Heft 84
Jahr 2016

Die Küste

ARCHIV FÜR FORSCHUNG UND TECHNIK
AN DER NORD- UND OSTSEE

ARCHIVE FOR RESEARCH AND TECHNOLOGY
ON THE NORTH SEA AND BALTIC COAST

84
2016

HERAUSGEBER: KURATORIUM FÜR FORSCHUNG IM KÜSTENINGENIEURWESEN

Die Küste, 84 (2016), 1-226

Die Küste

ARCHIV FÜR FORSCHUNG UND TECHNIK
AN DER NORD- UND OSTSEE

ARCHIVE FOR RESEARCH AND TECHNOLOGY
ON THE NORTH SEA AND BALTIC COAST

Heft 84 · Jahr 2016

Herausgeber: Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen

Verlag:
Bundesanstalt für Wasserbau (BAW)
Kußmaulstraße 17, 76187 Karlsruhe
Postfach 21 02 53, 76152 Karlsruhe
Telefon: 0721 9726-3380 Telefax: 0721 9726-5320
E-Mail: izw@baw.de, www.baw.de
Druck: BSH Druckerei, Rostock

Die Küste, 84 (2016), 1-226

Die Küste, 84 (2016), 1-226

ISSN 0452-7739
ISBN 978-3-939230-51-9

Verfasser dieses Heftes:

Arns, Arne, Universität Siegen, Forschungsinstitut Wasser und Umwelt, Abteilung Wasserbau und Hydromechanik, arne.arns@uni-siegen.de; Brühl, Markus, Technische Universität Braunschweig, m.bruehl@tu-bs.de; Dangendorf, Sönke, Universität Siegen, Abteilung Wasserbau und Hydromechanik, soenke.dangendorf@uni-siegen.de; Deicke, Matthias, Georg August Universität Göttingen, Abteilung Sedimentologie und Umweltgeologie, mdeicke@gwdg.de; Dorgeist, Matthias, RWTH Aachen University, Institut für Soziologie, matthias.dorgeist@rwth-aachen.de; Hartwig, Finn, finnhartwig@web.de; Häußling, Roger, RWTH Aachen University; Institut für Soziologie, rhaeussling@soziologie.rwth-aachen.de; Hellmers, Sandra, Technische Universität Hamburg, Institut für Wasserbau, s.hellmers@tuhh.de; Hofstede, Jacobus, Ministerium für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt, Natur und Digitalisierung des Landes Schleswig-Holstein, jacobus.hofstede@melund.landsh.de; Jensen, Frerk, Landesbetrieb für Küstenschutz, Nationalpark und Meeresschutz Schleswig-Holstein Husum, Frerk.Jensen@lkn.landsh.de; Jensen, Jürgen, Universität Siegen; Abteilung Wasserbau und Hydromechanik, juergen.jensen@uni-siegen.de; Kaip, Elena, RWTH Aachen Univeristy, Lehrstuhl für Technik- und Organisationssoziologie, ekaip@soziologie.rwth-aachen.de; Karius, Volker, Georg August Universität Göttingen, Abteilung Sedimentologie und Umweltgeologie, vkarius@uni-goettingen.de; Niehüser, Sebastian, Universität Siegen, Abteilung Wasserbau und Hydromechanik, sebastian.niehueser@uni-siegen.de; Palmaricciotti, Giovanni, Technische Universität Hamburg, Institut für Wasserbau, palmaricciotti@tuhh.de; Patzke, Justus, Technische Universität Hamburg, Institut für Wasserbau, justus.patzke@tuhh.de; Petersen, Volker, Ministerium für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt, Natur und Digitalisierung des Landes Schleswig-Holstein, volker.petersen@melund.landsh.de; Schindler, Malte, Beratungsbüro für Boden und Umwelt C. Schubert GmbH, schindler.malte@freenet.de; Schüttrumpf, Holger, RWTH Aachen University; Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, schuettrumpf@iww.rwth-aachen.de; Tadesse, Yohannis B., Technische Universität Hamburg, Institut für Wasserbau, yohannis.tadesse@tuhh.de; Tiepolt, Lars, Staatliches Amt für Landwirtschaft und Umwelt Mittleres Mecklenburg, lars.tiepolt@stalumm.mv-regierung.de; von Eynatten, Hilmar, Geowissenschaftliches Zentrum der Universität Göttingen, hilmar.von.eynatten@geo.uni-goettingen.de; Wahl, Thomas, University of Central Florida, Department of Civil, Environmental and Construction Engineering & Sustainable Coastal Systems Cluster, t.wahl@ucf.edu; Wöffler, Theide, RWTH Aachen University, Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, woeffler@iww.rwth-aachen.de; Ziesen, Nenja, RWTH Aachen University; Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, ziesen@iww.rwth-aachen.de

---

Die Verfasser sind für den Inhalt der Aufsätze allein verantwortlich. Nachdruck aus dem Inhalt nur mit Genehmigung des Herausgebers gestattet: Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen, Geschäftsstelle, Wedeler Landstraße 157, 22559 Hamburg.
Vorsitzender des Kuratoriums: VOLKER PETERSEN, Ministerium für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt, Natur und Digitalisierung des Landes Schleswig-Holstein, Mercatorstraße 3, 24106 Kiel
Geschäftsführer: Dr.-Ing. RAINER LEHFELDT, Wedeler Landstraße 157, 22559 Hamburg
Redaktionsleitung „Die Küste“: Dr.-Ing. ANNIKA SCHÜTTRUMPF

Die Küste, 84 (2016), 1-226

Die Küste, 84 (2016), 1-226

Inhaltsverzeichnis

Volker Petersen
Nachruf Stefan Hauser 1

Jürgen Jensen, Arne Arns, Holger Schüttrumpf, Theide Wöffler, Roger Häußling, Nenja Ziesen, Frerk Jensen, Hilmar von Eynatten, Malte Schindler und Volker Karius
Zukunft Hallig – Entwicklung von nachhaltigen Küstenschutz- und Bewirtschaftungsstrategien für die Halligen unter Berücksichtigung des Klimawandels 3

Arne Arns und Jürgen Jensen
Analyse der hydrologischen und hydrodynamischen Randbedingungen im Bereich der Halligen 9

Roger Häußling, Nenja Ziesen, Matthias Dorgeist und Elena Kaip
Eine partizipative und interdisziplinäre Gestaltung von Küstenschutzmaßnahmen auf den Halligen 45

Theide Wöffler und Holger Schüttrumpf
Risikoanalysen und Entwicklung neuer Küstenschutzkonzepte für die Halligen 67

Volker Karius, Malte Schindler, Matthias Deicke und Hilmar von Eynatten
Sedimentologische Untersuchungen auf den Halligen 95

Sebastian Niehüser, Jürgen Jensen, Thomas Wahl, Sönke Dangendorf und Jacobus Hofstede
Zum Einfluss möglicher Setzungserscheinungen am Leuchtturm Cuxhaven auf die langjährigen Wasserstandsaufzeichnungen am Pegel Cuxhaven Steubenhöft 119

Lars Tiepolt
Mobiles Laserscanning und Einsatz von Drohnen zur Aufnahme von Küstengebieten und Küstenschutzbauwerken 147

Finn Hartwig
Das Schwingungsverhalten der Tideelbe hinsichtlich Resonanz 193

Konferenzberichte

Markus Brühl
33rd International Conference on Ocean, Offshore & Arctic Engineering in San Francisco, USA 213

Yohannis B. Tadesse
11th International Conference on Hydroinformatics in New York City, USA 221

Die Küste, 84 (2016), 1-226

Sandra Hellmers, Giovanni Palmaricciotti und Justus Patzke
11th International Conference on Hydroscience & Engineering
„Hydro-Engineering for Environmental Challenges" in Hamburg, Germany 223

Die Küste, 84 (2016), 1-226

Nachruf Stefan Hauser

Im Alter von lediglich 51 Jahren verstarb am 29. August 2016 überraschend Herr Stefan Hauser. Herr Hauser schloss nach dem Abitur (1983) in seiner Geburtsstadt Hamburg sein Studium im Jahre 1992 mit der Diplom-Hauptprüfung an der TU Hannover ab. Zwischen 1993 und 1995 absolvierte er beim Land Niedersachsen seine Referendarausbildung. Im unmittelbaren Anschluss an das Referendariat mit dem Wechsel zur Bundeswasserstraßenverwaltung folgte der berufliche Einstieg in verschiedenen Funktionen beim damaligen Wasser- und Schifffahrtsamt Wilhelmshafen. Als Teil seiner beruflichen Tätigkeit oblag ihm die Projektleitung für das Informationssystem Unfallmanagement (ELIUS – ISU). Im Jahre 2004 erfolgte zunächst die Abordnung und spätere Versetzung an das damalige Bundeministerium für Verkehr.

Herr Hauser hat seit 2005 bis zu seinem frühzeitigen Tod die Interessen des Bundesverkehrsministeriums im Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen vertreten. Im Jahre 2014 übernahm Herr Hauser bei schwerer See und schwierigem Fahrwasser das Ruder als Vorsitzender des KFKI. Im Jahre 2014 war aufgrund unterschiedlicher Ursachen ein bisher nicht zu verzeichnender Negativrekord bei der Ausschüttung von Fördermitteln erreicht. Dies dürfte dazu geführt haben, dass Herr Hauser in der Ausgabe 1/2014 dem Akronym „KFKI“ eine Bedeutung zugeschrieben hat:

Keiner **F**ördert, **K**einen **I**nteressiert´s.

Dem hat sich Herr Hauser allerdings vehement entgegen gestellt. Mit der nötigen Hartnäckigkeit und dem ihm offenbar angeborenen Verhandlungsgeschick ist es Herrn Hauser gelungen, die im Umbruch befindlichen Ansätze in der Küstenforschung des

Bundesforschungsministeriums dafür nutzbar zu machen, dass der im KFKI beheimateten Forschung im Küsteningenieurwesen ein breiteres Betätigungsfeld eingeräumt wurde. In seinem Artikel in KFKI-aktuell stellt Herr Hauser hierzu fest:

> In den kommenden Jahren werden wir sehen, wie erfolgreich die zweite Säule „Forschungsagenda" für die KFKI-Forschung genutzt werden kann.

Es bleibt uns als Mitgliedsverwaltungen im KFKI und den im Küsteningenieurwesen forschenden Instituten vorbehalten, die von Herrn Hauser ausgebrachte Saat durch gute Ideen und bedarfsgerechte Forschungsansätze zu hegen und zu pflegen. Möge uns allen gemeinsam eine gute Ernte gelingen.

Für das Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen

Volker Petersen

KFKI-Vorsitzender 2016/17

Die Küste, 84 (2016), 1-226

Zukunft Hallig – Entwicklung von nachhaltigen Küstenschutz- und Bewirtschaftungsstrategien für die Halligen unter Berücksichtigung des Klimawandels

Jürgen Jensen, Arne Arns, Holger Schüttrumpf, Theide Wöffler, Roger Häußling, Nenja Ziesen, Frerk Jensen, Hilmar von Eynatten, Malte Schindler und Volker Karius

Zusammenfassung

Das Verbundprojekt ZukunftHallig (03KIS093-96) wurde mit dem Ziel der Entwicklung von nachhaltigen Küstenschutz- und Bewirtschaftungsstrategien für die Halligen unter Berücksichtigung des Klimawandels wurde zwischen 2010 und 2014 durch das Forschungsinstitut Wasser und Umwelt (fwu) der Universität Siegen, dem Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft (IWW) und dem Institut für Soziologie (IfS) der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, dem Geowissenschaftlichen Zentrum der Universität Göttingen (GZG) und den Landesbetrieben für Küstenschutz, Nationalpark und Meeresschutz Schleswig-Holstein (LKN-SH) bearbeitet. Dabei standen insbesondere der Erhalt und die Bedeutung der Halligen im nordfriesischen Wattenmeer im Fokus der Untersuchungen. Im Rahmen des Projektes wurden u. a. die hydromechanischen Belastungen unter heutigen und zukünftigen klimatischen Bedingungen sowie die morphologischen und sedimentologischen Veränderungen an und auf den untersuchten Standorten betrachtet. Zudem wurde in ZukunftHallig eine risikoorientierte Gefährdungsanalyse zur Quantifizierung des derzeitig vorhandenen Schutzstandards durchgeführt. Die dabei gewonnenen Informationen dienen als Grundlage für die Entwicklung von nachhaltigen, klimaangepassten Küstenschutzstrategien sowie zur Priorisierung von nachhaltigen Strategien bzw. konkreten Maßnahmen. Abschließend wurde die Akzeptanz dieser Strategien unter den Bewohnern eruiert. Die Untersuchungen wurden exemplarisch an den drei Halligen Langeneß, Nordstrandischmoor und Hooge durchgeführt, jedoch lassen sich die dabei gewonnenen Erkenntnisse auch auf andere Bereich (insbesondere in der Deutschen Bucht) übertragen und erweitern den Kenntnisstand aus anderen Forschungsprojekten (z. B. XtremRisK und HoRisK).

Schlagwörter

Halligen, Weltnaturerbe, Küstenschutzkonzepte, Akzeptanz, qualitative Interviews, Zukunftswerkstatt, ZukunftHallig

Summary

Between 2010 and 2014, an interdisciplinary team of researcher's aimed to "Develop sustainable coastal protection- and management strategies for the Halligen considering climate change" (ZukunftHallig, 03KIS093-96). The group consisted of the Research Institute for Water and Environment (fwu) of the

University of Siegen, the Institute for Hydraulic Engineering and Water Resources Management (IWW) and the Institute of Sociology (IfS) at RWTH Aachen University, the Geoscience Center (GZG) at the University of Göttingen, and the Schleswig-Holstein Agency for Coastal Defence, National park and Marine Conservation (LKN-SH). The project aimed at the development of new impulses to sustainable coastal protection- and management strategies, focusing on the protection and preservation of the Halligen. In particular, the hydrodynamic forcing of today and future conditions as well as morphological and sedimentological changes were investigated. Furthermore, a quantification of the current protection standard, a risk based hazard analysis was conducted. The outcome serves as input for creating the above mentioned sustainable coastal protection- and management strategies. Finally, the acceptance of these strategies among the residents was elicited. Due to the comprehensive work schedule, the study has only been conducted for three of the overall ten existing Halligen exemplarily. These are Langeneß, Nordstrandischmoor and Hallig Hooge.

Keywords

halligen, world heritage, coastal protection strategies, acceptance, qualitative interviews, future workshops, ZukunftHallig

Inhalt

1 Einleitung und Untersuchungsgebiet 4
2 Das Verbundprojekt ZukunftHallig 6
3 Danksagung 7
4 Schriftenverzeichnis 8

1 Einleitung und Untersuchungsgebiet

Die Nationalparks Schleswig-Holsteinisches Wattenmeer und Niedersächsisches Wattenmeer sind seit 1985 bzw. 1986 Nationalparks 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 eingedeichter Inseln im nordfriesischen Wattenmeer an der Nordseeküste Schleswig-Holsteins und stellen mit ihrer exponierten Lage (siehe Abb. 1) eine einzigartige Naturlandschaft dar und zwingen ihren Bewohnern besondere Lebens- und Bauweisen auf. Diese zehn Halligen entstanden z. T. aus den Resten ehemaliger Küstenmarschen; der größte Teil resultiert jedoch weitestgehend aus Neuauflandungen durch Schlickablagerungen (QUEDENS 1993). 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, gibt es jährlich bis zu 50-mal ein „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 zehn heute noch existierenden Halligen kann Abb. 1 entnommen

werden. Einige Halligen haben Sommerdeiche, andere höher gezogene Deckwerke. Hierdurch werden die Halligen unterschiedlich häufig überflutet.

Nachfolgend sind die zehn Halligen aufgelistet:

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

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

Das Wattenmeer mit seinen Halligen und Inseln hat neben einem hohen ökologischen und kulturhistorischen Stellenwert 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 reduziert.

2 Das Verbundprojekt ZukunftHallig

Die Halligen werden aufgrund ihrer exponierten Lage im schleswig-holsteinischen Wattenmeer besonders von den Auswirkungen des Klimawandels betroffen sein. Denn 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 Inselmarschen, indirekt aber auch auf die Häufigkeit und Intensität von Sturmfluten, die Seegangsentwicklung sowie die morphologische Entwicklung des Wattenmeers. Dabei 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 mittleren Tidehochwasser (MThw) Anstiegs (siehe z. B. SCHINDLER et al. 2014), so dass gegenwärtig nicht zweifelsfrei geklärt ist, ob die Halligen in Zukunft grundsätzlich mit dem Meeresspiegel mitwachsen oder nicht.

Im Jahre 2007 wurde die Arbeitsgruppe (AG) „Halligen 2050“ mit der Aufgabe gegründet, innovative und nachhaltige Konzepte zur Sicherung der Halligen und zum Schutz der Halligbewohner bei geänderten Klimabedingungen zu diskutieren. Die AG Hallig 2050 setzt sich aus Vertretern der Küstenschutzbehörden sowie ausgewählten Bewohnern zusammen. Im Forschungsvorhaben „ZukunftHallig“ wurden dagegen einschlägige wissenschaftliche Untersuchungen durchgeführt, dies jedoch in Abstimmung mit ausgewählten Vertretern der AG Hallig 2050. Übergeordnetes Ziel des Vorhabens war die Entwicklung von nachhaltigen Küstenschutz- und Bewirtschaftungsstrategien für die Halligen. 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
- 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

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 des Meeresspiegelanstiegs sowie Sturmflutwasserständen und -häufigkeiten, Seegang und Sedimentablagerungen. Das Verbundprojekt gliedert sich in die vier Vorhaben

ZukunftHallig-A: 03KIS093	Analyse der hydrologischen und hydrodynamischen Randbedingungen im Bereich der Halligen (Universität Siegen), ARNS und JENSEN (2016).
ZukunftHallig-B: 03KIS094	Risikoanalysen und Entwicklung neuer Küstenschutzkonzepte für die Halligen (Teil I, RWTH Aachen) WÖFFLER und SCHÜTTRUMPF (2016) Eine partizipative und interdisziplinäre Gestaltung von Küstenschutzmaßnahmen auf den Halligen (Teil II, RWTH Aachen), HÄUßLING, ZIESEN, DORGEIST und KAIP (2016).
ZukunftHallig-C: 03KIS095	Bewertung vorhandener Küstenschutzsysteme, hydrologisches Monitoring und Datenbereitstellung (LKN Schleswig-Holstein; nicht im Rahmen dieses Beitrages berücksichtigt).
ZukunftHallig-D: 03KIS096	Sedimentologische Untersuchungen auf den Halligen (Universität Göttingen), KARIUS, SCHINDLER, DEICKE und VON EYNATTEN (2016).

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

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. aufgrund des Kulturerbe-Status) und ökonomische (Tourismus, Landwirtschaft) Entwicklung der Halligen ermöglicht. Die Untersuchungen wurden exemplarisch an den drei Halligen Langeneß, Nordstrandischmoor und Hooge durchgeführt. 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.

3 Danksagung

Das Forschungsverbundvorhaben ZukunftHallig wurde vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) unter der Leitung des Projektträgers Jülich (PTJ) und den Fördernummern 03KIS093-96 gefördert. 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.

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. Wir danken 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 Helferinnen und Helfern für vielfältige, unbürokratische Unterstützung sowie Unterkunft bei Sonne und etlichen Stürmen. Ohne die Mitarbeit und Unterstützung des LKN-SH wäre dieses Projekt nicht möglich gewesen – dafür großen Dank.

4 Schriftenverzeichnis

ARNS, A. und JENSEN, J.: Analyse der hydrologischen und hydrodynamischen Randbedingungen im Bereich der Halligen, Die Küste, 84, 2016.

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. and UNNIKRISHNAN, A.S.: Sea Level Change. In: STOCKER, T.F.; QIN, D.; PLATTNER, G.-K.; TIGNOR, M.; ALLEN, S.K.; BOSCHUNG, J.; NAUELS, A.; XIA, Y.; BEX, V. and MIDGLEY, P.M. (eds.): Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 2013.

HÄUßLING, R.; ZIESEN, N.; DORGEIST, M. und KAIP, E.: Eine partizipative und interdisziplinäre Gestaltung von Küstenschutzmaßnahmen auf den Halligen, Die Küste, 84, 2016.

KARIUS, V.; SCHINDLER, M.; DEICKE, M. und VON EYNATTEN, H.: Sedimentologische Untersuchungen auf den Halligen, Die Küste, 84, 2016.

QUEDENS, G.: Die Halligen. Breklumer Verlag, Breklum, 128 S., 1993.

SCHINDLER, M.; KARIUS, V.; DEICKE, M. and VON EYNATTEN, H.: Measuring sediment deposition and accretion on anthropogenic marshland – Part I: Methodical evaluation and development, Estuarine, Coastal and Shelf Science 151, 236–245, 2014.

WÖFFLER, T. und SCHÜTTRUMPF, H.: Risikoanalysen und Entwicklung neuer Küstenschutzkonzepte für die Halligen, Die Küste, 84, 2016.

Die Küste, 84 (2016), 1-226

Analyse der hydrologischen und hydrodynamischen Randbedingungen im Bereich der Halligen

Arne Arns und Jürgen Jensen

Zusammenfassung

Die Deutsche Nordseeküste ist durch technische Hochwasserschutzeinrichtungen gegen Sturmfluten gesichert, deren Schutzhöhen aus landesspezifischen Verfahren abgeleitet werden. Primäres Ziel im Teilprojekt A (03KIS093) des Verbundprojektes „ZukunftHallig" (JENSEN et al. 2016) war daher zunächst die konsistente und objektive Ermittlung dieser Schutzhöhen (d. h. von Wasserständen definierter Eintrittswahrscheinlichkeiten). Im Untersuchungsgebiet werden die erforderlichen Schutzhöhen mit Hilfe von extremwertstatistischen Analysen ermittelt. Pegelmessungen, die eine ausreichend lange Zeitspanne abdecken, bilden hier üblicherweise die Basis für die punktuelle Ermittlung von Extremwasserständen. In unbepegelten Bereichen (wie z. B. in großen Bereichen der Halligen) ist diese Aufgabe dagegen ungleich schwieriger. Im Vorhaben wurde daher eine Methodik zur Kopplung statistischer und numerischer Modelle entwickelt, welche die Ermittlung der Höhen und Häufigkeiten extremer Wasserstände ermöglicht. Darüber hinaus wurde der Einfluss eines möglichen Meeresspiegelanstiegs von 0,54 m auf die Extremwasserstände untersucht. In den meisten Bereichen zeigt dieses Szenario einen Anstieg in den Extremwasserständen, der signifikant über den Anstieg des mittleren Meeresspiegels von 0,54 m hinausgeht.

Schlagwörter

Sturmfluten, numerische Modellierung, statistische Analysen, Wiederkehrintervalle, ZukunftHallig

Summary

The German North Sea coastline is protected by coastal defence structures with heights derived from return water levels. The calculation of return water levels, however, varies between federal states. Primary aim of the subproject ZukunftHallig-A (03KIS093) as part of the research project ZukunftHallig (JENSEN et al. 2016) was to provide a methodology enabling to consistently and objectively calculate return water levels. In the study area, such return levels are calculated using extreme value statistics. In some regions, however, this is a challenging task as water level records are not available or cover shorter time periods as required for undertaking reliable extreme value analysis. In this subproject, the concept of regionalization is adopted and adjusted from a riverine (where it has been previously applied) to a coastal setting. This innovative approach combines numerical modelling and a bias-correction method and enables to estimate return levels in ungauged areas. Additionally, the impact of sea level rise on extreme water levels is investigated adding +0.54 m to the MSL in the investigation area. At most locations, the analyses point to changes in the storm surge and return water levels that are significantly different from the changes in MSL alone.

Keywords

storm surges, numerical modelling, statistical assessment, return levels, ZukunftHallig

Inhalt

1 Einleitung ... 10
2 Verwendete Daten ... 13
3 Entwicklung einer konsistenten Vorgehensweise für die Analyse der Höhen und Häufigkeiten von Sturmfluten ... 13
3.1 Motivation ... 13
3.2 Grundlagen ... 14
3.3 Methoden und Ergebnisse ... 15
3.4 Trendkorrektur ... 16
3.5 Kollektivbildung ... 18
3.5.1 Block Maxima Methode ... 18
3.5.2 POT Methode ... 18
3.6 Declustern ... 22
3.7 Verteilung ... 22
3.8 Übertragbarkeit ... 24
3.9 Empfehlungen zur Ermittlung extremer Wasserstände ... 27
4 Kollektiverweiterung ... 28
4.1 Motivation ... 20
4.2 Modellaufbau ... 20
4.3 Kalibrierung ... 31
4.4 Biaskorrektur ... 32
4.5 Validierung der Biaskorrektur ... 33
4.6 Extremwertstatistische Analysen ... 35
5 Weitergehende Analysen ... 37
6 Zusammenfassung und Fazit ... 38
7 Schriftenverzeichnis ... 39

1 Einleitung

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-Einrichtungen) gegen Sturmfluten gesichert, deren Schutzhöhen (Bemessungswasserstände) aus extremwertstatistischen Analysen von Wasserstandsmessungen abgeleitet werden. Der sogenannte 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 (siehe z. B. die nummerierten Stationen in Abb. 1b bis d und Tab. 1).

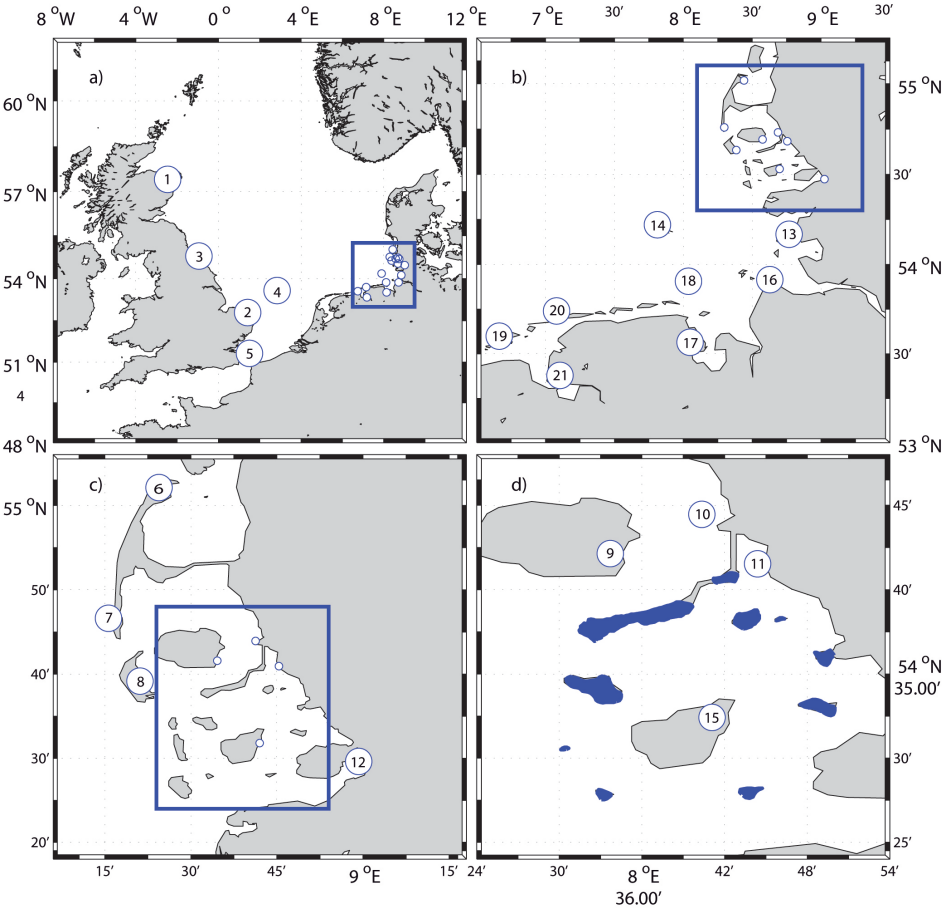

Abbildung 1: Lage der betrachteten Pegelstandorte (Nummerierung siehe Tab. 1); d) die einzelnen Halligen sind in blau dargestellt.

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

#	Station	Land	Tideregime	Standort		Tide/ surge Verh.	Anzahl der Jahre	Periode	Vollständigkeit (%)
				Lon	Lat				
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

Seit Ende der 1990er Jahre existieren zudem vielerorts Wasserstandszeitreihen mit einer zeitlichen Auflösung von t≤1h. 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 des Vorhabens liegt daher auf der räumlichen Interpolation

von Wasserstandsdaten, um geeignete Informationen auch für Bereiche zu erhalten, in denen keine Pegel vorhanden sind.

2 Verwendete Daten

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 Kap. 4.4) wurden Scheitelzeitreihen von Pegeln entlang der Deutschen Bucht verwendet. Alle relevanten Informationen zu den verwendeten Daten können Tab. 1 entnommen werden; die Lage der einzelnen Standorte kann Abb. 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 Tab. 1 wurden hinsichtlich fehlerhafter Werte geprüft und bereinigt (siehe ARNS et al. 2013). 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).

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

3.1 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 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-numerisches 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 extremwertstatistischer 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.

3.2 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 Abb. 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, d. h. aus r={1, 2, 3, 4,…n} Ereignissen 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. Im Rahmen der Studie wurde jedoch lediglich die *Maximum-Likelihood-Methode* (MLE) verwendet. In Schritt vier erfolgt die Wahl der theoretischen Verteilungsfunktion (in Abhängigkeit von Schritt 2). Die Grenzverteilung des BM-Kollektives ist die Verallgemeinerte Extremwertverteilung (*engl. Generalized Extreme Value distribution* (GEV))(siehe z. B. NEVES und FRAGA-ALVES 2008). Die Grenzverteilung des POT-Kollektives ist dagegen die Verallgemeinerte Pareto Verteilung (*engl. generalized Pareto distribution* (GPD))(siehe BALKEMA und DE HAAN 1974). 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 Abb. 2 nicht allumfassend ist und andere, weniger gängige Methoden vernachlässigt wurden. Eine projektrelevante Zusammenfassung der verwendeten Methoden und deren theoretischer Hintergrund kann dem Abschlussbericht des Projektes JENSEN (2014) sowie ARNS et al. (2013) entnommen werden.

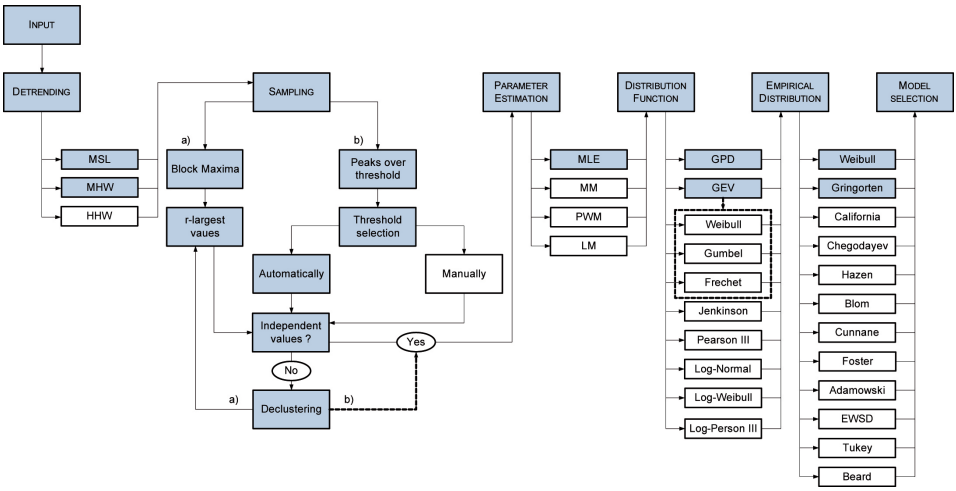

Abbildung 2: Mögliche Vorgehensweisen bei extremwertstatistischen Analysen (ARNS et al. 2013); die blaugrauen Felder wurden im Rahmen der Sensitivitätsstudie berücksichtigt.

3.3 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. Sofern 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.

3.4 Trendkorrektur

Für die Deutsche Bucht zeigen MUDERSBACH et al. (2013), dass die Variabilität und die Trends der höheren Wasserstands-Perzentile in der Vergangenheit mitunter deutlich höher waren als die des regionalen 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.

Extremwertstatistische Untersuchungen basieren auf der Annahme stationärer, unabhängiger und identisch verteilter Zufallsvariablen, wie z. B. extremen Wasserständen. Die Verwendung des MSL zur Trendkorrektur ist in diesem Kontext ungeeignet, da das resultierende Kollektiv auch nach der Trendbereinigung signifikant stationär ist. 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).

Im Rahmen der Sensitivitätsstudie (Kap. 3) wird die Trendkorrektur an den amtlich bereitgestellten 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. Abb. 3a 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=2 bis r=5 Werten/Jahr sind in Abb. 3a 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 Abb. 3). Im Gegensatz zur BM Methode zeigt die POT Methode jedoch auch bei größeren Kollektiven ein stabiles Verhalten (für weitere Informationen siehe ARNS et al. 2013).

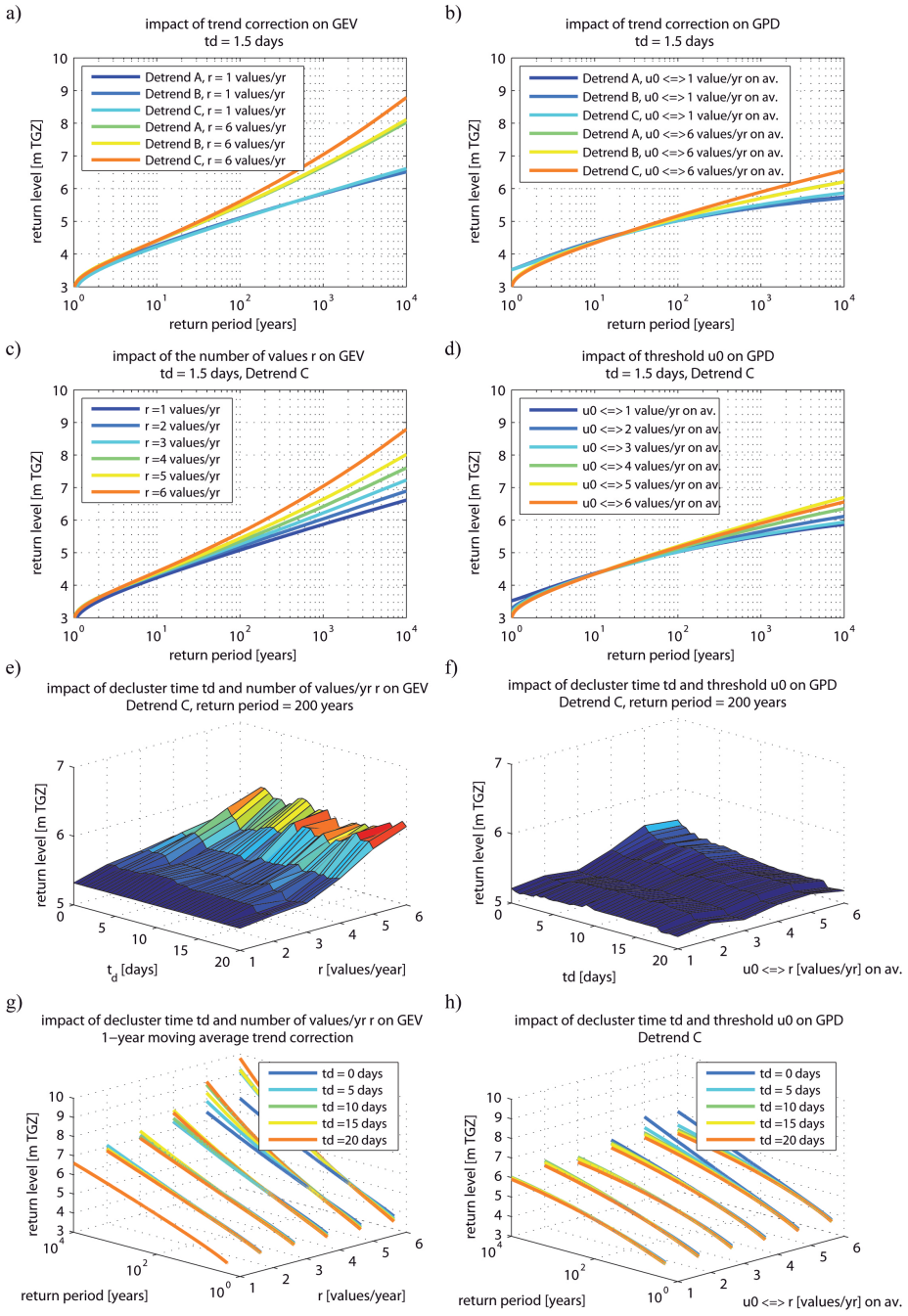

Abbildung 3: Einflussfaktoren der GEV (links) und der GPD (rechts) am Pegel Cuxhaven (ARNS et al. 2013); der grau hinterlegte Bereich zeigt die Ereignisse, die ein mittleres Widerkehrintervall von T≥200 Jahren haben und höhere Unsicherheiten aufweisen.

3.5 Kollektivbildung

3.5.1 Block Maxima Methode

Entlang der britischen Küstenlinie empfehlen DIXON und TAWN (1994) die Verwendung von r=8 Werten/Jahr. In der Deutschen 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 Abb. 3c). 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 mit aufgenommen, welche sich nur unzureichend mit Hilfe der Verallgemeinerten Extremwertverteilung (*engl. Generalized Extreme Value distribution (GEV)*) beschreiben lassen (d. h. es resultiert ein Bias, siehe Kap. 4.4). 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 einhergehend mit einem Vorzeichenwechsel. Aus physikalischer Sicht stellt sich die Frage, ob Formparameter größer Null geeignet sind, das Verhalten extremer Wasserstände adäquat zu beschreiben, da ein progressiver Kurvenverlauf einen überproportional starken Anstieg sehr seltener Wasserstände impliziert.

Ein Beispiel der Kollektivbildung unter Verwendung der r=3 größten Werte/Jahr (blaue Kreise) zeigt Abb. 4a. Exemplarisch 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 Abb. 4b). Am Pegel Cuxhaven führt die Verwendung von r > 1 Werten/Jahr somit zu einer signifikanten Überschätzung extremer Wasserstände (für weitere Informationen siehe ARNS et al. 2013).

3.5.2 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 gewonnenen Kollektive werden zunächst mit Hilfe eines χ^2 Hypothesentests auf deren Verteilung (GPD) getestet. Der Einfluss des Schwellenwertes u_0 auf die Ermittlung extremer Wasserstände ist in Abb. 3d 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).

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 Abb. 4a). So wird für das BM-Kollektiv z. B. aus einer 30-jährigen Zeitreihe bei r=3 Werten/Jahr ein Extremwertkollektiv mit insgesamt 90 Ereignissen generiert; in der POT-Methode wird der Schwellenwert dagegen so lange angepasst, bis auch hier eine Kollektivgröße von exakt 90 Werten aus 30 Jahren Zeitreihe gewonnen werden. 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 feste Anzahl an Werten berücksichtigt. Die Kollektivbildung der POT Methode selektiert demnach nur Werte, die dem vorher zu definierenden Kriterium „Extremwert" genügen.

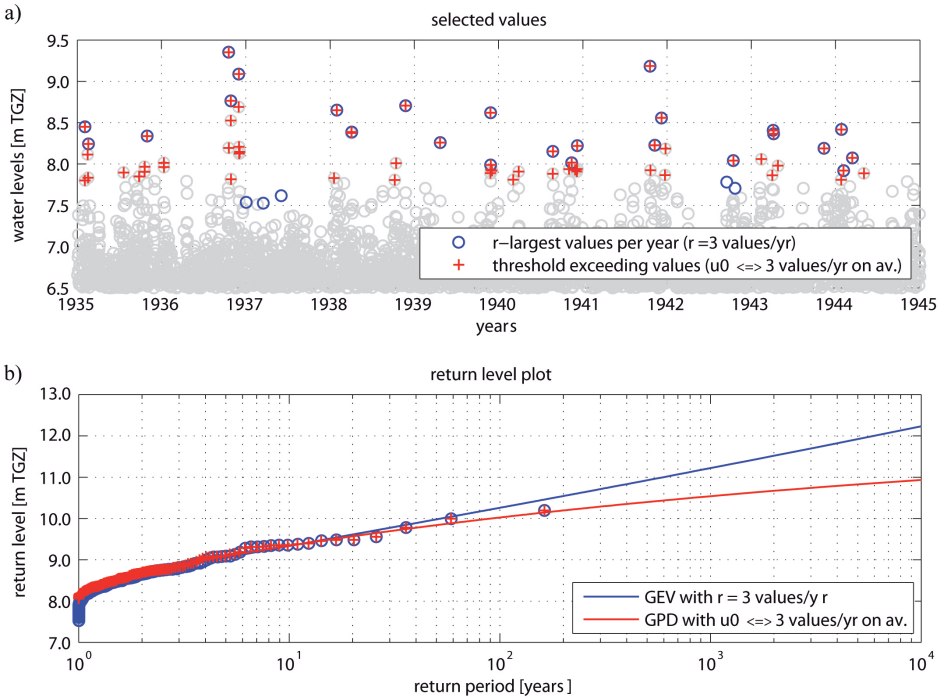

Abbildung 4: (a) Exemplarische Darstellung der Kollektivbildung mit der BM und der POT Methode; (b) Schätzung der Wiederkehrintervalle mittels GEV und GPD (ARNS et al. 2013).

Der Schwellenwert im vorigen Beispiel wurde so definiert, dass sich die Resultate der extremwertstatistischen Analyse mittels BM- und POT-Methode direkt miteinander vergleichen lassen. 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 zehn 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 generell gültigen, stabilen und zeitinvarianten Verfahrens zur Ermittlung extremer Wasserstände, welches eine geringere Varianz als das bisher primär verwendete AMAX-Verfahren (siehe Kap. 3.6) aufweist. Mit Ausnahme des Perzentil basierten Ansatzes wurden die untersuchten Verfahren jedoch an allen untersuchten Standorten verworfen, da in allen Verfahren 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 Abb. 5 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. den 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. Abb. 5 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).

