07	22.27	<	1.27	5.83	
Lan-11-K 05-24	37.24	16.88	24.66	<	1.10	4.96	
Lan-11-K 05-25	39.28	19.31	23.76	0.60	0.88	5.47	

Bohrkern	depth korr	^{210}Pb	^{214}Pb	^{137}Cs	BDD	LOI	t
Lan-11-K-06	[cm]	[Bq/kg]	[Bq/kg]	[Bq/kg]	[g/cm^3]	[%]	[year]
Lan-11-K 06-01	0.46	74.30	19.07	7.79	0.58	18.89	2011
Lan-11-K 06-02	1.35	59.09	19.13	4.96	0.49	14.55	2007
Lan-11-K 06-03	2.34	52.49	20.89	10.83	0.65	10.12	2004
Lan-11-K 06-04	3.68	43.19	19.38	35.39	0.84	8.50	2001
Lan-11-K 06-05	5.26	39.11	17.26	36.77	0.92	8.29	1997
Lan-11-K 06-06	6.99	32.23	15.61	15.01	0.98	6.57	1993
Lan-11-K 06-07	8.75	38.41	16.88	14.16	0.97	9.15	1989
Lan-11-K 06-08	10.41	33.75	16.45	12.25	0.88	8.48	1984
Lan-11-K 06-09	11.94	36.72	19.53	18.01	0.85	11.44	1979
Lan-11-K 06-10	13.69	29.18	16.88	24.64	1.10	7.15	1974
Lan-11-K 06-11	15.30	33.36	15.62	82.88	0.70	10.91	1968
Lan-11-K 06-12	16.78	33.34	16.53	34.67	0.97	9.86	1962
Lan-11-K 06-13	18.52	28.34	15.75	6.42	0.97	7.82	1951
Lan-11-K 06-14	20.51	28.14	14.74	2.61	1.19	5.29	1939
Lan-11-K 06-15	22.51	22.60	14.10	1.24	0.96	5.60	1911
Lan-11-K 06-16	24.47	18.40	15.00	1.36	1.13	4.13	1875
Lan-11-K 06-17	26.59	14.41	16.36	0.62	1.11	2.96	
Lan-11-K 06-18	28.85	21.15	15.20	<	1.25	3.02	
Lan-11-K 06-19	31.24	20.32	15.03	<	1.25	3.03	
Lan-11-K 06-20	33.72	22.74	17.34	0.37	1.36	3.86	
Lan-11-K 06-21	36.56	17.49	16.18	<	1.63	2.58	

Lan-11-K 06-22	39.24	17.54	16.07	0.40	1.17	2.53	
Lan-11-K 06-23	41.76	21.95	16.75	<	1.46	3.19	
Lan-11-K 06-24	44.48	20.62	16.59	<	1.39	2.32	
Lan-11-K 06-25	47.20	17.91	18.50	<	1.44	2.45	

Bohrkern	**depth korr**	**^{210}Pb**	**^{214}Pb**	**^{137}Cs**	**BDD**	**LOI**	**t**
Nor-11-K-01	**[cm]**	**[Bq/kg]**	**[Bq/kg]**	**[Bq/kg]**	**[g/cm^3]**	**[%]**	**[year]**
Nor-11-K 01-01	0.35	104.22	23.66	6.45	0.59	15.15	2011
Nor-11-K 01-02	1.22	100.80	24.64	6.75	0.83	13.38	2008
Nor-11-K 01-03	2.31	84.92	22.48	7.47	0.96	12.69	2004
Nor-11-K 01-04	3.25	71.71	23.92	7.42	0.56	9.89	1999
Nor-11-K 01-05	4.31	60.12	22.87	9.63	1.08	8.73	1997
Nor-11-K 01-06	5.56	40.85	20.59	14.15	0.84	5.97	1993
Nor-11-K 01-07	6.65	39.14	17.73	8.79	0.81	5.30	1991
Nor-11-K 01-08	7.71	52.80	24.54	63.41	0.79	8.06	1987
Nor-11-K 01-09	8.70	44.96	21.57	54.66	0.74	6.98	1985
Nor-11-K 01-10	9.76	46.89	23.29	31.11	0.88	7.46	1982
Nor-11-K 01-11	10.98	43.11	23.09	24.19	1.00	7.74	1979
Nor-11-K 01-12	12.26	49.70	24.33	28.07	0.97	8.61	1975
Nor-11-K 01-13	13.52	38.06	23.01	30.02	0.98	6.98	1972
Nor-11-K 01-14	14.80	39.73	22.00	37.16	0.98	7.97	1966
Nor-11-K 01-15	16.04	39.61	22.35	15.47	0.95	8.97	1963
Nor-11-K 01-16	17.22	38.84	23.62	25.68	0.89	8.51	1958
Nor-11-K 01-17	18.36	34.16	22.33	10.46	0.87	8.06	1953
Nor-11-K 01-18	19.47	33.48	22.60	8.14	0.84	8.13	1948
Nor-11-K 01-19	20.53	33.25	21.48	7.47	0.79	7.98	1944
Nor-11-K 01-20	21.65	28.34	19.47	4.70	0.93	6.49	1940
Nor-11-K 01-21	22.81	24.81	19.46	5.21	0.82	6.15	1933
Nor-11-K 01-22	23.92	25.13	19.74	2.71	0.86	5.34	1928
Nor-11-K 01-23	24.97	24.29	17.83	2.28	0.72	5.01	1924
Nor-11-K 01-24	26.04	23.62	19.26	1.28	0.89	4.68	1921
Nor-11-K 01-25	27.17	24.16	18.96	1.55	0.79	4.65	1915
Nor-11-K 01-30	30.92	23.87	21.01	1.41	0.96	5.08	1911
Nor-11-K 01-35	37.98	19.50	23.67	0.94	1.14	4.59	
Nor-11-K 01-40	45.72	24.45	22.14	<	1.16	4.26	
Nor-11-K 01-45	53.85	21.42	21.77	<	1.25	4.04	
Nor-11-K 01-50	62.19	19.97	22.74	<	1.21	3.39	
Nor-11-K 01-55	70.13	20.94	24.22	<	1.14	4.38	
Nor-11-K 01-60	77.68	22.87	25.44	<	1.10	4.10	

Bohrkern	**depth korr**	**^{210}Pb**	**^{214}Pb**	**^{137}Cs**	**BDD**	**LOI**	**t**
Nor-11-K-02	**[cm]**	**[Bq/kg]**	**[Bq/kg]**	**[Bq/kg]**	**[g/cm^3]**	**[%]**	**[year]**
Nor-11-K 02-01	0.24	100.36	20.32	4.95	0.35	15.92	2011
Nor-11-K 02-02	0.94	105.25	19.73	5.18	0.65	15.92	2009
Nor-11-K 02-03	1.84	101.20	20.13	6.06	0.63	14.65	2005
Nor-11-K 02-04	2.85	80.52	22.53	5.92	0.77	12.56	2001
Nor-11-K 02-05	4.01	71.52	20.05	6.91	0.81	10.94	1997
Nor-11-K 02-06	5.09	57.34	18.85	8.62	0.64	10.45	1992
Nor-11-K 02-07	6.30	46.96	21.61	26.86	0.95	7.22	1989
Nor-11-K 02-08	7.74	48.82	22.51	9.04	0.92	7.15	1986
Nor-11-K 02-09	9.03	56.40	20.14	82.67	0.77	9.63	1982
Nor-11-K 02-10	10.22	50.35	21.48	28.36	0.81	8.68	1978
Nor-11-K 02-11	11.45	47.70	20.73	22.25	0.81	9.58	1973

Nor-11-K 02-12	12.75	46.82	20.41	21.26	0.91	8.86	1968
Nor-11-K 02-13	14.16	33.99	17.18	16.86	0.94	7.61	1962
Nor-11-K 02-14	15.61	34.67	18.39	32.50	0.95	7.42	1957
Nor-11-K 02-15	16.94	35.15	20.84	36.43	0.79	9.28	1951
Nor-11-K 02-16	18.24	30.80	15.77	21.06	0.93	8.77	1946
Nor-11-K 02-17	19.67	35.89	22.59	10.11	0.95	8.58	1939
Nor-11-K 02-18	21.05	27.14	18.07	4.57	0.86	8.39	1930
Nor-11-K 02-19	22.27	24.82	18.91	3.96	0.74	8.27	1923
Nor-11-K 02-20	23.65	28.63	18.90	2.01	1.04	6.51	1918
Nor-11-K 02-21	25.22	29.48	20.27	1.62	0.98	6.47	1904
Nor-11-K 02-22	26.78	26.17	17.30	1.37	1.01	5.63	1881
Nor-11-K 02-23	28.35	20.07	19.26	<	1.00	5.57	
Nor-11-K 02-24	30.04	22.40	17.89	<	1.14	5.29	
Nor-11-K 02-25	31.85	22.60	16.75	<	1.14	4.13	
Nor-11-K 02-30	36.80	22.47	18.50	<	1.02	5.04	
Nor-11-K 02-35	44.89	26.30	24.77	<	1.03	5.45	
Nor-11-K 02-40	53.15	22.88	21.06	<	1.06	4.97	
Nor-11-K 02-45	61.56	23.63	20.52	<	1.06	4.85	

Anlage 1

- Publikationsliste -

fwu

Paper (peer reviewed)

Arns, A., Wahl., T., Jensen, J. (in review): A consistent return level assessment considering present day and future mean sea level conditions. Die Küste ICHE Special Issue.

Arns, A., Wahl, T., Haigh, I.D., Jensen, J. (in review): Determining return water levels at un-gauged coastal sites: a case study for northern Germany, Ocean Dynamics, invited paper for the Coastal Dynamics special issue of Ocean Dynamics.

Arns, A., Wahl, Jensen, J. (in review): Impact of sea level rise on extreme water levels in the northern part of the German Bight. Coastal Engineering.

Arns, A., Wahl, T., Dangendorf, S., Mudersbach, C., Jensen, J. (2013): Ermittlung regionalisierter Extremwasserstände für die Schleswig-Holsteinische Nordseeküste. Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, HW57, 2013, H. 6.

Arns, A., Wahl, T., Haigh, I., Pattiaratchi, C., Jensen, J.(2013): Estimating extreme water level probabilities: a comparison of the direct methods and recommendations for best practice, Coastal Engineering, Volume 81, Pages 51-66, http://dx.doi.org/10.1016/j.coastaleng.2013.07.003.

Mudersbach, C., Wahl, T., Haigh, I.D., Jensen, J., 2013. Trends in extreme high sea levels along the German north sea coastline compared to regional mean sea level changes. Continental Shelf Research (in press). ISSN 0278–4343. http://dx.doi.org/10.1016/j. csr.2013.06.016.

Konferenzbeiträge

Arns, A., Jensen, J., Wahl, T. (2014): A consistent return level assessment considering present day and future mean sea level conditions. The 11th International Conference on Hydroscience and Engineering ICHE, Hamburg, Germany, submitted.

Jensen, J., Arns, A., Mudersbach, C., Schüttrumpf, H., Wöffler, T., von Eynatten, H., Schindler, M., Jensen, F. (2014): Investigating the future of Schleswig-Holsteins Halligen: Results and implications. The 34th International Conference on Coastal Engineering, Seoul, PR Korea, angenommen.

Arns, A., Jensen, J., Mudersbach, C. (2014): On estimating return water levels in un-gauged areas: a methodology combing numerical model output and extreme value analyses. The 34th International Conference on Coastal Engineering, Seoul, PR Korea, angenommen.

Arns, A., Jensen, J. (2014): Estimating present day return water levels around the northern German coastline. The 7th Chinese-German Joint Symposium on Hydraulic and Ocean Engineering (JOINT2012), Hannover, Germany.

Arns, A., Jensen, J., Mudersbach, C. (2013): Regionalisierung extremer Wasserstände in unbepegelten Küstengebieten: Eine Methodik zur Kopplung numerischer und statistischer Modelle. 13. DKKV-Forum Katastrophenvorsorge, Hamburg.

Arns, A., Jensen, J. (2013): Extreme water level statistics in the German Bight: A best practice approach. International Short Conference on Advances in Extreme Value Analysis and Application to Natural Hazards (EVAN2013), Siegen.

Jensen, J., Arns, A., Dangendorf, S., Mudersbach, C., Wahl, T. (2013): Vom Wasserstand zum Risiko, HZG-Workshop Dialog: Küstenforschung, Küstennutzung und Küstenschutz, 4.-6. März 2013, Hamburg, Germany.

Arns, A., Wahl, T., Haigh, I.D., Jensen, J. (2013): Spatial extreme value analyses for Schleswig-Holsteins coastline and Islands, Coastal Dynamics 2013, Bordeaux, France.

Arns, A., Wahl, T., Jensen, J. (2012): Statistics of extreme still water levels – between policy and objectivity, 10th International Conference on Hydroscience and Engineering (ICHE), Orlando, USA.

Arns, A., Wahl, T., Haigh, I.D., Mudersbach, C., Jensen, J., Pattiaratchi, C. (2012): Changes in MSL and Extreme Sea Levels in Western Australia and Northern Europe, The 6th Chinese-German Joint Symposium on Hydraulic and Ocean Engineering (JOINT2012), Keelung, Taiwan.

Wöffler, T., Schüttrumpf, H., Arns, A., von Eynatten, H., Häußling, R., Jensen, J., Schindler, M. (2012): Development of Coastal Protection Measures for Small Islands in the Wadden Sea using a Risk-Based Approach, Proceedings of the 33nd International Conference on Coastal Engineering, Santander, Spain.

Jensen, J., Dangendorf, S., Arns, A. (2012): How does seasonal mean sea level affect extreme sea levels in the German Bight? Proc. of the 33th International Conference on Coastal Engineering, Santander, Spain.

Arns, A., von Eynatten, H., Häussling, R., van Riesen, D., Schüttrumpf, H., Jensen, J. (2011): Developing Sustainable Coastal Protection- and Management Strategies for Schleswig-Holstein's Halligen Considering Climate Changes (ZukunftHallig), 5th International Short Conference on Applied Coastal Research, Aachen.

Arns, A., von Eynatten, H., Häussling, R., van Riesen, D., Schüttrumpf, H., Jensen, J. (2011): Developing Sustainable Coastal Protection- and Management Strategies for Schleswig-

Holstein's Halligen Considering Climate Changes (ZukunftHallig), Geophysical Research Abstracts, Vol. 13, EGU General Assembly 2011, Vienna, Austria.

Arns, A., Jensen, J. (2010): Developing sustainable coastal protection- and management strategies for Schleswig-Holstein's Halligen considering climate change (ZukunftHallig) - Subproject A: Hydrodynamic analyses in the region of the Halligen, Tagungsband des 1. CoastDoc-Seminars, In: Mitteilungen des Forschungsinstituts Wasser und Umwelt, Heft 2, ISSN 1868-6613. http://www.bau.uni-siegen.de/fwu/wb/veranstaltungen/beitraege_coastdoc2010.pdf

IWW

Paper (peer reviewed)

Grimm, C., Wöffler, T., Bchmann, D., Schüttrumpf, H. (2012): Risk Management in Coastal Engineering - Applied Coastal Research Projects for Northern Germany. Water and Waste, 53-55.

Konferenzbeiträge

Wöffler, T., Schüttrumpf, H., Schindler, M., von Eynatten, H., Häussling, R., Arns, A., Jensen, J. (2014): Development and evaluation of coastal protection measures for small islands in the wadden sea. In: Proceedings of 34rd Conference on Coastal Engineering, 2014. Seoul, Korea (in Vorbereitung).

Wöffler, T.; Schüttrumpf, H. (2013): Untersuchungen zur Entwicklung nachhaltiger Küstenschutzmaßnahmen für die Halligen
Poster zum Dialog Küstenforschung, Küstennutzung und Küstenschutz, 04. - 06.03.2013, Hamburg.

Schüttrumpf, H.; Wöffler, T.; Arns, A.; Jensen, J. (2013): Sturmflutschutz auf den nordfriesischen Halligen Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen Heft 48 (2013) Wasserbaukolloquium 2013 Technischer und organisatorischer Hochwasserschutz – Bauwerke, Anforderungen, Modelle (Technical and Organizational Flood Protection - Structures, Requirements, Models) ISBN 978-3-86780-318-2.

Wöffler, T., Grimm,C., Bachmann, D., Jensen, J., Mudersbach, C., Fröhle, P., Thorenz, F., Schüttrumpf, H. (2012): Risk Management in Coastal Engineering In: Applied Research Projects for the German Wadden Sea. EGU General Assembly 2012, Vienna, Austria.

Wöffler, T., Schüttrumpf, H. (2012): Risikoorientierte Gefährdungsanalysen und Entwicklung nachhaltiger Küstenschutzkonzepte für die Halligen. 17. KFKI Seminar zur Küstenforschung, 2012, Bremerhaven.

Wöffler, T., Schüttrumpf, H., Arns, A., von Eynatten, H., Häussling, R., Jensen, J., Schindler, M. (2012): Development of coastal protection measures for small islands in the wadden sea using a risk-based approach. In: Proceedings of 33rd Conference on Coastal Engineering, 2012. Santander, Spain.

GZG

Paper (peer reviewed)

Malte Schindler & Katharina Willim: Berechnung langjähriger Überflutungshäufigkeiten für die Halligen Hooge, Langeneß und Nordstrandischmoor auf Basis regionaler Pegeldaten. (in review, Coastline Report)

Malte Schindler, Volker Karius, Matthias Deicke, Hilmar von Eynatten:Measuring sediment deposition and accretion on marshland - part I: Methodical evaluation and development. (in review, Estuarine, Coastal and Shelf Science)

Malte Schindler, Volker Karius, Matthias Deicke, Hilmar von Eynatten: Measuring sediment deposition and accretion on marshland - part II: The case of the North Frisian Halligen. (in review, Estuarine, Coastal and Shelf Science)

Konferenzbeiträge

Malte Schindler, Volker Karius, Matthias Deicke, Hilmar von Eynatten (2014): Abschluss des Forschungsprojektes "ZukunftHallig" 2010-2014 - Ergebnisse und Perspektiven der sedimentologischen Untersuchungen - Jahrestagung des Arbeitskreises Geographie der Meere und Küsten (AMK), Wilhelmshaven.

Malte Schindler, Volker Karius, Matthias Deicke & Hilmar von Eynatten (2013): Die Nordfriesischen Halligen im Zeichen des Klimawandels - Jahrestagung des Arbeitskreises Geographie der Meere und Küsten (AMK), Köln.

Katharina Willim, Malte Schindler, Stefan Erasmi, Hilmar von Eynatten (2013): Berechnung langjähriger Überflutungshäufigkeiten für die Halligen Hooge, Langeneß und Nordstrandischmoor - Jahrestagung des Arbeitskreises Geographie der Meere und Küsten (AMK), Köln.

Malte Schindler, Volker Karius, Matthias Deicke & Hilmar von Eynatten (2012): Sediment accumulation and surface elevation change on North Frisian Halligen - GV & Sediment Meeting, Hamburg.

Theide Wöffler, Holger Schüttrumpf, Arne Arns, Hilmar von Eynatten, Roger Häußling, Jürgen Jensen, Malte Schindler (2012): Development of coastal protection measures for small islands in the Wadden Sea using a risk-based approach - ICCE 2012, International Conference on Coastal Engineering, Proceedings.

Malte Schindler, Volker Karius, Matthias Deicke & Hilmar von Eynatten (2012): Recent marshland evolution on North Frisian Halligen, N-Germany: The interaction of storm surges and sediment accumulation - The 3rd joint IGCP588 / INQUA 1001 conference, Kiel.

Malte Schindler, Volker Karius, Matthias Deicke & Hilmar von Eynatten (2012): Sedimentakkumulation als Relief gestaltender Prozess der nordfriesischen Halligen - Jahrestagung des Arbeitskreises Geographie der Meere und Küsten (AMK), Mainz.

Malte Schindler, Volker Karius, Matthias Deicke & Hilmar von Eynatten (2011): Developing Sustainable Coastal Protection- and Management Strategies for Schleswig-Holstein's Halligen Considering Climate Changes (Zukunft Hallig) Subproject D: Sedimentological analyses on the Halligen - Jahrestagung des Arbeitskreises Geographie der Meere und Küsten (AMK), Bremen.

IfS

Konferenzbeiträge

Wöffler, T., Schüttrumpf, H., Arns, A., von Eynatten, H., Häußling, R., Jensen, J., Schindler, M. (2012): Development of Coastal Protection Measures for Small Islands in the Wadden Sea using a Risk-Based Approach, Proceedings of the 33nd International Conference on Coastal Engineering, Santander, Spain.

Arns, A., von Eynatten, H., Häussling, R., van Riesen, D., Schüttrumpf, H., Jensen, J. (2011): Developing Sustainable Coastal Protection- and Management Strategies for Schleswig-Holstein’s Halligen Considering Climate Changes (ZukunftHallig), 5th International Short Conference on Applied Coastal Research, Aachen.

Arns, A., von Eynatten, H., Häussling, R., van Riesen, D., Schüttrumpf, H., Jensen, J. (2011): Developing Sustainable Coastal Protection- and Management Strategies for Schleswig-Holstein’s Halligen Considering Climate Changes (ZukunftHallig), Geophysical Research Abstracts, Vol. 13, EGU General Assembly 2011, Vienna, Austria.

Anlage 2

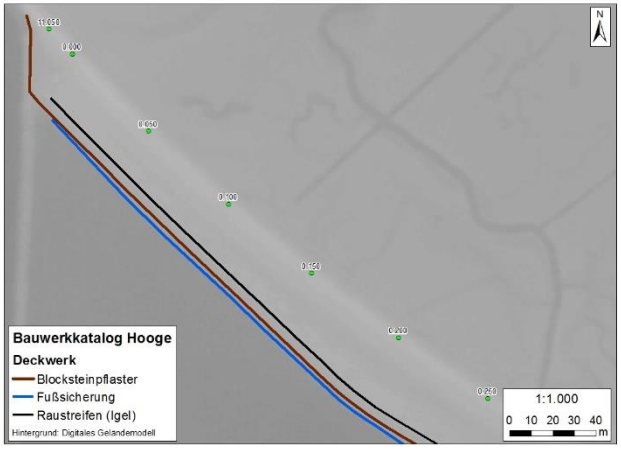
- Bauwerkskatalog Hooge (LKN) -

Bauwerkskatalog Hooge

Deckwerke

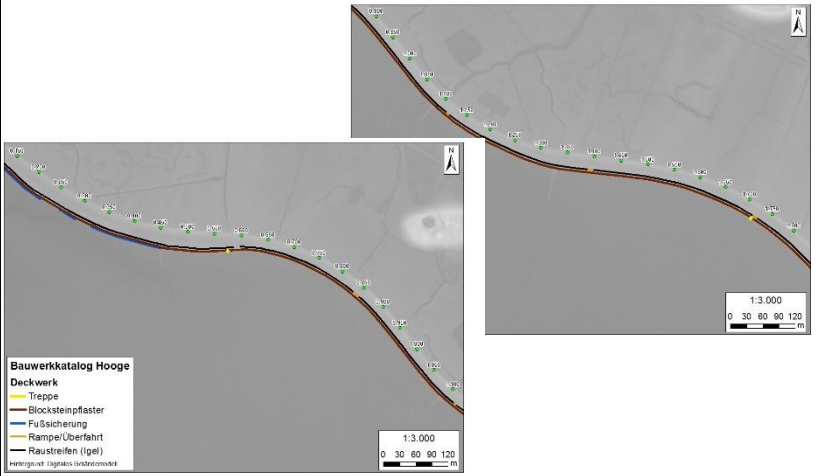
Kilometer: 0+000 bis 0+150

Bauwerksinformationen		***Regelquerschnitt***
Bauweise:	*Pflasterung mit behauenen Feldsteinen, mit Asphalt vergossen*	*Kein Regelquerschnitt verfügbar*
Ø-Höhe:	*1,97m NN*	
Ø-Breite:	*Keine Angaben*	
Raustreifen:	*Setzsteindeckwerk (Hand)*	
Ø-Höhe:	*2,69m NN*	
Ø-Breite:	*Keine Angaben*	
Watthöhe:	*0,53m NN*	
Schäden:	*keine*	
Anmerkungen:	*starker Bewuchs der Überschlagsicherung*	
Baujahr:	*1923*	
Letzte Verstärkung:	*Keine Angaben*	

Foto und Lage	***Details in Karte***
	

Kilometer: 0+150 bis 1+760

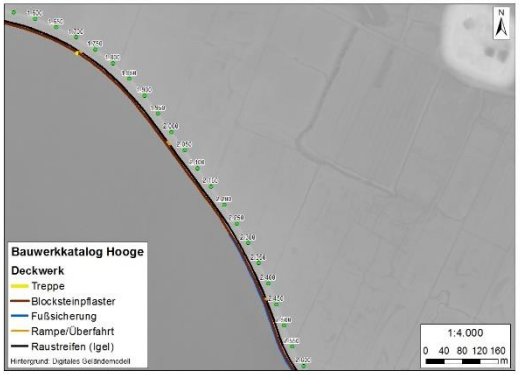
Bauwerksinformationen		***Regelquerschnitt***
Bauweise:	*Pflasterung mit geschlagenen Granitblöcken, Feldsteinen, Granitquader mit Asphalt vergossen*	*Kein Regelquerschnitt verfügbar*
Ø-Höhe:	*2,11m NN*	
Ø-Breite:	*Keine Angaben*	
Raustreifen:	*Setzsteindeckwerk (Hand)*	
Ø-Höhe:	*2,87m NN*	
Ø-Breite:	*Keine Angaben*	
Watthöhe:	*0,38m NN*	
Schäden:	*keine*	
Anmerkungen:	*starker Bewuchs der Überschlagsicherung, im Raustreifen sind mehrere Einkerbung zur Bildung von Wasserpolster vorhanden, teilweise Fußsicherungen vorhanden*	
Baujahr:	*1925*	
Letzte Verstärkung:	*Keine Angaben*	

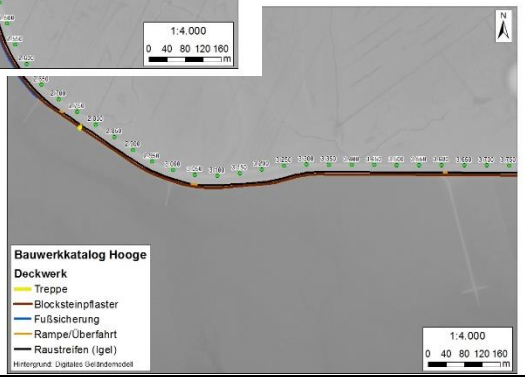
Foto und Lage	***Details in Karte***
	

Kilometer: 1+760 bis 3+760

Bauwerksinformationen		***Regelquerschnitt***
Bauweise:	*Blocksteinpflasterung mit Basaltsäulen*	*Kein Regelquerschnitt verfügbar*
Ø-Höhe:	*2,08m NN*	
Ø-Breite:	*Keine Angaben*	
Raustreifen:	*Setzsteindeckwerk (Hand)*	
Ø-Höhe:	*2,8m NN*	
Ø-Breite:	*Keine Angaben*	
Watthöhe:	*0,51m NN*	
Schäden:	*keine*	
Anmerkungen:	*Teilweise Überschlagsicherung und Raustreifen überwachsen*	
Baujahr:	*Keine Angaben*	
Letzte Verstärkung:	*Keine Angaben*	

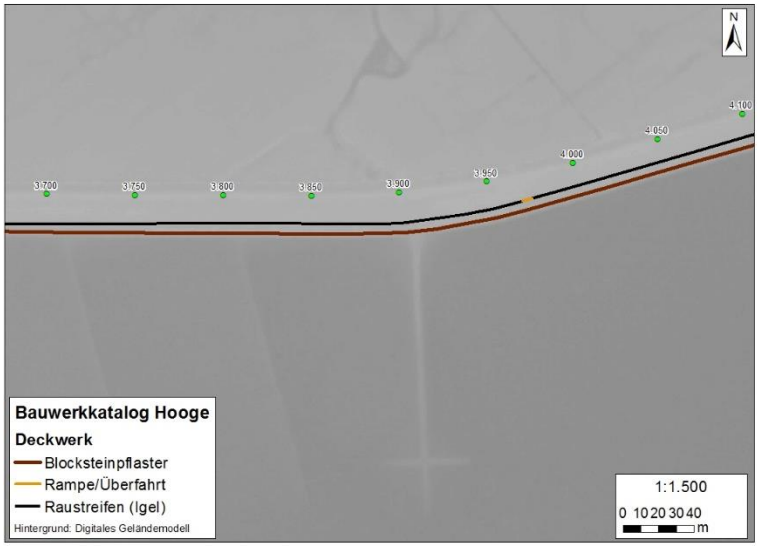
Foto und Lage	***Details in Karte***





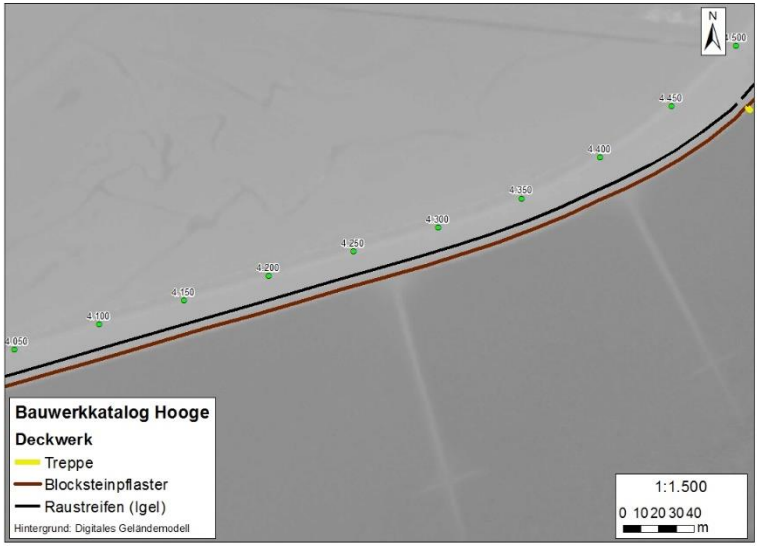
Kilometer: 3+760 bis 4+060

Bauwerksinformationen		***Regelquerschnitt***
Bauweise:	*Blocksteinpflasterung mit Basaltsäulen, Überschlagsicherung mit Granitquader/-blöcken*	*Kein Regelquerschnitt verfügbar*
Ø-Höhe:	*1,88m NN*	
Ø-Breite:	*Keine Angaben*	
Raustreifen:	*Setzsteindeckwerk (Hand)*	
Ø-Höhe:	*2,22m NN*	
Ø-Breite:	*Keine Angaben*	
Watthöhe:	*0,44m NN*	
Schäden:	*Keine*	
Anmerkungen:	*Rausstreifen ist stark überwachsen, im Raustreifen sind mehrere Einkerbung zur Bildung von Wasserpolster vorhanden*	
Baujahr:	*Keine Angaben*	
Letzte Verstärkung:	*Keine Angaben*	

Foto und Lage	***Details in Karte***
	

Kilometer: 4+060 bis 4+480

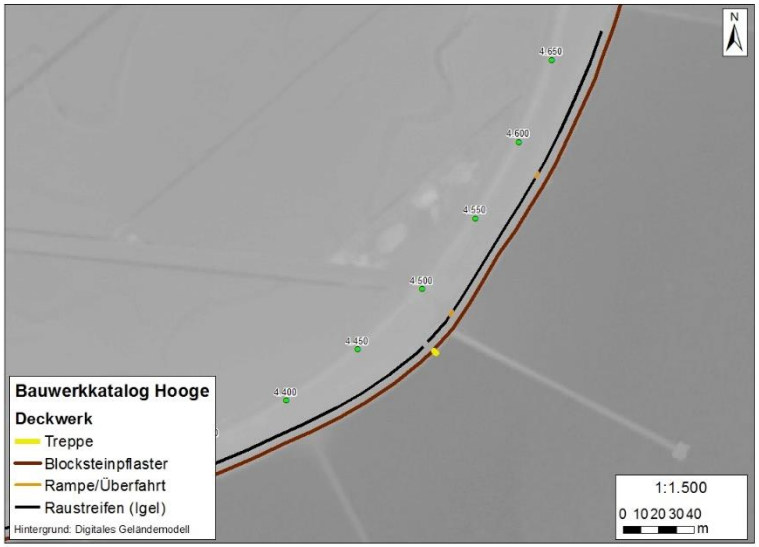
Bauwerksinformationen		***Regelquerschnitt***
Bauweise:	*Blocksteinpflasterung mit Basaltsäulen, Überschlagsicherung mit Granitquader/-blöcken*	*Kein Regelquerschnitt verfügbar*
Ø-Höhe:	*1,87m NN*	
Ø-Breite:	*Keine Angaben*	
Raustreifen:	*Setzsteindeckwerk (Hand)*	
Ø-Höhe:	*Keine Angaben*	
Ø-Breite:	*Keine Angaben*	
Watthöhe:	*0,29m NN*	
Schäden:	*keine*	
Anmerkungen:	*Verfügbare Vermessungsdaten nicht aktuell*	
Baujahr:	*1923*	
Letzte Verstärkung:	*2005*	

Foto und Lage	***Details in Karte***
	

Kilometer: 4+480 bis 4+620

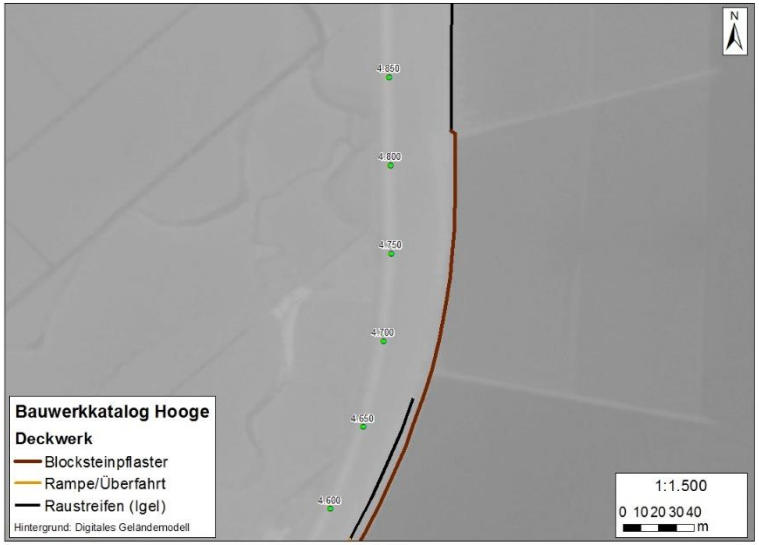
Bauwerksinformationen		***Regelquerschnitt***
Bauweise:	*Blocksteinpflasterung mit Basaltsäulen, Überschlagsicherung mit Granitquader/-blöcken*	*Kein Regelquerschnitt verfügbar*
Ø-Höhe:	*1,77m NN*	
Ø-Breite:	*Keine Angaben*	
Raustreifen:	*Setzsteindeckwerk (Hand)*	
Ø-Höhe:	*2,12m NN*	
Ø-Breite:	*Keine Angaben*	
Watthöhe:	*0,36m NN*	
Schäden:	*Keine*	
Anmerkungen:	*Raustreifen sehr stark überwachsen, teilweise nicht mehr sichtbar*	
Baujahr:	*Keine Angaben*	
Letzte Verstärkung:	*Keine Angaben*	

Foto und Lage	***Details in Karte***



Kilometer: 4+620 bis 4+820

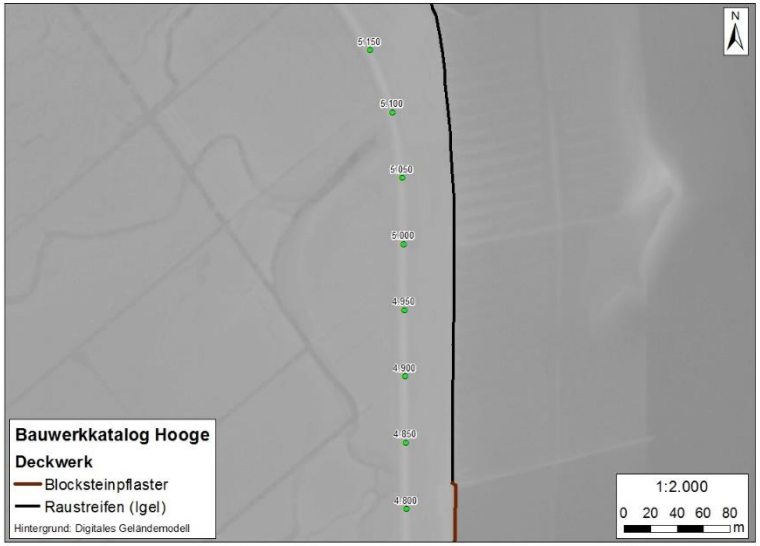
Bauwerksinformationen		***Regelquerschnitt***
Bauweise:	*Blocksteinpflasterung mit Basaltsäulen, Überschlagsicherung mit Granitquader/-blöcken*	*Kein Regelquerschnitt verfügbar*
Ø-Höhe:	*1,85m NN*	
Ø-Breite:	*Keine Angabe*	
Raustreifen:	*Nicht vorhanden*	
Ø-Höhe:	*--*	
Ø-Breite:	*--*	
Watthöhe:	*0,36m NN*	
Schäden:	*Keine*	
Anmerkungen:	*Überschlagsicherung stark überwachsen, sodass Granitblöcke kaum noch erkennbar sind*	
Baujahr:	*Keine Angaben*	
Letzte Verstärkung:	*Keine Angaben*	

Foto und Lage	***Details in Karte***
	

Kilometer: 4+820 bis 5+150

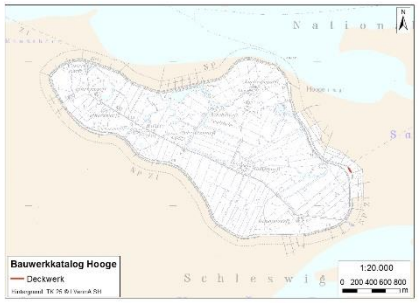
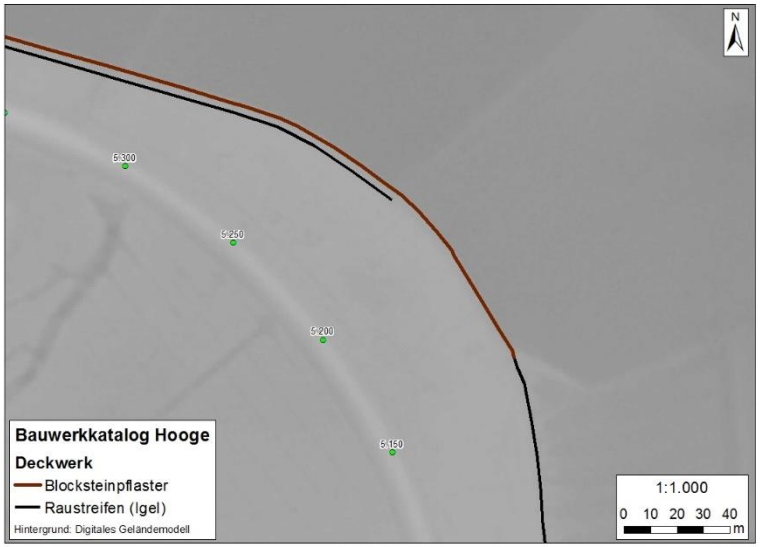
Bauwerksinformationen		***Regelquerschnitt***
Bauweise:	*--*	*Kein Regelquerschnitt verfügbar*
Ø-Höhe:	*--*	
Ø-Breite:	*--*	
Raustreifen:	*Steinschüttung*	
Ø-Höhe:	*1,68m NN*	
Ø-Breite:	*Keine Angaben*	
Vorlandhöhe:	*1,38m NN*	
Schäden:	*Keine*	
Anmerkungen:	*Stark überwachsen*	
Baujahr:	*Keine Angaben*	
Letzte Verstärkung:	*Keine Angaben*	

Foto und Lage	***Details in Karte***



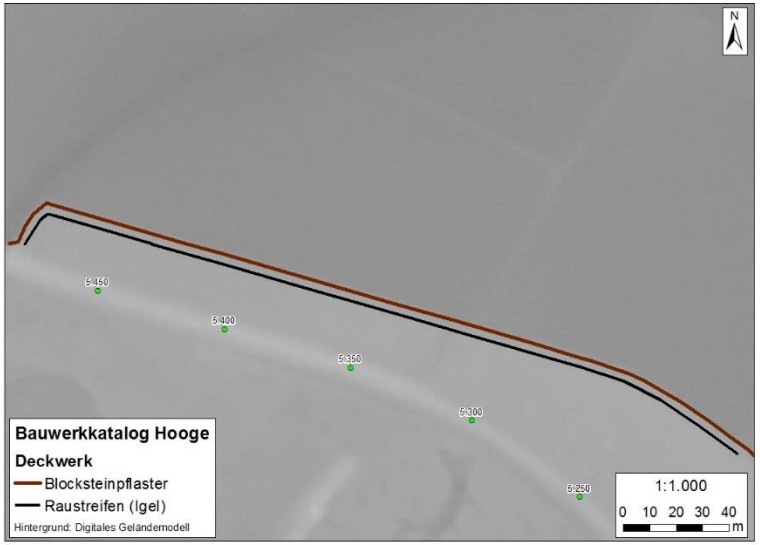
Kilometer: 5+150 bis 5+230

Bauwerksinformationen		***Regelquerschnitt***
Bauweise:	*Blocksteinpflasterung mit Basaltsäulen, Überschlagsicherung mit Granitquader/-blöcken*	*Kein Regelquerschnitt verfügbar*
Ø-Höhe:	*1,63m NN*	
Ø-Breite:	*Keine Angabe*	
Raustreifen:	*--*	
Ø-Höhe:	*--*	
Ø-Breite:	*--*	
Vorlandhöhe:	*0,6m NN*	
Schäden:	*Keine*	
Anmerkungen:	*Überschlagsicherung stark überwachsen*	
Baujahr:	*Keine Angaben*	
Letzte Verstärkung:	*Keine Angaben*	

Foto und Lage	***Details in Karte***
	

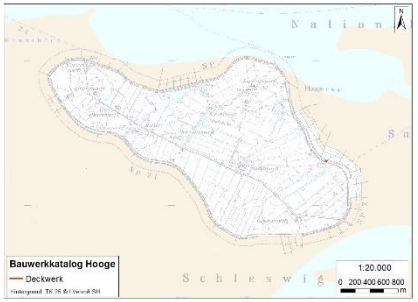
Kilometer: 5+230 bis 5+480

Bauwerksinformationen		***Regelquerschnitt***
Bauweise:	*Blocksteinpflasterung mit Basaltsäulen, Überschlagsicherung mit Granitquader/-blöcken*	*Kein Regelquerschnitt verfügbar*
Ø-Höhe:	*1,45m NN*	
Ø-Breite:	*Keine Angaben*	
Raustreifen:	*Setzsteindeckwerk (Hand)*	
Ø-Höhe:	*1,63m NN*	
Ø-Breite:	*Keine Angaben*	
Watthöhe:	*0,38m NN*	
Schäden:	*Keine*	
Anmerkungen:	*Raustreifen ist sehr niedrig*	
Baujahr:	*Keine Angaben*	
Letzte Verstärkung:	*Keine Angaben*	

Foto und Lage	***Details in Karte***
	

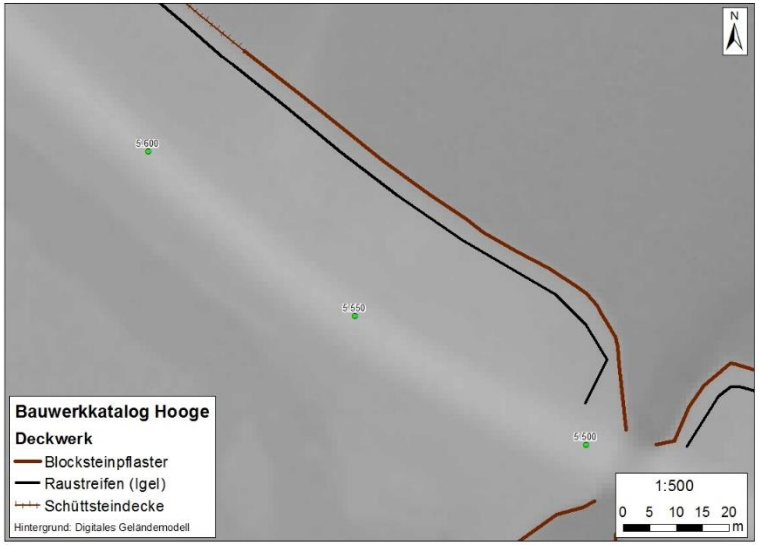
Kilometer: 5+480 bis 5+510

Bauwerksinformationen		***Regelquerschnitt***
Bauweise:	*Blocksteinpflasterung mit Granitquader*	*Kein Regelquerschnitt verfügbar*
Ø-Höhe:	*4,1m NN*	
Ø-Breite:	*Keine Angaben*	
Raustreifen:	*Setzsteindeckwerk (Hand)*	
Ø-Höhe:	*1,63*	
Ø-Breite:	*Keine Angaben*	
Watthöhe:	*0,81m NN*	
Schäden:	*Keine*	
Anmerkungen:	*Keine*	
Baujahr:	*Keine Angaben*	
Letzte Verstärkung:	*Keine Angaben*	

Foto und Lage	***Details in Karte***
	

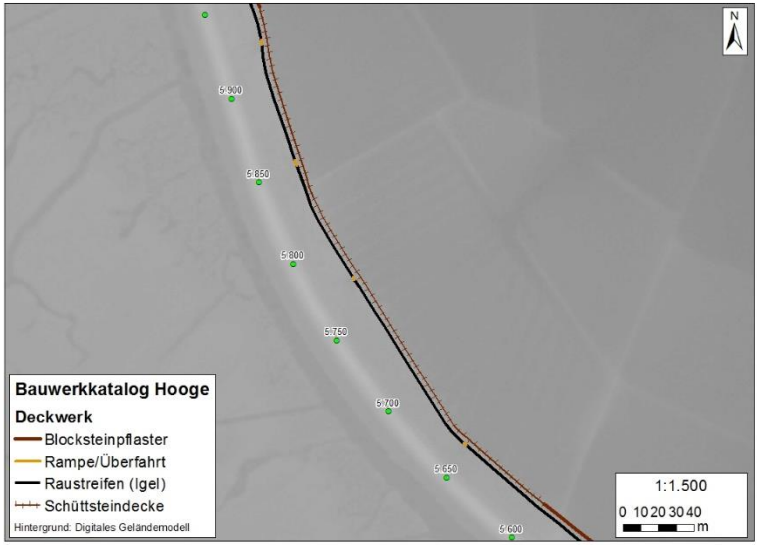
Kilometer: 5+510 bis 5+600

Bauwerksinformationen		***Regelquerschnitt***
Bauweise:	*Blocksteinpflasterung mit Basaltsäulen, Überschlagsicherung mit Granitblöcken*	*Kein Regelquerschnitt verfügbar*
Ø-Höhe:	*1,3m NN*	
Ø-Breite:	*Keine Angaben*	
Raustreifen:	*Setzsteindeckwerk (Hand)*	
Ø-Höhe:	*1,5m NN*	
Ø-Breite:	*Keine Angabe*	
Watthöhe:	*0,48m NN*	
Schäden:	*Keine*	
Anmerkungen:	*Keine*	
Baujahr:	*Keine Angaben*	
Letzte Verstärkung:	*Keine Angaben*	

Foto und Lage	***Details in Karte***
	

Kilometer: 5+600 bis 5+950

Bauwerksinformationen		***Regelquerschnitt***
Bauweise:	*Schüttsteindeckwerk*	*Kein Regelquerschnitt verfügbar*
Ø-Höhe:	*1,41m NN*	
Ø-Breite:	*Keine Angaben*	
Raustreifen:	*Setzsteindeckwerk (Hand)*	
Ø-Höhe:	*1,66m NN*	
Ø-Breite:	*Keine Angaben*	
Vorlandhöhe:	*0,93m NN*	
Schäden:	*Keine*	
Anmerkungen:	*Keine*	
Baujahr:	*Keine Angaben*	
Letzte Verstärkung:	*Keine Angaben*	

Foto und Lage	***Details in Karte***
	

Kilometer: 5+950 bis 6+330

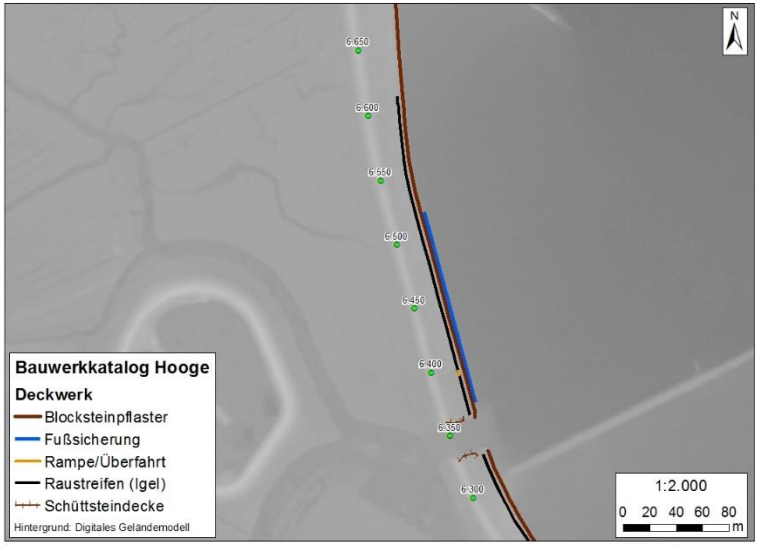
Bauwerksinformationen		***Regelquerschnitt***
Bauweise:	*Blocksteinpflasterung mit Granitquader*	*Kein Regelquerschnitt verfügbar*
Ø-Höhe:	*1,48m NN*	
Ø-Breite:	*Keine Angaben*	
Raustreifen:	*Setzsteindeckwerk (Hand)*	
Ø-Höhe:	*1,78m NN*	
Ø-Breite:	*Keine Angaben*	
Vorlandhöhe:	*0,61m NN*	
Schäden:	*Keine*	
Anmerkungen:	*Keine*	
Baujahr:	*Keine Angaben*	
Letzte Verstärkung:	*Keine Angaben*	

Foto und Lage	***Details in Karte***

Kilometer: 6+330 bis 6+610

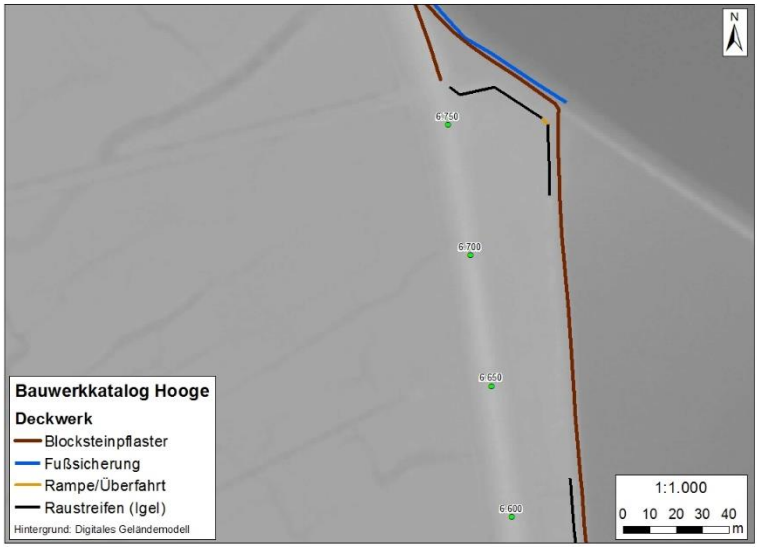
Bauwerksinformationen		***Regelquerschnitt***
Bauweise:	*Blocksteinpflasterung mit Granitquader*	*Kein Regelquerschnitt verfügbar*
Ø-Höhe:	*1,55m NN*	
Ø-Breite:	*Keine Angabe*	
Raustreifen:	*Setzsteindeckwerk (Hand)*	
Ø-Höhe:	*1,77m NN*	
Ø-Breite:	*Keine Angaben*	
Vorlandhöhe:	*0,17m NN*	
Schäden:	*Keine*	
Anmerkungen:	*Fußsicherung teilweise vorhanden*	
Baujahr:	*Keine Angaben*	
Letzte Verstärkung:	*Keine Angaben*	

Foto und Lage	***Details in Karte***



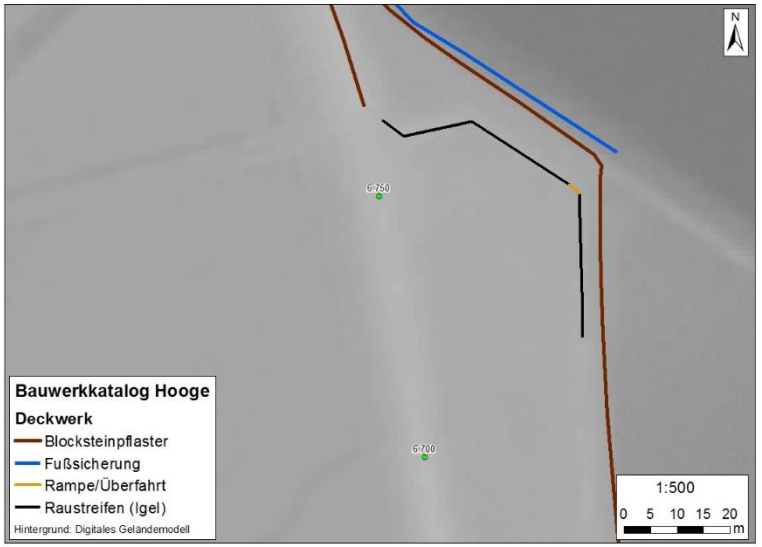
Kilometer: 6+610 bis 6+720

Bauwerksinformationen		***Regelquerschnitt***
Bauweise:	*Blocksteinpflasterung mit Granitquader*	*Kein Regelquerschnitt verfügbar*
Ø-Höhe:	*1,63m NN*	
Ø-Breite:	*Keine Angabe*	
Raustreifen:	*--*	
Ø-Höhe:	*--*	
Ø-Breite:	*--*	
Vorlandhöhe:	*0,17m NN*	
Schäden:	*Keine*	
Anmerkungen:	*Reste einer Fußsicherung erkennbar*	
Baujahr:	*Keine Angaben*	
Letzte Verstärkung:	*Keine Angaben*	

Foto und Lage	***Details in Karte***
	

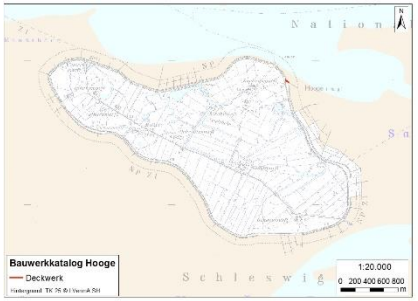
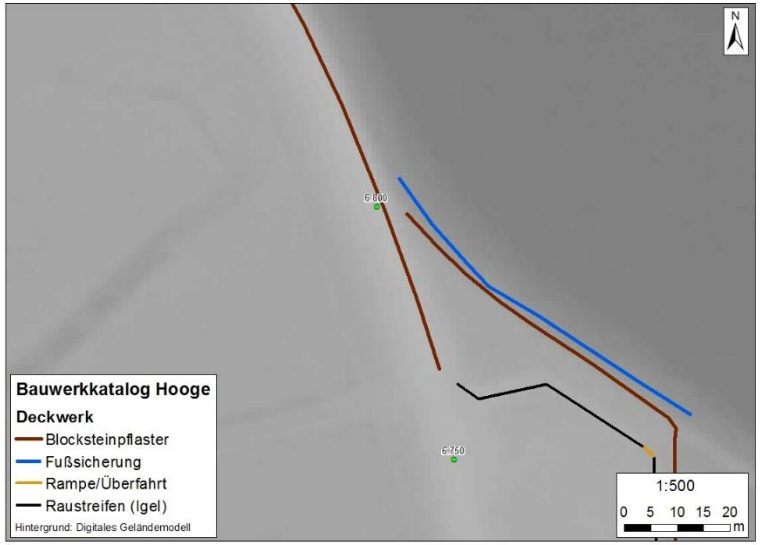
Kilometer: 6+720 bis 6+750

Bauwerksinformationen		***Regelquerschnitt***
Bauweise:	*Blocksteinpflasterung mit Granitquader*	*Kein Regelquerschnitt verfügbar*
Ø-Höhe:	*1,56m NN*	
Ø-Breite:	*Keine Angabe*	
Raustreifen:	*Setzsteindeckwerk (Hand)*	
Ø-Höhe:	*1,93m NN*	
Ø-Breite:	*Keine Angaben*	
Vorlandhöhe:	*0,17m NN*	
Schäden:	*Keine*	
Anmerkungen:	*keine*	
Baujahr:	*Keine Angaben*	
Letzte Verstärkung:	*Keine Angaben*	

Foto und Lage	***Details in Karte***
	

Kilometer: 6+750 bis 6+800

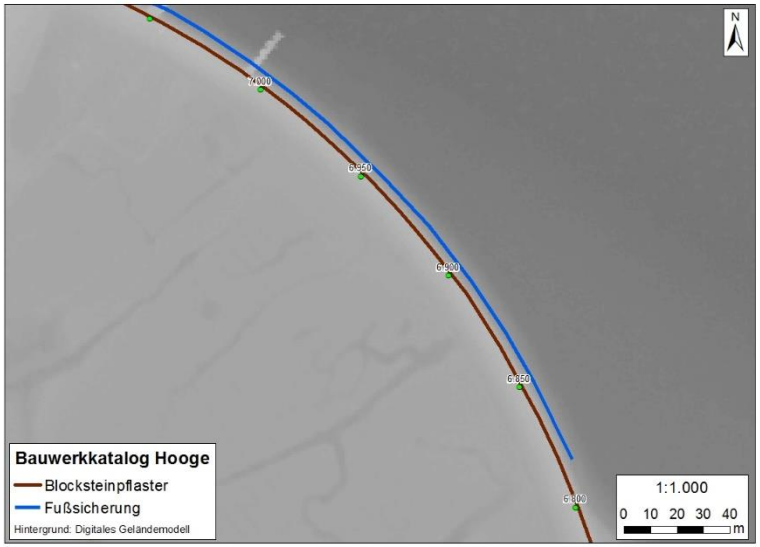
Bauwerksinformationen		***Regelquerschnitt***
Bauweise:	*Blocksteinpflasterung mit Granitblöcken, mit Asphalt vergossen, Überschlagsicherung per Betonkante abgegrenzt*	*Kein Regelquerschnitt verfügbar*
Ø-Höhe:	*1,41m NN*	
Ø-Breite:	*Keine Angabe*	
Raustreifen:	*Setzsteindeckwerk (Hand)*	
Ø-Höhe:	*2,11m NN*	
Ø-Breite:	*Keine Angaben*	
Vorlandhöhe:	*-0,67m NN*	
Schäden:	*Keine*	
Anmerkungen:	*Fußsicherung vorhanden*	
Baujahr:	*Keine Angaben*	
Letzte Verstärkung:	*Keine Angaben*	

Foto und Lage	***Details in Karte***
	

Kilometer: 6+800 bis 7+000

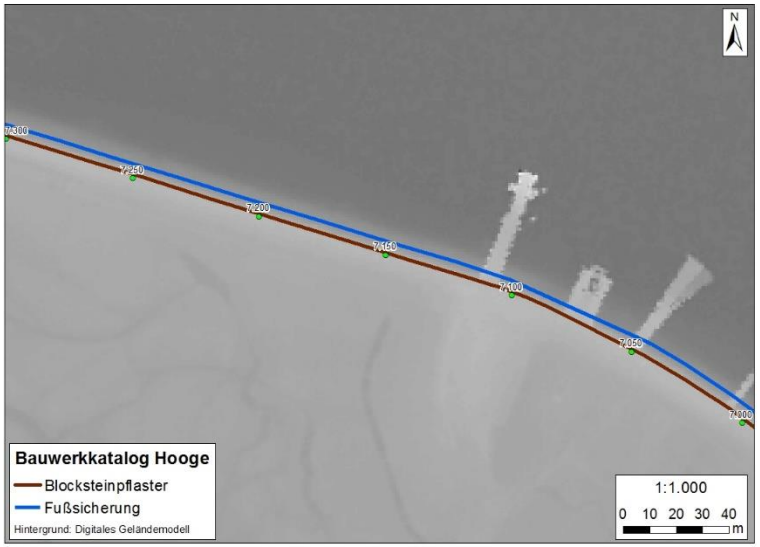
Bauwerksinformationen		***Regelquerschnitt***
Bauweise:	*Blocksteinpflasterung mit Granitblöcken, mit Asphalt vergossen*	*Kein Regelquerschnitt verfügbar*
Ø-Höhe:	*2,66m NN*	
Ø-Breite:	*Keine Angaben*	
Raustreifen:	*--*	
Ø-Höhe:	*--*	
Ø-Breite:	*--*	
Vorlandhöhe:	*0,8m NN*	
Schäden:	*keine*	
Anmerkungen:	*Regionaldeich mit seeseitigem Deckwerk, Fußsicherung vorhanden*	
Baujahr:	*Keine Angaben*	
Letzte Verstärkung:	*Keine Angaben*	

Foto und Lage	***Details in Karte***



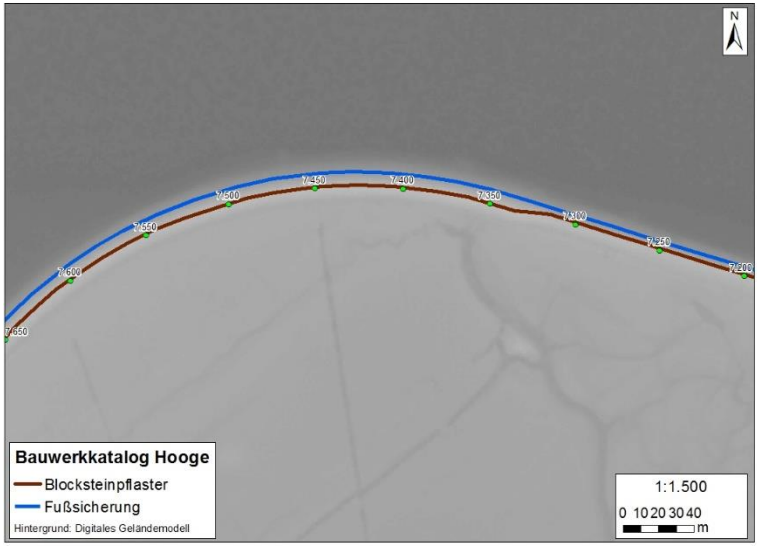
Kilometer: 7+000 bis 7+270

Bauwerksinformationen		***Regelquerschnitt***
Bauweise:	*Blocksteinpflasterung mit Granitblöcken, mit Asphalt vergossen, Überschlagsicherung mit Granitquadern (mit Asphalt vergossen) und Beton*	*Kein Regelquerschnitt verfügbar*
Ø-Höhe:	*2,86m NN*	
Ø-Breite:	*Keine Angaben*	
Raustreifen:	*--*	
Ø-Höhe:	*--*	
Ø-Breite:	*--*	
Vorlandhöhe:	*-0,94m NN*	
Schäden:	*keine*	
Anmerkungen:	*Regionaldeich mit seeseitigem Deckwerk, Fußsicherung vorhanden*	
Baujahr:	*Keine Angaben*	
Letzte Verstärkung:	*Keine Angaben*	

Foto und Lage	***Details in Karte***
	

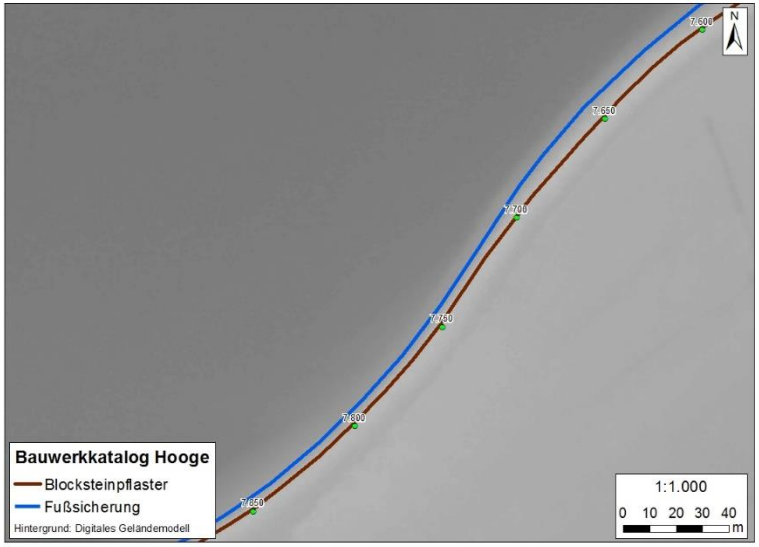
Kilometer: 7+270 bis 7+620

Bauwerksinformationen		***Regelquerschnitt***
Bauweise:	*Blocksteinpflasterung mit Basaltsäulen, mit Asphalt vergossen*	*Kein Regelquerschnitt verfügbar*
Ø-Höhe:	*3,12m NN*	
Ø-Breite:	*Keine Angabe*	
Raustreifen:	*--*	
Ø-Höhe:	*--*	
Ø-Breite:	*--*	
Vorlandhöhe:	*0,79m NN*	
Schäden:	*keine*	
Anmerkungen:	*Bis km 7+320 seeseitig mit Granitquader gepflastert und Asphaltverklammerung, Fußsicherung vorhanden*	
Baujahr:	*1972*	
Letzte Verstärkung:	*Keine Angaben*	

Foto und Lage	***Details in Karte***
	

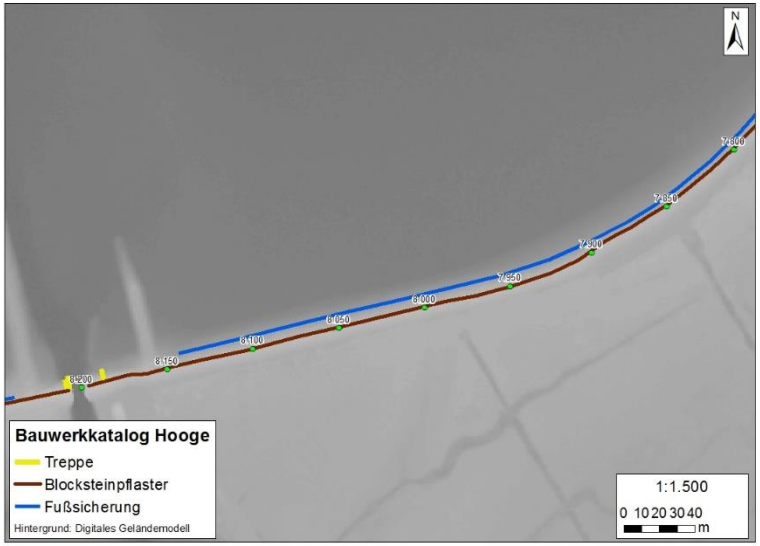
Kilometer: 7+620 bis 7+820

Bauwerksinformationen		***Regelquerschnitt***
Bauweise:	*Blocksteinpflasterung mit Basaltsäulen, Granitquader, Granitblöcke mit Asphalt vergossen*	*Kein Regelquerschnitt verfügbar*
Ø-Höhe:	*3,01m NN*	
Ø-Breite:	*Keine Angabe*	
Raustreifen:	*--*	
Ø-Höhe:	*--*	
Ø-Breite:	*--*	
Vorlandhöhe:	*-0,92m NN*	
Schäden:	*keine*	
Anmerkungen:	*Fußsicherung vorhanden (lockere Steinschüttung)*	
Baujahr:	*Keine Angaben*	
Letzte Verstärkung:	*Keine Angaben*	

Foto und Lage	***Details in Karte***
	

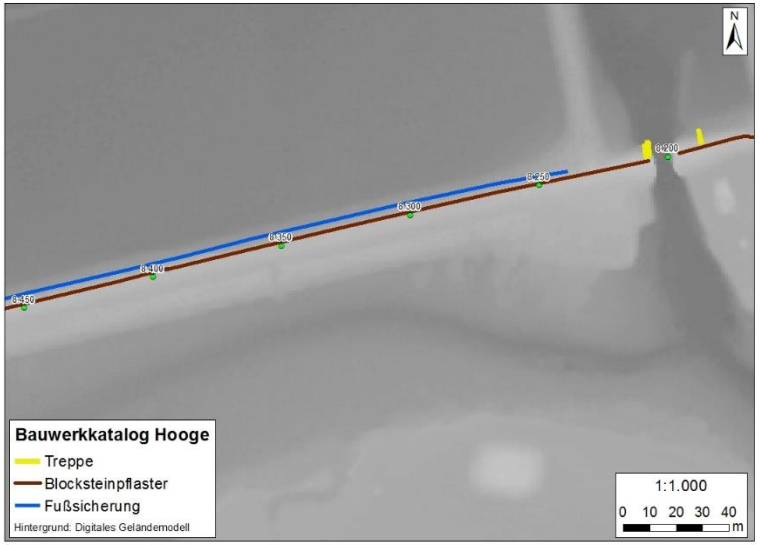
Kilometer: 7+820 bis 8+200

Bauwerksinformationen		***Regelquerschnitt***
Bauweise:	*Blocksteinpflasterung mit Basaltsäulen, mit Asphalt vergossen*	*Kein Regelquerschnitt verfügbar*
Ø-Höhe:	*3,14m NN*	
Ø-Breite:	*Keine Angabe*	
Raustreifen:	*--*	
Ø-Höhe:	*--*	
Ø-Breite:	*--*	
Vorlandhöhe:	*-0,25m NN*	
Schäden:	*keine*	
Anmerkungen:	*Fußsicherung vorhanden, Binnenseite teilweise stark bewachsen*	
Baujahr:	*Keine Angaben*	
Letzte Verstärkung:	*Keine Angaben*	

Foto und Lage	***Details in Karte***
	

Kilometer: 8+200 bis 8+395

Bauwerksinformationen		***Regelquerschnitt***
Bauweise:	*Pflasterung mit Betonplatten (Krone und Innenböschung), erste 10m Blocksteinpflasterung mit Basaltsäulen, danach Granitquader, mit Asphalt vergossen (Aussenböschung)*	*Kein Regelquerschnitt verfügbar*
Ø-Höhe:	*3,07m NN*	
Ø-Breite:	*Keine Angabe*	
Raustreifen:	*--*	
Ø-Höhe:	*--*	
Ø-Breite:	*--*	
Vorlandhöhe:	*-0,22m NN*	
Schäden:	*keine*	
Anmerkungen:	*Fußsicherung vorhanden, teilweise stark bewachsen*	
Baujahr:	*Keine Angaben*	
Letzte Verstärkung:	*Keine Angaben*	

Foto und Lage	***Details in Karte***
	

Kilometer: 8+395 bis 8+520

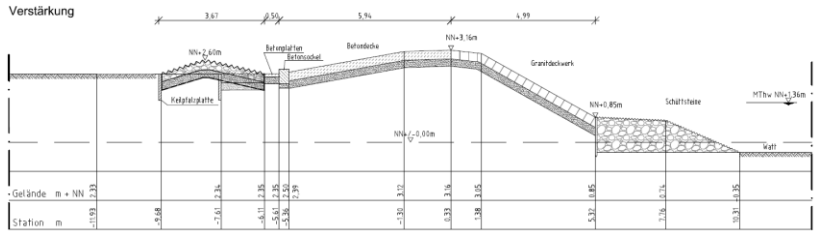
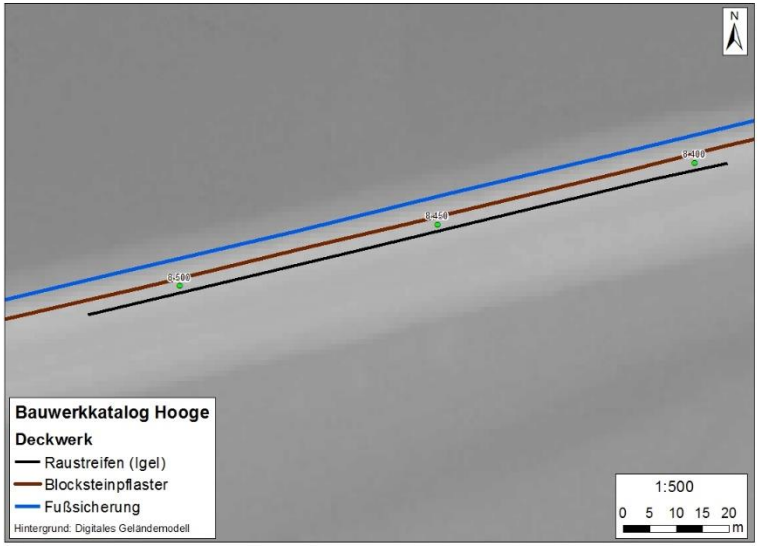
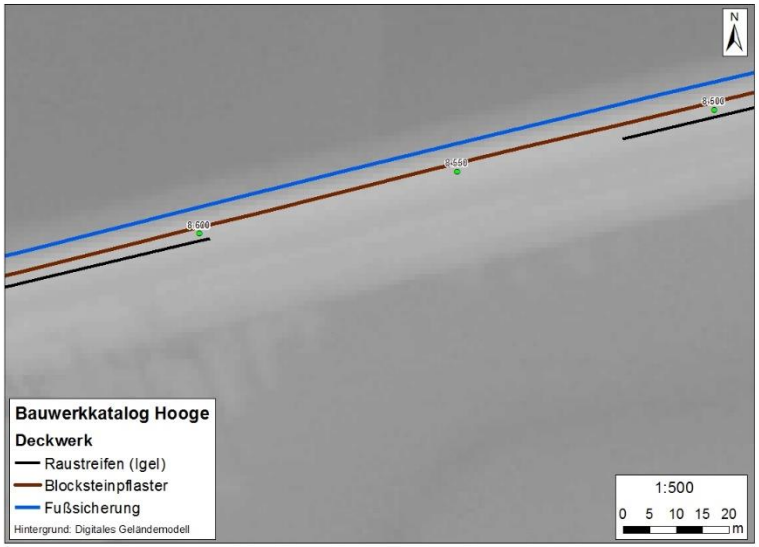
Bauwerksinformationen		***Regelquerschnitt***
Bauweise:	*Pflasterung mit Betonplatten (Krone und Innenböschung), Blocksteinpflasterung mit Granitquader, mit Asphalt vergossen (Aussenböschung)*	
Ø-Höhe:	*3,16m NN*	
Ø-Breite:	*10,93m*	
Raustreifen:	*Setzsteindeckwerk (Hand)*	
Ø-Höhe:	*2,60m NN*	
Ø-Breite:	*3,67m*	
Vorlandhöhe:	*-0,35m NN*	
Schäden:	*keine*	
Anmerkungen:	*Fußsicherung vorhanden*	
Baujahr:	*Keine Angaben*	
Letzte Verstärkung:	*8+395-8+465: 2012-2014* *8+465-8+520: 2009*	

Foto und Lage	***Details in Karte***
Kein aktuelles Foto verfügbar	

Kilometer: 8+520 bis 8+600

Bauwerksinformationen		***Regelquerschnitt***
Bauweise:	*Pflasterung mit Betonplatten (Innenböschung), Blocksteinpflasterung mit Granitquader, mit Asphalt vergossen (Aussenböschung)*	*Kein Regelquerschnitt verfügbar*
Ø-Höhe:	*3,12m NN*	
Ø-Breite:	*Keine Angaben*	
Raustreifen:	*--*	
Ø-Höhe:	*--*	
Ø-Breite:	*--*	
Vorlandhöhe:	*-0,03m NN*	
Schäden:	*keine*	
Anmerkungen:	*Fußsicherung vorhanden*	
Baujahr:	*Keine Angaben*	
Letzte Verstärkung:	*2012-2014*	

Foto und Lage	***Details in Karte***
Kein aktuelles Foto verfügbar	

Kilometer: 8+600 bis 8+670

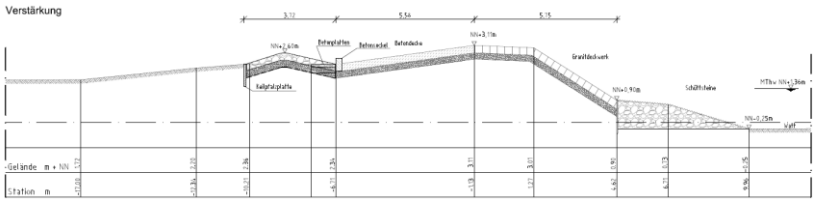
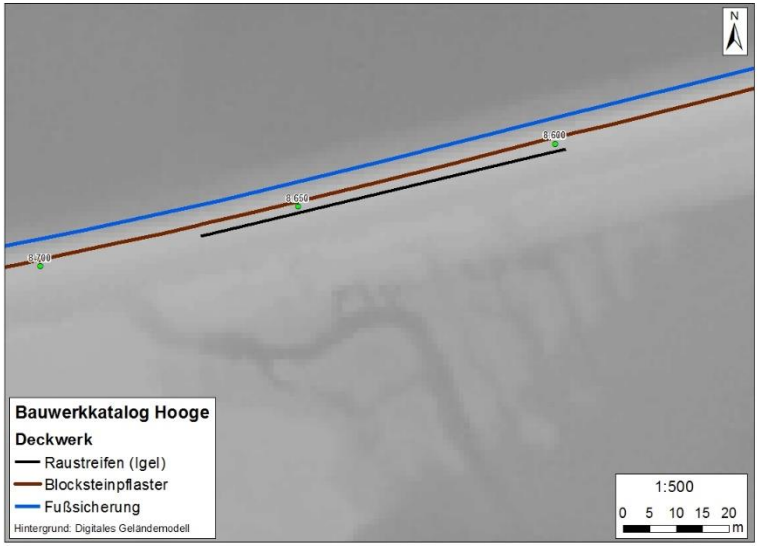
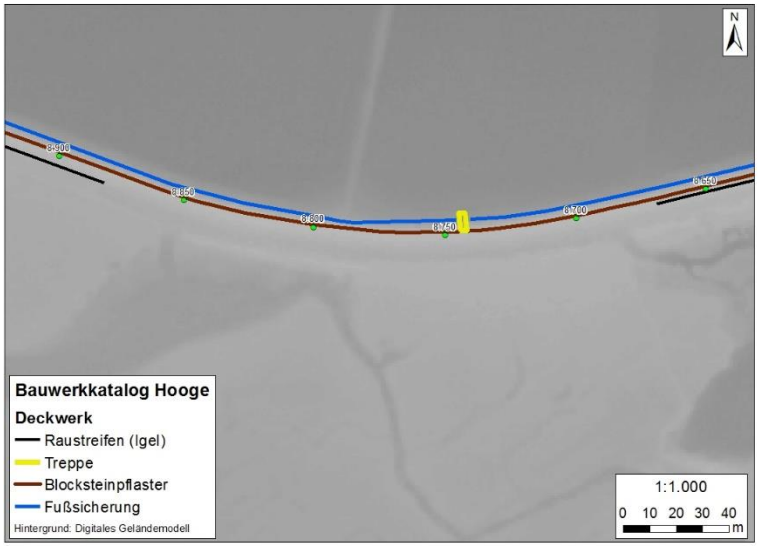
Bauwerksinformationen		***Regelquerschnitt***
Bauweise:	*Pflasterung mit Betonplatten (Innenböschung), Blocksteinpflasterung mit Granitquader, mit Asphalt vergossen (Krone und Aussenböschung)*	
Ø-Höhe:	*3,11m NN*	
Ø-Breite:	*11,33m*	
Raustreifen:	*Setzsteindeckwerk (Hand)*	
Ø-Höhe:	*2,60m NN*	
Ø-Breite:	*3,72*	
Vorlandhöhe:	*-0,25m NN*	
Schäden:	*keine*	
Anmerkungen:	*Fußsicherung vorhanden*	
Baujahr:	*Keine Angaben*	
Letzte Verstärkung:	*2008*	

Foto und Lage	***Details in Karte***
Kein aktuelles Foto verfügbar	

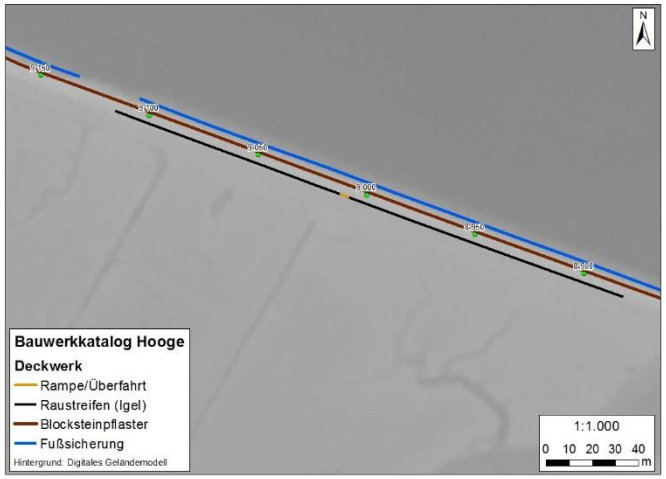
Kilometer: 8+670 bis 8+880

Bauwerksinformationen		***Regelquerschnitt***
Bauweise:	*Pflasterung mit Betonplatten (Innenböschung), Blocksteinpflasterung mit Granitquader, mit Asphalt vergossen (Aussenböschung), Krone Granitdecke mit Asphaltschicht*	*Kein Regelquerschnitt verfügbar*
Ø-Höhe:	*2,94m NN*	
Ø-Breite:	*Keine Angaben*	
Raustreifen:	*--*	
Ø-Höhe:	*--*	
Ø-Breite:	*--*	
Vorlandhöhe:	*-0,03m NN*	
Schäden:	*keine*	
Anmerkungen:	*Fußsicherung vorhanden (lockere Steinschüttung)*	
Baujahr:	*Keine Angaben*	
Letzte Verstärkung:	*Keine Angaben*	

Foto und Lage	***Details in Karte***
	

Kilometer: 8+880 bis 9+130

Bauwerksinformationen		***Regelquerschnitt***
Bauweise:	*Blocksteinpflasterung mit Granitquader, mit Asphalt vergossen (Aussenböschung), Krone Granitdecke mit Asphaltschicht, teilweise Innenböschung mit Granitquadern gepflastert, sonst Gras*	*Kein Regelquerschnitt verfügbar*
Ø-Höhe:	*2,85m NN*	
Ø-Breite:	*Keine Angaben*	
Raustreifen:	*Setzsteindeckwerk (Hand)*	
Ø-Höhe:	*2,99m NN*	
Ø-Breite:	*Keine Angaben*	
Vorlandhöhe:	*0,07m NN*	
Schäden:	*keine*	
Anmerkungen:	*Fußsicherung vorhanden, Innenböschung mit Gras bewachsen, teilweise Pflasterung mit Granitquader erkennbar, Raustreifen sehr schmal*	
Baujahr:	*Keine Angaben*	
Letzte Verstärkung:	*Keine Angaben*	

Foto und Lage	***Details in Karte***
	

Kilometer: 9+130 bis 9+270

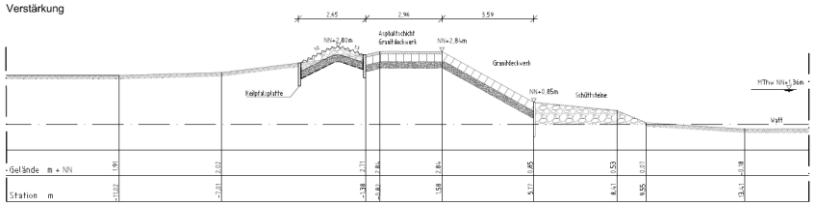
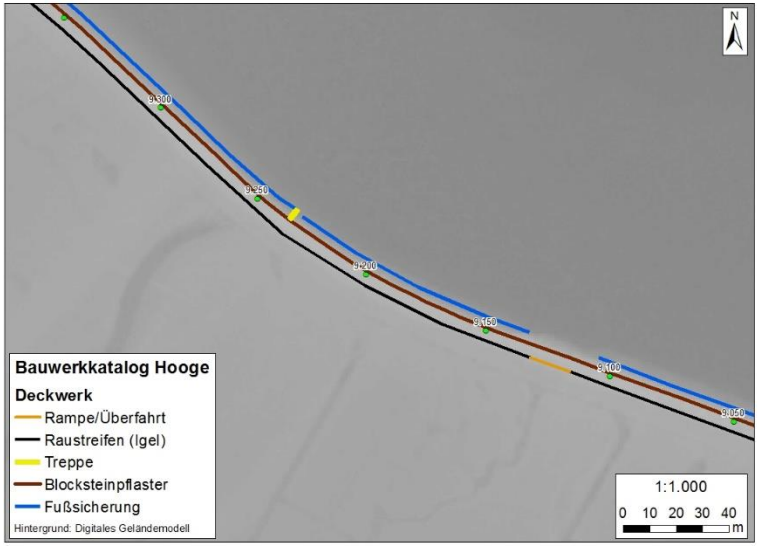
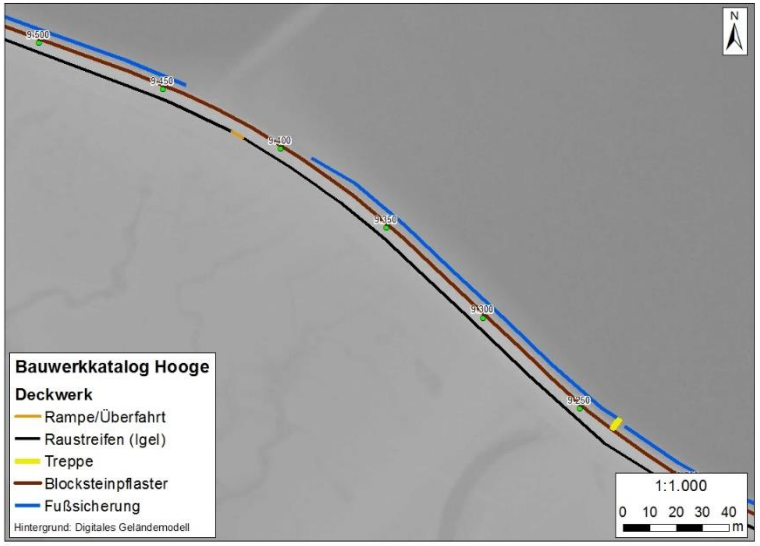
Bauwerksinformationen		***Regelquerschnitt***
Bauweise:	*Blocksteinpflasterung mit Granitquader, mit Asphalt vergossen, Krone Granitdecke mit Asphaltschicht, Innenböschung Gras*	
Ø-Höhe:	*2,84m NN*	
Ø-Breite:	*6,55m*	
Raustreifen:	*Setzsteindeckwerk (Hand)*	
Ø-Höhe:	*2,80m NN*	
Ø-Breite:	*2,65m*	
Vorlandhöhe:	*-0,18m NN*	
Schäden:	*keine*	
Anmerkungen:	*Fußsicherung vorhanden*	
Baujahr:	*Keine Angaben*	
Letzte Verstärkung:	*2012-2014*	

Foto und Lage	***Details in Karte***
Kein aktuelles Foto verfügbar	

Kilometer: 9+270 bis 9+430

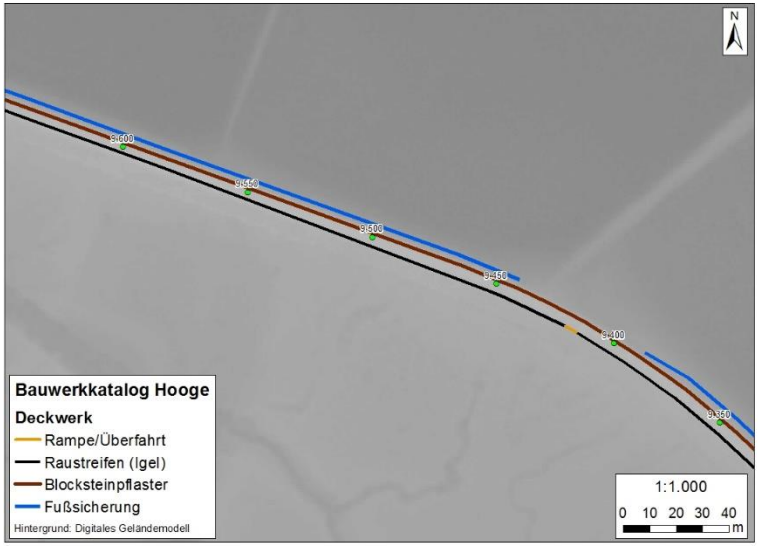
Bauwerksinformationen		***Regelquerschnitt***
Bauweise:	*Blocksteinpflasterung mit Granitquader, mit Asphalt vergossen, Krone Granitdecke mit Asphaltschicht, Innenböschung Gras*	*Kein Regelquerschnitt verfügbar*
Ø-Höhe:	*2,82m NN*	
Ø-Breite:	*Keine Angaben*	
Raustreifen:	*Setzsteindeckwerk (Hand)*	
Ø-Höhe:	*2,68m NN*	
Ø-Breite:	*Keine Angaben*	
Vorlandhöhe:	*0,24m NN*	
Schäden:	*keine*	
Anmerkungen:	*Keine Fußsicherung vorhanden, Raustreifen sehr schmal*	
Baujahr:	*Keine Angaben*	
Letzte Verstärkung:	*Keine Angaben*	

Foto und Lage	***Details in Karte***
	

Kilometer: 9+430 bis 9+585

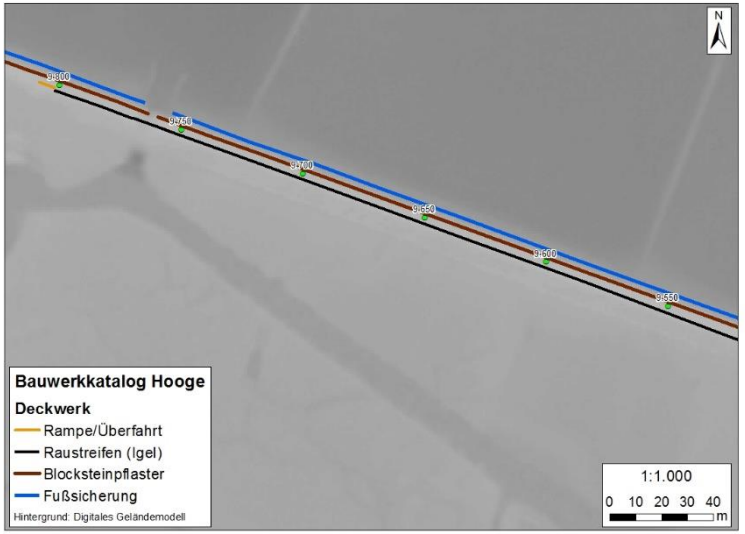
Bauwerksinformationen		***Regelquerschnitt***
Bauweise:	*Blocksteinpflasterung mit Granitquader, mit Asphalt vergossen, Krone hochgesetzte Betonplatten, Innenböschung Gras*	*Kein Regelquerschnitt verfügbar*
Ø-Höhe:	*2,84m NN*	
Ø-Breite:	*Keine Angaben*	
Raustreifen:	*Setzsteindeckwerk (Hand)*	
Ø-Höhe:	*2,83m NN*	
Ø-Breite:	*Keine Angaben*	
Vorlandhöhe:	*0,31m NN*	
Schäden:	*keine*	
Anmerkungen:	*Fußsicherung vorhanden, Raustreifen sehr schmal*	
Baujahr:	*Keine Angaben*	
Letzte Verstärkung:	*Keine Angaben*	

Foto und Lage	***Details in Karte***



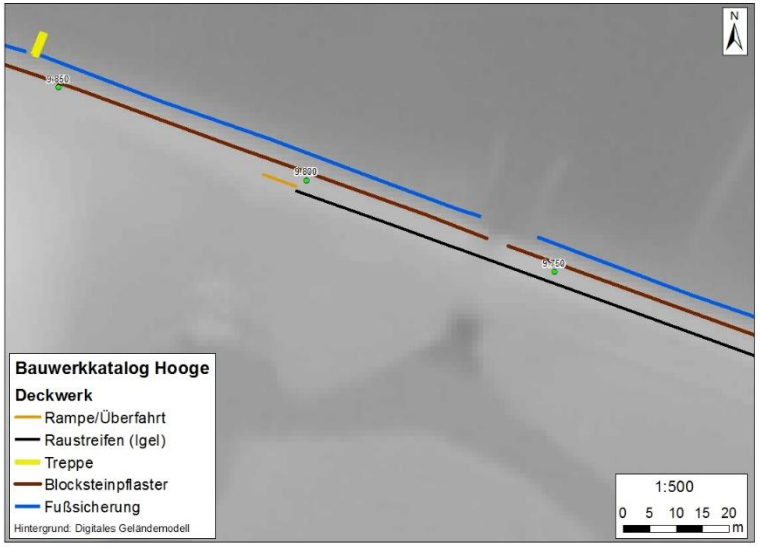
Kilometer: 9+585 bis 9+760

Bauwerksinformationen		***Regelquerschnitt***
Bauweise:	*Blocksteinpflasterung mit Granitquader, mit Asphalt vergossen, Krone hochgesetzte Betonplatten, Innenböschung Gras*	*Kein Regelquerschnitt verfügbar*
Ø-Höhe:	*2,84m NN*	
Ø-Breite:	*Keine Angaben*	
Raustreifen:	*Setzsteindeckwerk (Hand)*	
Ø-Höhe:	*2,83m NN*	
Ø-Breite:	*Keine Angaben*	
Vorlandhöhe:	*0,31m NN*	
Schäden:	*keine*	
Anmerkungen:	*Fußsicherung vorhanden, Raustreifen ist etwas breiter und durch Betonkante zur Deckwerkskrone abgegrenzt*	
Baujahr:	*Keine Angaben*	
Letzte Verstärkung:	*Keine Angaben*	

Foto und Lage	***Details in Karte***
	

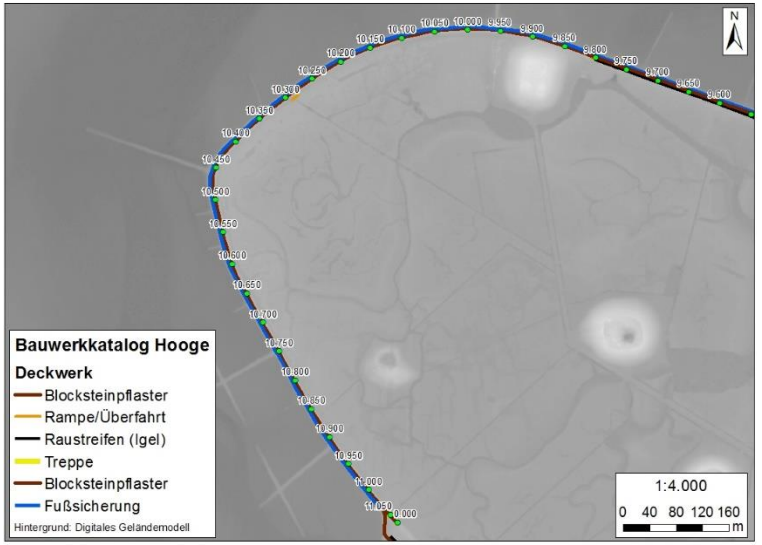
Kilometer: 9+760 bis 9+810

Bauwerksinformationen		***Regelquerschnitt***
Bauweise:	*Blocksteinpflasterung mit Granitquader, mit Asphalt vergossen, Krone Granitdecke mit Asphaltschicht, Innenböschung Gras*	*Kein Regelquerschnitt verfügbar*
Ø-Höhe:	*2,89m NN*	
Ø-Breite:	*Keine Angaben*	
Raustreifen:	*Setzsteindeckwerk (Hand)*	
Ø-Höhe:	*3,03m NN*	
Ø-Breite:	*Keine Angaben*	
Vorlandhöhe:	*0,12m NN*	
Schäden:	*keine*	
Anmerkungen:	*Fußsicherung vorhanden, Raustreifen ist etwas breiter, letzten 5m Betonplatte*	
Baujahr:	*Keine Angaben*	
Letzte Verstärkung:	*Keine Angaben*	

Foto und Lage	***Details in Karte***
	

Kilometer: 9+810 bis 11+065

Bauwerksinformationen		***Regelquerschnitt***
Bauweise:	*Blocksteinpflasterung mit Granitquader, mit Asphalt vergossen*	*Kein Regelquerschnitt verfügbar*
Ø-Höhe:	*3,32m NN*	
Ø-Breite:	*Keine Angaben*	
Raustreifen:	*--*	
Ø-Höhe:	*--*	
Ø-Breite:	*--*	
Vorlandhöhe:	*-0,22m NN*	
Schäden:	*keine*	
Anmerkungen:	*Fußsicherung vorhanden, teilweise wächst Gras aus den Fugen, Betonkante erkennbar*	
Baujahr:	*Keine Angaben*	
Letzte Verstärkung:	*Keine Angaben*	

Foto und Lage	***Details in Karte***
	

Bewohnte Warften

Backenswarft	***Foto und Lage***	***Bauwerksinformationen***	
		Warfttyp	*Nicht scharliegend*
		Letzte Verstärkung	*1990*
		Umfang	*640m*
		Höhe Warftfuß	*1,7m NN*
		Höhe Warftoberkante	*5,4m NN*
		Böschungsneigung	*1:6*
		Anzahl Einwohner	*16*
		Schutzräume	*9*
		Fething	*vorhanden*
		Anmerkungen	*Dringender Verstärkungsbedarf (Angabe Amt Pellworm)*

Hanswarft	***Foto und Lage***	***Bauwerksinformationen***	
		Warfttyp	*Nicht scharliegend*
		Letzte Verstärkung	*2001*
		Umfang	*663m*
		Höhe Warftfuß	*1,9m NN*
		Höhe Warftoberkante	*5,0m NN*
		Böschungsneigung	*1:6/ 1:15*
		Anzahl Einwohner	*36*
		Schutzräume	*13*
		Fething	*vorhanden*
		Anmerkungen	*Verstärkungsbedarf (Angabe Amt Pellworm)*

Ipkenswarft	***Foto und Lage***	***Bauwerksinformationen***	
		Warfttyp	*Nicht scharliegend*
		Letzte Verstärkung	*1998*
		Umfang	*380m*
		Höhe Warftfuß	*1,7m NN*
		Höhe Warftoberkante	*5,2m NN*
		Böschungsneigung	*1:6*
		Anzahl Einwohner	*4*
		Schutzräume	*2*
		Fething	*vorhanden*
		Anmerkungen	*Verstärkungsbedarf (Angabe Amt Pellworm)*

Kirchwarft	***Foto und Lage***	***Bauwerksinformationen***	
		Warfttyp	*Nicht scharliegend*
		Letzte Verstärkung	*1993*
		Umfang	*353m*
		Höhe Warftfuß	*1,7m NN*
		Höhe Warftoberkante	*5,4 NN*
		Böschungsneigung	*1:6*
		Anzahl Einwohner	*2*
		Schutzräume	*1*
		Fething	*Nicht vorhanden*
		Anmerkungen	*Kein Verstärkungsbedarf (Angabe Amt Pellworm)*

Lorenzwarft/ Middeltritt	***Foto und Lage***	***Bauwerksinformationen***	
		Warfttyp	*Nicht scharliegend*
		Letzte Verstärkung	*2007*
		Umfang	*588m*
		Höhe Warftfuß	*1,7m NN*
		Höhe Warftoberkante	*5,0 NN*
		Böschungsneigung	*1:6/1:15*
		Anzahl Einwohner	*6*
		Schutzräume	*3*
		Fething	*vorhanden*
		Anmerkungen	*Dringender Verstärkungsbedarf (Angabe Amt Pellworm)*

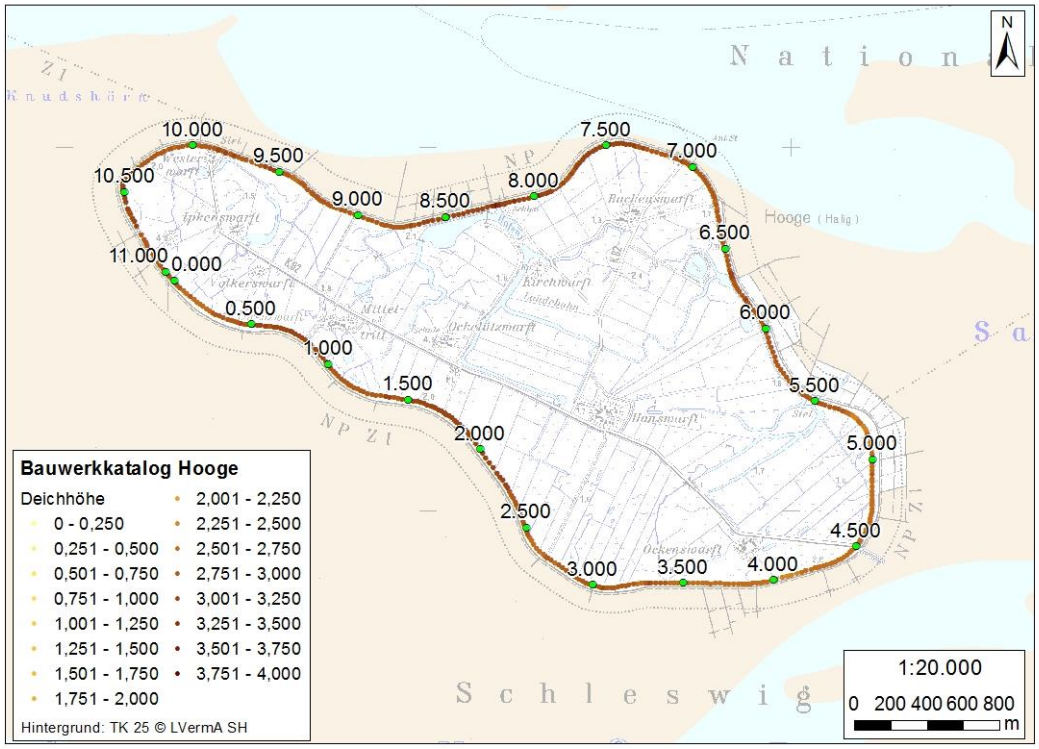
Ockelützwarft	***Foto und Lage***	***Bauwerksinformationen***	
		Warfttyp	*Nicht scharliegend*
		Letzte Verstärkung	*1993*
		Umfang	*483m*
		Höhe Warftfuß	*1,7m NN*
		Höhe Warftoberkante	*5,3 NN*
		Böschungsneigung	*1:6*
		Anzahl Einwohner	*8*
		Schutzräume	*5*
		Fething	*vorhanden*
		Anmerkungen	*Dringender Verstärkungsbedarf (Angabe Amt Pellworm)*

Ockenswarft	***Foto und Lage***	***Bauwerksinformationen***	
		Warfttyp	*Nicht scharliegend*
		Letzte Verstärkung	*1995*
		Umfang	*598m*
		Höhe Warftfuß	*1,5m NN*
		Höhe Warftoberkante	*5,6 NN*
		Böschungsneigung	*1:6/ 1:8*
		Anzahl Einwohner	*12*
		Schutzräume	*7*
		Fething	*vorhanden*
		Anmerkungen	*kein Verstärkungsbedarf (Angabe Amt Pellworm)*

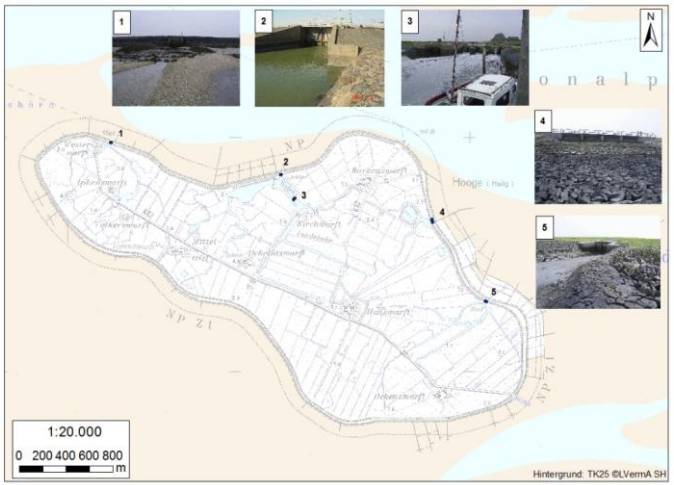
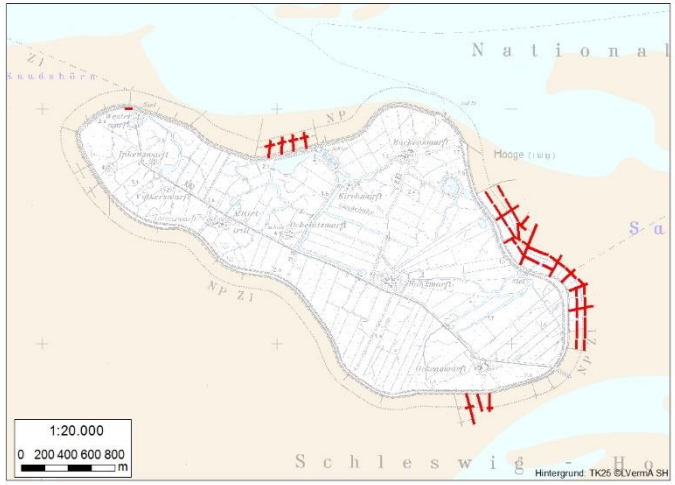
Volkertswarft	***Foto und Lage***	***Bauwerksinformationen***	
		Warfttyp	*Nicht scharliegend*
		Letzte Verstärkung	*1993*
		Umfang	*349m*
		Höhe Warftfuß	*1,9m NN*
		Höhe Warftoberkante	*5,3 NN*
		Böschungsneigung	*1:6*
		Anzahl Einwohner	*2*
		Schutzräume	*1*
		Fething	*vorhanden*
		Anmerkungen	*Verstärkungsbedarf (Angabe Amt Pellworm)*

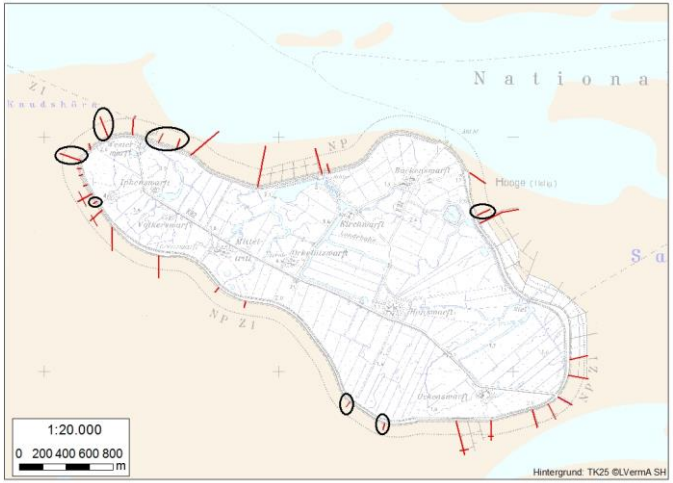
Westerwarft	***Foto und Lage***	***Bauwerksinformationen***	
		Warfttyp	*scharliegend*
		Letzte Verstärkung	*1998*
		Umfang	*357m*
		Höhe Warftfuß	*2,1m NN*
		Höhe Warftoberkante	*5,4 NN*
		Böschungsneigung	*1:8*
		Anzahl Einwohner	*6*
		Schutzräume	*1*
		Fething	*Nicht vorhanden*
		Anmerkungen	*Verstärkungsbedarf (Angabe Amt Pellworm)*

Regionaldeich

Lage	***Bauwerksinformationen***	
	*0+000 bis 6+750*	*Grasdeich:* *In diesem Bereich liegt der Regionaldeich weiter im Hinterland. Er ist mit Gras bewachsen und zwischen 2,4m NN und 3,25m NN (siehe Karte links) hoch. Die Durchschnittshöhe des Abschnitts beträgt 2,82m NN.*
	6+750 bis 11+065	*Regionaldeich mit seeseitigem Deckwerk (Erläuterungen vgl. Deckwerk)*

Sonstige Bauwerke

Siele/ Schleusen	***Foto und Lage***	***Bauwerksinformationen***	
		*Vorkommen auf der Hallig*	*4*
		Ø- Höhe	*2,98m NN (2,3 Nr.3 bis 3,16 Nr. 4)*
		Ø- Tiefe	*Schleusen sind 2-2,5m tief, während die Siele inkl. der Schwergewichtsmauern 15-17,5m tief sind.*
		Ø- Breite (Länge)	*4,5 (Nr. 1) -26,4m (Nr. 4)*
		Anzahl Kammern	*Nr 1,2 und 5: 1 Kammer,* *Nr. 3: 3 Kammern* *Nr. 4: 4 Kammern*
Lahnungen	***Foto und Lage***	*Bauwerksinformationen*	
		*Größe Lahnungsfeld (Landgewinnung)*	*0,47 km²*
		Anzahl Schutzlahnung (Erosionsschutz)	*1 westlich der Westerwarft*
		Bauweise	*Buschlahnung*

Buhnen	**Foto und Lage**		**Bauwerksinformationen**	
			*Vorkommen auf der Hallig*	*32*
			Ø- Länge	*150m (37m – 379m)*
			Material	*Meist Schüttsteine (Granit)*
			Schäden	*8 Buhnen (schwarze Umrandung) sind teilweise stark erodiert (siehe Foto oben)*
			Anmerkungen	*Einige Buhnen sind um Querbuhnen ergänzt (an der Südkante)*