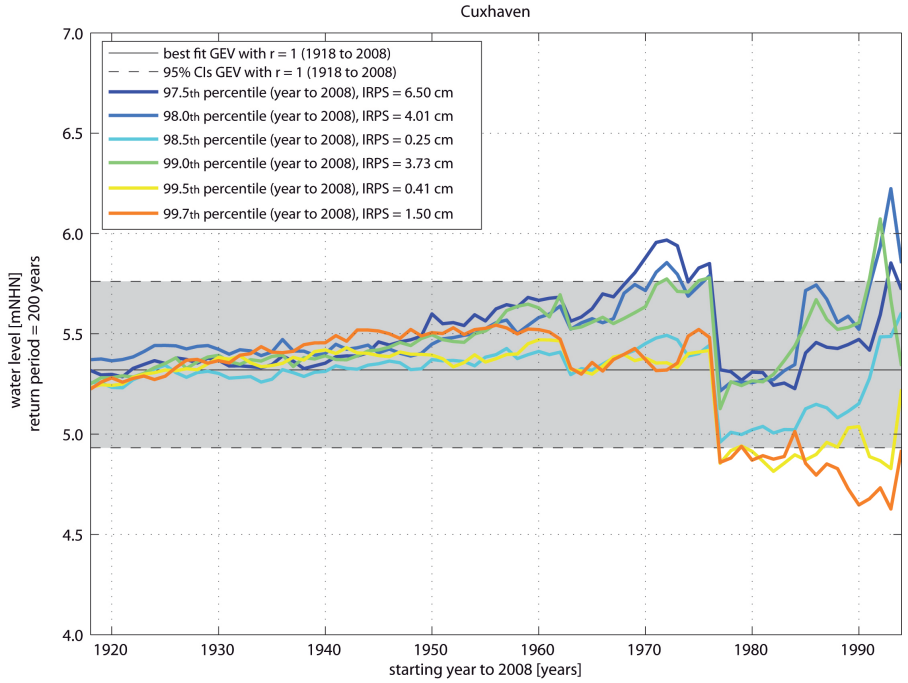

Abbildung 5: Stabilität der GPD Schätzungen unter Verwendung unterschiedlicher Schwellenwerte am Pegel Cuxhaven. Die graue Schattierung zeigt den Bereich der 95% Konfidenzintervalle der GEV (ARNS et al. 2013).

Um die Leistungsfähigkeit der verwendeten Verfahren zur Wahl eines Schwellenwertes objektiv zu vergleichen, wird im Folgenden der *Index of Return Period Stability* (IRPS) (siehe ARNS et al. 2013) verwendet. Der IRPS ist ein relatives Maß der Stabilität und ermittelt sich nach

$$IRPS = s^2 \cdot max.\Delta h \cdot \bar{h} \quad (1)$$

und beschreibt das Produkt der Varianz s^2, der maximalen Abweichung einer Wasserstandsschätzung zu einer Referenzgröße max. Δh sowie der mittleren Distanz $\bar{h}$ einer Wasserstandsschätzung (hier mit einem mittleren Wiederkehrintervall von T = 200 Jahren) gegenüber einer Referenzgröße. Als Referenzgröße wird die Wasserstandsschätzung mittels BM Methode (GEV) unter Verwendung der Zeitreihe ab 1936 verwendet; vor 1936 zeigen die Analysen an allen betrachteten Pegeln keine signifikante Beeinflussung der Wiederkehrintervalle.

Abb. 6a zeigt den IRPS für alle Standorte gemäß Abb. 1d. 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 Abb. 6b 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).

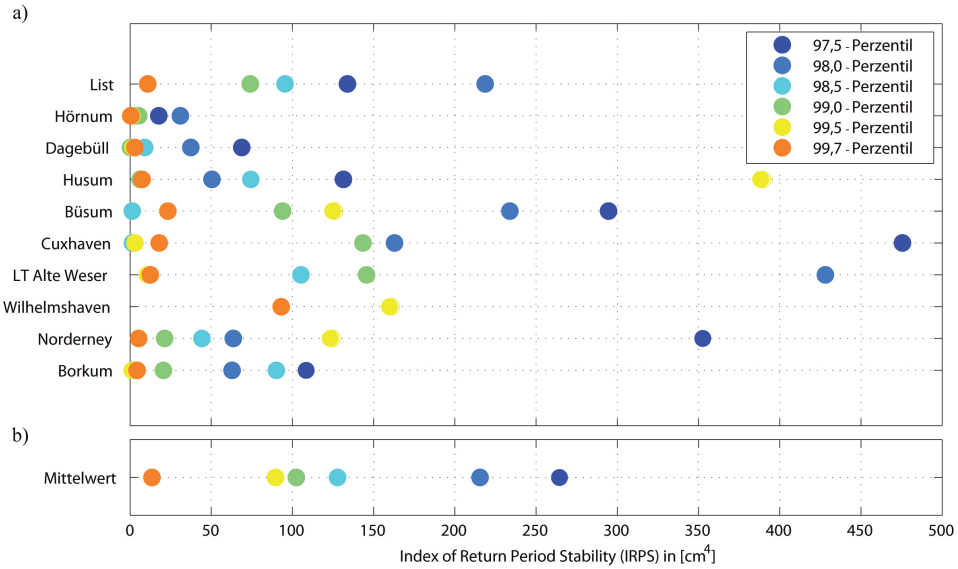

Abbildung 6: (a) IRPS aller Standorte; (b) Mittelwert des IRPS aus allen Standorten (nach ARNS et al. 2013).

3.6 Declustern

Um den Einfluss des „Declustern" auf die Abschätzung von Wiederkehrintervallen zu untersuchen, wurden die BM und POT Kollektive mit $t_d = 0$ bis $t_d = 20$ Tagen „declustert". Abb. 3e bis f zeigt die Ergebnisse des „Declustern" für das Wiederkehrintervall T=200 Jahre. In Abb. 3e 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 (Abb. 3g). Das o. g. Ergebnis 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 Abb. 3f 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 weitere Informationen siehe ARNS et al. 2013).

3.7 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 zehn 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 Abb. 7 b 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 Abb. 7a bis f), dann werden diese mit zunehmender Kollektivgröße kleiner.

Die Mittelwerte der berechneten Wasserstände nehmen dagegen mit steigenden r-Werten zu, d. h. bei r=6 Werten/Jahr resultieren die insgesamt höchsten Werte. Im direkten Vergleich mit der AMAX Methode führt BM-Methode mit r>1 Werten/Jahr zu einer Überschätzung von extremen Wasserständen. Die GPD zeigt dagegen im Gegensatz zur GEV ein stabileres Verhalten. Dies ändert sich erst im Jahr 1976 (siehe die blauen Kurven in Abb. 7g). Folglich verursacht die Nichtberücksichtigung des Jahres 1976 (bzw. der Sturmflut) eine Unterschätzung der Extremwasserstände. 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 Abb. 7 (rote Kurven) entnommen werden. Hierbei zeigt sich, dass die Berücksichtigung neuerer Wasserstandsaufzeichnungen 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.

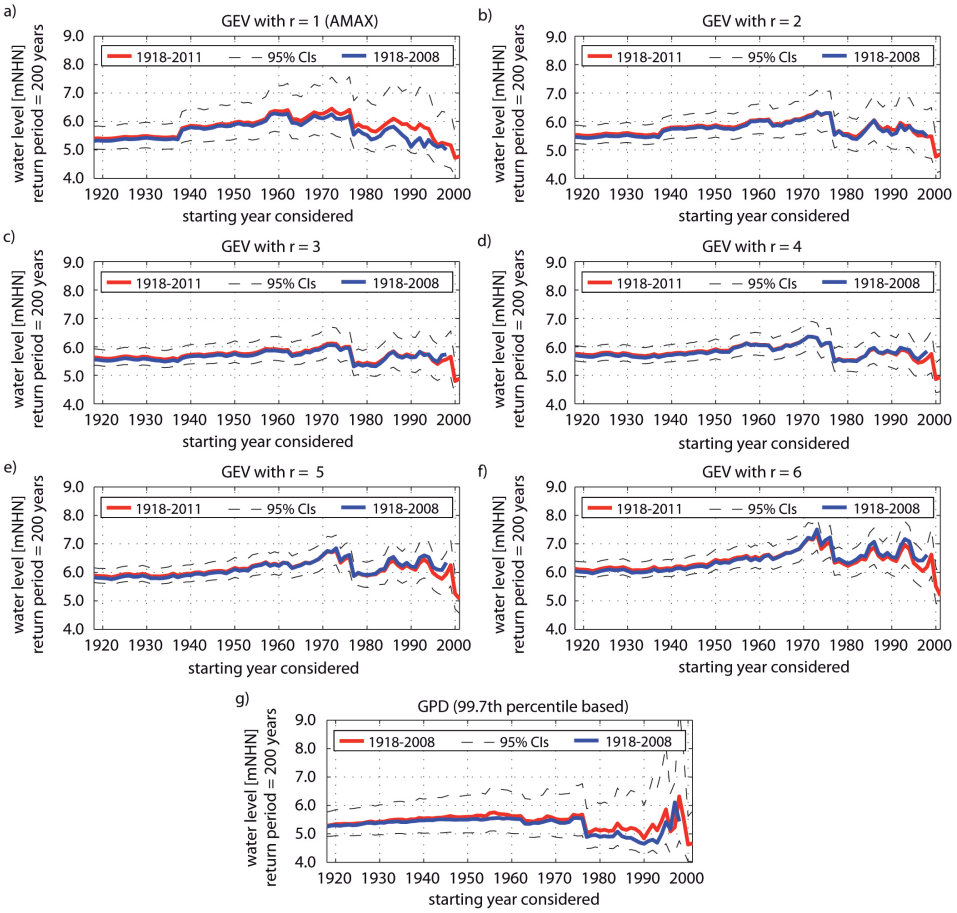

Abbildung 7: (a) - (f) Stabilität der GEV mit r=1 bis r=6 Werten/Jahr am Pegel Cuxhaven; (g) Stabilität der GPD unter Verwendung eines Schwellenwertes von u_0=99,7-Perzentil. Die blaue Linie zeigt die Periode von 1918 bis 2008; die rote Kurve zeigt die Periode von 1918 bis 2011.

3.8 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 neun weitere Stationen analysiert (siehe Abb. 1 und Tab. 1). Die Kollektivbildung sowie die Datenvorverarbeitung (Pre-Processing) erfolgt gemäß Kap. 3.5. In der BM Methode werden die T=200 jährlichen Wasserstände (PÜ=0,05 [1/a]) unter Verwendung von r=1 Werten/Jahr geschätzt. Wie in Kap. 3.5.1 erläutert, resultieren am Pegel Cuxhaven aus der BM Methode mit r>1 Werten/Jahr höhere Extremwasserstände als aus der AMAX-Methode. Es ist nicht möglich zwischen richtigem und falschem Wert zu differenzieren, jedoch werden bei Kollektiven mit r>1 Werten/Jahr auch sehr niedrige Ereignisse berücksichtigt. Die daraus resultierende Verzerrung des Schätzers (Bias) ist dabei deutlich größer als in der AMAX-Methode. 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. Abb. 8 zeigt die Anwendung der GEV bzw. GPD auf die BM- bzw. POT-Kollektive an zehn weiteren Pegelstationen.

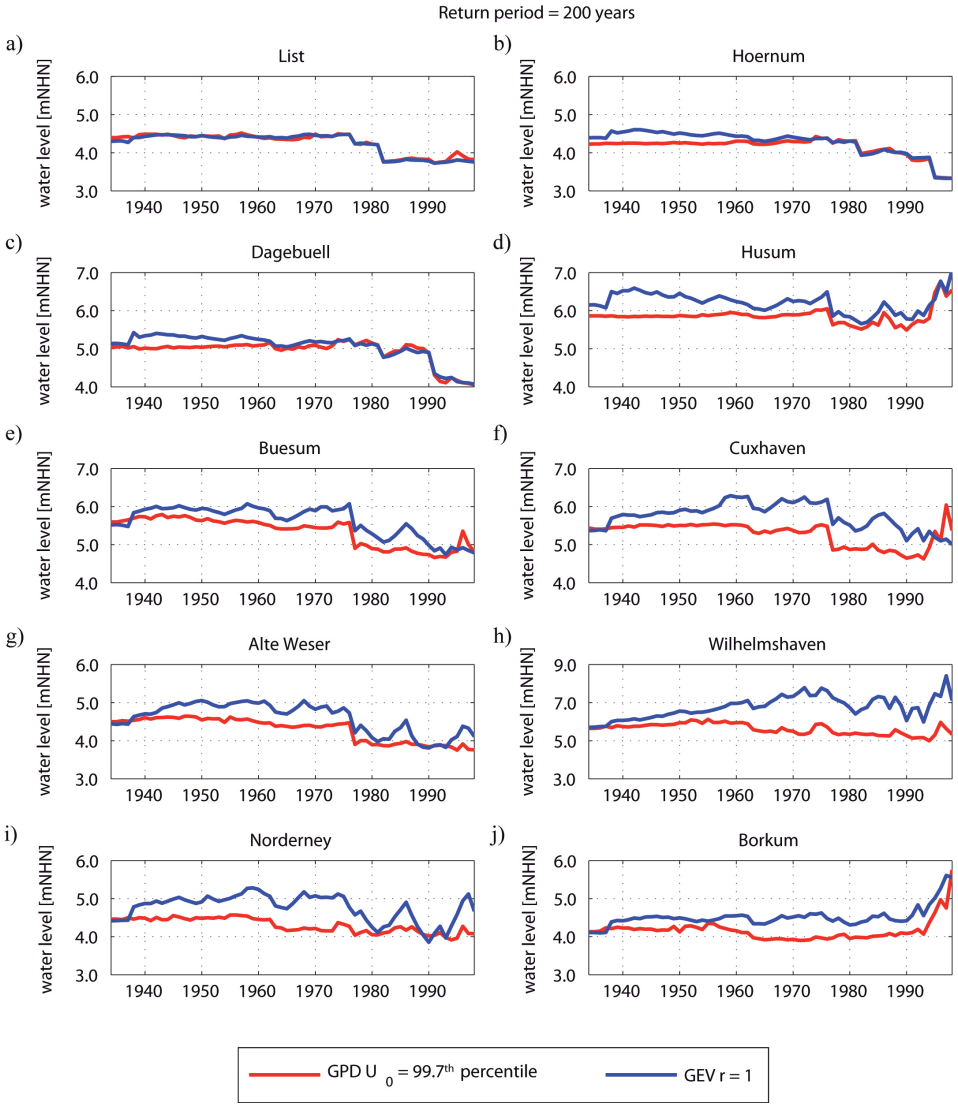

Abbildung 8: Ergebnisse der GEV mit r=1 Werten/Jahr (blau) und der GPD mit einem Schwellenwert von u_0=99,7-Perzentil an allen zehn Stationen (ARNS et al. 2013).

An allen deutschen Pegelstationen (Abb. 8a bis j) zeigt die GPD ein stabileres Verhalten als die GEV. Lediglich an den Pegeln Norderney und Borkum (Abb. 8i 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 Kap. 3.7 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. Kap. 3.5.2) verwendet. Abb. 9 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.

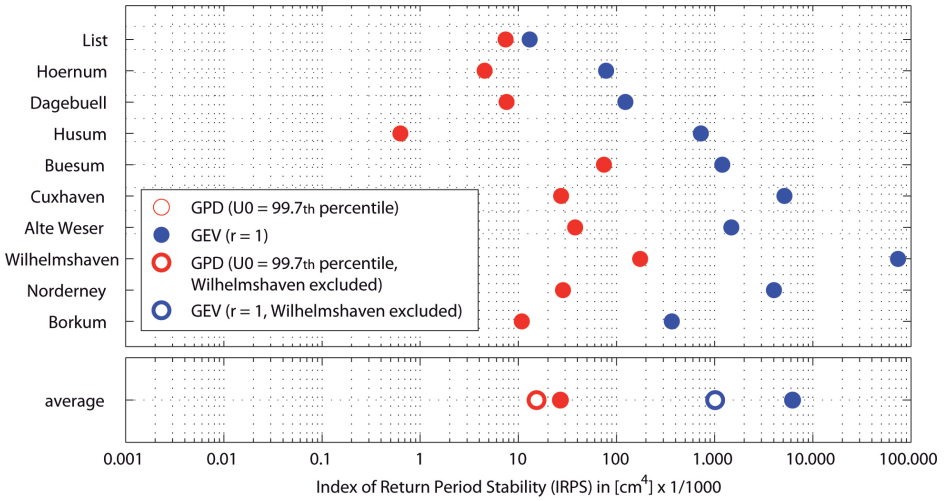

Abbildung 9: IRPS aller zehn Pegel nach; die Berechnungen basieren auf den Linien aus Abb. 8 (ARNS et al. 2013).

Die mittleren IRPS Werte (*average*, siehe unterer Teil von Abb. 9) 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 ($GEV_{IRPS}=7{,}36\times10^{7}$, $GPD_{IRPS}=1{,}74\times10^{5}$). Extrahiert man diesen Pegel aus der Mittelwertbildung, sinken die IRPS der GEV (von $GEV_{IRPS}=6{,}20\times10^{6}$ auf $GEV_{IRPS}=1{,}01\times10^{6}$) 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 GPD ist in allen betrachteten Fällen stabiler.

3.9 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 Abb. 10) 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 den Schwellenwert u_0 (99,7-Perzentil der Thw) überschreiten.
- Passen Sie die GPD an das Kollektiv an.

Darüber hinaus ist die Unabhängigkeit des Kollektivs sicherzustellen. Für praktische Anwendungen lautet 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. SMITH und WEISSMANN (1994) empfehlen hierzu 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:

$$\theta(u_0) = \frac{2\{\sum_{i=1}^{n-1}(T_i-1)\}^2}{(n-1)\sum_{i=1}^{n-1}(T_i-1)(T_i-2)} \quad (2)$$

Dabei beschreibt T_i die Differenzzeit zwischen den Einzelereignissen, n die Kollektivgröße und u_0 den Schwellenwert (FERRO und SEGERS 2003). Die Empfehlungen gelten 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.

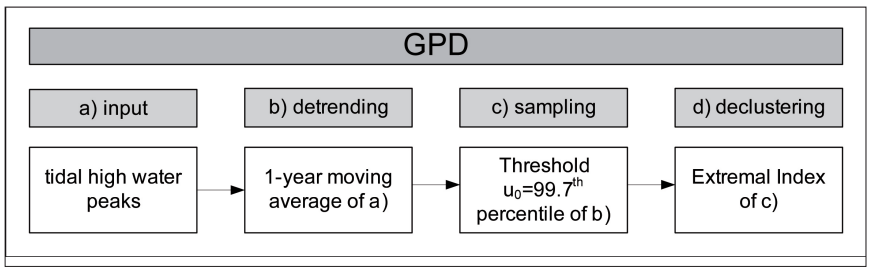

Abbildung 10: Empfehlungen zur Durchführung extremwertstatistischer Analysen in der Deutschen Bucht (ARNS et al. 2013).

4 Kollektiverweiterung

4.1 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 und MÜLLER-NAVARRA 2008; ARNS et al. 2015). 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 und WILSON (2007) oder REGO und LI (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 und 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.

4.2 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 Abb. 11 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‘ (~1 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 aufweisen (NHN), basieren 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 Tab. 1 führt. 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 rotblau gestrichelte Linien in Abb. 11) 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).

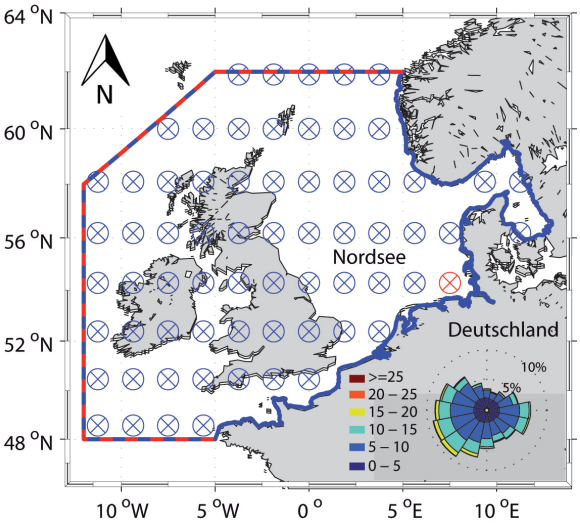

Abbildung 11: Grid Punkte des meteorologischen Modellantriebs (blaue Kreise) im Modellbereich (blaue Linie). Im rechten unteren Bereich der Abbildung ist eine Windrose aller Winde [m/s] zwischen 1970 und 2009 an dem der Deutschen Bucht nächstgelegenen Grid Punkt (roter Punkt) dargestellt. Am linken Bildrand ist die offene Berandung des Modells (rot-blau gestrichelte Linie) dargestellt.

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.

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 dem Strickler-Beiwert $k_{st}=45\,m^{1/3}/s$ vereinfacht als konstant angenommen; der Wert wurde im Rahmen der Kalibrierung als geeignet nachgewiesen. Mit Hilfe des oben beschriebenen Modells wurde ein 40 Jahre „Hindcast“ für die Zeitspanne 1970 und 2009 durchgeführt; der verwendete Zeitschritt beträgt 600 Sekunden. 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

zehn Minuten in einem Abstand von 1000 m entlang der gesamten Deutschen Bucht ausgelesen.

4.3 Kalibrierung

Für alle nachfolgenden Untersuchungen werden ausschließlich die Thw-Scheitelwerte benötigt; auf eine Darstellung der Kalibrierung des Gesamtwasserstandes wird an dieser Stelle daher verzichtet. Die Kalibrierung des Modells wurde auf Basis von beobachteten Thw-Scheitelwerten 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* r^2 und der *Index of Agreement d* zur Beurteilung der Anpassungsgüte ausgewählt. Der *Determinationskoeffizient* r^2 (auch bekannt als *Bestimmtheitsmaß*) beschreibt das quadrierte Verhältnis der *Pearson-Korrelation* aus *n* beobachteten (*Wb)* und modellierten (*Wm)* Wasserständen. 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. Die Spanne der möglichen Werte entspricht der des *Determinationskoeffizienten* r^2. Zusätzlich wurde für die vorliegende Untersuchung die Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers (RMSE) berechnet. Die Rauheiten wurden vereinfacht global angesetzt, d. h. innerhalb des Modells wurde keine weitere Differenzierung einzelner Rauheitsbereiche vorgenommen. Mit Hilfe der o. g. Effizienzkriterien wurde die bestmögliche Modellanpassung ermittelt. Hierbei verursachte ein globaler Rauheitsbeiwert von $k_{st}=45\,m^{1/3}/s$ die geringsten Abweichungen gegenüber den gemessenen Wasserständen. Dieser k_{st}-Wert kompensiert z. T. die Unzulänglichkeiten der verwendeten Bathymetrie. Reibungseffekte werden im Rahmen der hier verwendeten Modellrechnung ohnehin nur an der Sohle erfasst während Schichtungseffekte und Oberwasserzuflüsse nicht berücksichtigt werden, 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).

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 Tab. 2 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). Diese sind vermutlich auf den größeren Flachwassereinfluss im Bereich der Deutschen Bucht sowie die gewählte Sohlrauheit zurückzuführen.

Tabelle 2: Effizienzkriterien zur Beurteilung der bestmöglichen Modellanpassung an unterschiedlichen Stationen (vgl. Tab. 1). 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

4.4 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.

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.

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.

4.5 Validierung der Biaskorrektur

In diesem Abschnitt wird die Validität (Gültigkeit) der Biaskorrektur im Hinblick auf die generelle Eignung untersucht. Hierdurch soll die Praxistauglichkeit der in Abschnitt 4.4 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 wird im Folgenden 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 anderen Referenzstandorte (siehe Kap. 4.4) interpoliert. Hierdurch soll die Übertragbarkeit der Biaskorrektur untersucht werden. Abb. 12a zeigt die Regressionsbeziehungen (rote Kreise) zwischen den Naturmessungen und den Modellergebnissen für den Standort Pellworm Hafen.

Die größten Abweichungen sind bei den höchsten und niedrigsten Thw (r^2=0,99 [-], d=0,98 [-]) zu finden. Durch die Biaskorrektur können die Abweichungen zwischen den modellierten und den gemessenen Wasserständen deutlich reduziert werden (r^2=1[-], d=0,996[-]). Die Abweichungen in den Verteilungsfunktionen sind in Abb. 12b) dargestellt. Dabei zeigen die höheren Thw tendenziell geringere Abweichung als die

niedrigeren. Diese Tendenz wird auch durch die Perzentil Betrachtung in Abb. 12c) bestätigt. Dabei zeigen die niedrigen Perzentile insgesamt größere Abweichungen als die höheren Perzentile. Die für die extremwertstatistischen Analysen relevanten Werte (≥99,7-Perzentil; vgl. Abschnitt 3) weisen demnach geringere Abweichungen auf.

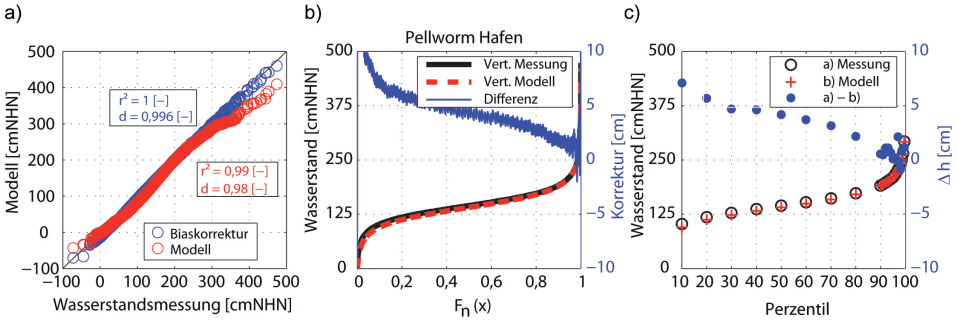

Abbildung 12: (a) Regression der modellierten (rot) und korrigierten (blau) Wasserstände gegenüber der Messung am Standort Pellworm Hafen; (b) Empirische Verteilungsfunktion am Beispielstandort für Pegelmessung (schwarz), Modellergebnis (rot) und die daraus resultierenden Differenzen (blau); (c) Perzentile aus Pegelmessung (schwarz) und Modellergebnis (rot), die blauen Punkte zeigen die Differenzen.

In Abb. 13 sind die Effizienzkriterien aller 16 Standorte 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.

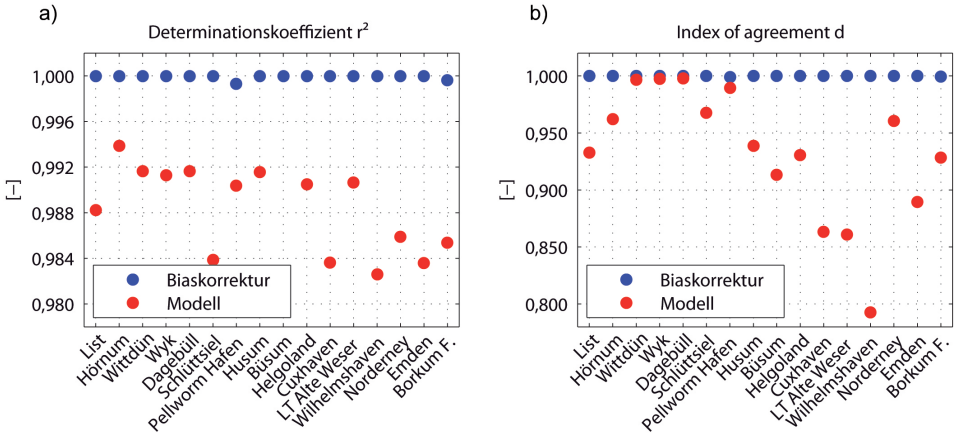

Abbildung 13: Vergleich zwischen den Naturmessungen und den Modellergebnissen an den 16 Validierungsstandorten vor (rote Punkte) und nach (blaue Punkte) Anwendung der Biaskorrektur, mit (a) dem Determinationskoeffizient r² und (b) dem Index of Agreement.

Abb. 13a zeigt deutlich, dass durch die Biaskorrektur an allen Standorten eine Erhöhung des *Determinationskoeffizienten r²* erreicht wurde; alle Standorte erreichen nach der Korrektur Werte von $r^2 \approx 1$[-]. Abb. 13b 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. Im Bereich des Validierungsstandortes konnten die Abweichungen zwischen Naturmessung und Modellergebnissen reduziert, jedoch nicht vollständig eliminiert werden. Hier verbleibt trotz Bias-Korrektur eine geringe Abweichung, die im Rahmen der nachfolgenden Analysen jedoch vernachlässigbar ist.

4.6 Extremwertstatistische Analysen

Übergeordnetes Ziel bei der zuvor beschriebenen Methodik ist die Ermittlung von Wiederkehrintervallen für extreme Wasserstände entlang der gesamten Küstenlinie mit quasi-lückenloser Ausdehnung (1000 m). Hierzu werden die modellgenerierten und Bias-korrigierten Wasserstände im Folgenden für extremwertstatistische Analysen verwendet. 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 Kap. 5.9 zusammengefasst durchgeführt (siehe auch ARNS et al. 2013). Abb. 14a zeigt exemplarisch die daraus resultieren 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 Abb. 14b 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 Abb. 14c sind sämtliche 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.

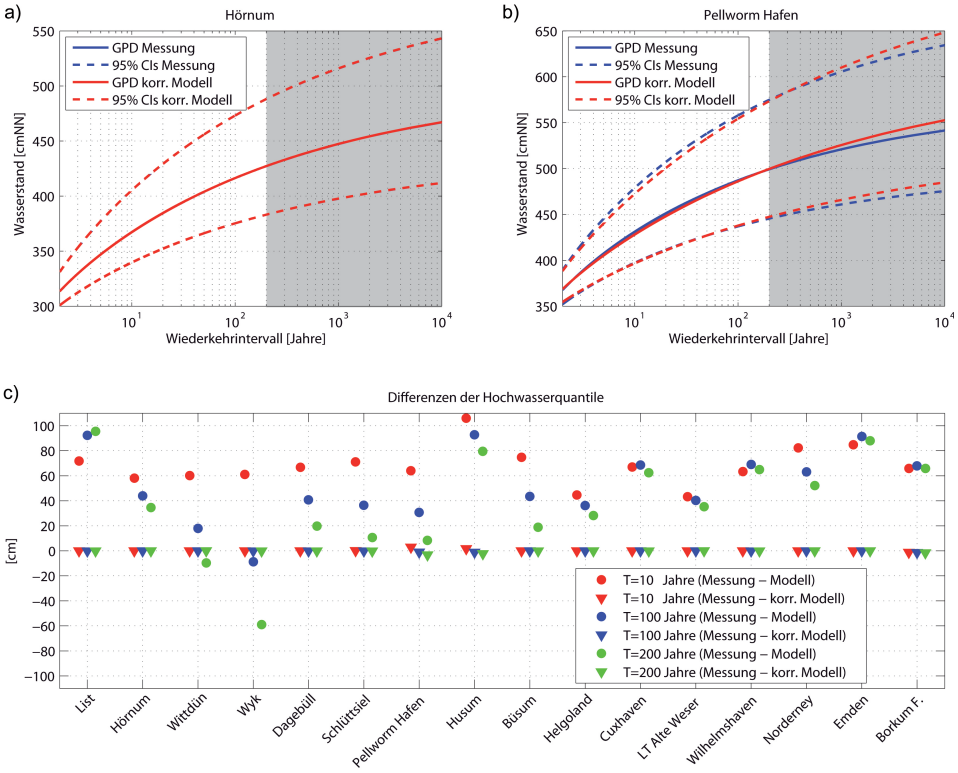

Abbildung 14: (a), (b) Vergleich der Wiederkehrintervalle aus biaskorrigierten (rot) und gemessenen (blau) Wasserständen an den Standorten (a) Hörnum und (b) Pellworm Hafen; (c) Vergleich der Differenzen der Hochwasserquantile an allen betrachteten Standorten für die Wiederkehrintervalle T={10; 100; 200}.

In Abb. 15a 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 als auch auf Stauwirkungen infolge meteorologischer Einflüsse (siehe z. B. DANGENDORF et al. 2012, 2013) zurückzuführen. Abb. 15b, c und d zeigen 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 Hochwasserschutzanlagen verwendet werden können.

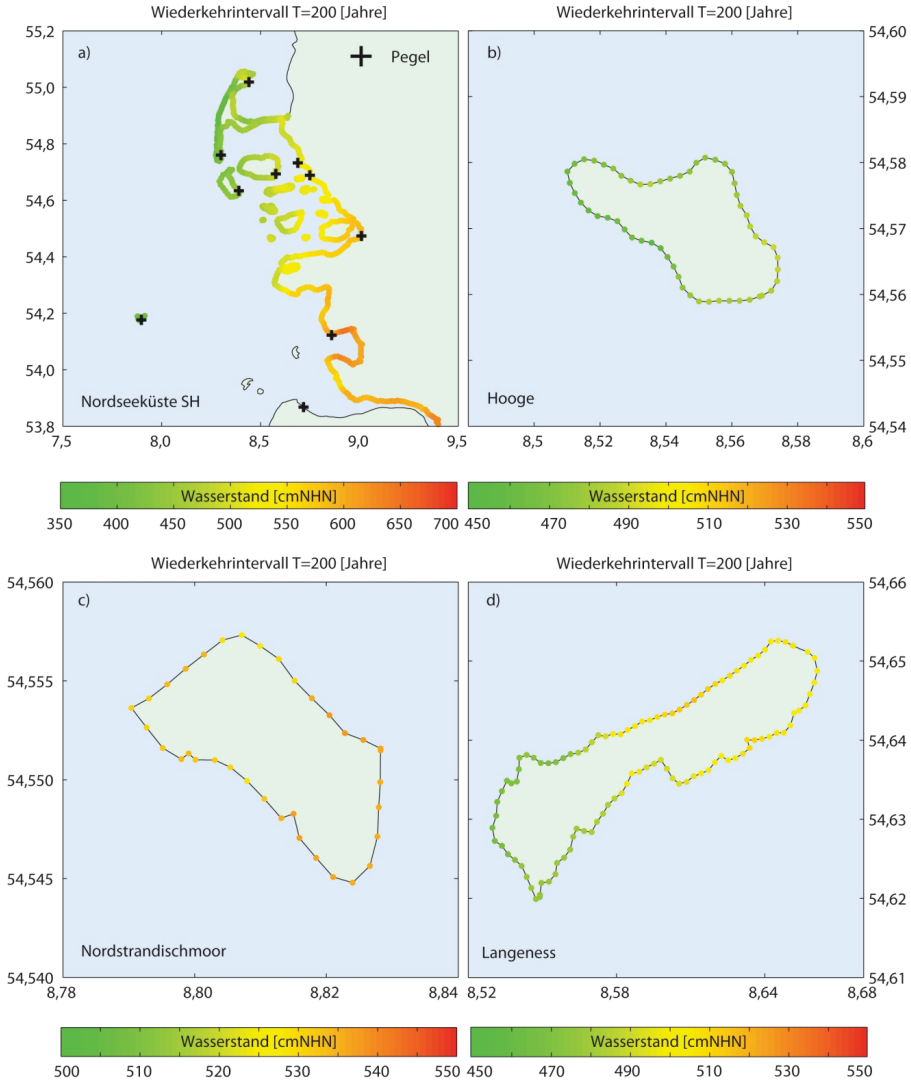

Abbildung 15: (a) Wasserstände in [cmNHN] mit einem mittleren Wiederkehrintervall von T=200 Jahren entlang der Schleswig-Holsteinischen Nordseeküste; Wasserstände in [cmNHN] mit einem mittleren Wiederkehrintervall von T= 200 Jahren entlang der Außenkante von (b) Hallig Hooge, (c) Nordstrandischmoor und (d) Langeneß.

5 Weitergehende Analysen

Die vorangegangenen Kapitel thematisieren die Ermittlung der Wiederkehrintervalle extremer Wasserstände unter gegenwärtigen Bedingungen (d. h. inklusive der Vergangenheit). In ZukunftHallig-A wurde darüber hinaus der Einfluss eines MSL Anstiegs von +0,54 m auf die Extremwasserstände in der Deutschen Bucht untersucht (siehe hierzu

JENSEN 2014; ARNS et al. 2015). Die Untersuchungen basieren auf dem in den Kap. 4.2 und 4.3 beschriebenen zweidimensionalen numerischen Modell.

Die Analysen zeigen, dass zukünftige Extremwasserstände signifikant höher auflaufen könnten als nur infolge des MSL Anstieges prognostiziert. Diese Differenzen sind primär in Änderungen von Flachwasser- und Reibungseffekten und der damit einhergehenden Beeinflussung der Tide begründet.

Für die Untersuchungen zum Einfluss des MSL Anstiegs auf Extremwasserstände wurden atmosphärische und batyhmetrische Änderungen vernachlässigt. Dies war notwendig, um die zugrunde liegenden Prozesse sowie deren Antriebsfaktoren isoliert untersuchen 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 der hiesigen Untersuchungen sowohl verstärken als auch abschwächen (siehe z. B. SIEFERT und LASSEN 1987; STENGEL und ZIELKE 1994; FERK 1995).

6 Zusammenfassung und Fazit

Es wurde gezeigt, dass die Ermittlung von Wiederkehrintervallen auf nationaler sowie auf internationaler Ebene sehr inhomogen ist. So kommen auch in Deutschland in den einzelnen durch Nordsee-Sturmfluten betroffenen Bundesländern unterschiedliche Verfahren (statistisch und deterministisch) zum Einsatz. Und selbst in den Bundesländern, in denen extremwertstatistische Verfahren verwendet werden, ist die Vorgehensweise nicht reglementiert und unterliegt somit oftmals subjektiven Einflussmöglichkeiten. Aus diesem Grund wurden die in Deutschland meistgenutzten 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 Kap. 3.5.1) 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 Kap. 3.5.2) 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 hochaufgelösten Wasserstandsmessungen nicht verfügbar sind. So haben z. B. HAIGH et al. (2010b) 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 Scheitelwerte 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.

Im Rahmen des Vorhabens wird eine Methodik zur objektiven Verwendung direkter extremwertstatistischer Methoden empfohlen. 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; für belastbare quantitative Aussagen sollte die Methodik jedoch detailliert 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. In der Deutschen Bucht werden diese Voraussetzungen jedoch nicht an allen Standorten erfüllt. Daher wurde im Rahmen des Projektes 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. Um Abweichungen zwischen simulierten und beobachteten Wasserständen (u. a. aus der globalen Rauheit) zu eliminieren, wurde eine Biaskorrektur entwickelt. 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 1.000 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 einfache sowie stabile Vorgehensweise für die Ermittlung von Bemessungsgrößen.

Die Ergebnisse aus ZukunftHallig-A können daher verwendet werden, um objektive und konsistente Aussagen zu den Höhen und Häufigkeiten extremer Wasserstände unter heutigen und potentiellen zukünftigen Bedingungen abzuleiten.

7 Schriftenverzeichnis

ANDERSEN, O.B.: Global ocean tides from ERS 1 and TOPEX/POSEIDON altimetry, Journal of Geophysical Research, Volume 100, 25249-25259, 1995. http://dx.doi.org/10.1029/95JC01389

ALLAMANO, P.; LAIO, F. and CLAPS, P.: Effects of disregarding seasonality on the distribution of hydrological extremes. Hydrology and Earth System Sciences 15, 3207–3215, 2011.

ARNS, A.; WAHL, T.; HAIGH, I.D.; JENSEN, J. and PATTIARATCHI, C.: Estimating extreme water level probabilities: A comparison of the direct methods and recommendations for best practise, Coastal Engineering, Volume 81, 51–66, 2013. http://dx.doi.org/10.1016/j.coastaleng.2013.07.003

ARNS, A.; WAHL, T.; DANGENDORF, S. and JENSEN, J.: The impact of sea level rise on extreme water levels in the northern part of the German Bight, submitted to: Coastal Engineering, 2015.

BALKEMA, A.A. and DE HAAN, L.: Residual life time at great age, Ann. Probab., 2, 792–804, 1974.

BATSTONE, C.; LAWLESS, M.; TAWN, J.; HORSBURGH, K.; BLACKMAN, D.; MCMILLAN, A.; WORTH, D.; LAEGER, S. and HUNT, T.: A UK best-practice approach for extreme sea-level analysis along complex topographic coastlines. Ocean Engineering, Vol. 71, 28–39, 2013. http://dx.doi.org/10.1016/j.oceaneng.2013.02.003

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

COMPO G.B.; WHITAKER, J.S.; SARDESHMUKH, P.D. et al.: The twentieth century reanalysis project. Q J Roy Meteor Soc 137, 1–28, 2011. http://dx.doi.org/10.1002/qj.776

DANGENDORF, S.; WAHL, T.; HEIN, H.; JENSEN, J.; MAI, S. and MUDERSBACH, C.: Mean sea level variability and influence of the North Atlantic Oscillation on long-term trends in the German Bight. Water 4(1), 170–195, 2012. http://dx.doi.org/10.3390/w4010170

DANGENDORF, S.; MUDERSBACH, C.; WAHL, T. and JENSEN, J.: 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, 2013.

DVWK DEUTSCHER VERBAND FÜR WASSERWIRTSCHAFT UND KULTURBAU E. V.: Numerische Modelle von Flüssen, Seen und Küstengewässern. DVWK-Schriften 127, 1999.

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

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

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

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

FERK, U.: Folgen eines beschleunigten Meeresspiegelanstiegs für die Wattgebiete der niedersächsischen Nordseeküste. Die Küste, 57, 135–156, 1995.

FERRO, CH.A.T. and SEGERS, J.: Inference for clusters of extreme values. Journal of the RoyalStatistical Society: Series B 65, 545–556, 2003.

FOREMAN, M.G.G.; WALTERS, R.A.; HENRY, R.F; KELLER, C.P. and DOLLING, A.G.: 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, 1995. http://dx.doi.org/10.1029/94JC02721

GÖNNERT, G.: Sturmfluten und Windstau in der Deutschen Bucht Charakter, Veränderungen und Maximalwerte im 20. Jahrhundert. Die Küste, 67, 185–365, 764, 2003.

GÖNNERT, G.; ISERT, K.; GIESE, H. und PLÜß, A.: Charakterisierung der Tidekurve. Die Küste, 68, 99–163, 2004.

GÖNNERT, G.; MÜLLER, O. and GERKENSMEIER, B.: 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, 2013.

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

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

HAIGH, I.D.; NICHOLLS, R. and WELLS, N.: A comparison of the main methods for estimating probabilities of extreme still water levels. Coastal Engineering 57, 838–849, 2010b.

HAWKES, P.J.; GONZALEZ-MARCO, D.; SÁNCHEZ-ARCILLA, A. and PRINOS, P.: Best practice for the estimation of extremes: a review. Journal of Hydraulic Research 46, 324–332, 2008.

HORSBURGH, K.J. and WILSON, C.: Tide-surge interaction and its role in the distribution of surge residuals in the North Sea. Journal of Geophysical Research, 112 (C8). Art. No. 774 C08003, 2007. http://dx.doi.org/10.1029/2006JC004033

JENSEN, J.; ARNS, A.; SCHÜTTRUMPF, H.; WÖFFLER, T.; HÄUßLING, R.; ZIESEN, N.; JENSEN, F.; VON EYNATTEN, H.; SCHINDLER, M. und KARIUS, V.: Zukunft Hallig – Entwicklung von nachhaltigen Küstenschutz- und Bewirtschaftungsstrategien für die Halligen unter Berücksichtigung des Klimawandels. Die Küste, 84, 2016.