Anlage 3

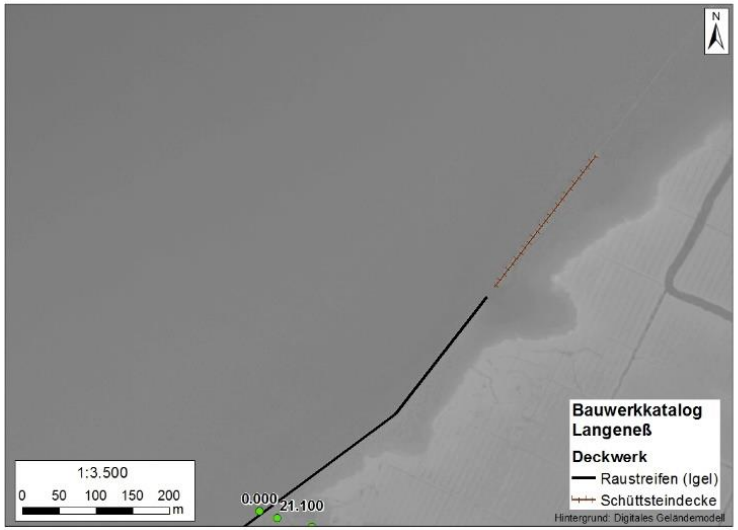
- Bauwerkskatalog Langeness (LKN) -

Bauwerkskatalog Langeneß

Deckwerke

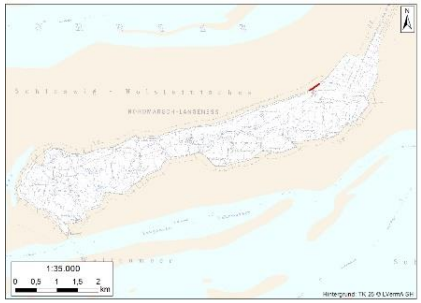
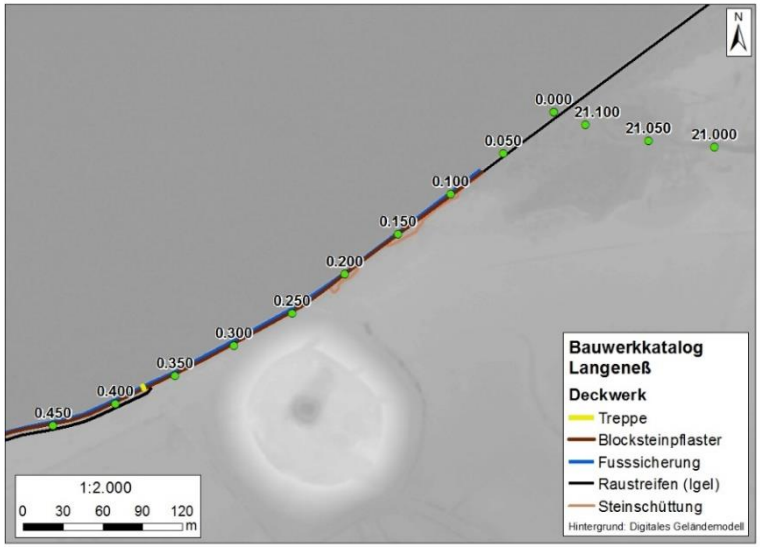
Kilometer: 0+000 bis 0+035

Bauwerksinformationen		***Regelquerschnitt***
Bauweise:	*Deckwerk beschränkt sich auf Raustreifen*	*Kein Regelquerschnitt verfügbar*
Ø-Höhe:	*Keine Angaben*	
Ø-Breite:	*keine Angaben*	
Raustreifen:	*Setzsteindecke (Hand)*	
Ø-Höhe:	*1,89m NN*	
Ø-Breite:	*Keine Angaben*	
Watthöhe:	*1,11m NN*	
Schäden:	*Keine*	
Anmerkungen:	*Keine*	
Baujahr:	*Keine Angaben*	
Letzte Verstärkung:	*fertige Deckwerkverstärkung*	

Foto und Lage	***Details in Karte***
	

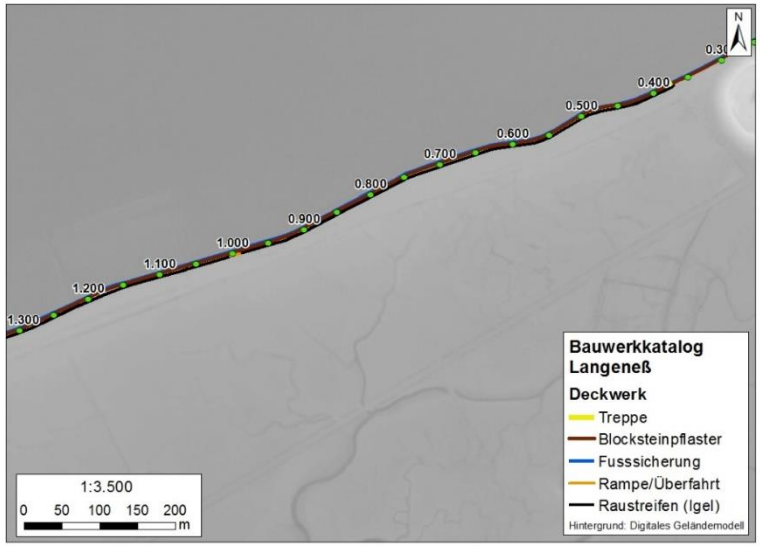
Kilometer: 0+035 bis 0+370

Bauwerksinformationen		**Regelquerschnitt**
Bauweise:	*Blocksteinpflasterung, Pflasterung mit Granitquadern*	*Kein Regelquerschnitt verfügbar*
Ø-Höhe:	*2,15m NN*	
Ø-Breite:	*4,34m NN*	
Raustreifen:	*Keiner vorhanden*	
Ø-Höhe:		
Ø-Breite:		
Watthöhe:	*1,11m NN*	
Schäden:	*Keine*	
Anmerkungen:	*Fußsicherung vorhanden*	
Baujahr:	*1933/34*	
Letzte Verstärkung:	*fertige Deckwerkverstärkung*	

Foto und Lage	**Details in Karte**
	

Kilometer: 0+370 bis 1+235

Bauwerksinformationen		***Regelquerschnitt***
Bauweise:	*Blocksteinpflasterung, Pflasterung mit Granitquadern*	*Kein Regelquerschnitt verfügbar*
Ø-Höhe:	*2,15m NN*	
Ø-Breite:	*Keine Angaben*	
Raustreifen:	*Setzsteindeckwerk (Hand)*	
Ø-Höhe:	*3,1m NN*	
Ø-Breite:	*Keine Angaben*	
Watthöhe:	*0,99m NN*	
Schäden:	*keine*	
Anmerkungen:	*Fußsicherung vorhanden*	
Baujahr:	*1933/34*	
Letzte Verstärkung:	*fertige Deckwerkverstärkung*	

Foto und Lage	***Details in Karte***
	

Kilometer: 1+235 bis 1+550

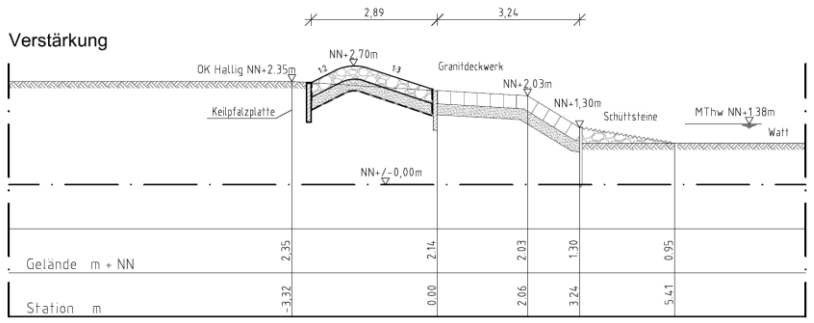
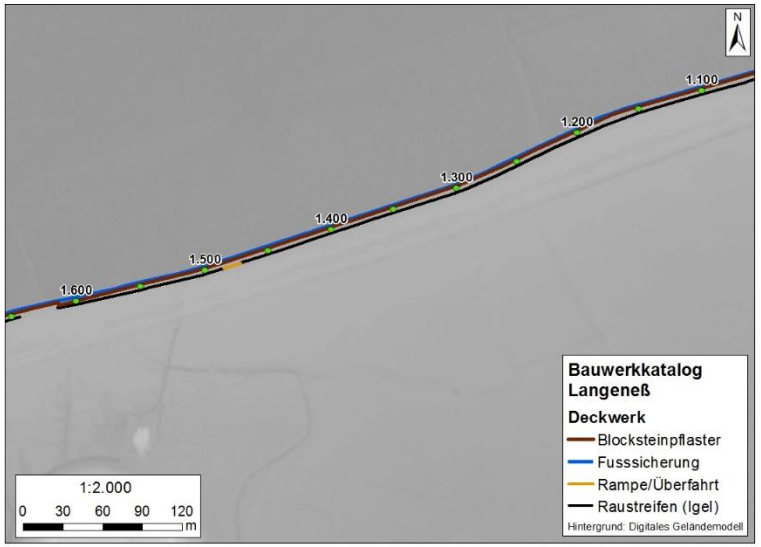
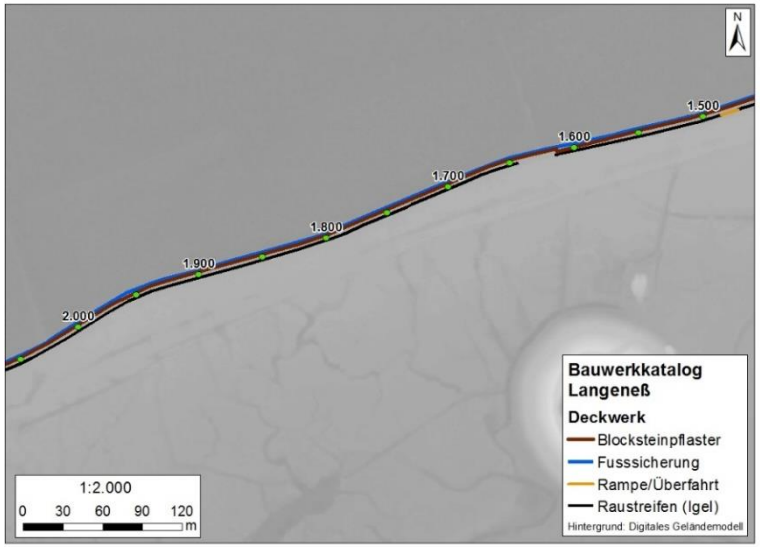
Bauwerksinformationen		***Regelquerschnitt***
Bauweise:	*Blocksteinpflasterung, Pflasterung mit Granitquadern*	
Ø-Höhe:	*2,03m NN*	
Ø-Breite:	*3,24m NN*	
Raustreifen:	*Setzsteindeckwerk (Hand)*	
Ø-Höhe:	*2,70m NN*	
Ø-Breite:	*2,89m NN*	
Watthöhe:	*0,95m NN*	
Schäden:	*Keine*	
Anmerkungen:	*Fußsicherung vorhanden*	
Baujahr:	*1933/34*	
Letzte Verstärkung:	*2007*	

Foto und Lage	***Details in Karte***
	

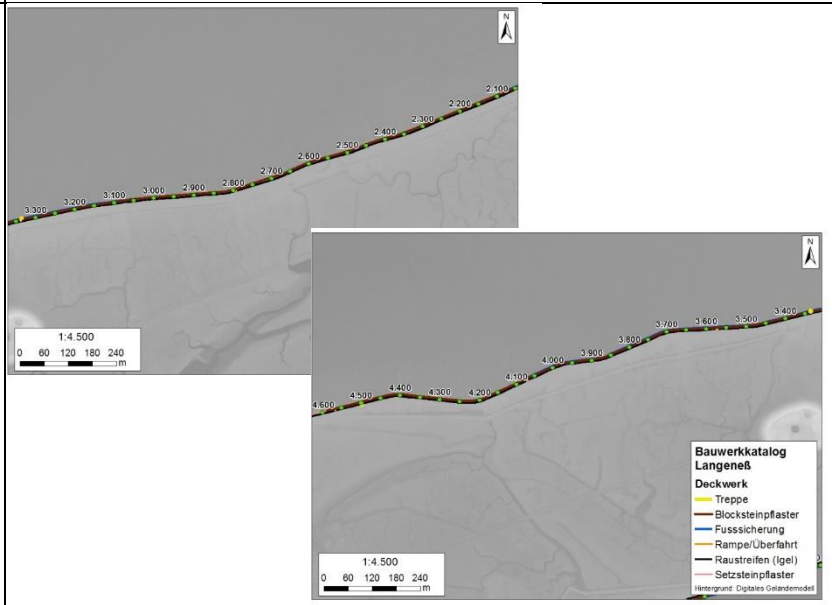
Kilometer: 1+550 bis 2+065

Bauwerksinformationen		***Regelquerschnitt***
Bauweise:	*Blocksteinpflasterung, Pflasterung mit Granitquadern*	*Kein Regelquerschnitt vorhanden*
Ø-Höhe:	*1,90m NN*	
Ø-Breite:	*Keine Angaben*	
Raustreifen:	*Setzsteindeckwerk (Hand)*	
Ø-Höhe:	*2,81m NN*	
Ø-Breite:	*Keine Angaben*	
Watthöhe:	*0,91m NN*	
Schäden:	*Keine*	
Anmerkungen:	*Fußsicherung vorhanden*	
Baujahr:	*1933/34*	
Letzte Verstärkung:	*fertige Deckwerkverstärkung*	

Foto und Lage	***Details in Karte***
	

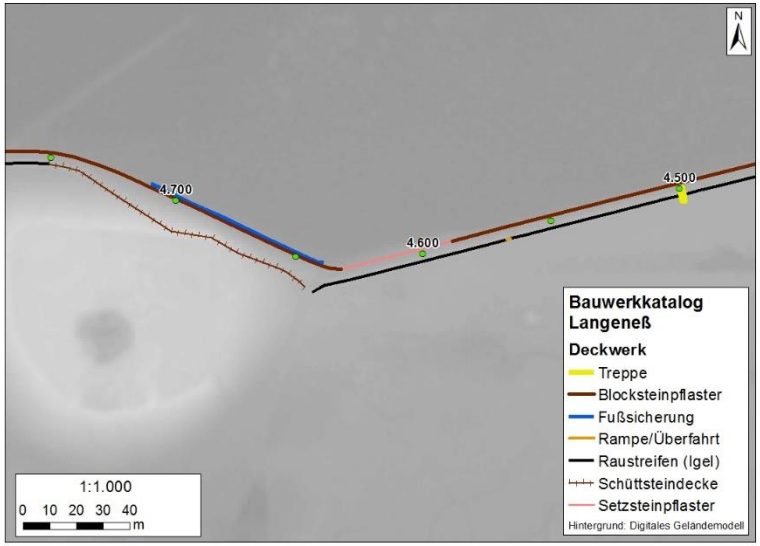
Kilometer: 2+065 bis 4+590

Bauwerksinformationen		***Regelquerschnitt***
Bauweise:	*Blocksteinpflasterung, Pflasterung mit Granitquadern*	*Kein Regelquerschnitt vorhanden*
Ø-Höhe:	*1,90m NN*	
Ø-Breite:	*Keine Angaben*	
Raustreifen:	*Setzsteindeckwerk (Hand)*	
Ø-Höhe:	*2,87m NN*	
Ø-Breite:	*Keine Angaben*	
Watthöhe:	*0,88m NN*	
Schäden:	*Keine*	
Anmerkungen:	*Fußsicherung von km 3+050 bis km 4+080 vorhanden, Raustreifen ist etwas breiter als im Abschnitt zuvor*	
Baujahr:	*1933/34*	
Letzte Verstärkung:	*fertige Deckwerkverstärkung*	

Foto und Lage	***Details in Karte***
	

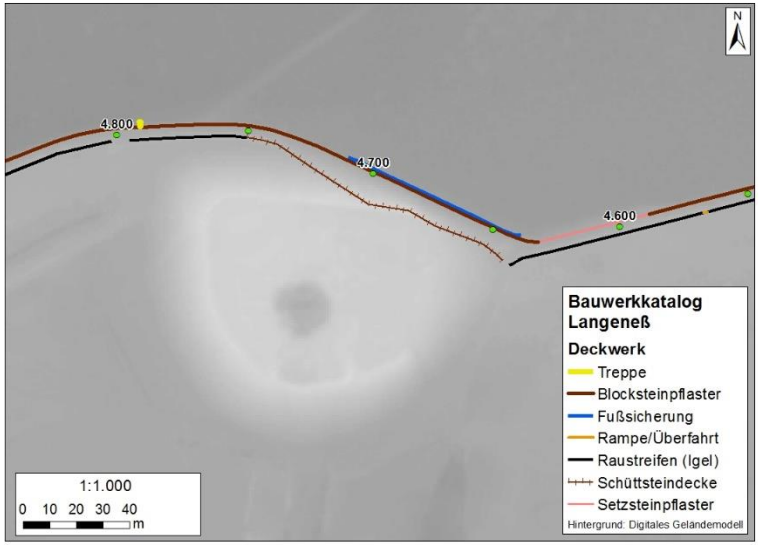
Kilometer: 4+590 bis 4+630

Bauwerksinformationen		***Regelquerschnitt***
Bauweise:	*Pflasterung mit behauenen Feldsteinen, Granitquader*	*Kein Regelquerschnitt vorhanden*
Ø-Höhe:	*2,00m NN*	
Ø-Breite:	*Keine Angaben*	
Raustreifen:	*Setzsteindeckwerk (Hand)*	
Ø-Höhe:	*2,97m NN*	
Ø-Breite:	*Keine Angaben*	
Watthöhe:	*1,17m NN*	
Schäden:	*Keine*	
Anmerkungen:	*Sehr flache Neigung des Deckwerks, daher breiter als im vorherigen Abschnitt, kleine Anlegestelle*	
Baujahr:	*1924*	
Letzte Verstärkung:	*fertige Deckwerkverstärkung*	

Foto und Lage	***Details in Karte***
	

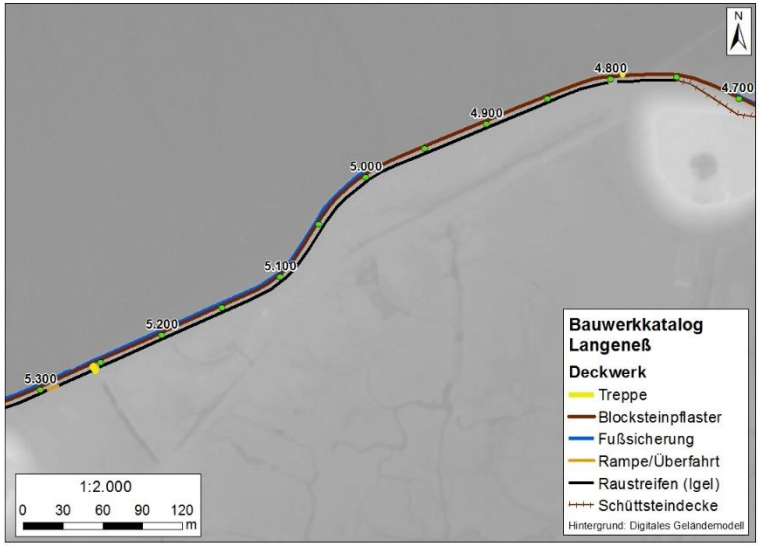
Kilometer: 4+630 bis 4+750

Bauwerksinformationen		***Regelquerschnitt***
Bauweise:	*Blocksteinpflasterung, Pflasterung mit Granitquadern*	*Kein Regelquerschnitt vorhanden*
Ø-Höhe:	*1,80m NN*	
Ø-Breite:	*Keine Angaben (Überschlagsicherung sehr schmal)*	
Raustreifen:	*-*	
Ø-Höhe:	*-*	
Ø-Breite:	*-*	
Watthöhe:	*1,17m NN*	
Schäden:	*Keine*	
Anmerkungen:	*Schüttsteindecke sichert den Warftfuß, Fußsicherung bis km 4+710*	
Baujahr:	*Keine Angaben*	
Letzte Verstärkung:	*fertige Deckwerkverstärkung*	

Foto und Lage	***Details in Karte***
	

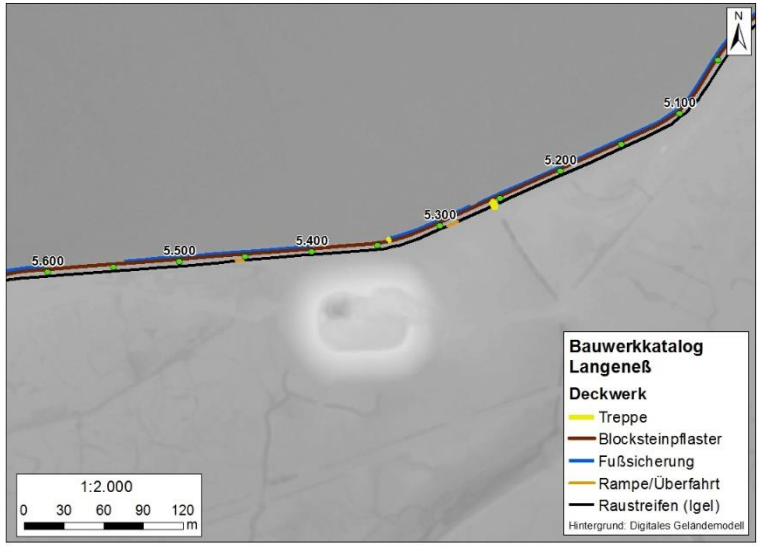
Kilometer: 4+750 bis 5+250

Bauwerksinformationen		***Regelquerschnitt***
Bauweise:	*Blocksteinpflasterung, Pflasterung mit Granitquadern*	*Kein Regelquerschnitt vorhanden*
Ø-Höhe:	*1,84m NN*	
Ø-Breite:	*Keine Angaben*	
Raustreifen:	*Setzsteindeckwerk (Hand)*	
Ø-Höhe:	*2,9m NN*	
Ø-Breite:	*Keine Angaben*	
Watthöhe:	*1,11m NN*	
Schäden:	*Keine*	
Anmerkungen:	*Fußsicherung ab km 5+000*	
Baujahr:	*Keine Angaben*	
Letzte Verstärkung:	*fertige Deckwerkverstärkung*	

Foto und Lage	***Details in Karte***
	

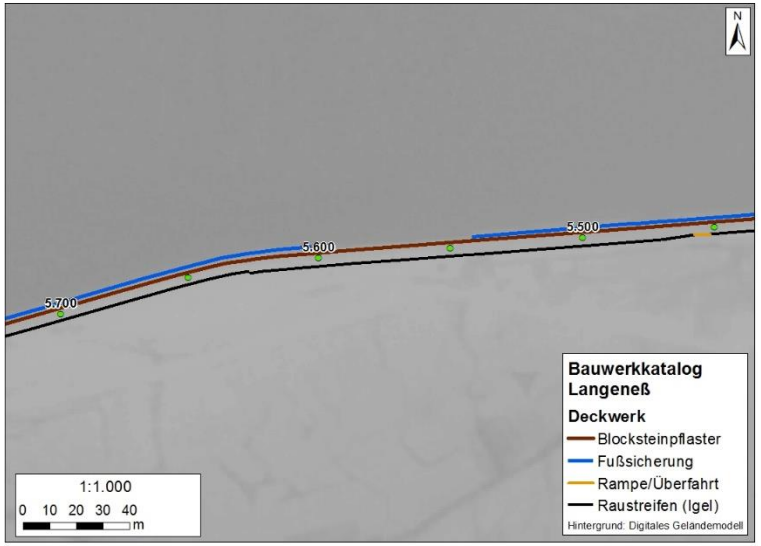
Kilometer: 5+250 bis 5+470

Bauwerksinformationen		***Regelquerschnitt***
Bauweise:	*Blocksteinpflasterung, Pflasterung mit Granitquadern*	*Kein Regelquerschnitt vorhanden*
Ø-Höhe:	*1,84m NN*	
Ø-Breite:	*Keine Angaben*	
Raustreifen:	*Schüttsteindeckwerk mit Betonvermörtelung*	
Ø-Höhe:	*2,91m NN*	
Ø-Breite:	*Keine Angaben*	
Watthöhe:	*1,11m NN*	
Schäden:	*Keine*	
Anmerkungen:	*Streckenweise keine Fußsicherung*	
Baujahr:	*Keine Angaben*	
Letzte Verstärkung:	*fertige Deckwerkverstärkung*	

Foto und Lage	***Details in Karte***
	

Kilometer: 5+470 bis 5+535

Bauwerksinformationen		***Regelquerschnitt***
Bauweise:	*Blocksteinpflasterung, Pflasterung mit Granitquadern*	*Kein Regelquerschnitt vorhanden*
Ø-Höhe:	*1,8m NN*	
Ø-Breite:	*Keine Angaben*	
Raustreifen:	*Setzsteindeckwerk (Hand)*	
Ø-Höhe:	*2,9m NN*	
Ø-Breite:	*Keine Angaben*	
Watthöhe:	*0,93m NN*	
Schäden:	*Keine*	
Anmerkungen:	*Fußsicherung vorhanden*	
Baujahr:	*Keine Angaben*	
Letzte Verstärkung:	*fertige Deckwerkverstärkung*	

Foto und Lage	***Details in Karte***
	

Kilometer: 5+535 bis 5+740

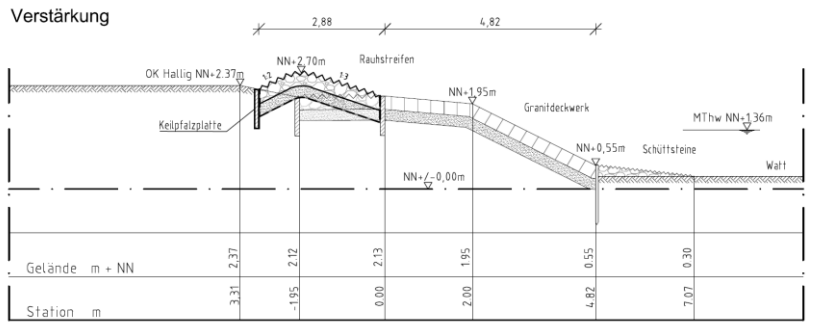
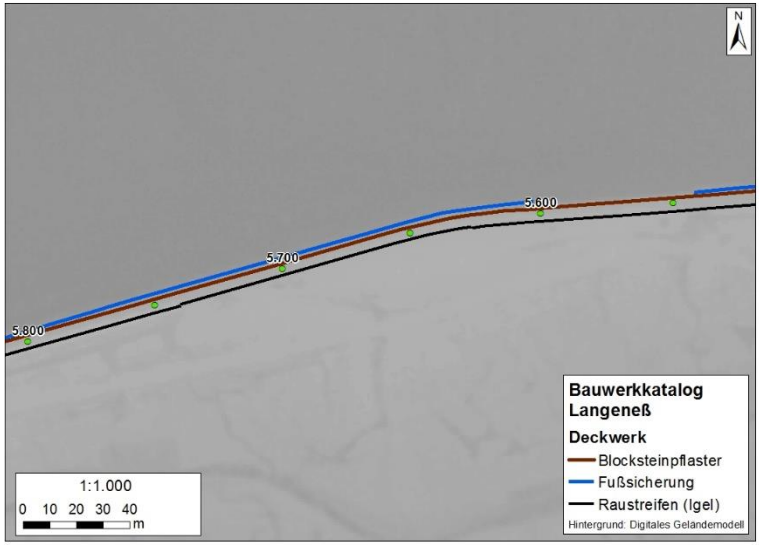
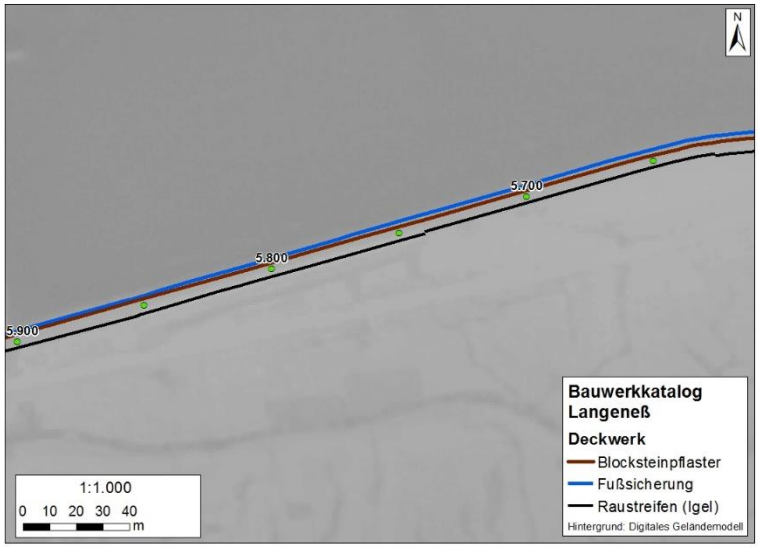
Bauwerksinformationen		***Regelquerschnitt***
Bauweise:	*Blocksteinpflasterung, Pflasterung mit Granitquadern*	
Ø-Höhe:	*1,95m NN*	
Ø-Breite:	*4,82m NN*	
Raustreifen:	*Setzsteindeckwerk (Hand)*	
Ø-Höhe:	*2,7m NN*	
Ø-Breite:	*2,88m*	
Watthöhe:	*0,3m NN*	
Schäden:	*Dort, wo Verstärkung erst 2013 erfolgte sind starke Auskolkungen zu verzeichnen*	
Anmerkungen:	*Fußsicherung vorhanden*	
Baujahr:	*Keine Angaben*	
Letzte Verstärkung:	*5+535 bis 5+ 625: 2007; 5+625 bis 5+740: 2013*	

Foto und Lage	***Details in Karte***
	

Kilometer: 5+740 bis 5+860

Bauwerksinformationen		***Regelquerschnitt***
Bauweise:	*Blocksteinpflasterung, Pflasterung mit Granitquadern*	*Kein Regelquerschnitt vorhanden*
Ø-Höhe:	*1,80m NN*	
Ø-Breite:	*Keine Angaben*	
Raustreifen:	*Schüttsteindeckwerk mit Betonvermörtelung*	
Ø-Höhe:	*2,7m NN*	
Ø-Breite:	*2,83m*	
Watthöhe:	*0,17m NN*	
Schäden:	*Starke Auskolkungen im Hinterland*	
Anmerkungen:	*keine*	
Baujahr:	*Keine Angaben*	
Letzte Verstärkung:	*fertige Deckwerkverstärkung*	

Foto und Lage	***Details in Karte***
	

Kilometer: 5+860 bis 6+105

Bauwerksinformationen		***Regelquerschnitt***
Bauweise:	*Blocksteinpflasterung, Pflasterung mit Granitquadern*	
Ø-Höhe:	*1,67m NN*	
Ø-Breite:	*4,11m*	
Raustreifen:	*Schotterdeckwerk mit 2 Komponenten-Verklebung*	
Ø-Höhe:	*2,5m NN*	
Ø-Breite:	*5,11m*	
Watthöhe:	*0,3m NN*	
Schäden:	*keine*	
Anmerkungen:	*Bauweise nach Baukastenprinzip*	
Baujahr:	*Keine Angaben*	
Letzte Verstärkung:	*2013*	

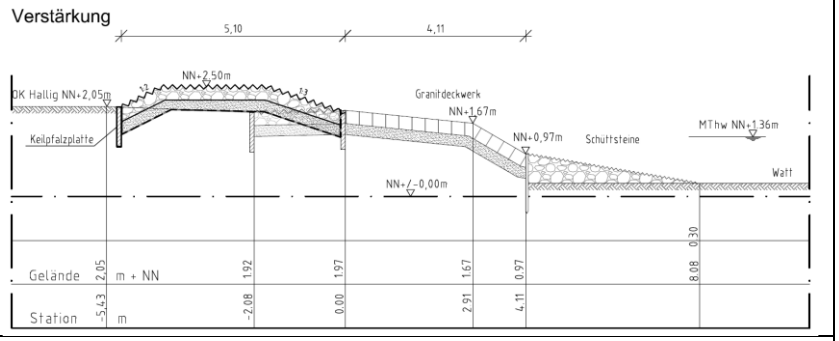
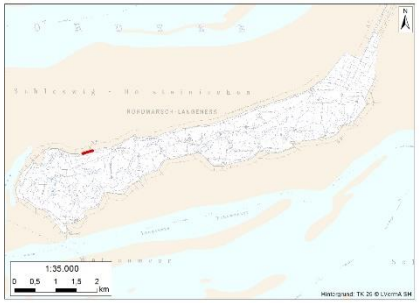
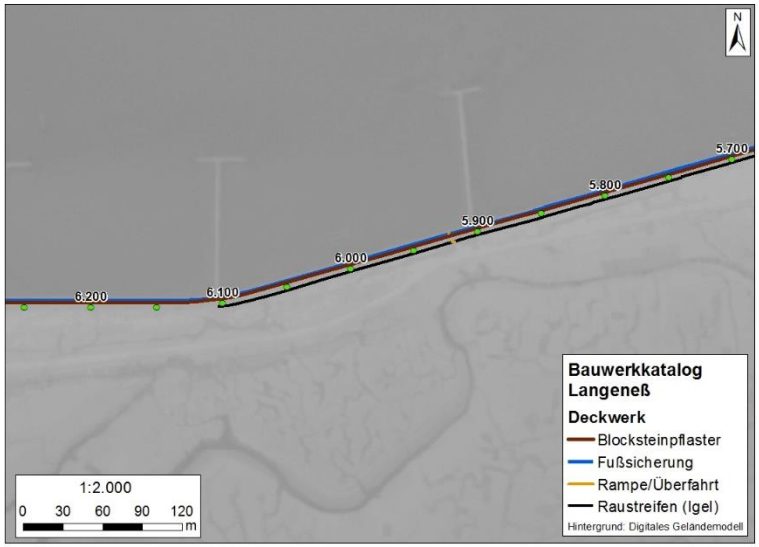


Foto und Lage	***Details in Karte***
Kein aktuelles Foto verfügbar	





Kilometer: 6+105 bis 6+270

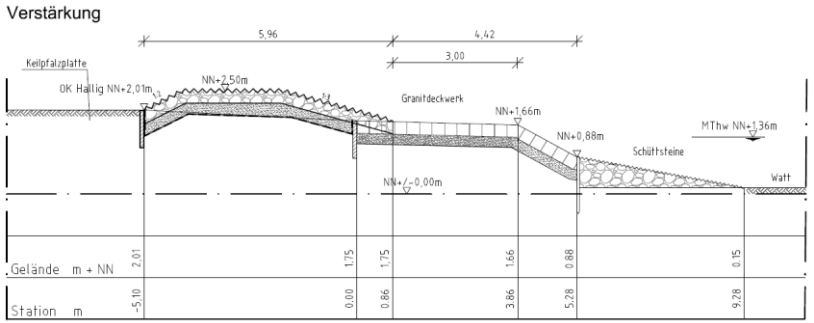
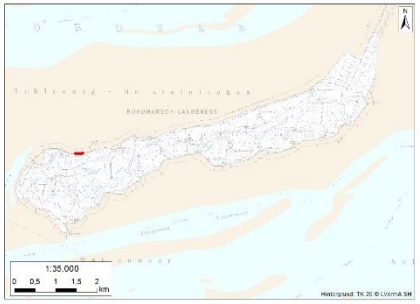
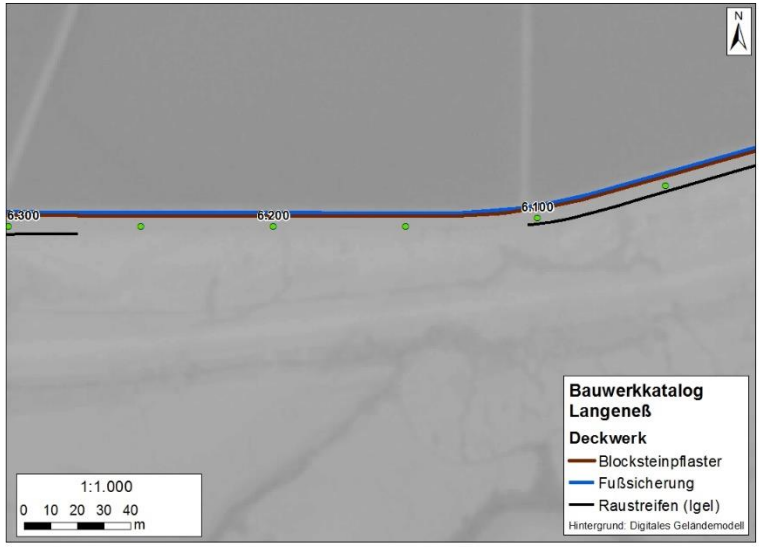
Bauwerksinformationen		***Regelquerschnitt***
Bauweise:	*Blocksteinpflasterung, Pflasterung mit Granitquadern*	
Ø-Höhe:	*1,66m NN*	
Ø-Breite:	*4,42m*	
Raustreifen:	*Schotterdeckwerk mit 2 Komponenten-Verklebung*	
Ø-Höhe:	*2,5m NN*	
Ø-Breite:	*5,96m*	
Watthöhe:	*0,15m NN*	
Schäden:	*keine*	
Anmerkungen:	*Bauweise nach Baukastenprinzip*	
Baujahr:	*Keine Angaben*	
Letzte Verstärkung:	*2013*	

Foto und Lage	***Details in Karte***
Kein aktuelles Foto verfügbar 	

Kilometer: 6+270 bis 6+545

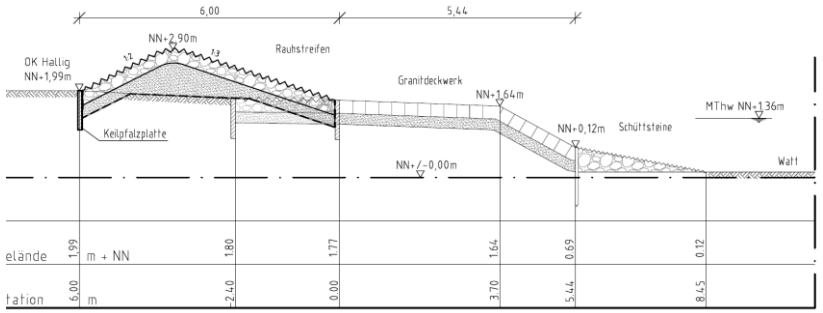
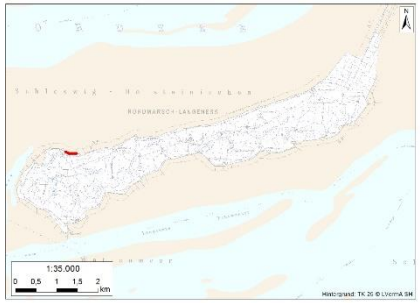
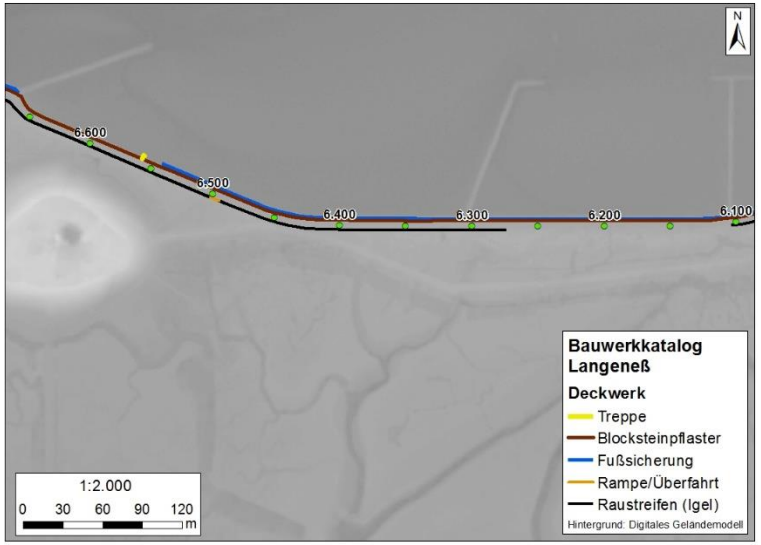
Bauwerksinformationen		***Regelquerschnitt***
Bauweise:	*Blocksteinpflasterung, Pflasterung mit Granitquadern*	
Ø-Höhe:	*1,64m NN*	
Ø-Breite:	*5,44m*	
Raustreifen:	*Schotterdeckwerk mit 2 Komponenten-Verklebung*	
Ø-Höhe:	*2,9m NN*	
Ø-Breite:	*6,00m*	
Watthöhe:	*0,12m NN*	
Schäden:	*keine*	
Anmerkungen:	*Fußsicherung vorhanden*	
Baujahr:	*Keine Angaben*	
Letzte Verstärkung:	*2013*	

Foto und Lage	***Details in Karte***
	

Kilometer: 6+545 bis 6+670

Bauwerksinformationen	
Bauweise:	*Blocksteinpflasterung, Pflasterung mit Granitquadern*
Ø-Höhe:	*1,58m NN*
Ø-Breite:	*6,53m*
Raustreifen:	*Schotterdeckwerk mit 2 Komponenten-Verklebung*
Ø-Höhe:	*2,9m NN*
Ø-Breite:	*6,1m*
Watthöhe:	*0,26m NN*
Schäden:	*keine*
Anmerkungen:	*keine*
Baujahr:	*Keine Angaben*
Letzte Verstärkung:	*2009*

Regelquerschnitt

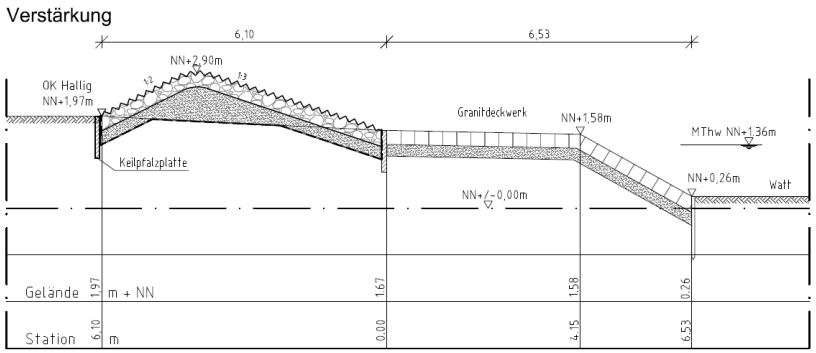
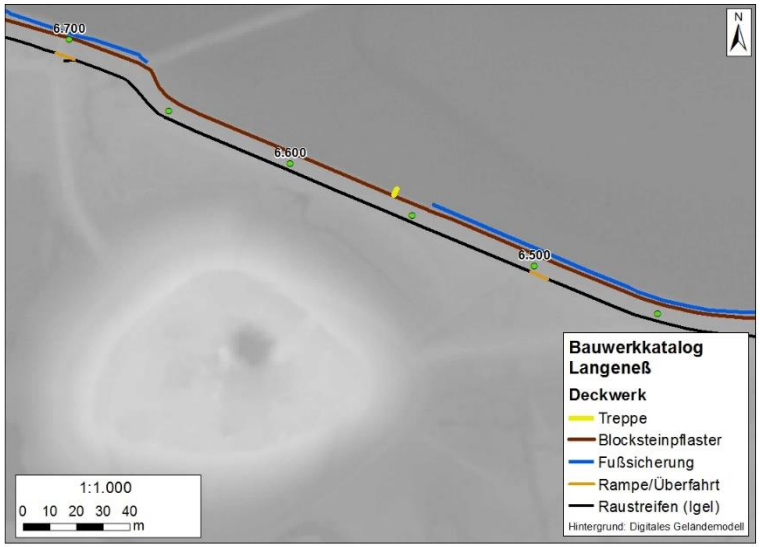


Foto und Lage

Details in Karte



Kilometer: 6+670 bis 6+720

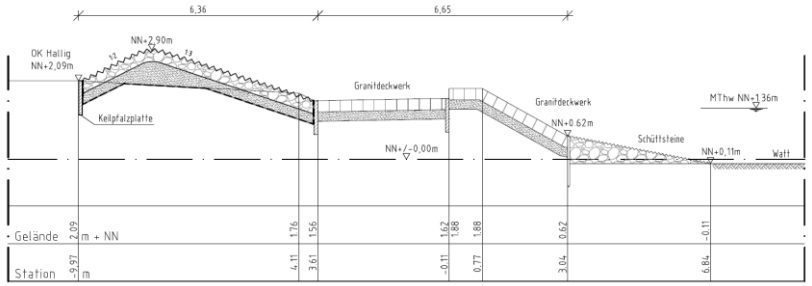
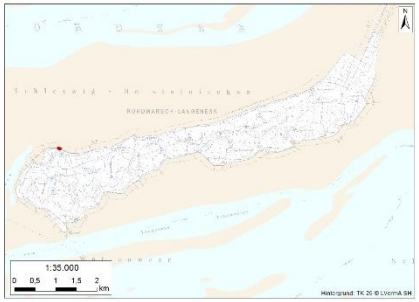
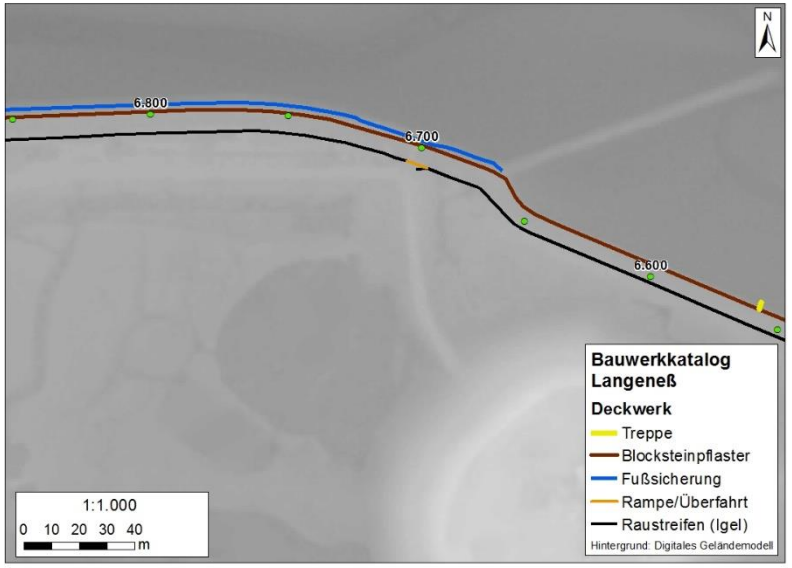
Bauwerksinformationen		***Regelquerschnitt***
Bauweise:	*Blocksteinpflasterung, Pflasterung mit Granitblöcken, überhöht*	
Ø-Höhe:	*1,62m NN/ 1,88m NN*	
Ø-Breite:	*6,65m*	
Raustreifen:	*Schotterdeckwerk mit 2 Komponenten-Verklebung*	
Ø-Höhe:	*2,9m NN*	
Ø-Breite:	*6,36m*	
Watthöhe:	*0,11m NN*	
Schäden:	*keine*	
Anmerkungen:	*Fußsicherung vorhanden*	
Baujahr:	*Keine Angaben*	
Letzte Verstärkung:	*2008*	

Foto und Lage	***Details in Karte***
	

Kilometer: 6+720 bis 6+955

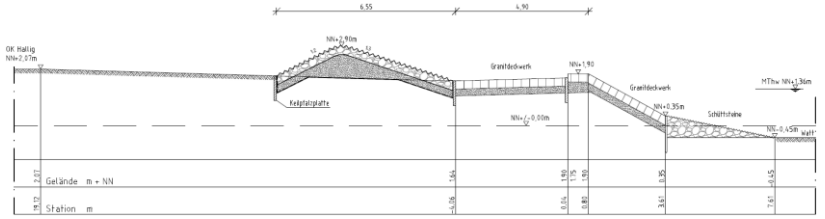
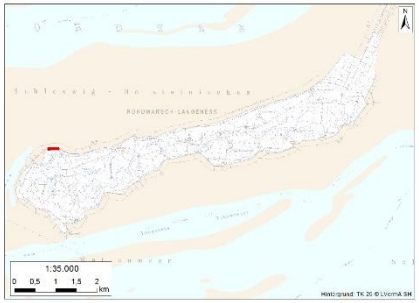
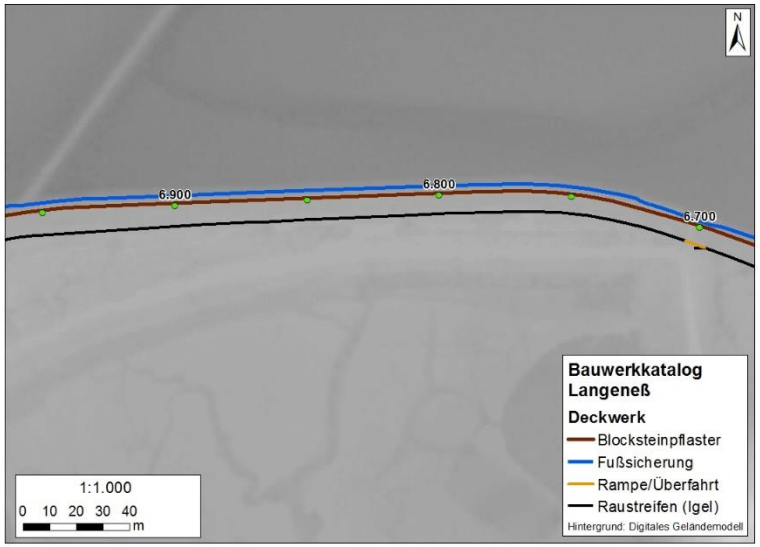
Bauwerksinformationen		***Regelquerschnitt***
Bauweise:	*Blocksteinpflasterung, Pflasterung mit Granitquadern, überhöht*	
Ø-Höhe:	*1,64m NN/ 1,9m NN*	
Ø-Breite:	*4,90 m*	
Raustreifen:	*Schotterdeckwerk mit 2 Komponenten-Verklebung*	
Ø-Höhe:	*2,9m NN*	
Ø-Breite:	*6,55m*	
Watthöhe:	*0,11m NN*	
Schäden:	*keine*	
Anmerkungen:	*Fußsicherung vorhanden*	
Baujahr:	*Keine Angaben*	
Letzte Verstärkung:	*6+720 bis 6+830: 2008* *6+830 bis 6+955: 2009*	

Foto und Lage	***Details in Karte***
	

Kilometer: 6+955 bis 7+120

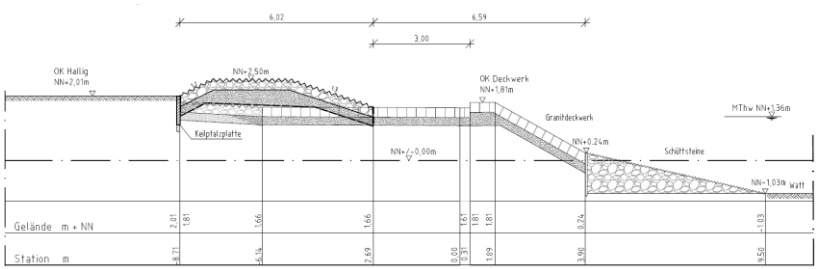
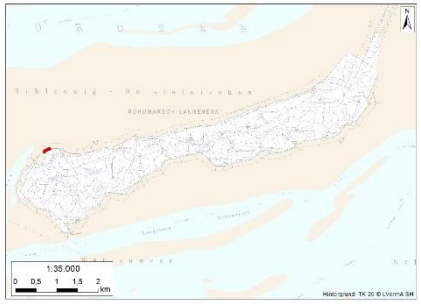
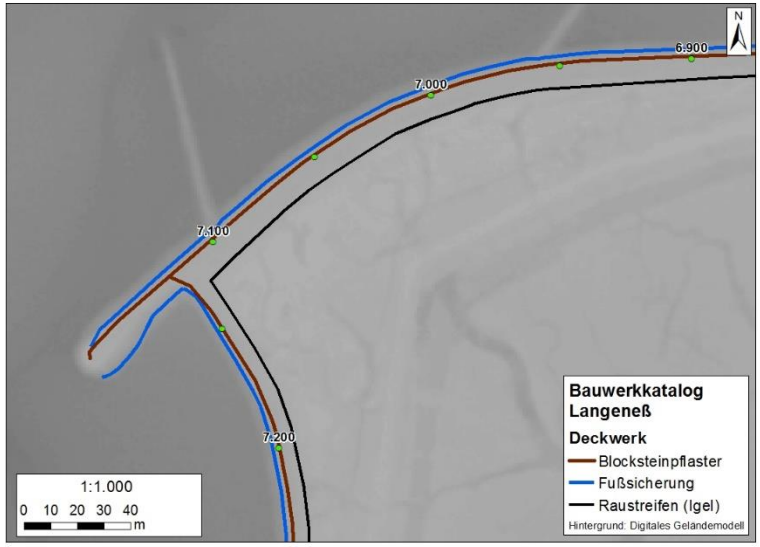
Bauwerksinformationen		***Regelquerschnitt***
Bauweise:	*Blocksteinpflasterung, Pflasterung mit Granitquadern, überhöht*	
Ø-Höhe:	*1,61m NN/ 1,81m NN*	
Ø-Breite:	*6,59 m*	
Raustreifen:	*Schotterdeckwerk mit 2 Komponenten-Verklebung*	
Ø-Höhe:	*2,5m NN*	
Ø-Breite:	*6,02m*	
Watthöhe:	*-1,03m NN*	
Schäden:	*keine*	
Anmerkungen:	*Fußsicherung vorhanden, Bauweise nach Baukastenprinzip*	
Baujahr:	*Keine Angaben*	
Letzte Verstärkung:	*2012*	