JENSEN, J.: Abschlussbericht zur Entwicklung von nachhaltigen Küstenschutz- und Bewirtschaftungsstrategien für die Halligen unter Berücksichtigung des Klimawandels (ZukunftHallig), 2014.

JENSEN, J. and MÜLLER-NAVARRA, S.: Storm surges on the German Coast. Die Küste, 74, 92–125, 2008.

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

KÖSTERS, F. and WINTER, C.: Exploring German Bight coastal morphodynamics based on modelled bed shear stress, Geo-Mar Lett 34, 2014. http://dx.doi.org/10.1007/s00367-013-0346-y

KRAUSE, P.; BOYLE, D.P. and BÄSE, F.: Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. Adv. in Geosc., Vol. 5, 89–97, 2005.

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

LASSEN, H.; SIEFERT, W. and GÖNNERT, G.: Windstauentwicklung in dem Tiefwasserbereich der südöstlichen Nordsee bei Sturmflutwetterlage. Die Küste, 64, 87–126, 2001.

LKN LANDESBETRIEB FÜR KÜSTENSCHUTZ,NATIONALPARK UND MEERESSCHUTZ SCHLESWIG-HOLSTEIN: Generalplan Küstenschutz der Landes Schleswig-Holstein, Fortschreibung 2012. Entwurf für die Anhörung der Verbände, 2012.

MERZ, R. and BLÖSCHL, G.: Flood frequency regionalisation – spatial proximity vs. catchment attributes. Journal of Hydrology, Volume 302, Issues 1–4, 283–306, 2005.

MIDDLETON, J. and THOMPSON, K.: Return periods of extreme sea levels from short records. Journal of Geophysical Research 91, 11, 707, 1986.

MUDELSEE, M.; CHIRILA, D.; DEUTSCHLÄNDER, T., et al.: Climate Model Bias Correction und die Deutsche Anpassungsstrategie. Mitteilungen Deutsche Meteorologische Gesellschaft, 2–7 (in German), 2010.

MUDERSBACH, C. and JENSEN, J.: 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, 2010. http://dx.doi.org/10.1111/j.1753-318X.2009.01054.x

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

NEVES, C. and FRAGA-ALVES, M.I.: Testing extreme value conditions - an overview and recent approaches. Revstat – Statistical Journal, Vol. 6, # 1, 83–100, 2008.

NLWKN NIEDERSÄCHSISCHER LANDESBETRIEB FÜR WASSERWIRTSCHAFT, KÜSTEN- UND NATURSCHUTZ: Generalplan Küstenschutz Niedersachsen/ Bremen-Festland, 2007.

PIANI, C.; HAERTER, J.O. and COPPOLA, E.: Statistical bias correction for daily precipitation in regional climate models over Europe. Theor. Appl. Climatol., Vol. 99, 187–192, 2010.

PUGH, D.T. and VASSIE, J.M.: Extreme sea levels from tide and surge probability. Proceedings of the sixteenth Coastal Engineering Conference, 1, 911–930, 1979.

PUGH, D.T. and VASSIE, J.M.: Applications of the joint probability method for extreme sea level computations. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, 69, 959–975, 1980.

REGO, J.L. and LI., C.: Nonlinear Terms in Storm Surge Predictions: Effect of Tide and Shelf Geometry with Case Study from Hurricane Rita, J. Geophys. Res., 115, 2010. http://dx.doi.org/10.1029/2009JC005285

ROSBJERG, D.; MADSEN, H. and RASMUSSEN, P.F.: Prediction in partial duration serieswith generalized Pareto-distributed exceedances. Water Resources Research 28, 3001–3010, 1992.

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. and ZHANG, X.: 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, 109–230, 2012.

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

SIEFERT, W.: Umsatz- und Bilanz-Analysen für das Küstenvorfeld der Deutschen Bucht. Grundlagen und erste Auswertungen. Die Küste, 45, 1–57, 1987.

SIEFERT, W. und LASSEN, H.: Zum säkularen Verhalten der mittleren Watthöhen an ausgewählten Beispielen. Die Küste, 45, 59–70, 1987.

STENGEL, T. und ZIELKE, W.: Der Einfluss eines Meeresspiegelanstiegs auf Gezeiten und Sturmfluten in der Deutschen Bucht. Die Küste, 56, 93–118, 1994.

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

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

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

THOMPSON, K.R.; BERNIER, N.B. and CHAN, P.: Extreme sea levels, coastal flooding and climate change with a focus on Atlantic Canada. Natural Hazards 51, 139–150, 2009.

WAHL, T.; JENSEN, J.; FRANK, T. and HAIGH, I.D.: Improved estimates of mean sea level changes in the German Bight over the last 166 years. Ocean Dyn 61(5), 701–715, 2011.
http://dx.doi.org/10.1007/s10236-011-0383-x

WAHL, T.; HAIGH, I.D.; WOODWORTH, P.L.; ALBRECHT, F.; DILLINGH, D.; JENSEN, J.; NICHOLLS, R.J.; WEISSE, R. and WÖPPELMANN, G.: Observed mean sea level changes around the North Sea coastline from 1800 to present, Earth-Science Reviews, Vol.124, 51-67, 2013.
http://dx.doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.05.003

WALDEN, A.T.; PRESCOTT, P. and WEBBER, N.B.: An alternative approach to the joint probability method for extreme high sea level computations. Coastal Engineering 6, 71–82, 1982.

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

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

ZIELKE, W.: Numerische Modelle von Flüssen, Seen und Küstengewässern. Schriftenreihe des Deutschen Verbandes für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V., DVWK Schriften, Heft 127, 1999.

Die Küste, 84 (2016), 1-226

Die Küste, 84 (2016), 1-226

Eine partizipative und interdisziplinäre Gestaltung von Küstenschutzmaßnahmen auf den Halligen

Roger Häußling, Nenja Ziesen, Matthias Dorgeist und Elena Kaip

Zusammenfassung

Die Alltagskultur der Halligbewohner (mit der Bezeichnung Bewohner sind im Folgenden sowohl die Bewohnerinnen, als auch die Bewohner der Halligen gemeint) ist geprägt durch ihren besonderen Lebensraum, der durch Sturmflut- und Landunterrisiken gekennzeichnet ist, denen die Bewohner der einzigartigen Halligen mit ihren eingeschliffenen Traditionen und ihrem erfahrungsgenährten Wissen begegnen. Diese Alltagspraxen und Erfahrungen zur Sprache zu bringen und den Halligbewohnern Gehör zu schenken, stand im Teilprojekt B (03KIS094) im Fokus der soziologischen Begleitforschung zum Verbundprojekt „ZukunftHallig“ (JENSEN et al. 2016). Um die soziokulturellen und sozioökonomischen Bedingungen prospektiv und retrospektiv zu erfassen, wurden qualitative Interviews mit den Halligbewohnern durchgeführt und ausgewertet. Darüber hinaus wurden seitens der soziologischen Herangehensweise Zukunftswerkstätten mit Halligbewohnern und Ingenieuren initiiert, in denen zukünftige Küstenschutzvorkehrungen zum Erhalt dieses besonderen Lebensraumes entworfen wurden, die zum einen den örtlichen Gegebenheiten sowie dem Klimawandel und zum anderen einer örtlichen – sozialen und kulturellen – Akzeptanz gerecht werden können.

Schlagwörter

Halligen, Küstenschutz, Landunter und Sturmflut, Akzeptanz, qualitative Interviews, Zukunftswerkstatt, ZukunftHallig

Summary

The everyday culture of the inhabitants of Hallig is characterized by its special habitat, which is marked by storm tide and land submerged risks, which the inhabitants of the unique Hallig face with their ingrained traditions and their practical knowledge. Bringing up these daily practices and experiences, and listening to the inhabitants of Hallig were the focus of the accompanying sociological research (03KIS094) within the framework of the joint project "ZukunftHallig" (JENSEN et al. 2016). To understand the socio-cultural and socio-economic conditions, prospectively and retrospectively, qualitative interviews with the inhabitants of Hallig were conducted and evaluated. In addition, as a part of the sociological approach future workshops with the inhabitants of Hallig and engineers were initiated. In these workshops arrangements of future coastal protection to obtain this particular habitat, which can fulfill on the one hand the local conditions and climate change and on the other a local - social and cultural - acceptance, were designed.

Keywords

hallig, coastal protection, land submerged and storm tide, acceptance, qualitative interviews, future workshop, ZukunftHallig

Inhalt

1 Einleitung ... 46
2 Einblicke in die qualitativen Interviews mit den Halligbewohnern ... 47
2.1 Bewertung bisheriger Küstenschutzmaßnahmen und neue Küstenschutzvorschläge seitens der Bewohner von Hooge ... 48
2.1.1 Bewertung bisheriger Küstenschutzmaßnahmen ... 48
2.1.2 Neue Küstenschutzideen und Vorschläge der Bewohner ... 51
2.2 Bewertung bisheriger Küstenschutzmaßnahmen und neue Küstenschutzvorschläge seitens der Bewohner von Langeneß ... 54
2.2.1 Bewertung bisheriger Küstenschutzmaßnahmen ... 54
2.2.2 Neue Küstenschutzideen und Vorschläge der Bewohner ... 56
2.3 Bewertung bisheriger Küstenschutzmaßnahmen und neue Küstenschutzvorschläge seitens der Bewohner von Nordstrandischmoor ... 58
2.3.1 Bewertung bisheriger Küstenschutzmaßnahmen ... 58
2.3.2 Neue Küstenschutzideen und Vorschläge der Bewohner ... 59
2.4 Bewertung bisheriger Küstenschutzmaßnahmen und neue Küstenschutzvorschläge seitens der Bewohner von Oland ... 60
2.4.1 Bewertung bisheriger Küstenschutzmaßnahmen ... 60
2.4.2 Neue Küstenschutzideen und Vorschläge der Bewohner ... 61
2.5 Zusammenfassung ... 61
3 Die Zukunftswerkstätten auf den Halligen Hooge und Langeneß ... 62
3.1 Die Zukunftswerkstatt auf der Hallig Hooge ... 62
3.2 Die Zukunftswerkstatt auf der Hallig Langeneß ... 63
4 Zusammenfassung und Fazit ... 64
5 Schriftenverzeichnis ... 65

1 Einleitung

Wasserschutz- und Küstenschutzmaßnahmen erfordern im Hinblick auf eine nachhaltige Gestaltung verstärkt eine interdisziplinäre Zusammenarbeit. Entsprechend ist die wasserbauliche Praxis nicht bloß als eine Ingenieurstechnik, sondern vielmehr als gesellschaftliches und kulturelles Anliegen zu betrachten, indem Hochwasser- und Küstenschutz, Nachhaltigkeit sowie kulturelle Natur-, Technik- und Weltbilder als Zusammenhänge berücksichtigt werden müssen (PARODI 2007).

Dieser interdisziplinäre Brückenschlag war auch bei dem Verbundprojekt ZukunftHallig (JENSEN 2014) 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 und Ingenieuren eingenommen. Dabei standen besonders die Wünsche, Sorgen, Mitsprachebedürfnisse und die Akzeptanz der Halligbewohner im Fokus der Aufmerksamkeit. Zukünftige Küstenschutzvorkehrungen zum Erhalt der Halligen als besonderer Lebensraum 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, qualitative Interviews auf den Halligen Hooge, Langeneß, Nordstrandischmoor und Oland 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 Kap. 2).

In einem zweiten Schritt wurde in Form von Zukunftswerkstätten der Ideenaustausch zwischen Halligbewohnern und Ingenieuren organisiert (siehe Kap. 3). Aufgabe der soziologischen Begleitforschung war hierbei die Vermittlung zwischen unterschiedlichen Wissens- und Interessensbeständen, 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 zukünftiger potentieller Küstenschutzstrategien mit der Akzeptanz, den Anliegen sowie kritischen Befürchtungen seitens der Halligbewohner in Einklang gebracht werden. Zentral waren hierbei auch ein integratives Miteinander und ein interdisziplinärer Brückenschlag, zwischen einer soziologischen Akzeptanzforschung und einer technischen Machbarkeitsprüfung seitens des Wasserbauingenieurwesens (siehe WÖFFLER und SCHÜTTRUMPF in diesem Band). Ziel dieses interdisziplinären Zusammenarbeitens war es, umfassende Ergebnisse zu zeitigen und zu einem, alle Perspektiven einbeziehenden, Erkenntnisgewinn beizutragen.

2 Einblicke in die qualitativen Interviews mit den Halligbewohnern

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 methodologisch basierend auf der qualitativen Inhaltsanalyse nach MAYRING (KUCKARTZ 2012; MAYRING 2005/2010). Mittels theoriegeleiteter und empiriegeleiteter Kategorienbildung wurde ein Codesystem erstellt (Wörterbuch-basierter Ansatz), an dem sich die Analyse orientierte. Entlang dieser Kriterien erfolgte eine mehrstufige qualitative Inhaltsanalyse. Dabei ergaben sich die folgenden Hauptkategorien bzw. Hauptcodes: *Küstenschutz*; *Sturmflut* und *Landunter*; *Infrastruktur*; *Zentrale Akteure*; *Naturschutz*; *Landwirtschaft*; *Tourismus* und *Kulturelle Traditionen*. 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* galt 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, neun Interviews auf Nordstrandischmoor und sechs Interviews auf Oland geführt und ausgewertet. Im Folgenden soll ein Einblick in die qualitative Auswertung gegeben werden, indem ausgewählte Aspekte vorgestellt werden, die eine besondere Relevanz für das Ziel des Projektes – die Entwicklung von nachhaltigen Bewirtschaftungs- und Küstenschutzstrategien – zeigen. So werden die *Bewertungen bisheriger Küstenschutzmaßnahmen* sowie *neue Ideen und Vorschläge der Bewohner bezüglich des Küstenschutzes* für die jeweiligen Halligen Hooge, Langeneß, Nordstrandischmoor und Oland zusammenfassend dargelegt.

2.1 Bewertung bisheriger Küstenschutzmaßnahmen und neue Küstenschutzvorschläge seitens der Bewohner von Hooge

2.1.1 Bewertung bisheriger Küstenschutzmaßnahmen

Zu den *Lahnungen* äußern sich insgesamt 18 der 32 befragten Bewohner auf Hooge: Insgesamt werten sieben 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. Zwei weitere Bewohner priorisieren Buschlahnungen, da diese aufgrund eigener Erfahrungen effektiver seien. Für einen weiteren Bewohner sind Buschlahnungen, ohne die Funktion, Land zu gewinnen, jedoch unwichtig. Zwei 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 beeinflussen und regulieren würden. Jedoch müsste hier seiner Ansicht nach 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* (letzte Warftverstärkung auf Hooge im Jahr 2007) äußern sich insgesamt 14 Bewohner: Zwei Bewohner beschreiben wertungsfrei die letzten Warfterhöhungen und Warftaufschüttungen und zwei 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 als „beste Aufwarftung“ diejenige 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 sieben 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. An dieser Stelle wird ein differenziertes, heterogenes Meinungsbild auf den Halligen deutlich. 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 die 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 Kritik speziell an der Aufwarftung der Warften 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 der Hallig Hooge.

Zu *Sommer- und Ringdeichen* als bisherige Küstenschutzmaßnahmen äußern sich insgesamt elf Bewohner: Dabei bewerten zwei 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. Vier 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 sollte. 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. Zwei Bewohner betonen spezifisch die Wichtigkeit des Ringdeiches und stellen heraus, dass man sich mit diesem sicher fühle.

Zu dem *Igel* als Küstenschutzmaßnahme äußern sich sieben Bewohner: Dabei sprechen sechs 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 sechs der befragten Bewohner: Dabei nennen drei 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 gäbe 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 zwingend notwendig 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 „Verschottungs-Schau" jedes Jahr durchzuführen sei, um zu überprüfen, ob die Schotten 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 vier Bewohner: Zwei dieser Interviewten empfinden Elastocoast als nicht passenden 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 Wirksamkeit jedoch als positiv ein, wenn man vernünftig und naturschützend damit umgehe.

Zu den *Deckwerken* und der *Steindecke* äußern sich drei der befragten Bewohner: Dabei sind zwei 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 gegen 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.

Zwei 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 zwei 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 die Schleusentore gut funktionieren würden, sodass das Wasser nach einem Landunter wieder abfließen könne.

Zwei 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 müsste.

Zu der *Stöpe* äußern sich zwei Bewohner: Dabei spricht ein Bewohner seine Unzufriedenheit mit der (ehemaligen) zu hohen Bauweise der Stöpe aus, während diese korrekt auf Oland angebracht worden wäre und dort funktioniere. Ein zweiter Interviewter betont die Funktion der Stöpe, um Wasser abzuhalten, und sieht diese auch zukünftig „im Gespräch", vor allem in Anbetracht potentiell steigender Sturmfluten.

Bezüglich des *Schutzraumes* geben zwei 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 eigene Haus sei aus seiner Sicht zu tief gebaut und dementsprechend nicht optimal geschützt.

2.1.2 Neue Küstenschutzideen und Vorschläge der Bewohner

Zu *mobilen Schläuchen* und *mobilen Wänden* äußern sich insgesamt 16 Bewohner: Dabei sprechen sechs 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 standhalten würden. Neben dieser Argumentation wird angeführt, dass zum einen junge Menschen auf den Halligen fehlen würden, 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 wäre diesen Maßnahmen gegenüber dann aufgeschlossen, wenn traditionelle Küstenschutzvorkehrungen nicht mehr helfen könnten. Die mobilen Wände werden explizit von weiteren fünf 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 drei weitere Bewohner ihre Ablehnung explizit 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 einen *Ringdeich* und eine *Deicherhöhung* als Küstenschutzmaßnahmen äußern sich 14 Bewohner: Dabei befürworten sechs 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, gibt jedoch auch die Kosten- und Eigentumsfrage zu bedenken. Zwei 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 drei Bewohner eine Deicherhöhung, unter anderem aufgrund der Deichstabilität und des Kostenfaktors, ablehnen, würden drei Bewohner einer Erhöhung unter dem Sicherheitsaspekt der Bewohner zustimmen.

Zu der Idee eines *hydraulischen Hauses* äußern sich insgesamt 13 der befragten Bewohner: Sieben Bewohner stehen dieser Idee positiv und mit Interesse gegenüber. Dabei sehen zwei dieser Bewohner diese Idee jedoch eher in Kombination mit anderen Maßnahmen, wie einer Häuseraufstockung und betonen, 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 vier Bewohner diesen Vorschlag ab, unter anderem hinsichtlich der Machbarkeit, des Kostenfaktors sowie der damit einhergehenden Veränderungen auf der Hallig. Zwei weitere Bewohner äußern keine klare Ablehnung, jedoch eine deutliche Skepsis gegenüber hydraulischen Häusern. Einer dieser Befragten betrachtet diese Art der Technologie als hochkomplex sowie 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 müsste, aber ein Festhalten an traditionellen Maßnahmen utopisch wäre.

Zu einer potentiellen *Aufwarftung* äußern sich elf Bewohner: Dabei erachten sieben Bewohner eine Aufwarftung und Warfterhöhung als wünschenswert, notwendig und vorstellbar, um den Schutz der Halligbewohner zu optimieren. Vier Bewohner sehen dies allerdings nicht als Ideallösung und lehnen eine Aufwarftung ab, unter anderem, da dies zu teuer sei und das Sichtfeld einschränke. Einer dieser Befragten würde einer Aufwarftung erst in der nächsten Generation zustimmen und sieht derzeit keine Notwendigkeit dazu.

Über eine potentielle *Aufstockung der Häuser oder einen Neubau* äußern sich sechs der befragten Hooge-Bewohner: Dabei betrachten drei Bewohner die Idee einer Aufstockung der Häuser als 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 sollte. Zwei 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 – aus seiner Sicht – einzig vorstellbare bauliche Maßnahme an den 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 sechs Bewohnern herausgestellt: Dabei betonen drei Bewohner ein Festhalten am traditionellen, halligtypischen Küstenschutz. Ein Bewohner befürchtet, dass das Halligtypische mit neuen Maßnahmen generell verloren gehe. Zwei Bewohner betonen hingegen, dass ein Festhalten an traditionellem Küstenschutz nicht fokussiert werden sollte, wenn diese Maßnahmen nicht mehr helfen würden.

Schwimmende Häuser werden von fünf Bewohnern bewertet: Dabei äußern vier Bewohner ihre Ablehnung gegenüber 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.

Explizit zu einer *Warftabflachung* äußern sich zwei Bewohner: Während ein Befragter eine Warftabflachung ablehnt, sieht ein weiterer Interviewter eine Notwendigkeit dessen. Auch hier zeigt sich ein heterogenes, teils kontroverses Meinungsbild. 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.

Ein 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 etwaige Maßnahmen auch gegen die Natur und die natürliche Entwicklung seien.

Eine *Verschottung aller Häuser* auf den Halligen sowie die Instandhaltung der vorhandenen Schotten werden von zwei Bewohnern als Vorschläge befürwortet, da dies struktursichernde Maßnahmen seien.

Darüber hinaus lassen sich die folgenden Einzelaussagen diesem Themenkomplex zuordnen: Ein Bewohner wünscht sich *Stöpen* 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 könnten. 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* und zu ersetzen, 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 wären aus seiner Sicht komplette Pfahlbauten. Ein weiterer Bewohner äußert den Vorschlag, die *ganze Warft hochfahrbar zu gestalten*. Ein Interviewter schlägt eine *Mole* als Bau- und Schutzmaßnahme vor. 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 möglich sei. Ein Bewohner betont die Notwendigkeit einer *intensiveren Pflege und Konzeption der Lahnungen*. *Verschottungsmechanismen in Kombination mit einer Warfterhöhung* werden als Alternativlösung zu den mobilen Wänden von einem Interviewten beschrieben, 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.

2.2 Bewertung bisheriger Küstenschutzmaßnahmen und neue Küstenschutzvorschläge seitens der Bewohner von Langeneß

2.2.1 Bewertung bisheriger Küstenschutzmaßnahmen

Insgesamt äußern sich 26 Bewohner der 31 Interviewten auf Langeneß zu den *Warft-Erhöhungen* und Anpassungen als Küstenschutzmaßnahme (letzte Warftverstärkung auf Langeneß im Jahr 2005). Während sieben Bewohner die Methodik der bisherigen Warft-Erhöhung beschreiben sowie auch ihre Wichtigkeit betonen und weitere sieben Bewohner ihre Zufriedenheit mit der bisherigen Umsetzung äußern, kritisieren elf 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 die interviewten 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. Vier Bewohner haben keine Bedenken bezüglich Elastocoast und erkennen dessen Vorteile, u. a. in der Arbeitserleichterung. Drei weitere Bewohner wägen sowohl die Vor-, als auch die Nachteile ab, während weitere drei 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. Drei Bewohner beschreiben die ehemalige Funktion der Lahnungen für die Landgewinnung. Ein Bewohner kritisiert die Aufgabe von Vorlahnungen zugunsten des Naturschutzes und ein weiterer Bewohner äußert sich kritisch zu einer fehlenden Lahnungspflege. Ein Bewohner gibt an, keine ausreichenden Kenntnisse über die Wichtigkeit der Reparaturarbeiten an den Lahnungen zu besitzen.

Zu den *Schotten* als bisherige Küstenschutzmaßnahme äußern sich elf Bewohner: Dabei betonen fünf 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 wurden. Zwei weitere Bewohner geben Auskunft, dass Schotten bei ihnen vorhanden seien, für zwei weitere Bewohner sind diese jedoch unwichtig und auch nicht vorhanden, u. a. weil sie in höher liegenden Häusern wohnen. Ein weiterer Bewohner sagt aus, dass zwar Schotten vorhanden seien, aber nicht genutzt würden und ein Bewohner gibt zu bedenken, dass diese traditionelle Maßnahme zukünftige Generationen ohnehin nicht nutzen würden: „[…] 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 auch ein potentieller generationaler Unterschied bezüglich der traditionellen Küstenschutzmaßnahmen ersichtlich.

Ebenfalls elf der 31 befragten Bewohner äußern sich zu dem *Igel* als Küstenschutzmaßnahme: Hier betonen fünf Interviewte die Wichtigkeit des Igels und ein Bewohner äußert Zufriedenheit mit dem Igel. Drei Bewohner beschreiben jedoch eine fehlende Ausarbeitung des Igels. Ein Bewohner beschreibt den bisherigen Igel allgemein und stellt Überlegungen bezüglich eines neuen Igels in Verbindung mit einem höheren Deich an. Ein Bewohner äußert fehlende Kenntnisse über die Wichtigkeit oder einen Nachbesserungsbedarf des Igels.

Weitere zehn Bewohner äußern sich zu den *Steinbuhnen* und der *Steinkante*: Dabei heben sechs 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 vier weitere dieser zehn Bewohner hervor.

Acht 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 sechs 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 werden von fünf 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 vier weiteren Bewohnern hervorgehoben: Dabei beschreiben zwei 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 und vermutet durch diesen eine schnellere Überflutung.

Weitere vier Bewohner äußern sich zur *Schleuse* als Küstenschutzmaßnahme, wobei zwei Bewohner die Funktionsweise der Schleuse beschreiben und zwei Bewohner deren Wichtigkeit hervorheben.

Zudem beschreiben drei Bewohner die *Bauweise der traditionellen Hallig-Häuser* als eine positive sowie beständige Küstenschutzmaßnahme.

Weitere drei 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 drei 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 erneut deutlich, dass kein homogenes Meinungsbild unter den Halligbewohnern bezüglich 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 zwei Bewohner angeben, *keine Meinung* zur Wichtigkeit der traditionellen Küstenschutzmaßnahmen aufgrund fehlender Kenntnisse zu haben.

2.2.2 Neue Küstenschutzideen und Vorschläge der Bewohner

Zur Idee eines *hydraulischen Hauses* äußern sich insgesamt 16 der 31 Befragten: Dabei lehnen elf Bewohner diesen Vorschlag ab und für fünf Bewohner ist diese Konzeption für kommende Generationen vorstellbar, wenn dies technisch machbar sei.

Die elf 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 elf Bewohnern als neue Idee im Küstenschutz bewertet: Aufgrund einer potentiellen Inkompatibilität mit der alternden Bevölkerung, eines fehlenden festen Untergrundes sowie aufgrund des Wellenganges und des Windes lehnen fünf dieser elf 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." Fünf Bewohner halten mobile Wände oder Schläuche hingegen für vorstellbar, betonen jedoch auch die potentiellen Schwierigkeiten in der Umsetzung, u. a. erneut 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 Außensände, 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 Warft-Ersatz): „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, das 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 seien: „Aber vielleicht

in zwanzig, dreißig Jahren, dass die da mal vielleicht eine andere Entwicklung dort haben […]." Ein weiterer Bewohner schlägt 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 von acht Bewohnern als neue Idee genannt und präferiert. Ein Bewohner betont in diesem Zusammenhang die Notwendigkeit einer staatlichen Bezuschussung und ein weiterer Interviewter die Notwendigkeit einer gleichzeitigen Warfterhöhung.

Der Vorschlag, „*Parterre dicht machen und ein Stock hoch bauen*", ist zwar für zwei Bewohner derzeit nicht realisierbar und wird als unnötig erachtet, jedoch präferieren sechs Bewohner diese Idee, da dies 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 würden.

Einen *Ringdeich* halten fünf Bewohner zur Wasserberuhigung für vorstellbar, zwei 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 bezüglich der Naturschutzrichtlinien schwer umsetzbar wäre. Ein Bewohner präferiert in diesem Kontext einen halben Ringdeich.

Fest-Installierte Wände vor der Warft werden von allen sechs Bewohnern, die sich zu dieser neuen Küstenschutzidee äußern, abgelehnt, u. a. aufgrund des Wellenganges.

Eine *Nachbesserung der Warften und Aufwarftung* wird von fünf Bewohnern vorgeschlagen, ein weiterer Bewohner sieht in diesem Kontext – aufgrund des Gewichtes – jedoch keine weiteren Aufwarftungsmöglichkeiten.

Weitere vier 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 vier Bewohnern geäußert: Dabei befürworten drei Interviewte eine Zusammenlegung der Küstenschutz- und Naturschutz- bzw. Ranger-Tätigkeiten, sodass schwere Küstenschutztätigkeiten von der jüngeren Generation übernommen würden und körperlich weniger belastende Tätigkeiten von älteren Bewohnern ausgeführt werden könnten. Ein weiterer Bewohner befürwortet ein verstärktes Zusammenarbeiten der Gemeinde- und Küstenschutzarbeiter sowie der Zivildienstleistenden 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 im Küsten- und Naturschutz.

Das Konzept von *Pfahlhäusern* wird von zwei 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."

Abschließend sei zur Verdeutlichung des heterogenen Meinungsbildes auf den Halligen auf die folgenden Einzelnennungen verwiesen:

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 den 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 befürwortet eine *staatliche Bezuschussung der Sandsäcke*, 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 weiterer Interviewter 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."

2.3 Bewertung bisheriger Küstenschutzmaßnahmen und neue Küstenschutzvorschläge seitens der Bewohner von Nordstrandischmoor

2.3.1 Bewertung bisheriger Küstenschutzmaßnahmen

Insgesamt äußern sich alle neun interviewten Bewohner von Nordstrandischmoor zu den *Warft-Erhöhungen und Anpassungen* als Küstenschutzmaßnahme (letzte Warftverstärkung auf Nordstrandischmoor im Jahr 1978): Sieben Bewohner beschreiben allgemein die Methodik der bisherigen Warft-Erhöhungen und Anpassungen und auch sechs dieser Bewohner betonen die Wichtigkeit dieser Küstenschutzmaßnahme. Zwei Bewohner kritisieren die bisherige Umsetzung der Warft-Erhöhung. Drei Bewohner äußern Bedenken bezüglich der Finanzierung, da eine Warft-Erhöhung sehr teuer sei und deshalb nicht von den Bewohnern der Warft getragen werden könnte. Drei Bewohner sind der Meinung, dass eine Warft-Erhöhung nur noch bedingt möglich sei und man hierfür das Gewicht und den Untergrund berücksichtigen müsse: „Also eine Warft-Erhöhung kann man auch machen, aber es kommt darauf an, wie die Warft beschaffen ist."

Die Äußerungen der Bewohner in Bezug auf *Elastocoast* sind überwiegend gespalten. Insgesamt äußern sich fünf Bewohner zu dieser Maßnahme positiv. Hervorzuheben ist hier, dass keine Beeinträchtigungen durch Elastocoast gesehen werden und auch die Verarbeitung des Materials von vier Bewohnern als einfach charakterisiert wird. Drei Bewohner äußern Kritik an der Haltbarkeit des Materials, da es schnell Schaden nehme.

Acht Bewohner beschreiben die Funktion des *Deckwerks* und des *Igels*, um die Halligkante zu sichern und betonen, dass diese gut funktionieren würden und ebenso wichtig seien. Drei Bewohner geben zu bedenken, dass die Deckwerke und der Igel mehr Pflege bedürfen würden und man den Bau erweitern müsse.

Fünf Bewohner beschreiben und bewerten die *Holz-, Busch- und Steinlahnungen*, wobei jeder dieser Interviewten die Wichtigkeit dieser Maßnahmen hervorhebt. Drei Bewohner betonen die Funktion der Lahnungen, den Wellenschlag zu verringern. Ebenso äußern drei Bewohner Kritik an der Regelung, große Ausgleichsflächen im Gegenzug für den Lahnungsbau aufbringen zu müssen.

Die *Schotten* werden von vier Bewohnern 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 aus, dass nicht alle Bewohner auf Nordstrandischmoor im Besitz von Schotten seien.

Die *Schleusen* werden von zwei Bewohnern genannt und als wichtig erachtet. Diese würden dazu dienen, die Hallig nach einem Landunter zu entwässern und wenn dies langsam geschehe, würde dies zu einem Wachstum der Hallig beitragen: „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."

Zwei Bewohner geben Auskunft, einen *Schutzraum* im Haus zu haben.

2.3.2 Neue Küstenschutzideen und Vorschläge der Bewohner

Zu der Idee eines *hydraulischen Hauses* äußern sich insgesamt acht der Befragten: Dabei lehnen sieben Bewohner diesen Vorschlag ab und ein Bewohner befürwortet diesen. Als Ablehnungsgrund wird vor allem das technische Risiko genannt: „Und was ist, wenn die Hydraulik nicht funktioniert?" Zudem wird eine große Wartungsintensität des Systems vermutet.

Von den sechs Bewohnern, die sich zu der Vorstellung von *schwimmenden Häusern* als künftige Küstenschutzstrategie äußern, lehnen vier Bewohner diese Maßnahme ab und zwei Bewohner können sich eine solche Strategie vorstellen. Die Kritik zeigt sich vor allem in einem geringen Vertrauen in die Funktionalität sowie in der Vorstellung, dass ein schwimmendes Haus nicht in das halligtypische Bild passe.

Mobile Wände werden von fünf Bewohnern als neue Idee im Küstenschutz bewertet und durchweg abgelehnt, mit dem Hauptkritikpunkt, dass die Wände nicht die nötige Stabilität für die rauen Verhältnisse an der Küste, mit Wellenschlag und starkem Wind, besäßen.

Ein *Hochsetzen der Häuser oder Aufstocken* wird von fünf Bewohnern genannt. Dabei äußern sich drei Interviewte positiv zu dieser Idee und einer von diesen Befragten habe bereits sein Haus dafür vorbereitet. Zwei Bewohner äußern Bedenken: „Das hängt ab davon, wie alt das Haus ist"; „Das Haus aufstocken ist für mich relativ – es würde das Fundament nicht mehr tragen."

Zu der Idee, *durchsichtige Wände fest zu installieren*, äußern sich vier Bewohner. Von diesen lehnt ein Bewohner diese Idee ab: „Da würde man sich wie in einem Terrarium fühlen." Drei Bewohner können sich solche Wände jedoch vorstellen. Sie merken aber an, dass diese dicht sein sollten, man die spezielle Beschaffenheit des Bauumfeldes beachten müsse und eine Übereinstimmung mit dem Naturschutz und der Landwirtschaft gegeben sein sollte.

Pfahlhäuser werden von vier Bewohnern bewertet: Zwei Bewohner können sich dieses Konzept als Küstenschutzstrategie nicht vorstellen, im Gegensatz zu den beiden anderen Bewohnern, die dieses Konzept auch als Alternative zur Warft-Erhöhung betrachten. Erneut zeigt sich eine heterogene, divergierende Meinungsvielfalt auf den Halligen.

Einen *Ringdeich* um die Warft, speziell um die Wellen vor der Warft zu brechen, halten zwei Bewohner für vorstellbar.

Abschließend seien noch folgende Einzelnennungen aufgeführt:

Ein Bewohner gibt Auskunft darüber, die *Schleusen* aktiv zu gebrauchen, um das Wachstum der Hallig zu fördern. *Gesetzliche Regelungen* sollten nach der Ansicht eines Bewohners 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 weiteren Bewohners die Halligkante vor weiteren Schäden.

2.4 Bewertung bisheriger Küstenschutzmaßnahmen und neue Küstenschutzvorschläge seitens der Bewohner von Oland

2.4.1 Bewertung bisheriger Küstenschutzmaßnahmen

Insgesamt äußern sich drei der sechs interviewten Bewohner von Oland zu den *Warft-Erhöhungen* und betonen die Wichtigkeit der bisherigen Warft-Erhöhung. Dabei berichtet eine Person von der Notwendigkeit einer neuen Warft-Erhöhung und weist darauf hin, dass der Boden und seine Höhe dabei nicht aus dem Blickfeld verloren gehen dürften (letzte Warftverstärkung auf Oland 1980).

Kritisch äußern sich zwei 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.

Zwei 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 würden.

Der Schutz des Hallig-Bodens durch den *Deich* sowie dessen Funktionsweise werden von zwei Bewohnern umschrieben, wobei ein Bewohner anmerkt, dass man bei einer Erhöhung noch über den Deich sehen können sollte, da man sich schon gegenwärtig auf die Zehenspitzen stellen müsse, um darüber zu schauen. Ein Bewohner betont neben der Wichtigkeit der hohen Deiche auch das Problem der künstlich angelegten Deiche, das darin bestehe, dass das Wasser von den Halligbewohnern selbst beseitigt werden müsse.

Die Wichtigkeit des *Dammes* bzw. des *Lorendammes* für den Schutz der Halligen wird von zwei Bewohnern betont.

Zudem lassen sich die folgenden Einzelaussagen in diesem Themenkomplex anführen: Ein Bewohner berichtet von der Wichtigkeit des *Igels* als Küstenschutzmaßnahme. Ein Bewohner befürwortet und betont die Wichtigkeit der *Deckwerke* als Küstenschutzmaßnahme, für den Erhalt der Hallig. Hinsichtlich der *Schleuse* betont ein Bewohner, dass er sie nicht als eine Küstenschutzmaßnahme betrachte, sondern als Wasserregulierungsmechanismus. Weiterhin äußert sich ein Bewohner als zufrieden mit der *Abflachung* und ein weiterer Bewohner kann dazu keine klare Position beziehen, weil er Bedenken hinsichtlich der Stabilität des Bodens aufgrund seiner spezifischen Zusammensetzung aus Lehm und Torf hat.

Insgesamt werden die *traditionellen Küstenschutzmaßnahmen* nochmals von zwei Bewohnern in ihrer Wichtigkeit sowie Angemessenheit hervorgehoben.

2.4.2 Neue Küstenschutzideen und Vorschläge der Bewohner

Zur Idee eines *hydraulischen Hauses* äußern sich insgesamt drei der sechs Befragten: Dabei lehnen zwei Bewohner diesen Vorschlag ab und ein Bewohner betrachtet diese Konzeption zwar als vorstellbar, aber es fehle ihm konkretes Wissen zur genaueren Funktionsweise, um eine explizite Entscheidung treffen zu können. Als kritische Aspekte werden primär die hohe Wartungsbedürftigkeit und Probleme hinsichtlich einer Orientierung während eines Landunters im Dunkeln genannt.

Einen *Ringdeich* lehnen drei Bewohner hinsichtlich des Platzmangels bzw. der Einengung und der Zerstörung des Wattenmeers – aufgrund der Wegnahme des Bodens als Baumaterial für die Deiche – ab.

Die zwei Bewohner, die sich zu der Idee von *schwimmenden Häusern* als künftige Küstenschutzstrategie äußern, lehnen diese Idee ab, begründet unter anderem durch ein fehlendes Vertrauen in diese Art der Technik.

Mobile Schläuche und *mobile Wände* werden von zwei Bewohnern als Küstenschutzmaßnahmen bewertet und aufgrund des Wellenganges sowie des Windes abgelehnt. Ein Bewohner kann sich aber vorstellen, dass in zwanzig oder dreißig Jahren dieser Vorschlag umsetzbar wäre.

Der Vorschlag, „*Parterre dicht machen und ein Stock hoch bauen*", wird von einem Bewohner als vorstellbar bezeichnet. 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 […]." Auch hier wird ein heterogenes, divergierendes Meinungsbild unter den Halligbewohnern deutlich.

2.5 Zusammenfassung

Insgesamt wird die Bedeutung *traditioneller Küstenschutzmaßnahmen* hervorgehoben. Überwiegend einheitlich werden die bisherigen – traditionellen, vertrauten – Küstenschutzmaßnahmen als wichtig erachtet, vor allem die Lahnungen, Warften, der Deich und Igel. Dabei werden jedoch auch die Wartungsintensität sowie die Notwendigkeit der Instandhaltung und Pflege betont. Bezüglich *neuer Ideen und Vorschläge im Küstenschutz* zeigt sich ein heterogenes, teils stark divergierendes Meinungsbild der Bewohner. So stehen beispielsweise die befragten Bewohner der Hallig Hooge *hydraulischen Häusern* größtenteils offen gegenüber, während die Bewohner von Langeneß und Nordstrandischmoor diesem Vorschlag überwiegend ablehnend begegnen. Eine deutliche Skepsis gegenüber neuen Küstenschutzstrategien besteht vor allem hinsichtlich finanzieller Aspekte sowie einer technischen Machbarkeit. Auch wird deutlich, dass der Erhalt des Halligtypischen, des eigenen Lebensraums, den Bewohnern wichtig ist. Zudem werden der Wunsch nach einer aktiven Einbringung der Halligbewohner bei der Konstruktion und Implementation neuer Konzepte sowie eine Kritik an einem fehlenden Einbezug der Bewohner in der Vergangenheit aus der qualitativen Auswertung sichtbar.

Um das Meinungsbild bezüglicher neuer Küstenschutzmaßnahmen zur langfristigen und nachhaltigen Sicherung detaillierter im Diskurs zu erfassen und einen aktiven Einbezug der Halligbewohner zu zeigen, seien im Folgenden die Ergebnisse der Zukunftswerkstätten dargestellt.

3 Die Zukunftswerkstätten auf den Halligen Hooge und Langeneß

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 (JUNGK und MÜLLERT 1981). Die Werkstätten sind als wirkungsvolles demokratisches Bürgerbeteiligungsverfahren, Foren der Artikulation und als Ermächtigung von denjenigen gedacht, die von Planung betroffen sind.

Eine typische Zukunftswerkstatt beginnt 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 (STRACKE-BAUMANN 2009). 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. Im Folgenden findet sich eine Zusammenfassung der zentralen, von den Bewohnern präferierten Ideen bezüglich zukünftiger und nachhaltiger Küstenschutzmaßnahmen auf den Halligen.

3.1 Die Zukunftswerkstatt auf der Hallig Hooge

Insgesamt nahmen 22 Halligbewohner an dem Workshop auf Hooge am 17.06.2013 teil. In der *Kritikphase* galt es aufzuzeigen, was aus der Sicht der Teilnehmer nicht passieren dürfe, wenn man nachhaltige Sturmflut- und Küstenschutzmaßnahmen auf der Hallig umsetzt. 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 besteht. Auf diesen Aspekt wurde bei der Darlegung der qualitativ ausgewerteten Interviews (siehe Kap. 2) bereits mehrfach hingewiesen. Kritisch äußerten sich die Bewohner in der Zukunftswerkstatt auf Hooge vor allem zu den Bereichen Finanzen, Behörden, Landschaftsbild, Natur, Bevölkerung und Sonstiges.

In der anschließenden *Phantasiephase* konnten die Bewohner ihren eigenen Ideen ohne Einschränkungen freien Lauf lassen, im Hinblick auf die Leitfrage: „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. In Kleingruppen von circa vier Personen konnte jeder Teilnehmer auch mehrere Ideen einbringen, sodass in kürzester Zeit eine Vielzahl von Ideen generiert werden konnte. Nach dieser Phase sollten die Kleingruppen sich jeweils für vier Vorschläge 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. eventuell mit anderen Ideen zu kombinieren.

Nach dieser Vorstellung wurden aus dem entstandenen reichhaltigen Ideen-Pool (insgesamt 22 generierte Ideen) die fünf Vorschläge herausgegriffen, die am meisten Zustimmung von allen Teilnehmern der Zukunftswerkstatt erhielten. Die Auszählung der Abstimmung ergab dann das folgende Ranking:

Tabelle 1: Präferierte Küstenschutzideen der Bewohner (Zukunftswerkstatt Hooge).

1)	Die Außensände verbinden und durch Bepflanzung verstärken. Dadurch die Sedimentation anregen und sie als Wellenbrecher nutzen.
2)	Den Wellenschlag auf die Warften durch Raupflasterung der Deckwerke, eine hydraulische Erhöhung der Außenböschung oder Installationen am Warftfuß vermindern.
3)	Das „Wasser mit Wasser" bekämpfen, indem man einen Schlauch an der Warftkante befestigt, der sich bei steigenden Wasserständen füllt und die Warft schützt.
4)	Als Wellenbrecher einen Ringdeich vor die Warft bauen.
5)	Die Warft mit ausfahrbaren Stahlwänden ausrüsten, die im Fall einer Sturmflut die Warft schützen. Diese könnten bei der nächsten Aufwarftung eingebaut werden.

In der abschließenden *Realisierungsphase* sollten die Teilnehmer die fünf präferierten Ideen spezifischer hinsichtlich einer Konkretisierung und potentiellen Umsetzung diskutieren. Diese in den Zukunftswerkstätten generierten und diskutierten Ideen wurden anschließend im Rahmen des interdisziplinären Verbundprojektes seitens der Wasserbauingenieure des IWW der RWTH-Aachen aufgegriffen und in Hinblick auf ihre hydrodynamische Wirksamkeit, technische Betriebssicherheit und Machbarkeit überprüft (siehe WÖFFLER und SCHÜTTRUMPF in diesem Band).

3.2 Die Zukunftswerkstatt auf der Hallig Langeneß

Insgesamt haben 31 Personen an dem Workshop auf der Hallig Langeneß am 18.06.2013 teilgenommen. Auch hier galt es in der *Kritikphase* aufzuzeigen, was aus der Sicht der Teilnehmer nicht passieren dürfe, wenn man nachhaltige Sturmflut- und Küstenschutzmaßnahmen auf der Hallig umsetzt. Wie auf Hooge konnte ein sehr heterogenes Meinungsbild der Bewohner festgestellt werden, sodass einige geäußerte Kritikpunkte zu den unterschiedlichen Themenbereichen – Bauliches, Sicherheit, Landschaftsbild, Natur, Wirtschaft und Finanzen, Organisatorisches, Wohnsituation und Sonstiges – im Widerspruch zueinander standen. Die *Phantasiephase* der Zukunftswerkstatt auf Langeneß orientierte sich ebenfalls, wie auf Hooge, an der Leitfrage: „Was wären die besten nachhaltigen Sturmflut- und Küstenschutzmaßnahmen auf der Hallig, die dem Klimawandel Rechnung tragen?" Äquivalent zu der Zukunftswerkstatt auf Hooge konnte auch hier innerhalb kürzester Zeit eine Vielzahl von insgesamt 23 Ideen generiert werden, über die die Bewohner abstimmten. Die meiste Zustimmung erhielten die folgenden fünf Vorschläge bezüglich zukünftiger, nachhaltiger Küstenschutzmaßnahmen:

Tabelle 2: Präferierte Küstenschutzideen der Bewohner (Zukunftswerkstatt Langeneß).

1)	Optimierung der Warftverstärkung durch Abflachung, Rauhigkeitseinfluss/Wellenauflauf reduzieren und Häuser anheben.
2)	Automatische Warfterhöhung durch Wasserkraft.
3)	Komplette Warfterhöhung/Neubau.
4)	Wirkungsvolle Schutzräume in den Häusern einrichten.
5)	Einen Deich von Sylt bis Eiderstedt und Öffnung desselben mit Gezeitenkraftwerken.

In der abschließenden *Realisierungsphase* der Zukunftswerkstatt diskutierten die Teilnehmer die fünf präferierten Ideen spezifischer hinsichtlich einer Konkretisierung und potentiellen Umsetzung. Auch diese von den Bewohnern präferierten Ideen wurden anschließend seitens der projektbeteiligten Wasserbauingenieure des IWW der RWTH-Aachen in Hinblick auf ihre hydrodynamische Wirksamkeit, technische Betriebssicherheit und Machbarkeit überprüft (siehe WÖFFLER und SCHÜTTRUMPF in diesem Band).

Im Anschluss wurden die von den Bewohnern präferierten und auf ihre Machbarkeit geprüften Ideen, neben den allgemeinen Projektergebnissen, den Hallig-Bewohnern erneut präsentiert und zur Diskussion gestellt.

4 Zusammenfassung und Fazit

Die Einbindung der Soziologie im Verbundprojekt „ZukunftHallig" hat wesentliche und zentrale Aspekte für die Entwicklung von nachhaltigen Küstenschutz- und Bewirtschaftungsstrategien offenbart, die entscheidend für eine Akzeptanz der ansässigen Bevölkerung sind. In diesem Kontext zeigt eine Auswertung der durchgeführten Interviews mit den Halligbewohnern von Hooge, Langeneß, Nordstrandischmoor und Oland, dass ein heterogenes Meinungsbild besteht, an das individualisierte Küstenschutzmaßnahmen am ehesten anschließen können. Zudem konnte festgestellt werden, 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.

Weiterhin 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. Im Kontext dessen zeigt sich auch die Notwendigkeit, dass man mit den beteiligten Akteuren vor Ort im Gespräch bleibt und diese mit einbezieht, um eine höhere Akzeptanz und Kooperation zu erhalten. Die im Rahmen dessen von den Halligbewohnern präferierten Ideen wurden aufgegriffen und von den projektbeteiligten Wasserbauingenieuren auf ihre Machbarkeit hin überprüft (siehe Wöffler und Schüttrumpf in diesem Band).

Vor allem der gelungene interdisziplinäre Brückenschlag zwischen einer soziologischen Akzeptanzforschung und einer Machbarkeitsprüfung seitens des Wasserbauingenieurwesens hat eine umfassendere Einsicht in das Untersuchungsgebiet sowie ein grundlegenderes Verständnis für die Alltagskultur in dem besonderen Lebensraum der Halligen ermöglicht, in dem aufgrund von Veränderungen, unter anderem klima- aber auch

soziodemographisch bedingt, neue ingenieursbezogene Konzepte notwendig werden, um die Halligen zu erhalten. Es konnte gezeigt werden, welche Maßnahmen die Bewohner für ihre Hallig präferieren sowie akzeptieren und gleichzeitig, welche dieser Maßnahmen real umsetzbar sind. An diese gewonnenen Erkenntnisse kann zukünftig in Form eines Maßnahmenkataloges angeschlossen werden.

5 Schriftenverzeichnis

JENSEN, J.; ARNS, A.; SCHÜTTRUMPF, H.; WÖFFLER, T.; HÄUßLING, R.; ZIESEN, N.; JENSEN, F.; VON EYNATTEN, H.; SCHINDLER, M. und KARIUS, V.: Zukunft Hallig – Entwicklung von nachhaltigen Küstenschutz- und Bewirtschaftungsstrategien für die Halligen unter Berücksichtigung des Klimawandels. Die Küste, 84, 2016.

JENSEN, J.: Abschlussbericht zur Entwicklung von nachhaltigen Küstenschutz- und Bewirtschaftungsstrategien für die Halligen unter Berücksichtigung des Klimawandels (ZukunftHallig), 2014.

JUNGK, R. und MÜLLER, N.R.: Zukunftswerkstätten. Wege zur Wiederbelebung der Demokratie. Hoffmann und Campe, Hamburg, 1981.

KUCKARTZ, U.: Qualitative Inhaltsanalyse. Methoden, Praxis, Computerunterstützung. Beltz, Weinheim, 2012.

MAYRING, P.: Qualitative Inhaltsanalyse. Grundlagen und Techniken. Beltz-Verlag, Weinheim/Basel, 2010.

MAYRING, P.: Einführung in die qualitative Sozialforschung: Eine Anleitung zu qualitativem Denken. Beltz-Verlag, Weinheim/Basel, 2005.

PARODI, O.: Massivwasserbau und Naturnaher Wasserbau. Weltbilder, Nachhaltigkeit, Ethik. In: Technikfolgenabschätzung – Theorie und Praxis 16. Jahrgang (Heft 2), 88–94, 2007.

STRACKE-BAUMANN, C.: Nachhaltigkeit von Zukunftswerkstätten. Stiftung Mitarbeit, Bonn, 2009.

Glossar

Buhne:	Wand-/Dammartiges Bauwerk im Küstenschutz.
Igel:	Wellenbrecher-Konstruktion.
Lahnungen:	Uferschutzanlage, meist aus Holzpflock-Reihen.
Stöpe:	Verschließbarer Durchlass für Verkehrswege; Straßenführung durch einen Deich zweiter Linie wird bei Gefahr (Sturmflut/Hochwasser) geschlossen.

Die Küste, 84 (2016), 1-226

Die Küste, 84 (2016), 1-226

Risikoanalysen und Entwicklung neuer Küstenschutzkonzepte für die Halligen

Theide Wöffler und Holger Schüttrumpf

Zusammenfassung

Die im Bereich des Schleswig-Holsteinischen Wattenmeeres liegenden Inseln und Halligen sind im Wesentlichen durch Gezeiten, ausgedehnte Prielsysteme, das flache Relief des Meeresbodens und Sturmfluten geprägt. Die im Rahmen des Projekts ZukunftHallig (JENSEN 2014) 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. Das vorrangige Ziel im Teilprojekt B (03KIS094) des Verbundprojektes „ZukunftHallig" (JENSEN et al. 2016) ist die Entwicklung von nachhaltigen Bewirtschaftungskonzepten beziehungsweise Küstenschutzstrategien und -maßnahmen für die nordfriesischen Halligen. Dafür werden Impulse und Ideen im Rahmen von Zukunftworkshops generiert, bei denen die Halligbewohner ihre eigenen Ideen für neue Hochwasserschutzkonzepte unter wissenschaftlicher Begleitung entwickeln. Die anschließende wasserbauliche Bewertung stellt sicher, dass sowohl hydrodynamisch wirksame als auch von der Bevölkerung akzeptierte Maßnahmen identifiziert werden können. Die gewonnenen Ergebnisse stellen 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 dar.

Schlagwörter

Halligen, Klimawandel, Meeresspiegelanstieg, nachhaltige Küstenschutzkonzepte, ZukunftHallig

Summary

The ten North Frisian Hallig islands are located in Schleswig-Holstein's part of the UNESCO world heritage Wadden Sea. They are of worldwide uniqueness and strongly influenced by tides, wide systems of tidal inlets and the shallow relief of the sea bottom. The unique features of these islands are the lack of dikes and the fact that the houses are built on artificial dwelling mounds in order to protect the inhabitants and their goods against frequently occurring inundations during storm surge seasons. In sub project B (03KIS094) of the research project "ZukunftHallig" (JENSEN 2014; JENSEN *et al. 2016), new impulses and ideas for future protection measures are generated during future workshops where the inhabitants can develop their own coastal protection concepts under scientific advisory. The following evaluation from the hydraulic engineering perspective guarantee hydrodynamic effective and social accepted measures. The results provide a scientific contribution to future sustainable coastal protection measures in the area of the North Frisian Wadden Sea. Furthermore, partial results also represent an extension of knowledge for other coastal areas.*

Keywords

small islands, climate change, sea level rise, sustainable coastal protection concepts, ZukunftHallig

Inhalt

1 Einleitung ... 68
2 Entwicklung von alternativen Küstenschutz- und Bewirtschaftungsstrategien ... 70
2.1 Bewertung der Ideen der Zukunftworkshops ... 71
2.2 Bepflanzung und Verbindung der Außensände ... 72
2.3 Raupflasterung der Warften ... 75
2.4 Mobiler Deichschlauch ... 76
2.5 Ringdeich als Wellenbrecher vor die Warft ... 78
2.6 Hydraulische Hochwasserschutzwand ... 82
2.7 Warftverstärkung durch Abflachung, Raupflasterung und Freiborderhöhung ... 83
2.8 Automatische Warfterhöhung durch Wasserkraft ... 87
2.9 Wirkungsvolle Schutzräume in den Häusern einrichten ... 88
2.10 Eindeichung des Wattenmeeres ... 88
3 Ergebnisse ... 89
3.1 Hydrodynamische Wirksamkeit ... 89
3.2 Betriebssicherheit ... 89
3.3 Bauaufwand ... 90
3.4 Landschaftsbild ... 90
3.5 Naturschutz ... 90
3.6 Akzeptanz ... 91
3.7 Ergebnis ... 91
4 Zusammenfassung und Ausblick ... 92
5 Schriftenverzeichnis ... 93

1 Einleitung

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 Arbeitspakete der folgenden Untersuchungen des Vorhabens ZukunftHallig-B zu den unterschiedlichen Teilbereichen der Halligen dargestellt.

Der Bereich A im unteren Teil der Abb. 1 umfasst das See- beziehungsweise Wattgebiet vor den Halligen. Für diesen Bereich wurden die vorherrschenden hydrologischen Bedingungen untersucht und der Aufbau eines numerischen Modells zur Simulation der Seegangsverhältnisse vorgenommen. Dieses Arbeitspaket dient somit der Bestimmung

der Randbedingungen der in den folgenden Schritten durchgeführten Untersuchungen für die übrigen Teilbereiche.

Der Bereich B beinhaltet das Gebiet der Halligkante. Für diesen Bereich wurden physikalische und numerische Untersuchungen zur Entwicklung eines Bemessungsansatzes für Halligraustreifen durchgeführt.

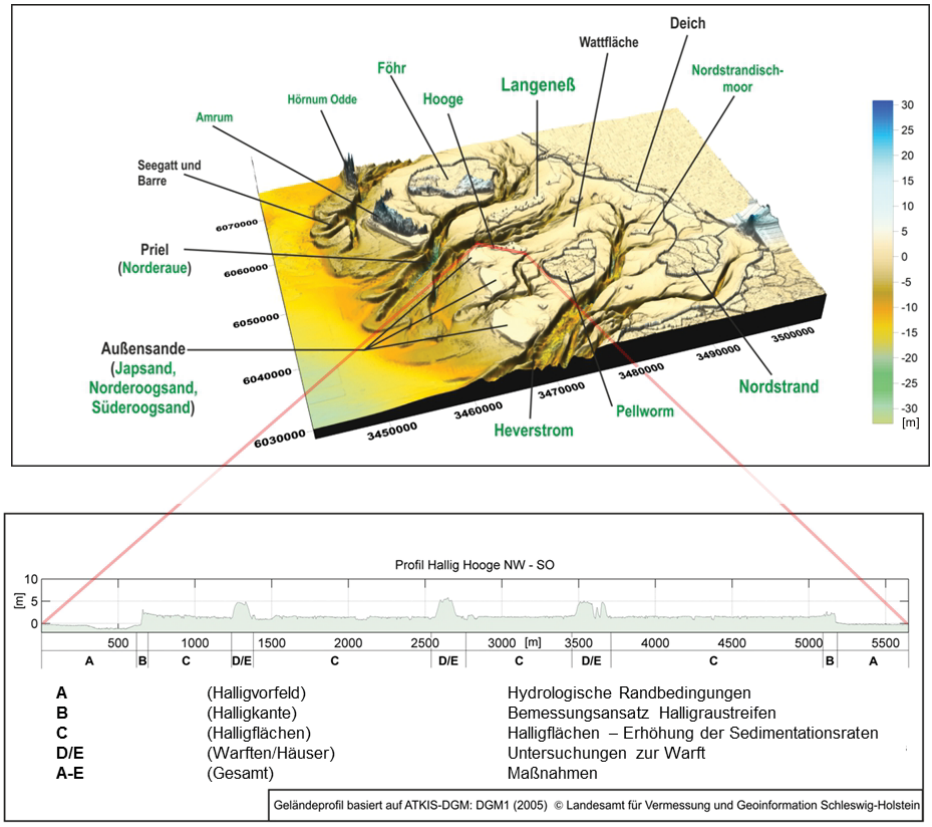

Abbildung 1: Untersuchungsgebiet und Zuordnung der Untersuchungen zu den unterschiedlichen Halligabschnitten; Bathymetrie und Topographie des nordfriesischen Wattenmeeres (Verschnitt aus Wattgrundkarten, Seekarten, DGM1 und DGM25).

Der Bereich C umfasst die eigentlichen Halligflächen. Für diese wurden sowohl in-situ-Messungen im Entwässerungsgebiet der Sieltoranlage Osterwehl als auch numerische Simulationen durchgeführt. Ziel der Untersuchungen für den Bereich der zentralen Halligflächen ist die Ermittlung von Maßnahmen, die eine Erhöhung der Sedimentationsraten bewirken. Dies kann beispielsweise durch ein Öffnen der Sieltore bei bestimmten Wasserständen erreicht werden. Zum einen könnte so auf die Zahl der Landunter Einfluss genommen werden und zum anderen eine Flutung der Hallig über die Sieltore erfolgen. 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 (D) mit den darauf befindlichen Gebäuden (E). Für die Warften ist eine Ermittlung des Schutzstandards sowie eine risikoorientierte Gefährdungsanalyse durchgeführt worden. Im letzten Arbeitspaket wurden für die im Rahmen der soziologischen Begleitforschung mit den Halligbewohnern erarbeiteten Vorschläge für zukünftige Küstenschutzmaßnahmen Untersuchungen zur Machbarkeit und der hydrodynamischen Wirksamkeit durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen stellen den Hauptteil dieses Beitrags dar.

2 Entwicklung von alternativen Küstenschutz- und Bewirtschaftungsstrategien

Im Rahmen des Projektes wurden zwei Zukunftsworkshops 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 der Workshops war es, die Halligbewohner und die im Verbundprojekt beteiligten Wissenschaftler 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 Wissenschaftler mit den Erfahrungen und Wünschen der Bewohner kommen. Aus diesem Austausch ist eine Ideensammlung entstanden, die potentielle zukünftige Küstenschutzmaßnahmen hervorbringt. Dies soll zum einen technisch innovativ sein und zum anderen auf die Akzeptanz der Halligbewohner stoßen. Die Abb. 2 zeigt den Arbeitsablauf zwischen dem IfS und dem Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft (IWW) der RWTH Aachen University.

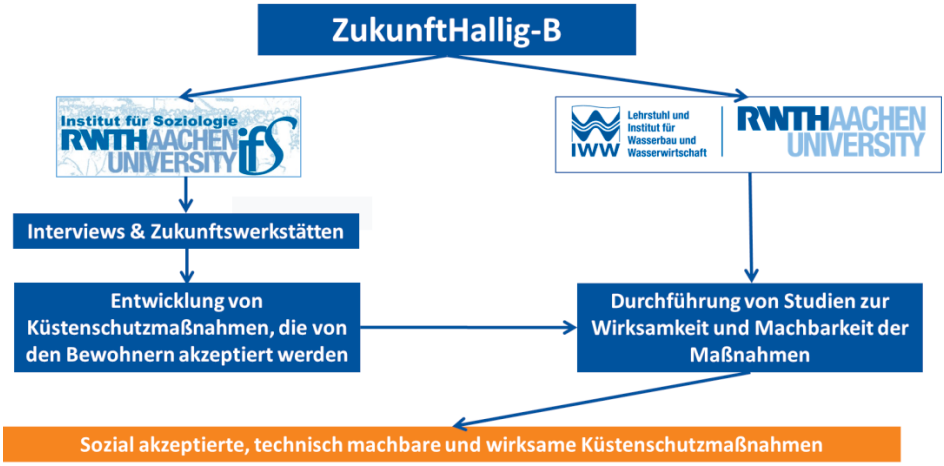

Abbildung 2: Kooperation zwischen dem IfS und dem IWW der RWTH Aachen University innerhalb des Vorhabens ZukunftHallig-B.

Während dieser Workshops entstand ein umfangreicher Katalog an Ideen für zukünftige Maßnahmen des Küstenschutzes auf den Halligen (JENSEN 2014). Im Folgenden befasst sich der vorliegende Beitrag mit der wasserbaulichen Bewertung ausgewählter Maßnahmen dieses Ideenkatalogs.

Dabei beschränkt sich die hier gezeigte Untersuchung auf die in der Tab. 1 dargestellten Ideen für Küstenschutzmaßnahmen, die in der dargestellten Reihenfolge von den Bewohnern der Halligen Hooge und Langeneß ausgewählt worden sind.

Tabelle 1: Von den Bewohnern ausgewählte Ideen für zukünftige Küstenschutzmaßnahmen zur weiteren Untersuchung.

Rang	Hooge	Langeneß
1	Verbindung/Bepflanzung der Außensande	Abflachung des Warftprofils
2	Raupflasterung der Warften	Hydraulische Warft
3	Mobiler Deichschlauch	Aufwarftung/Anhebung der Häuser
4	Ringdeich um die Warft	Errichtung geeigneter Schutzräume
5	Hydraulische Hochwasserschutzwand	Eindeichung des Wattenmeeres

2.1 Bewertung der Ideen der Zukunftsworkshops

In den folgenden Kap. 2.2 bis 2.10 erfolgt eine Beschreibung und Bewertung der im Rahmen der Zukunftsworkshops auf Hooge und Langeneß entwickelten Ideen für zukünftige Küstenschutzmaßnahmen für die Halligen. Die Bewertung der hydrodynamischen Wirksamkeit der zukünftigen Küstenschutzmaßnahmen bezieht sich dabei auf die folgenden Parameter:

- Wasserstand
- Seegang
- Wellenüberlauf

Zur Bewertung der hydrodynamischen Wirksamkeit wurden einzelne Maßnahmen im numerischen Modell (Delft3D) umgesetzt und ihre Wirkung auf den Seegang simuliert. Delft3D verfügt dabei über das numerische Seegangsmodell SWAN (Simulating WAves Nearshore) in der Version 40.41.

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 nicht vorgenommen.

Als ein vergleichbares Kriterium für die hydrodynamische Wirksamkeit der jeweiligen Maßnahme wird der Einfluss auf die Wellenüberlaufrate dargestellt. Dieser wird basierend auf den Formeln für die Berechnung der Wellenüberlaufrate bei Belastung durch Wellenspektren des Eurotop-Manual (PULLEN et al. 2007) berechnet:

$$\frac{q}{\sqrt{g \cdot H_{m0}^3}} = \frac{0,067}{\sqrt{\tan a}} \gamma_b \cdot \xi_{m-1,0} \cdot \exp(-4,75 \frac{R_C}{\xi_{m-1,0} \cdot H_{m0} \cdot \gamma_b \cdot \gamma_f \cdot \gamma_\beta \cdot \gamma_v}) \quad (1)$$

Das Maximum ist dabei definiert als:

$$\frac{q}{\sqrt{g \cdot H_{m0}^3}} = 0,2 \cdot \exp\left(-2,6 \frac{R_C}{H_{m0} \cdot \gamma_f \cdot \gamma_\beta}\right) \quad (2)$$

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	[-]

2.2 Bepflanzung und Verbindung der Außensände

Im Rahmen dieses Kapitels wird untersucht, in welcher Weise eine Sandaufspülung beziehungsweise Schließung des Hoogeloches zwischen den Sandplaten Japsand und Norderoogsand das Seegangsklima im Wattenmeer beeinflusst (vgl. Abb. 3).

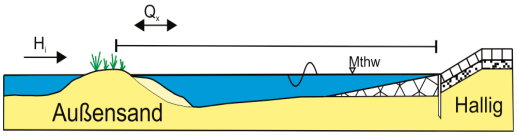

Abbildung 3: Schematische Darstellung der Bepflanzung und Verbindung der Außensände.

Für die Berechnung der hydrodynamischen Wirksamkeit dieser Maßnahme wurde die zentral auf Hooge gelegene Hanswarft gewählt, von der aus ein sechs Kilometer langes Untersuchungsprofil in südwestliche Richtung verläuft. Der Referenzzustand und die Darstellung des Untersuchungsprofils sowie die Umsetzung der Sandaufspülung im Bereich des Hoogeloches sind in der Abb. 4 aufgezeigt.

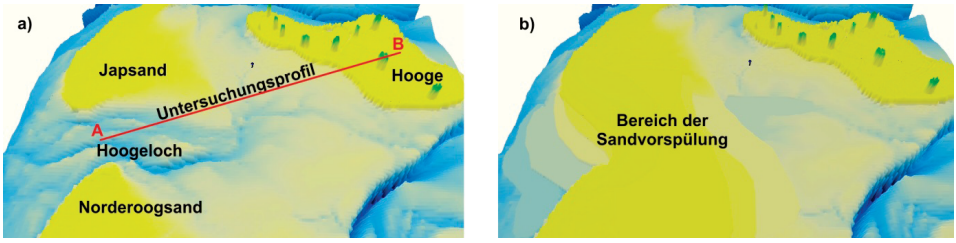

Abbildung 4: Referenzzustand und Darstellung des Untersuchungsprofils (a) und Sandaufspülung im Bereich des Hoogelochs im numerischen Modell (b).

Der Anfangspunkt des Profils (vgl. Abb. 4 und Abb. 5) 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.

Zwischen den Profilstationen 2500 m und 3200 m kreuzt das Profil den südlichen Rand des Japsandes, so dass das Höhenniveau bis auf einen 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. 5 unten).

Zur Ermittlung der maßgebenden Richtung des Seegangs und Windes werden die Verläufe der signifikanten Wellenhöhe und mittleren Wellenperiode für den Bemessungswasserstand BHW_{200} von NHN +5,40 m entlang des Profils ausgewertet. Die verwendeten Bemessungswasserstände setzen sich aus dem HW_{200} und einem Klimazuschlag von 0,5 m zusammen und basieren auf den regionalisierten Referenzwasserständen der IAWG, die vom LKN-SH im Rahmen des Projektes bereitgestellt worden sind. Wie in Abb. 5 zu erkennen ist, verhalten sich die 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 0,25 m 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 BHW_{200} 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 numerische Untersuchung wird am Referenzzustand (vgl. Abb. 4 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 3,7 Mio. m^3 ergibt.

Die Ergebnisse der Simulationen am modifizierten System werden in Abb. 6 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 BHW_{200} (NHN +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.

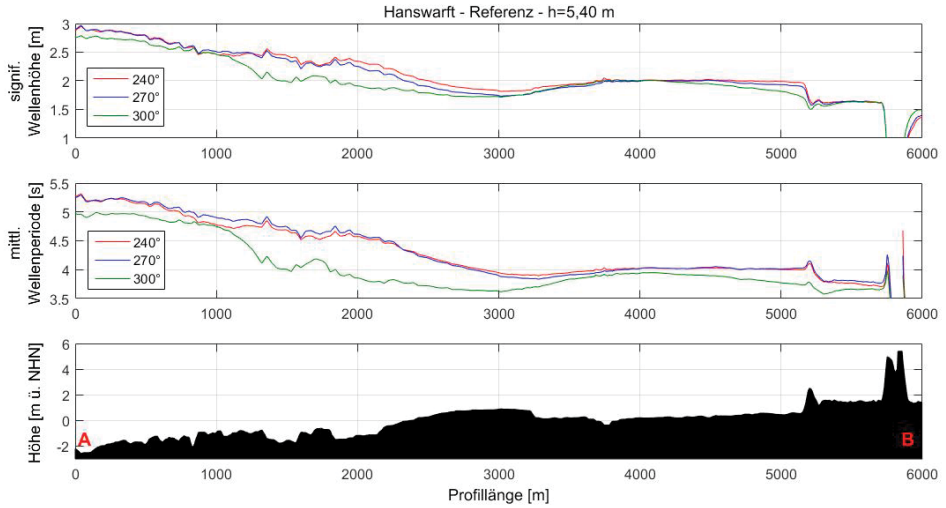

Abbildung 5: Referenzzustand für die Seegangs- und Windrichtungen 240°, 270° und 300°.

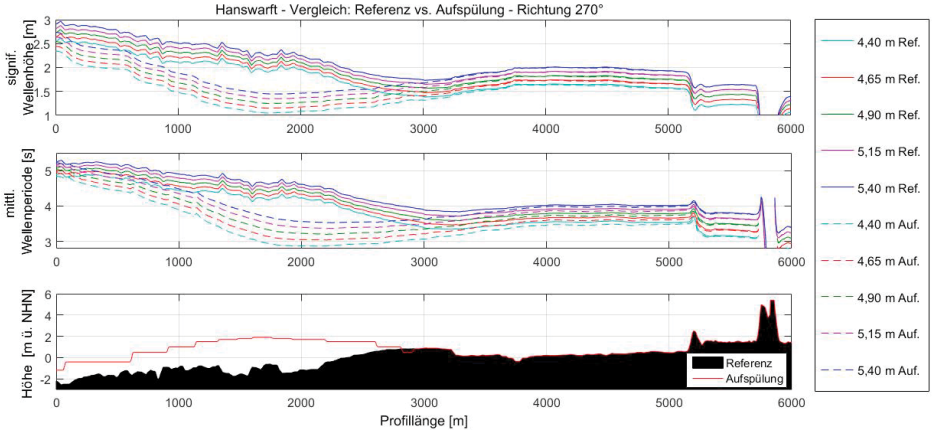

Abbildung 6: Wirkung der Sandaufspülung im Vergleich zum Referenzzustand.

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 Mio. m³ 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.

2.3 Raupflasterung der Warften

Bei dieser zu untersuchenden Maßnahme werden die bereits vorhandenen Warften mit neuen Deckwerken versehen beziehungsweise Rauheitselemente an der Warftböschung aufgebracht (Abb. 7).

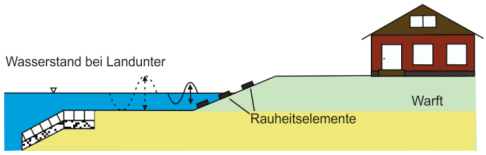

Abbildung 7: Schematische Darstellung der Raupflasterung einer Warft.

Hierzu werden anstelle der aktuell zumeist 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 et al. 2007).

Abb. 8 zeigt den Einfluss der Rauheit auf die relative Wellenüberlaufrate am Beispiel eines einfachen Warftprofils.

So kann, ausgehend von dem dargestellten Warftprofil, bei einem Einsatz eines Basaltdeckwerkes die Wellenüberlaufrate von 15,5 l/(s·m) um ca. 30 % auf 10,5 l/(s·m) im Vergleich zur Warft mit einer Grasoberfläche verringert werden. Mit Hilfe von Rauheitselementen oder einer aufgebrachten Elastocoast-Deckschicht, bei der mit Hilfe eines 2-Komponenten-Klebers Wasserbausteine an ihren Kontaktflächen zu einer rauen und durchlässigen Deckschicht verfestigt werden, kann die Wellenüberlaufrate noch weiter reduziert werden.

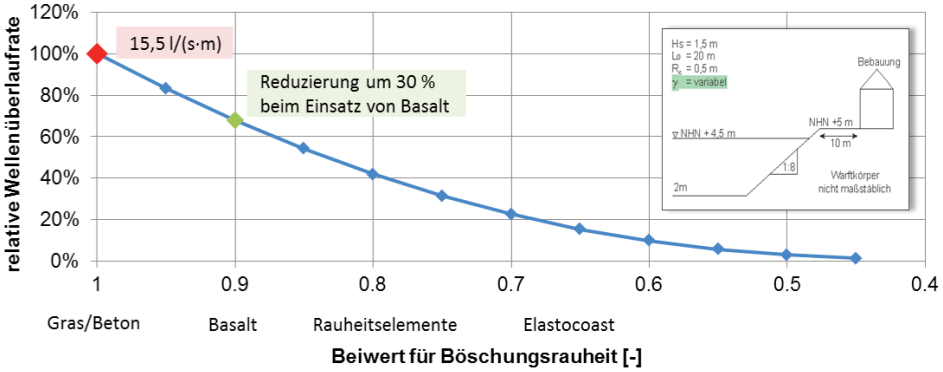

Abbildung 8: Einfluss der Rauheit auf die relative Wellenüberlaufrate nach 'Referenz'.

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 sehr hohen Belastungen standhalten kann.

2.4 Mobiler Deichschlauch

Im Folgenden wird die Möglichkeit des Einsatzes eines Deichschlauches als Hochwasserschutz untersucht. In Abb. 9 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 automatisierter Aufbau möglich sein, der durch einen geringen Arbeitsaufwand gekennzeichnet ist.

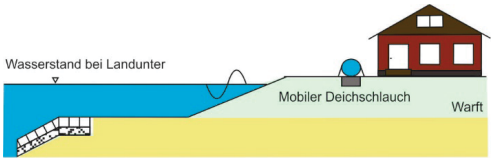

Abbildung 9: Schematische Darstellung des Einsatzes eines Deichschlauches.

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 einen zuverlässigen Hochwasserschutz gewährleisten zu können, muss ein redundantes Pumpen- und Zuleitungssystem installiert werden. Vor den Zuleitungen werden Gitter angebracht, die eine Verstopfung des Systems durch Treibsel oder anderes Material verhindern sollen. Bei der Betrachtung der Wirkung auf die relative Wellenüberlaufrate wird der mobile Deichschlauch als Kronenmauer betrachtet, da für einen mobilen Deichschlauch bislang keine durch physikalische Modellversuche abgesicherten Ergebnisse vorliegen. Die Ergebnisse dieser Untersuchung sind in Abb. 10 dargestellt.

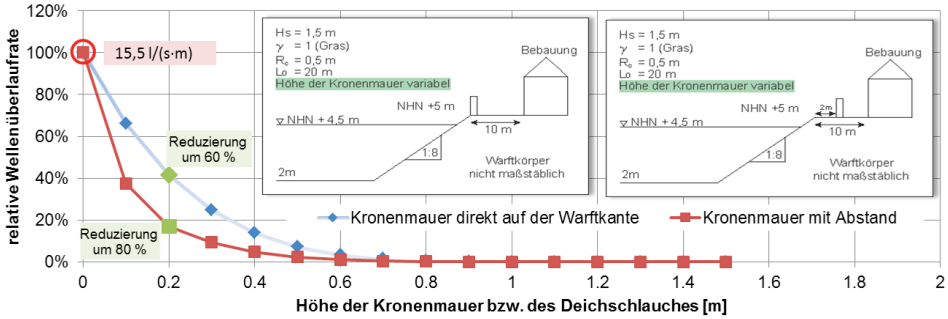

Abbildung 10: Einfluss einer Kronenmauer bzw. eines Deichschlauchs auf die relative Wellenüberlaufrate nach „Referenz“.

Die Ergebnisse zeigen, dass zum einen die Höhe des Deichschlauchs zum anderen aber auch die Entfernung des Deichschlauchs zur Warftkante von Bedeutung sind. So reduziert bei dem gegebenen Profil ein 0,2 m 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 um 60 % auf 6,5 l/(s·m).

Der Hauptkritikpunkt an diesem System ist die Betriebssicherheit, da das System fehleranfällig 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. Da es keine Referenzprojekte gibt, müssten 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 eine aufklappbare Hochwasserschutzwand dar (vgl. Abb. 11). Auch diese stellt im Normallfall keinen starken Eingriff in das Landschaftsbild dar. Ein Nachteil gegenüber den sich selbst aufbauenden Deichschläuchen ist, dass das System von den jeweiligen Warftbewohnern selbst aufgeklappt und gesichert werden müsste. Dabei kann unter Umständen starker Wind diese Arbeiten zusätzlich erschweren. Aus diesem Grund ist ein mobiles Hochwasserschutzsystem nur auf Warften einsetzbar, auf denen genug Personal zur Verfügung steht.

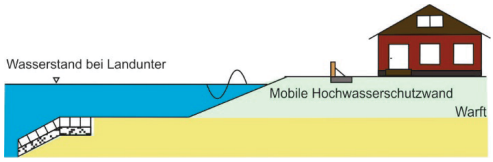

Abbildung 11: Schematische Darstellung des Einsatzes einer mobilen Hochwasserschutzwand auf einer Warft.

2.5 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. Abb. 12 zeigt schematisch die Umsetzung dieser Maßnahme.

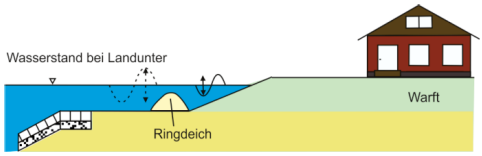

Abbildung 12: Schematische Darstellung eines Ringdeiches um die Warft.

An einem Untersuchungsprofil wird zunächst die Wirkung eines Ringdeiches auf der Halligfläche analysiert. Zur Beurteilung dient der Fuß der Christianswarft auf Langeneß, von der aus das etwa einen Kilometer lange Profil in südwestliche Richtung verläuft (vgl. Abb. 13).

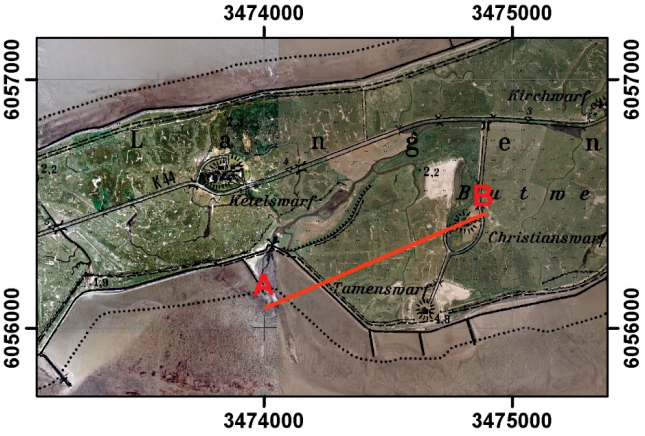

Abbildung 13: Untersuchungsprofil an der Christianswarft auf Langeneß.

Der Profilanfangspunkt (vgl. Abb. 13 und Abb. 14) liegt mit einer Höhe von 0,40 m unter Normalhöhennull (NHN) auf dem Halligvorland im Watt. An Profilstation 325 m beginnt die geböschte Halligkante und geht nach wenigen Metern in einen NHN +2 m hohen Regionaldeich 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.

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 BHW_{200} von NHN + 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. 14 sind die Wellenhöhen und -perioden für die maßgebende Seegangs- und Windrichtung von 240° in Abhängigkeit von Wasserständen zwischen NHN +4,70 m und NHN +5,70 m wiedergegeben.

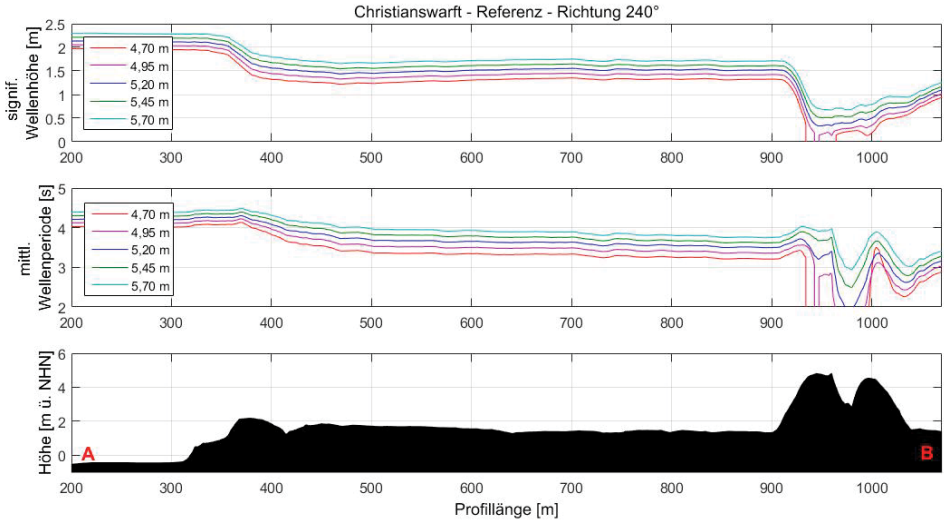

Abbildung 14: Referenzzustand für eine Seegangs- und Windrichtung von 240°.

Unter der Annahme des Bemessungswasserstandes BHW_{200} (NHN +5,70 m) ist der ausgereifte Seegang am Profilanfang durch eine signifikante Wellenhöhe von H_s=2,3 m und eine mittlere Wellenperiode von T_m=4,4 s gekennzeichnet. Der Seegang wird durch die Halligkante und -fläche sowie durch den Regionaldeich 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.

Um die Christianswarft wird für die Untersuchungen ein System aus Ringdeichen angelegt (Abb. 15 unten). Die Untersuchungen zur hydrodynamischen Wirksamkeit des modifizierten Systems werden für Ringdeichhöhen von 1,0 m und 1,5 m durchgeführt.

Um die hydrodynamische Wirksamkeit der Maßnahme zu beurteilen, ist in Abb. 15 ein direkter Vergleich zwischen den Seegangsparametern des Referenzzustandes und des modifizierten Systems dargestellt.

Für den Bemessungswasserstand (NHN +5,70 m) werden die signifikanten Wellenhöhen infolge der 1,5 m hohen Ringdeiche um etwa 0,2 m verringert. In diesem Fall wird die mittlere Wellenperiode um 0,2 s verkürzt. Damit liegen bezüglich der Wellenhöhe und Wellenperiode am Warftfuß hydrodynamische Wirksamkeiten der 1,5 m hohen Ringdeiche von 10 % beziehungsweise 5 % vor. Werden die Ringdeiche 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. Diese Abnahme der hydrodynamischen Wirksamkeit bei wachsenden Wasserständen haben auch NIEMEYER und KAISER (2001) in ihren Untersuchungen festgestellt.

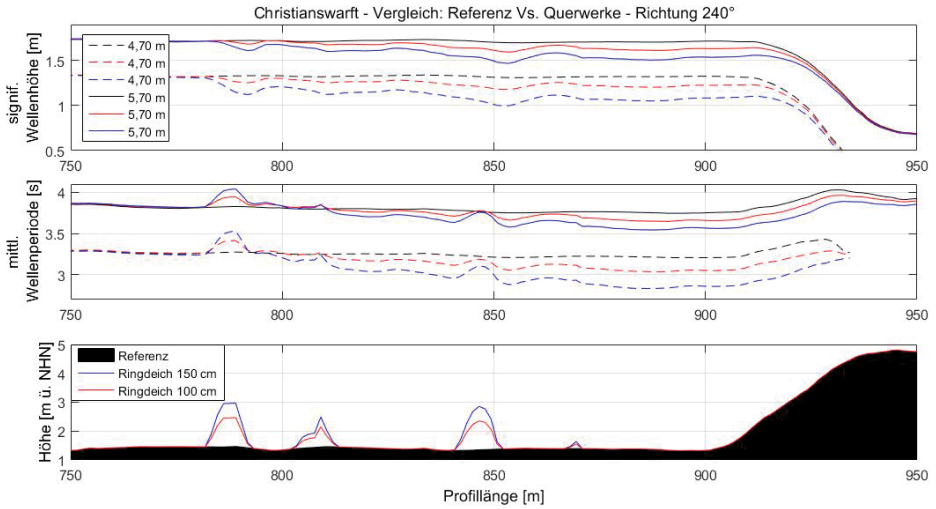

Abbildung 15: Wirkung der Ringdeiche im Vergleich zum Referenzzustand für eine Seegangs- und Windrichtung von 240°.