Foto und Lage	***Details in Karte***
	

Kilometer: 7+120 bis 7+370

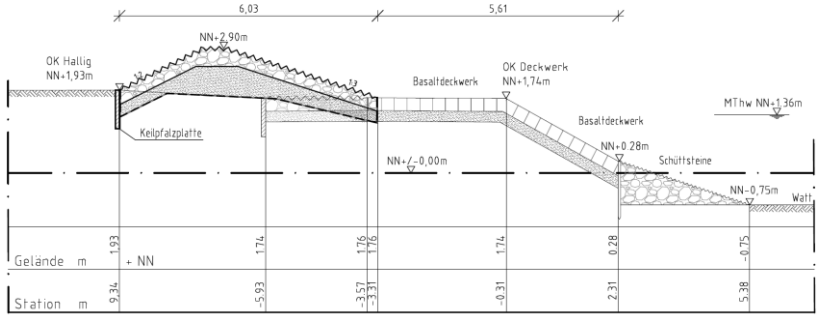
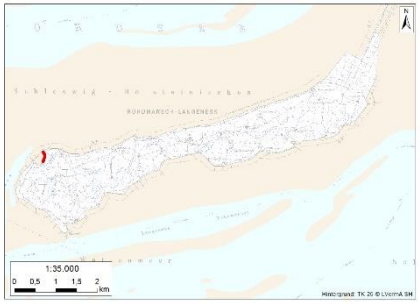
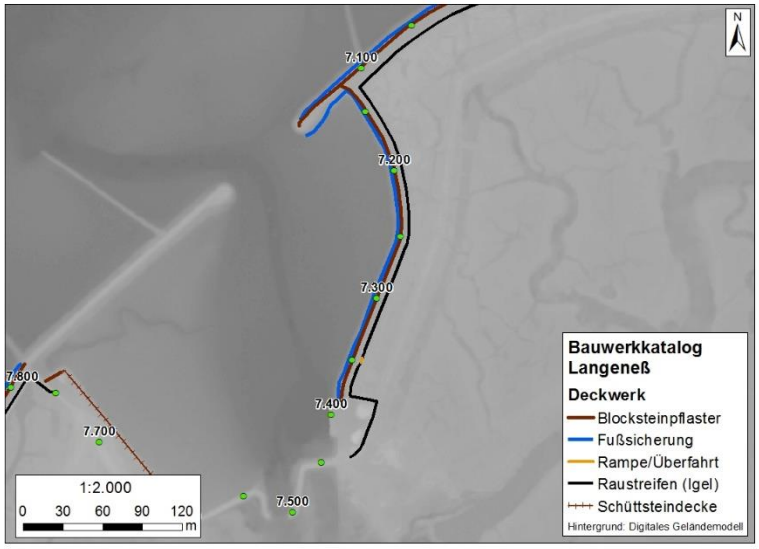
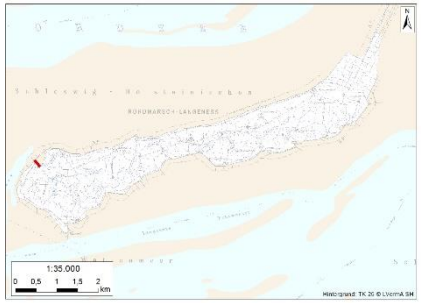
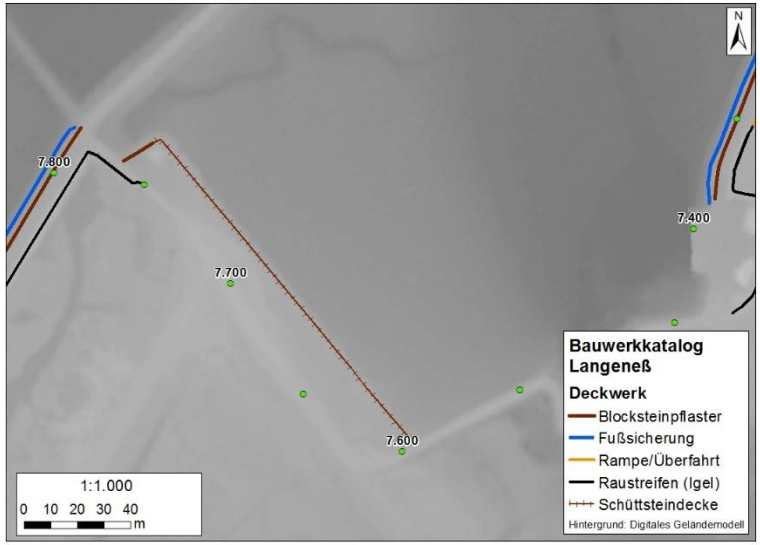
Bauwerksinformationen		***Regelquerschnitt***
Bauweise:	*Blocksteinpflasterung, Pflasterung mit Granitquadern, überhöht*	
Ø-Höhe:	*1,74m NN*	
Ø-Breite:	*5,61 m*	
Raustreifen:	*Setzsteindeckwerk (Hand)*	
Ø-Höhe:	*2,9m NN*	
Ø-Breite:	*6,03m*	
Watthöhe:	*-0,75m NN*	
Schäden:	*keine*	
Anmerkungen:	*Fußsicherung vorhanden*	
Baujahr:	*1927/28*	
Letzte Verstärkung:	*Bis km 7+255: 2012* *Bis km 7+350: 2008*	

Foto und Lage	***Details in Karte***
	

Kilometer: 7+600 bis 7+750

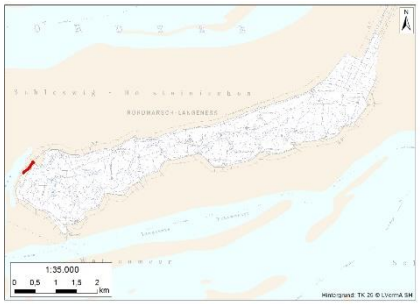
Bauwerksinformationen		***Regelquerschnitt***
Deckwerk:	*--*	*Kein Regelquerschnitt vorhanden*
Ø-Höhe:	*--*	
Ø-Breite:	*--*	
Raustreifen:	*Steinschüttung*	
Ø-Höhe:	*1,66m NN*	
Ø-Breite:	*Keine Angaben*	
Watthöhe:	*0,81m NN*	
Schäden:	*keine*	
Anmerkungen:	*Fußsicherung vorhanden*	
Baujahr:	*Keine Angaben*	
Letzte Verstärkung:	*--*	

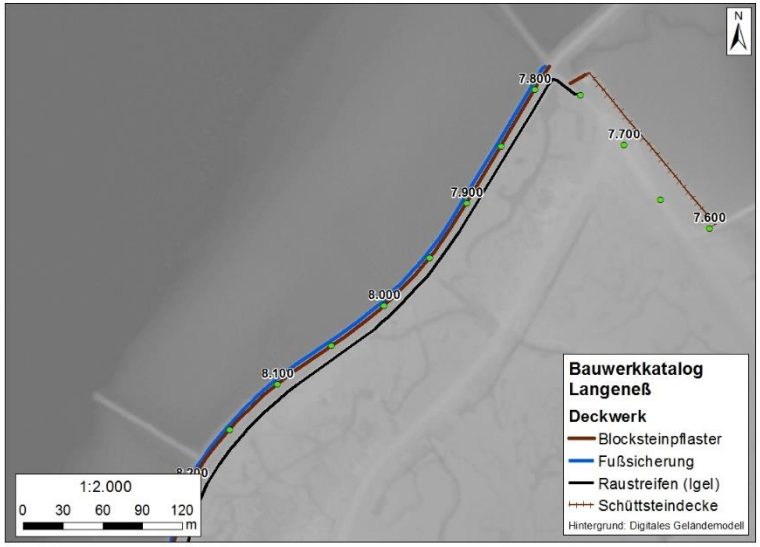
Foto und Lage	***Details in Karte***
	

Kilometer: 7+750 bis 8+100

Bauwerksinformationen		***Regelquerschnitt***
Deckwerk:	*Blocksteinpflasterung, Pflasterung mit Granitblöcken, überhöht, Böschung mit Asphalt vergossen, Deckwerk am Raustreifen mit Beton übergossen*	*Kein Regelquerschnitt vorhanden*
Ø-Höhe:	*1,70m/ 1,90m NN*	
Ø-Breite:	*Keine Angaben*	
Raustreifen:	*Schüttsteindeckwerk mit Betonvermörtelung*	
Ø-Höhe:	*2,87m NN*	
Ø-Breite:	*Keine Angaben*	
Watthöhe:	*-0,73m NN*	
Schäden:	*keine*	
Anmerkungen:	*Fußsicherung vorhanden*	
Baujahr:	*1927*	
Letzte Verstärkung:	*Fertige Deckwerkverstärkung*	

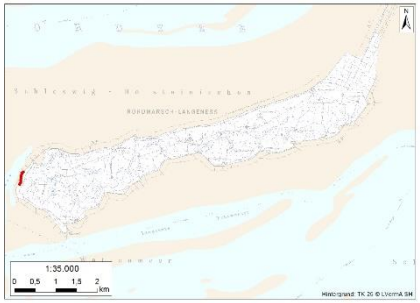
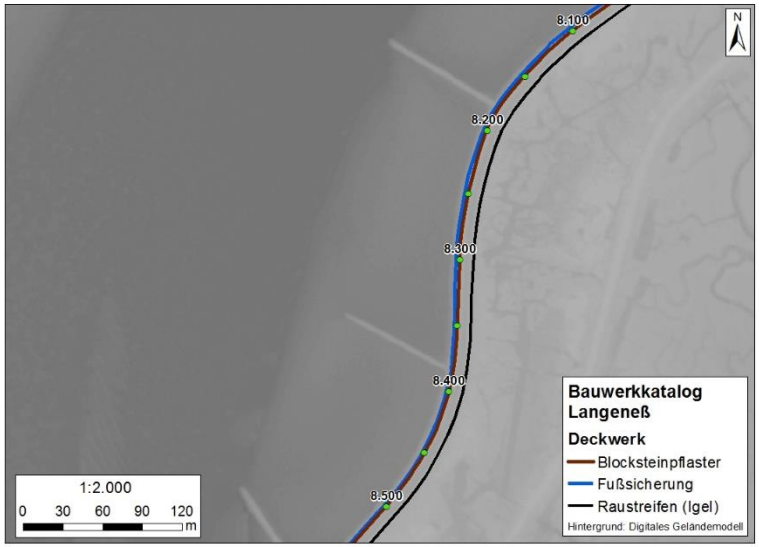
Foto und Lage	***Details in Karte***





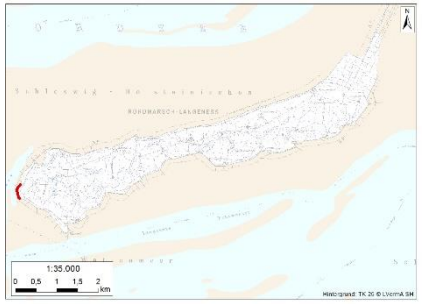
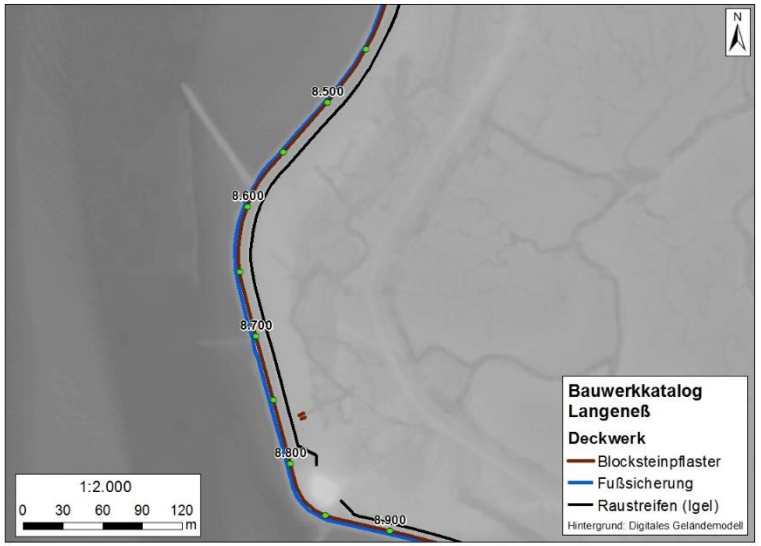
Kilometer: 8+100 bis 8+465

Bauwerksinformationen		***Regelquerschnitt***
Deckwerk:	*Blocksteinpflasterung, Pflasterung mit Granitblöcken, überhöht, Böschung mit Asphalt vergossen, Deckwerk am Raustreifen mit Beton übergossen*	*Kein Regelquerschnitt vorhanden*
Ø-Höhe:	*1,70m/ 1,90m NN*	
Ø-Breite:	*Keine Angaben*	
Raustreifen:	*Schüttsteindeckwerk mit Betonvermörtelung*	
Ø-Höhe:	*2,65m NN*	
Ø-Breite:	*Keine Angaben*	
Watthöhe:	*-0,73m NN*	
Schäden:	*starke Auskolkungen im Hinterland*	
Anmerkungen:	*Fußsicherung vorhanden*	
Baujahr:	*1927*	
Letzte Verstärkung:	*Bis 2020*	

Foto und Lage	***Details in Karte***
	

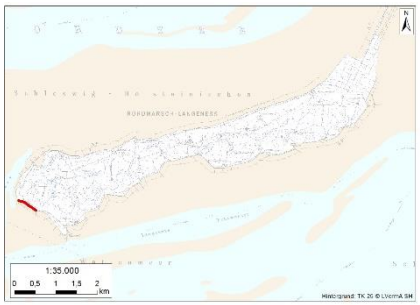
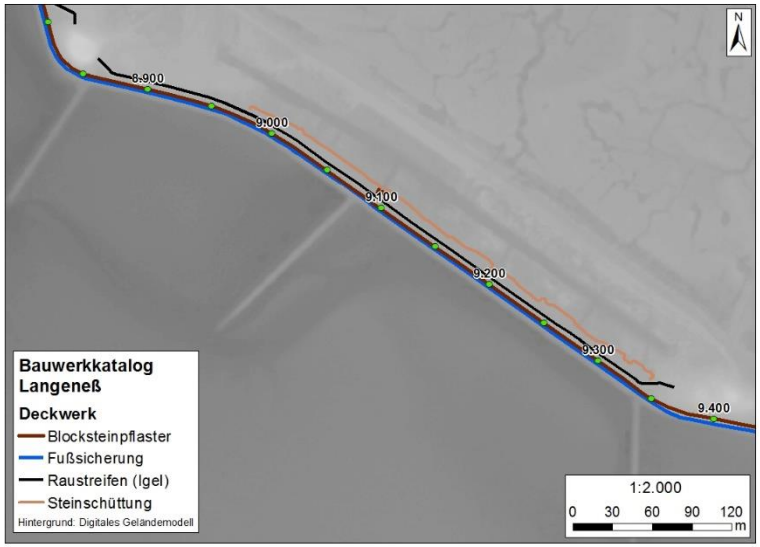
Kilometer: 8+465 bis 8+855

Bauwerksinformationen		***Regelquerschnitt***
Deckwerk:	*Blocksteinpflasterung, Pflasterung mit Granitblöcken und Basaltsäulen, überhöht*	*Kein Regelquerschnitt vorhanden*
Ø-Höhe:	*1,70m/ 1,90m NN*	
Ø-Breite:	*Keine Angaben*	
Raustreifen:	*Schüttsteindeckwerk mit Betonvermörtelung*	
Ø-Höhe:	*2,85m NN*	
Ø-Breite:	*Keine Angaben*	
Watthöhe:	*-0,48m NN*	
Schäden:	*Senken in der Überschlagsicherung*	
Anmerkungen:	*Fußsicherung vorhanden*	
Baujahr:	*Keine Angaben*	
Letzte Verstärkung:	*Fertige Deckwerkverstärkung*	

Foto und Lage	***Details in Karte***
	

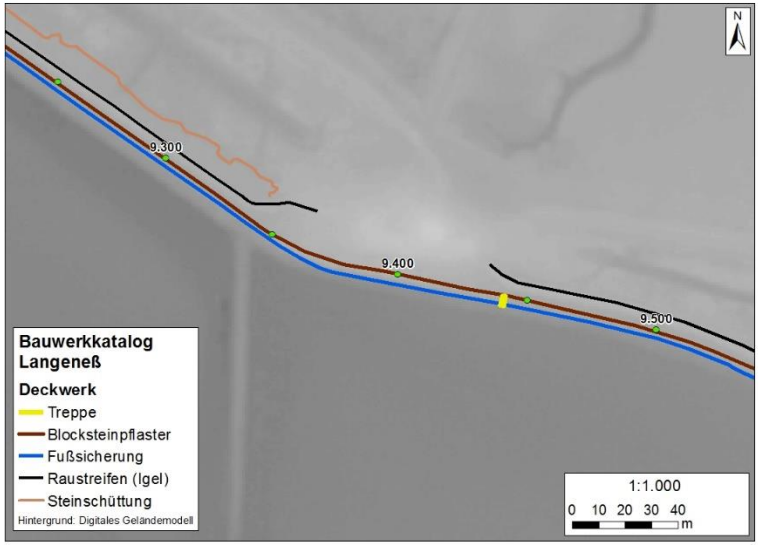
Kilometer: 8+855 bis 9+340

Bauwerksinformationen		***Regelquerschnitt***
Deckwerk:	*Blocksteinpflasterung, Pflasterung mit Granitblöcken und Basaltsäulen, überhöht*	*Kein Regelquerschnitt vorhanden*
Ø-Höhe:	*1,65m/ 1,85m NN*	
Ø-Breite:	*Keine Angaben*	
Raustreifen:	*Schüttsteindeckwerk mit Betonvermörtelung*	
Ø-Höhe:	*2,6m NN*	
Ø-Breite:	*Keine Angaben*	
Watthöhe:	*-0,48m NN*	
Schäden:	*Auskolkungen im Hinterland, Steinschüttungen als Überschlagsicherung hinter dem Raustreifen angebracht, Senken in der Überhöhung zur Bildung von Wasserpolster*	
Anmerkungen:	*Fußsicherung vorhanden*	
Baujahr:	*Keine Angaben*	
Letzte Verstärkung:	*Fertige Deckwerkverstärkung*	

Foto und Lage	***Details in Karte***
	

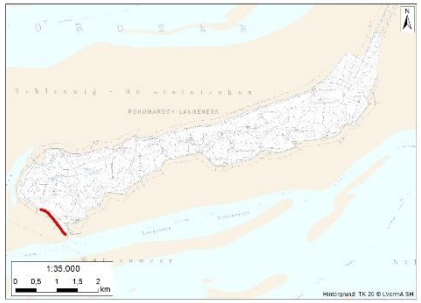
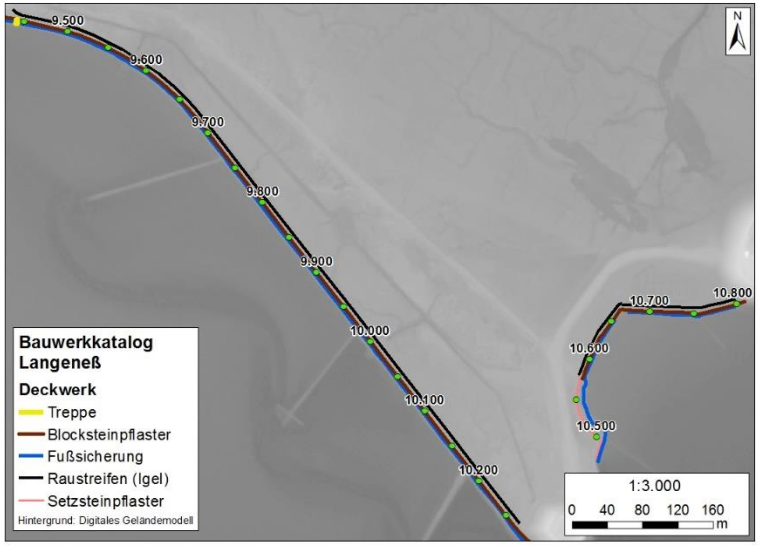
Kilometer: 9+340 bis 9+440

Bauwerksinformationen		***Regelquerschnitt***
Deckwerk:	*Blocksteinpflasterung, Pflasterung mit Granitblöcken, mit Asphalt vergossen*	*Kein Regelquerschnitt vorhanden*
Ø-Höhe:	*2,23m NN*	
Ø-Breite:	*Keine Angaben*	
Raustreifen:	*--*	
Ø-Höhe:	*--*	
Ø-Breite:	*--*	
Watthöhe:	*-0,3m NN*	
Schäden:	*keine*	
Anmerkungen:	*Fußsicherung vorhanden, Fuß der Halgewarft mit Granitsteinen befestigt*	
Baujahr:	*Keine Angaben*	
Letzte Verstärkung:	*Fertige Deckwerkverstärkung*	

Foto und Lage	***Details in Karte***
	

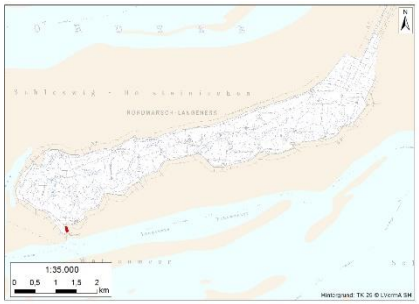
Kilometer: 9+440 bis 10+295

Bauwerksinformationen		***Regelquerschnitt***
Deckwerk:	*Blocksteinpflasterung, Pflasterung mit Granitblöcken, mit Asphalt vergossen, überhöht*	*Kein Regelquerschnitt vorhanden*
Ø-Höhe:	*1,72m NN/ 1,92mNN*	
Ø-Breite:	*Keine Angaben*	
Raustreifen:	*Schüttsteindeckwerk mit Betonvermörtelung*	
Ø-Höhe:	*2,79m NN*	
Ø-Breite:	*Keine Angaben*	
Watthöhe:	*-0,65m NN*	
Schäden:	*keine*	
Anmerkungen:	*Fußsicherung vorhanden*	
Baujahr:	*Keine Angaben*	
Letzte Verstärkung:	*Fertige Deckwerkverstärkung*	

Foto und Lage	***Details in Karte***
	

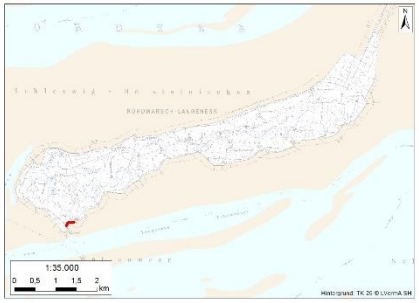
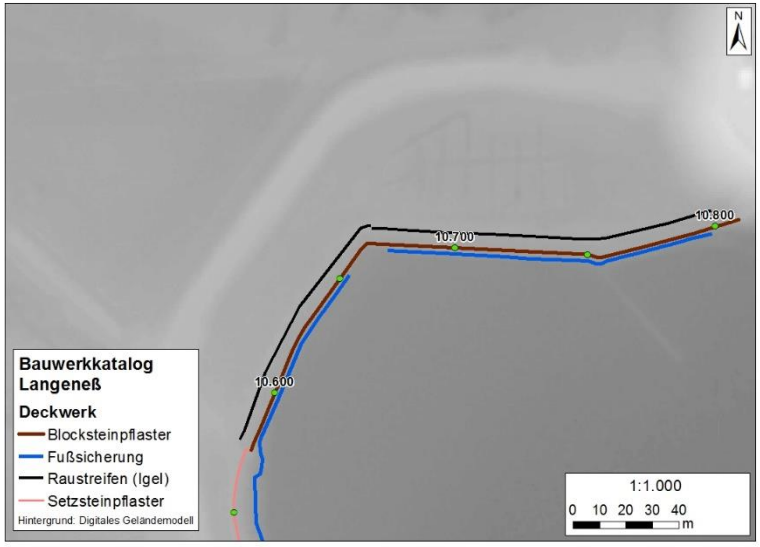
Kilometer: 10+500 bis 10+570

Bauwerksinformationen		***Regelquerschnitt***
Deckwerk:	*Rau gesetztes Setzsteindeckwerk (Hand) aus behauenen Granitblöcken*	*Kein Regelquerschnitt vorhanden*
Ø-Höhe:	*2,23m NN*	
Ø-Breite:	*Keine Angaben*	
Raustreifen:	*--*	
Ø-Höhe:	*--*	
Ø-Breite:	*--*	
Watthöhe:	*-0,37m NN*	
Schäden:	*keine*	
Anmerkungen:	*Fußsicherung vorhanden*	
Baujahr:	*Keine Angaben*	
Letzte Verstärkung:	*Keine Angaben*	

Foto und Lage	***Details in Karte***
	

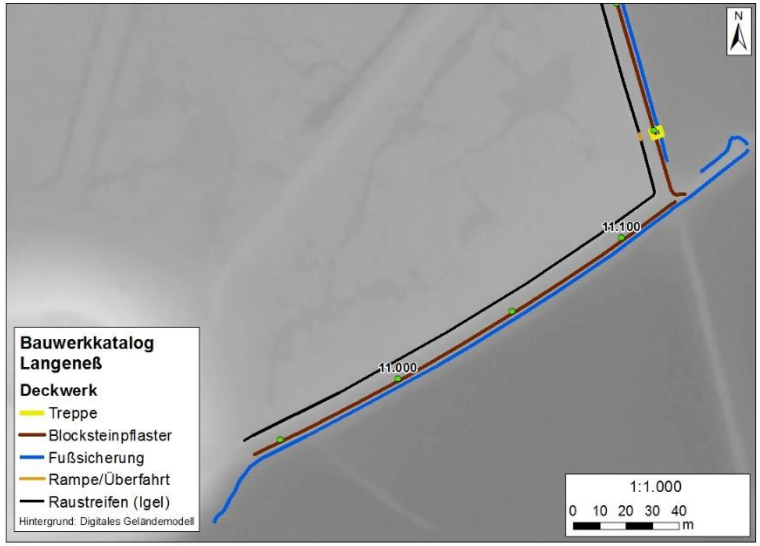
Kilometer: 10+570 bis 10+800

Bauwerksinformationen		***Regelquerschnitt***
Deckwerk:	*Blocksteinpflaster, Pflasterung mit Granitblöcken, behauenen Feldsteinen, mit Asphalt vergossen*	*Kein Regelquerschnitt vorhanden*
Ø-Höhe:	*1,51m NN*	
Ø-Breite:	*Keine Angaben*	
Raustreifen:	*Setzsteindeckwerk (Hand)*	
Ø-Höhe:	*2,22m NN*	
Ø-Breite:	*Keine Angaben*	
Watthöhe:	*-0,37m NN*	
Schäden:	*keine*	
Anmerkungen:	*Fußsicherung teilweise vorhanden, Raustreifen ab km 10+665 schmaler und niedriger (Ø-Höhe 1,69m NN)*	
Baujahr:	*Keine Angaben*	
Letzte Verstärkung:	*Keine Angaben*	

Foto und Lage	***Details in Karte***
	

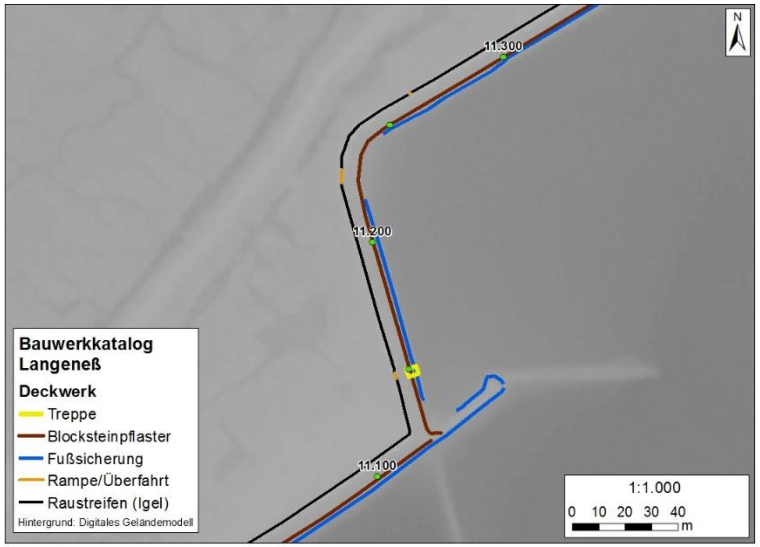
Kilometer: 10+940 bis 11+130

Bauwerksinformationen		***Regelquerschnitt***
Deckwerk:	*Blocksteinpflaster, Pflasterung mit Findlingen, Basaltsäulen und Granitquader, mit Asphalt vergossen*	*Kein Regelquerschnitt vorhanden*
Ø-Höhe:	*1,47m NN*	
Ø-Breite:	*Keine Angaben*	
Raustreifen:	*Schüttsteindeckwerk mit Betonvermörtelung*	
Ø-Höhe:	*2,52m NN*	
Ø-Breite:	*Keine Angaben*	
Watthöhe:	*-0,57m NN*	
Schäden:	*keine*	
Anmerkungen:	*Fußsicherung vorhanden*	
Baujahr:	*Keine Angaben*	
Letzte Verstärkung:	*Fertige Deckwerkverstärkung*	

Foto und Lage	***Details in Karte***
	

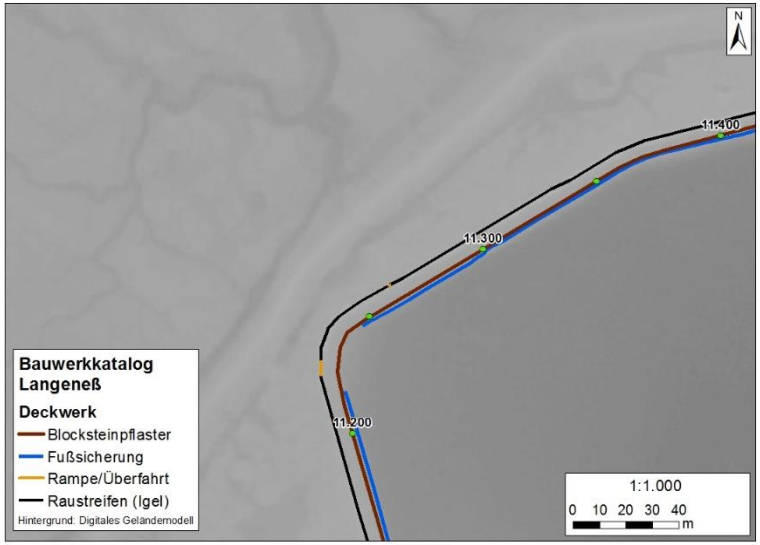
Kilometer: 11+130 bis 11+210

Bauwerksinformationen		**Regelquerschnitt**
Deckwerk:	*Blocksteinpflaster, Pflasterung mit Basaltsäulen*	*Kein Regelquerschnitt vorhanden*
Ø-Höhe:	*1,59m NN*	
Ø-Breite:	*Keine Angaben*	
Raustreifen:	*Schüttsteindeckwerk mit Betonvermörtelung*	
Ø-Höhe:	*2,5m NN*	
Ø-Breite:	*Keine Angaben*	
Watthöhe:	*0,28m NN*	
Schäden:	*keine*	
Anmerkungen:	*Fußsicherung vorhanden*	
Baujahr:	*Keine Angaben*	
Letzte Verstärkung:	*Fertige Deckwerkverstärkung*	

Foto und Lage	**Details in Karte**
	

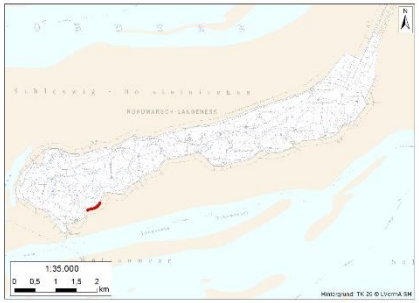
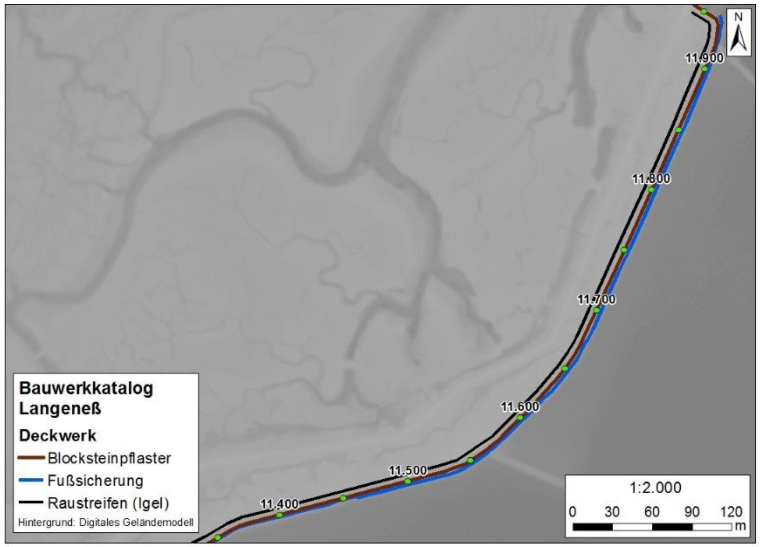
Kilometer: 11+210 bis 11+330

Bauwerksinformationen		***Regelquerschnitt***
Deckwerk:	*Blocksteinpflaster, Pflasterung mit Granitquadern (innen) und Basaltsäulen (aussen)*	*Kein Regelquerschnitt vorhanden*
Ø-Höhe:	*1,54m NN*	
Ø-Breite:	*Keine Angaben*	
Raustreifen:	*Setzsteindeckwerk (Hand)*	
Ø-Höhe:	*2,59m NN*	
Ø-Breite:	*Keine Angaben*	
Watthöhe:	*-0,23m NN*	
Schäden:	*keine*	
Anmerkungen:	*Fußsicherung teilweise vorhanden, Raustreifen bis km 11+250 etwas breiter*	
Baujahr:	*Keine Angaben*	
Letzte Verstärkung:	*Fertige Deckwerkverstärkung*	

Foto und Lage	***Details in Karte***
	

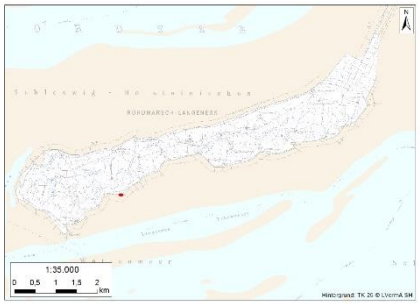
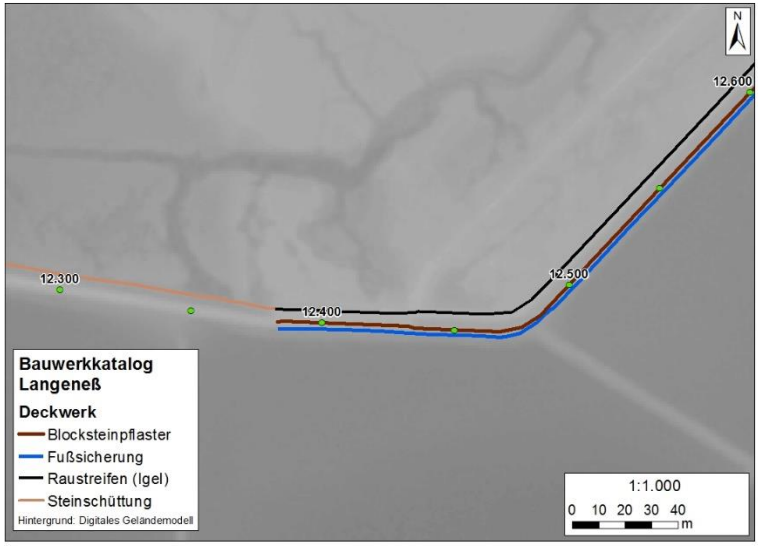
Kilometer: 11+330 bis 11+960

Bauwerksinformationen		***Regelquerschnitt***
Deckwerk:	*Blocksteinpflaster, Pflasterung mit Granitquadern (innen) und Basaltsäulen (aussen), stellenweise komplett mit Basaltsäulen*	*Kein Regelquerschnitt vorhanden*
Ø-Höhe:	*1,57m NN*	
Ø-Breite:	*Keine Angaben*	
Raustreifen:	*Schüttsteindeckwerk mit Betonvermörtelung*	
Ø-Höhe:	*2,22m NN*	
Ø-Breite:	*Keine Angaben*	
Watthöhe:	*-0,23m NN*	
Schäden:	*keine*	
Anmerkungen:	*Fußsicherung teilweise vorhanden*	
Baujahr:	*Keine Angaben*	
Letzte Verstärkung:	*Fertige Deckwerkverstärkung*	

Foto und Lage	***Details in Karte***
	

Kilometer: 12+380 bis 12+440

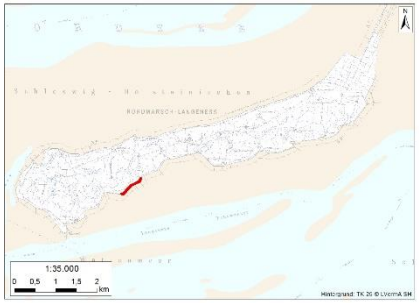
Bauwerksinformationen		***Regelquerschnitt***
Deckwerk:	*Blocksteinpflaster, Pflasterung mit Basaltsäulen*	*Kein Regelquerschnitt vorhanden*
Ø-Höhe:	*2,2m NN*	
Ø-Breite:	*Keine Angaben*	
Raustreifen:	*Schüttsteindeckwerk mit Betonvermörtelung*	
Ø-Höhe:	*2,37m NN*	
Ø-Breite:	*Keine Angaben*	
Watthöhe:	*-0,12m NN*	
Schäden:	*Auskolkungen im Hinterland*	
Anmerkungen:	*Fußsicherung teilweise vorhanden, Raustreifen kaum höher als Deckwerk*	
Baujahr:	*Keine Angaben*	
Letzte Verstärkung:	*Keine Angaben*	

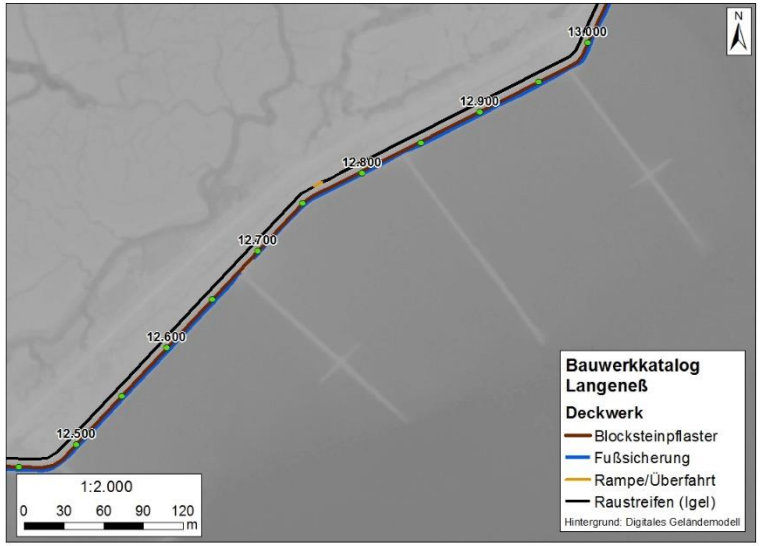
Foto und Lage	***Details in Karte***
	

Kilometer: 12+440 bis 13+060

Bauwerksinformationen		***Regelquerschnitt***
Deckwerk:	*Blocksteinpflaster, Pflasterung mit Granitquadern (innen) und Basaltsäulen (aussen),*	*Kein Regelquerschnitt vorhanden*
Ø-Höhe:	*1,58m NN*	
Ø-Breite:	*Keine Angaben*	
Raustreifen:	*Schüttsteindeckwerk mit Betonvermörtelung*	
Ø-Höhe:	*2,55m NN*	
Ø-Breite:	*Keine Angaben*	
Watthöhe:	*0,16m NN*	
Schäden:	*keine*	
Anmerkungen:	*Fußsicherung vorhanden*	
Baujahr:	*Keine Angaben*	
Letzte Verstärkung:	*Fertige Deckwerkverstärkung*	

Foto und Lage	***Details in Karte***





Kilometer: 13+070 bis 14+315

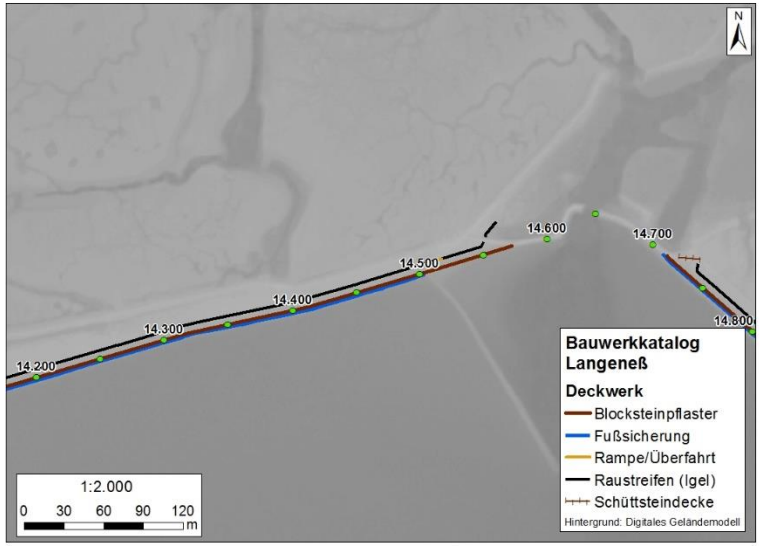
Bauwerksinformationen		***Regelquerschnitt***
Deckwerk:	*Blocksteinpflaster, Pflasterung mit Granitquadern (innen) und Basaltsäulen (aussen)*	*Kein Regelquerschnitt vorhanden*
Ø-Höhe:	*1,68m NN*	
Ø-Breite:	*Keine Angaben*	
Raustreifen:	*Schüttsteindeckwerk mit Betonvermörtelung*	
Ø-Höhe:	*2,77m NN*	
Ø-Breite:	*Keine Angaben*	
Watthöhe:	*0,25m NN*	
Schäden:	*keine*	
Anmerkungen:	*Fußsicherung vorhanden*	
Baujahr:	*1930/1931*	
Letzte Verstärkung:	*Fertige Deckwerkverstärkung*	

Foto und Lage	***Details in Karte***

Kilometer: 14+315 bis 14+510

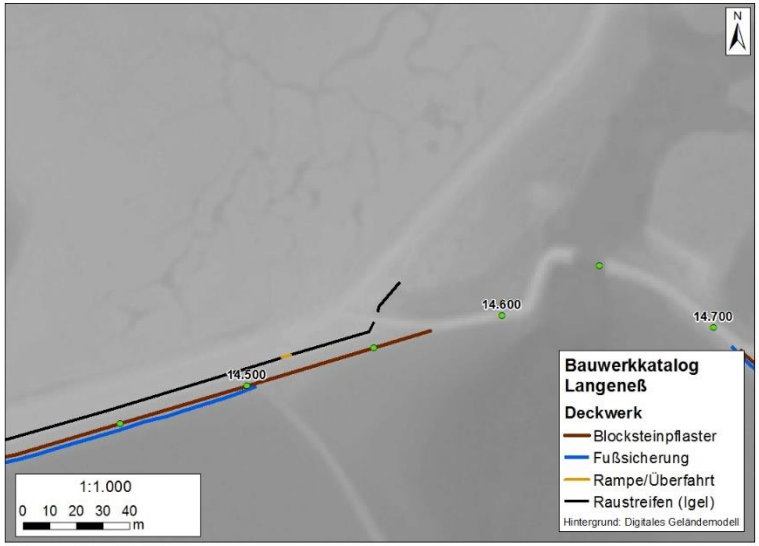
Bauwerksinformationen		***Regelquerschnitt***
Deckwerk:	*Blocksteinpflaster, Pflasterung mit Granitquadern, Kante mit Betonmörtel verklammert*	*Kein Regelquerschnitt vorhanden*
Ø-Höhe:	*1,88m NN*	
Ø-Breite:	*Keine Angaben*	
Raustreifen:	*Schüttsteindeckwerk mit Betonvermörtelung*	
Ø-Höhe:	*2,75m NN*	
Ø-Breite:	*Keine Angaben*	
Watthöhe:	*0,29m NN*	
Schäden:	*keine*	
Anmerkungen:	*Fußsicherung vorhanden*	
Baujahr:	*1930/1931*	
Letzte Verstärkung:	*Fertige Deckwerkverstärkung*	

Foto und Lage	***Details in Karte***



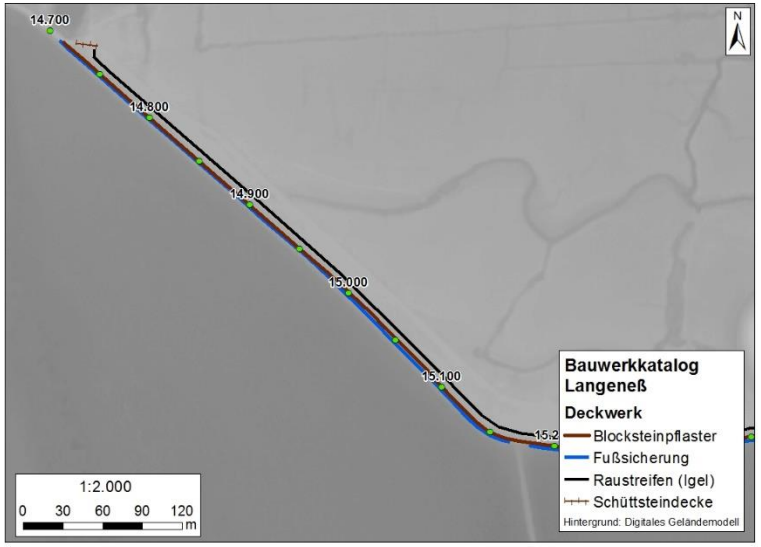
Kilometer: 14+510 bis 14+575

Bauwerksinformationen		***Regelquerschnitt***
Deckwerk:	*Blocksteinpflaster, Pflasterung mit behauenen Granitquadern, Feldsteine*	*Kein Regelquerschnitt vorhanden*
Ø-Höhe:	*1,75m NN*	
Ø-Breite:	*Keine Angaben*	
Raustreifen:	*Schüttsteindeckwerk mit Betonvermörtelung*	
Ø-Höhe:	*2,75m NN*	
Ø-Breite:	*Keine Angaben*	
Watthöhe:	*0,29m NN*	
Schäden:	*keine*	
Anmerkungen:	*Fußsicherung vorhanden*	
Baujahr:	*1930/1931*	
Letzte Verstärkung:	*Fertige Deckwerkverstärkung*	

Foto und Lage	***Details in Karte***
	

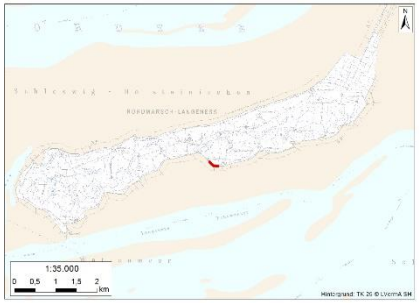
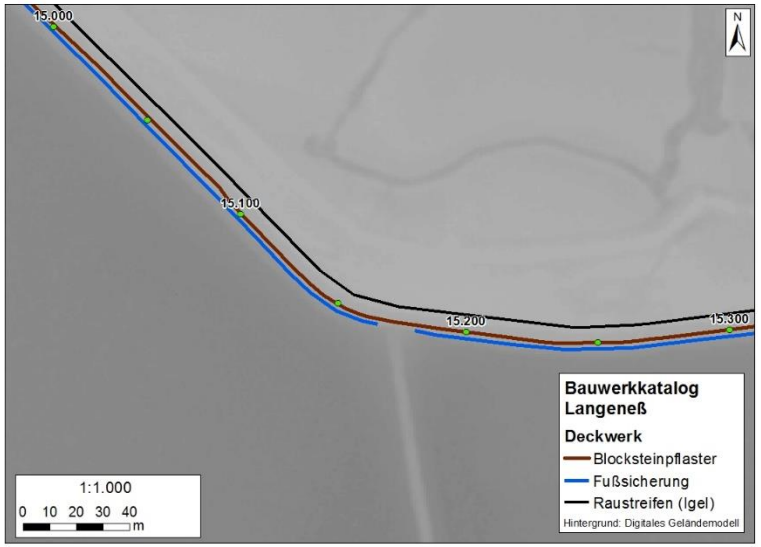
Kilometer: 14+710 bis 15+020

Bauwerksinformationen		***Regelquerschnitt***
Deckwerk:	*Blocksteinpflaster, Pflasterung mit behauenen Granitquadern, Feldsteine, mit Asphalt vergossen*	*Kein Regelquerschnitt vorhanden*
Ø-Höhe:	*1,93m NN*	
Ø-Breite:	*Keine Angaben*	
Raustreifen:	*Schüttsteindeckwerk mit Asphaltverklammerung*	
Ø-Höhe:	*2,59m NN*	
Ø-Breite:	*Keine Angaben*	
Watthöhe:	*0,1m NN*	
Schäden:	*keine*	
Anmerkungen:	*Fußsicherung vorhanden*	
Baujahr:	*Keine Angaben*	
Letzte Verstärkung:	*Fertige Deckwerkverstärkung*	

Foto und Lage	***Details in Karte***
	

Kilometer: 15+020 bis 15+270

Bauwerksinformationen		***Regelquerschnitt***
Deckwerk:	*Blocksteinpflaster, Pflasterung mit behauenen Granitquadern, Feldsteine, mit Asphalt vergossen*	*Kein Regelquerschnitt vorhanden*
Ø-Höhe:	*1,89m NN*	
Ø-Breite:	*Keine Angaben*	
Raustreifen:	*Schüttsteindeckwerk mit Asphaltverklammerung*	
Ø-Höhe:	*2,59m NN*	
Ø-Breite:	*Keine Angaben*	
Watthöhe:	*0,1m NN*	
Schäden:	*keine*	
Anmerkungen:	*Fußsicherung vorhanden, Hinterland ist hoch aufgewachsen*	
Baujahr:	*Keine Angaben*	
Letzte Verstärkung:	*Fertige Deckwerkverstärkung*	

Foto und Lage	***Details in Karte***
	

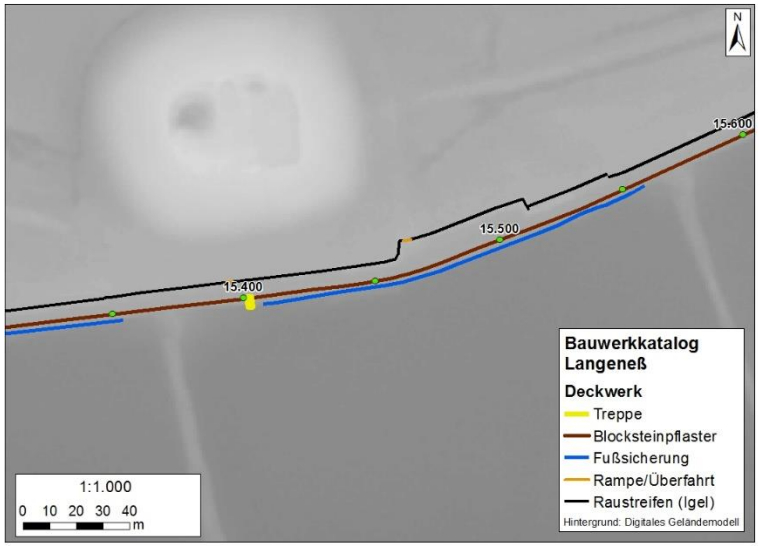
Kilometer: 15+270 bis 15+350

Bauwerksinformationen		***Regelquerschnitt***
Deckwerk:	*Blocksteinpflaster, Pflasterung mit Basaltsäulen*	*Kein Regelquerschnitt vorhanden*
Ø-Höhe:	*1,79m NN*	
Ø-Breite:	*Keine Angaben*	
Raustreifen:	*Schüttsteindeckwerk mit Betonvermörtelung*	
Ø-Höhe:	*2,64m NN*	
Ø-Breite:	*Keine Angaben*	
Watthöhe:	*-0,06m NN*	
Schäden:	*keine*	
Anmerkungen:	*Fußsicherung vorhanden, Hinterland ist hoch aufgewachsen*	
Baujahr:	*Keine Angaben*	
Letzte Verstärkung:	*Fertige Deckwerkverstärkung*	

Foto und Lage	***Details in Karte***

Kilometer: 15+350 bis 15+540

Bauwerksinformationen		***Regelquerschnitt***
Deckwerk:	*Blocksteinpflaster, Pflasterung mit Basaltsäulen und beschlagenen Granitblöcken (mit Asphalt vergossen)*	*Kein Regelquerschnitt vorhanden*
Ø-Höhe:	*1,84m NN*	
Ø-Breite:	*Keine Angaben*	
Raustreifen:	*Setzsteindeckwerk (Hand)*	
Ø-Höhe:	*2,9m NN*	
Ø-Breite:	*Keine Angaben*	
Watthöhe:	*-0,18m NN*	
Schäden:	*keine*	
Anmerkungen:	*Fußsicherung vorhanden, gepflasterte Fläche in Höge Tamenswarft*	
Baujahr:	*Keine Angaben*	
Letzte Verstärkung:	*Fertige Deckwerkverstärkung*	

Foto und Lage	***Details in Karte***
	

Kilometer: 15+540 bis 15+820

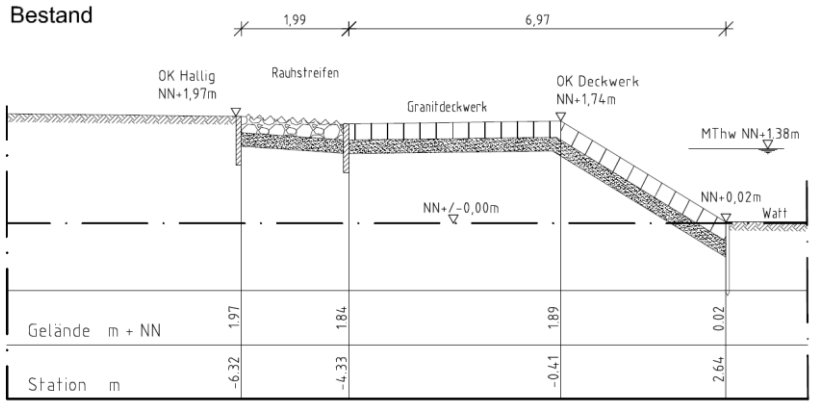
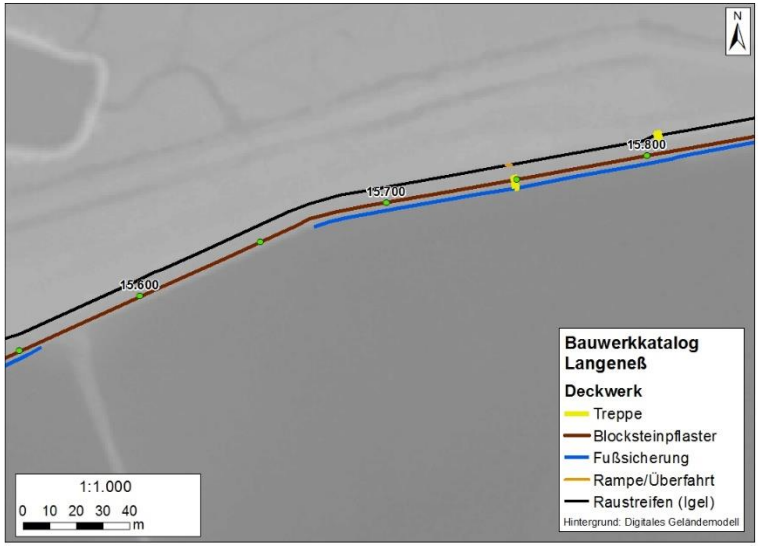
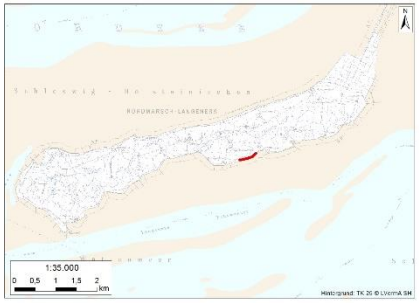
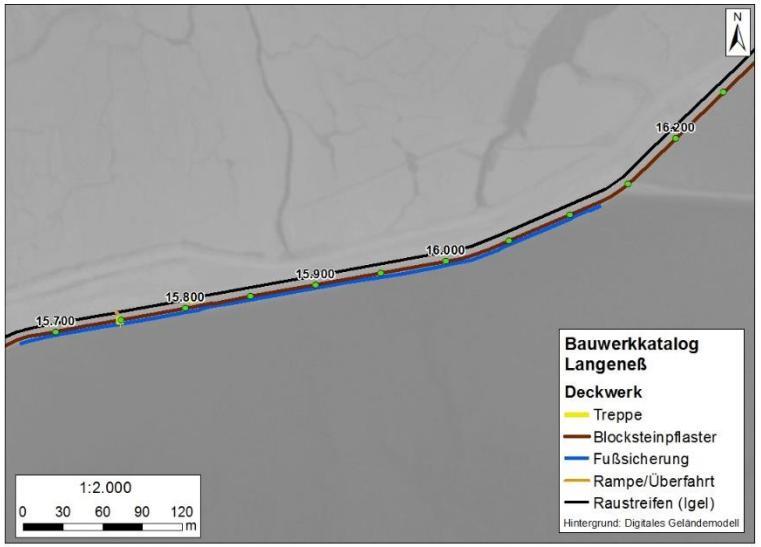
Bauwerksinformationen		**Regelquerschnitt**
Deckwerk:	*Blocksteinpflaster, Pflasterung mit Basaltsäulen, Granitquader*	
Ø-Höhe:	*1,74m NN*	
Ø-Breite:	*6,97m*	
Raustreifen:	*Setzsteindeckwerk (Hand)*	
Ø-Höhe:	*1,97m NN*	
Ø-Breite:	*1,99m*	
Watthöhe:	*0,02m NN*	
Schäden:	*Hinterland ist hoch aufgewachsen, Auskolkungen*	
Anmerkungen:	*Fußsicherung vorhanden*	
Baujahr:	*Keine Angaben*	
Letzte Verstärkung:	*Verstärkung nach 2013 geplant*	