Aus Abb. 15 folgt, dass eine Vergrößerung der hydrodynamischen Wirksamkeit von einer Ringdeichlinie zur nächsten stattfindet. Der Anteil der Reduzierung von Wellenhöhe und -periode beträgt infolge der ersten Ringdeichlinie etwa 25 % der gesamten hydrodynamischen Wirksamkeit. Nachdem der Seegang die zweite Ringdeichlinie 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, woraus die Notwendigkeit der Anordnung hintereinander angeordneter Ringdeichlinien hervorgeht.

Die Untersuchungen des Referenzzustandes zeigen, dass der auf die Hallig treffende Seegang an der Halligkante und am Deckwerk gedämpft wird. Anschließend findet auf der Halligfläche keine weitere Seegangsdämpfung statt. Im Gegensatz dazu ist vielmehr eine Tendenz zur Erhöhung der Seegangsparameter 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.

Abb. 16 und Abb. 17 stellen den Einfluss der signifikanten Wellenhöhe und der mittleren Wellenperiode auf die relative Wellenüberlaufrate dar. Mit einer wie im numerischen Modell erreichten Reduzierung der signifikanten Wellenhöhe um 10 % am Warftfuß könnte die Wellenüberlaufrate von 15,5 l/(s·m) um ca. 30 % reduziert werden (siehe

Abb. 16). Ähnlich verhält es sich bei der mittleren Wellenperiode. Eine Verringerung der mittleren Wellenperiode von 3,5 s auf 3 s hat nach Abb. 17 eine Reduzierung der relativen Wellenüberlaufrate um 57 % auf 6,6 l/(s·m) zur Folge.

Neben der Dämpfung der Seegangsparameter 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 Erosion darstellt. Durch die Anordnung der Längswerke beziehungsweise Ringdeiche kommt es zu einer Verlagerung der Brandungszone vom Warftfuß in das vorgelagerte Ringdeichsystem. Dies bedeutet, dass die Wellenenergie an den Ringdeichen umgewandelt wird und dadurch am Warftfuß nicht mehr für Erosionsprozesse zur Verfügung steht. Eine Steigerung der Energiedissipation kann durch eine Erhöhung der Bauwerke erreicht werden.

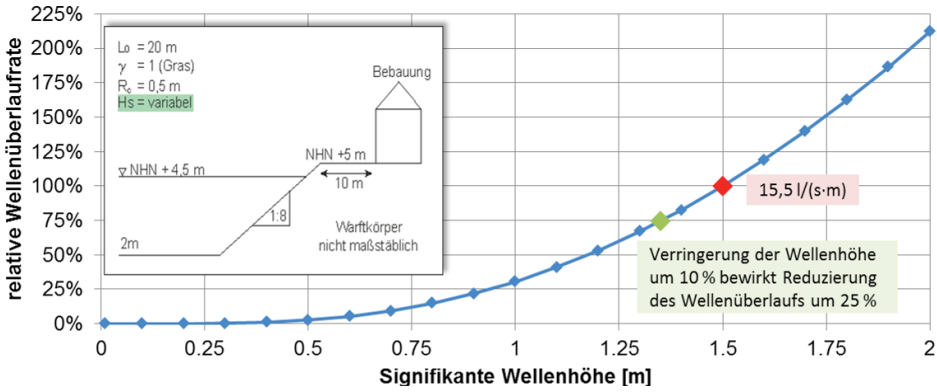

Abbildung 16: Einfluss der signifikanten Wellenhöhe am Warftfuß auf die relative Wellenüberlaufrate nach „Referenz“.

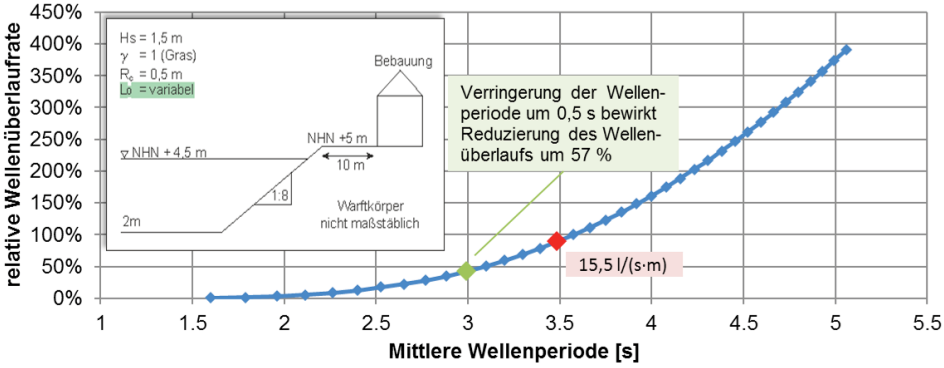

Abbildung 17: Einfluss der mittleren Wellenperiode auf die relative Wellenüberlaufrate nach „Referenz“.

Die Höhe und Abmessungen der Ringdeiche im numerischen Modell sind so gewählt, dass diese sich weitestgehend in die landschaftliche Umgebung einfügen. Außerdem ist eine Umsetzung der Maßnahme mit naturnahen Baumaterialen möglich, so dass der Einfluss auf die Ökologie bei dieser Maßnahme minimiert werden kann. Im Rahmen von

Parameterstudien müssen zukünftig Untersuchungen zur Optimierung der Lage und Geometrie des Ringdeichs durchgeführt werden.

Ein weiterer Vorteil dieser Maßnahme ist in der hohen Betriebssicherheit des Systems zu sehen, da die Ringdeiche eine dauerhafte Einrichtung darstellen würden. Der Eingriff in das Landschaftsbild der Halligen ist abhängig von der jeweiligen der Ausführung der Ringdeiche. Aus größerer Entfernung wäre ein Ringdeich um die Warft kaum zu erkennen.

2.6 Hydraulische Hochwasserschutzwand

Bei dieser vorgeschlagenen Maßnahme handelt es sich um eine Hochwasserschutzwand, die bei Landunter-Ereignissen selbstständig mit Hilfe von Schwimmkörpern aus dem Warftkörper ausgefahren wird. Die Hochwasserschutzwand wird ringförmig um die Warft angelegt, um den Wellenüberlauf entscheidend zu vermindern und damit vorbeugend die Warfthäuser zu schützen. Abb. 18 zeigt den schematischen Aufbau der hydraulischen Hochwasserschutzwand.

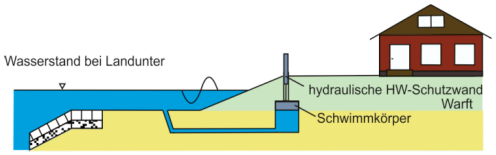

Abbildung 18: Schematische Darstellung einer hydraulischen Hochwasserschutzwand.

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. Die Wirkung auf die mittlere Wellenüberlaufrate ist bereits in Abb. 10 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-SH 2012) nicht erwünscht ist. Hauptkritikpunkt an dieser Maßnahme stellt allerdings die geringe Betriebssicherheit dar. Testläufe zur Funktionalität des Systems können gar nicht beziehungsweise nur schwer durchgeführt werden und diverse Einflussfaktoren wie beispielsweise Muschelbewuchs können bereits zu einem Versagen des Systems führen.

2.7 Warftverstärkung durch Abflachung, Raupflasterung und Freiborderhöhung

In diesem Kapitel werden unterschiedliche Möglichkeiten der Warftverstärkung untersucht. Da einige dieser Maßnahmen der Warftverstärkung (Rauheitselemente siehe Kap. 2.3) 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 sind:

- Erhöhung der Krone des Ringdeichs
- Abflachung des Warftprofils
- Einbau einer Berme
- Aufschüttung der gesamten Warft
- Einbau von Rauheitselementen (vgl. Kap. 2.3)
- Einbau einer Kronenmauer

Eine Erhöhung der Deichkrone beziehungsweise der Einbau einer Kronenmauer vergrößern die Freibordhöhe R_C und verringern bei gleichbleibender Warftneigung die Wellenüberlaufrate. Um eine gleichbleibende Profilsteigung bei einer erhöhten Kronenhöhe zu gewährleisten, ist eine aufwendige Massenbewegung notwendig. Der Ringdeich von Warften 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. Abb. 19 stellt eine Abflachung eines schematischen Warftprofils dar.

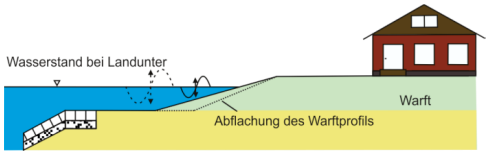

Abbildung 19: Schematische Darstellung der Abflachung des Warftprofils.

Eine weitere Maßnahme, die keinen Einfluss auf den Wellenüberlauf ausübt, aber dennoch hier behandelt wird, ist die Anhebung der Häuser (vgl. Abb. 20).

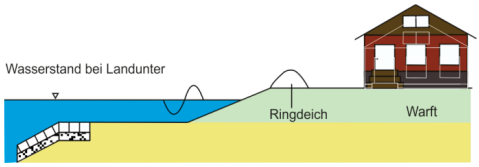

Abbildung 20: Schematische Darstellung der Anhebung eines Warfthauses und des Einsatzes eines Ringdeiches.

In Abb. 21 ist der Einfluss der Warftneigung 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/(s·m) auf einen Wert von 5,8 l/(s·m). 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 weniger hoch auf. Warften können jedoch nicht beliebig flach ausgebildet werden, da aufgrund der großen Massenbewegungen der Kosten-Nutzen-Faktor ungünstig ist.

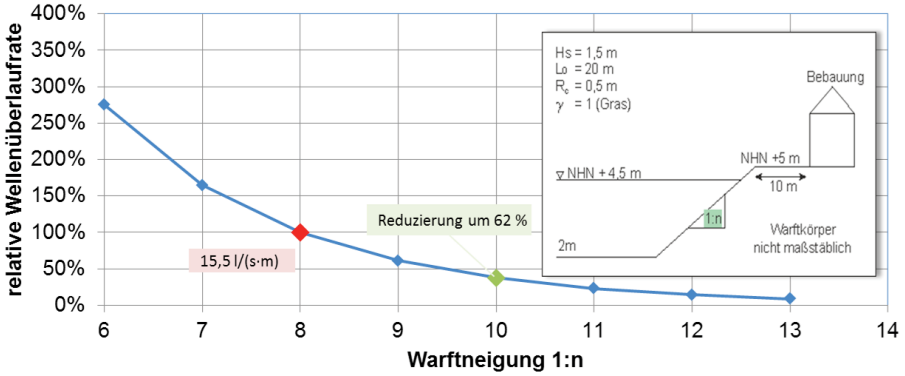

Abbildung 21: Einfluss der Warftneigung auf die relative Wellenüberlaufrate.

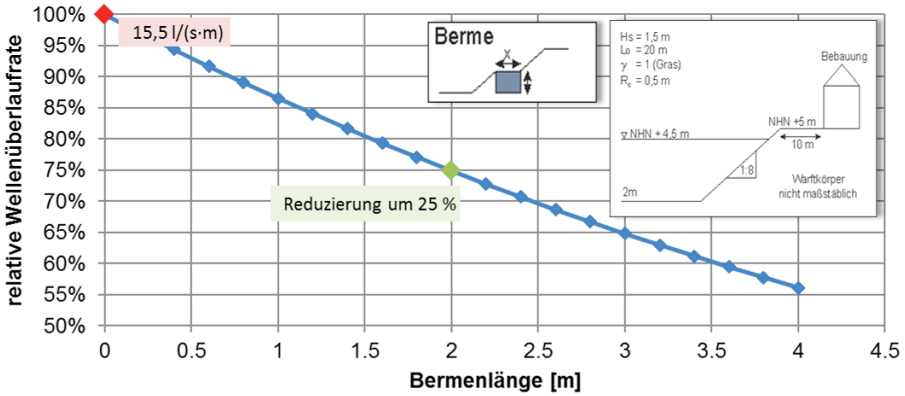

Abbildung 22: Einfluss einer Berme auf die relative Wellenüberlaufrate.

Auch eine Berme hat einen reduzierenden Einfluss auf die Wellenüberlaufrate. So bewirkt eine Berme mit einer Länge von zwei Metern in Höhe des Bemessungswasserstandes bei der gegebenen Warftgeometrie eine Reduzierung der relativen Wellenüberlaufrate um ca. 25 % (vgl. Abb. 22). 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.

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. Große Massenbewegungen sind erforderlich und die Hallighäuser müssten künstlich erhöht oder neu gebaut werden. Das Prinzip dieser Maßnahme ist in Abb. 23 dargestellt. Die auf der Warft befindlichen Gebäude müssen im Zuge dieser Maßnahme an das neue Niveau angepasst werden.

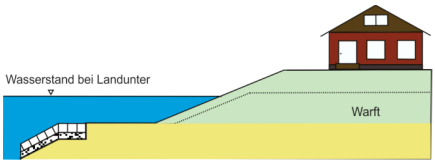

Abbildung 23: Schematische Darstellung einer Aufwarftung mit anschließendem Neubau.

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. All diese Maßnahmen sind zwar technisch möglich, aber mit einem großen Arbeits- und Kostenaufwand verbunden.

Die Wirksamkeit dieser Maßnahme auf die relative Wellenüberlaufrate ist in Abb. 24 dargestellt. So bewirkt eine Erhöhung des Freibords um 0,5 m auf 1,0 m eine Reduzierung der mittleren Wellenüberlaufrate von 15,5 l/(s·m) auf einen Wert von 0,5 l/(s·m) bei den gegebenen Bedingungen.

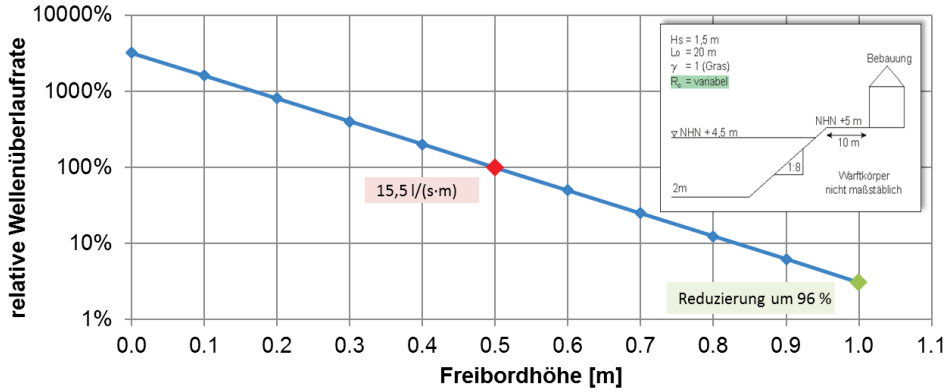

Abbildung 24: Einfluss der Freibordhöhe auf die relative Wellenüberlaufrate.

Abgesehen vom 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. Die Möglichkeit des Einbaus von Rauheitselementen stellt eine weitere Maßnahme der Warftverstärkung dar und ist bereits in Kap. 2.3 untersucht worden.

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. Abb. 25 zeigt das verwendete Warftprofil und die Verstärkungsmöglichkeiten mittels Ringdeich, Aufschüttung der Warft, Steigungsänderung und Berme.

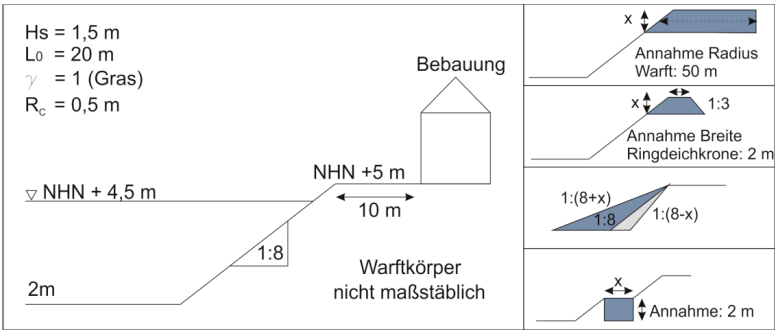

Abbildung 25: Exemplarisches Warftprofil.

In Abb. 26 sind die Ergebnisse der Berechnungen dargestellt. Dabei wird das benötigte Erdvolumen in m³ pro m in Abhängigkeit der Reduzierung der Wellenüberlaufraten für die Maßnahmen der kompletten Warfterhöhung, dem Ringdeich auf der Warftkrone, der Abflachung des Warftprofils und dem Einfluss einer Berme dargestellt. 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.

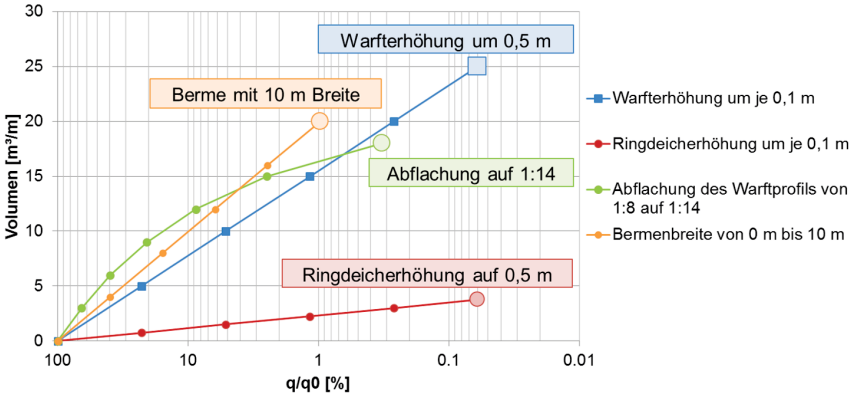

Abbildung 26: Benötigtes Erdvolumen in Abhängigkeit der Reduzierung der Wellenüberlaufrate.

Auf Grundlage der gezeigten Ergebnisse 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 Maßnahmen Ringdeich und Warfterhöhung. Solange sich das Erdgeschoss der Hallighäuser 0,5 m 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. 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 jedoch eine deutlich kostenintensivere Maßnahme dar.

2.8 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. 27 für den Zustand während eines Landunters schematisch dargestellt.

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. 2.4 beziehungsweise in Abb. 10 dargestellt worden und soll an dieser Stelle nicht weiter erläutert werden.

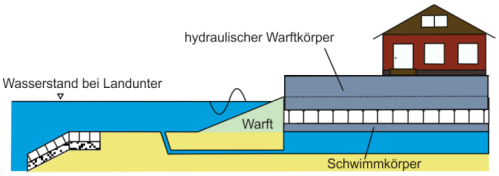

Abbildung 27: Schematische Darstellung einer hydraulisch gelagerten Warft.

Hauptkritikpunkt dieser Maßnahme ist neben dem enorm hohen Arbeitsaufwand die fragliche Betriebssicherheit dieses Systems. Da die hydraulische Warft im Normallfall nicht auf ihre Funktionalität hin überprüft werden kann, ist dieses System mit einem hohen Risiko und sehr hohen Kosten behaftet. Bei einem Versagen des Systems und dem nicht Vorhandensein anderer Schutzmaßnahmen könnte bei Extremereignissen Wasser in die Häuser eindringen und große Schäden verursachen.

2.9 Wirkungsvolle Schutzräume in den Häusern einrichten

Schutzräume existieren bereits in fast allen Hallighäusern. Sie wurden als Konsequenz der 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 (vgl. Abb. 28). Das bedeutet, dass selbst bei einer schweren Zerstörung des restlichen Hauses diese Räume bestehen bleiben (PETERSEN 1981). 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.

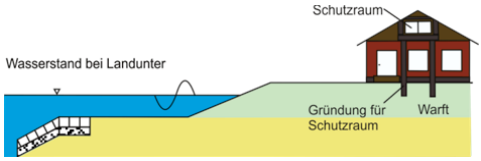

Abbildung 28: Einrichtung eines Schutzraumes in einem Hallighaus.

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.

2.10 Eindeichung des Wattenmeeres

Die Möglichkeit eines Deiches von rund 35 km Länge zwischen der Halbinsel Eiderstedt bis zur Insel Sylt wurde bereits als „Friesendamm“ von W. Dix in den Jahren 1927 und 1949 beschrieben (STADELMANN 2008). Der Deich würde eine Fläche von etwa 1000 km² Wattenmeer eindeichen und das gesamte Gebiet vor dem offenen Meer schützen. 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.

In der Abb. 29 ist eine mögliche Variante einer Umsetzung dieses Projektes dargestellt. Diese Variante hat eine Länge von 37,2 km und umfasst alle zehn Halligen.

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 ein solches 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 ökologischen Veränderungen generell als nicht umsetzbar zu bewerten.

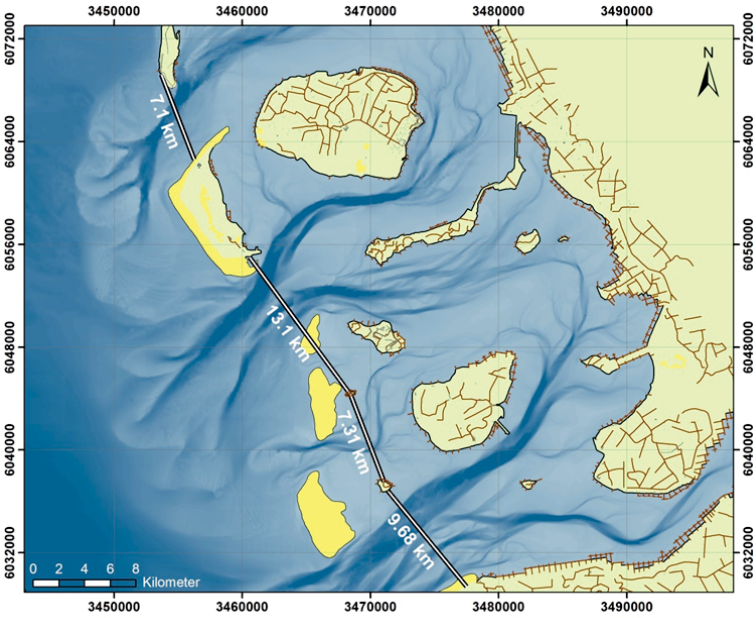

Abbildung 29: Variante der Eindeichung des südlichen nordfriesischen Wattenmeeres mit einer Gesamtlänge von 37,2 km.

3 Ergebnisse

3.1 Hydrodynamische Wirksamkeit

Wie in Kap. 2.1 erwähnt, erfolgt die abschließende Bewertung der hydrodynamischen Wirksamkeit anhand des Einflusses auf die mittlere Wellenüberlaufrate q und basiert auf den in Kap. 2.2 bis 2.10 gezeigten Untersuchungen.

3.2 Betriebssicherheit

Da eine Ermittlung der Gesamtversagenswahrscheinlichkeit im Rahmen dieser Arbeit nicht durchgeführt werden kann, wird ein vereinfachter Ansatz gewählt, um die Betriebssicherheit der einzelnen Maßnahmen zu bewerten. Dafür wird unterschieden, ob im Falle eines Extremereignisses die Betriebsbereitschaft zunächst hergestellt werden muss oder eine Maßnahme dauerhaft installiert ist. Zusätzlich geht in die Bewertung ein, ob zur Herstellung der geforderten Betriebssicherheit ein Eingriff der Bewohner in das jeweilige System möglich ist. Grundsätzlich wird im Rahmen dieser Bewertung bei stationären Maßnahmen von einer hohen Betriebssicherheit ausgegangen. Mobilen Maßnahmen hingegen wird eine geringere Betriebssicherheit zugewiesen, da diese Systeme im Vergleich zu den erdbaulichen Maßnahmen fehleranfälliger sind und eine höhere systemspezifische Vulnerabilität aufweisen (BWK 2005).

3.3 Bauaufwand

Der Bauaufwand der Maßnahmen wird über eine Abschätzung der beim Bau anfallenden ökonomischen Kosten durchgeführt. Diese setzen sich nach BACHMANN (2012) aus den Flächenkosten, Baukosten, ökologischen Ausgleichskosten und Planungskosten zusammen. Diese Berechnung kann vor allem bei erdbaulichen Maßnahmen durchgeführt werden. Für neue und innovative Maßnahmen fehlt bislang eine ausreichende Datengrundlage.

3.4 Landschaftsbild

Die Grundlage für die Bewertung des Einflusses auf das Landschaftsbild stellen die folgenden Indikatoren nach KIEMSTEDT et al. (1996) und DEMUTH (2000) dar:

- Verfremdung der Eigenart der Landschaft
- Vielfaltsverlust
- Oberflächenverfremdung
- Maßstabsverlust
- Lage-/Strukturstörung
- Überformung durch technische Elemente
- Reliefänderung
- Ausräumung der Landschaft
- Lärm- und Geruchsbelästigung

Diese potentiellen Einflüsse werden dem Referenzzustand der Hallig vor der Maßnahme gegenübergestellt und herausgestellt, ob eine negative Beeinträchtigung vorliegt.

3.5 Naturschutz

Die Bewertung des Einflusses der Maßnahmen auf den Naturschutz erfolgt nach KIEMSTEDT et al. (1996) auf Grundlage der folgenden potentiellen Beeinträchtigungen:

- Beeinträchtigung von Arten und Lebensgemeinschaften:
  - Flächenverlust von Lebensräumen
  - Beeinträchtigung der Standortbedingungen von Lebensräumen
  - Veränderung von Lebensraumstrukturen
  - Dezimierung von Pflanzen und Tieren
  - Veränderung des genetischen Austauschs
- Beeinträchtigung des Bodens
  - Bodenverlust, Bodenabtrag
  - Veränderung der Bodenorganismen
  - Veränderung des Nährstoff- und Wasserhaushalts
  - Beeinträchtigung der natürlichen biotischen Ertragsfähigkeit

Bei der Untersuchung des Einflusses auf den Naturschutz mit Hilfe dieser potentiellen Beeinträchtigungen müssen zusätzlich die betroffene Flächengröße sowie die jeweilige Dauer der Maßnahme berücksichtigt werden.

3.6 Akzeptanz

Die Bewertung der Akzeptanz basiert auf den in Tab. 1 aufgeführten Platzierungen der Maßnahmen, die von den Bewohnern der Halligen in dieser Reihenfolge gewählt wurden.

3.7 Ergebnis

In Tab. 2 ist eine zusammenfassende Bewertung der im Rahmen der Zukunftsworkshops auf Hooge und Langeneß generierten Ideen dargestellt. Dabei wird für die folgenden Kategorien jeweils eine Einzelbewertung vorgenommen, bei der Punkte von 0 bis 4 vergeben werden:

- Wirkung auf den Wellenüberlauf
- Betriebssicherheit
- Bauaufwand
- Landschaftsbild
- Naturschutz
- Akzeptanz

Die jeweilige Bedeutung der Bewertungspunkte der einzelnen Kategorien ist in der Legende der Tab. 2 aufgeführt. In der rechten Spalte der Tab. 2 wird das geometrische Mittel der einzelnen Bewertungen berechnet. Erhält eine Maßnahme in nur einer Bewertungskategorie null Punkte, ergibt die Gesamtwertung somit ebenfalls null Punkte.

Als technisch machbare und wirksame Maßnahmen belegen die Abflachung des Warftprofils beziehungsweise der Ringdeich auf der Warftkrone mit 2,99 Punkten den ersten Platz der untersuchten Maßnahmen. Der um die gesamte Warft errichtete Ringdeich sowie die Raupflasterung der Warften erhalten mit 2,57 Punkten die zweitbeste Bewertung. Auf den Plätzen dahinter folgen die Aufwarftung sowie die Errichtung geeigneter Schutzräume mit je 2,40 Punkten. Gerade die Maßnahme der Schutzräume sollte jedoch als Ergänzung anderer Maßnahmen angesehen werden und mit diesen kombiniert angewendet werden. Diesen Maßnahmen konnte somit im Rahmen der Untersuchung die hydrodynamische Wirksamkeit, die technische Machbarkeit sowie die soziale Akzeptanz nachgewiesen werden. Der mobile Deichschlauch könnte durch eine 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. Die hydraulische Warft sowie die Eindeichung des Wattenmeeres fallen 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.

Tabelle 2: Zusammenfassende Bewertung der im Rahmen der Zukunftsworkshops auf Hooge und Langeneß generierten Maßnahmen.

Maßnahme	Wirkung auf den Wellen-überlauf	Betriebs-sicherheit	Bauauf-wand	Landschafts-bild	Naturschutz	Akzeptanz der Bewohner	$\bar{x}_{geom}$
Abflachung des Warftprofils / Ringdeich auf Warft	3	4	3	2	2	5	**2.99**
Raupflasterung	3	4	3	1	2	4	**2.57**
Ringdeich um Warft (Wellenbrecher)	3	4	3	2	2	2	**2.57**
Aufwarftung	4	4	1	2	2	3	**2.40**
Errichtung geeigneter Schutzräume	2	4	3	2	2	2	**2.40**
Anhebung der Häuser	2	4	1	2	2	3	**2.14**
Mobiler Deichschlauch	4	1	1	2	2	3	**1.91**
Bepflanzung/Verbindung der Außensände	2	2	1	1	1	5	**1.65**
Hydraulische Hochwasserschutzwand	4	0	0	2	2	1	**0**
Hydraulische Warft	4	0	0	1	1	4	**0**
Eindeichen des Wattenmeers	4	4	0	0	0	1	**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 groß 1: groß 2: mittlerer Aufwand 3: gering 4: sehr gering	0: stark negativer 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	1: Platz 5 2: Platz 4 3: Platz 3 4: Platz 2 5: Platz 1	

4 Zusammenfassung und Ausblick

Die aufgeführten Untersuchungen innerhalb des Vorhabens ZukunftHallig-B stellen einen wichtigen Beitrag zur Entwicklung nachhaltiger Küstenschutzmaßnahmen und Bewirtschaftungsstrategien dar. Mit dem aufgebauten numerischen Seegangsmodell wird zunächst ein Werkzeug geschaffen, mit dem die weiteren 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.

Im hier dargestellten Arbeitspaket 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.

Diese 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.

5 Schriftenverzeichnis

BACHMANN, D.: Beitrag zur Entwicklung eines Entscheidungsunterstützungssystems zur Bewertung und Planung von Hochwasserschutzmaßnahmen; Dissertation; Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, 2012.

BWK: Mobile Hochwasserschutzsysteme – Grundlagen für Planung und Einsatz; Bund der Ingenieure für Wasserwirtschaft, Abfallwirtschaft und Kulturbau (BWK) e.V.; ISBN 3-936015-19-8, 2005.

CHO, D.-O.: The evolution and resolution of conflicts on Saemangeum Reclamation Project. Ocean and Coastal Management, Volume 50, Issues 11–12, 930–944, 2007.

DEMUTH, B.: Das Schutzgut Landschaftsbild in der Landschaftsplanung – Methodenüberprüfung anhand ausgewählter Beispiele der Landschaftsrahmenplanung; Mensch und Buch Verlag; Berlin, 2000.

EHLERS, J.: The Morphodynamics of the Wadden Sea. Rotterdam, A. A. Balkema, ISBN 90-6191-679-8, 1988.

JENSEN, J.; ARNS, A.; SCHÜTTRUMPF, H.; WÖFFLER, T.; HÄUßLING, R.; ZIESEN, N.; JENSEN, F.; VON EYNATTEN, H.; SCHINDLER, M. und KARIUS, V.: Zukunft Hallig – Entwicklung von nachhaltigen Küstenschutz- und Bewirtschaftungsstrategien für die Halligen unter Berücksichtigung des Klimawandels. Die Küste, 84, 2016.

JENSEN, J.: Abschlussbericht zur Entwicklung von nachhaltigen Küstenschutz- und Bewirtschaftungsstrategien für die Halligen unter Berücksichtigung des Klimawandels (ZukunftHallig), 2014.

KIEMSTEDT, H.; OTT, S. und MÖNNECKE, M.: Methodik der Eingriffsregelung – Gutachten zur Methodik der Ermittlung, Beschreibung und Bewertung von Eingriffen in Natur und Landschaft, zur Bemessung von Ausgleichs- und Ersatzmaßnahmen sowie von Ausgleichszahlungen; Institut für Landschaftspflege und Naturschutz der Universität Hannover, 1996.

LKN-SH: Fachplan Küstenschutz Sylt. Husum: Landesamt für Küstenschutz, Naturschutz und Meeresschutz Schleswig-Holstein, 2014.

MELUR-SH: Generalplan Küstenschutz des Landes Schleswig-Holstein. Fortschreibung 2012.

NIEMEYER, H.D. und KAISER, R.: Hydrodynamische Wirksamkeit von Lahnungen, Hellern und Sommerdeichen. Die Küste, 64, 15–60, 2001.

PETERSEN, M.: Die Halligen: Küstenschutz – Sanierung – Naturschutz. Karl Wachholtz Verlag, Neumünster, 1981.

PULLEN, T.; ALLSOP, N.W.H.; BRUCE, T.; KORTENHAUS, A.; SCHÜTTRUMPF, H. and VAN DER MEER, J.W.: EurOtop. Wave Overtopping of Sea Defences and Related Structures: Assessment Manual, Die Küste, 73, 1–178, 2007.

STADELMANN, R.: Den Fluten Grenzen setzen – Schleswig Holsteins Küstenschutz – Westküste und Elbe. Band 1, Nordfriesland, Husum, 2008.

Die Küste, 84 (2016), 1-226

Die Küste, 84 (2016), 1-226

Sedimentologische Untersuchungen auf den Halligen

Volker Karius, Malte Schindler, Matthias Deicke und Hilmar von Eynatten

Zusammenfassung

Die nordfriesischen Halligen und niedrige Bereiche der ostfriesischen Inselmarschen stehen vor der Herausforderung steigender Wasserstände (relative mean sea level, RMSL, mean tidal high water, MThw, highest tidal high water, HThw). Quantitative Aussagen über das natürliche Anpassungspotential der regelmäßig überfluteten Bereiche zu treffen war das Ziel des Teilprojektes D (03KIS095) im Verbundprojekt „ZukunftHallig" (JENSEN et al. 2016). Mittlere Sedimentaufwuchsraten 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 hydrodynamische 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.

Schlagwörter

Halligen, Hooge, Langeneß, Nordstrandischmoor, Norderney, Juist, Salzmarsch, Sedimentation, Sedimentaufwuchsrate, Sedimentfalle, ^{210}Pb, ^{137}Cs, Sturmflut, Meeresspiegelanstieg, ZukunftHallig

Summary

The north frisian Halligen are challenged by rising water levels (relative mean sea level, RMSL, mean tidal high water, MThw, highest tidal high water, HThw). The main aim of sub project D (03KIS095)

in the research project „ZukunftHallig" (JENSEN et al. 2016)was to quantify the natural adaptive processes of the regularily innundated areas. The mean values of the accretion 1986-2011 amount to 1.4±0.6 mm/a (Hooge), 1.6±0.7 mm/a (Langeneß) and 3.2±1.6 mm/a (Nordstrandischmoor). On selected areas of the east frisian islands accretion mean values of 2.4±1.0 mm/a (Norderney, east part of Grohdepolder) and 0.75±0.25 mm/a (Juist, southern Billpolder) were measured in 2011-2013. The corresponding rise of RMSL and MThw is actually 2.6 mm/a and 5.0 mm/a (Gauge Wyk/Föhr). The difference in rates of accretion and water level rise will cause increasing hydrodynamic forces (hydrostatic pressure and swell) applied to the marsh areas and the dwelling mounts. The accretion at Hooge and Langeneß is mainly influenced by storm surges higher than 1.54 m above MThw. Nordstrandischmoor benefits also from minor inundation events. High sedimentation areas on Langeneß are mainly nearest to the waterline, on Hooge this areas are mainly behind the tide gates whereas on Nordstrandischmoor sediments are mostly even distributed. Former high sedimentation areas along interior tidal creeks are still visible in the morhological models of the Halligen. Nevertheless, there is no enhenced accretion today. In the short term technical meaures should be taken to reinforce the dwelling mounts but in the longer term measures should be evaluated to increase the sediment accretion during innundations (e. g. modified bank protections and different operation modes for the tidal gates).

Keywords

Halligen, Hooge, Langeneß, Nordstrandischmoor, Norderney, Juist, saltmarsh, sedimentation, accretion, sediment trap, ^{210}Pb, ^{137}Cs, storm surge, sea level rise, ZukunftHallig

Inhalt

1 Einleitung 97
2 Methoden 98
2.1 Häufigkeit von Landunterereignissen 98
2.2 Bestimmung der Bodendichte und des organischen Anteils 101
2.3 Messung der vertikalen Aufwuchsraten 101
2.3.1 Sedimentfallen 101
2.3.2 Sedimentdatierungen 103
2.4 Sedimentverteilung und Morphologie 104
3 Ergebnisse und Diskussion 105
3.1 Häufigkeit von Landunterereignissen 105
3.2 Bestimmung der Bodendichte und des organischen Anteils 107
3.3 Messung der vertikalen Aufwuchsraten 109
3.3.1 Halligen Hooge, Langeneß und Nordstrandischmoor 109
3.3.2 Ostfriesische Inseln Juist und Norderney 111
3.3.3 Isostatische Landbewegung und Kompaktion tieferer Schichten 111
3.4 Sedimentverteilung und Topographie der Halligen 112
3.4.1 Sedimentverteilung 112
3.4.2 Topographie 114
4 Fazit 115
5 Schriftenverzeichnis 116

1 Einleitung

Die vom Geowissenschaftlichen Zentrum Göttingen, Abteilung Sedimentologie und Umweltgeologie durchgeführten Arbeiten im Rahmen des vom BMBF geförderten Verbundprojektes „ZukunftHallig“ (JENSEN 2014) 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 häufig werden die Marschen der Halligen jährlich überflutet
- 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?

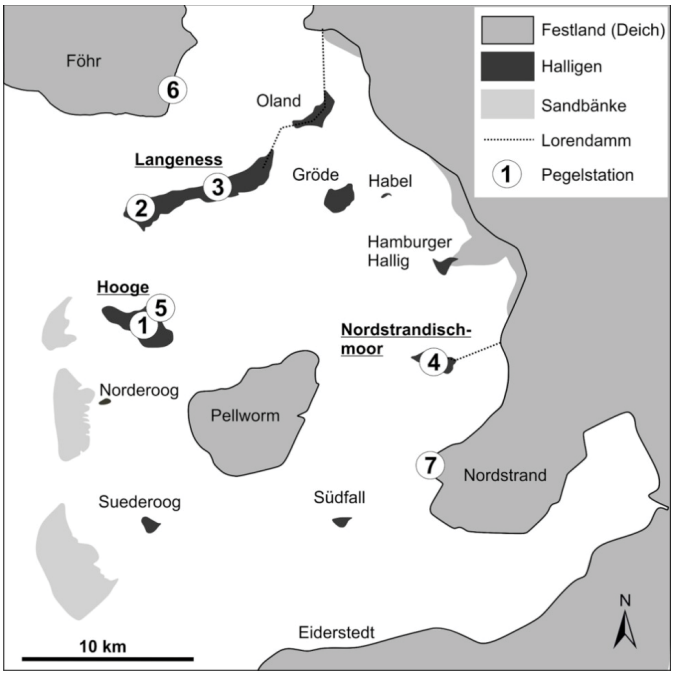

Abbildung 1: Lageskizze des Nordfriesischen Wattenmeeres zwischen der Halbinsel Eiderstedt (Süden) und Insel Föhr (Norden). Die drei in der vorliegenden Studie behandelten Halligen sind hervorgehoben. Die Nummerierungen kennzeichnen die Pegelstandorte der behandelten Binnen- und Außenpegel.

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 (SCHINDLER et al. 2014b). 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. Das hauptsächliche Arbeitsgebiet der nordfriesischen Halligen ist in Abb. 1 dargestellt.

2 Methoden

2.1 Häufigkeit von Landunterereignissen

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. DIBBER und MÜLLER-NAVARA (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. Basierend auf dem Ansatz von DIBBER und MÜLLER-NAVARA (2009) wurden Schwellenwerte sowohl für beginnende Landunterereignisse (im Folgenden als LU bezeichnet) sowie vollständige Landunterereignisse (im Folgenden als vLU bezeichnet) definiert. Es wurde besonders darauf geachtet, dass die alternativen Schwellenwerte in Form von Referenzhöhen bei topographischen Änderungen leicht reproduzierbar sind.

Digitale Geoinformationsdaten des Landesamtes für Vermessung und Geoinformation Schleswig-Holstein (LVermA-SH) wurden 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.

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 DGM1 basierend auf der landesweiten, luftgestützten LIDAR-Vermessung (light detection and ranging) mit einer Gitterweite von 1x1 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 aus dem DGM1 extrahiert.

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“ bzw.

„Igel“ 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. 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 gewachsen. 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 Raustreifen 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.

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 Abb. 1zu entnehmen. Unterschieden werden Binnenpegel, welche wenig bis keine Tidebeeinflussung zeigen, und die zugehörigen Außenpegel, welche tidebeeinflusst sind. Digitale Binnenpegel wurden auf den 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). Tab. 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 (Abb. 1) 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

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 unterschieden für LU/vLU 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:

$$H_A = H_B + \overline{\Delta_h} \quad (1)$$

$$\overline{\Delta_h} = \frac{\sum(h_A - h_B)}{n} \quad (2)$$

H_A: Schwellenwert des Außenpegels für ein Überflutungsereignis (LU/vLU)

h_A: Außenwasserstand

H_B: Schwellenwert des Binnenpegels für ein Überflutungsereignis (LU/vLU)

h_B: Binnenwasserstand

n: Anzahl Wertepaare

$\overline{\Delta_h}$: 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 zu niedrigen Außenwasserstandes h_A jedoch nicht auf über das Deckwerk eindringendes Wasser zurück zu führen sein kann. Viel wahrscheinlicher ist der Grund für den Binnenpegelanstieg in geringen Undichtigkeiten der Siele zu suchen, wodurch etwas Wasser durch die Priele und Gräben eindringen kann. Um sicher zu stellen, dass Werte h_A während der Folgetiden signifikant niedriger ausfallen, wurden diese in zwei Datenkollektive unterteilt. (i) Wasserstände h_A zum Zeitpunkt der Schwellenwertüberschreitung $H_{B\,(LU)}$ während der ersten Tide eines Ereignisses. (ii) 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, dass Wasserstände h_A in Abhängigkeit von Folgetiden signifikant niedriger ausfallen. Bei der Berechnung der Außenpegelschwellenwerte $H_{A\,(vLU)}$ wurden alle Außenpegelwasserstände h_A sowohl der ersten Tide 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. Tab. 4). Da die 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 und 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. Die Anzahl der Rammkernbohrungen beträgt auf Langeneß 6 (n=6), Hooge 4 (n=4) und Nordstrandischmoor 2 (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 jeweils 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 Aufwuchsraten

2.3.1 Sedimentfallen

In den Winterhalbjahren 2010–2013 wurden auf den zu untersuchenden Halligen im November 61 (Langeneß), 36 (Hooge) bzw. 12 (Nordstrandischmoor) Sedimentfallen des Typ A (1l LDPE-Weithalsflasche) und Typ B (Kunstrasen (B3)) ausgebracht und zur Laboranalyse im März des Folgejahres wieder entfernt (Abb. 2).