Foto und Lage	**Details in Karte**
	

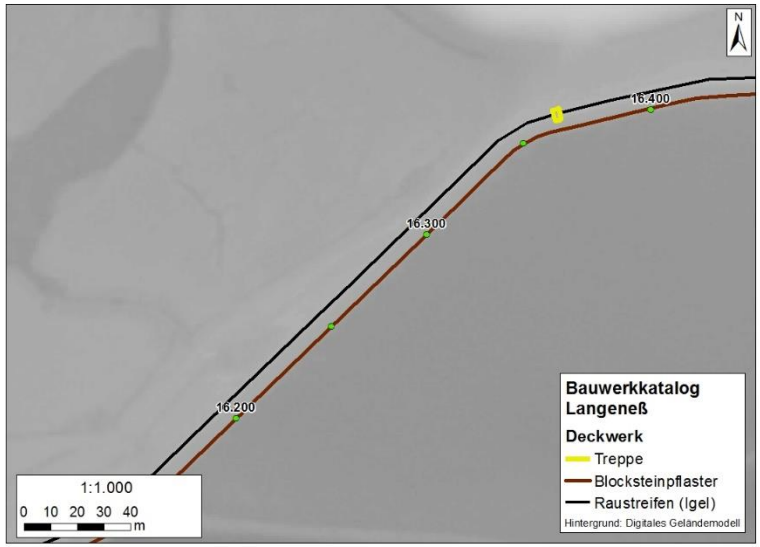
Kilometer: 15+820 bis 16+250

Bauwerksinformationen		***Regelquerschnitt***
Deckwerk:	*Blocksteinpflaster, Pflasterung mit Granitquadern (innen) und Basaltsäulen (aussen)*	*Kein Regelquerschnitt vorhanden*
Ø-Höhe:	*1,79m NN*	
Ø-Breite:	*Keine Angaben*	
Raustreifen:	*Schüttsteindeckwerk mit Betonvermörtelung*	
Ø-Höhe:	*2,87m NN*	
Ø-Breite:	*Keine Angaben*	
Watthöhe:	*0,28m NN*	
Schäden:	*keine*	
Anmerkungen:	*Fußsicherung vorhanden, geringer Höhenunterschied zum Hinterland*	
Baujahr:	*Keine Angaben*	
Letzte Verstärkung:	*Fertige Deckwerkverstärkung*	

Foto und Lage	***Details in Karte***
	

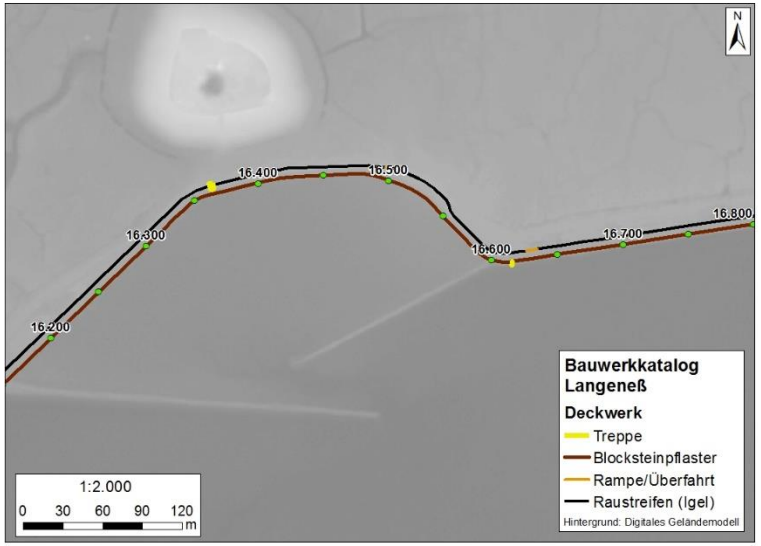
Kilometer: 16+250 bis 16+360

Bauwerksinformationen		**Regelquerschnitt**
Deckwerk:	*Blocksteinpflaster, bis km 16+320 Pflasterung mit Granitquadern (innen) und Basaltsäulen (aussen), danach Findlinge / Feldsteine*	*Kein Regelquerschnitt vorhanden*
Ø-Höhe:	*1,9m NN*	
Ø-Breite:	*Keine Angaben*	
Raustreifen:	*Setzsteindeckwerk (Hand)*	
Ø-Höhe:	*2,89m NN*	
Ø-Breite:	*Keine Angaben*	
Watthöhe:	*0,28m NN*	
Schäden:	*keine*	
Anmerkungen:	*geringer Höhenunterschied zum Hinterland*	
Baujahr:	*Keine Angaben*	
Letzte Verstärkung:	*Fertige Deckwerkverstärkung*	

Foto und Lage	**Details in Karte**
	

Kilometer: 16+360 bis 16+640

Bauwerksinformationen		***Regelquerschnitt***
Deckwerk:	*Blocksteinpflaster, Pflasterung mit Findlingen / Feldsteine*	*Kein Regelquerschnitt vorhanden*
Ø-Höhe:	*1,9m NN*	
Ø-Breite:	*Keine Angaben*	
Raustreifen:	*Schüttsteindeckwerk mit Betonvermörtelung*	
Ø-Höhe:	*3,10m NN*	
Ø-Breite:	*Keine Angaben*	
Watthöhe:	*1,05m NN*	
Schäden:	*keine*	
Anmerkungen:	*Teilweise geringer Höhenunterschied zum Watt*	
Baujahr:	*Keine Angaben*	
Letzte Verstärkung:	*Fertige Deckwerkverstärkung*	

Foto und Lage	***Details in Karte***
	

Kilometer: 16+640 bis 16+970

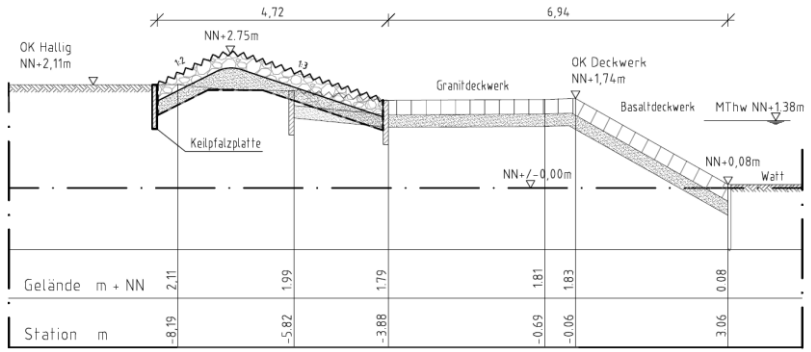
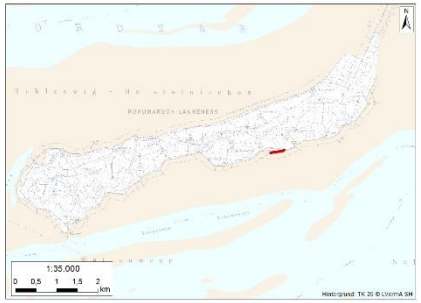
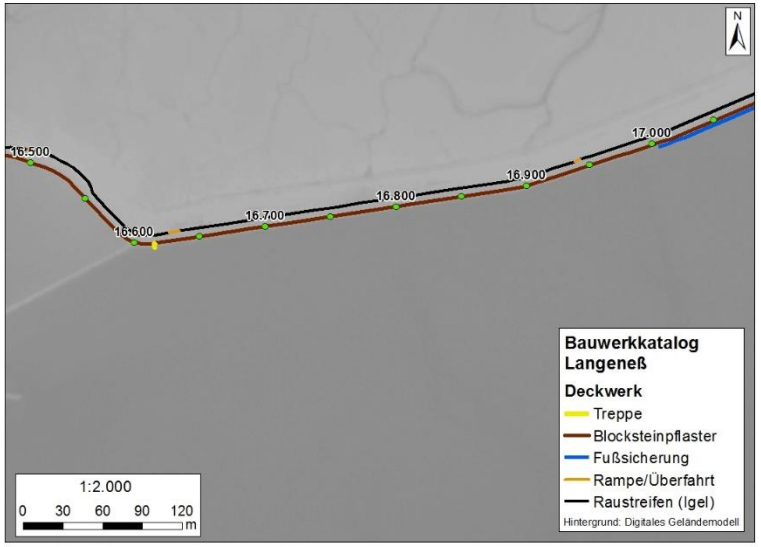
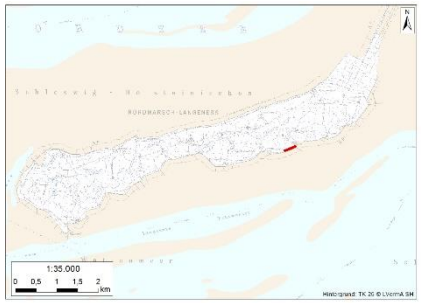
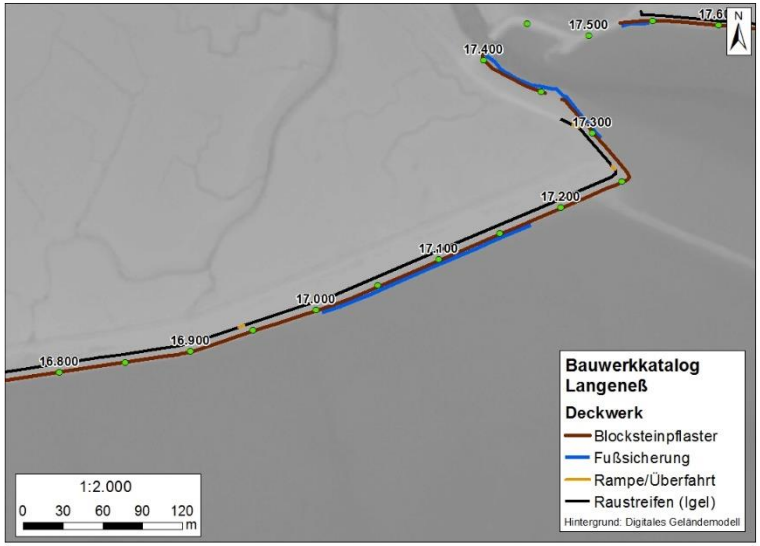
Bauwerksinformationen		***Regelquerschnitt***
Deckwerk:	*Blocksteinpflaster, Pflasterung mit Granitquadern/-blöcken (innen) und Basaltsäulen (aussen)*	
Ø-Höhe:	*1,74m NN*	
Ø-Breite:	*6,94m*	
Raustreifen:	*Schüttsteindeckwerk mit Betonvermörtelung*	
Ø-Höhe:	*2,75m NN*	
Ø-Breite:	*4,72m*	
Watthöhe:	*0,08m NN*	
Schäden:	*keine*	
Anmerkungen:	*keine*	
Baujahr:	*Keine Angaben*	
Letzte Verstärkung:	*2007*	

Foto und Lage	***Details in Karte***
Kein aktuelles Foto verfügbar 	

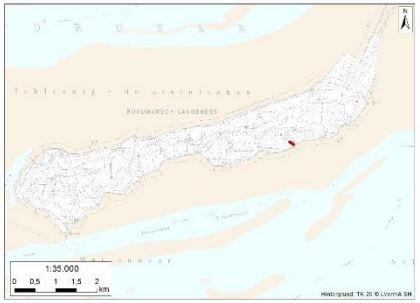
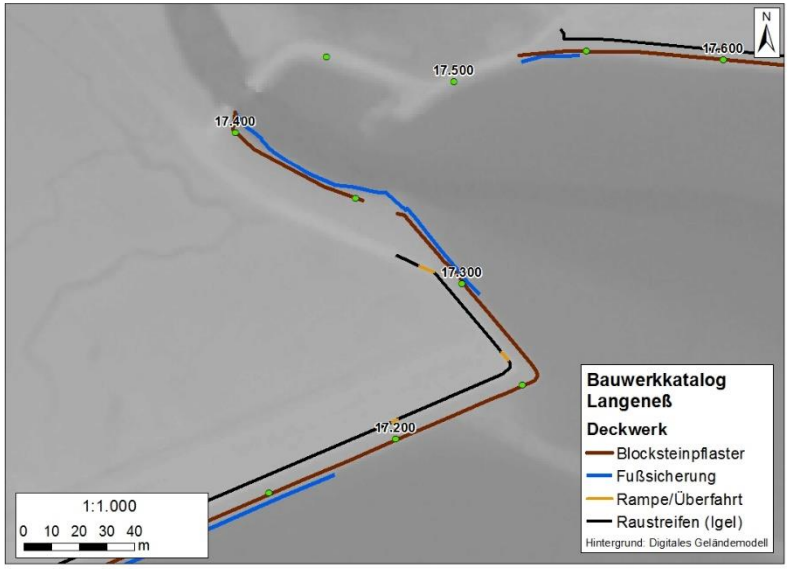
Kilometer: 16+970 bis 17+250

Bauwerksinformationen		***Regelquerschnitt***
Deckwerk:	*Blocksteinpflaster, Pflasterung mit Granitquadern/-blöcken (innen) und Basaltsäulen (aussen)*	*Kein Regelquerschnitt vorhanden*
Ø-Höhe:	*1,72m NN*	
Ø-Breite:	*Keine Angabe*	
Raustreifen:	*Schüttsteindeckwerk mit Betonvermörtelung*	
Ø-Höhe:	*3,00m NN*	
Ø-Breite:	*Keine Angabe*	
Watthöhe:	*0,17m NN*	
Schäden:	*keine*	
Anmerkungen:	*Ab km 17+160 Pflasterung mit gröber geschlagenen Granitblöcken, teilweise schmale Fußsicherung*	
Baujahr:	*Keine Angaben*	
Letzte Verstärkung:	*Fertige Deckwerkverstärkung*	

Foto und Lage	***Details in Karte***
	

Kilometer: 17+250 bis 17+400

Bauwerksinformationen		***Regelquerschnitt***
Deckwerk:	*Blocksteinpflaster, Pflasterung mit Granitquadern (innen) und Basaltsäulen (aussen), ab Anlegestelle nur Basaltdecke ohne Überschlagsicherung*	*Kein Regelquerschnitt vorhanden*
Ø-Höhe:	*1,72m NN*	
Ø-Breite:	*Keine Angabe*	
Raustreifen:	*Setzsteindeckwerk (Hand)*	
Ø-Höhe:	*2,81m NN*	
Ø-Breite:	*Keine Angabe*	
Watthöhe:	*0,55m NN*	
Schäden:	*keine*	
Anmerkungen:	*Ab km 17+325 (Anlegestelle) geht Raustreifen in Regionaldeich über, teilweise Fußsicherung vorhanden*	
Baujahr:	*Keine Angaben*	
Letzte Verstärkung:	*Fertige Deckwerkverstärkung*	

Foto und Lage	***Details in Karte***
	

Kilometer: 17+540 bis 17+955

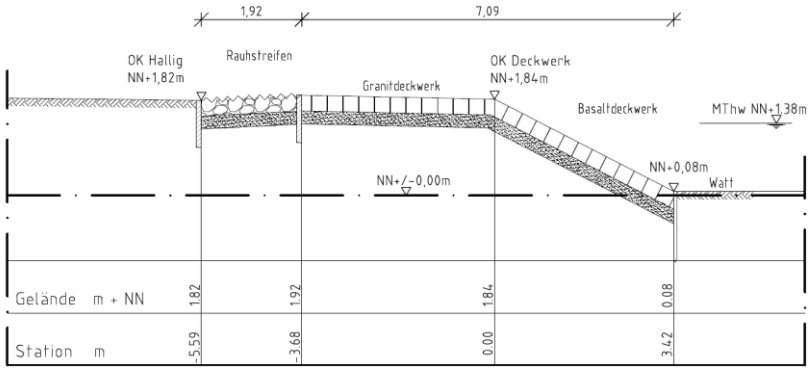
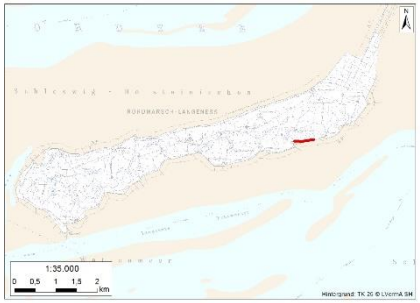
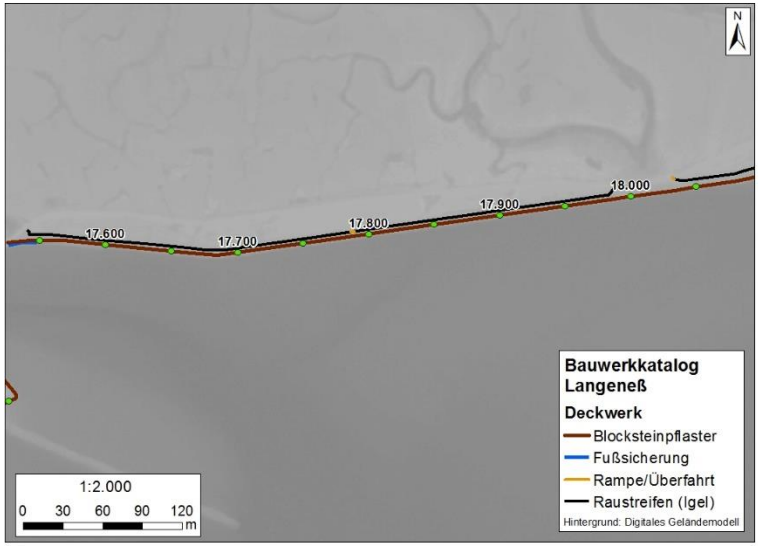
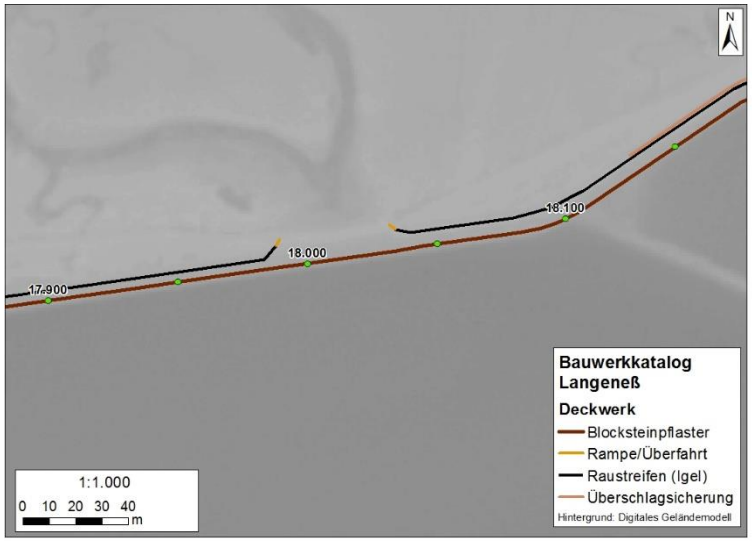
Bauwerksinformationen		***Regelquerschnitt***
Deckwerk:	*Blocksteinpflaster, Pflasterung mit Granitquadern (innen) und Basaltsäulen (aussen), ab Anlegestelle nur Basaltdecke ohne Überschlagsicherung*	
Ø-Höhe:	*1,84m NN*	
Ø-Breite:	*7,09m*	
Raustreifen:	*Setzsteindeckwerk (Hand)*	
Ø-Höhe:	*1,82m NN*	
Ø-Breite:	*1,92m*	
Watthöhe:	*0,08m NN*	
Schäden:	*Starke Auskolkungen im Hinterland*	
Anmerkungen:	*Dringender Verstärkungsbedarf, Gefahr der Deckwerkhinterspülung*	
Baujahr:	*Keine Angaben*	
Letzte Verstärkung:	*Nach 2013*	

Foto und Lage	***Details in Karte***
	

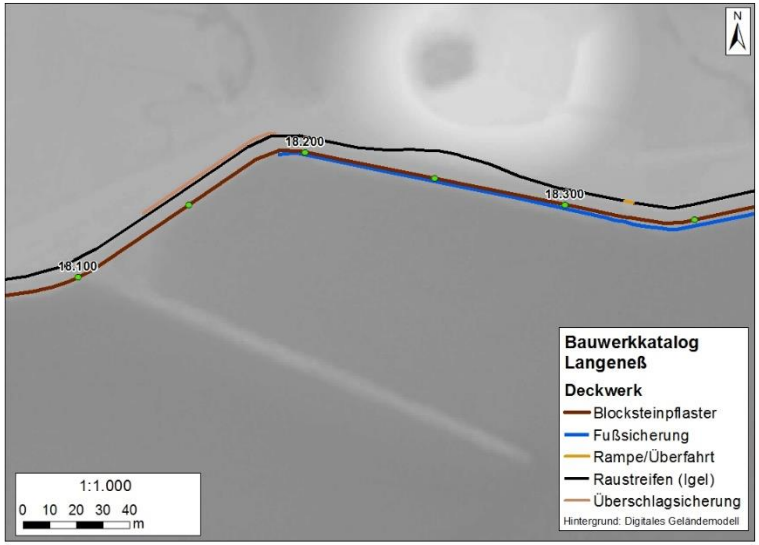
Kilometer: 17+955 bis 18+185

Bauwerksinformationen		***Regelquerschnitt***
Deckwerk:	*Blocksteinpflaster, Pflasterung mit Granitquadern (innen) und Basaltsäulen (aussen), bis km 18+050 grenzt Regionaldeich ans Deckwerk an*	*Kein Regelquerschnitt vorhanden*
Ø-Höhe:	*1,81m NN*	
Ø-Breite:	*Keine Angaben*	
Raustreifen:	*Schüttsteindeckwerk mit Betonvermörtelung*	
Ø-Höhe:	*1,75m NN*	
Ø-Breite:	*Keine Angaben*	
Watthöhe:	*0,16m NN*	
Schäden:	*keine*	
Anmerkungen:	*Hinter Raustreifen wurde Streifen mit Betonsteinen gepflastert (Überschlagsicherung)*	
Baujahr:	*Keine Angaben*	
Letzte Verstärkung:	*Fertige Deckwerkverstärkung*	

Foto und Lage	***Details in Karte***
	

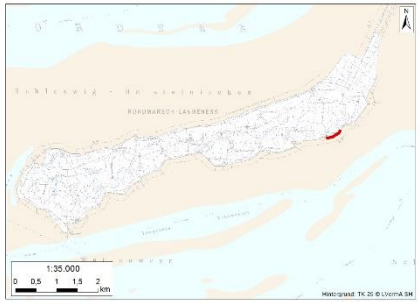
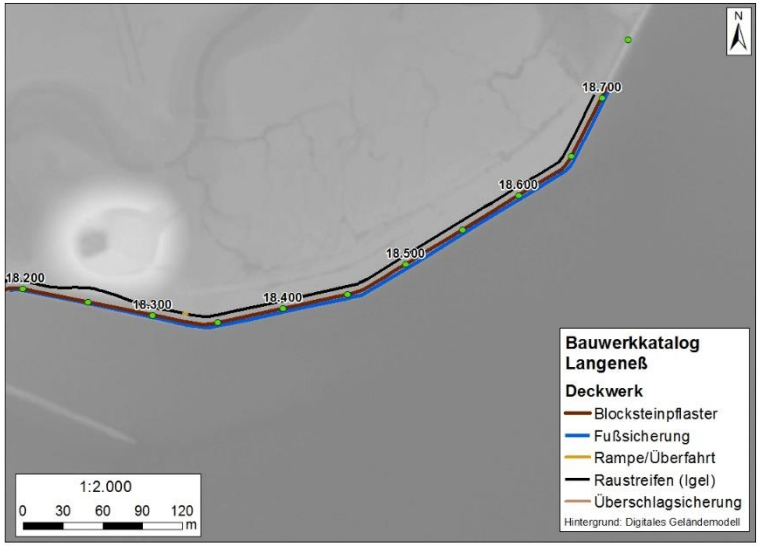
Kilometer: 18+185 bis 18+325

Bauwerksinformationen		***Regelquerschnitt***
Deckwerk:	*Blocksteinpflaster, Pflasterung mit Granitblöcken, Feldsteinen, aussen mit Betonmörtel vergossen*	*Kein Regelquerschnitt vorhanden*
Ø-Höhe:	*1,79m NN*	
Ø-Breite:	*Keine Angaben*	
Raustreifen:	*Schüttsteindeckwerk mit Betonvermörtelung*	
Ø-Höhe:	*1,75m NN*	
Ø-Breite:	*Keine Angaben*	
Watthöhe:	*0,43m NN*	
Schäden:	*keine*	
Anmerkungen:	*Raustreifen an der Warft hochgezogen, teilweise mit Schüttsteinen ausgebessert*	
Baujahr:	*1924*	
Letzte Verstärkung:	*Fertige Deckwerkverstärkung*	

Foto und Lage	***Details in Karte***
	

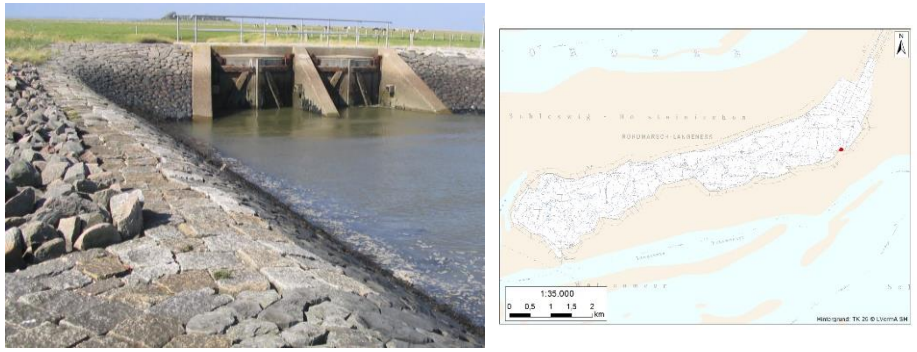
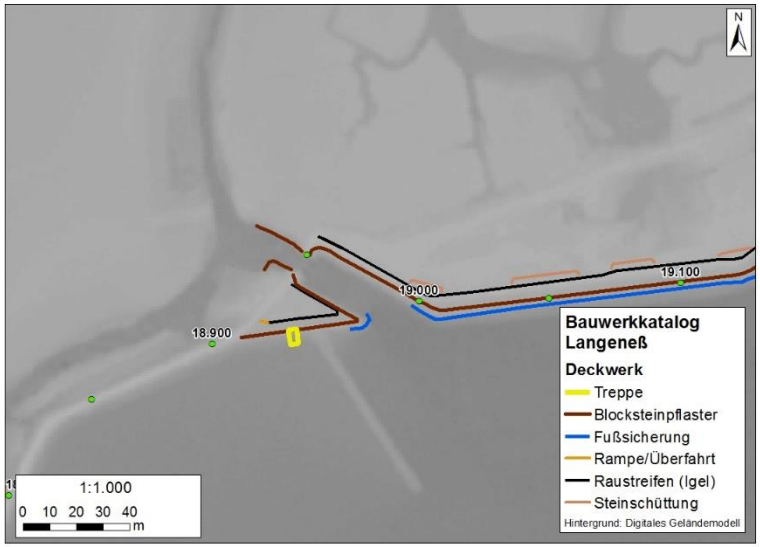
Kilometer: 18+325 bis 18+710

Bauwerksinformationen		**Regelquerschnitt**
Deckwerk:	*Blocksteinpflaster, Pflasterung mit Granitquader (innen), Basaltsäulen (aussen)*	*Kein Regelquerschnitt vorhanden*
Ø-Höhe:	*1,75m NN*	
Ø-Breite:	*Keine Angaben*	
Raustreifen:	*Schüttsteindeckwerk mit Betonvermörtelung*	
Ø-Höhe:	*2,71m NN*	
Ø-Breite:	*Keine Angaben*	
Watthöhe:	*-0,15m NN*	
Schäden:	*keine*	
Anmerkungen:	*Deckwerk geht in Regionaldeich über*	
Baujahr:	*Keine Angaben*	
Letzte Verstärkung:	*Fertige Deckwerkverstärkung*	

Foto und Lage	**Details in Karte**
	

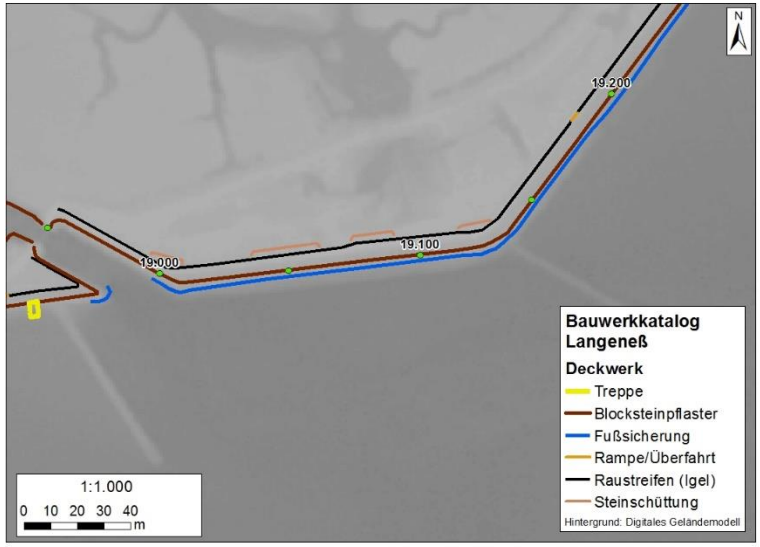
Kilometer: 18+910 bis 18+940

Bauwerksinformationen		***Regelquerschnitt***
Deckwerk:	*Blocksteinpflaster, Pflasterung mit Granitquader (innen), Basaltsäulen (aussen)*	*Kein Regelquerschnitt vorhanden*
Ø-Höhe:	*1,68m NN*	
Ø-Breite:	*Keine Angaben*	
Raustreifen:	*Setzsteinpflaster von Hand*	
Ø-Höhe:	*1,85m NN*	
Ø-Breite:	*Keine Angaben*	
Watthöhe:	*-0,3m NN*	
Schäden:	*keine*	
Anmerkungen:	*Deckwerk ist dem Deich vorgelagert*	
Baujahr:	*Keine Angaben*	
Letzte Verstärkung:	*Fertige Deckwerkverstärkung*	

Foto und Lage	***Details in Karte***
	

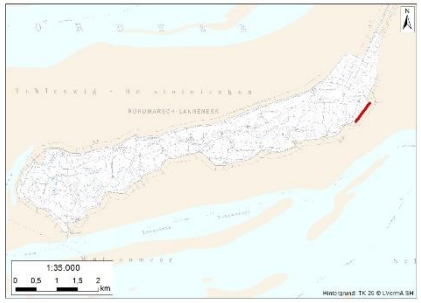
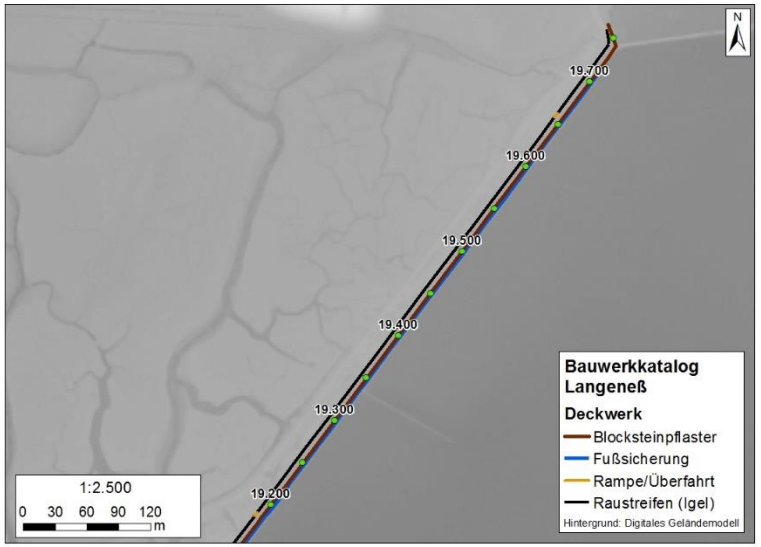
Kilometer: 18+950 bis 19+180

Bauwerksinformationen		***Regelquerschnitt***
Deckwerk:	*Blocksteinpflaster, Pflasterung mit Granitquader (innen), Basaltsäulen (aussen)*	*Kein Regelquerschnitt vorhanden*
Ø-Höhe:	*1,76m NN*	
Ø-Breite:	*Keine Angaben*	
Raustreifen:	*Schüttsteindeckwerk mit Betonvermörtelung*	
Ø-Höhe:	*2,68m NN*	
Ø-Breite:	*Keine Angaben*	
Watthöhe:	*-0,2m NN*	
Schäden:	*Auskolkungen im Hinterland, Priele sind teilweise stark ausgeräumt*	
Anmerkungen:	*Streckenweise Setzsteinpflasterung hinter Raustreifen als Überschlagsicherung*	
Baujahr:	*Keine Angaben*	
Letzte Verstärkung:	*Fertige Deckwerkverstärkung*	

Foto und Lage	***Details in Karte***
	

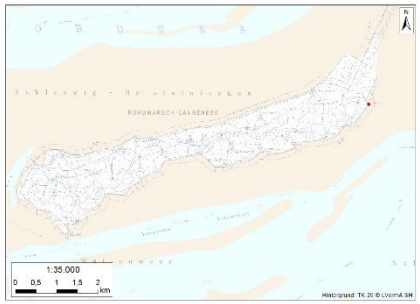
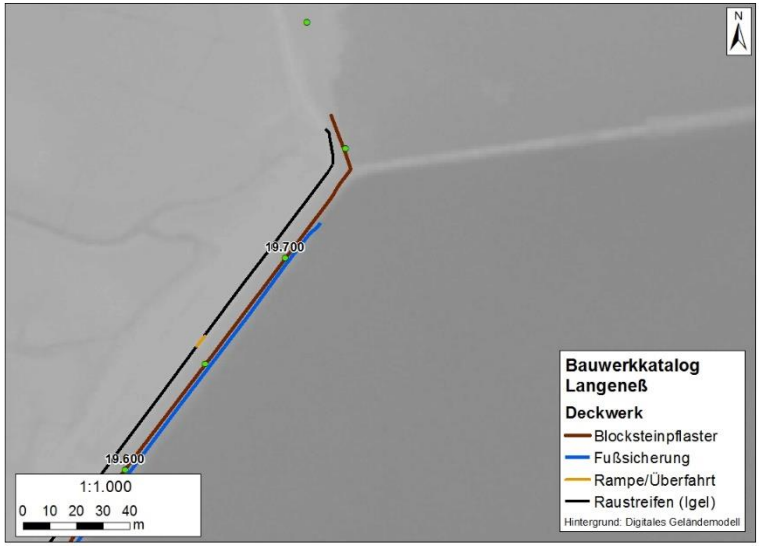
Kilometer: 19+180 bis 19+740

Bauwerksinformationen		**Regelquerschnitt**
Deckwerk:	*Blocksteinpflaster, Pflasterung mit Granitquader (innen), Basaltsäulen (aussen)*	*Kein Regelquerschnitt vorhanden*
Ø-Höhe:	*1,71m NN*	
Ø-Breite:	*Keine Angaben*	
Raustreifen:	*Setzsteindeckwerk (Hand)*	
Ø-Höhe:	*2,7m NN*	
Ø-Breite:	*Keine Angaben*	
Watthöhe:	*-0,2m NN*	
Schäden:	*Auskolkungen im Hinterland, Gräben/Priele sind teilweise stark ausgeräumt*	
Anmerkungen:	*Fußsicherung vorhanden*	
Baujahr:	*Keine Angaben*	
Letzte Verstärkung:	*Fertige Deckwerkverstärkung*	

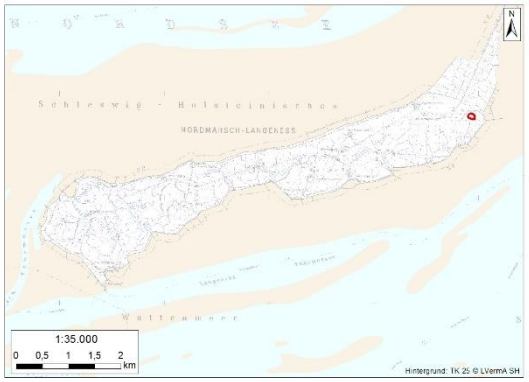
Foto und Lage	**Details in Karte**
	

Kilometer: 19+740 bis 19+760

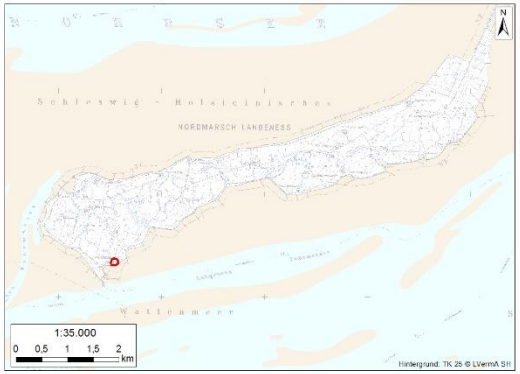
Bauwerksinformationen		***Regelquerschnitt***
Deckwerk:	*Blocksteinpflaster, Pflasterung mit Granitquader*	*Kein Regelquerschnitt vorhanden*
Ø-Höhe:	*1,74m NN*	
Ø-Breite:	*Keine Angaben*	
Raustreifen:	*Setzsteindeckwerk (Hand)*	
Ø-Höhe:	*2,7m NN*	
Ø-Breite:	*Keine Angaben*	
Vorlandhöhe:	*1,22m NN*	
Schäden:	*keine*	
Anmerkungen:	*keine*	
Baujahr:	*Keine Angaben*	
Letzte Verstärkung:	*Fertige Deckwerkverstärkung*	

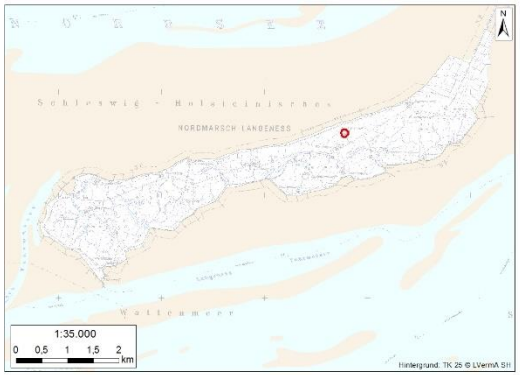
Foto und Lage	***Details in Karte***
	

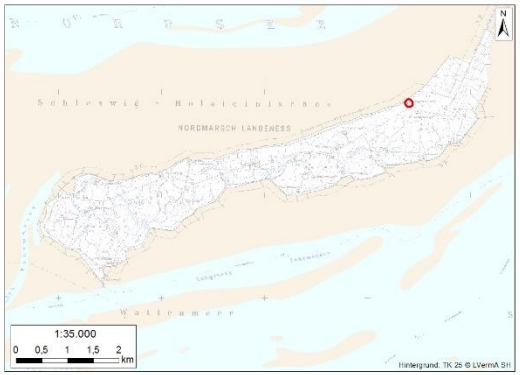
Bewohnte Warften

Bandixwarft	***Foto und Lage***	***Bauwerksinformationen***	
		*Warfttyp*	*Nicht scharliegend*
		Letzte Verstärkung	*1997*
		Umfang	*387m*
		Höhe Warftfuß	*1,9m NN*
		Höhe Warftoberkante	*5,5m NN*
		Böschungsneigung	*1:6/1:8*
		Anzahl Einwohner	*4*
		Schutzräume	*2*
		Fething	*Vorhanden*
		Anmerkungen	*keine*

Christians-warft	***Foto und Lage***	***Bauwerksinformationen***	
		Warfttyp	*Nicht scharliegend*
		Letzte Verstärkung	*2000*
		Umfang	*379m*
		Höhe Warftfuß	*1,6m NN*
		Höhe Warftoberkante	*4,8m NN*
		Böschungsneigung	*1:6/1:15*
		Anzahl Einwohner	*4*
		Schutzräume	*1*
		Fething	*Vorhanden*
		Anmerkungen	*keine*

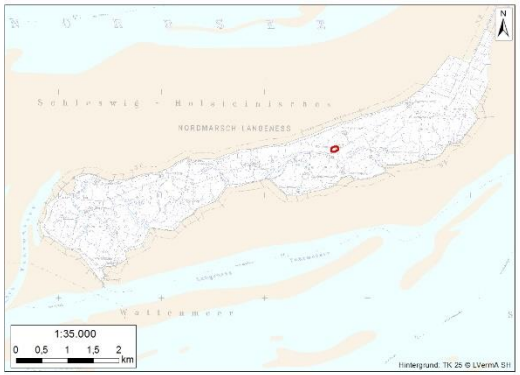
Hilligenley	***Foto und Lage***	***Bauwerksinformationen***	
		*Warfttyp*	*Scharliegend*
		Letzte Verstärkung	*1992*
		Umfang	*447m*
		Höhe Warftfuß	*2m NN*
		Höhe Warftoberkante	*5,3m NN*
		Böschungsneigung	*1:8*
		Anzahl Einwohner	*10*
		Schutzräume	*3*
		Fething	*Vorhanden*
		Anmerkungen	*Verstärkungsbedarf (nach Angaben Amt Pellworm)*

Honkens-warft	***Foto und Lage***	***Bauwerksinformationen***	
		*Warfttyp*	*Nicht scharliegend*
		Letzte Verstärkung	*1996*
		Umfang	*459m*
		Höhe Warftfuß	*1,7m NN*
		Höhe Warftoberkante	*5,2m NN*
		Böschungsneigung	*1:6/1:8*
		Anzahl Einwohner	*12*
		Schutzräume	*2*
		Fething	*Vorhanden*
		Anmerkungen	*keine*

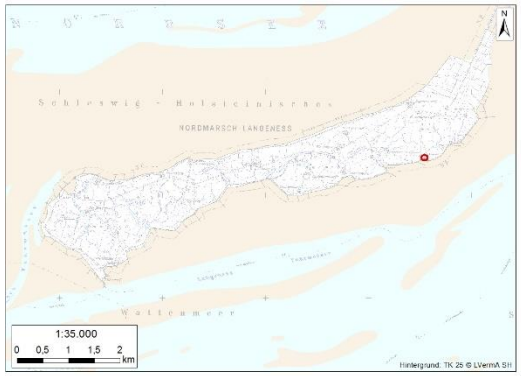
Hunnens-warft	***Foto und Lage***		***Bauwerksinformationen***	
			*Warfttyp*	*Nicht scharliegend*
			Letzte Verstärkung	*1994*
			Umfang	*476m*
			Höhe Warftfuß	*2,4m NN*
			Höhe Warftoberkante	*5,4m NN*
			Böschungsneigung	*1:6/1:8*
			Anzahl Einwohner	*17*
			Schutzräume	*5*
			Fething	*vorhanden*
			Anmerkungen	*keine*

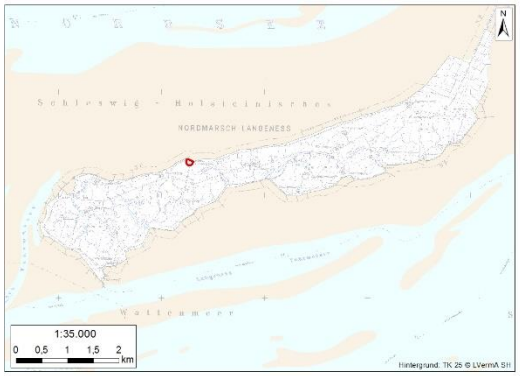
Ketelswarft	***Foto und Lage***		***Bauwerksinformationen***	
			Warfttyp	*Nicht scharliegend*
			Letzte Verstärkung	*1994*
			Umfang	*566m*
			Höhe Warftfuß	*1,7m NN*
			Höhe Warftoberkante	*5,4m NN*
			Böschungsneigung	*1:6/1:8*
			Anzahl Einwohner	*16*
			Schutzräume	*3*
			Fething	*Vorhanden*
			Anmerkungen	*keine*

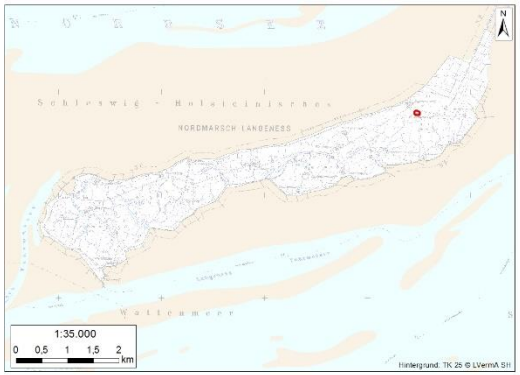
Kirchhofs-warft	***Foto und Lage***		***Bauwerksinformationen***	
			Warfttyp	*Nicht scharliegend*
			Letzte Verstärkung	*1999*
			Umfang	*369m*
			Höhe Warftfuß	*1,7m NN*
			Höhe Warftoberkante	*4,6m NN*
			Böschungsneigung	*1:6*
			Anzahl Einwohner	*7*
			Schutzräume	*2*
			Fething	*Vorhanden*
			Anmerkungen	*keine*

Kirchwarft	***Foto und Lage***		***Bauwerksinformationen***	
			*Warfttyp*	*Nicht scharliegend*
			Letzte Verstärkung	*1996*
			Umfang	*398m*
			Höhe Warftfuß	*1,7m NN*
			Höhe Warftoberkante	*5,4m NN*
			Böschungsneigung	*1:6/1:8*
			Anzahl Einwohner	*6*
			Schutzräume	*2*
			Fething	*Nicht vorhanden*
			Anmerkungen	*keine*

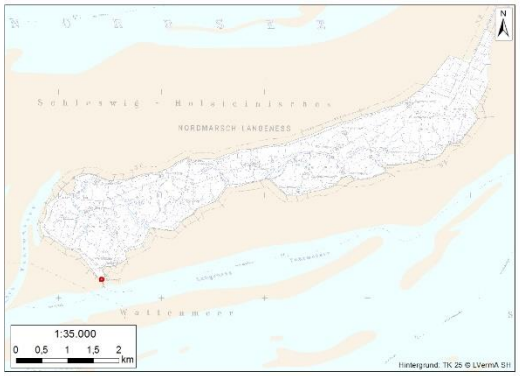
Mayens-warft	***Foto und Lage***		***Bauwerksinformationen***	
			Warfttyp	*Nicht scharliegend*
			Letzte Verstärkung	*1987*
			Umfang	*448m*
			Höhe Warftfuß	*1,6m NN*
			Höhe Warftoberkante	*5m NN*
			Böschungsneigung	*1:8*
			Anzahl Einwohner	*9*
			Schutzräume	*4*
			Fething	*Vorhanden*
			Anmerkungen	*Dringender Handlungsbedarf (nach Angaben Amt Pellworm)*

Neuwarft	***Foto und Lage***		***Bauwerksinformationen***	
			*Warfttyp*	*Scharliegend*
			Letzte Verstärkung	*1992*
			Umfang	*373m*
			Höhe Warftfuß	*2m NN*
			Höhe Warftoberkante	*5,3m NN*
			Böschungsneigung	*1:8*
			Anzahl Einwohner	*5*
			Schutzräume	*1*
			Fething	*Vorhanden*
			Anmerkungen	*keine*

Norderhörn	***Foto und Lage***		***Bauwerksinformationen***	
			*Warfttyp*	*scharliegend*
			Letzte Verstärkung	*1987*
			Umfang	*403m*
			Höhe Warftfuß	*2,1m NN*
			Höhe Warftoberkante	*4,9m NN*
			Böschungsneigung	*1:8*
			Anzahl Einwohner	*13*
			Schutzräume	*3*
			Fething	*Vorhanden*
			Anmerkungen	*Dringender Handlungsbedarf (nach Angaben Amt Pellworm)*

Peterhaitz-warft	***Foto und Lage***		***Bauwerksinformationen***	
			*Warfttyp*	*Nicht scharliegend*
			Letzte Verstärkung	*1997*
			Umfang	*312m*
			Höhe Warftfuß	*1,7m NN*
			Höhe Warftoberkante	*4,9m NN*
			Böschungsneigung	*1:6/1:15*
			Anzahl Einwohner	*5*
			Schutzräume	*1*
			Fething	*Vorhanden*
			Anmerkungen	*keine*

Peterswarft	***Foto und Lage***		***Bauwerksinformationen***	
			Warfttyp	*Nicht scharliegend*
			Letzte Verstärkung	*1988*
			Umfang	*380m*
			Höhe Warftfuß	*1,5m NN*
			Höhe Warftoberkante	*5,1m NN*
			Böschungsneigung	*1:6/1:15*
			Anzahl Einwohner	*3 (+Schutzstation)*
			Schutzräume	*1*
			Fething	*Vorhanden*
			Anmerkungen	*Keine*

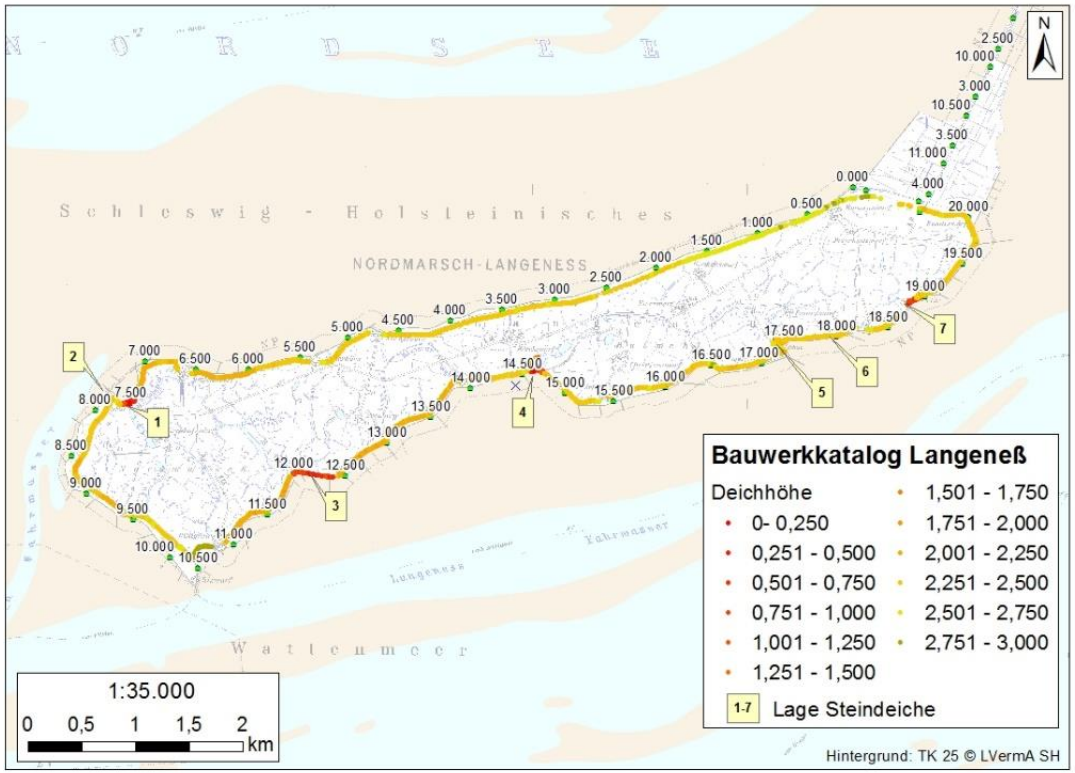
Rixwarft	***Foto und Lage***		***Bauwerksinformationen***	
			*Warfttyp*	*Scharliegend*
			Letzte Verstärkung	*1992*
			Umfang	*213m*
			Höhe Warftfuß	*2,2m NN*
			Höhe Warftoberkante	*5m NN*
			Böschungsneigung	*1:8*
			Anzahl Einwohner	*1*
			Schutzräume	*1*
			Fething	*Nicht vorhanden*
			Anmerkungen	*Verstärkungsbedarf (nach Angaben Amt Pellworm)*

Süderhörn	***Foto und Lage***	***Bauwerksinformationen***	
		Warfttyp	*Nicht scharliegend*
		Letzte Verstärkung	*1992*
		Umfang	*376m*
		Höhe Warftfuß	*2,3m NN*
		Höhe Warftoberkante	*5,4m NN*
		Böschungsneigung	*1:6/1:8*
		Anzahl Einwohner	*1*
		Schutzräume	*2*
		Fething	*Vorhanden*
		Anmerkungen	*Verstärkungsbedarf (nach Angaben Amt Pellworm)*

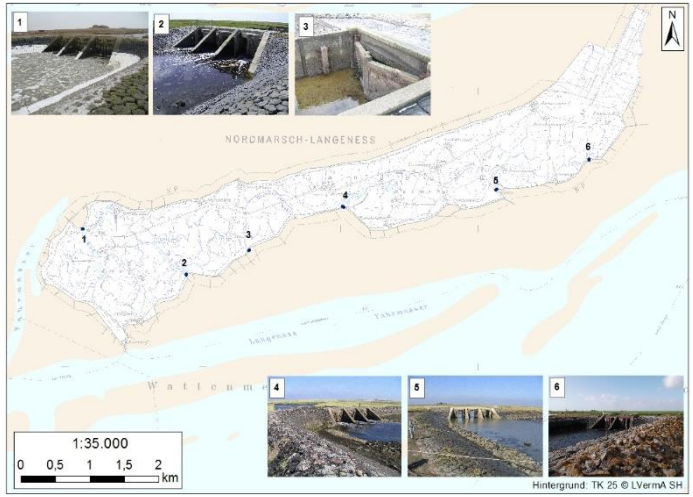
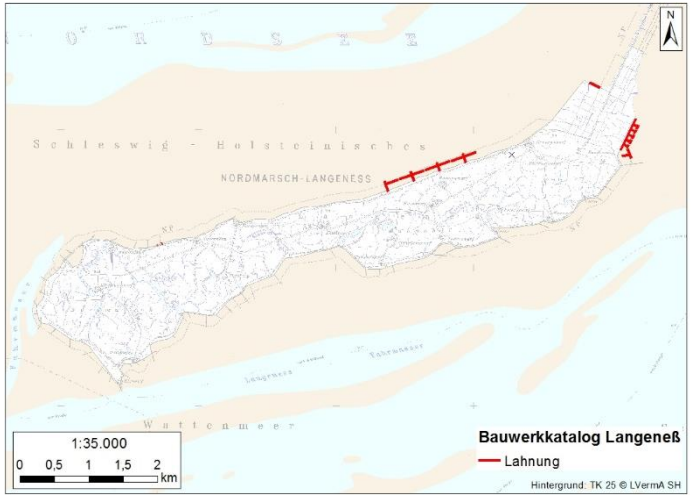
Tadenswarft	***Foto und Lage***	***Bauwerksinformationen***	
		Warfttyp	*Nicht scharliegend*
		Letzte Verstärkung	*2005*
		Umfang	*431m*
		Höhe Warftfuß	*1,9m NN*
		Höhe Warftoberkante	*5,1m NN*
		Böschungsneigung	*1:6/1:15*
		Anzahl Einwohner	*5*
		Schutzräume	*3*
		Fething	*Vorhanden*
		Anmerkungen	*keine*

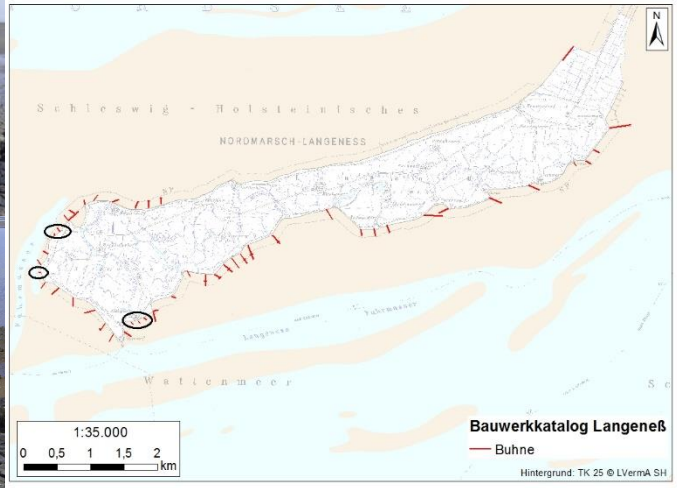
Tamens-warft	***Foto und Lage***		***Bauwerksinformationen***	
			Warfttyp	*Nicht scharliegend*
			Letzte Verstärkung	*2005*
			Umfang	*333m*
			Höhe Warftfuß	*2m NN*
			Höhe Warftoberkante	*5m NN*
			Böschungsneigung	*1:6/1:15*
			Anzahl Einwohner	*1*
			Schutzräume	*1*
			Fething	*Vorhanden*
			Anmerkungen	*Verstärkungsbedarf (nach Angaben Amt Pellworm)*

Regionaldeich

Lage	***Bauwerksinformationen***	
	*In der Regel Grasdeiche, Ausnahmen (siehe Karte):*	
	1) *7+420-7+620*	*Steindeich,* *bis km 7+500 gepflastert mit Basaltsäulen und Krone aus Granitquadern, ab km 7+500 komplett aus Basaltsäulen*
	2) *7+730-7+780*	*Steindeich* *gepflastert mit Basaltsäulen*
	3) *11+980-12+385*	*Steindeich* *gepflastert mit Basaltsäulen, Fußsicherung*
	4) *14+540-14+720*	*Steindeich* *gepflastert mit Granitquader und behauenen Feldsteinen, Asphaltverklammerung; teilweise verstärkt durch Fußsicherung (aussen) und Überschlagsicherung (innen)*
	5) *17+400-17+550*	*Steindeich* *gepflastert mit Basaltsäulen, verstärkt durch Fußsicherung (aussen) und Überschlagsicherung (innen)*
	6) *18+000-18+040*	*Steindeich* *gepflastert mit Basaltsäulen*
	7) *18+700-18+960*	*Steindeich* *gepflastert mit Basaltsäulen, Verklammert mit Betonmörtel, verstärkt durch Fußsicherung (aussen) und teilweise Überschlagsicherung (innen)*

Weitere Schutzbauwerke

Siel	***Foto und Lage***	***Bauwerksinformationen***	
		*Vorkommen auf der Hallig*	*6*
		Ø- Höhe	*2,5m NN*
		Ø- Tiefe	*10,5m (inkl. Schwergewichtsmauer), Siel am Leye 22m (inkl. Schwergewichtsmauer)*
		Ø- Breite (Länge)	*4,5-15m*
		Anzahl Kammern	*3 Kammern am Ilef, Osterwehl, Westerwehl und Ridd, 2 Kammern am Priel zwischen Neu- und Bandixwarft, 1 Kammer am Leye*
Lahnungen	***Foto und Lage***	*Bauwerksinformationen*	
		*Größe Lahnungsfeld (Landgewinnung)*	*0,28 km²*
		Anzahl Schutzlahnung (Erosionsschutz)	*2 zwischen Mayenswarft und Süderhörn*
		Bauweise	*Buschlahnung*

Buhnen	**Foto und Lage**	**Bauwerksinformationen**	
		*Vorkommen auf der Hallig*	*52*
		Ø- Länge	*140m (43m – 330m)*
		Material	*Meist Schüttsteine (Granit)*
		Schäden	*6 Buhnen (schwarze Umrandung) sind kurz und niedrig (im Westteil)*
		Anmerkungen	*Zwischen Ridd und kleiner Wehl sind die Buhnen um Querbuhnen ergänzt*

Anlage 4
- Bauwerkskatalog
Nordstrandischmoor (LKN) -

Bauwerkskatalog Nordstrandischmoor

Deckwerke

Kilometer: 0+000 bis 0+435

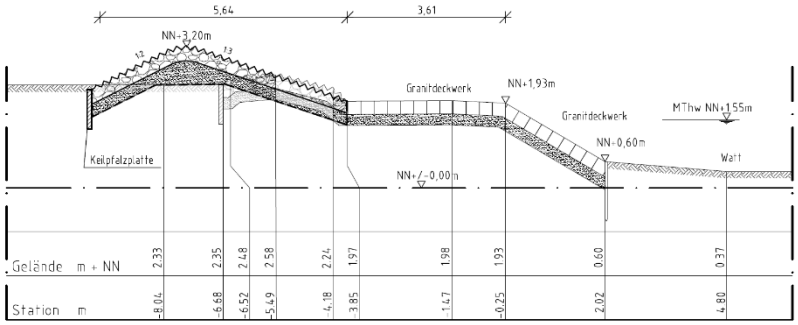
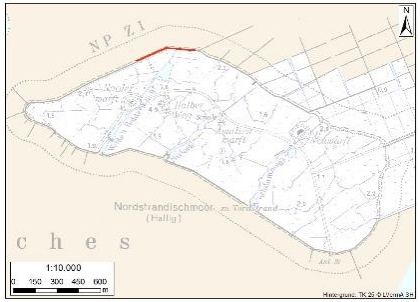
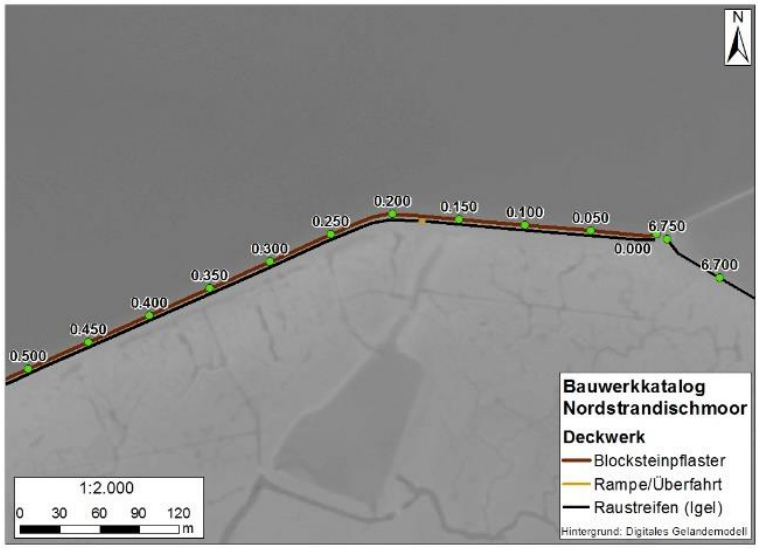
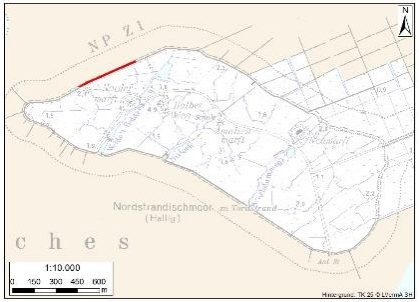
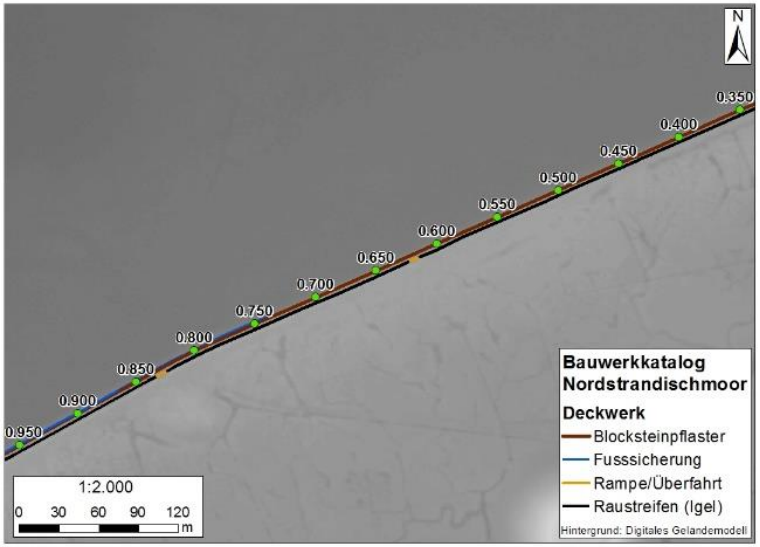
Bauwerksinformationen		***Regelquerschnitt***
Bauweise:	*Blocksteinpflasterung, Pflasterung mit Granitquader*	
Ø-Höhe:	*1,93m NN*	
Ø-Breite:	*3,61m NN*	
Raustreifen:	*Schotterdeckwerk mit 2 Komponenten- Verklebung*	
Ø-Höhe:	*3,20m NN*	
Ø-Breite:	*5,64m NN*	
Watthöhe:	*keine Angaben*	
Schäden:	*keine*	
Anmerkungen:	*keine*	
Baujahr:	*1928*	
Letzte Verstärkung:	*keine Angabe*	

Foto und Lage	***Details in Karte***
Kein Foto verfügbar 	

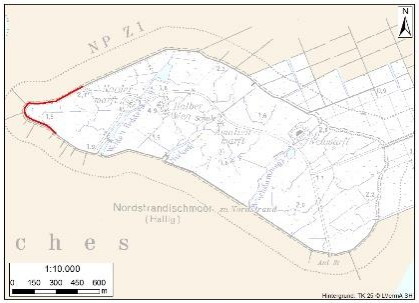
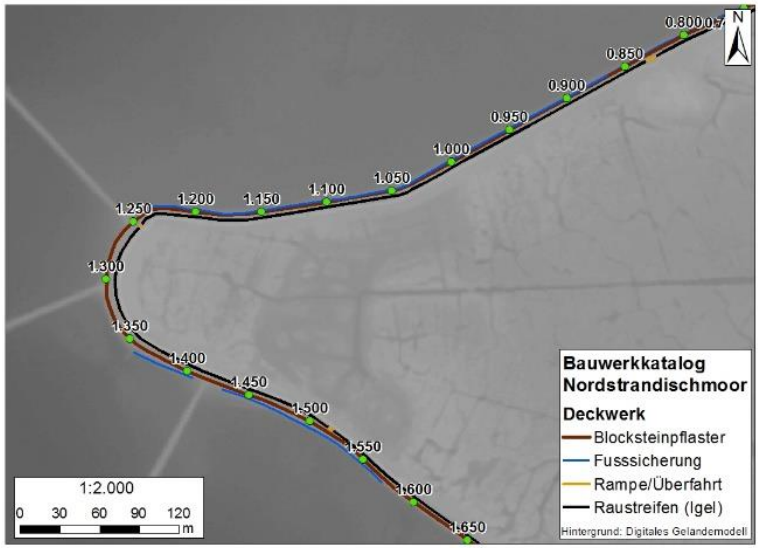
Kilometer: 0+435 bis 0+865

Bauwerksinformationen		***Regelquerschnitt***
Bauweise:	*Blocksteinpflasterung, Pflasterung mit Granitquader*	*Kein Regelquerschnitt vorhanden*
Ø-Höhe:	*keine Angaben*	
Ø-Breite:	*keine Angaben*	
Raustreifen:	*Schüttsteindeckwerk mit Betonvermörtelung*	
Ø-Höhe:	*1,92m NN*	
Ø-Breite:	*keine Angaben*	
Watthöhe:	*0,69m NN*	
Schäden:	*keine*	
Anmerkungen:	*Fusssicherung ab km 0+740*	
Baujahr:	*1928*	
Letzte Verstärkung:	*keine Angabe*	

Foto und Lage	***Details in Karte***
	

Kilometer: 0+865 bis 1+585

Bauwerksinformationen		***Regelquerschnitt***
Bauweise:	*Blocksteinpflasterung, Pflasterung mit Basaltsäulen und Granitquader wechselt*	*Kein Regelquerschnitt verfügbar*
Ø-Höhe:	*keine Angaben*	
Ø-Breite:	*keine Angaben*	
Raustreifen:	*Schüttsteindeckwerk mit Betonvermörtelung*	
Ø-Höhe:	*1,77m NN*	
Ø-Breite:	*keine Angaben*	
Watthöhe:	*0,58m NN*	
Schäden:	*keine*	
Anmerkungen:	*Fusssicherung ab km 0+825 mit Unterbrechungen; Höhe des Watts reduziert sich ab km 1+350 auf 0,2 m NN*	
Baujahr:	*1929*	
Letzte Verstärkung:	*keine Angabe*	

Foto und Lage	***Details in Karte***
	

Kilometer: 1+585 bis 1+905

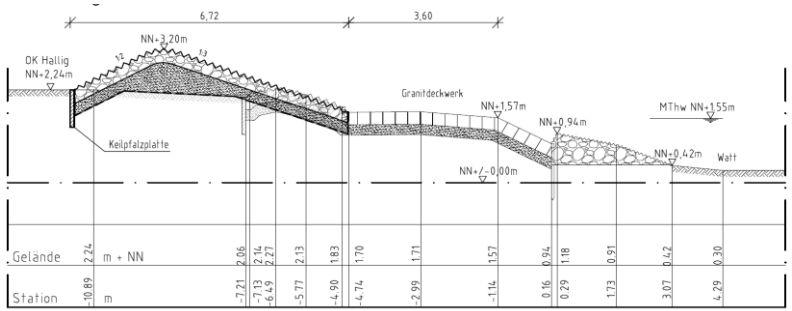
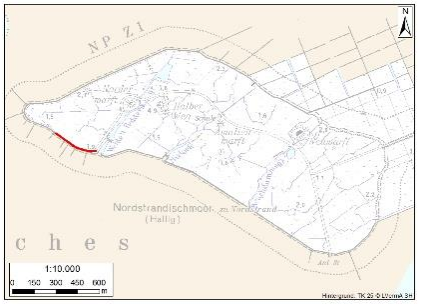
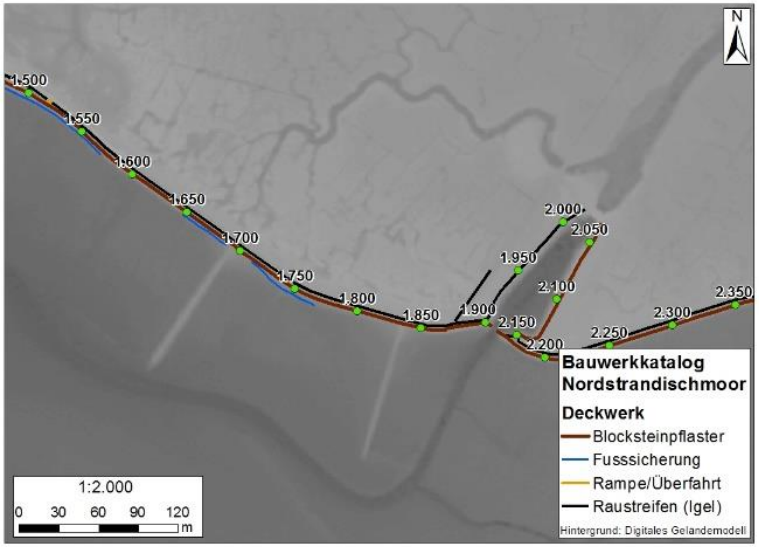
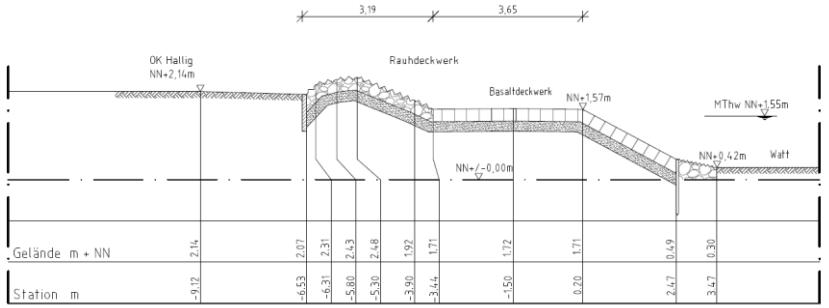
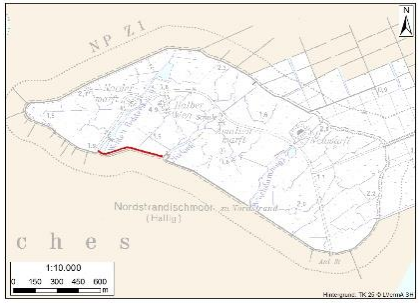
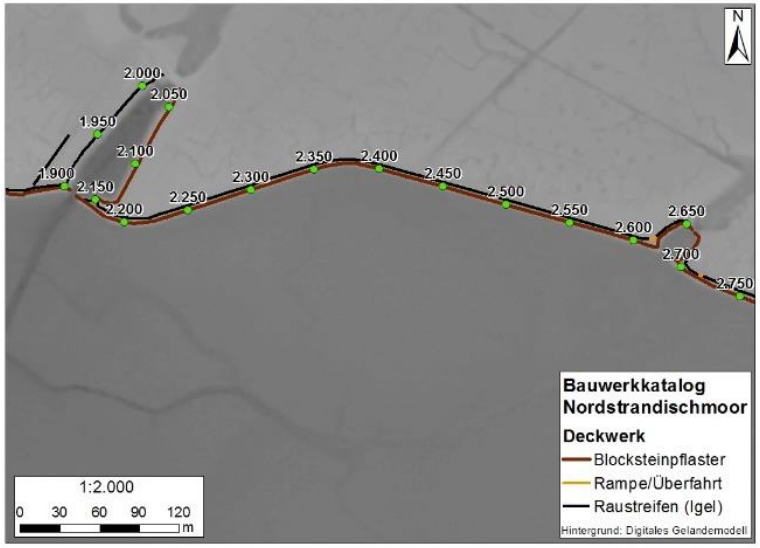
Bauwerksinformationen		***Regelquerschnitt***
Bauweise:	*Blocksteinpflasterung, Pflasterung mit Basaltsäulen und Granitquader wechselt*	
Ø-Höhe:	*1,57m NN*	
Ø-Breite:	*4,90m*	
Raustreifen:	*Schotterdeckwerk mit 2 Komponenten- Verklebung*	
Ø-Höhe:	*3,20 m NN*	
Ø-Breite:	*6,72m*	
Watthöhe:	*0,42m NN*	
Schäden:	*keine*	
Anmerkungen:	*Fusssicherung mit Unterbrechungen vorhanden*	
Baujahr:	*keine Angabe*	
Letzte Verstärkung:	*2008 ©*	

Foto und Lage	***Details in Karte***
	

Kilometer: 1+905 bis 2+695

Bauwerksinformationen		***Regelquerschnitt***
Bauweise:	*Blocksteinpflasterung, Pflasterung mit Basaltsäulen*	
Ø-Höhe:	*1,57m NN*	
Ø-Breite:	*5,92m NN*	
Raustreifen:	*Schüttsteindeckwerk mit Bitumenverguss, teilweise 2- Komponenten- Verklebung*	
Ø-Höhe:	*2,48m NN*	
Ø-Breite:	*3,19m*	
Watthöhe:	*0,42m NN*	
Schäden:	*keine*	
Anmerkungen:	*Keine Fusssicherung, westliches Ufer am Nieloch mit Granitdecke und Raustreifen, östlich kein Raustreifen*	
Baujahr:	*Keine Angabe*	
Letzte Verstärkung:	*Keine Angaben*	
Foto und Lage		***Details in Karte***
		

Kilometer: 2+695 bis 3+825

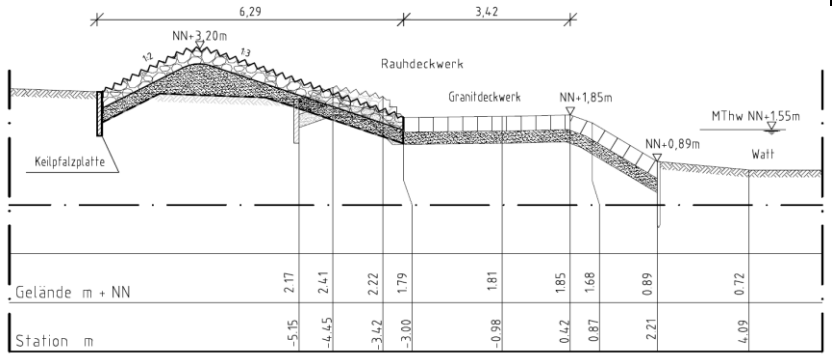
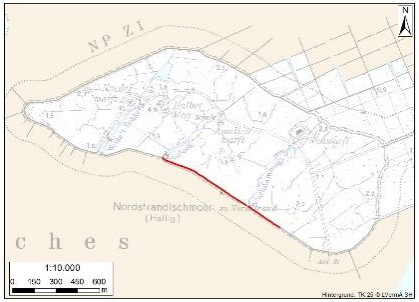
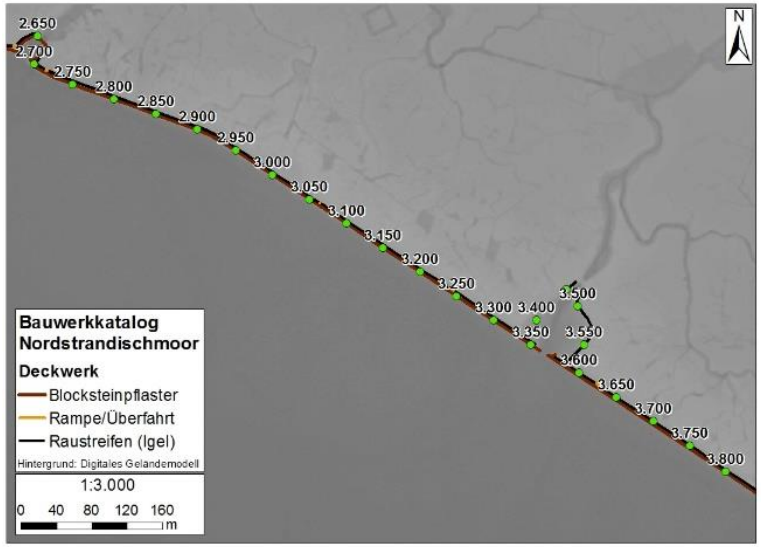
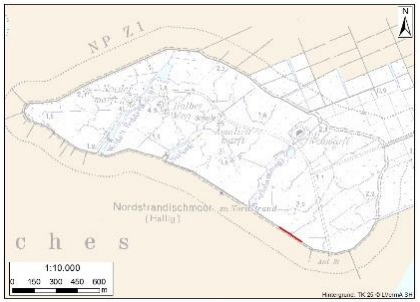
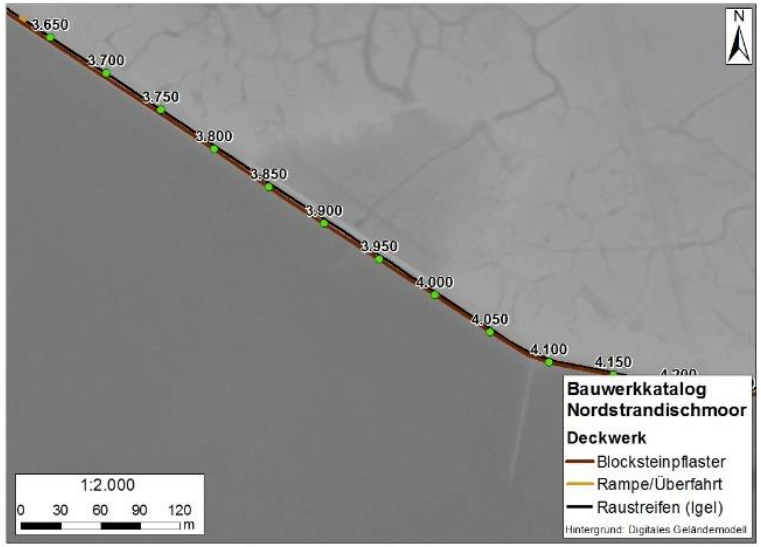
Bauwerksinformationen		***Regelquerschnitt***
Bauweise:	*Blocksteinpflasterung, Pflasterung mit Granitquadern, teilweise Böschung mit Basaltsäulen*	
Ø-Höhe:	*1,85m NN*	
Ø-Breite:	*5,92m NN*	
Raustreifen:	*Schotterdeckwerk mit 2 Komponenten Verklebung*	
Ø-Höhe:	*3,20m NN*	
Ø-Breite:	*6,94m*	
Watthöhe:	*0,42m NN*	
Schäden:	*starke Auskolkungen im Hinterland*	
Anmerkungen:	*Keine Fusssicherung; östliches Ufer des Bruchdammgrabens ist durch Raustreifen gesichert*	
Baujahr:	*Keine Angabe*	
Letzte Verstärkung:	*2013*	

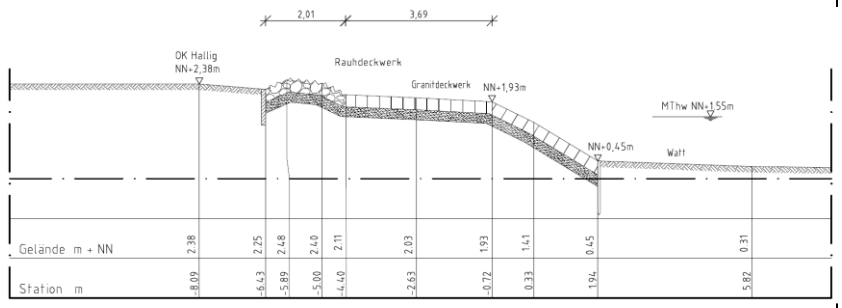
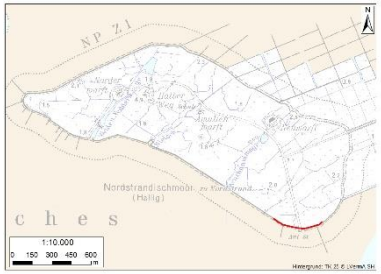
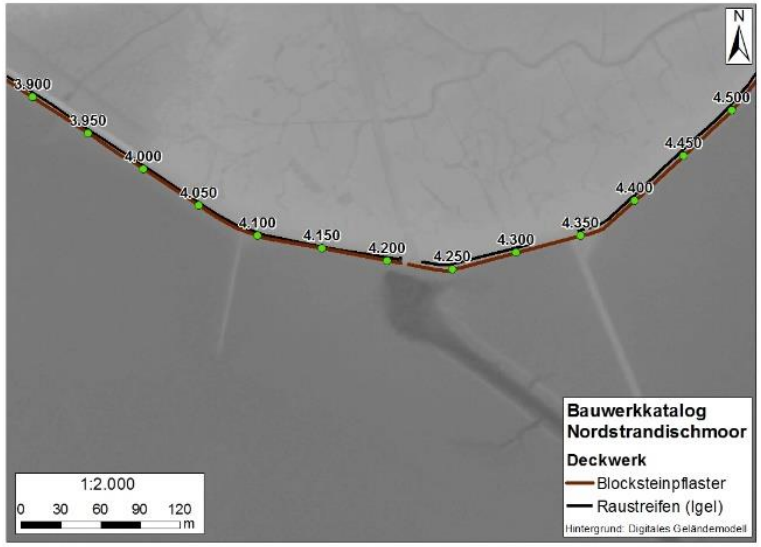
Foto und Lage	***Details in Karte***
Kein aktuelles Foto verfügbar 	

Kilometer: 3+825 bis 4+000

Bauwerksinformationen		***Regelquerschnitt***
Bauweise:	*Blocksteinpflasterung, Pflasterung mit Granitquadern, Decke zum Teil mit Betonmörtel und Schüttsteinen bedeckt*	*Kein Regelquerschnitt vorhanden*
Ø-Höhe:	*1,90m NN*	
Ø-Breite:	*Keine Angaben*	
Raustreifen:	*Schüttsteindeckwerk mit Betonvermörtelung*	
Ø-Höhe:	*Keine Angaben*	
Ø-Breite:	*Keine Angaben*	
Watthöhe:	*0,63m NN*	
Schäden am Deckwerk:	*keine*	
Anmerkungen:	*Keine Fusssicherung*	
Baujahr:	*Keine Angabe*	
Letzte Verstärkung:	*Keine Angabe, fertige Deckwerkverstärkung*	

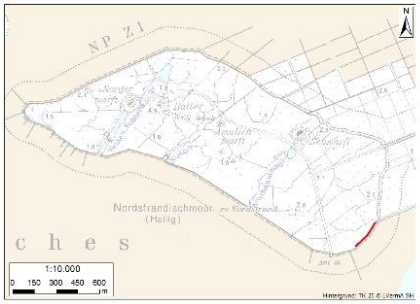
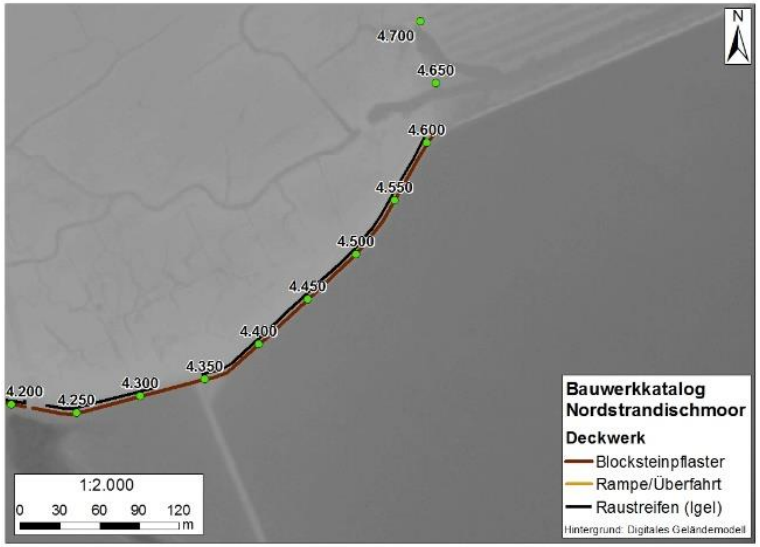
Foto und Lage	***Details in Karte***
	

Kilometer: 4+000 bis 4+400

Bauwerksinformationen		***Regelquerschnitt***
Bauweise:	*Blocksteinpflasterung, Pflasterung mit Granitquadern*	
Ø-Höhe:	*1,93 m NN*	
Ø-Breite:	*6,35m*	
Raustreifen:	*Setzsteindeckwerk (Hand), vom KM 4+315-4+350 kein Raustreifen*	
Ø-Höhe:	*2,48m NN*	
Ø-Breite:	*2,01m NN*	
Watthöhe:	*0,45m NN*	
Schäden:	*keine*	
Anmerkungen:	*Keine Fusssicherung*	
Baujahr:	*Keine Angabe*	
Letzte Verstärkung:	*Keine Angabe*	
Foto und Lage		***Details in Karte***
		

Kilometer: 4+400 bis 4+600

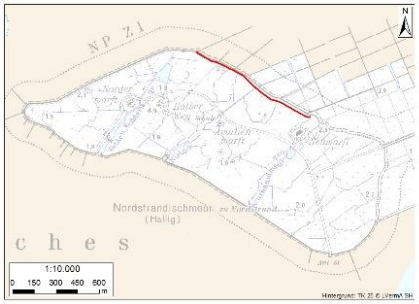
Bauwerksinformationen		***Regelquerschnitt***
Bauweise:	*Blocksteinpflasterung, Pflasterung mit Granitquadern*	*Kein Regelquerschnitt verfügbar*
Ø-Höhe:	*Keine Angaben*	
Ø-Breite:	*Keine Angaben*	
Raustreifen:	*Schüttsteindeckwerk mit Betonvermörtelung*	
Ø-Höhe:	*Keine Angaben*	
Ø-Breite:	*Keine Angaben*	
Watthöhe:	*0,66m NN*	
Schäden:	*keine*	
Anmerkungen:	*Keine Fusssicherung*	
Baujahr:	*Keine Angabe*	
Letzte Verstärkung:	*Keine Angabe, fertige Deckwerkverstärkung*	

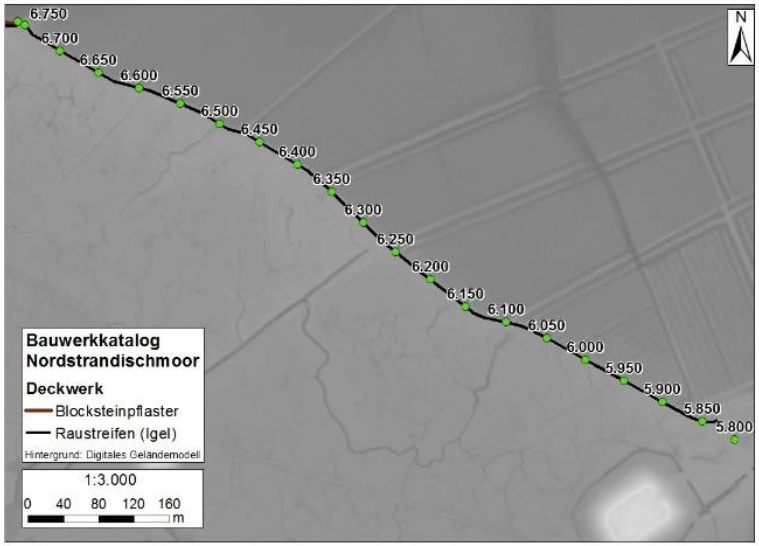
Foto und Lage	***Details in Karte***
	

Kilometer: 5+870 bis 6+750

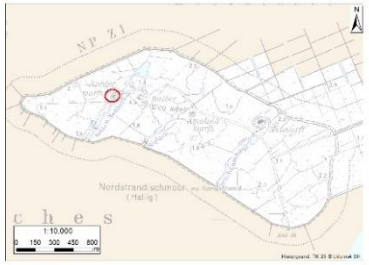
Bauwerksinformationen		***Regelquerschnitt***
Bauweise:	*Deckwerk beschränkt sich auf Raustreifen*	*Kein Regelquerschnitt verfügbar*
Ø-Höhe:	*Keine Angaben*	
Ø-Breite:	*Keine Angaben*	
Raustreifen:	*Setzsteindeckwerk (Hand)*	
Ø-Höhe:	*2,18m NN*	
Ø-Breite:	*Keine Angaben*	
Watthöhe:	*Bereich geht ins Vorland über*	
Schäden:	*keine*	
Anmerkungen:	*keine*	
Baujahr:	*Keine Angabe*	
Letzte Verstärkung:	*Keine Angabe*	

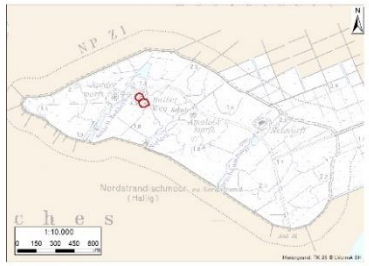
Foto und Lage	***Details in Karte***

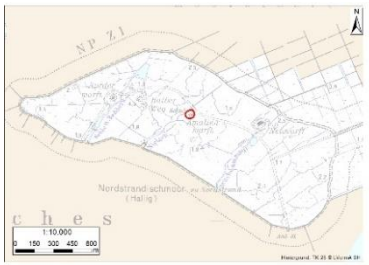


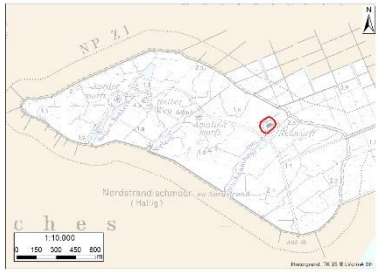


Warften

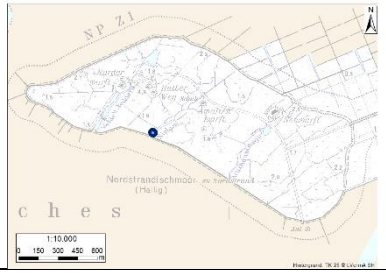
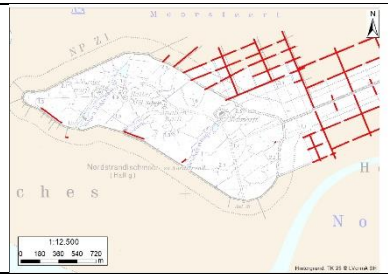
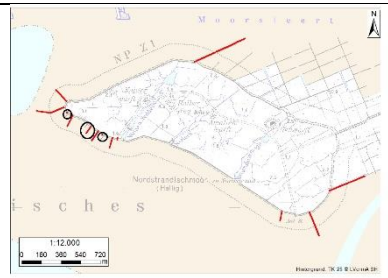
Norderwarft	***Foto und Lage***	***Bauwerksinformationen:***	
		*Warfttyp*	*Nicht scharliegend*
		Letzte Verstärkung	*1982*
		Umfang	*332 m*
		Höhe Warftfuß	*2m NN*
		Höhe Warftoberkante	*5,54 m NN*
		Böschungsneigung	*1:8*
		Anzahl Einwohner	*5*
		Schutzräume	*1*
		Fething	*Nicht vorhanden*
		Anmerkungen	*Keine*

Halber Weg	***Foto und Lage***	***Bauwerksinformationen (ohne Nebenwarft):***	
		*Warfttyp*	*Nicht scharliegend*
		Letzte Verstärkung	*1978*
		Umfang	*233m*
		Höhe Warftfuß	*1,9m NN*
		Höhe Warftoberkante	*5,26m NN*
		Böschungsneigung	*1:6*
		Anzahl Einwohner	*3*
		Schutzräume	*1*
		Fething	*Nicht vorhanden*
		Anmerkungen	*Dringender Verstärkungsbedarf*

Amalienwarft	***Foto und Lage***	***Bauwerksinformationen:***	
		*Warfttyp:*	*Nicht scharliegend*
		Letzte Verstärkung	*1973*
		Umfang	*222m*
		Höhe Warftfuß	*2m NN*
		Höhe Warftoberkante	*5,29m NN*
		Böschungsneigung	*1:6*
		Anzahl Einwohner	*1*
		Schutzräume	*1*
		Fething	*Nicht vorhanden*
		Anmerkungen	*Dringender Verstärkungsbedarf*

Neuwarft	***Foto und Lage***	***Bauwerksinformationen:***	
		*Warfttyp*	*Nicht scharliegend*
		Letzte Verstärkung	*1985*
		Umfang	*373m*
		Höhe Warftfuß	*2m NN*
		Höhe Warftoberkante	*5,78*
		Böschungsneigung	*1:6*
		Anzahl Einwohner	*12*
		Schutzräume	*2*
		Fething	*Nicht vorhanden*
		Anmerkungen	*keine*

Weitere Schutzbauwerke

Siel	*Foto und Lage*	*Bauwerksinformationen*	
		*Höhe*	*2,15m NN*
		Tiefe	*5,20 m*
		Breite	*12,50m*
		Anzahl Kammern	*1*
Lahnungen	*Foto und Lage*	*Bauwerksinformationen*	
		*Größe Lahnungsfeld (Landgewinnung)*	*0,99 km²*
		Anzahl Schutzlahnung (Erosionsschutz)	*5*
		Bauweise	*Buschlahnung*
Buhne	*Foto und Lage*	*Bauwerksinformationen*	
		*Anzahl*	*13*
		Ø- Länge	*164m (12m- 521m)*
		Material	*Granit*
		Schäden	*Bei drei Buhnen sind nur noch Reste entlang der Holzpfahlreihe übrig (vgl. schwarze Kreise in der Abbildung links)*

Anlage 5
- Bericht der Arbeitsgruppe
HALLIGEN 2050 -

Ministerium für Energiewende,
Landwirtschaft, Umwelt
und ländliche Räume
des Landes Schleswig-Holstein

Bericht der Arbeitsgruppe HALLIGEN 2050:

Möglichkeiten zur langfristigen Erhaltung der Halligen im Klimawandel

Kiel, April 2014

Bericht der AG HALLIGEN 2050:
Möglichkeiten zur langfristigen Erhaltung der Halligen im Klimawandel

Inhaltsverzeichnis: **Seite**

Zusammenfassung 2

1. Einführung 3

2. Geographischer Überblick 6

3. Herausforderung Klimawandel 10

4. Gewässerkundliche Überwachung und Bemessung 13

5. Stabilität der Halligen 18

6. Hochwasserschutz 27

7. Handlungsoptionen und -erfordernisse 32

Anlage: Küstenschutzrelevante Parameter der Halligwarften sowie Einschätzung des Handlungsbedarfes (Stand Mitte 2013) 36

ZUSAMMENFASSUNG

Die Halligen im nordfriesischen Wattenmeer stellen weltweit einmalige und schützenswerte Kultur- und Naturwerte dar. Durch ihre exponierte Lage im Wattenmeer sind die Halligen und ihre Bewohner vom Meeresspiegelanstieg und höheren Sturmflutwasserständen besonders betroffen. Ziel der Landesregierung ist die langfristige Erhaltung der Halligen und der Schutz ihrer Bewohner vor den Angriffen des Meeres. Auf Initiative der Landesregierung wurde daher eine Arbeitsgruppe „Halligen 2050“ mit der Aufgabe gegründet, innovative und nachhaltige Konzepte zur Sicherung der Halligen und zum Schutz der Halligbewohner bei geänderten Klimabedingungen zu diskutieren. Hierzu wurden vielfältige Aktivitäten entfaltet.

Dieser Bericht enthält die Ergebnisse der ersten Phase. Nach einem geographischen Überblick über die Halligen werden in diesem Bericht der erwartete Klimawandel und seine möglichen Konsequenzen für die Halligwelt in Form von Szenarien behandelt. Anschließend werden das optimierte gewässerkundliche Mess- und Überwachungsprogramm sowie Bemessungsgrundlagen für die Warften vorgestellt. Weitere Kapitel befassen sich mit dem Höhenwachstum auf den Halligen und dem Hochwasserschutz der Halligwarften. Die Ergebnisse der Forschungsprojekte SAHALL und ZukunftHallig sowie des Ideenwettbewerbes Hallig 2050, die flankierend zu den Arbeiten der AG Halligen 2050 liefen, werden hier dargestellt und bewertet. In einer Synthese werden abschließend Empfehlungen zur langfristigen Erhaltung der Halligen und Halligwarften bei geänderten Klimabedingungen formuliert.

Hinsichtlich des Halligwachstums wurde festgestellt, dass der vertikale Aufwuchs schon seit Jahrzehnten deutlich hinter dem Anstieg des mittleren Tidehochwassers zurückbleibt. In der Folge nimmt die mittlere Geländehöhe, insbesondere der größeren Halligen, bezogen auf den Meeresspiegel ständig ab. Ohne Gegenmaßnahmen ist mit einem weiteren Absenken der relativen Geländehöhen zu rechnen. Zur Hochwassersicherheit der Halligwarften bei – künftig zu erwartenden – höheren Sturmflutwasserständen wurde festgestellt, dass bei mehreren Warften Defizite existieren (Anlage 1). Die Sturmflut Xaver vom Dezember 2013 mit Wasserständen auf den Halligen von 4,0 bis 4,5 m über NHN hat das Erfordernis von Anpassungsmaßnahmen nochmals klar aufgezeigt. Obwohl Xaver im langjährigen Vergleich „nur“ etwa auf Platz 10 rangiert, stand das Wasser auf einigen Warften bereits vor der Haustür.

Die AG Halligen 2050 hat mehrere Handlungserfordernisse herausgearbeitet, die in Form von Empfehlungen am Ende dieses Berichtes beschrieben werden:

1. Änderungen frühzeitig erfassen,
2. Halligwachstum gewährleisten,
3. Objektschutz an Warftgebäuden erfassen und optimieren,
4. Bemessungsansatz für Halligwarften optimieren,
5. Schutzstandard der Warften ermitteln und bewerten,
6. Notwendige Maßnahmen umsetzen,
7. nachhaltige Küstenschutzmaßnahmen forcieren, und
8. die AG Halligen 2050 fortführen.

1. EINFÜHRUNG

Die Halligen im nordfriesischen Wattenmeer stellen weltweit einmalige und schützenswerte Kultur- und Naturwerte dar; Theodor Storm nannte sie „Schwimmende Träume“. Durch ihre exponierte Lage im Wattenmeer sind die Halligen und ihre Bewohner vom Meeresspiegelanstieg und höheren Sturmflutwasserständen besonders betroffen.

Wie stark der „Blanke Hans“ den Halligen zusetzen kann, hat unter anderem die Sturmflut am 16/17. Februar 1962 gezeigt. Die Warften wurden überflutet; die Bewohner haben in Dachgeschossen, teilweise auf den Dächern Zuflucht suchen müssen. Diese Katastrophe war Anlass für ein umfangreiches Warftverstärkungsprogramm. Bis 2007 wurden alle 32 bewohnten Warften mit Gesamtkosten in Höhe von 18 Mio. € verstärkt. Bauträger war das für die Halligen zuständige Amt Pellworm; das Land förderte die Maßnahmen zu 100%. Im Rahmen des Verstärkungsprogrammes wurden die Außenböschungen der Warften flacher gestaltet und niedrige Ringdeiche wurden um die Bebauung auf den Warften angelegt. Da die Halligen während Sturmfluten nicht evakuiert werden können, wurden in den Wohnhäusern Schutzräume eingerichtet. In Anbetracht der Projektionen zum Meeresspiegelanstieg und der damit weiter steigenden Sturmflutwasserstände stellt sich die Frage, ob es künftig möglich und auch sinnvoll ist, die Warften nach der obigen Methode weiter zu verstärken. Weiterhin ist unklar, ob bzw. inwieweit die natürliche Sedimentation auf den Halligen einen beschleunigten Meeresspiegelanstieg ausgleichen kann.

Ziel der Landesregierung ist die langfristige Erhaltung der Halligen und der Schutz ihrer Bewohner vor den Angriffen des Meeres. Auf Initiative der Landesregierung wurde daher im Jahre 2007 eine Arbeitsgruppe „Halligen 2050“ mit der Aufgabe gegründet, innovative und nachhaltige Konzepte zur Sicherung der Halligen und zum Schutz der Halligbewohner bei geänderten Klimabedingungen zu diskutieren. Sie setzt sich aus folgenden Institutionen und Personen zusammen:

- **Halligen**: Ruth Kruse (Nordstrandischmoor), Bgm. Volker Mommsen (Gröde), Bgm. Hans-Friedrich Nissen (Oland-Langeneß, bis 05-2013), Bgm. Heike Hinrichsen (Oland-Langeneß, ab 06-2013), Bgm. Matthias Piepgras (Hooge),
- **Amt Pellworm**: Bgm. Klaus Jensen (bis 06-2013), Amtsvorsteher Matthias Piepgras (ab 07-2013)
- **Kreis Nordfriesland**: Landrat Dieter Harrsen
- **Insel- und Halligkonferenz**: Natalie Eckelt
- **WWF und Schutzstation Wattenmeer**: Dr. Hans-Ulrich Rössner
- **LKN SH**: Dirk van Riesen (bis 10-2013), Birgit Matelski (ab 11-2013), Peter Beismann (bis 03-2013), Dr. Martin Stock, Dieter Schulz
- **MELUR SH**: Volker Petersen (Obmann), Dr. Jacobus Hofstede

Gemäß Arbeitsplan werden die folgenden technischen Fragestellungen erörtert:

1) Welche Sedimentationsraten existieren langfristig auf den Halligen in Abhängigkeit von der Lage im Wattenmeer, der Überflutungshäufigkeit und dem Meeresspiegelanstieg?

2) Wie verteilt sich die Sedimentation nach einer Überflutung auf der Hallig und wie stark ist das resultierende Höhenwachstum?
3) Wie wird die lang- und kurzfristige Sedimentation durch Küstenschutzbauwerke wie Sommerdeiche oder erhöhte Deckwerke beeinflusst?
4) Wie kann das Höhenwachstum, zum Beispiel durch eine Optimierung der Anordnung und Höhenlage von Schutzbauwerken, optimiert werden?
5) Welchen Schutzstandard haben die Halligwarften (Definition und Quantifizierung)?
6) Wie wird dieser Schutzstandard sich bei geänderten Klimabedingungen entwickeln und welchen Einfluss haben die verschiedenen Klimafaktoren (Meeresspiegelanstieg, Höhe und Häufigkeit von Sturmfluten)?
7) Wie bzw. mit welchen Strategien und Techniken kann ein angemessener Schutz für die Halligbewohner bei geänderten Klimabedingungen gewährleistet werden?

Darüber hinaus werden die vom Land auf den Halligen jeweils vorgesehenen Jahresarbeitsprogramme zur Küstensicherung vorgestellt und erörtert.

Zur Erfüllung des Arbeitsauftrages wurden die folgenden Aktivitäten entfaltet.

- Die AG Halligen 2050 hat bisher neun Sitzungen durchgeführt.
- Der LKN-SH[1] hat ein optimiertes gewässerkundliches Mess- und Überwachungsprogramm im Bereich der Halligen installiert. Darüber hinaus wurden als Bemessungsgrundlage für Schutzmaßnahmen mit statistischen Verfahren Sturmflutwasserstände mit unterschiedlichen Eintrittswahrscheinlichkeiten für die Halligen ermittelt.
- Das MELUR-SH[2] hat gemeinsam mit der AIK-SH[3], dem Amt Pellworm mit den Halligen sowie dem Kreis Nordfriesland in 2012 einen Ideenwettbewerb für Projektgemeinschaften von Ingenieuren und Architekten ausgelobt. Der Wettbewerb sollte innovative und nachhaltige Schutzmethoden für Warften und Warfthäuser aufzeigen, die einen angemessenen und nachhaltigen Schutz der Halligbewohner bei geänderten Klimabedingungen gewährleisten.
- Das MELUR-SH hat von 2007 bis Ende 2012 die Phasen I und II des Forschungsprojekts SAHALL der Universität Göttingen finanziert. In diesem Projekt ging es um das Höhenwachstum der Halligen (Fragestellungen 1 bis 4).
- Im Rahmen der KFKI[4]-Forschung wird das vom BMBF[5] geförderte Vorhaben ZukunftHallig durchgeführt. In diesem Projekt der Universitäten Siegen, Aachen und Göttingen sowie des LKN-SH wird bis Ende 2013 erforscht, wie die Bewohnbarkeit der Halligen bei geänderten Klimabedingungen durch

[1] Landesbetrieb für Küstenschutz, Nationalpark und Meeresschutz Schleswig-Holstein

[2] Ministerium für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume Schleswig-Holstein

[3] Architekten- und Ingenieurkammer Schleswig-Holstein

[4] Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen

[5] Bundesministerium für Forschung und Bildung

nachhaltige Anpassungsmaßnahmen langfristig gewährleistet werden kann (Fragestellungen 5 bis 7).

In Kapitel 2 des vorliegenden Berichtes folgt ein geographischer Überblick über die Halligen. Anschließend werden in Kapitel 3 der erwartete Klimawandel und seine möglichen Konsequenzen für die Halligwelt in Form von Szenarien behandelt. Kapitel 4 befasst sich mit dem optimierten Mess- und Überwachungsprogramm sowie mit den gewässerkundlichen Bemessungsgrundlagen. Das Höhenwachstum auf den Halligen wird in Kapitel 5 thematisiert. Hier werden die Ergebnisse des Projektes SAHALL dargestellt und bewertet. Die Warften und damit der künftige Küstenhochwasserschutz stehen in Kapitel 6 im Fokus. Die Ergebnisse des Ideenwettbewerbes wie auch erste Zwischenergebnisse aus ZukunftHallig werden hier erläutert. In einer Synthese mit Ausblick werden schließlich in Kapitel 7 Möglichkeiten und Erfordernisse für eine langfristige Erhaltung der Halligen und Halligwarften bei geänderten Klimabedingungen aufgezeigt.

Zu den Herausforderungen des Klimawandels in Schleswig-Holstein gehört auch die Sicherung der wertvollen und nicht zuletzt nach den Natura 2000-Richtlinien geschützten Natur auf den Halligen. Dieses Thema wurde in der ersten Arbeitsphase der AG Halligen 2050 noch nicht über die Frage der Sicherung des Erhalts der Halligen hinaus behandelt. Es soll jedoch bei einer Fortsetzung der AG Halligen 2050 auf die Agenda kommen (Kap. 7, Empfehlung 8).

2. GEOGRAPHISCHER ÜBERBLICK

Zehn Halligen mit einer Gesamtfläche von 21 km^2 existieren im nordfriesischen Wattenmeer; sechs davon sind permanent bewohnt (Abb. 1, Tab. 1). Hier leben insgesamt etwa 280 Menschen auf 32 Warften. Der Begriff Hallig bedeutet „flach“ oder „niedrig“. Die mittlere Höhenlage der Halligen liegt nur wenige Dezimeter über dem mittleren Tidehochwasser. Bedingt durch ihre geringe Höhenlage ergeben sich mehrmals im Jahr während Wind- und Sturmfluten sog. „Landunter-Phasen“.

Abb. 1: Die Halligen im Nordfriesischen Wattenmeer

Wie keine andere Landschaft stehen die nordfriesischen Halligen als Sinnbild für den: „Kampf mit dem Blanken Hans“. Historische Sturmfluten wüteten hier wegen der exponierten und kaum geschützten Lage besonders gravierend. Im Jahre 1717 kamen während einer Sturmflut auf Nordstrandischmoor 16 Menschen, auf Langeneß 18 Menschen ums Leben. Im Jahre 1825 starben in der so genannten Halligflut 74 Menschen auf den Halligen. Die Halligbewohner haben in der Folge ein sehr besonderes Verhältnis zu ihrem Lebensraum entwickelt. Ihr Kampf mit dem Blanken Hans ist ein wichtiger Teil des regionalen Kulturbewußtseins geworden.