Abbildung 2: Verwendete Sedimentfallen. (A) 1-Liter-LDPE-Flasche im Marschboden eingelassen. (B3) Kunstrasen.

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 (Abb. 3) jeweils parallel installiert.

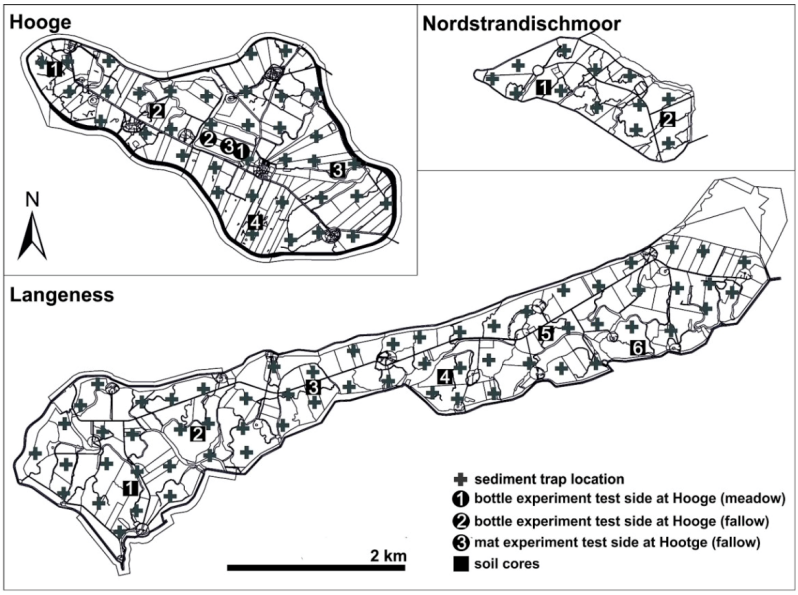

Abbildung 3: Darstellung der untersuchten Halligen mit den Positionen der Sedimentfallen (Pluszeichen, 61 (Langeneß), 36 (Hooge), 12 (Nordstrandischmoor)), den Bohrpositionen (Quadrate) und den Standorten der methodischen Untersuchungen (Kreise).

Die gewonnenen Sedimente des Fallentyps A 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 (SCHINDLER et al. 2014a). Beim Fallentyp B wurde nach Trocknung die Gesamtmenge des auf der Falle abgelagerten Materials durch Wägung bestimmt und um den aus Fallentyp A bestimmten Anteil organischen Materials korrigiert. Die Ergebnisse der Fallentypen A+B wurden für die Berechnung der Sedimentaufwuchsrate an jeder Position gemittelt. Bei der Berechnung des Höhenwachstums (ΔH) wurde der mittlere Organikanteil im Boden berücksichtigt (Formeln 3–5).

$$Mc_{trap} = Ms_{trap} \cdot \frac{100 - LOI_{trap}}{100} \quad (3)$$

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 %]

$$M_{accretion} = \frac{Mc_{trap} \cdot 100}{100 - Loi_{soil}} \quad (4)$$

$M_{accretion}$: Zum Höhenwachstum beitragende effektive Masse Typ A/B [g]

Loi_{soil}: Mittlerer halligspezifischer Glühverlust (seit 1915) [%]

$$\Delta H = \frac{M_{accretion}}{A} \cdot BDD^{-1} \cdot 10 \quad (5)$$

ΔH: Sedimentaufwuchsrate [mm/a]

A: effektive Fläche der Sedimentfalle (Type A, Bodenfläche der Flasche (70.88 cm²), Typ B, Gesamtfläche der Matte (600 cm²) [cm²]

BDD: Trockenraumdichte [g/cm³]

Ein halligspezifischer Mittelwert wurde durch Mittelung aller Fallenstandorte über den gesamten Beobachtungszeitraum von drei Jahren berechnet. Bei der Bestimmung der Unsicherheiten wurde eine Fehlerfortpflanzungsrechnung basierend auf den Standardabweichungen der Mittelwerte durchgeführt. Durch die hohe räumliche Variabilität der Sedimentakkumulation sowie der Bodendichten (lateral wie auch vertikal) sind systematische Fehler, die beispielsweise bei der Bestimmung des organischen Anteils durch die Glühverlustmethode auftreten zu vernachlässigen – hier erfolgt eine Überbestimmung wegen auftretender Kristallwasserverluste bei Tonmineralen.

2.3.2 Sedimentdatierungen

Sedimentdatierungen wurden mit der ^{137}Cs sowie der ^{210}Pb Methode durchgeführt. Aliquote der getrockneten und gemörserten Bohrkernabschnitte (35–70 g) wurden in Plastikdosen (39.3 cm³) gepresst und mit gasdichter Folie versiegelt (Parafilm®, Pechiney Plastic Packaging). Für kleinere Probenvolumina (meist organikreiche Schichten des Oberbodens) wurden Röhrchen mit 6.9 cm³ benutzt. Alle Proben wurden vor der gammaspektrometrischen Analyse mindestens drei Wochen gelagert, um ein ausreichendes Gleichgewicht zwischen ^{226}Ra und seinen Zerfallsprodukten zu gewährleisten (GOODBRED und KUEHL 1998).

Die Gammaspektrometrie wurde am 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 und 351.9 keV). Es wurden drei low background Ge(Li) Detektoren verwendet. Die Messdauer betrug 250000 s (2,9 Tage)

Das Radionuklid ^{137}Cs ($t_{1/2}$=30.2 a) weist in der Region der Nordsee im Allgemeinen zwei Anreicherungshorizonte auf, die auf dem atmosphärischen Fallout von Tschernobyl (1986) sowie auf dem durch oberirdische Atomwaffentests (Maximum 1963) hervorgerufenen Fallout beruhen (CALLAWAY et al. 1996; KIRCHNER und EHLERS 1998a; SCHUERCH et al. 2012; KIRCHNER und EHLERS 1998b)

Das Radionuklid ^{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/(m² 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 und OLDFIELD 1978; APPLEBY und 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 und OLDFIELD 1978; APPLEBY und OLDFIELD 1983).

Bei der Berechnung von Sedimentaufwuchsraten auf Basis der Bohrkerne wurde die Mächtigkeit der einzelnen Kernabschnitte um die bei der Rammkernbohrung unvermeidliche Stauchung (hier zwischen 10–25%) korrigiert. Wegen der mit der Tiefe zunehmenden Bodendichte und dem abnehmenden Organikgehalt würden tiefere Sedimentbereiche geringere Sedimentaufwuchsraten ergeben als höhere. Um eine Vergleichbarkeit zu den mit Sedimentfallen ermittelten Werten herzustellen, wurde im Folgenden mit einheitlichen Werten für BDD und LOI_{Soil} gerechnet (Tab. 2).

Tabelle 2: 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 Sedimentaufwuchsraten.

	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

2.4 Sedimentverteilung und Morphologie

Um die räumliche Variabilität der durch Sedimentfallen quantitativ erfassten Sedimentdepositionen darzustellen, wurde ein Punkt-Kriging-Verfahren angewendet. Nach ASSELMAN und 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-Kartographischen 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 1x1 m lässt sich die Topographie 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 dargestellt 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 Vorhabens nicht durchgeführt werden.

3 Ergebnisse und Diskussion

3.1 Häufigkeit von Landunterereignissen

In Abb. 4 werden die mittleren Gelände- und Deich/Deckwerkshöhen über Normalhöhennull (NHN) sowie das regionale MThw als Mittel der letzten Dekade (2001–2010) dargestellt. Die absolute Geländehöhe ist auf Hooge (151 cm NHN) im Vergleich zu Langeneß (153 cm ü NHN) nur geringfügig niedriger. Für beide Halligen wird ein MThw von 136 cm NHN 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 NHN (GOF) und 155 cm (MThw) deutlich höher. Der Gradient der mittleren Deich/Deckwerkshöhen beschreibt einen entgegengesetzten Verlauf von 290 cm NHN (Hooge) über 234 cm NHN (Langeneß) bis 225 cm NHN (Nordstrandischmoor).

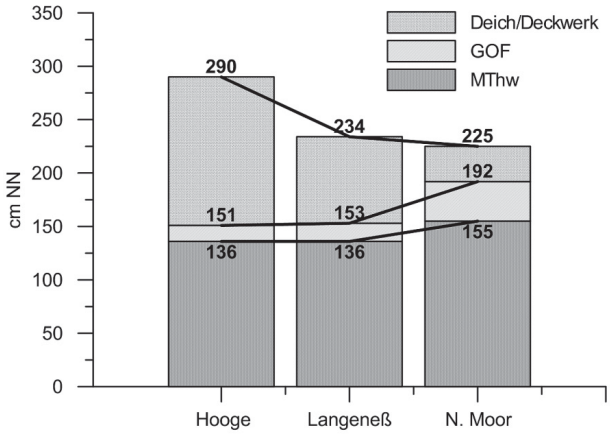

Abbildung 4: Mittlere Bezugshöhen der Halligen Hooge, Langeneß und Nordstrandischmoor über Normalnull (NHN). Dargestellt sind das mittlere Tidehochwasser (MThw), die mittlere Geländeoberfläche (GOF) und die mittlere Höhe der Sommerdeiche (Hooge und Langeneß) bzw. nicht Wasser permeablen Deckwerke (Nordstrandischmoor).

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 (Tab. 3). 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. 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.

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. Die Anzahl der im Zeitraum beobachteten

Überschreitungen der Binnenpegelschwellenwerte für LU und vLU sowie die nach Formel (1) und Formel (2) berechneten Außenpegelschwellenwerte bezogen auf den Pegelnullpunkt (PNP) sind der Tab. 4 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 zurückzuführen. 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: Referenzhöhen der Binnenpegelschwellenwerte für Land unter (LU) sowie vollständige Land unter Ereignisse (vLU) bezogen auf Normalnull (NHN) sowie das mittlere Tidehochwasser (MThw).

Hallig	Geländehöhe (LU)		Deich / Deckwerk (vLU)	
	cm NHN	cm MThw	cm NHN	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

Die im ausgewerteten Zeitraum 1952 bis 2011 sturmflutaktivste Periode mit 14 (Hooge) bzw. 26 (Langeneß) LU pro Jahr ist das Wasserwirtschaftsjahr (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.

Tabelle 4: 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.

Hallig	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

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. 64 % aller Ereignisse erreichen das Niveau einer vollständigen Überflutung (vLU).

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 (Tab. 5) 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 5: 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).

Hallig	1961–1970 LU (vLU) /a	1971–1980 LU (vLU) /a	1981–1990 LU (vLU) /a	1991–2000 LU (vLU) /a	2001–2010 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 NHN)	315	308	343	346	312

3.2 Bestimmung der Bodendichte und des organischen Anteils

Die Halligböden sind als junge, grundwasserbeeinflusste Gleye zu klassifizieren. Die obersten ca. 80 cm des Bodens sind nicht permanent wassergesättigt und durch braunrote Oxidationsfarben gekennzeichnet. Die Trockenraumdichte und der Glühverlust variieren deutlich mit der Tiefe (Abb. 5). 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/cm3 an der Oberfläche und bis zu ca. 1,4 g/cm3 in größerer Tiefe. Der Gehalt an organischer Substanz ist deutlich höher in den Böden von Hooge und Langeneß (>30 %) als von Nordstrandischmoor (>15 %).

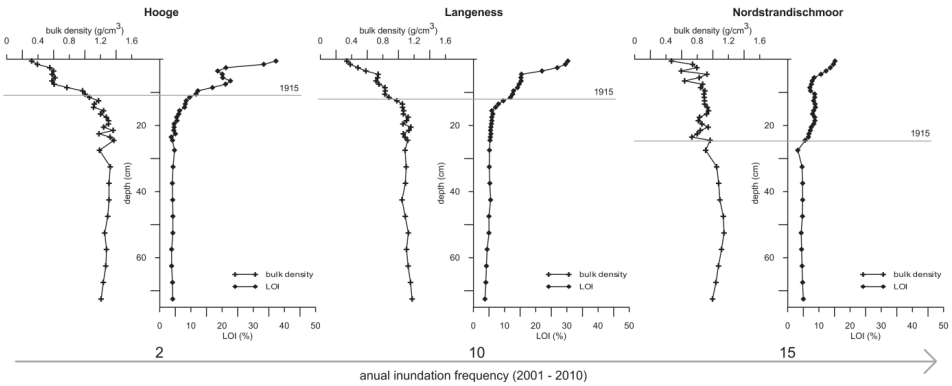

Abbildung 5: Mittlere BDD und LOI Werte als Proxies für organische Bodensubstanz bestimmt an Rammkernen von 2011 (a) Hooge, n=4, (b) Langeneß, n=6 (b) Nordstrandischmoor, n=2. Auflösung in 1 cm Abschnitten bis 25 cm Teufe, darunter 5 cm. Der Horizont von 1915 markiert den Deichbau auf den Halligen und damit einhergehende hydraulische und sedimentologische Veränderungen.

Wegen der hohen Korrelation zwischen LOI und BDD (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. (2010a) 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 Variationen. LOI Werte sind mit 4–5 % nahezu konstant. Unter Einbeziehung des Kristallwasserfehlers tendiert der Gehalt an organischer Substanz gegen Null.

Tabelle 6: 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 und LOI finden Eingang in die Berechnung der Sedimentaufwuchsraten.

	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

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 (Tab. 6). Auffällig ist der Organikgehalt der Sedimente vor dem Deichbau von 1915 (MÜLLER und FISCHER 1917), der deutlich niedrigere 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 und die seit 1915 deutlich angestiegenen Organikgehalte im Boden passen dazu.

3.3 Messung der vertikalen Aufwuchsraten

3.3.1 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 (Tab. 7). Die Ergebnisse der Radionukliddatierungen sind im Rahmen des Fehlers (vgl. Tab. 7) seit 1963 nicht unterscheidbar von den Raten aus den Sedimentfallenuntersuchungen. Wird der längere Zeitraum seit dem Deichbau betrachtet, so ergeben sich im Mittel geringfügig geringere Raten, da die Sedimentaufwuchsraten in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts niedriger waren als heute (vgl. Abb. 7)

Tabelle 7: Sedimentaufwuchsraten 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 Sedimentaufwuchs der einzelnen Halligen variiert deutlich von Jahr zu Jahr (Abb. 6) 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 permeablen Deckwerk ist auf Langeneß im Mittel 58 cm niedriger als auf Hooge (vgl. Abb. 4). 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.

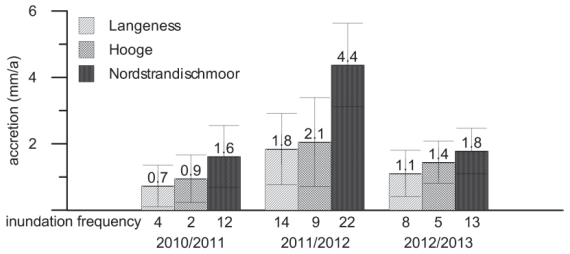

Abbildung 6: Mediane Sedimentaufwuchsraten für drei Beobachtungszeiträume (jeweils Oktober bis März, 2010 bis 2013) im Vergleich mit der Überflutungsanzahl (LU).

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 Zusammenhang (Abb. 7), der bei 4 von 12 Rammkernen statistisch signifikant ($p < 0.1$) ist (exemplarisch Abb. 8).

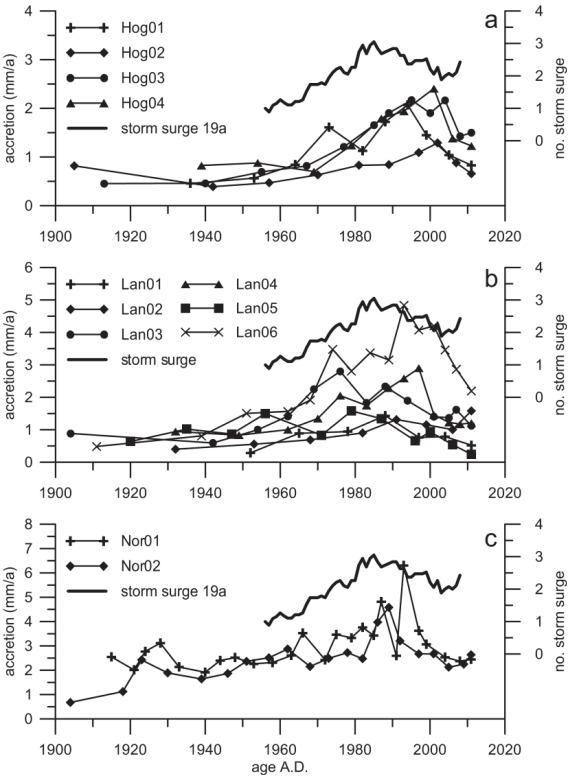

Abbildung 7: Vergleich der mittleren Sedimentaufwuchsraten (a) Hooge, (b) Langeneß und (c) Nordstrandischmoor mit der Sturmfluthäufigkeit. Die Sturmfluthäufigkeit beruht auf dem 19 jährigen gleitenden Mittel der jährlichen Überschreitungsanzahlen (1,54 m ü mThw) am Pegel Wyk auf Föhr.

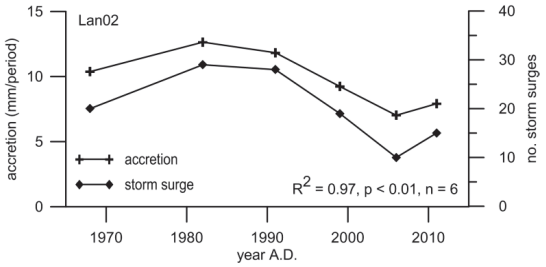

Abbildung 8: Sedimentaufwuchs (nach ^{210}Pb Alter) im Bohrkern Langeneß 2, verglichen mit der Anzahl an Sturmfluten über 1,54 m über MThw (MThw (Hooge) =1,36 m über NHN im Zeitraum 2001–2010).

3.3.2 Ostfriesische Inseln Juist und Norderney

Messungen der Sedimentaufwuchsraten 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 Millimeter pro Jahr und entsprechen somit denen der Halligen (Tab. 8). Das Gelände südlich des Billpolders auf Juist liegt topographisch höher über dem MThw als die Fläche östlich des Grohdepolders auf Norderney. Dies erklärt, warum die mittleren Aufwuchsraten auf der Versuchsfläche Juist wesentlich geringer sind als die auf Versuchsfläche Norderney.

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

3.3.3 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 und Topographie der Halligen

3.4.1 Sedimentverteilung

Die Sedimentverteilung wurde als dreijähriges Mittel der vertikalen Aufwuchsraten aus den Sedimentfallenkombinationen A und B berechnet (Tab. 7). Die Verteilungskarten zeigen unterschiedliche Verteilungsmuster der Überflutungssedimente auf den Halligen. Obwohl die Distanz zwischen den Fallenstandorten mit 400x400 m recht groß ist, zeigen sich Verteilungsmuster, welche teilweise mit naturbelassenen Tidenmarschen vergleichbar sind (Abb. 9). 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. 2010b).

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) (Abb. 9). Mit zunehmender Entfernung von 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 Tidegeschehen 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 (Abb. 9). 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 Sedimente 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 km² besitzt Nordstrandischmoor lediglich 12 Observationspunkte und zeigt eine eher chaotische Sedimentverteilung (Abb. 9). Ein Zusammenhang zwischen Sedimentverteilung und räumlichen Parametern konnte nicht nachgewiesen werden.

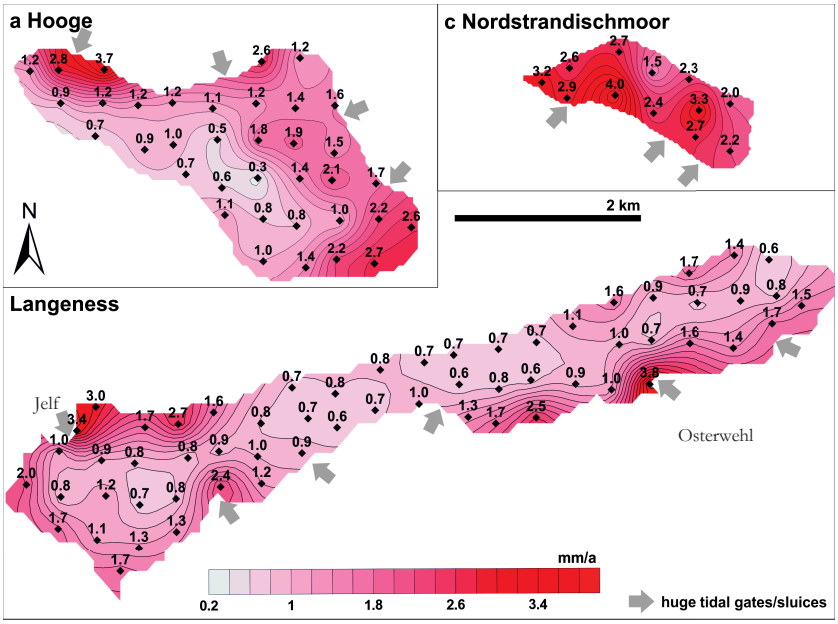

Abbildung 9: Verteilungskarten der Sedimentaufwuchsraten für die untersuchten Halligen. Dargestellt sind die Mittelwerte der Sedimentfallenuntersuchungen aus drei Jahren. Isolinien wurden mit linearem Kriging ohne Drift berechnet.

3.4.2 Topographie

Digitale Geländemodelle der Halligen (Abb. 10) 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 liegen, abgebildet werden. Neben den Uferwallstrukturen sind die Bereiche binnenseitig der Deckwerke in einem Bereich von 100 bis 200 m deutlich gegenüber den zentralen Flächen erhöht. 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. 2010b). Allerdings weisen Messungen des Sedimentaufwuchses rechtwinklig zu Binnenprielen darauf hin, dass die Unterschiede im heutigen Sedimentaufwuchs wesentlich geringer sind als die im Geländemodell beobachteten Refliefunterschiede. Dies spricht eher dafür, dass diese morphologischen Strukturen älteren Datums sind und heute in dieser Form nicht mehr von der Sedimentation unterstützt werden.

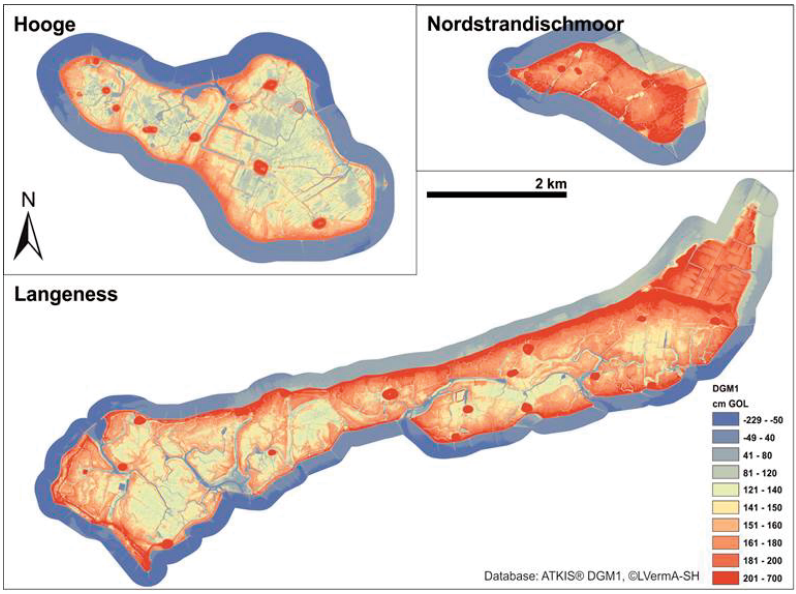

Abbildung 10: Digitales Geländemodell der Halligen Hooge, Langeneß und Nordstrandischmoor basierend auf LIDAR Daten (2005) mit einer Auflösung von 1 x 1 m.

4 Fazit

Die Hauptziele 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 Schlussfolgerungen ziehen:

- Der Sedimentaufwuchs auf den Halligen (aktuell Hooge 1,5 mm/a, Langeneß 1,2 mm/a, Norstrandischmoor 2,6 mm/a) 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 ergibt sich eine zunehmende Gefährdung für Warften und Bewohner auf Grund der zu erwartenden höheren hydrodynamischen Belastungen
- 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.

- 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).
- 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 beziffern. Daher 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.
- Zukünftige Forschung sollte sich u. a. auf die Frage konzentrieren, wie sich die Sedimentakkumulation auf den Halligen steigern lässt und unter welchen hydrologischen und meteorologischen Bedingungen eine ausreichende Sedimentverfügbarkeit gegeben ist. Dazu sind z. B. Trübemessungen und Sedimenttransportmodellierungen geeignet.

5 Schriftenverzeichnis

APPLEBY, P.G.: Chronostratigraphic Techniques in Recent Sediments. In: LAST, W.M. and SMOL, J.P. (Hg.): Tracking Environmental Change Using Lake Sediments, Bd. 1: Springer Netherlands (Developments in Paleoenvironmental Research), 171–203, 2001.
http://dx.doi.org/10.1007/0-306-47669-X_9

APPLEBY, P.G. and OLDFIELD, F.: The calculation of lead – 210 dates assuming a constant rate of supply of unsupported 210Pb to the sediment. CATENA 5 (1), S. 1–8, 1978.
http://dx.doi.org/10.1016/S0341-8162(78)80002-2

APPLEBY, P.G and OLDFIELD, F.: The assessment of 210Pb data from sites with varying sediment accumulation rates. Hydrobiologia 103 (1), 29–35, 1983.

ASSELMAN, N.E.M. and MIDDELKOOP, H.: Floodplain sedimentation: Quantities, patterns and processes. Earth Surf. Process. Landforms 20 (6), 481–499, 1995.

BARTHOLDY, A.T.; BARTHOLDY, J. and KROON, A.: Salt marsh stability and patterns of sedimentation across a backbarrier platform. In: Marine Geology 278 (1–4), 31–42, 2010a.

BARTHOLDY, A.T.; BARTHOLDY, J. and KROON, A.: Salt marsh stability and patterns of sedimentation across a backbarrier platform. In: Marine Geology 278 (1–4), 31–42, 2010b.

CALLAWAY, J.C.; DELAUNE, R.D. and PATRICK, W.H.: Chernobyl 137Cs used to determine sediment accretion rates at selected northern European coastal wetlands. In: Limnology and Oceanography 41 (3), 444–450, 1996.

CRAFT, C.B.; SENECA, E.D. and BROOME, S.W.: Vertical Accretion in Microtidal Regularly and Irregularly Flooded Estuarine Marshes. In: Estuarine, Coastal and Shelf Science 37 (4), 371–386, 1993.

D'ALPAOS, A.; LANZONI, S.; MARANI, M. and RINALDO, A.: Landscape evolution in tidal embayments: Modeling the interplay of erosion, sedimentation, and vegetation dynamics. In: Journal of Geophysical Research F: Earth Surface 112 (1), 2007.

DIBBER, S. und MÜLLER-NAVARA, S.: Wasserstände bei Sturmfluten entlang der nordfriesischen Küste. Die Küste, 76, 2009.

GOODBRED, S. and KUEHL, S.: Floodplain processes in the Bengal Basin and the storage of Ganges-Brahmaputra river sediment: an accretion study using 137Cs and 210Pb geochronology. In: Sedimentary Geology 121 (3–4), 239–258, 1998.
http://www.sciencedirect.com/science/article/B6V6X-3VSP0K5-M/2/cfb872c631e220d52eed2cb023a4dd93

HOUSTON, J.R. and DEAN, R.G.: Accounting for the Nodal Tide to Improve Estimates of Sea Level Acceleration. Journal of Coastal Research. In: Journal of Coastal Research, 801–807, 2011.

JENSEN, J.; ARNS, A.; SCHÜTTRUMPF, H.; WÖFFLER, T.; HÄUßLING, R.; ZIESEN, N.; JENSEN, F.; VON EYNATTEN, H.; SCHINDLER, M. und KARIUS, V.: Zukunft Hallig – Entwicklung von nachhaltigen Küstenschutz- und Bewirtschaftungsstrategien für die Halligen unter Berücksichtigung des Klimawandels. Die Küste, 84, 2016.

JENSEN, J.: Abschlussbericht zur Entwicklung von nachhaltigen Küstenschutz- und Bewirtschaftungsstrategien für die Halligen unter Berücksichtigung des Klimawandels (ZukunftHallig), 2014.

KIRCHNER, G. and EHLERS, H.: Sediment Geochronology in Changing Coastal Environments. Potentials and Limitations of the 137Cs and 210Pb Methods. In: Journal of Coastal Research 14 (2), 483–492, 1998a.

KIRCHNER, G.and EHLERS, H.: Sediment Geochronology in Changing Coastal Environments. Potentials and Limitations of the 137Cs and 210Pb Methods. In: Journal of Coastal Research 14 (2), 483–492, 1998b.

LONG, A.J.; WALLER, M.P. and STUPPLES, P.: Driving mechanisms of coastal change. Peat compaction and the destruction of late Holocene coastal wetlands. In: Marine Geology 225 (1–4), 63–84, 2006.
http://dro.dur.ac.uk/1193/

MÖRNER, N.: The northwest European "sea-level laboratory" and regional holocene eustasy. In: Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology 29, 281–300, 1980.

MÜLLER, F. und FISCHER, O.: Das Wasserwesen an der schleswig-holsteinischen Nordseeküste. Teil 1, Die Halligen, 1917.

SCHINDLER, M.; KARIUS, V.; DEICKE, M. and VON EYNATTEN, H.: Measuring sediment deposition and accretion on anthropogenic marshland – Part I: Methodical evaluation and development. In: Estuarine, Coastal and Shelf Science 151, 236–245, 2014a.

SCHINDLER, M.; KARIUS, V.; DEICKE, M. and VON EYNATTEN, H.: Measuring sediment deposition and accretion on anthropogenic marshland – Part II: The adaptation capacity of the North Frisian Halligen to sea level rise. In: Estuarine, Coastal and Shelf Science 151, 246–255, 2014b.

SCHUERCH, M.; RAPAGLIA, J.; LIEBETRAU, V.; VAFEIDIS, A. and REISE, K.: Salt Marsh Accretion and Storm Tide Variation: an Example from a Barrier Island in the North Sea. In: Estuaries and Coasts 35 (2), 486–500, 2012.

TEMMERMAN, S.; GOVERS, G.; WARTEL, S. and MEIRE, P.: Spatial and temporal factors controlling short-term sedimentation in a salt and freshwater tidal marsh, Scheldt estuary, Belgium, SW Netherlands. In: Earth Surf. Process. Landforms 28 (7), 739–755, 2003.
http://dx.doi.org/10.1002/esp.495

VINK, A.; STEFFEN, H.; REINHARDT, L. and 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). In: Quaternary Science Reviews 26 (25–28), 3249–3275, 2007.
http://www.sciencedirect.com/science/article/B6VBC-4PXG7NM-1/2/3c23053934568b9b88c872b04ec32dc2

WOODWORTH, P.L.: A Note on the Nodal Tide in Sea Level Records. Journal of Coastal Research. In: Journal of Coastal Research, 316–323, 2011.

Die Küste, 84 (2016), 1-226

Zum Einfluss möglicher Setzungserscheinungen am Leuchtturm Cuxhaven auf die langjährigen Wasserstandsaufzeichnungen am Pegel Cuxhaven Steubenhöft

Sebastian Niehüser, Jürgen Jensen, Thomas Wahl, Sönke Dangendorf und Jacobus Hofstede

Zusammenfassung

Der weltweite Anstieg des Meeresspiegels stellt eine der Hauptkonsequenzen des Klimawandels dar. Zur Beurteilung und Auswertung der an Pegeln aufgezeichneten Wasserstandszeitreihen ist daher eine geeignete und möglichst homogene Datenbasis die wesentliche Voraussetzung. Damit keine fehlerhaften Rückschlüsse aus den Analysen der Wasserstandsdaten gezogen werden, muss eine Prüfung und ggf. eine Anpassung der Referenzhöhen der aufgezeichneten Wasserstandswerte an Änderungen der Höhenlage des Pegelstandortes (z. B. Landsenkungen, Setzungen) vorgenommen werden. Insbesondere präzise Angaben zur Höhenlage der Pegel spielen eine übergeordnete Rolle, da die Pegelstandorte tektonischen und anthropogenen Einflüssen unterliegen. Der Fokus dieser Arbeit liegt auf dem Einfluss von möglichen Setzungserscheinungen am Leuchtturm Cuxhaven auf die MSL-Wasserstandszeitreihe des Pegels Cuxhaven Steubenhöft in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts. Es handelt sich beim Pegel Cuxhaven Steubenhöft um die längste verfügbare Wasserstandszeitreihe, bestehend aus Tidescheitelwasserständen (Tnw und Thw) für den Bereich der deutschen Nordseeküste, die bis Mitte des 19. Jahrhunderts (1843) ununterbrochen zurückreicht und in digitaler Form vorliegt. Somit bildet diese Wasserstandszeitreihe die wesentliche Grundlage für Rückschlüsse auf historische Wasserstandsentwicklungen sowohl auf regionaler (deutsche Nordseeküste) als auch globaler Ebene. Die Vergleichbarkeit von Ergebnissen aus unterschiedlichen Studien ist nur gegeben, wenn ein einheitliches Bezugssystem verwendet wird. Zur Untersuchung des Einflusses möglicher Setzungserscheinungen am Leuchtturm Cuxhaven auf die MSL-Wasserstandszeitreihe wurden 18 Vergleichspegel herangezogen, die auch Daten vor 1900 aufweisen. Eine von SIEFERT und LASSEN (1985) empfohlene Korrektur wurde auf die MSL-Wasserstandszeitreihe von Cuxhaven Steubenhöft im Zeitraum von 1855 bis 1900 angewendet. Anschließend wurden sowohl visuelle als auch analytische Vergleichsuntersuchungen (Trend- und Korrelationsanalysen) durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass im Vergleich mit anderen Pegeln der Nord- und Ostsee auf das Anbringen dieser Korrektur verzichtet werden sollte, da die MSL-Zeitreihe des Pegels Cuxhaven Steubenhöft ohne Korrektur besser zu anderen Pegeln passt. Solange keine neuen Erkenntnisse vorliegen, wird aufgrund der vorliegenden Ergebnisse empfohlen, auf eine Korrektur der Wasserstandsaufzeichnungen des Pegels Cuxhaven Steubenhöft zu verzichten.

Schlagwörter

Pegel Cuxhaven (Steubenhöft), Landsenkung, Wasserstandszeitreihen, Nivellement, MSL, Jahreswerte

Summary

Global sea level rise is one of the main consequences of climate change. For analysing recorded water levels at tide gauge sites, a suitable and homogeneous time series is required. Before one can analyze the available data sets, they have to be checked and if necessary adjusted to observed changes in the tide gauge location to avoid misinterpretation. Especially detailed information about the elevation of tide gauge sites is important because they are influenced by tectonic movements and anthropogenic effects. In this paper the focus is on the influence of the subsidence at the lighthouse of Cuxhaven on the MSL water level time series of the tide gauge of Cuxhaven Steubenhöft in the second half of the 19th Century. The tide gauge Cuxhaven Steubenhöft provides the longest and uninterrupted digital time series in the German North Sea (since 1843, restricted to the tidal high (HW) and low water levels (LW)). Thus, this water level time series forms the essential basis for conclusions on historical water level developments on both regional (German North Sea) and global scales. Therefore, the comparability of results from different studies can only be given, if uniform data sets are used. To analyze the influence of subsidence at the lighthouse of Cuxhaven on the MSL water level time series, 18 tide gauge sites were used. The criterion was a data availability that reaches back to the middle of the 19th century. A correction of the raw data as suggested by SIEFERT and LASSEN (1985) was applied to the water level time series of Cuxhaven Steubenhöft in the period of 1855 to1900. Subsequently, visual, trend and correlation analysis were performed. The comparison with the other tide gauge locations revealed that a correction of the time series is not necessary. The MSL water level time series of Cuxhaven Steubenhöft fits well to the selected reference sites without the correction. As long as no further results suggest otherwise, it is recommended not to correct the water level time series of Cuxhaven Steubenhöft.

Keywords

Tide gauge Cuxhaven (Steubenhöft), subsidence, water level time series, leveling, MSL, annual values

Inhalt

1 Einleitung 121
2 Aufgabenstellung 122
2.1 Datenverfügbarkeit am Pegel Cuxhaven 122
2.2 Untersuchungszeitraum und die Historie des Pegels Cuxhaven 123
2.3 Konkretisierung der Aufgabenstellung 125
3 Datengrundlage der Vergleichspegel 127
4 Berücksichtigung der postglazialen Ausgleichsbewegung 128
5 Untersuchungen für Cuxhaven vs. Vergleichspegel 130
5.1 Beeinflussung des langfristigen MSL-Trends 130
5.2 Visuelle Beurteilung 131

5.3 Trendanalysen 134
5.4 Korrelationsanalysen 136
5.5 Kombination aus Trend- und Korrelationsanalysen 138
5.6 Bewertung der Ergebnisse 139
6 Schlussfolgerung 140
6.1 Gründe für eine Korrektur der Wasserstandszeitreihe von Cuxhaven 141
6.2 Gründe gegen eine Korrektur der Wasserstandszeitreihe von Cuxhaven 141
6.3 Ausblick 142
7 Schriftenverzeichnis 143

1 Einleitung

Global als auch regional betrachtet stellt der Klimawandel den Menschen vor große Herausforderungen. Eine der Hauptkonsequenzen des Klimawandels stellt insbesondere der weltweite Anstieg des Meeresspiegels dar. Um den Meeresspiegelanstieg mit den an Pegeln aufgezeichneten Wasserstandszeitreihen beurteilen und auswerten zu können, ist die maßgebende Voraussetzung eine geeignete und möglichst homogene Datenbasis. Zur Vermeidung fehlerhafter Rückschlüsse aus den zur Verfügung stehenden Datensätzen muss eine Prüfung und ggf. eine Anpassung der Aufzeichnungswerte an festgestellte Änderungen des Pegelstandortes den Untersuchungen vorangestellt werden. Insbesondere präzise Angaben zur Höhenlage der Pegel spielen eine übergeordnete Rolle, da die Pegelstandorte tektonischen und anthropogenen Einflüssen, wie z. B. durch Gasentnahmen (STEFFEN und WU 2011), unterliegen. Im Bereich der deutschen Nordseeküste können diese bis zu einige Millimeter betragen. Eine Nichtberücksichtigung würde systematisch verfälschte Wasserstandsänderungen ergeben, die hinsichtlich ihrer hydrologischen oder klimabedingten Ursachen nicht korrekt interpretiert werden könnten (WANNINGER et al. 2008). In JENSEN und TÖPPE (1986) wurden am Beispiel des Pegels Travemünde Originalaufzeichnungen unter Berücksichtigung der genannten Aspekte aufbereitet, die bis ins Jahr 1826 zurückreichen. Eine Auswertung der Daten hinsichtlich der Entwicklung von Extremwasserständen erfolgte in JENSEN und TÖPPE (1990). Der Fokus dieser Arbeit liegt auf dem Einfluss von möglichen Setzungserscheinungen am Leuchtturm Cuxhaven auf die *Mean Sea Level* (MSL)-Wasserstandszeitreihe des Pegels Cuxhaven Steubenhöft (im Weiteren als Pegel Cuxhaven bezeichnet) in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts. Aufgrund der räumlichen Nähe zueinander (s. Abb. 1) wäre der Pegelstandort Cuxhaven maßgeblich von einem Absinken des Cuxhavener Leuchtturms betroffen.

Wie bereits erwähnt, nehmen Setzungserscheinungen an Pegelnullpunkten, hervorgerufen durch z. B. Vertikalbewegungen, bei der Analyse von gemessenen Wasserstandsdaten eine außerordentliche Rolle ein (WEISS und SUDAU 2011). Insbesondere wenn kausale Zusammenhänge zwischen älteren und neueren Messungen hergestellt werden sollen, ist die Betrachtung eines Höhenunterschiedes Δh (Landeshorizont → Pegelfestpunkt → Pegelnullpunkt) unumgänglich (SIEFERT und LASSEN 1985). Allerdings muss in jedem Fall nachgewiesen werden können, dass festgestellte Höhenänderungen tatsächlich stattgefunden haben und demnach eine Homogenisierung des Datensatzes durchgeführt werden sollte. Fehlt ein derartiger Nachweis oder lassen die Nivellements Zweifel an der

korrekten Ausführung durch fehlerhafte Anschlussnivellements bzw. durch fehlerhafte Messwerte oder Systemunstimmigkeiten aufkommen, sollte auf eine Korrektur verzichtet werden, da diese die Unsicherheiten des Datenbestandes noch vergrößern kann. Außerdem müssen zur Bestimmung von tatsächlichen Höhenänderungen aus Wiederholungsmessungen gleiche Referenzpunkte gewählt werden, die wiederum als stabil und unverändert angesehen werden können (WANNINGER et al. 2008).

Im Weiteren werden der Umgang und eine mögliche Prüfung der Plausibilität von gemessenen Setzungen am Pegel Cuxhaven vorgestellt, bewertet und eine Empfehlung für den zukünftigen Umgang mit der längsten verfügbaren Wasserstandszeitreihe für den Bereich der deutschen Nordseeküste vorgestellt. Diesem Umgang kommt insofern eine wichtige Bedeutung zu, da eine Vergleichbarkeit von Ergebnissen aus unterschiedlichen Studien nur gegeben sein kann, wenn eine einheitliche Datenbasis bzw. ein vergleichbares Bezugssystem verwendet wird. Die Wasserstandsmessungen am Pegel Cuxhaven stellen die einzigen Beobachtungen im Gebiet der Deutschen Bucht dar, die seit Mitte des 19. Jahrhunderts (1843) ununterbrochen vorliegen und in digitaler Form zur Verfügung stehen und somit die wesentliche Basis für Rückschlüsse auf die historische Wasserstandsentwicklung darstellen. Demzufolge ist die Wasserstandszeitreihe nicht nur regional, sondern auch im Kontext globaler Studien von erheblicher Bedeutung für die Bewertung historischer Wasserstandsentwicklungen.