Name	**Fläche**	**Küstenlänge**	**Einwohner**
	(km^2)	(km)	(30.09.2011)
Langeneß (einschl. Nordmarsch)	9,241	21,126	115
Hooge	5,460	11,066	109
Nordstrandischmoor	1,630	6,759	22
Oland	0,955	4,930	21
Gröde	1,965	7,544	11
Süderoog	0,577	3,074	2
Hamburger Hallig	0,493	3,092	0
Südfall	0,407	2,963	0
Habel	0,063	1,511	0
Norderoog	0,079	1,359	0
Summe	**20,870**	**63,424**	**280**

Tab. 1: Halligen im nordfriesischen Wattenmeer (Quellen: KIS-SH, Statistikamt HH/SH, Amt Pellworm)

Die Halligen sind Überbleibsel einer im Mittelalter während Sturmfluten und Meereseinbrüche untergegangenen Küstenmarschlandschaft. Betrug ihre Fläche Mitte des 17. Jahrhunderts noch etwa 100 km^2, so nahm diese Fläche infolge von Sturmfluten bis Ende des 19. Jahrhunderts auf weniger als 30 km^2 ab. Von 1824 bis 1924 nahm die Halligbevölkerung von 937 auf 490 ab[6], was fast eine Halbierung gleichkommt. Zu Anfang des 20. Jahrhunderts wurden die Halligen dann durch Küstenschutzmaßnahmen in ihrer Lage stabilisiert. Die bewohnten Halligen Hooge, Oland-Langeneß und Gröde erhielten zudem Sommerdeiche, die leichte Windfluten abhalten. Bedingt durch ihre exponierte Lage und die extremen Sturmflutwasserstände der Jahre 1962 und 1976 wurden die bewohnten Warften in den letzten Jahrzehnten umfassend verstärkt. Dabei wurde die Verstärkung grundsätzlich so ausgeführt, dass – neben einer Abflachung der Außenböschung – die Warften einen Ringwall als Hochwasserschutz

[6] Lorenzen, J. 1992. Die Halligen in alten Abbildungen. Foriining for nationale Friiske, Breklumer Druckerei Manfred Siegel KG, 159 S.

erhielten (Abb. 2). Damit liegen die Häuser nunmehr in einer Wanne. Zusätzlich wurden Schutzräume in den Wohnhäusern eingerichtet.

Für den Küstenhochwasserschutz (einschl. Warftverstärkungen) zuständig sind grundsätzlich die Grundeigentümer bzw. die Halligbewohner; koordiniert wird die Aufgabe des Küstenhochwasserschutzes durch das Amt Pellworm; der LKN-SH ist Fachbehörde (technische Beratung, Prüfung, Genehmigung und Zuwendungen). Für die Küstensicherung auf den Halligen ist das Land Schleswig-Holstein, vertreten durch den LKN-SH, verantwortlich. Dabei sind die Sicherungsmaßnahmen insoweit zu treffen, als es im Interesse des Wohls der Allgemeinheit und des Küstenschutzes erforderlich ist. Entsprechende Regelungen sind im Landewassergesetz Teil 7: „Deiche und Küsten“ enthalten.

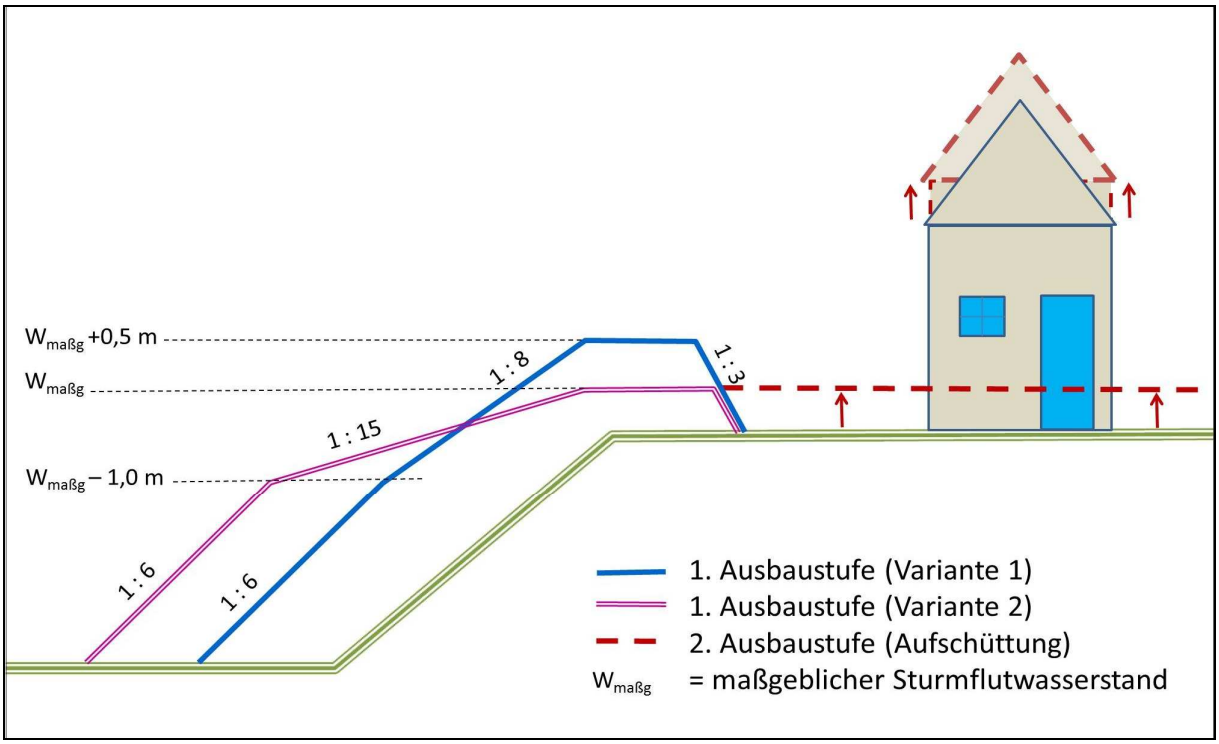


Abb. 2: Prinzip der Halligwarftverstärkungen (nach Landesförderrichtlinie)

Der Tourismus entwickelte sich in den vergangenen Jahrzehnten auf den Halligen zum wichtigsten Wirtschaftsfaktor. Das abgeschiedene Land im Meer ist ein beliebtes Urlaubs- und Ausflugsziel – nicht nur im Sommer – geworden. Dabei kommen die Besucher vor allem, um die überwältigende Natur, die Ruhe, die Abgeschiedenheit und das typische Flair zu erleben. Langfristig können die Halligen nur bewohnbar bleiben, wenn vor Ort ausreichend Möglichkeiten zur Existenzsicherung vorhanden sind.

Die Halligen liegen inmitten des Nationalparks Schleswig-Holsteinisches Wattenmeer und sind seit 2009 im Weltnaturerbe Wattenmeer. Gleichzeitig sind sie Teil des Biosphärengebietes Schleswig-Holsteinisches Wattenmeer und Halligen. Die sechs dauerhaft bewohnten Halligen gehören zur Entwicklungszone des Biosphärenreservats, jedoch nicht zum Nationalpark. Das UNESCO-Welterbe-Komitee würdigte das

Wattenmeer in drei Kriterien als eines der größten küstennahen und gezeitenabhängigen Feuchtgebiete der Erde: Geologie, Ökologie und Biodiversität. Das Komitee beschreibt das Gebiet als einzigartiges Ökosystem, erdzeitlich jung, mit vom Menschen weitgehend unbeeinflussten Naturvorgängen und einer besonders reichen Artenvielfalt. Die Beliebtheit der Halligen bei Touristen ist auch in dieser Naturschönheit begründet.

3. HERAUSFORDERUNG KLIMAWANDEL

Der vom Menschen verursachte Klimawandel und der Umgang mit seinen Konsequenzen stellen zentrale Herausforderungen der heutigen Gesellschaft dar. Für den Küstenschutz auf den Halligen sind durch den Klimawandel verursachte mögliche Veränderungen der mittleren und der Höchstwasserstände sowie des Seeganges besonders relevant. Diese Kenngrößen sind wesentliche Grundlage für die Dimensionierung der Küstenschutzanlagen. Im Nachfolgenden werden der derzeitige Kenntnisstand über die mögliche künftige Entwicklung des mittleren Meeresspiegels, der Sturmflutwasserstände und der Seegangverhältnisse kurzgefasst.

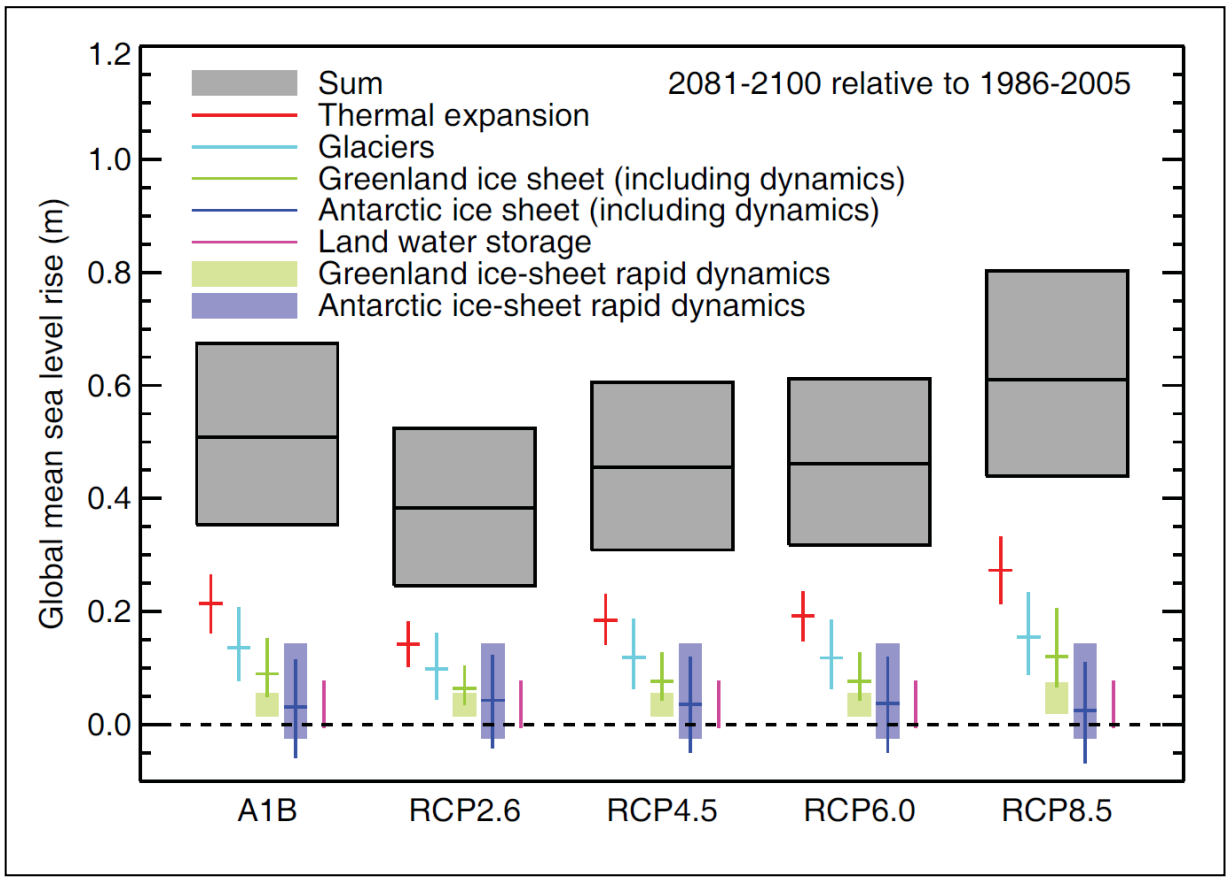


Abb. 3: Projektionen des globalen mittleren Meeresspiegelanstieges für verschiedene Strahlungsbilanzszenarien (Church et al. 2013[7])

Ausgangspunkt für Projektionen zum globalen **Meeresspiegelanstieg** ist nach dem fünften Weltklimabericht des IPCC von 2013 die globale Strahlungsbilanz, die derzeit bei etwa zwei Watt pro Quadratmeter (W/m^2) liegt. Durch den Ausstoß von Treibhausgasen (vor allem CO_2) könnte gemäß IPCC die Wärme-Einstrahlung bis 2100

[7] Church, J.A., P.U. Clark, A. Cazenave, J.M. Gregory, S. Jevrejeva, A. Levermann, M.A. Merrifield, G.A. Milne, R.S. Nerem, P.D. Nunn, A.J. Payne, W.T. Pfeffer, D. Stammer and A.S. Unnikrishnan, 2013: Sea Level Change. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

nicht-linear auf 2,6 (Szenario RCP2.6) bis 8,5 W/m^2 (Szenario RCP8.5) zunehmen. Für diese Strahlungsszenarien sind im Weltklimabericht Projektionen zum globalen mittleren Meeresspiegelanstieg für den Zeitraum 2000 – 2100 enthalten (Abb. 3). Demnach ist in diesem Jahrhundert mit einem globalen Meeresspiegelanstieg zwischen 0,26 und 0,82 m (entsprechend ca. 3 und 8 mm pro Jahr) zu rechnen. Für Schleswig-Holstein ist zu diesen Werten noch die langfristige Landsenkung zu addieren, die zwischen 0 und 1 mm/J. liegt.

Hinsichtlich künftiger **Sturmflutwasserstände** ist zunächst festzuhalten, dass Sturmfluten auf den jeweiligen mittleren Wasserspiegel aufsetzen. Folglich nehmen die Sturmflutwasserstände in etwa entsprechend dem mittleren Meeresspiegelanstieg (siehe oben) zu. Sturmfluten entstehen während auflandiger Starkwindereignisse, die das Wasser vor der Küstenlinie aufstauen und dort zum sog. Windstau führen. Die Höhe des Windstaus ist abhängig von der Windstärke, -richtung und -dauer sowie der Küstentopographie (Wassertiefe, Exposition zur Windrichtung, Buchteneffekt). Entsprechend fällt der Windstau lokal stark unterschiedlich aus und Projektionen sind für die Küsten Schleswig-Holsteins schwierig zu erstellen. Das HZG[8] hat für die Nordseeküste Modellrechnungen zum künftigen Windstau und den künftigen Sturmflutwasserständen veröffentlicht (Woth et al. 2006[9]). Das HZG projiziert bis Ende dieses Jahrhunderts moderate Zunahmen des Windstaus um 0,2 bis 0,4 m für die Westküste Schleswig-Holsteins. Die Projektionen zu den Sturmflutwasserständen reichen von 0,3 bis 1,1 m bis 2100. Das HZG weist darauf hin, dass die Berechnungen jeweils nur für zwei (ältere) IPCC-Szenarien und mit zwei Klimamodellen angestellt wurden. Neuere Studien kommen zu ähnlichen Ergebnissen (Gaslikova et al. 2013[10]).

Hinsichtlich künftiger Sturmflutwasserstände in der Region lohnt sich ein Rückblick auf die bisherige Entwicklung. In Abb. 4 ist die Entwicklung der Jahreshöchstwasserstände seit 1875 am Pegel Dagebüll, für den im Gegensatz zu den Halligpegeln eine lange Zeitreihe vorliegt, dargestellt. Demnach steigen die Höchstwasserstände in Dagebüll bereits seit 1875 um jährlich 4,7 mm bzw. um fast 0,5 m pro Jahrhundert, und das ohne anthropogenen Klimawandel. Seit Anfang der 1990er Jahre ist – in Abweichung vom Langzeittrend – eine Beruhigung erkennbar.

Der mittlere und maximale **Seegang** ist wie der Windstau von den Windverhältnissen und der Küstentopographie geprägt. Auch hier gilt, dass die Erstellung von regionalen Projektionen sehr schwierig ist. Eine HZG-Studie (Grabemann und Weisse 2008[11]) für die Nordsee kommt für zwei (ältere) IPCC-Treibhausgasszenarien zu folgenden Ergebnissen. Für die südöstliche Nordsee deutet sich eine leichte Zunahme

---

8 Helmholtz-Zentrum Geesthacht für Material- und Küstenforschung

9 WOTH, K.; WEISSE, R.; VON STORCH, H. (2006): Climate change and North Sea storm surge extremes: an ensemble study of storm surge extremes expected in a changed climate projected by four different regional climate models. In: Ocean Dynamics, doi: 10.1007/s10236005-0024-3.

10 GASLIKOVA L., I. GRABEMANN and N. GROLL (2013). Changes in North Sea Storm Surge conditions for Four Transient Future Climate Realizations. Natural Hazards, Volume 66, Issue 3, pp 1501-1518.

11 GRABEMANN I. and R. WEISSE (2008). Climate change impact on extreme wave conditions in the North Sea: an ensemble study. Ocean Dynamics 58, 199-212.

der extremen Wellenhöhen, im Mittel um 5 bis 8%, zum Ende des 21. Jahrhunderts an. Diese Änderung ist mit einer geringen Zunahme der Häufigkeit extremer Wellenhöhen und ihrer Dauer gekoppelt. Im Detail zeigen die einzelnen Simulationen jedoch erhebliche Unterschiede. Die Unsicherheiten in den Klimamodellen erreichen die Größenordnung der abgeschätzten Änderungen im Seegang.

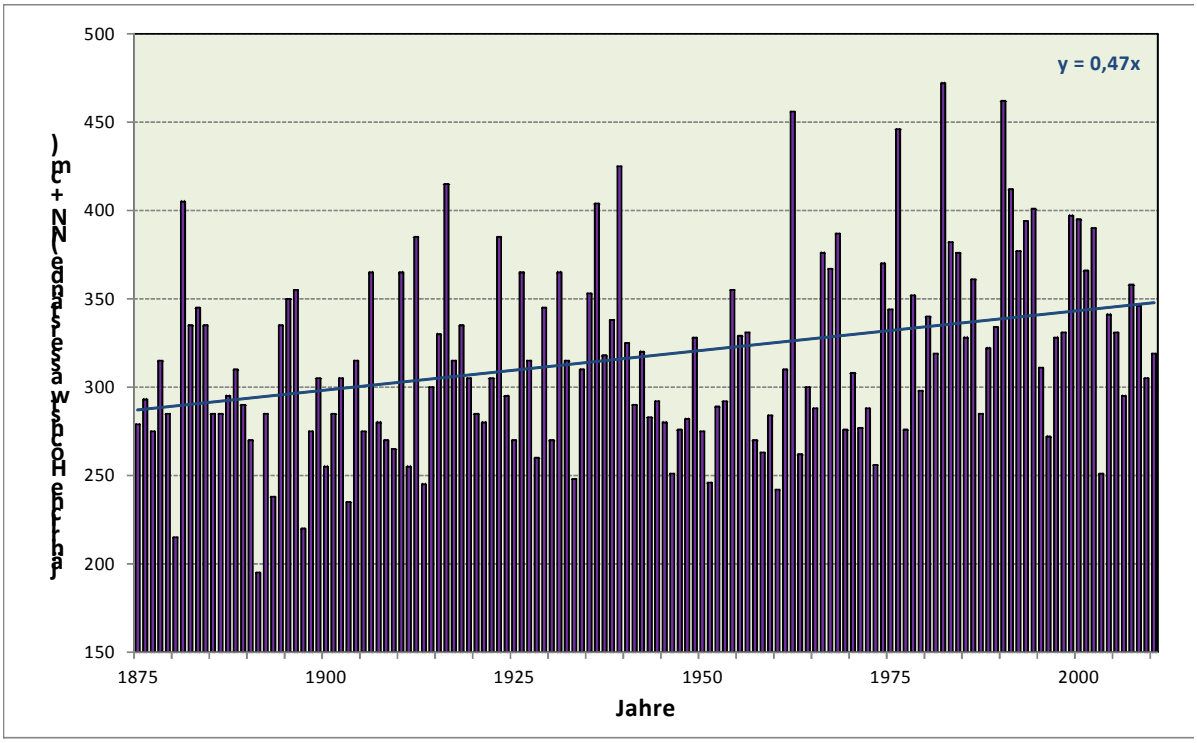


Abb. 4: Entwicklung der jährlichen Höchstwasserstände in Dagebüll seit 1875

Für die Halligen sind die oben beschriebenen hydrologischen Entwicklungen infolge des Klimawandels sehr ernst und dürfen nicht unterbewertet werden. Es ist damit zu rechnen, dass höher auflaufende Sturmfluten die Halligwarften in der Zukunft deutlich stärker belasten werden. Auch die Halligkanten werden vermehrt beansprucht werden, was – zum Erhalt der Halligen – entsprechende Sicherungsmaßnahmen bedingt. Schließlich wird der mittel- bis langfristig stark zunehmende Meeresspiegelanstieg auf den Halligen zu einem entsprechend erhöhten Bedarf an Sediment führen. Nur wenn langfristig genügend Material zum Ausgleich des Meeresspiegelanstieges zur Ablagerung kommt, kann die relative Geländehöhe zum Meeresspiegel und damit die charakteristische Halliglandschaft langfristig erhalten bleiben. Erste Voraussetzung hierfür sind ausreichend häufige Land-unter-Phasen.

4. GEWÄSSERKUNDLICHE ÜBERWACHUNG UND BEMESSUNG

Vorsorgliches und nachhaltiges Management setzt ausreichende und aussagekräftige Naturdaten als Grundlage für ein optimales Systemverständnis voraus. Für das Planen von Maßnahmen mit einem langen Zeithorizont wie der Küstenschutz gilt dieser Grundsatz umso mehr. Entsprechend spielt der gewässerkundliche Mess- und Beobachtungsdienst des LKN-SH eine grundlegende Rolle für einen nachhaltigen Küstenschutz auf den Halligen.

Eine Überprüfung der Datenmenge und –Qualität durch den LKN-SH im Rahmen der AG Halligen 2050 zeigte, dass das hydrologische Messprogramm wie auch die Datenaufbereitung im Bereich der Halligen in Anbetracht der Herausforderungen aus dem Klimawandel weiter zu entwickeln sind. Der LKN-SH wurde um die Umsetzung eines optimierten Messkonzeptes sowie um entsprechende Auswertungen gebeten. Die Ergebnisse werden nachfolgend dargestellt.

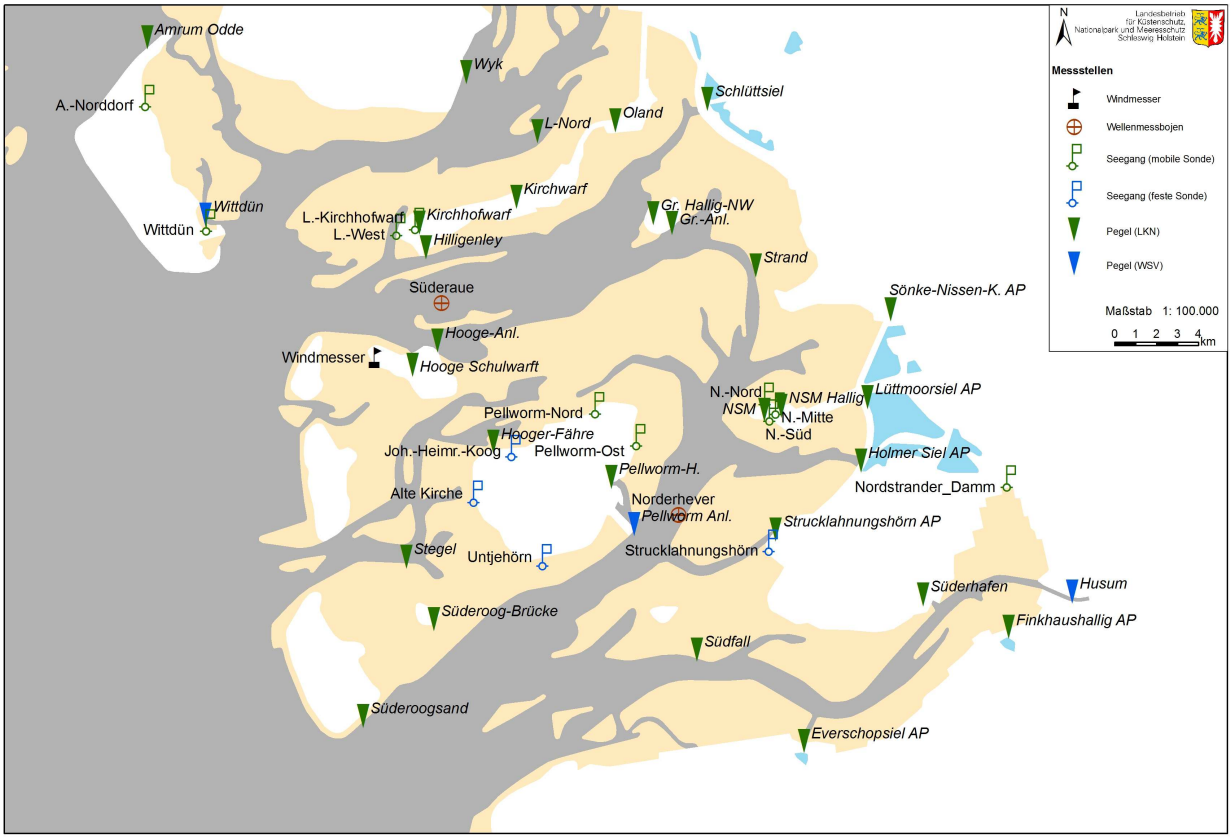


Abb. 5: Hydrologisches Messprogramm im Bereich der Halligen

4.1 Messkonzept

Als Grundlage für die Bemessung von Schutz- und Sicherungsmaßnahmen sind für jede Hallig detaillierte Informationen zur hydrologischen Entwicklung und Belastung erforderlich. Ziel des vom LKN-SH im Bereich der Halligen einzurichtenden gewäs-

serkundlichen Messprogrammes (Abb. 5) sind räumlich repräsentative genaue Angaben zu Sturmflutwasserständen, Wasserstands-Überschreitungshäufigkeiten und -Verweildauern sowie zum Seegang. Hierzu wurden unter anderen die folgenden Aktivitäten entfaltet:

- Untersuchung und Zuordnung von Außenpegeln zu den Halligen,
- Prüfung und Herstellung von funktionalen Zusammenhängen, zum Beispiel zwischen Dauer- und Sommerpegeln,
- Aufrüstung der vorhandenen Pegel mit Datenfernübertragung,
- Errichtung von drei Halligpegeln auf Langeneß (2) und Oland (1),
- Errichtung vom Außensommerpegel Langeneß-Nord und vom Außendauerpegel Hilligenley,
- Einrichtung von autarken mobilen Seegangmessstationen, und
- Sammlung und Aufbereitung von Beobachtungen der Halligbewohner zu den „Land-unter-Phasen“.

4.2 Hydrologische Auswertungen

Da das Messsystem teilweise noch im Aufbau ist bzw. gerade eingerichtet wurde, können keine Endergebnisse präsentiert werden. Anhand der bestehenden Anlagen und der vorliegenden Messdaten sind jedoch vielfältige Analysen bereits möglich; teilweise wurden diese im Rahmen des Projektes ZukunftHallig ermittelt.

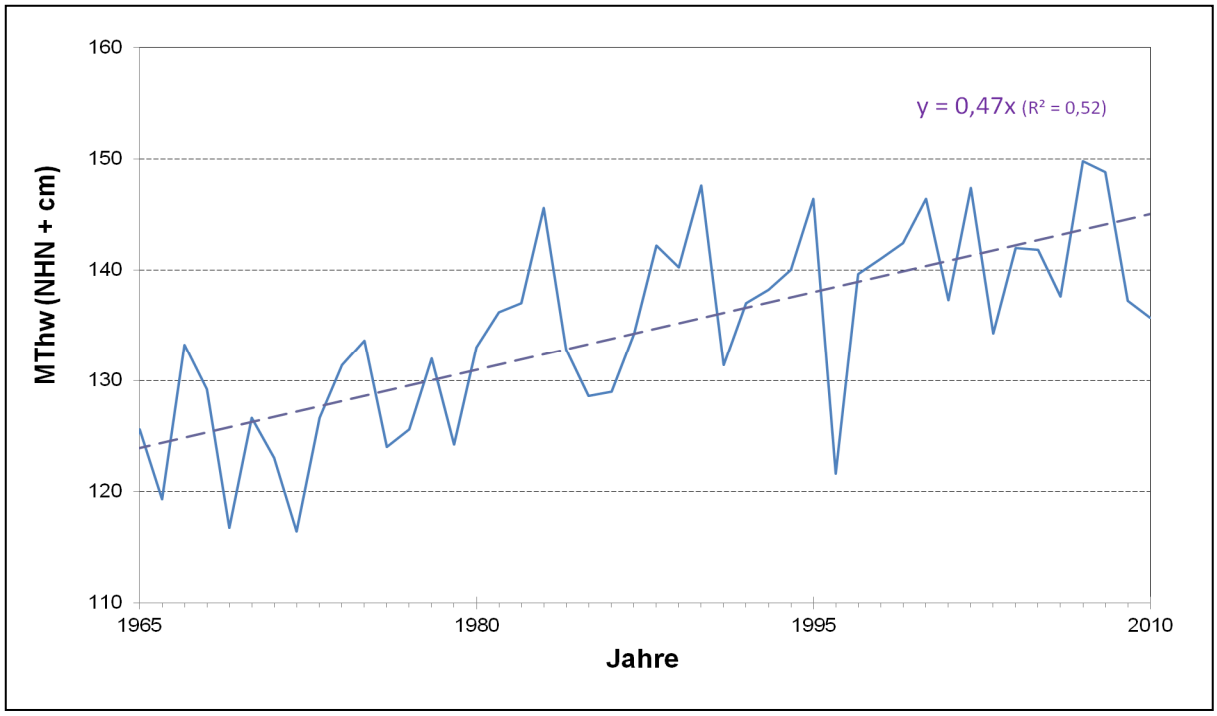


Abb. 6: Anstieg des mittleren jährlichen Tidehochwassers (MThw) seit 1965, gemittelt über die Pegel Dagebüll, Wyk auf Föhr, Wittdün auf Amrum, Schlüttsiel, und Pellworm-Hafen.

In Abb. 6 ist die Entwicklung des mittleren Tidehochwassers (MThw) in der Region seit 1965 dargestellt. Von 1965 bis 2010 stieg demnach das MThw um durchschnittlich 0,47 mm pro Jahr bzw. insgesamt um gut 0,2 m an. Nicht dargestellt ist die Entwicklung des mittleren Tideniedrigwassers (MTnw), das von 1965 bis 2010 keinen signifikanten Trend aufwies. Folglich hat der mittlere Tidenhub entsprechend des MThw-Anstieges zugenommen.

Nicht nur für den Schutz vor Sturmfluten und Uferabbruch, sondern auch im Hinblick auf das Höhenwachstum der Halligen sind Angaben zu Überschreitungshäufigkeiten und Verweilzeiten erhöhter Wasserstände von großer Bedeutung. In Abb. 7 ist für den Pegel Hooge-Anleger die mittlere, minimale und maximale jährliche Überschreitungshäufigkeit bestimmter Wasserstände über den Zeitraum 2002 bis 2011 dargestellt. Dieser Parameter zeigt auf, wie oft auf den Halligen mit bestimmten Wasserständen zu rechnen ist. So wurde der Wasserstand von NHN +2,3 m (ca. MThw + 0,9 m) im besagten Zeitraum im Schnitt jährlich etwa Zehnmal, mindestens viermal und höchstens Achtzehnmal (im Jahre 2007) überschritten.

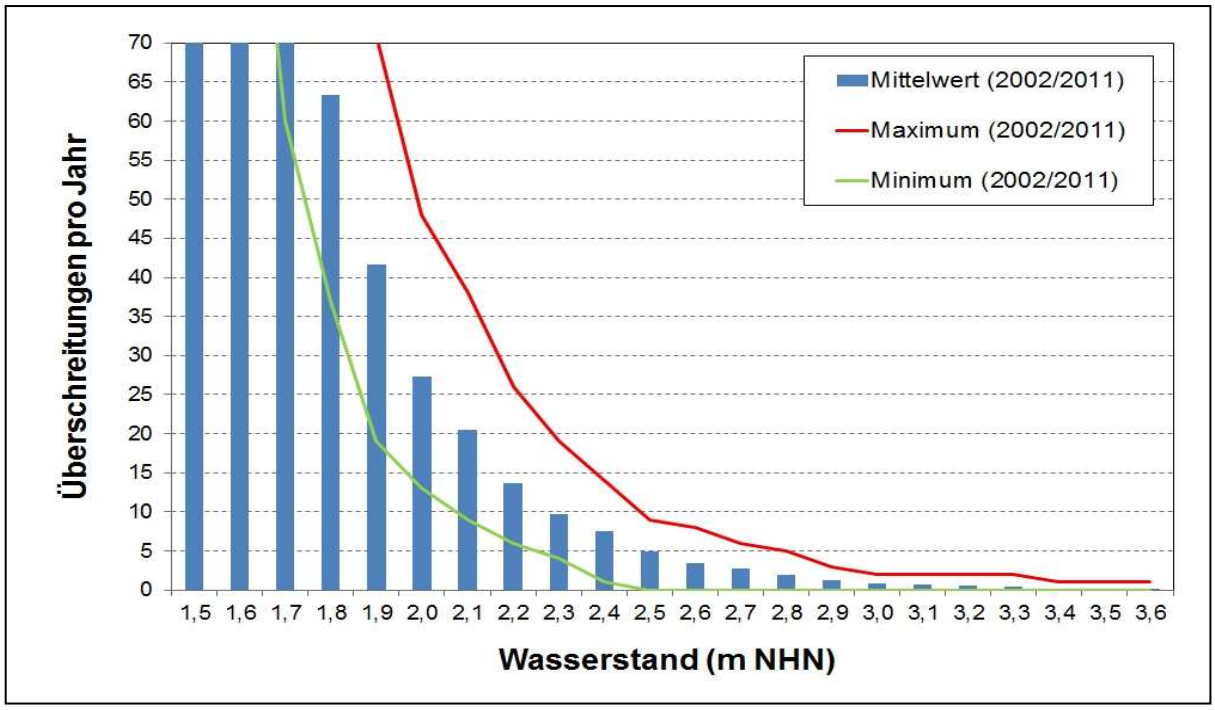


Abb. 7: Wasserstands-Überschreitungshäufigkeiten am Pegel Hooge Anleger für den Zeitraum 2002 bis 2011

In Abb. 8 ist für den Zeitraum 1978 bis 2011 die jährliche Häufigkeit von Wasserständen höher als NHN +2,30 m und höher als NHN +2,90 m am Pegel Hooge Anleger dargestellt. Für beide Wasserstandmarken ist kein Trend über den besagten Zeitraum erkennbar. Über die letzten drei Jahre waren die Häufigkeiten eher gering; die größte Häufigkeit trat im Jahre 1990 auf. Die Höhenmarke NHN +2,90 stellt in etwa die mittlere Höhenlage der Regionaldeiche auf Hooge dar. Die Überflutung der Hallig durch Wellenüberlauf setzt allerdings bereits erheblich früher, etwa ab NHN +2,30 m ein. Der Wasserstand NHN +2,30 m wurde im Zeitraum 1978 – 2011 durchschnittlich

etwa Zehnmal pro Jahr, der von NHN +2,90 m im Schnitt einmal im Jahr erreicht oder überschritten.

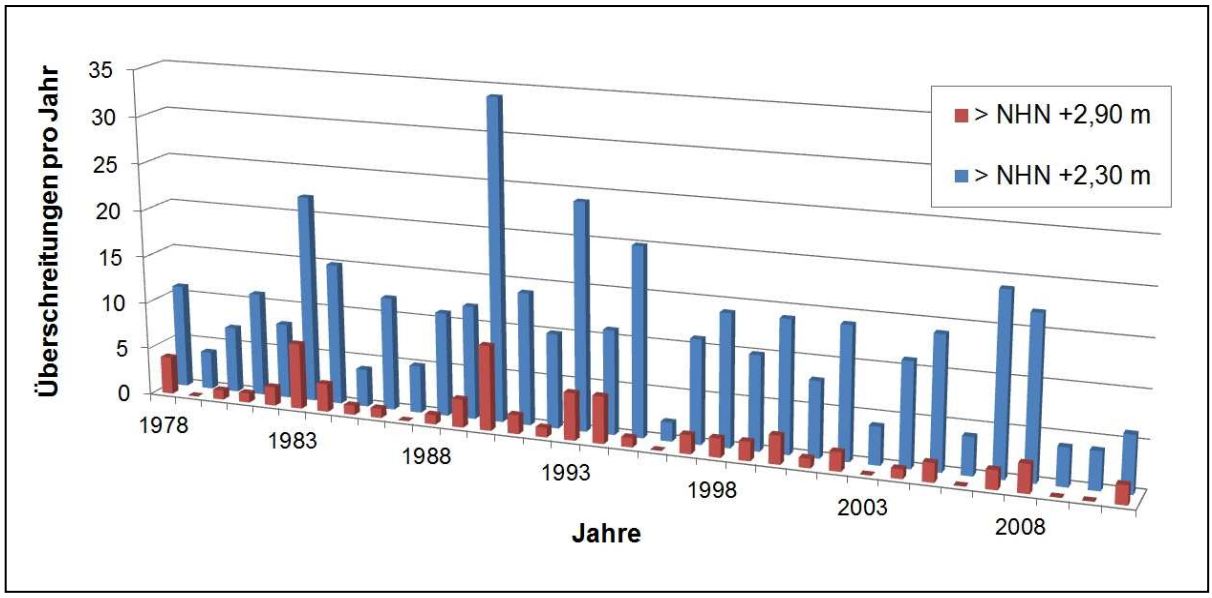


Abb. 8: Häufigkeit erhöhte Wasserständen am Pegel Hooge Anleger seit 1978.

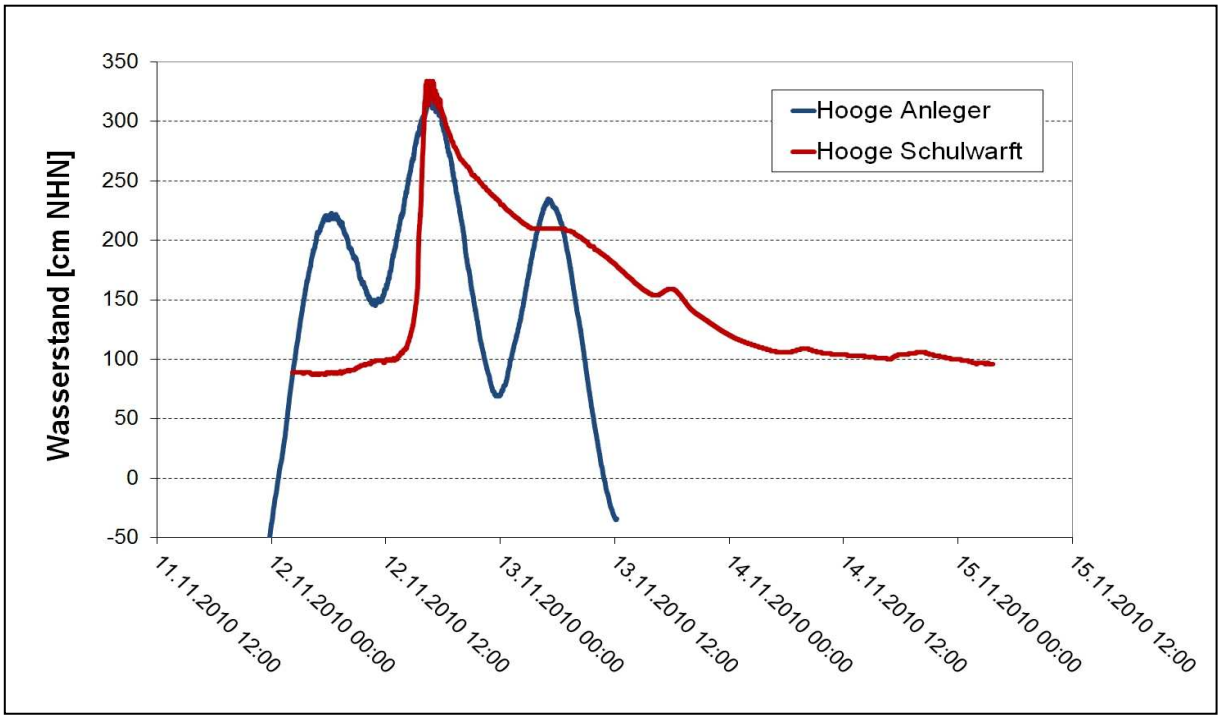


Abb. 9: Vergleich von Wasserstands-Ganglinien während einer Sturmflut im Jahre 2010 auf (Schulwarft) und vor (Anleger) der Hallig Hooge.

Aus der Abb. 9 geht das verzögerte Ablaufen des Wassers von der Hallig nach einer Sturmflut hervor. Dargestellt sind die Wasserstands-Ganglinien der Sturmflut vom 12. November 2010 am Halligpegel Hooge Schulwarft (rote Linie) und am Außenpegel Hooge Anleger (blaue Linie). Während die Ganglinie am Anleger bereits am 13.11.10 wieder normal verlief, blieben die Wasserstände an der Schulwarft bis 14.11.10 er-

höht. Die Verweilzeiten erhöhter Wasserstände am Halligpegel Hooge-Schulwarft sind entsprechend höher als am Außenpegel Hooge-Anleger.

5. STABILITÄT DER HALLIGEN

Die Stabilität der Halligen ist sowohl flächenmäßig als auch höhenmäßig zu betrachten. Obwohl die AG Halligen 2050 hinsichtlich der Stabilität der Halligen in Zeiten des Klimawandels vorrangig das Höhenwachstum thematisiert hat (Kap. 5.2), folgen zunächst einige Aussagen zur Sicherung der Halligen vor Uferabbruch.

5.1 Sicherung der Halligen vor Uferabbruch

Durch Uferabbruch während Sturmfluten nahm die Fläche der Halligen zwischen Mitte des 17. und Ende des 19. Jahrhunderts um etwa 70 km^2 bzw. 70% ab. Damit die verbliebenen Halligen nicht komplett verschwinden, wurden Anfang des 20. Jahrhunderts umfangreiche Ufersicherungsmaßnahmen durchgeführt. Mit diesen Maßnahmen konnte – trotz steigendem Meeresspiegel und zunehmender Sturmflutwasserstände – weiterer Abbruch erfolgreich verhindert werden. Derzeit (Stand 2010) sichern etwa 54 km Deckwerke in Kombination mit 25 km Buhnen und 45 km Lahnungen die Halligen vor Abbruch. In Abb. 10 sind die Küstenschutzmaßnahmen für die Hallig Gröde dargestellt.

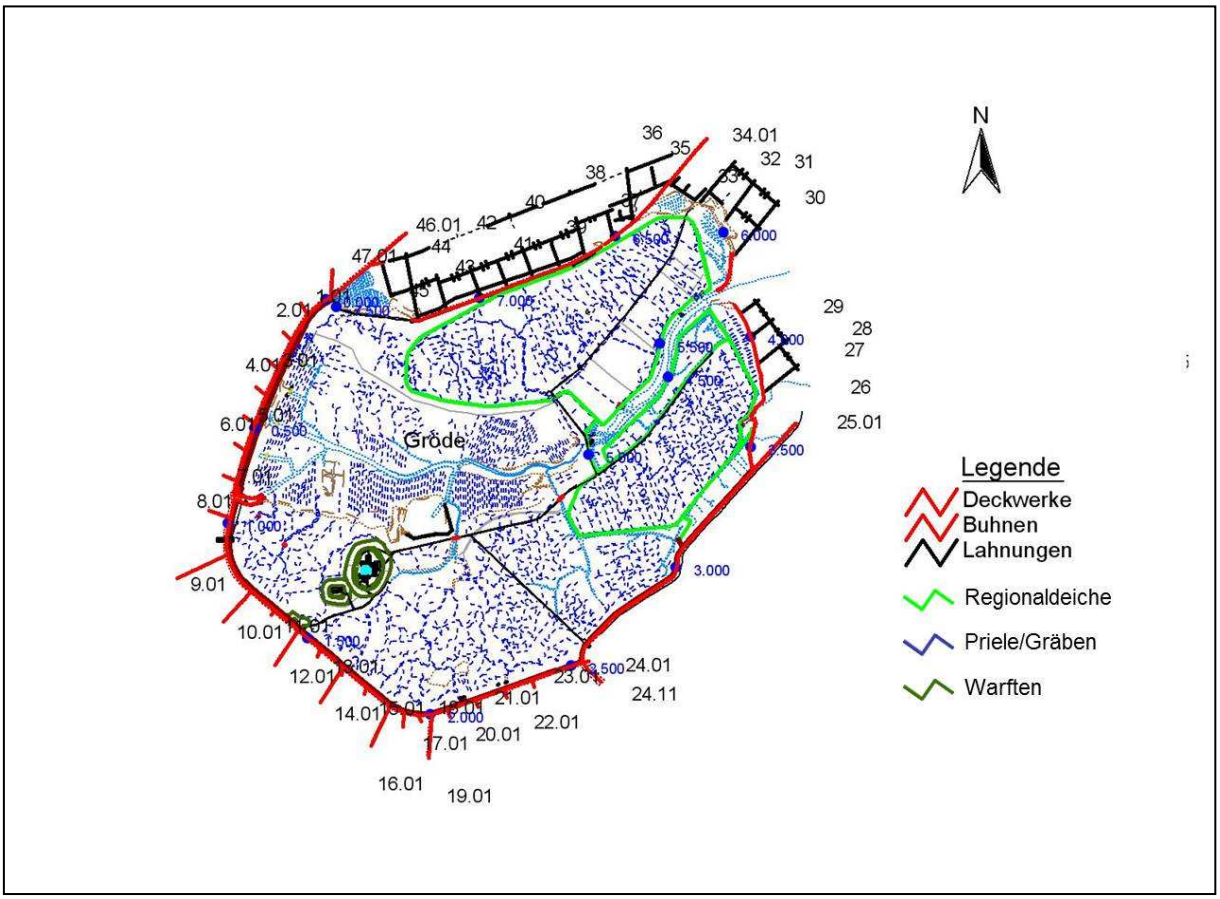


Abb. 10: Küstenschutzmaßnahmen auf der Hallig Gröde

Durch ihre exponierte Lage im Wattenmeer und insbesondere in Anbetracht eines künftig verstärkt steigenden Meeresspiegels ist die Sicherung der Halligen vor

Uferabbruch eine große Herausforderung. Die durch die jeweilige Exposition bedingten stark unterschiedlichen hydrologischen und morphologischen Rahmenbedingungen bedingen ein lokal angepasstes Vorgehen. So können Lahnungsfelder nur vor gering belasteten „energiearmen“ Uferbereichen sinnvoll sein, während Deckwerke an exponiert liegenden Halligkanten ggf. zusätzlich durch Buhnen zu sichern sind (MELUR 2012).

Infolge der regelmäßigen Überflutungen bzw. Land-unter-Phasen wächst insbesondere unmittelbar hinter den Deckwerken das Gelände durch die sich hier konzentrierende Sedimentation stark in die Höhe. Der langfristige Meeresspiegelanstieg – seit 1914 ist das MThw um etwa 0,4 m angestiegen – führt weiterhin dazu, dass vermehrt Wellenüberschlag bei den alten Deckwerken auftritt, was im aufgewachsenen Gelände hinter den Deckwerken verstärkt zu Auskolkungen führt (Foto 1). Ohne Gegenmaßnahmen kann dies langfristig durch Hinterspülung und Zerstörung der Deckwerke zu einer Gefährdung der Halligstabilität führen.

Foto 1: Auskolkungen hinter einem alten Deckwerk auf Gröde (Foto: Mommsen, 15.07.2010)

Um dies zu vermeiden, sind die Deckwerke rechtzeitig in der Höhe anzupassen. Derzeit läuft ein Verstärkungsprogramm an insgesamt 4,75 km Deckwerken auf sechs Hallligen (Abb. 11). Hinsichtlich der Bestickhöhe der Deckwerke ist besonders zu berücksichtigen, dass das zum Ausgleich des Meeresspiegelanstieges erforderliche Höhenwachstum der Halligen (Kap. 5.2) eine ausreichend häufige Überflutung voraussetzt. Des Weiteren stellen die Deckwerksverstärkungen Eingriffe in Natur und Landschaft dar, die im Rahmen des laufenden Programmes durch entsprechende Maßnahmen minimiert werden. Derzeit liegen weitergehende Maßnahmen der Mini-

mierung sowie Varianten oder Alternativen zum Erreichen des mit der Baumaßnahme beabsichtigten Ziels nicht vor. Im Rahmen der Erstellung der Strategie Wattenmeer 2100 (MELUR 2012) soll nach neuen Möglichkeiten gesucht werden, die flächenmäßige Stabilität der Halligen durch möglichst naturverträgliche Maßnahmen zu fördern.

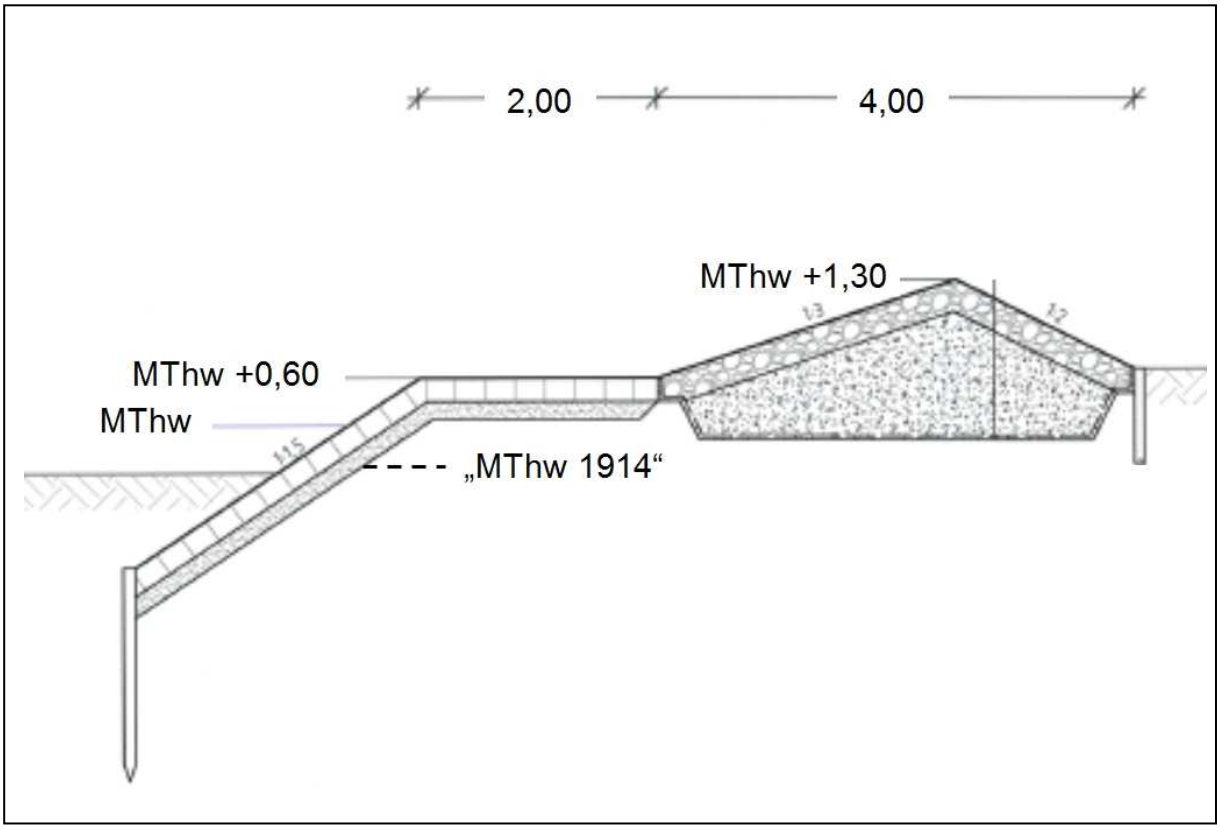


Abb. 11: Regelprofil Verstärkung Halligdeckwerke (LKN 2008).

5.2 Höhenwachstum der Halligen

Wie bereits erwähnt sind die Halligen zum Ausgleich des Meeresspiegelanstieges angewiesen auf Akkumulationen während der Land-Unter-Phasen. Grundsätzlich nimmt mit steigendem Meeresspiegel die Häufigkeit der Überflutungen zu, was – wiederum grundsätzlich – zu einer verstärkten Akkumulation führt. Dieser an sich einfache und positive Prozess-Reaktionsmechanismus wird jedoch durch viele Faktoren wie Dauer der Überflutung, Wassertiefe auf der Hallig und Schwebstofffracht in der Wassersäule beeinflusst. Dies kann zum Beispiel dazu führen, dass eine höher auflaufende und länger andauernde schwere Sturmflut mehr Akkumulationen von Sedimenten auf der Hallig bewirkt als mehrere leichte Sturmfluten, wobei dieser Zusammenhang nicht zwingend ist.

Um ein besseres Verständnis über diese komplexen Wechselbeziehungen zu erhalten ist das MELUR-SH im Jahre 2007 in eine mehrjährige Forschungskooperation mit dem Geowissenschaftlichen Zentrum der Universität Göttingen eingetreten. Im Rah-

men des in zwei Phasen gegliederten Projektes SAHALL (**S**ediment **A**kkumulation **Hall**igen) wurden:

I. das bisherige Höhenwachstum auf mehreren Halligen ermittelt und ursächlich gedeutet, sowie
II. Möglichkeiten zur Förderung des Höhenwachstums untersucht.

Die Ergebnisse von SAHALL I lagen Anfang 2009 vor, die Ergebnisse von SAHALL II Ende 2012. In den Sitzungen der AG Halligen 2050 haben die Wissenschaftler der Universität Göttingen regelmäßig über Zwischenergebnisse und Projektfortschritt berichtet. Die nachfolgenden Ausführungen beruhen maßgeblich auf den im Rahmen von SAHALL gewonnenen Erkenntnissen.

Zur Ermittlung des langfristigen Höhenwachstums wurden auf vier Halligen mehrere Rammkernbohrungen (zwei pro Hallig) niedergebracht, an denen anschließend Altersbestimmungen (137Cs Datierungen) durchgeführt wurden. Die Ergebnisse sind in Tab. 2 dargestellt.

Hooge	Langeneß	Nordstrandischmoor	Süderoog
2,6	1,8	3,8	3,2

Tab. 2: Durchschnittliches Höhenwachstum (in mm/a) auf den Halligen Hooge, Langeneß, Nordstrandischmoor und Süderoog über den Zeitraum 1963 bis 2007.