2 Aufgabenstellung

2.1 Datenverfügbarkeit am Pegel Cuxhaven

Erste Aufzeichnungen von Tidemessungen liegen für den Standort Cuxhaven ab etwa 1786 vor. Anfänglich handelte es sich dabei um lückenbehaftete Wasserstandsablesungen an einer provisorischen Latte zur Bestimmung von Tidehub und ordinärer Ebbe (LASSEN et al. 1984). Laut JENSEN (1984) liegen schließlich seit 1843 regelmäßige Lattenpegelaufzeichnungen vor. Diese Beobachtungen beschränken sich allerdings auf händisch protokollierte Tidehoch- und -niedrigwasser, die in der Niederlassung Cuxhaven der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) archiviert wurden (vgl. Abb. 2). Ab dem Jahr 1899 wurden schließlich die Wasserstände mit einem Schwimmerschreibpegel am Pegel „Steubenhöft“ erfasst (vgl. Abb. 1). Durch die veränderte Messtechnik liegen seit diesem Zeitpunkt vollständig auf Pegelbögen aufgezeichnete Tidekurven vor. Dank der Digitalisierung dieser Tidekurven (veranlasst durch Dipl.-Ozean. Ralph Annutsch, i. R., ehemals BSH) sind seit 1918 bis heute Stundenwerte der Wasserstände vorhanden (DANGENDORF et al. 2013). Seit 1996 zeichnet schließlich ein digitaler Tidepegel minütlich die Wasserstände auf (MÜLLER-NAVARRA et al. 2013).

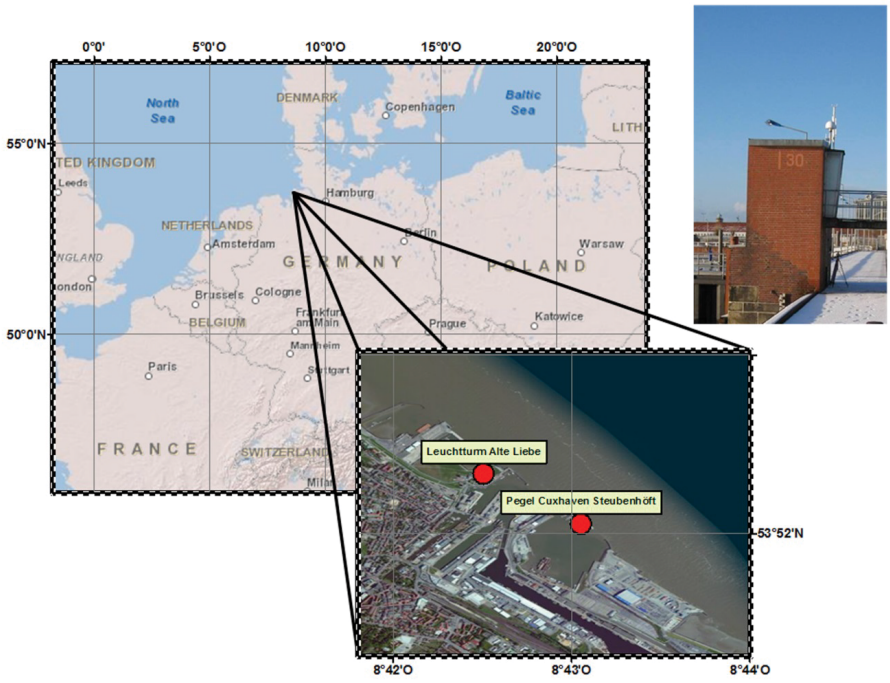

Abbildung 1: Lage des Pegels Cuxhaven und Darstellung des Pegelhauses (WEB 1).

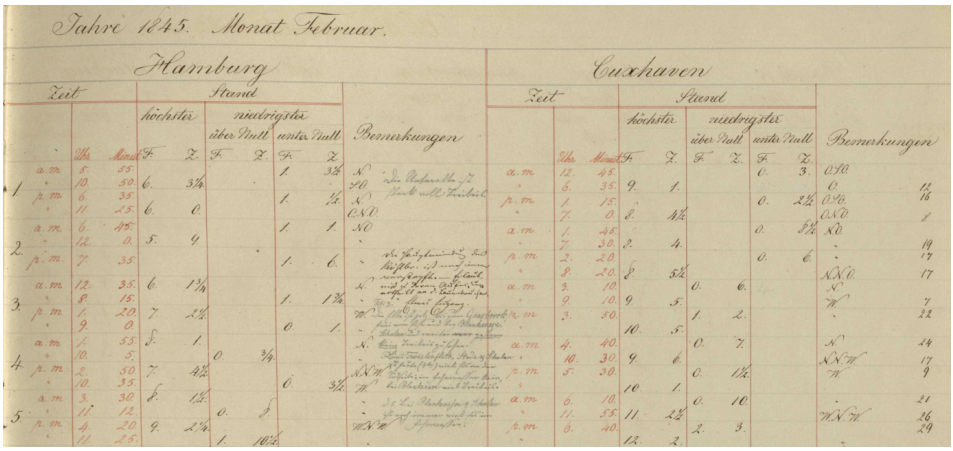

Abbildung 2: Wasserstandsaufzeichnungen der Pegel Hamburg und Cuxhaven für Februar 1845. Die Höhen sind in der Einheit Hamburger Fuß und Zoll aufgetragen, die Zeiten sind lokale Uhrzeiten (MÜLLER-NAVARRA et al. 2013).

2.2 Untersuchungszeitraum und die Historie des Pegels Cuxhaven

Als Grundlage für die Untersuchungen wird der Zeitraum von 1855 bis 1900 herangezogen. Konkret wird überprüft, ob die festgestellten Höhenbewegungen am Pegelfestpunkt

des Cuxhavener Tidepegels (vgl. z. B. SIEFERT und LASSEN 1985) auf Basis vergleichender Betrachtungen mit anderen langen Pegelzeitreihen bestätigt werden können und somit eine Korrektur der Wasserstandszeitreihe erforderlich machen.

Zum geschichtlichen Hintergrund: Im März des Jahres 1855 brachte Lentz am Granitsockel des Cuxhavener Leuchtturms ein Höhenschild an, das später durch eine in den Granit gehauene Kerbe ersetzt wurde. Die Höhe leitete Lentz aus seinem Nivellement von Hamburg nach Cuxhaven ab (vgl. Tab. 1). Durch diese bauliche Kontrollmarke war einerseits der Pegelnullpunkt für die Nachwelt gesichert und andererseits ein Anschlusspunkt für weitere Höhenmessungen geschaffen.

In SIEFERT und LASSEN (1985) wurden die in Tab. 1 aufgeführten Nivellements ausgewertet und eine Senkungstendenz des Leuchtturms Cuxhaven aus den abnehmenden Höhenwerten der Pegelkontrollmarke in Form der eingehauenen Kerbe abgeleitet. Vorangegangen waren laut SIEFERT und LASSEN (1985) zeitaufwendige Umrechnungen von Fuß- in Metermaße für ältere Nivellements sowie die Bestimmung vergangener Änderungen von Höhenfestpunkten.

Tabelle 1: Übersicht durchgeführter Nivellements für den Betrachtungszeitraum (SIEFERT und LASSEN 1985).

Lentz	1854/55 Hamburg-Cuxhaven
Taack	Nachmessungen von Otterndorf bis Cuxhaven
Preußische Landesaufnahme	1875 mit Ergänzungsmessungen bis 1912
Seibt (im preußischen geodätischen Institut, später Büro für Hauptnivellements und Wasserstandsbeobachtungen)	1876/77; 1881; 1885; 1890; 1883/84 Gradmessung Nivellement Anclam-Cuxhaven
Nivellements im Amte Ritzebüttel (heutiges Cuxhaven)	1864 bis 1912
Hamburger Vermessungsbüro in Cuxhaven	1912-1935
Reichsamt für Landesaufnahme	1914-1935
Niedersächsisches Landesverwaltungsamt - Landesvermessung-	1950-1981
Bundesanstalt für Gewässerkunde	
Vermessungsamt der Freien und Hansestadt Hamburg	
Nordseeküstennivellement I (NKN I)	1926 bis 1931
Nordseeküstennivellement II (NKN II)	1949-1955

In Abb. 3 ist die angesprochene und von SIEFERT und LASSEN (1985) abgeleitete Senkungstendenz (blau) mit der zugehörigen Regressionsgeraden (rot) aus LASSEN et al. (1984) dargestellt. Der Korrelationskoeffizient zwischen den nivellierten Höhen der Kerbe am Leuchtturm mit der Regressionsgeraden beträgt $r = -0{,}97$.

Aus den so erhaltenen Senkungen und „*unter Zugrundelegung aller Erkenntnisse und der Umrechnung vom „alten" auf das „neue System" (NN a.S. auf NN n.S.) sind die Wasserstände in den Gewässerkundlichen Jahrbüchern für Cuxhaven*" nach SIEFERT und LASSEN (1985, S. 70) um die in Tab. 2 aufgeführten Beträge anzupassen. Daraus ergibt sich für den relevanten Untersuchungszeitraum von 1855 bis 1900 die in Abb. 3 dargestellte Korrekturkurve.

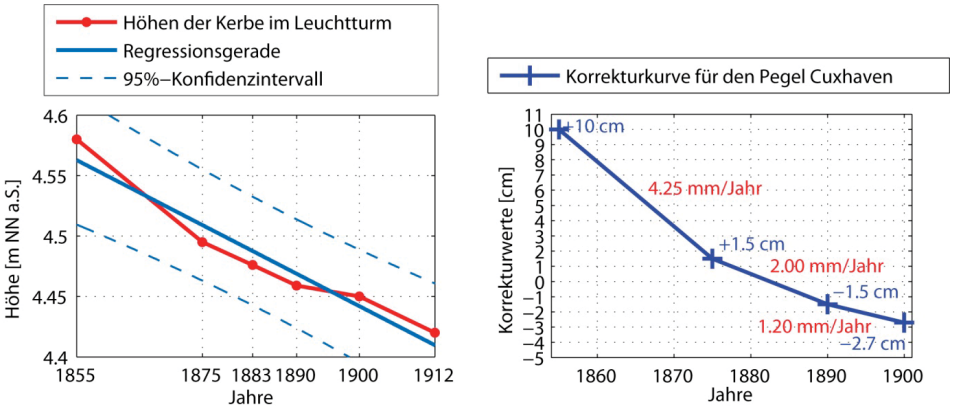

Abbildung 3: Ermittelte Senkungstendenz des Leuchtturms Cuxhaven von 1855 bis 1912 mit Regressionsgeraden aus LASSEN et al. (1984) (links) und Korrekturkurve für die Wasserstandszeitreihe des Pegels Cuxhaven von 1855 bis 1900 aus SIEFERT und LASSEN (1985) (rechts).

Tabelle 2: Stützpunkte der Korrekturkurve für den Pegel Cuxhaven (SIEFERT und LASSEN 1985).

vor 1855	unbekannt
von 1855 bis 1875	gleichmäßig von +10 cm auf +1,5 cm
bis 1890	gleichmäßig auf -1,5 cm
bis 1900	gleichmäßig auf -2,7 cm
ab 1900	unverändert (die Angaben in den Gewässerkundlichen Jahrbüchern sind auf „a.S." bezogen, gelten aber für „n.S." als richtig, da sich zwei Annahmen gegeneinander aufheben, und zwar -2,7 cm und +2,5 cm)
ab 1936	keine Korrekturen außer den angegebenen PNP-Verschiebungen

2.3 Konkretisierung der Aufgabenstellung

Aus der in Abb. 3 gezeigten Korrekturfunktion zum Ausgleich des Einflusses von Setzungserscheinungen am Leuchtturm Cuxhaven auf die Wasserstandsbeobachtungen ergibt sich die grundlegende Frage, ob die Anpassung der Aufzeichnungen zwischen 1855 und 1900 vorgenommen werden muss. Aufgrund der häufigen Verwendung des Pegels Cuxhaven als Indikator für die gesamte Deutsche Bucht (vgl. z. B. DANGENDORF et al. 2012) bzw. als repräsentativen Standort für Hochwasserrisikoanalysen, auch als Eingangspegel der Stadt Hamburg (OUMERACI et al. 2009, 2012; WAHL et al. 2011, 2012), kommt dieser Fragestellung eine entscheidende Bedeutung zu. Neue Untersuchungen zeigen, dass eine Eignung des Pegels Cuxhaven als Indikator des MSL für die gesamte Deutsche Bucht nicht gegeben ist, da das gemeinsame Signal (im Wesentlichen dekadische Variabilität) anderer Nordseepegel nicht vollständig wiedergegeben wird (ALBRECHT et al. 2011). Allerdings bezieht sich diese Erkenntnis auf Aufzeichnungen nach 1924, weshalb diese Aussage nicht unmittelbar auf den hier betrachteten Untersuchungszeitraum übertragen werden kann.

Unabhängig von der Eignung des Pegels Cuxhaven als MSL-Indikator für die gesamte Deutsche Bucht wären Änderungen in den Wasserständen fehlerbehaftet ermittelt worden (z. B. säkularer Meeresspiegelanstieg), wenn einerseits der Zeitraum von 1855 bis

1900 den Untersuchungen zugrunde lag und andererseits die „falsche“ Zeitreihe für die Untersuchungen herangezogen wurde. Denn ein kontinuierliches Sinken des Leuchtturms führt selbst bei gleichbleibenden Wasserständen zu höheren Pegelablesungen. Damit würde eine Trendermittlung zwangsläufig zu erhöhten Anstiegsraten führen.

In der Literatur finden sich sowohl Arbeiten, die eine Anpassung der Wasserstandszeitreihen für entsprechende Untersuchungen vorgenommen haben (z. B. JENSEN 1984; JENSEN et al. 1992; HOFSTEDE 1990) wie auch Arbeiten, in welchen bewusst darauf verzichtet wurde (z. B. JENSEN et al. 1988, 2011a, 2011b; WAHL et al. 2010, 2011). Hierbei resultieren die begründeten Zweifel an der ermittelten Senkungstendenz aus einer Untersuchung von Lentz, die in LASSEN et al. (1984) beschrieben steht. Als Grundlage dienten mittlere Jahreswasserstände (etwa halbe Tidehöhe; entspricht mittlerem Tidehalbwasser MT1/2w (vgl. JENSEN et al. 2011a für die Definition und den Unterschied MSL und MT1/2w)) sowie die Ergebnisse des Nivellements von Hamburg nach Cuxhaven (vgl. Tab. 1, 1. Zeile), das von Lentz selbst durchgeführt wurde. Lentz kommt allerdings zu dem Schluss, dass sich weder durch die Gegenüberstellung der mittleren Jahreswasserstände noch durch das Nivellement ein Sinken des Leuchtturms vermuten bzw. nachweisen lässt.

LASSEN et al. (1984) vermuten hingegen keine hohe Genauigkeit des Lentz'schen Nivellements bis Harburg, weshalb diese Vermutung auch für die Nivellementslinie bis Cuxhaven aufgestellt wird. Eine Zusammenstellung von Widersprüchen in den Messungen kann allerdings aufgrund fehlender Rückmessungen nicht erfolgen. Daher kommen LASSEN et al. (1984) zu dem Schluss, dass Lentz's Annahme nicht aufrechterhalten werden kann und der Leuchtturm wie in Abb. 3 im Zeitraum von 1855 bis 1912 gleichmäßig um etwa 16 cm gesackt ist. So wurde die Korrektur als nachgewiesene Setzung in JENSEN (1984) angenommen und der verwendete Datensatz angepasst. An dieser Stelle gilt es allerdings die Frage zu beantworten, wie mit der einschränkenden Aussage in LASSEN et al. (1984, S. 114) *„…Lentz vermutet sogar einen Fehler in seinem Nivellement von 1855 kurz vor Cuxhaven…*“ umzugehen ist? Ohne die Berücksichtigung des Lentz'schen Nivellements von 1855 würde sich die sehr starke Senkungsrate von 4,25 mm/Jahr für den Zeitraum 1855 bis 1875 nicht in der Form ergeben wie in Abb. 3 dargestellt. Außerdem kann anhand der veröffentlichten Ergebnisse nicht gänzlich geklärt werden, ob die ermittelten Höhenunterschiede aus dem Nivellement vollständig auf lokale Setzungen im Bereich des Cuxhavener Leuchtturms zurückzuführen sind. Ebenso können diese teilweise aus Unterschieden in großräumigeren Vertikalbewegungen zwischen den Ausgangspunkten des Nivellements (Bremen und Hamburg) und dem Endpunkt Cuxhaven zurückzuführen und schließlich in den Messungen erfasst worden sein. Diese und weitere unbeantwortete Fragen haben dazu geführt, dass die Korrektur z. B. im KFKI-Projekt AMSeL („Analyse von hochaufgelösten Tidewasserständen und Ermittlung des MSL an der deutschen Nordseeküste“) nicht berücksichtigt, jedoch ebenso wie die Unsicherheiten weiterer historischer Pegeldaten diskutiert wurde (s. u. und JENSEN et al. 2011a).

Im Folgenden werden verschiedene Analysemethoden auf den Datensatz von Cuxhaven ohne (Cuxhaven oK) und mit Korrektur (Cuxhaven mK) der Wasserstände angewendet. Dabei werden optische Vergleiche sowie Trend- und Korrelationsanalysen mit Pegeln durchgeführt, für welche ebenfalls Aufzeichnungsdaten zwischen 1855 und 1900 verfügbar sind. Diese Auswertungen werden auf Basis von MSL-Jahreswerten durchgeführt. Ziel der Untersuchungen ist es, eine Aussage bzw. eine Empfehlung

aussprechen zu können, wie in Zukunft mit dem Datensatz des Pegels Cuxhaven umzugehen ist und so eine Vergleichbarkeit von Ergebnissen in zukünftigen Studien durch Berücksichtigung eines einheitlichen Datensatzes zu gewährleisten.

3 Datengrundlage der Vergleichspegel

Für die Vergleichsbetrachtungen wurden 18 Pegelstandorte ausgewählt, für die Daten aus der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts zur Verfügung stehen und die sich im erweiterten räumlichen Umfeld des Pegels Cuxhaven an der Nord- und Ostseeküste sowie eines Pegel an der Atlantikküste befinden. In Tab. 3 (Spalte 1) sind die 18 Pegelstandorte aufgelistet, die für die Vergleichsuntersuchungen mit Cuxhaven genutzt werden sollen. Abb. 4 zeigt die geographische Lage der Nord- und Ostseepegel sowie die des Atlantikpegels. In Spalte 2 und 3 von Tab. 3 sind die zur Verfügung stehenden Aufzeichnungszeiträume aufgeführt. Es werden jeweils MSL-Jahreswerte verwendet, die auf der Homepage des Permanent Service of Mean Sea Level (PSMSL, http://www.psmsl.org/) u. a. für die Nordsee zur Verfügung gestellt werden. Die Daten der Ostseepegel stammen aus der Veröffentlichung von HAHN und RIETSCHEL (1938).

Tabelle 3: Ausgewählte Pegel für die Vergleichsuntersuchungen.

Pegel	Datenverfügbarkeit		Datenlücken 1855-1900 [%]	GIA-Korrektur [mm/Jahr] (pos. = Senkung)
	von	bis		
Cuxhaven	1843	2011	0	0,36
Brest	1807	2011	9	0,22
Sheerness	1833	2006	83	-0,08
Delfzijl	1826	2011	0	0,37
West Terschelling	1887	2011	70	0,43
Harlingen	1865	2009	22	0,36
Den Helder	1832	2011	0	0,30
Ijmuiden	1871	2011	37	0,16
Hoek van Holland	1864	2011	20	0,04
Vlissingen	1862	2009	15	-0,06
Pillau	1816	1935	0	-0,39
Stolpmünde	1858	1935	7	-0,39
Kolberg	1816	1935	0	-0,35
Swinemünde	1811	1935	0	-0,28
Barhöft	1878	1935	50	0,00
Warnemünde	1883	1935	61	-0,05
Schleimünde	1874	1935	41	0,00
Travemünde	1855	1935	0	0,09
Amsterdam	1800	1900	0	0,17*
*Mittelwert aus Den Helder, Ijmuiden und Hoek van Holland ((0,30+0,16+0,04)/3 = 0,17)				

Wichtig für die weitere Herangehensweise und insbesondere für die Beurteilung der Ergebnisse sind Lücken in den Aufzeichnungsdaten für den Untersuchungszeitraum von

1855 bis 1900, welche in Spalte 4 in Tab. 3 prozentual aufgeführt sind. So ist es z. B. fraglich, inwiefern belastbare Trends bzw. Vergleiche mit dem Pegelstandort Sheerness ermittelt werden können, wenn 83% des Betrachtungszeitraumes lückenbehaftet sind. In den entsprechenden Kapiteln wird schließlich der Datensatz von Cuxhaven an die vorhandene Datengrundlage des Vergleichspegels angepasst (vgl. Kap. 5.2). Das bedeutet, dass für die Untersuchungen nur die Jahreswerte verwendet werden, die an beiden Pegeln gleichermaßen vorhanden sind.

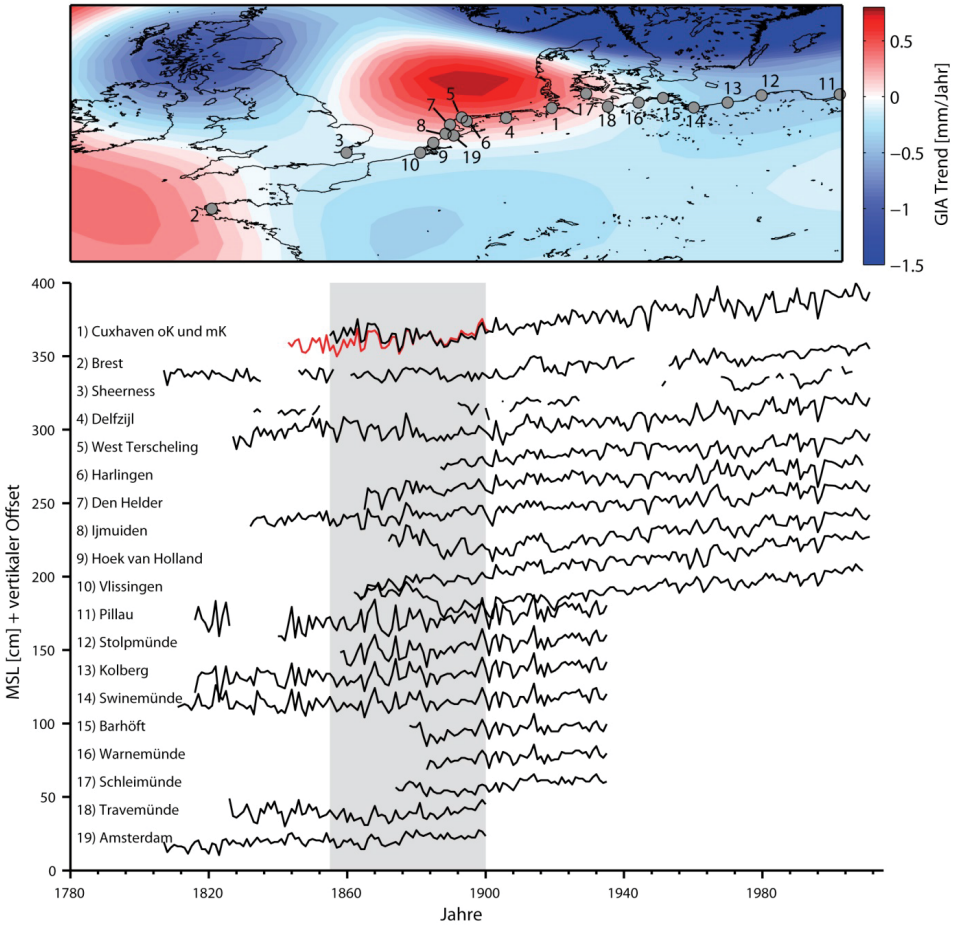

Abbildung 4: Geografische Lage aller Vergleichspegel inklusive des GIA „Fingerprints“ nach PELTIER (2004) (oben) mit den zugehörigen MSL-Zeitreihen (schwarz) aller Pegel. Außerdem sind die MSL-Zeitreihen Cuxhaven oK (rot) als auch Cuxhaven mK (schwarz) dargestellt. Die grau schraffierte Fläche kennzeichnet die Untersuchungsperiode von 1855–1900.

4 Berücksichtigung der postglazialen Ausgleichsbewegung

Die MSL-Zeitreihen der in Tab. 3 aufgeführten Pegel sollen für vergleichende Untersuchungen mit der MSL-Zeitreihe Cuxhaven oK und mK hinsichtlich interannueller/

dekadischer Variabilität und Trendentwicklung genutzt werden. Nach WANNINGER et al. (2008) ist eine wichtige Voraussetzung, dass die Höhenlagen der Pegel und der Pegelnullpunkte während der Untersuchungsdauer konstant bzw. bekannt sind und damit korrigiert werden können. Einflüsse aus tektonischen sowie anthropogenen Einwirkungen (z. B. Bergbau, Grundwasser- oder Gasentnahmen) erzeugen vertikale Bewegungen der Erdoberfläche, die sich ebenfalls auf die Pegelstandorte auswirken. Insbesondere wenn es darum geht, Trends unterschiedlicher Pegelaufzeichnungen miteinander zu vergleichen, ist es wichtig, den Einfluss vertikaler Landbewegungen zu berücksichtigen. Die Überlagerung von Wasserstandsänderungen und den rezenten Krustenbewegungen führen, wenn sie nicht berücksichtigt werden, zu scheinbaren Änderungen in den Wasserständen und hydrologische bzw. klimabedingte Wasserstandsänderungen können nicht korrekt erfasst werden. Etwaige Unterschiede in den relativen Trends sind in dem Fall auf ebensolche Landbewegungseffekte zurückzuführen (WANNINGER et al. 2008).

Um diesen Effekt auszuschließen, wurden alle MSL-Zeitreihen um den Einfluss postglazialer Ausgleichbewegungen (*engl. Glacial Isostatic Adjustmment* (GIA)) korrigiert. Hierzu wurden entsprechende Daten von der Webseite des Permanent Service of Mean Sea Level (PSMSL, http://www.psmsl.org/) (PELTIER 2004) verwendet. GIA ist ein globales Phänomen mit regional unterschiedlicher Ausprägung und beschreibt großskalige Landhebungen/-senkungen der Erdoberfläche infolge von Schmelzprozessen in der Landeisbedeckung seit der letzten Eiszeit. Zwar können auch andere geologische Vorgänge (z. B. Tektonik, vulkanische Aktivitäten oder Grundwasser- und Gasentnahmen) für Bewegungen in der Erdoberfläche verantwortlich sein, jedoch ist GIA der einzige durch numerische Modelle erfassbare Prozess. Die Auswirkungen der geologischen Vorgänge können sich mit dem GIA-Effekt überlagern und diesen verstärken oder auch verringern. Für verschiedene Megacities wurden so z. B. in NICHOLLS (2010) Landsenkungen über das 20. Jahrhundert hinaus ermittelt, die bis zu mehrere Meter betragen können. In Arbeiten der jüngeren Vergangenheit werden GIA-Modellergebnisse zur Berücksichtigung der Vertikalbewegungen verwendet (vgl. CHURCH und WHITE 2006; HOLGATE und WOODWORTH 2004; JEVREJEVA et al. 2006, 2008). Kürzlich zeigten zudem WAHL et al. (2013), dass die GIA-Korrektur in der Nordsee flächenmäßig zu den aktuell noch immer homogensten Ergebnissen führt. Eine Übersicht der GIA-Daten und der Modellierung liefern STEFFEN und WU (2011).

Die verbleibenden Effekte können beispielsweise durch ausreichend lange *Continuous Global Positioning System* (CGPS) Messungen erfasst werden. Aktuelle Studien bestätigen das und verwenden das CGPS, um kontinuierliche Messungen der Vertikalbewegungen direkt oder in unmittelbarer Nähe der Pegel auszuwerten (WÖPPELMANN et al. 2007, 2009; SCHÖNE et al. 2009; SUDAU und WEISS 2011). Auf diese Weise sind sehr genaue Abschätzungen der Vertikalbewegungen möglich und unter der Annahme, dass dieser Prozess linear verläuft (SCHÖNE et al. 2009), ist es möglich, verfügbare Wasserstandsdaten um die Vertikalbewegungen zu korrigieren (z. B. WOODWORTH et al. 2009).

Die für die ausgewählten Pegelstandorte ermittelten Landsenkungs- bzw. Landhebungsraten sind in Tab. 3 (Spalte 5) zusammengefasst aufgeführt. Es stehen für jeden Pegelstandort drei Werte zur Verfügung, die jeweils unterschiedliche Zeiträume abbilden. Der erste Wert beschreibt die mittlere Landsenkungs- bzw. Landhebungsrate der letzten 250 Jahre, der zweite Wert den prognostizierten Wert für die kommenden 250 Jahre und der dritte und in dieser Arbeit verwendete Wert bildet die mittlere Landsenkungs- bzw.

Landhebungsrate für die Gegenwart (engl.: *average present-day rate*) ab. Da für den Pegelstandort Amsterdam keine GIA-Korrekturen verfügbar sind, wurde der Mittelwert der Standorte Den Helder, Ijmuiden und Hoek van Holland angesetzt. Grund für die Wahl der Standorte zur Mittelwertbildung ist die geographische Lage des Pegels Amsterdam zu den drei gewählten Pegelstandorten.

5 Untersuchungen für Cuxhaven vs. Vergleichspegel

5.1 Beeinflussung des langfristigen MSL-Trends

Bevor mit den Auswertungen zu dem beschriebenen Untersuchungszeitraum von 1855 bis 1900 begonnen wird, soll der Einfluss der Korrektur auf den langfristigen Trend der MSL-Zeitreihe am Pegel Cuxhaven aufgezeigt werden. Konkret wurde der Trend für den Zeitraum 1855 bis 2011 bestimmt. Zwar liegen MSL-Jahreswerte für die Cuxhaven-Zeitreihe seit 1843 vor, jedoch sind Informationen über mögliche Korrekturen erst ab 1855 verfügbar. Um eine Beeinflussung der Ergebnisse bzw. Vermengung von korrigierten und nicht-korrigierten Daten zu vermeiden, wird auf die Betrachtung des Zeitraums vor 1855 verzichtet. Die GIA-Korrekturen wurden für die Auswertung bereits angebracht. Abb. 5 zeigt die MSL-Zeitreihe von Cuxhaven oK und mK sowie die lineare Trendentwicklung, die auch in Tab. 4 zusammengefasst ist.

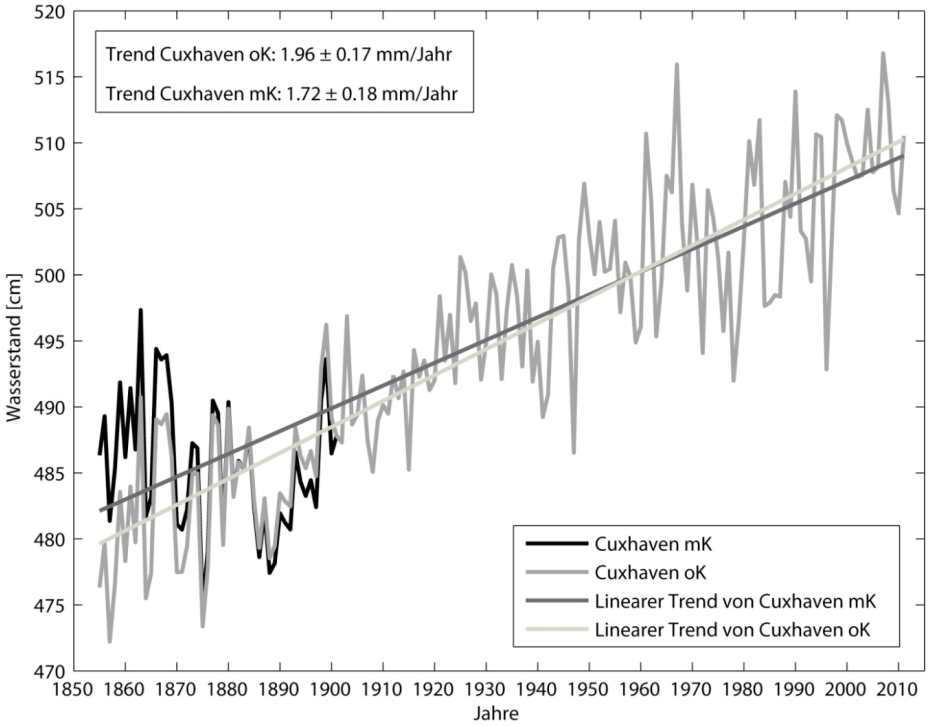

Abbildung 5: Langfristiger Trend der MSL-Zeitreihen oK und mK am Pegel Cuxhaven für den Zeitraum 1855 bis 2011.

Tabelle 4: Langfristiger Trend der MSL-Zeitreihen oK und mK am Pegel Cuxhaven für den Zeitraum 1855 bis 2011.

MSL-Zeitreihe	Trend nach GIA-Korrektur für den Zeitraum 1855 bis 2011 [mm/Jahr]
Cuxhaven oK	1,96 ± 0,17
Cuxhaven mK	1,72 ± 0,18

Es ist deutlich zu sehen, dass eine Korrektur der MSL-Jahreswerte im Zeitraum von 1855 bis 1900 am Pegel Cuxhaven eine Reduktion des linearen Trends um 0,24 mm/Jahr zur Folge hat. Dies entspricht mehr als 10% des Trends bezogen auf die MSL-Zeitreihe ohne Korrektur und hat somit einen nicht unerheblichen Einfluss auch auf langfristige Auswertungen. Trendbetrachtungen über den gesamten Aufzeichnungszeitraum einer Wasserstandszeitreihe stellen die wichtigsten Anhaltspunkte für Wasserstandsänderungen dar. Entsprechend wirken sich (nicht) berücksichtigte Höhenänderungen der Pegelstandorte aus. Deutlich stärker wirkt sich natürlich die Korrektur bei Untersuchungen der Trends für den Beobachtungszeitraum von 1855 bis 1900 (vgl. Kap. 5.3) aus, da hier der gesamte Zeitraum unmittelbar von der etwaig anzubringenden Korrektur betroffen ist.

5.2 Visuelle Beurteilung

Die folgenden Abb. 6 bis 9 zeigen beispielhaft den Vergleich der MSL-Zeitreihe Cuxhaven oK und mK mit weiteren ausgewählten langen MSL-Nordsee-Pegelzeitreihen aus Tab. 3. Konkret handelt es sich um die Pegelstandorte Brest, Delfzijl, Harlingen und Hoek van Holland (siehe Legende unten rechts). Alle MSL-Zeitreihen sind um den Einfluss postglazialer Ausgleichbewegungen (GIA) korrigiert worden. Die angegebenen Trends beziehen sich lediglich auf den Untersuchungszeitraum von 1855 bis 1900. Zur besseren Vergleichbarkeit wurden die Cuxhaven-Zeitreihen auf den Zeitraum reduziert, für welchen auch MSL-Jahreswerte des Vergleichspegels vorhanden sind. Deshalb unterscheiden sich die Trends in den Cuxhaven-Zeitreihen oK und mK leicht, je nachdem, wie viele Werte des Vergleichspegels vorhanden sind. Die jeweilige Angabe, ob der Trend von Cuxhaven oK bzw. mK als signifikant unterschiedlich gekennzeichnet ist, bezieht sich auf das Konfidenzintervall auf dem 95%-Signifikanzniveau des Vergleichspegels. Befindet sich der Trend von Cuxhaven oK bzw. mK innerhalb des Vertrauensintervalls des Vergleichspegels, so wird er als „nicht signifikant unterschiedlich“ und anderenfalls als „signifikant unterschiedlich“ bezeichnet.

In diesem Abschnitt wird allerdings nur auf die optische Vergleichbarkeit eingegangen. Weitere Erläuterungen zu den in den Grafiken angegebenen Trends für alle Vergleichspegel werden in Kap. 5.3 und 5.5 geliefert.

Augenscheinlich passt die MSL-Zeitreihe Cuxhaven mK deutlich besser zu den MSL-Zeitreihen der Pegel Brest und Delfzijl als die MSL-Zeitreihe Cuxhaven oK. Für die Pegel Harlingen und Hoek van Holland wiederum scheint die MSL-Zeitreihe Cuxhaven oK besser übereinzustimmen.

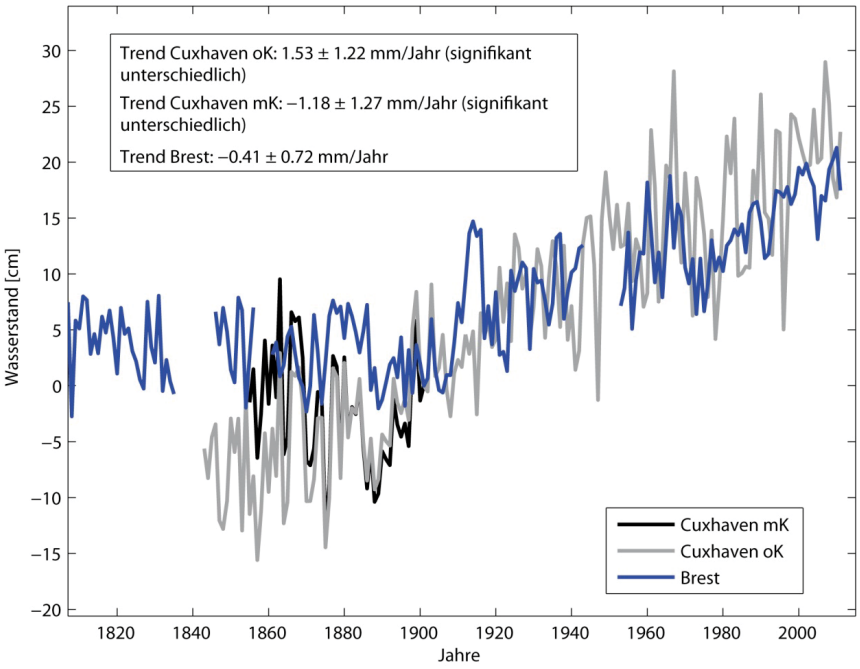

Abbildung 6: Vergleich der MSL-Zeitreihe Cuxhaven oK und mK mit der MSL-Zeitreihe Brest.

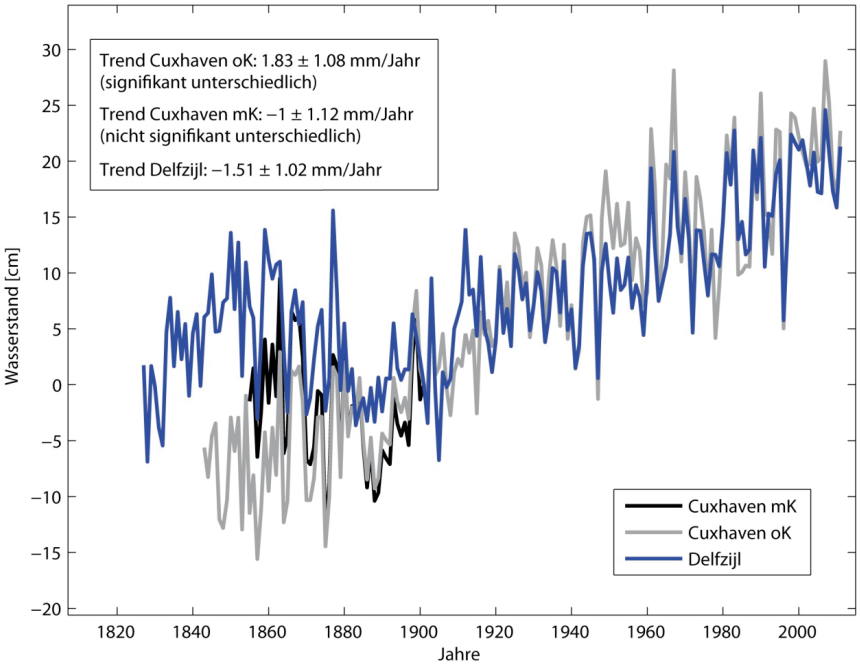

Abbildung 7: Vergleich der MSL-Zeitreihe Cuxhaven oK und mK mit der MSL-Zeitreihe Delfzijl.

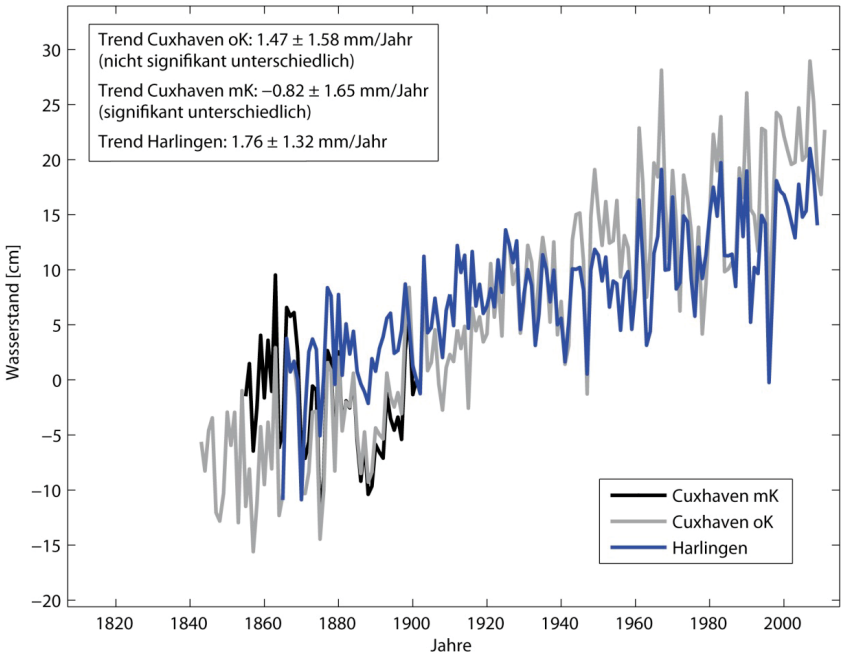

Abbildung 8: Vergleich der MSL-Zeitreihe Cuxhaven oK und mK mit der MSL-Zeitreihe Harlingen.

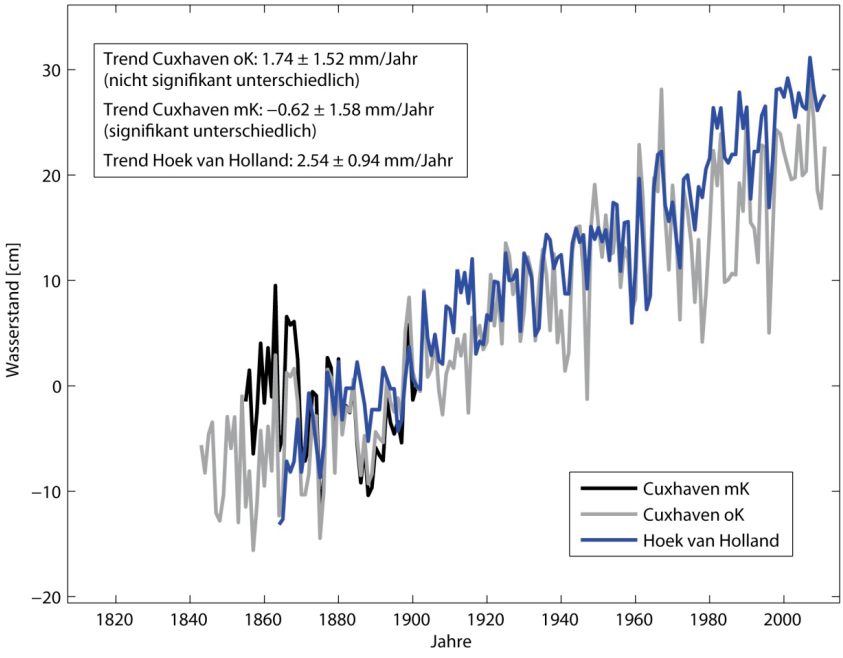

Abbildung 9: Vergleich der MSL-Zeitreihe Cuxhaven oK und mK mit der MSL-Zeitreihe Hoek van Holland.