Daraus lässt sich die Erkenntnis ableiten, dass das Höhenwachstum auf den Halligen bzw. im Bereich der Bohrungen nicht ausreicht, um den MThw-Anstieg in Höhe von 0,46 mm/a (Abb. 6) auszugleichen. Es deutet sich an, dass der Zustand einer zu geringen Sedimentakkumulation auf den großen Halligen schon länger andauert. Weite Teile von Hooge und Langeneß sind mittlerweile so niedrig gelegen, dass diese beiden Halligen ohne Uferschutzbauwerke bereits bei einem mittleren Tidehochwasser vernässen würden. Bei einem normalen Springtidehochwasser von etwa 0,3 m über MThw würden diese Halligen größtenteils unter Wasser stehen (Abb. 12).

Zur Ermittlung der aktuellen Akkumulation auf den Halligen wurden an vielen Stellen Sedimentfallen (Matten und Flaschen) sowie Sedimentation-Erosion-Messtafeln (SEB) aufgestellt. Die Höhenentwicklung auf den Halligen konnte somit über bisher fünf Winterperioden in hoher räumlicher und zeitlicher Dichte, teilweise in direktem Bezug zu den jeweiligen Land-Unter-Phasen, erfasst und ausgewertet werden. Die Messungen bestätigen die oben angedeuteten komplexen Abhängigkeiten des Höhenwachstums von internen und externen Faktoren. Im Ergebnis zeigt sich eine sehr hohe räumliche und zeitliche Variabilität der aktuellen Höhenentwicklung (Tab. 3). Entsprechend schwierig ist eine direkte Verknüpfung der jeweilig gemessenen Höhenentwicklung zu einzelnen Faktoren wie „Abstand von der Halligkante“. Dies führt zu der Feststellung der an SAHALL beteiligten Wissenschaftler, wonach weitere Messungen and Analysen erforderlich sind.

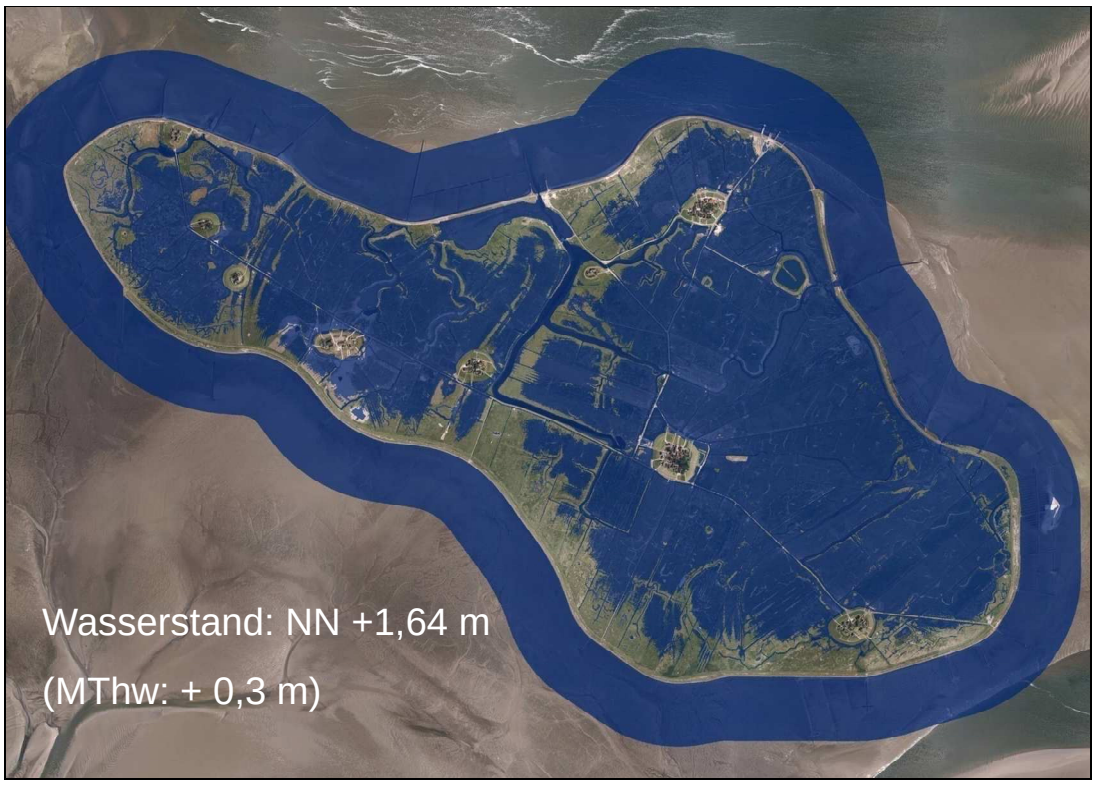


Abb. 12: Während Springtidehochwasser überflutete Fläche auf Hooge (ohne Berücksichtigung des Regionaldeiches).

	Hooge		Langeneß		Nordmarsch		Nordstrandischmoor		Süderoog	
	F**	M***	F	M	F	M	F	M	F	M
2007/08	3,3	1,9	3,2	2,4	3,9	2,7	12	5	11,7	8,2
2008/09	0	0	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	1,1	0,2	1	0,5
2009/10	0,5	0,3	1,8	1,4	1,4	0,5	1,5	-	0,7	-
2010/11	0,9	0,9	1	0,7	1,3	1,1	3,2	-	1,8	-
2011/12	2,5	2,5	2,4	2	2,6	3,2	9	2,1	7,7	2,2
Summe	7,2	5,6	8,4	6,5	9,2	7,5	26,8		22,9	

* vom 01.10 bis 31.03 des nächsten Jahres; ** F = Flasche; *** M = Matte

Tab. 3: Höhenwachstum (in mm) auf den Halligen Hooge, Langeness, Nordmarsch, Nordstrandischmoor und Süderoog ermittelt aus Sedimentfallen.

Im Einzelnen ist festzuhalten, dass auf den kleinflächigen Halligen Süderoog und Nordstrandischmoor in den sturmreichen Winterhalbjahren 2007/08 und 2011/12 deutlich mehr Sediment akkumuliert wurde als auf den größeren Halligen Hooge und Langeneß. In den sturmflutarmen Winterhalbjahren 2009/10 und 2010/2011 ist der Unterschied zwischen den groß- und kleinflächigen Halligen weniger stark ausgeprägt. Im Winterhalbjahr 2008/09 wurde Hallig Hooge gar nicht überflutet.

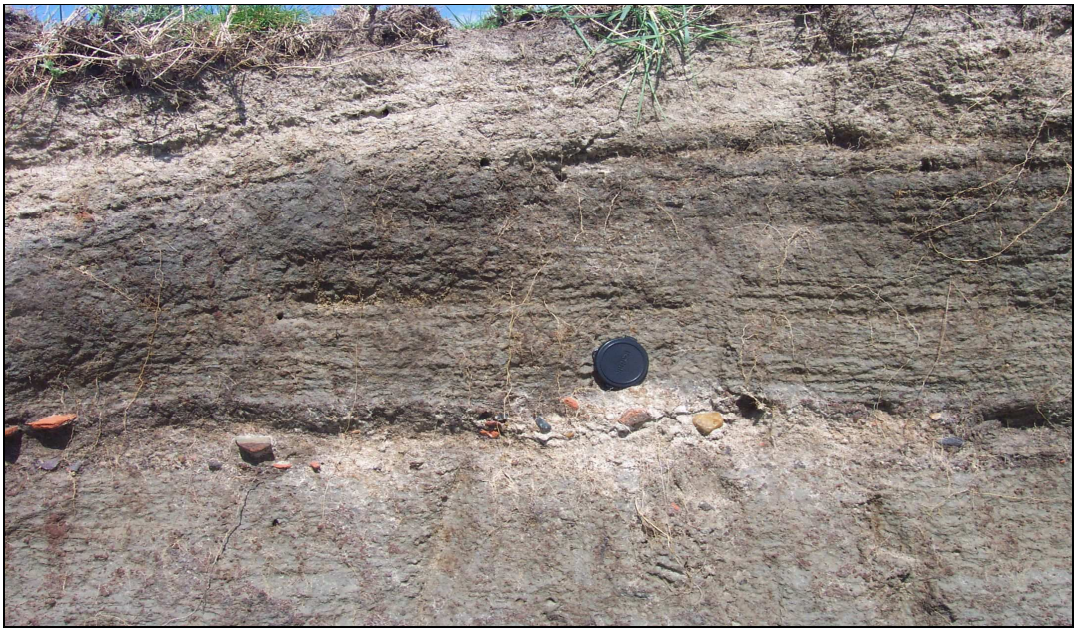


Foto 2: Akkumulationsschichtung auf einer Hallig (Foto: Hofstede, 17.07.2007).

Trotz voneinander abweichender Ergebnisse zeichnet sich bei den verwendeten Methoden (Sedimentfallen und SEB) ab, dass das aktuelle Höhenwachstum auf den großflächigen Halligen Hooge und Langeneß deutlich langsamer voranschreitet als der MThw-Anstieg (Abb. 6) im nordfriesischen Wattenmeer. Die bisherigen Beobachtungen reichen zwar nur bis ins Jahr 2007 zurück, doch traten in diesem Zeitraum zwei Winterhalbjahre (2007/08 und 2011/12) mit einer überdurchschnittlich hohen Anzahl von Überflutungen auf. Selbst in diesen Winterhalbjahren reichte die akkumulierte Sedimentmenge nicht aus, um den MThw-Anstieg zu kompensieren. Dabei ist festzuhalten, dass in diesen Winterhalbjahren keine schweren oder sehr schweren Sturmfluten auftraten. Da davon auszugehen ist, dass solche Sturmfluten durch stärkere Turbulenzen im Wattenmeer eine höhere Schwebstofffracht in der Wassersäule aufweisen als leichte Sturmfluten, könnten die seltenen, aber deutlich höheren Sturmfluten plötzliche Wachstumsschübe hervorbringen (Foto 2).

Insgesamt erbrachten die in SAHALL I eingesetzten Methoden zur Messung des Höhenwachstums auf den Halligen plausible Ergebnisse. Die "Land unter" Sedimentation auf den Halligen wurde erstmals großflächig quantitativ nachgewiesen und mit ursächlichen Faktoren in Verbindung gebracht. Da die ermittelten aktuellen Sedimentationsraten zumeist nicht ausreichen, um den bisherigen MThw-Anstieg auszugleichen, wurden in SAHALL II seit 2010 auf den Halligen Hooge und Langeneß innovative Maßnahmen zur Erhöhung der natürlichen, überflutungsbedingten Sedimentakkumulation erprobt. Die Akkumulation sollte dabei mit naturnahen Maßnahmen gefördert werden, damit Beeinträchtigungen für Natur, Umwelt und Grünlandnutzung möglichst gering bleiben.

Auf den Halligen Hooge und Langeneß (Nordmarsch) wurden im Jahre 2010 in drei Versuchsfeldern (A, B und C) verschiedene Maßnahmen zwecks Erhöhung der Sedimentakkumulation getestet (Abb. 13).

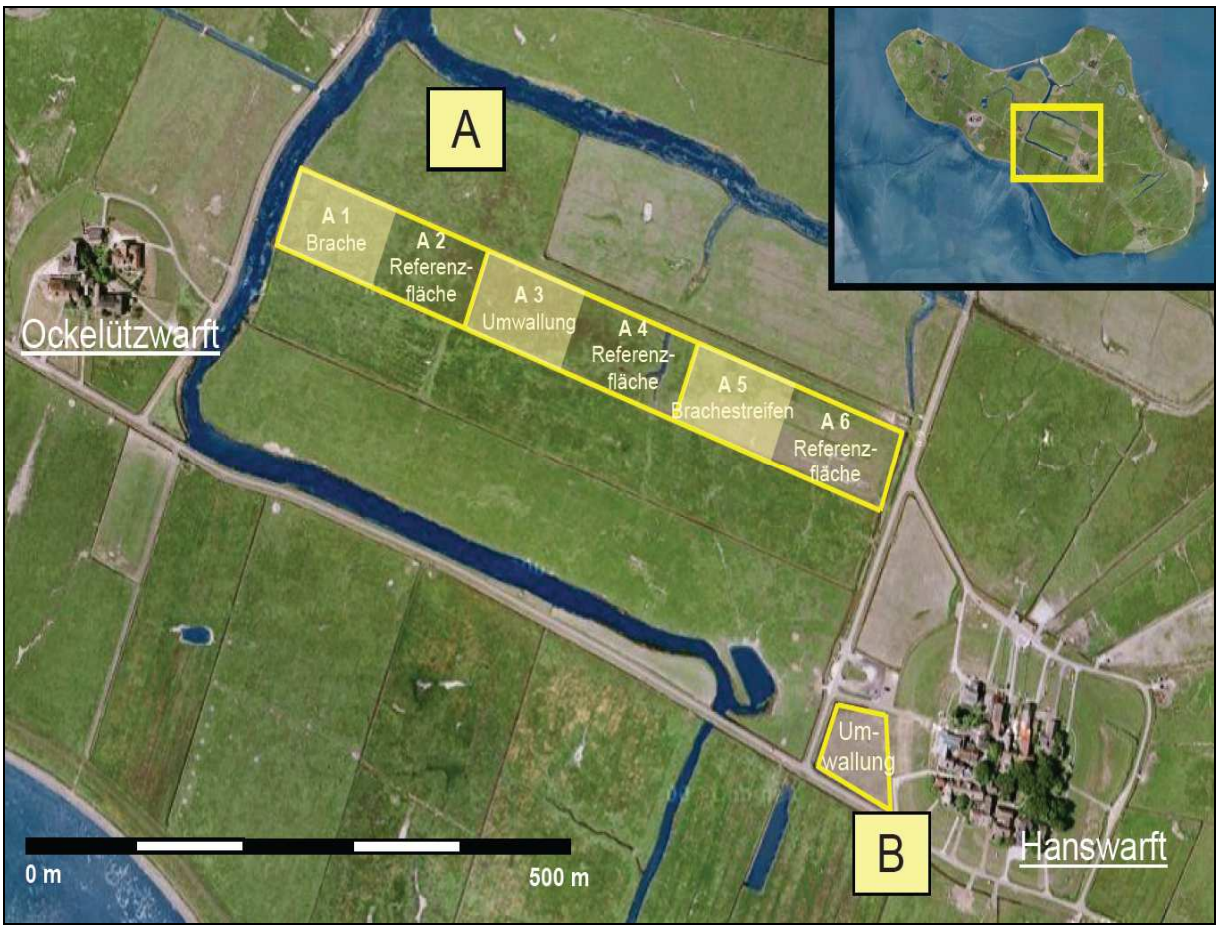


Abb. 13: Lage der Versuchsfelder A und B auf Hooge (Angabe der Maßnahmen in Gelb).

Um die Wirksamkeit einzelner Maßnahmen quantifizieren zu können, grenzten an die Maßnahmenflächen stets gleichartige Referenzflächen, in denen parallel die Sedimentakkumulation bestimmt wurde. Folgende Maßnahmen wurden untersucht:

1. Der westlichste Teil des Versuchsfeldes A (Abb. 13) wurde vollständig aus der Nutzung herausgenommen. In der neugeschaffenen Bracheﬂäche soll durch die höher aufwachsende Vegetation die Strömung in Bodennähe während einer Überflutung gebremst und auf diese Weise eine höhere Sedimentakkumulation bewirkt werden.
2. Im östlichen Teil des Versuchsfeldes A auf Hooge wurde ein ca. 2-3 m breiter Streifen zwischen der Weide und den angrenzenden Gräben nicht beweidet. Die Grundidee dabei ist, dass die am Rand einer Weide hoch aufwachsende Vegetation das nach einem Landunter zum Graben ablaufende Restwasser bremst. Somit entsteht mehr Zeit für die Ablagerung von Sedimenten und folglich eine erhöhte Akkumulation.

3. Im mittleren Teil des Versuchsfeldes A sowie im Versuchsfeld B auf Hooge wurden niedrige Umwallungen mit ober- resp. unterirdischer Entwässerung angelegt. Durch eine verzögerte Entwässerung nach Sturmfluten wird mit dieser Maßnahme mehr Zeit für die Ablagerung von Sedimenten und damit eine erhöhte Akkumulation bezweckt.
4. Im Prielsystem der Versuchsfläche C auf Nordmarsch wurden vier Steinbarrieren errichtet. Mit dieser Maßnahme soll erreicht werden, dass das von der Fläche in Richtung des Priels abströmende Restwasser durch die Steinbarrieren gebremst werden. Dies soll zu vermehrter Ablagerung von Sedimenten und Akkumulation führen.

Im Rahmen von SAHALL II konnte nur über zwei Winterhalbjahre gemessen werden. Darüber hinaus führten mehrere ungünstige Rahmenbedingungen wie die ungewöhnlich trockene Witterung im Sommer 2010 zu Verzögerungen und Problemen bei der Auswertung. Deshalb können die gewonnenen Erkenntnisse nur als vorläufig gewertet werden. Sämtliche Maßnahmen zur Förderung der Sedimentakkumulation konnten in Hinblick auf ihre Wirksamkeit nach knapp zwei Jahren noch nicht abschließend beurteilt werden. Insofern wäre eine Diskussion über das Verhältnis von Aufwand und Nutzen einer Maßnahme verfrüht.

Folgende vorläufige Erkenntnisse wurden gewonnen:

- Wie bereits im Vorprojekt SAHALL I konnte bisher keine Verstärkung der Akkumulation durch eine höher aufwachsende Vegetationsdecke nachgewiesen werden.
- Die Maßnahme „Umwallung“ zeigte im Winterhalbjahr 2011/12 einen positiven Sedimentationseffekt bei Überflutungen mit Wasserständen von mehr als 25 cm über der Walloberkante. Bei Überflutungen mit niedrigen Wasserständen wirkt sich eine Umwallung für die Akkumulation negativ aus. Eine optimale Höhe für eine Umwallung wäre zu ermitteln. Auch gibt es noch Innovationsbedarf bei der Be- und Entwässerung einer umwallten Fläche. Hinzu kommt, dass dies auch hinsichtlich des Aufwandes und des Landschaftsbildes geprüft werden müsste.
- Wenn man eine umwallte Fläche als ein Modell für eine Hallig betrachtet, dann erscheint es grundsätzlich sinnvoll, die Halligufer mit einem Wall zu versehen. Jedoch muss die optimale Höhe dieses Bauwerkes ermittelt werden. Ist ein Wall zu hoch, gelangt zu wenig Sediment auf die Hallig. Ist er zu niedrig, dann erfolgen Überflutungen auch bei niedrigen Außenwasserständen, die erfahrungsgemäß kaum Sediment auf der Hallig ablagern. In diesem Zusammenhang könnte aber auch die Frage von Öffnungen untersucht werden.
- Im Versuchsfeld C auf Nordmarsch deutet sich auf den Flächen, die von einem Priel mit künstlichen Steinbarrieren entwässert werden, eine Verstärkung der Sedimentakkumulation an. Der Sedimentationseffekt konnte aber noch nicht quantifiziert werden, da bei Überflutungen der Wasserzutritt (und damit auch die Sedimentation) im Versuchsfeld C sehr stark von einem in unterschiedlicher Höhenlage verlaufenden Deckwerk an der vorgelagerten Halligkante geprägt wird.

- Obwohl bisher nicht bei allen untersuchten Maßnahmen eine Förderung der Akkumulation abschließend nachgewiesen werden konnte, ist es grundsätzlich als sinnvoll zu erachten, das von einer Hallig ablaufende Restwasser ausreichend zu verlangsamen, so dass es zu keiner Remobilisierung von bereits abgelagertem Material kommt. Die Hauptwassermenge sollte auch weiterhin schnell von einer Hallig strömen können, die restlichen 30 bis 50 cm sollten deutlich langsamer abfließen.

Resümierend lässt sich nach Projektende für die Fragestellungen 1 bis 4 (Kap. 1) der AG Halligen 2050 folgendes festhalten. Im Projekt SAHALL konnte das durch Überflutungen verursachte kurz- bis mittelfristige Höhenwachstum auf den Halligen in seiner räumlichen und zeitlichen Variation quantitativ ermittelt werden. Demnach verläuft das Höhenwachstum auf den Halligen spätestens seit 1963 (Tab. 2) langsamer als der MThw-Anstieg in der Region. Die Messdaten zeigen weiterhin auf, dass das Höhenwachstum auf den größeren, von Regionaldeichen umgebenen Halligen Hooge und Langeneß insgesamt langsamer verläuft als auf den kleineren, nicht bedeichten Halligen Süderoog und Nordstrandischmoor. In der Folge würden wesentliche Teile von Hooge ohne Deiche bereits heute bei leicht erhöhten Tidewasserständen überflutet werden. Die Daten deuten zwar generell auf einen Zusammenhang zwischen Zahl der Überflutungen und Akkumulation von Sediment hin; offensichtlich wird die Sedimentation jedoch von vielen weiteren Parametern beeinflusst. Im Rahmen des fünfjährigen SAHALL-Projektes konnten diese Faktoren, zum Beispiel durch das Fehlen von schweren und sehr schweren Sturmfluten, nur begrenzt analysiert werden. Trotzdem darf generell davon ausgegangen werden, dass eine zunehmende Überflutungshäufigkeit infolge eines beschleunigten Meeresspiegelanstieges zu stärkeren Akkumulationen auf den Halligen führt. Die vorläufigen Erkenntnisse aus den Feldversuchen in SAHALL II deuten darauf hin, dass die Akkumulation durch Verzögerung des ablaufenden Wassers generell gefördert werden kann. Auch hier sind jedoch viele weitere Faktoren zu berücksichtigen. Des Weiteren ist die Akzeptanz in der Bevölkerung zu berücksichtigen. Die untersuchten Maßnahmen konnten daher nicht abschließend im Sinne einer Kosten-Nutzen-Analyse beurteilt werden; generell erscheint die Machbarkeit derzeit jedoch gering. Im Rahmen des KFKI-Projektes ZukunftHallig wurden auch Maßnahmen untersucht, womit zumindest bei Kantenfluten mehr schwebstoffbeladenes Wasser auf die Hallig gelangen kann. Eine abschließende Beurteilung steht noch aus.

6. HOCHWASSERSCHUTZ

Auf den Halligen wohnen etwa 280 Menschen auf 32 Warften. Zum Schutz vor Sturmfluten sind sie auf die Warften angewiesen. Nach der Sturmflutkatastrophe des Jahres 1962 wurde bis 2007 ein umfangreiches Warftverstärkungsprogramm durchgeführt (Kap. 1, Abb. 2). Infolge des Bauprogrammes mit kleinen Ringdeichen stehen die Warfthäuser nunmehr in einer Senke. Es stellt sich die Frage, ob es künftig bei weiter steigenden Sturmflutwasserständen möglich und auch sinnvoll ist, die Warften nach der obigen Methode weiter zu verstärken.

Um diese Frage zu beantworten sollen Angaben zum heutigen Sicherheitsstandard erarbeitet sowie Strategien und Techniken aufgezeigt werden, die einen angemessenen Schutz für die Halligbewohner bei steigenden Sturmflutwasserständen gewährleisten können. Hierzu wurde unter anderem ein gemeinsamer Ideenwettbewerb ausgelobt. Im Rahmen des interdisziplinären Wettbewerbs für Bauingenieure und Architekten wurden sowohl innovative Lösungen für die eigentlichen Warftverstärkungen als auch nachhaltige Optionen zur Erhöhung der Hochwassersicherheit von (alten und neuen) Warfthäusern erbeten. Die Ergebnisse werden nachfolgend in Kap. 6.2 dargestellt. Weiterhin lief bis Anfang 2014 ein vom BMBF finanziertes Forschungsprojekt „ZukunftHallig“. Ziel dieses Projektes war es, weitere Impulse für nachhaltige Küstenschutz- und Bewirtschaftungsstrategien zu entwickeln, die insbesondere auf den Erhalt und die Bedeutung der Halligen im nordfriesischen Wattenmeer eingehen. Erste Ergebnisse und Auswertungen im Rahmen dieses Projektes sind in diesem Bericht enthalten.

6.1 Sicherheitsstandard der Halligwarften

Die Belastungen der Halligwarften während Sturmfluten ergeben sich aus dem jeweiligen Sturmflutwasserstand zuzüglich eines Sturmseeganges. Derzeit können wegen fehlender Naturmessungen keine Aussagen zum Sturmseegang auf den Halligen gemacht werden. Um dieses Defizit zu beheben, sollen im Rahmen des vom LKN entwickelten gewässerkundlichen Messprogramms entsprechende Messungen an mehreren Stellen erfolgen (Abb. 4).

Der Bemessung der Warftverstärkungen im letzten Bauprogramm wurde ein maßgebender Sturmflutwasserstand zugrunde gelegt (Abb.2). Wenn die Verstärkung mit einer relativ steilen Außenböschung erfolgen musste, wurde ein Sicherheitszuschlag von 0,5 m hinzugerechnet. Der maßgebende Sturmflutwasserstand orientierte sich dabei an dem für Landesschutzdeiche, d.h. dem bei einer Jahrhundertflut zu erwartenden Wasserstand. Im Generalplan Küstenschutz des Jahres 1977 werden für Föhr-Ost und Pellworm-Ost erstmalig maßgebende Sturmflutwasserstände von NN +4,90 resp. NN +5,30 m angegeben.

Im Rahmen der vierten Fortschreibung des Generalplanes Küstenschutz (MELUR 2012) wurden regionale statistische Analysen zur Wahrscheinlichkeit von Sturmflut-

wasserständen durchgeführt. Ergebnisse für die Halligen sind in Tab. 4 und Abb. 14 dargestellt.

Hallig	Wiederkehrintervall (Jahre)			
	20	**50**	**100**	**200**
Hooge	4,30	4,60	4,75	4,90
Nordmarsch	4,40	4,65	4,85	5,10
Langeneß	4,55	4,85	5,05	5,20
Oland	4,65	4,95	5,15	5,30
Gröde	4,70	5,00	5,20	5,40
Nordstrandischmoor	4,85	5,20	5,40	5,60

Tab. 4: Sturmflutwasserstände (NHN + m) auf den permanent bewohnten Halligen für unterschiedliche Wiederkehrintervälle.

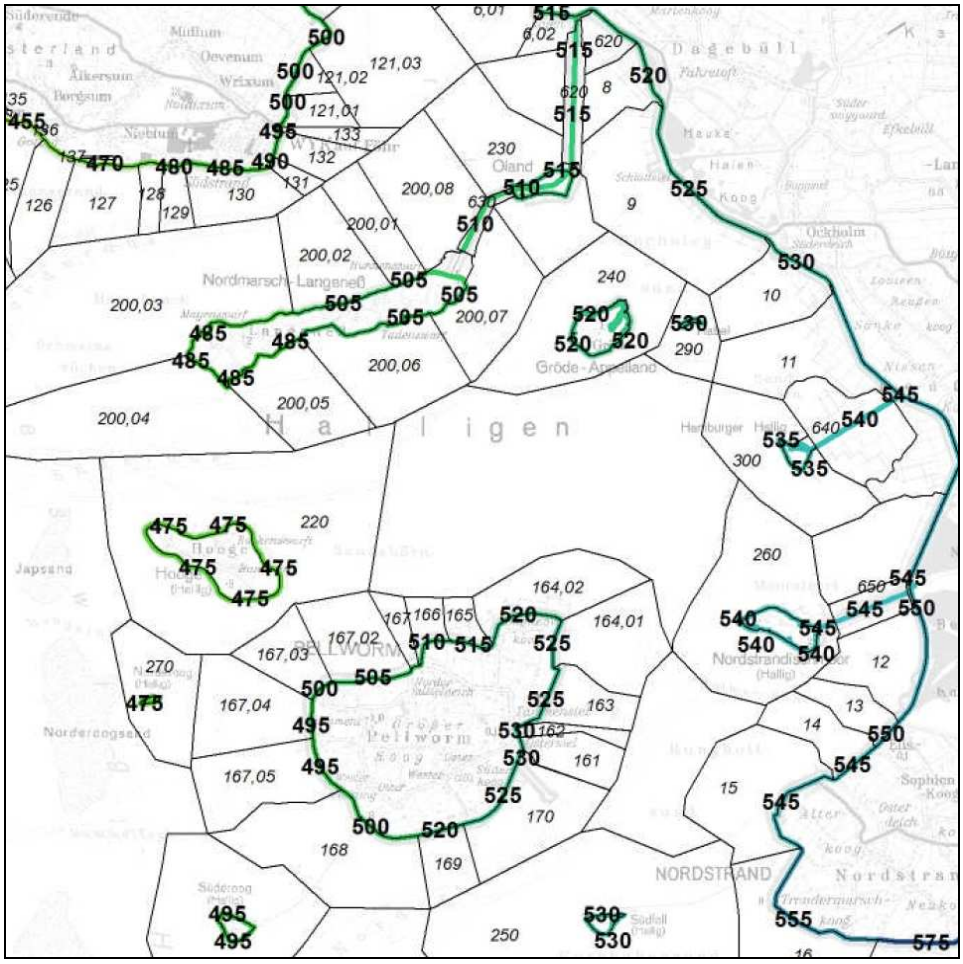


Abb. 14: Sturmflutwasserstände mit einem Wiederkehrintervall von 100 Jahren (jährliche Wahrscheinlichkeit = 0,01) im Bereich der Halligen.

Nach diesen Auswertungen haben die bisher beobachteten Höchstwasserstände an den Pegeln Wyk auf Föhr (1981, NHN + 4,52 m) und Pellworm-Hafen (1976, NHN + 4,74 m) ein Wiederkehrintervall von „nur“ etwa 20 Jahren. Dabei entspricht ein 20-jähriger Wasserstand in etwa MThw +3,0 m, ein 100-jähriger Wasserstand in etwa MThw +3,5 m. Auffällig ist, dass die dem Generalplan Küstenschutz des Jahres 1977 zugrunde gelegten maßgebenden Sturmflutwasserstände kaum abweichen von den in Abb. 14 dargestellten. Dies liegt auch daran, dass sich das Sturmflutgeschehen seit Anfang der 1990er Jahre insgesamt beruhigt hat (Abb. 6).

6.2 Ideenwettbewerb Hallig 2050

Als wichtiger Baustein zur Erfüllung des Arbeitsauftrages der AG Halligen 2050 haben das MELUR-SH, das Amt Pellworm mit den Halligen, die AIK-SH und der Kreis Nordfriesland zu Anfang 2012 einen Ideenwettbewerb ausgelobt. Der Wettbewerb sollte nachhaltige Strategien und Techniken aufzeigen, die einen angemessenen Schutz für die Halligbewohner bei geänderten Klimabedingungen gewährleisten können. Dabei wurden innovative Lösungen für die Gewährleistung der Warftgebäude im Einklang mit nachhaltigen Optionen für weitere Warftverstärkungen erwartet. Der Wettbewerb wurde als interdisziplinärer Ideenwettbewerb ausschließlich für Projektgemeinschaften von Ingenieuren und Architekten ausgeschrieben. Insgesamt fünf Teams aus Ingenieuren und Architekten haben nach einer Vorauswahl am Wettbewerb teilgenommen. Am 01.06.12 tagte ein 10-köpfiges Preisgericht aus Fach- und Sachpreisrichtern im Nissenhaus Husum und bestimmte nach einer intensiven und teilweise kontrovers geführten Diskussion drei Preisgewinner.

Der erste Preis ging an die Projektgemeinschaft: „IMS Ingenieurgesellschaft mbH (Hamburg), bof Architekten (Hamburg) und Landschaftsarchitekten osp Urbanelandschaften (Hamburg)“. Der zweite Preis erhielt die Gemeinschaft: „Ingenieurbüro Mohn (Husum), Johannsen und Fuchs Architekten (Husum) und Landschaftsarchitekten Kessler Kraemer (Flensburg)“. Einen Sonderpreis bekam die Gemeinschaft „Ingenieursbüro Ivers GmbH (Husum) und Dethlefsen und Lundelius (Bredstedt). Im Protokoll hielt das Preisgericht zu den erfolgreichen Beiträgen Folgendes fest.

Erster Preis: „Die sichelförmige Aufhöhung des Halligkörpers im Westen (Abb. 15) bietet Schutz und schafft zudem Platz für Neubauten. Vorhandene Gebäude auf der Ostseite können somit solange wie möglich in Benutzung bleiben. Die erforderlichen Eingriffe in die Halliglandschaft sind stufenweise möglich und auf das Notwendigste reduziert. Die Siedlungsgenese der Halligen wird aufgenommen und weitergeführt. Neubauten werden im halligtypischen Formenkanon entwickelt und mit ingenieurmäßig überzeugender Technik der Gebäudetische zukunftsfähig gehalten. Kritisch beurteilt wird die schematische, rundlingsartige Anordnung der neuen Gebäude.“

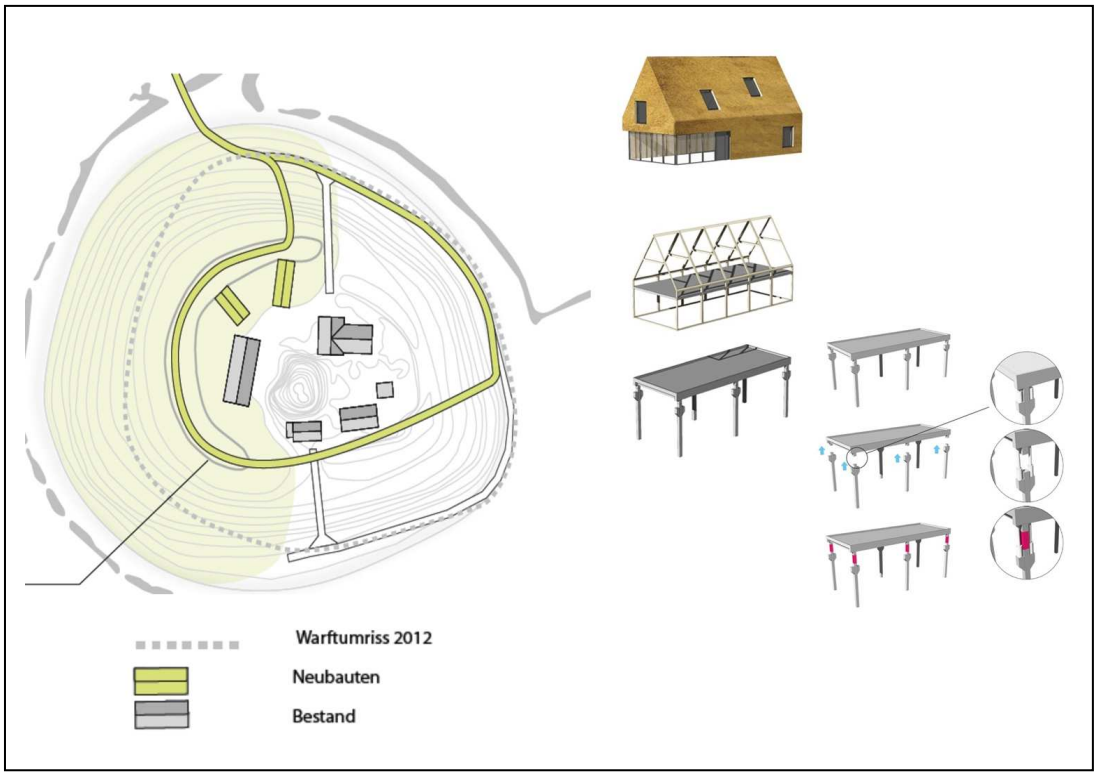


Abb. 15: Links: sichelförmige Erweiterung und Erhöhung der Westseite der Warft mit ersten Neubauten.
Rechts: neue Gebäude stehen auf höhenverstellbaren Gebäudetischen.

Zweiter Preis: „Überzeugend dargestellt ist die Analyse der Siedlungsformen und Typologien der Halligbebauungen auf Warften. Hieraus entwickelt sind verschiedene Konzepte, die in zwei Varianten exemplarisch an der Tadenswarft und der Hanswarft dargestellt sind (Abb. 16). Das Konzept mit der traditionell aufgehöhten Hanswarft und der Neubebauung im halligtypischen Formenkanon mit zusätzlichen Dammbalken als temporärerem Hochwasserschutz überzeugt ebenso wie das zweite Konzept. Am Beispiel der Tadenswarft wird mit einer inneren Warfterhöhung, einer Kombination aus traditionellen Hausformen und teilaufgeständerten modernen Neubauten, eine interessante Idee entwickelt.“

Abb. 16: Innere Warfterhöhung mit einer Kombination aus traditionellen Hausformen und teilaufgeständerten modernen Neubauten.

Sonderpreis: „Der Entwurf schafft mit dem Vorschlag einer aufgeständerten Hochbaulösung (Abb. 17) einen Hochwasserschutz mit minimalem Eingriff in Halligkörper und Naturraum. Es stellt damit eine eigenständige, mutige Lösung dar, was vom Preisgericht gewürdigt wird. Kritisch sieht das Preisgericht die formale, uniforme Ausbildung der Baukörper, die in ihrer städtischen Anmutung wie Fremdkörper wirken und die traditionelle Hallig-Silhouette vermissen lassen. Die sternförmige Clusterform führt zu Zwängen und Beeinträchtigungen in ihrer Nutzbarkeit.“

Abb. 17: Gemeinschaftliche aufgeständerte Wohnform mit 3 bis 5 Riegeln, die sich in Rasterkonfiguration um einen zentralen Schutzraum anordnen.

Insgesamt ist festzuhalten, dass die fünf eingereichten Wettbewerbsbeiträge in ihrer Gesamtheit eine wertvolle Sammlung altbewährter und innovativer Methoden zum langfristigen Schutz der Halligbewohner vor Sturmfluten darstellen. Fast alle Beiträge sehen eine weitere Ertüchtigung der Warftkörper, sowohl nach außen als auch nach innen, in mehreren Schritten vor. Darüber hinaus werden Vorschläge zur Sicherung der Gebäude vor Sturmfluten gemacht, allerdings zumeist im Rahmen eines Neubaus. Abgesicherte Ergebnisse zu dieser Thematik liegen aus dem Forschungsprojekt ZukunftHallig derzeit nicht vor. Hiermit ist erst zum Ende des Projektes zu rechnen.

7. HANDLUNGSOPTIONEN UND -ERFORDERNISSE

Die Ausführungen in Kapitel 3 zum projizierten Meeresspiegelanstieg zeigen auf, dass mittel- bis langfristig im Bereich der Halligen mit höheren Anstiegsraten des Meeresspiegels und folglich mit erhöhten Sturmwasserständen gerechnet werden muss. Die hydrologischen Belastungen der Halligen und Halligwarften werden signifikant steigen. Für einen vorsorgenden und nachhaltigen Küstenschutz ergeben sich hieraus mehrere Handlungserfordernisse, von der frühzeitigen Detektion eventueller hydro-morphologischer Änderungen bis hin zu möglichen konkreten Anpassungsmaßnahmen. Die Sturmflut Xaver vom 06. Dezember 2013 mit Wasserständen auf den Halligen von 4,0 bis 4,5 m über NHN hat das Erfordernis von Anpassungsmaßnahmen klar aufgezeigt. Obwohl Xaver im langjährigen Vergleich „nur“ etwa auf Platz 10 rangiert, stand das Wasser auf einigen Warften bereits vor der Haustür. Insbesondere Neubürger haben die Vorgänge als bedrohlich empfunden. Defizite wurden beim Objektschutz (Verschottung der Gebäude) festgestellt. Im Nachfolgenden werden Handlungsoptionen in Form von Empfehlungen formuliert.

Empfehlung 1: Änderungen frühzeitig erfassen. Durch ein optimiertes hydro- und morphologisches Überwachungsprogramm soll gewährleistet werden, dass klimabedingte negative Entwicklungen früh erkannt werden, um entsprechende Gegen- und Anpassungsmaßnahmen rechtzeitig planen zu können.

Im Rahmen der Arbeiten der AG Halligen 2050 hat der LKN-SH bereits ein optimiertes hydrologisches Mess- und Beobachtungsprogramm im Bereich der Halligen installiert (Kap. 4). Angaben zum Seegang in der Region werden mithilfe von autarken mobilen Seegangmessstationen ermittelt (siehe Empfehlung 4: Bemessungsansatz). Darüber hinaus zeigen mehrere (neue und alte) Pegelstationen vor und auf den Halligen in höher räumlicher und zeitlicher Auflösung Wasserstände auf. Die hydrologischen Daten dienen zum einen als Bemessungsgrundlage für die Schutz- und Sicherungsbauwerke, zum anderen können somit Trendänderungen im Meeresspiegelanstieg und der Sturmflutintensität erkannt werden. Das hydrologische Messprogramm ist um ein entsprechendes morphologisches Programm zu erweitern, wobei auf die Erfahrungen aus dem Projekt SAHALL zurückgegriffen werden kann.

Empfehlung 2: Halligwachstum gewährleisten. Maßnahmen zur Sicherung der Halligkanten vor Abbruch sowie zur Gewährleistung von Nutzungen auf den Hallig-Oberflächen sollten so bemessen werden, dass eine regelmäßige Überflutung der Halligen mit schwebstoffbeladenem Meerwasser während Sturmfluten nicht unterbunden wird.

Auswertungen der vorhandenen Meeresspiegeldaten haben ergeben, dass das MThw in der Region seit Mitte des letzten Jahrhunderts mit ca. 4,6 mm pro Jahr (Abb. 6) deutlich stärker ansteigt als der globale mittlere Meeresspiegel (ca. 2 mm/J).

Die Ergebnisse des SAHALL-Projektes (Kap. 5) zeigen auf, dass große Teile der Hallig-Oberflächen dem MThw-Anstieg nachweislich seit 1963 nicht mehr folgen können. Insbesondere auf den größeren Halligen Hooge und Langeneß hinkt die Sedimentation dem MThw-Anstieg deutlich hinterher. Als Konsequenz wäre die Hallig Hooge ohne Regionaldeiche heute bereits bei mittlerem Springtidehochwasser zum größten Teil überflutet (Abb. 12). Dies unterstreicht die Bedeutung von ausreichend häufigen „Land-unter-Phasen“ für den langfristigen Erhalt der Halligen in ihrer charakteristischen Erscheinungsform. Aus diesen Gründen und in Anbetracht der aktuellen Deichbesticke sind keine Verstärkungsmaßnahmen an Regionaldeichen auf den Halligen vorzusehen. Dort, wo Regionaldeiche ebenfalls der Sicherung der Halligkanten gegen Abbruch dienen, sollen – falls erforderlich – lediglich Maßnahmen zur Gewährleistung dieser Funktion durchgeführt werden. Eine Höhenanpassung der Deckwerke soll nur zur Gewährleistung der Küstensicherungsfunktion erfolgen.

Empfehlung 3: Objektschutz an Warftgebäuden erfassen und optimieren. Wegen der besonderen Bedeutung von Objektschutz im exponierten Halligbereich sollte der bestehende Objektschutz erfasst und geprüft sowie Vorschläge zur Optimierung erarbeitet werden.

Die Sturmflut Xaver hat die Bedeutung von Objektschutz an den Warftgebäuden erneut aufgezeigt. Auf den besonders exponierten Halligen muss damit gerechnet werden, dass die Gebäude während besonders hohen Sturmfluten durch Wellenüberlauf belastet werden. Um Schäden an und Überflutung von Gebäuden zu minimieren, werden bereits heute im Sturmflutfall mobile Verschottungen vor Türen und Fenstern eingesetzt. Der vorhandene Objektschutz soll nunmehr in einer Bestandsaufnahme erfasst und hinsichtlich ihres Zustandes und ihrer Funktionalität überprüft werden. Des Weiteren sollen Vorschläge zur Optimierung des Objektschutzes einschließlich ergänzende und alternative Möglichkeiten erarbeitet werden.

Empfehlung 4: Bemessungsansatz für Halligwarften optimieren. Da die Warften während Sturmfluten durch das Zusammenspiel von Wasserstand und Sturmseegang belastet werden, sollte die Bemessung künftiger Verstärkungsmaßnahmen beiden Parametern Rechnung tragen.

Hydrologische Grundlage für die Bemessung der seit Mitte der sechziger Jahre durchgeführten Warftverstärkungen war gemäß Förderrichtlinie ein Bemessungswasserstand, der sich an dem für Landesschutzdeiche orientierte (Abb. 2). Bei flacherer Ausgestaltung der Außenböschung wurde das HW_{100} zugrunde gelegt, bei steileren Böschungen das HW_{100} + 0,5 m. Wesentlicher Grund war das weitgehende Fehlen von belastbaren Angaben zum Sturmseegang im Bereich der Halligen. Dem wird nunmehr im Rahmen des optimierten Messprogrammes (Kap. 4) begegnet. Weiterhin haben sich inzwischen die Möglichkeiten der numerischen Modellierung von Sturmseegang im Wattenmeer erheblich verbessert. Überlegungen für einen kombinierten Bemessungsansatz werden im Rahmen des Projektes ZukunftHallig ange-

stellt. Obwohl die Warften nicht den Schutzstandard eines Landesschutzdeiches aufweisen müssen oder können[12], ist zu berücksichtigen, dass die bisher höchsten Sturmfluten der Jahre 1976 und 1981 in der heutigen Zeit im Bereich der Halligen ein statistisches Wiederkehrintervall von etwa 20 Jahren haben (Tab. 4). Auch bei niedrigeren Ereignissen, wie beispielsweise in 1991, stand bereits Wasser in einzelnen Warfthäusern.

Empfehlung 5: Schutzstandard der Warften ermitteln und bewerten. Mit dem integrierten Verfahren gemäß Empfehlung 4 sollte der heutige Schutzstandard der Warften ermittelt und hinsichtlich der Handlungserfordernisse gemeinsam bewertet werden.

Bedingt durch die fehlenden Daten zum Sturmseegang war es bisher nur möglich zu ermitteln, welche Sturmflutwasserstände die Ringdeiche auf den Warften kehren. Die Ergebnisse sind in der Anlage 1 zusammen mit weiteren küstenschutzrelevanten Parametern aufgelistet. Wie oben bereits beschrieben, wird die Belastung bzw. der vorhandene Schutzstandard jedoch durch das Zusammenspiel von Wasserstand und Sturmseegang bestimmt. Methodische Grundlagen zur integrierten Bestimmung werden im Projekt ZukunftHallig erarbeitet. Auf der Basis detaillierter Ortskenntnisse haben die Halliggemeinden mit Bericht vom 07. Mai 2013 Hochwasserschutz-Handlungsbedarfe für die einzelnen Warften aufgezeigt. Die Ergebnisse sind ebenfalls in der Anlage 1 enthalten. In dem Bericht wird eine Vielzahl von Faktoren genannt, wie beispielsweise die Nähe zur Halligkante oder die Höhenlage der Häuser innerhalb der Ringdeiche. Diese Faktoren haben ebenfalls Einfluss auf mögliche Handlungsbedarfe und bedingen eine lokale Herangehensweise, d.h. die Konsequenzen des ermittelten Schutzstandards sind für jede Warft einzeln abzuleiten.

Empfehlung 6: Notwendige Maßnahmen umsetzen. Falls die Bewertungen gemäß Empfehlung 5 einen vordringlichen Handlungsbedarf hinsichtlich Warftverstärkungen ergeben, sollen die Voraussetzungen für eine zügige Planung und Umsetzung gemeinsam geschaffen werden.

Im Bericht der Halliggemeinden vom 07. Mai 2013 wird für acht Warften erheblicher Handlungsbedarf aufgezeigt (Anl. 1). Diese Beurteilungen sollen durch quantitativ belastbare Berechnungen, d.h., eine integrierte Berechnung des heutigen Schutzstandards (Empfehlung 4), überprüft bzw. bestätigt werden. Der Ideenwettbewerb hat eine Vielzahl von möglichen Maßnahmen zur Verbesserung des Hochwasserschutzes aufgezeigt (Kap. 6.2). Für die Planung und Umsetzung möglicher Maßnahmen sind jedoch noch eine Reihe von Voraussetzungen zu erfüllen, wie beispielsweise die integrierte Bemessung (Empfehlung 4) sowie Fragen der Finanzierung und ökologischer Verträglichkeit. Um spätere Konflikte zu vermeiden, ist eine transparente Herangehensweise bei der Erfüllung dieser Voraussetzungen und der späteren Um-

[12] Der Bemessungsansatz für Landeschutzdeiche (einschl. Seegang) würde zu erforderlichen Warfthöhen > NHN +7,0 m führen. Derzeit liegen die Ringdeichhöhen zwischen NHN +4,8 und +5,8 m.

setzung unabdingbar. Die Erfahrungen beim Sturm Xaver am 05./06.12.2013 werden in die Festlegung des vordringlichen Handlungsbedarfs einbezogen.

Empfehlung 7: nachhaltige Küstenschutzmaßnahmen forcieren. Um eine sozial, ökologisch und wirtschaftlich ausgewogene Entwicklung auf den Halligen langfristig zu gewährleisten, sollen nachhaltige Küstenschutzmaßnahmen entwickelt und umgesetzt werden.

Küstenschutzmaßnahmen haben vielfältige Auswirkungen, insbesondere auch auf ökologische Strukturen und Funktionen. Neben dem Minimierungsgebot und der Beschränkung auf notwendige Schutzmaßnahmen sollen möglichst naturverträgliche ergänzende und alternative Maßnahmen entwickelt und umgesetzt werden. Gerade im Bereich der Halligwarften greifen Küstenschutzmaßnahmen auch direkt in den privaten Lebensraum ein bzw. beeinflussen das soziale Umfeld in erheblichem Maße. Mögliche Maßnahmen sollen auch diesen Aspekt gebührend berücksichtigen. Der Ideenwettbewerb hat diesbezüglich erste Möglichkeiten aufgezeigt, die im Rahmen des Projektes ZukunftHallig, insbesondere im Teilprojekt Soziologie, weiter aufbereitet werden. Nicht zuletzt sollen die Küstenschutzmaßnahmen eine nachhaltige wirtschaftliche Entwicklung im Sinne einer langfristigen Existenzsicherung der Halligbewohner ermöglichen. Maßnahmen auf den Warften sollen in einer Art und Weise ausgeführt werden, die die touristische Attraktivität der Warften nicht bzw. möglichst wenig beeinträchtigen.

Empfehlung 8: die AG Halligen 2050 fortführen. Da nur ein gemeinsames Herangehen – unabhängig von den Zuständigkeitsfragen – eine transparente und von allen Seiten akzeptierte Umsetzung der oben genannten Empfehlungen gewährleisten kann, soll die AG Halligen 2050 fortgeführt werden.

Gemäß Landeswassergesetz (§ 75) sind die Böschungen der Halligwarften von den Eigentümerinnen oder Eigentümern und den Nutzungsberechtigten wehrfähig zu erhalten. Koordiniert wird diese Aufgabe durch das Amt Pellworm, während der LKN-SH als Fachbehörde (technische Beratung, Prüfung, Genehmigung und Zuwendungen) zuständig ist. Zu berücksichtigen sind darüber hinaus Belange wie die ökologische Verträglichkeit von Maßnahmen und touristische Aspekte. Bei einer solchen Vielfalt von privaten und öffentlichen Interessen und Belangen ist eine intensive Information, Kommunikation und Koordination für eine erfolgreiche Umsetzung unabdingbar. Die seit 2009 aktive Arbeitsgruppe Hallig 2050 umfasst alle relevanten Interessen und Belange und zeichnet sich durch eine konstruktive zielorientierte Arbeitsweise aus. Die Erfolgsaussichten zur Umsetzung der Empfehlungen lassen sich entsprechend durch eine Fortführung der AG Halligen 2050 maßgeblich erhöhen, wobei auch die Erhaltung der Hallig-Natur bearbeitet werden soll.

Anlage

Küstenschutzrelevante Parameter der Halligwarften sowie Einschätzung des Handlungsbedarfes (Stand Mitte 2013).

Hallig	Warft	Einwohner	Schutzräume	Neigung der	Ist-Höhe	HW_{100}	Handlungsbedarf
(Einwohnerzahl)				Außenböschung	NHN + m	NHN + m	Bericht Amt Pellworm 07.05.13
Gröde	Kirchwarf	2	1	1:6	5,16	5,20	erheblicher Handlungsbedarf
(11)	Knutzwarf	9	4	1:6	5,28	5,20	erheblicher Handlungsbedarf
Habel		0		1:6	4,76	5,30	
Hamburger Hallig	Hauptwarf	0	1	1:8	-	5,35	
Hooge	Backenswarft	16	9	1:6	5,43	4,75	betroffen bei höheren Fluten
(92)	Hanswarf	36	13	1:6 / 1:15	4,96	4,75	weniger betroffen bei höheren Fluten
	Ipkenswarf	4	2	1:6	5,24	4,75	weniger betroffen bei höheren Fluten
	Kirchwarf	2	1	1:6	5,42	4,75	
	Lorenzwarf/	4	1	1:6 / 1:15	4,94	4,75	betroffen bei höheren Fluten
	Mitteltritt	2	2	1:6	4,94	4,75	betroffen bei höheren Fluten
	Ockelützwarf	8	5	1:6	5,27	4,75	betroffen bei höheren Fluten
	Ockenswarf	12	7	1:6 / 1:8	5,56	4,75	
	Volkertswarf	2	1	1:6	5,32	4,75	weniger betroffen bei höheren Fluten
	Westerwarf	6	1	1:8	5,39	4,75	besonders exponierte Randlage
Langeneß	Bandixwarf	4	2	1:6 / 1:8	5,54	5,05	
(115)	Christianswarf	4	1	1:6 / 1:15	4,74	5,05	
	Hilligenley	10	3	1:8 und Berme	5,26	4,90	besonders exponierte Randlage
	Honkenswarf	12	2	1:6 / 1:8	5,19	5,05	
	Hunnenswarf	17	5	1:6 / 1:8	5,41	5,05	
	Ketelswarf	16	3	1:6 / 1:8	5,37	5,05	
	Kirchhofwarf	7	2	1:6	4,64	4,90	
	Kirchwarf	6	2	1:6 / 1:8	5,36	5,05	
	Mayenswarf	9	4	1:8	4,89	4,90	erheblicher handlungsbedarf
	Neuwarf	5	1	1:8	5,28	5,05	
	Norderhörn	13	3	1:8	4,86	5,00	erheblicher Handlungsbedarf
	Peterheitzwarf	1	1	1:6 / 1:15	4,85	5,05	
	Peterswarf	3	1	1:6	5,14	5,05	erheblicher Handlungsbedarf
	Rixwarf	1	1	1:8	4,95	4,85	besonders exponierte Randlage
	Süderhörn	1	2	1:6 / 1:8	5,44	4,95	besonders exponierte Randlage
	Tadenswarf	5	3	1:6 / 1:15	5,14	5,05	
	Tamenswarf	1	1	1:6 / 1:15	4,95	5,05	besonders exponierte Randlage
	Treuberg	0	0	1:6	3,94	4,95	
Nordstrandischmoor	Amalienwarf	1	1	1:6	5,29	5,40	erheblicher Handlungsbedarf
(21)	Halberweg	3	1	1:6	5,26	5,40	erheblicher Handlungsbedarf
	Neuwarf	12	2	1:6	5,78	5,40	
	Norderwarf	5	1	1:8	5,80	5,40	
Oland (27**)**		27	10	1:6	5,87	5,15	Handlungsbedarf
Süderoog (2)		2	1	1:6 / 1:8	4,78	4,95	erheblicher Handlungsbedarf (LKN)
Südfall		0	1	1:8	4,99	5,30	