Insgesamt ist eine visuelle Beurteilung der verschiedenen Pegelzeitreihen auf deren Übereinstimmung schwierig, da alle MSL-Zeitreihen eine deutliche inter-annuelle Variabilität aufweisen, die dem langfristigen Trend überlagert ist (eine Reduktion der Variabilität könnte hier bereits einen besseren Aufschluss geben). Eben dieser Trend wird durch das Anbringen der Korrekturfunktion am Pegel Cuxhaven deutlich beeinflusst. Aus diesem Grund erscheint es sinnvoll, einerseits die Korrelation zwischen dem Pegel Cuxhaven und anderen langen Pegeln aber vor allem auch die Trends, die sich an verschiedenen Pegeln für den Zeitraum 1855 bis 1900 ergeben, vergleichend zu betrachten, wie in den folgenden Kapiteln durchgeführt. Dabei soll überprüft werden, ob durch einen Vergleich der MSL-Zeitreihe Cuxhaven oK und mK mit weiteren langen MSL-Pegelzeitreihen aus Nord- und Ostsee analytisch nachgewiesen werden kann, dass eine Korrektur der Zeitreihe des Pegels Cuxhaven, in der Art wie von SIEFERT und LASSEN (1985) vorgeschlagen, zu empfehlen ist.

5.3 Trendanalysen

Tabelle 5: Ergebnisse der Trendanalysen für den Zeitraum von 1855 bis 1900 der 18 Vergleichspegel und Cuxhaven oK sowie mK (grau hinterlegte Pegelstandorte werden aufgrund fehlerhafter Daten oder zu geringer Datengrundlage nicht weiter berücksichtigt).

Pegel	Trend nach GIA-Korrektur für den Zeitraum 1855 bis 1900 [mm/Jahr]
Cuxhaven oK	1.83 ± 1.08
Cuxhaven mK	-1.00 ± 1.12
Brest	-0.41 ± 0.72
Sheerness	-3.57 ± 8.82
Delfzijl	-1.51 ± 1.02
West Terschelling	2.87 ± 3.09
Harlingen	1.76 ± 1.32
Den Helder	1.50 ± 0.78
Ijmuiden	-4.12 ± 2.26
Hoek van Holland	2.54 ± 0.94
Vlissingen	-4.01 ± 1.28
Pillau	1.85 ± 1.30
Stolpmünde	2.38 ± 1.32
Kolberg	1.91 ± 1.00
Swinemünde	1.27 ± 0.92
Barhöft	1.21 ± 2.88
Warnemünde	4.60 ± 2.13
Schleimünde	-0.84 ± 1.38
Travemünde	1.41 ± 0.76
Amsterdam	1.37 ± 0.59

Tab. 5 und Abb. 10 fassen die Ergebnisse der linearen Trendanalysen der MSL-Zeitreihen für mehrere Pegel über die Periode 1855 bis 1900 tabellarisch und grafisch zusammen.

Für jeden der berücksichtigten Vergleichspegel ist in Tab. 3 weiterhin angegeben, wie viel Prozent der MSL-Jahreswerte im Zeitraum 1855 bis 1900 fehlen. Alle Pegel, bei denen mehr als 25% der Daten fehlen, können aufgrund der großen Datenlücken nicht für belastbare Trendvergleiche genutzt werden. Außerdem ist der Pegel Vlissingen nicht herangezogen worden, da hier die Vermutung besteht, dass die verfügbaren Daten aus dem 19. Jahrhundert fehlerhaft sind (WAHL et al. 2013). Somit können insgesamt 11 Pegel für belastbare Vergleiche mit den MSL-Zeitreihen des Pegels Cuxhaven herangezogen werden, für die in Tab. 5 auch die Trends sowie das jeweilige Konfidenzintervall auf dem 95%-Signifikanzniveau aufgeführt sind.

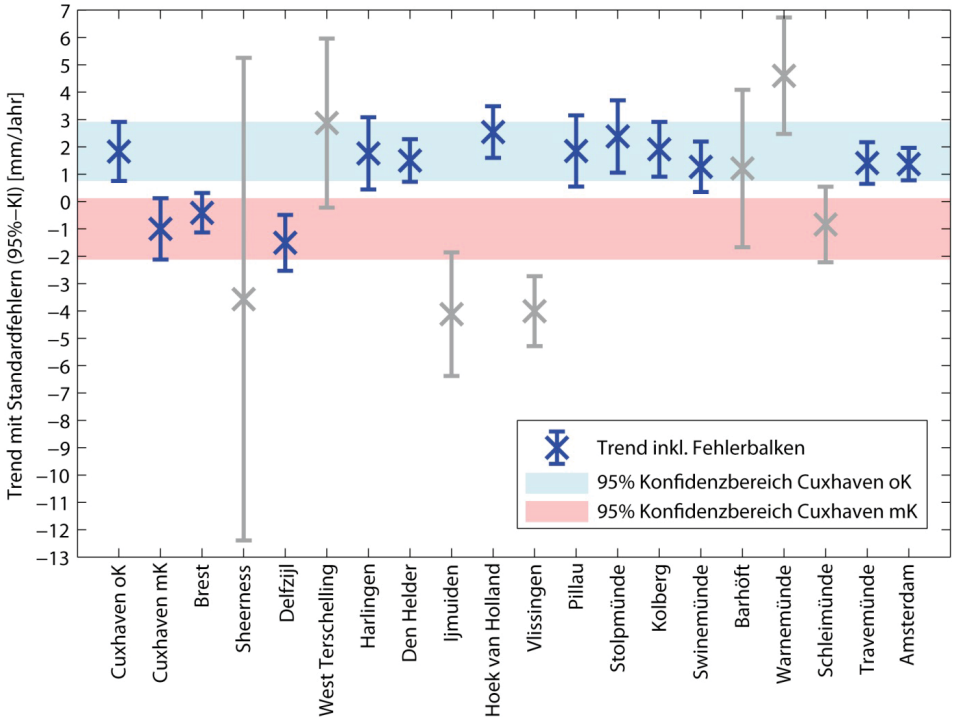

Abbildung 10: Ergebnisse der Trendanalysen mit Fehlerbalken auf dem 95%-Signifikanzniveau für die 18 Vergleichspegel und Cuxhaven oK sowie mK (grau hinterlegte Pegelstandorte werden aufgrund fehlerhafter Daten oder zu geringer Datengrundlage nicht weiter berücksichtigt; die farbigen Balken stellen eine optische Verlängerung des 95%-Konfindenzintervalls der Trends am Pegel Cuxhaven oK und mK dar).

Beim Vergleich der Trends aus den MSL-Wasserstandszeitreihen der untersuchten Pegelstandorte passt die korrigierte MSL-Zeitreihe Cuxhaven mK wie schon bei der visuellen Betrachtung deutlich besser zu den MSL-Zeitreihen der Pegel Brest und Delfzijl als die nicht korrigierte MSL-Zeitreihe Cuxhaven oK. Für die nicht korrigierte MSL-Zeitreihe Cuxhaven oK wurde hingegen ein positiver Trend ermittelt, dessen Größenordnung sich ebenfalls für die restlichen Pegelstandorte ergibt. Der Einfluss im Untersuchungszeitraum von 1855 bis 1900 ist dabei wesentlich deutlicher als bei der Betrachtung des Gesamtzeitraums von 1855 bis 2011 (vgl. Kap. 5.1) und sorgt sogar für einen Vorzeichenwechsel von positiven zu negativen Trends, wenn die Korrekturen angebracht werden.

5.4 Korrelationsanalysen

Wie schon bei den Trendanalysen wurden bei den Korrelationsanalysen nur solche Pegel verwendet, deren Datenlücken im Zeitraum von 1855 bis 1900 kleiner als 25% sind (vgl. Tab. 3). Zudem wurden die zugrunde gelegten MSL-Zeitreihen vor der Auswertung um den jeweiligen linearen Trend korrigiert. Im Falle der MSL-Zeitreihe Cuxhaven mK erfolgte dieser Schritt erst nach dem Anbringen der Korrektur.

Tab. 6 und Abb. 11 fassen die Ergebnisse der Korrelationsanalysen zusammen und zeigen auf, ob eine signifikante Korrelation auf dem 95%-Signifikanzniveau zwischen den Referenzpegeln und den MSL-Zeitreihen Cuxhaven oK und Cuxhaven mK nachgewiesen werden kann.

Tabelle 6: Ergebnisse der Korrelationsanalysen für die 18 Vergleichspegel und Cuxhaven oK sowie Cuxhaven mK auf dem 95%-Signifikanzniveau mit Angabe des Korrelationskoeffizienten (grau hinterlegte Pegelstandorte werden aufgrund fehlerhafter Daten oder zu geringer Datengrundlage nicht weiter berücksichtigt).

Pegel	Signifikante Korrelation zu Cuxhaven oK	Korrelations-koeff. zu Cuxhaven oK	Signifikante Korrelation zu Cuxhaven mK	Korrelations-koeff. zu Cuxhaven mK
Cuxhaven oK	j	1,00	j	0,80
Cuxhaven mK	j	0,80	j	1,00
Brest	n	0,09	n	0,29
Sheerness	n	0,06	n	0,11
Delfzijl	j	0,59	j	0,82
West Terschelling	j	0,70	j	0,71
Harlingen	j	0,66	j	0,47
Den Helder	j	0,71	j	0,46
Ijmuiden	j	0,42	j	0,63
Hoek van Holland	j	0,45	n	0,31
Vlissingen	j	0,40	j	0,66
Pillau	j	0,51	j	0,36
Stolpmünde	j	0,50	j	0,39
Kolberg	j	0,49	n	0,26
Swinemünde	j	0,42	n	0,25
Barhöft	j	0,52	j	0,52
Warnemünde	j	0,57	j	0,48
Schleimünde	n	0,36	j	0,52
Travemünde	n	0,23	n	-0,06
Amsterdam	j	0,57	n	0,23
j = ja; n = nein				

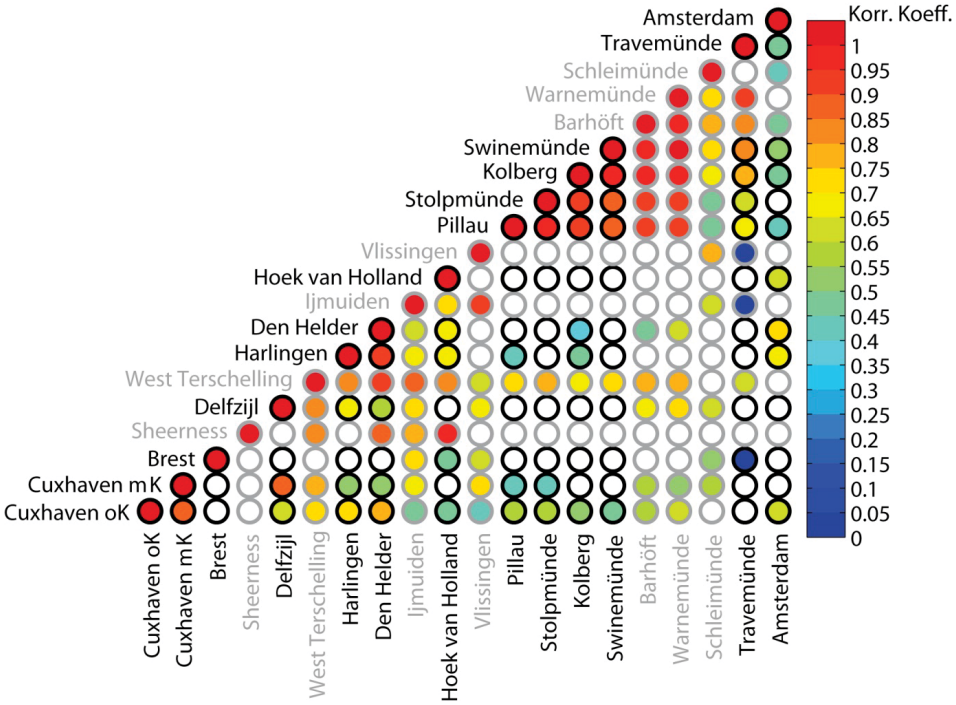

Abbildung 11: Korrelationen für den Zeitraum 1855 bis 1900 zwischen den MSL-Zeitreihen Cuxhaven oK und mK mit den 18 Vergleichspegeln (grau beschriftete Pegelstandorte werden aufgrund fehlerhafter Daten oder zu geringer Datengrundlage nicht weiter berücksichtigt; die Kreise werden farblich nicht ausgefüllt, wenn keine statistische Signifikanz auf dem 95%-Signifikanzniveau nachgewiesen wurde).

Es zeigt sich, dass die MSL-Zeitreihe Cuxhaven oK eine signifikante Korrelation zu 14 der insgesamt 18 ausgewählten Pegel aufweist. Werden nur diejenigen Pegel berücksichtigt, welche nach Tab. 6 als aussagekräftig identifiziert wurden, dann kann eine signifikante Korrelation mit 9 der 11 Vergleichspegel nachgewiesen werden. Die einzigen Ausnahmen stellen die Pegel Brest und Travemünde dar. Hierbei gilt es jedoch zu beachten, dass im Fall von Brest ein solches Ergebnis bei den Korrelationsanalysen zu erwarten war, da bereits bekannt ist, dass die Pegel im Bereich des Englischen Kanals auf inter-annuellen Zeitskalen eher der Variabilität des Nord-Ost-Atlantik folgen, als der Variabilität in der inneren Nordsee (WAHL et al. 2013). Die stärkste Korrelation ergibt sich zwischen den MSL-Zeitreihen Cuxhaven oK und Den Helder.

Werden zum Vergleich die MSL-Zeitreihe Cuxhaven mK sowie die anderen Nord- und Ostseepegel herangezogen, so wird deutlich, dass die Korrelationen in vielen Fällen abnehmen. Eine signifikante Korrelation kann nur noch für 11 der 18 Pegel nachgewiesen werden. Bei reiner Betrachtung der Pegelstandorte ohne große Datenlücken und unsicherer Aufzeichnungen, sinkt die Anzahl der signifikanten Zusammenhänge schließlich auf 5 von 11 Vergleichspegeln. Die stärkste Korrelation ergibt sich in diesem Fall zwischen den Pegelstandorten Cuxhaven mK und Delfzijl.

Insgesamt bekräftigen auch die Korrelationsanalysen den bereits aus der visuellen Betrachtung sowie den Trendanalysen gewonnenen Eindruck, dass die MSL-Zeitreihe des

Pegels Cuxhaven oK eher zu den Vergleichspegeln passt und einen ähnlichen Verlauf aufweist. Es wird nicht nur der Trend, sondern aufgrund der zeitabhängigen Korrekturfunktion auch die Variabilität der Aufzeichnungen beeinflusst.

5.5 Kombination aus Trend- und Korrelationsanalysen

In diesem Kapitel sollen die Ergebnisse der vorangegangenen Trend- und Korrelationsanalysen zusammengefasst werden. Dargestellt sind diese in Abb. 12. In einem ersten Schritt wurden dazu die GIA-Korrekturen an sämtliche betrachtete Pegel angebracht. Anschließend wurden die Trends für den Zeitraum von 1855 bis 1900 auf Basis der verfügbaren Daten für alle Vergleichspegel inklusive der 95%-Konfidenzintervalle berechnet. Für die Berechnung der Trends wurden immer nur die Daten genutzt, die auch am Vergleichspegel verfügbar sind, um einen direkten Vergleich zu ermöglichen. Aus diesem Grund ergeben sich sowohl für Cuxhaven oK als auch für Cuxhaven mK leicht unterschiedliche Trends, wenn die Vergleichspegel Datenlücken aufweisen (z. B. Brest, Harlingen, Hoek van Holland, Stolpmünde). Außerdem sind im Gegensatz zu den vorangegangenen Kapiteln nur die Ergebnisse für diejenigen Pegel dargestellt, die ausreichend Daten für den betrachteten Zeitraum zur Verfügung stellen (> 75% der Jahreswerte, vgl. Tab. 3). Zudem wurde der Pegel Vlissingen aufgrund der Vermutung der fehlerbehafteten Werte im 19. Jahrhundert nicht mehr aufgeführt (vgl. Kap. 5.3). Zusätzlich fließen in diesem Kapitel die Resultate der durchgeführten Korrelationsanalysen mit ein.

Die Ergebnisse für die MSL-Zeitreihe Cuxhaven oK zeigen, dass die ermittelten Trends für 9 der 11 Vergleichspegel nicht signifikant unterschiedlich sind, d. h. der Trend von Cuxhaven oK liegt innerhalb des 95%-Konfidenzintervalls des Vergleichspegels. Die Ausnahmen stellen die Pegel Brest und Defzijl dar. Ähnlich verhält es sich mit den signifikanten Korrelationen. Nicht signifikante Beziehungen bestehen hier ebenfalls nur zwischen Brest und zusätzlich zu Travemünde. Werden demnach nur die Vergleichspegel betrachtet, für die eine signifikante Korrelation nachgewiesen wurde, passen die ermittelten Trends in 8 der 9 Fälle gut zusammen.

Die Ergebnisse für die MSL-Zeitreihe Cuxhaven mK lassen gegensätzliche Schlussfolgerungen zu. Nach der Korrektur der MSL-Wasserstandszeitreihe des Pegels Cuxhaven mit den Werten aus SIEFERT und LASSEN (1985) weist nur noch 1 der 11 Vergleichspegel keinen signifikant unterschiedlichen Trend auf. Anders formuliert bedeutet das, dass der Trend der MSL-Zeitreihe von Cuxhaven mK nur gut zu 1 der 11 Vergleichspegel passt. Dabei handelt es sich um den Pegel Delfzijl. Ebenfalls bedeutet das, dass in 4 von 5 Fällen die Trends signifikant unterschiedlich sind, wenn nur die Vergleichspegel betrachtet werden, für die eine signifikante Korrelation zu Cuxhaven mK ermittelt werden konnte. Allerdings ergeben sich durch die Korrektur grundsätzlich niedrigere Trends als für die Vergleichspegel.

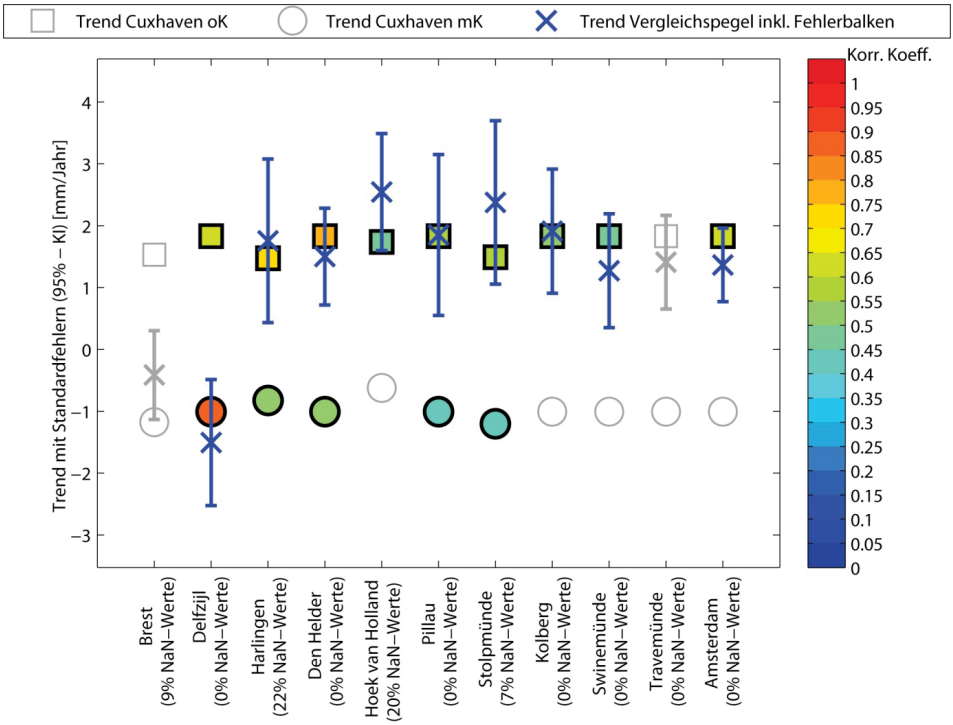

Abbildung 12: Vergleich der linearen Trends für den Zeitraum 1855 bis 1900 der MSL-Zeitreihe von Cuxhaven oK und mK mit weiteren langen Nord- und Ostseepegel unter Angabe des Korrelationskoeffizienten. Die zum Vergleich herangezogenen Nord- und Ostseepegel weisen Datenlücken < 25% auf und es besteht keine Vermutung hinsichtlich einer Fehlerbehaftung der Datensätze. Kreuze symbolisieren den Trend der Vergleichspegel inkl. Fehlerbalken (blau: siginifikante Korrelation zu Cuxhaven oK oder mK, grau: keine signifikante Korrelation). Die Trends der MSL-Zeitreihe Cuxhaven oK sind als Quadrate, die der MSL-Zeitreihe Cuxhaven mK sind als Kreise dargestellt. Die Einfärbung beschreibt den Wert des Korrelationskoeffizienten. Es wird keine Einfärbung vorgenommen, wenn keine statistische Signifikanz auf dem 95%-Signifikanzniveau nachgewiesen wurde.

In diesem Kapitel wurden die Zweifel an der Plausibilität einer Korrektur der Wasserstandszeitreihe vom Pegel Cuxhaven weiter begründet. Die Ergebnisse der Untersuchungen der vorangegangenen Kapitel haben dies bereits bestätigt und wurden hier zusammenfassend dargestellt.

5.6 Bewertung der Ergebnisse

Insgesamt zeigen die Ergebnisse der durchgeführten Analysen, dass die Korrektur nach SIEFERT und LASSEN (1985) nicht nur den langfristigen Trend sowie den Trend im Untersuchungszeitraum von 1855 bis 1900 der Cuxhaven-Zeitreihe beeinflusst, sondern aufgrund der zeitabhängigen Korrekturfunktion auch die Variabilität. Zum Vergleich wurden 18 Vergleichspegel herangezogen, die nach Prüfung auf unsichere oder zu geringer Datengrundlage auf 11 Pegel reduziert wurden. Ohne die Korrektur kann ein signifikanter Zusammenhang zu 9 von 11 Vergleichspegeln nachgewiesen werden. Nach Anbringen

der Korrektur gilt dies nur noch für 5 der 11 Vergleichspegel. Wie Abb. 10 zeigt, beeinflusst die Korrektur im Wesentlichen den Trend der MSL-Zeitreihe von Cuxhaven in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts. Daher können die hier durchgeführten Korrelationsuntersuchungen zwar erste Hinweise zur Plausibilität der Korrekturfunktion liefern, allerdings gestalten sich die Ergebnisse der Trenduntersuchungen in diesem Zusammenhang deutlich aussagekräftiger. Es hat sich gezeigt, dass in 8 der 9 Fälle, in welchen eine signifikante Korrelation zwischen den Vergleichspegeln und der MSL-Zeitreihe Cuxhaven oK nachgewiesen wurde, die ermittelten Trends nicht signifikant unterschiedlich sind. Während dies bei der Untersuchung der MSL-Zeitreihe Cuxhaven mK lediglich auf 1 der 5 Fälle zutrifft.

Die hier dargestellten Ergebnisse machen deutlich, dass es mithilfe analytischer Verfahren unter Einbeziehung einer großen Anzahl von Vergleichspegeln nicht möglich ist, die Plausibilität der von SIEFERT und LASSEN (1985) vorgeschlagenen Korrekturfunktion für den Pegel Cuxhaven zu bestätigen. Vielmehr zeigen die Untersuchungen eine sehr gute Übereinstimmung zwischen der MSL-Zeitreihe Cuxhaven oK, wie sie z. B. im Projekt AMSeL (JENSEN et al. 2011b) genutzt wurde, und einer Vielzahl der ausgewählten Vergleichspegel. Insgesamt können die hier dargestellten und diskutierten Ergebnisse nur zu der Empfehlung führen, auf das Anbringen einer Korrekturfunktion an die Wasserstandsdaten des Pegels Cuxhaven aus der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts zu verzichten. Ebenfalls ist zu empfehlen, weitere Untersuchungen anzustellen, um herauszufinden, warum eine Korrektur nur mit dem Pegel Delfzijl (und evtl. Brest) zu einer besseren Übereinstimmung führt. Zudem wäre zu prüfen, ob die Zeitreihen der Pegel Vlissingen und Ijmuiden im Rahmen einer neuen Beurteilung der Zeitreihen vor 1900 ebenfalls korrigiert bzw. homogenisiert werden müssten (vgl. WAHL et al. 2013). Zudem sollten weitere Zeitreihen des Pegels Cuxhaven sowie der Vergleichspegel in die Betrachtungen einbezogen werden. Bis dato basieren die durchgeführten Untersuchungen lediglich auf MSL-Jahreswerten. Die Pegelaufzeichnungen von Cuxhaven sind allerdings auch wichtig zur Analyse der Langzeitentwicklung von Sturmfluten (vgl. DANGENDORF et al. 2014a).

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass es aufgrund der historischen und aktuellen Bedeutung der MSL-Wasserstandszeitreihe von Cuxhaven für die Nutzung in Wissenschaft und Praxis von großer Bedeutung ist, dass alle Nutzer mit ein und derselben Zeitreihe, insbesondere was den Höhenbezug angeht, arbeiten und der Zugriff darauf garantiert wird. Aufgrund dieser Tatsache ist größte Vorsicht geboten, wenn eine weitreichende Empfehlung wie im vorliegenden Fall zur Änderung der Wasserstandsdaten des Pegels Cuxhaven aus der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts ausgesprochen werden soll. Allerdings lassen die gewonnen Erkenntnisse derzeit nur den Schluss zu, dass auf die Korrektur nach SIEFERT und LASSEN (1985) zu verzichten ist, bis ggf. zukünftige oder weitergehende Untersuchungen zu anderen Resultaten kommen und die hier beschriebenen Erkenntnisse widerlegen. Abschließend werden die Ergebnisse der Untersuchungen mit Schlussfolgerungen, Empfehlungen und Ausblick sowie der Bedarf an zukünftigen Untersuchungen im folgenden Kapitel zusammengeführt.

6 Schlussfolgerung

Auf Basis der hier vorgestellten und diskutierten Ergebnisse, ergibt sich ein differenziertes Bild, was die Plausibilität bzw. Notwendigkeit einer Korrektur der Wasserstandszeitreihe

von Cuxhaven angeht. Im Folgenden sollen daher zusammenfassend die Gründe, welche für eine Korrektur sprechen, denjenigen gegenübergestellt werden, die gegen eine Korrektur sprechen. Außerdem wird noch der Bedarf an möglichen zukünftigen Untersuchungen diskutiert.

6.1 Gründe für eine Korrektur der Wasserstandszeitreihe von Cuxhaven

- SIEFERT und LASSEN (1985) empfehlen nach der Auswertung der Ergebnisse diverser historischer Nivellements das Anbringen der in Abb. 3 dargestellten Korrekturfunktion zum Ausgleich von Setzungserscheinungen des Leuchtturms Cuxhaven.
- Durch Anbringen der Korrekturfunktion passt die MSL-Zeitreihe des Pegels Cuxhaven mK besser zu der MSL-Zeitreihe des Pegels Delfzijl (signifikante Korrelation und nicht signifikant unterschiedlicher Trend).

6.2 Gründe gegen eine Korrektur der Wasserstandszeitreihe von Cuxhaven

- Einen wichtigen Stützpunkt in der von SIEFERT und LASSEN (1985) vorgeschlagenen Korrekturfunktion stellt das Ergebnis eines Nivellements von Lentz im Jahre 1855 dar. Lassen selbst schreibt in seiner Veröffentlichung (LASSEN et al. 1984) zu durchgeführten Untersuchungen von Lentz, dass „*…sich ein Sinken des Leuchtturms weder aus Wasserständen noch aus Nivellements nachweisen lässt. Lentz vermutet sogar einen Fehler in seinem Nivellement von 1855 kurz vor Cuxhaven…*“. Somit muss zumindest der wichtige Stützpunkt der Korrekturfunktion aus dem Jahre 1855 angezweifelt werden, aus welchem sich eine sehr starke Korrektur für den Zeitraum 1855 bis 1875 ergibt.
- Sowohl LASSEN et al. (1984) als auch SIEFERT und LASSEN (1985) geben wenig Erläuterungen zu der ermittelten Korrekturfunktion. Es ist nicht ersichtlich, wie die Ergebnisse historischer Nivellements auf das heutige Höhensystem umgerechnet wurden und welche Unsicherheiten sich dabei ergeben. Die vorgestellten Ergebnisse in Form der Korrekturfunktion sind auf Basis der verfügbaren Informationen nicht reproduzierbar.
- Trenduntersuchungen unter Berücksichtigung von 11 Vergleichspegeln zeigen, dass die MSL-Zeitreihe Cuxhaven oK gut zu 9 der 11 Vergleichspegel passt (d. h. es zeigen sich keine signifikant unterschiedlichen Trends für den Zeitraum 1855 bis 1900). Nach der Korrektur (Cuxhaven mK) gilt dies nur noch für 1 der 11 Vergleichspegel, während sich für die anderen 10 Pegel deutlich niedrigere Trends in Cuxhaven ergeben. Sowohl der langfristige Trend als auch der Trend für den Zeitraum von 1855 bis 1900 werden also durch das Anbringen der Korrektur deutlich reduziert. Speziell für den Zeitraum von 1855 bis 1900 stellt sich ein Vorzeichenwechsel von einer positiven zu einer negativen Trendentwicklung ein.
- Korrelationsuntersuchungen durch Einbeziehung von 11 Vergleichspegeln zeigen, dass die MSL-Zeitreihe Cuxhaven oK einen signifikanten Zusammenhang zu 9 der 11 Vergleichspegel aufweist. Nach der Korrektur (Cuxhaven mK) gilt dies nur noch für 5 der 11 Vergleichspegel.

6.3 Ausblick

Die Kenntnis der historischen Wasserstandsentwicklung im 19. Jahrhundert (regional und global) ist sowohl für wissenschaftliche als auch praktische Fragestellungen (z. B. für den Küstenschutz) von größter Bedeutung. Dazu sollten in einem ersten Schritt alle noch verfügbaren analogen Wasserstandsaufzeichnungen, d. h. die Pegelbögen von möglichst allen jemals betriebenen Pegelstandorten, gescannt und digitalisiert und somit für die Zukunft gesichert werden. In einem nächsten Schritt können diese Daten dann plausibilisiert, ggf. korrigiert und in ein einheitliches Bezugssystem eingebunden werden und anschließend entsprechenden Analysen zugeführt werden.

- Es besteht somit ein dringlicher Digitalisierungsbedarf historischer Wasserstandsaufzeichungen als Grundlage für weitere Untersuchungen, z. B. auf Basis anderer Zeitreihen als von MSL-Jahreswerten. Bereits im Abschlussbericht des AMSeL-Projektes (JENSEN et al. 2011b) wurde darauf hingewiesen, dass dadurch vergleichende Untersuchungen zur Meeresspiegelentwicklung zum Ende des 19. und Anfang des 20. Jahrhunderts durchgeführt werden können. Ebenso sollten die Vergleichspegel (z. B. Pegel Vlissingen und Ijmuiden) auf Korrektur- bzw. Homogenisierungsbedarf geprüft werden (vgl. WAHL et al. 2013). Darüber hinaus gilt es zu prüfen, warum z. B. die Wasserstandsaufzeichnungen am Pegel Delfzijl besser zur MSL-Zeitreihe Cuxhaven mK passen.
- Die Genauigkeit und Unsicherheit der GIA-Korrekturwerte ist zu prüfen, da diese einen erheblichen Einfluss auf die durchgeführten Untersuchungen haben. In JEVREJEVA et al. (2014) zeigen die mit verschiedenen Modellen ermittelten Trends beispielsweise in der Nordsee Abweichungen von mehreren Millimetern pro Jahr.
- Wie in Kap. 4 bereits angesprochen, wurden in der aktuellen Analyse aufgrund fehlender Datengrundlage einzig jene Landsenkungen berücksichtigt, die auf postglaziale Effekte zurückzuführen sind. Lokale Krustenbewegungen (SUDAU und WEISS 2011), die beispielsweise mit Grundwasserentnahmen etc. in Verbindung stehen, bleiben daher unberücksichtigt. Da diese regional z. T. stark variieren, können sie die vorgestellten Ergebnisse beeinflussen. Derzeit wird die räumliche und zeitliche Verfügbarkeit von vertikalen Landbewegungsschätzern (z. B. aus GPS und Tidepegel-Satellitenaltimetrie) stetig erweitert und somit robuster (vgl. WÖPPELMANN und MARCOS 2016; SANTAMARÍA-GÓMEZ et al. 2017). Ähnliches gilt auch für die Anteile aus atmosphärischen Schwankungen, die zumindest über den Zeitraum 1900–2011 in der Nordsee für regionale Differenzen gesorgt haben (DANGENDORF et al. 2014b). Weitere Erkenntnisse könnten hier unter Berücksichtigung historischer Wind- (z. B. ICOADS) und Luftdruckdaten (Hadley SLP) gewonnen werden (s. a. DANGENDORF et al. 2014a, 2014b).
- Das Verhalten des Pegels Brest und dessen Vergleichbarkeit mit dem Pegel Cuxhaven ist zu überprüfen. DANGENDORF et al. (2014a) zeigen, dass dekadische Wasserstandsschwankungen am Pegel Brest zur Charakteristik der Nordseepegel passen.
- Hauptkomponentenanalysen (EOF) können zur Findung des gemeinsamen dekadischen bis multidekadischen Signals in der Nordsee verwendet werden.
- Durch das (Nicht-)Anbringen der Korrektur besteht ein erheblicher Einfluss auf einen etwaigen Tipping-Point (GEHRELS und WOODWORTH 2013), der z. B. von

HOFSTEDE (1990) in Deutschland zum Ende des 19. Jahrhunderts vermutet wird. Weitere Untersuchungen, z. B. mit (Reanalyse-)Daten und Verfahren zur Varianzreduktion (DANGENDORF et al. 2014b) sind zu empfehlen.

7 Schriftenverzeichnis

ALBRECHT, F.; WAHL, T.; JENSEN, J. and WEISSE, R.: Determining Sea Level Change in the German Bight, Ocean Dynamics, 61, 2037–2050, 2011. http://dx.doi.org/10.1007/s10236-011-0462-z

CHURCH, J.A. and WHITE, N.J.: A 20th century acceleration in global sea-level rise, Geophys. Res. Lett., 33, L01602, 2006. http://dx.doi.org/10.1029/2005GL024826

DANGENDORF, S.; WAHL, T.; HEIN, H.; JENSEN, J.; MAI, S. and MUDERSBACH, C.: Mean Sea Level Variability and Influence of the North Atlantic Oscillation on Long-Term Trends in the German Bight, Water, 4/2012, 170–195, 2012. http://dx.doi.org/10.3390/w4010170

DANGENDORF, S.; MUDERSBACH, C.; WAHL, T. and JENSEN, J.: Characteristics of intra-, inter-annual and decadal sea level variability and the role of meteorological forcing: The long record of Cuxhaven, Ocean Dynamics 63 (2–3), doi: 10.1007/s10236-013-0598-0, 2013.

DANGENDORF, S.; MÜLLER-NAVARRA, S.; JENSEN, J.; SCHENK, F.; WAHL, T. and WEISSE, R.: North Sea storminess from a novel storm surge record since AD 1843, Journal of Climate, doi: 10.1175/JCLI-D-13-00427.1, 2014a.

DANGENDORF, S.; CALAFAT, F.M.; ARNS, A.; HAIGH, I. D.; WAHL, T. and JENSEN, J.: North Sea mean sea level variability: processes and implications, Journal of Geophysical Research, 119, 6820–6841, doi: 10.1002/2014JC009901, 2014b.

GEHRELS, R. and WOODWORTH, P.L.: When did modern rates of sea-level rise start?, Global and Planetary Change, Volume 100, 263–277, ISSN 0921-8181, doi: 10.1016/j.gloplacha.2012.10.020, 2013.

HAHN, A. und RIETSCHEL, E.: Langjährige Wasserstandsbeobachtungen an der Ostsee, VI Baltische Hydrologische Konferenz, Hauptbericht 13, 1938.

HOFSTEDE, J.L.A.: Sea-level rise in the inner German Bight since AD 600 and its implications upon tidal flats geomorphology. In BRÜCKNER, H. and RADTKE, U. (Hrsg.): From the North Sea to the Indian Ocean – results of the 8th annual meeting of the working group "Marine and Coastal Geography", Franz Steiner Verlag, Stuttgart, 11–27, 1990.

HOLGATE, S.J. and WOODWORTH, P.L.: Evidence for enhanced coastal sea level rise during the 1990s, Geophysical Research Letters, 31, L07305, 2004.

JENSEN, J.: Änderungen der mittleren Tidewasserstände an der Nordseeküste, Mitteilungen Leichtweiß-Institut der TU Braunschweig, Heft 83, 441–550, 1984.

JENSEN, J. und TÖPPE, A.: Zusammenstellung und Auswertung von Originalaufzeichnungen des Pegels Travemünde/Ostsee ab 1826, Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen, 30. Jhg., Heft 4, 99–107, 1986.

JENSEN, J.; MÜGGE, H.-E. und VISSCHER, G.: Untersuchungen zur Wasserstandsentwicklung in der Deutschen Bucht, Die Küste, 47, 1988.

JENSEN, J. und TÖPPE, A.: Untersuchungen über Sturmfluten an der Ostsee unter spezieller Berücksichtigung des Pegels Travemünde, Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen, 34. Jhg., Heft 1/2, 29–37, 1990.

JENSEN, J.; MÜGGE, H.-E. und SCHÖNFELD, W.: Analyse der Wasserstandsentwicklung und Tidedynamik in der Deutschen Bucht, Die Küste, 53, 1992.

JENSEN, J.; FRANK, T.; WAHL, T. und DANGENDORF, S.: Analyse von hochaufgelösten Tidewasserständen und Ermittlung des MSL an der deutschen Nordseeküste (AMSeL), Abschlussbericht, Siegen, 2011a.

JENSEN, J.; FRANK, T. und WAHL, T.: Analyse von hochaufgelösten Tidewasserständen und Ermittlung des MSL an der deutschen Nordseeküste (AMSeL), Die Küste, 78, 2011b.

JEVREJEVA, S.; GRINSTED, A.; MOORE, J.C. and HOLGATE, S.: Nonlinear trends and multiyear cycles in sea level records, J. Geophys. Res., 111, C09012, doi: 10.1029/2005JC003229, 2006.

JEVREJEVA, S.; MOORE, J. C.; GRINSTED, A. and WOODWORTH, P.L.: Recent global sea level acceleration started over 200 years ago?, Geophys. Res. Lett., 35, L08715, doi: 10.1029/2008GL033611, 2008.

JEVREJEVA, S.; MOOREA, J.C.; GRINSTED, A.; MATTHEWS, A.P. and SPADA, G.: Trends and acceleration in global and regional sea levels since 1807, Global and Planetary Change, Volume 113, S. 11–22, 2014.

LASSEN, H.; LINKE, G. und BRAASCH, G.: Säkularer Meeresspiegelanstieg und tektonische Senkungsvorgänge an der Nordseeküste, Zeitschrift für Vermessungswesen und Raumordnung, Heft 2, 1984.

MÜLLER-NAVARRA, S.; JENSEN, J.; ROSENHAGEN, G. und DANGENDORF, S.: Rekonstruktion von Gezeiten und Windstau am Pegel Cuxhaven 1843 bis 2013, Jubiläumskolloqium 200 Jahre Klimamessstation Jena, 2013.

NICHOLLS, R.J.: Impacts of and Responses to Sea-Level Rise, In: CHURCH, J.A.; WOODWORTH, P.L.; AARUP, T. and WILSON W.S. (Hrsg.): Understanding Sea-Level Rise and Variability, Wiley-Blackwell, Oxford, UK, 17–51, doi: 10.1002/9781444323276.ch5, 2010.

OUMERACI, H.; JENSEN, J.; GÖNNERT, G.; PASCHE, E.; KORTENHAUS, A.; NAULIN, M.; WAHL, T.; THUMM, S.; UJEYL, G.; GERSHOVICH, I. and BURZEL, A.: Flood Risk Analysis for a Megacity: The German XtremRisK-Project, European and Global Communities combine forces on Flood Resilient Cities, Paris, France, 2009.

OUMERACI, H.; GÖNNERT, G.; JENSEN, J.; KORTENHAUS, A.; FRÖHLE, P.; GERKENSMEIER, B.; WAHL, T.; MUDERSBACH, C.; NAULIN, M.; UJEYL, G.; PASCHE, E.; DASSANAYAKE, D.R. und BURZEL, A.: Extremsturmfluten an offenen Küsten und Ästuargebieten – Risikoermittlung und -beherrschung im Klimawandel (XtremRisK), Abschlussbericht, 2012. https://www.tu-braunschweig.de/Medien-DB/hyku-xr/50_oumeraci_et_al_xtremrisk_abschlussbericht.pdf

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

SANTAMARÍA-GÓMEZ, A.; GRAVELLE, M.; DANGENDORF, S.; MARCOS, M.; SPADA, G. and WÖPPELMANN, G.: Uncertainty of the 20th century sea-level rise due to vertical

land motion errors, Earth and Planetary Science Letters, Volume 473, 24–32, ISSN 0012-821X, doi: 10.1016/j.epsl.2017.05.038, 2017.

SCHÖNE, T.; SCHÖN, N. and THALLER, D.: IGS Tide Gauge Benchmark Monitoring Pilot Project (TIGA): scientific benefits, Journal of Geodesy, 83, 249–261, 2009.

SIEFERT, W. und LASSEN, H.: Gesamtdarstellung der Wasserstandsverhältnisse im Küstenvorfeld der Deutschen Bucht nach neuen Pegelaufzeichnungen, Die Küste, 42, 1985.

STEFFEN, H. and WU, P.: Glacial isostatic adjustment in Fennoscandia – A review of data and modeling, Journal of Geodynamics, 52, doi: 10.1016/j.jog.2011.03.002, 2011.

SUDAU, A. und WEISS, R.: Der Einfluss vertikaler Landbewegungen auf langwellige Wasserstandsbeobachtungen, Mitteilungen des IWW – 40. IWASA, Internationales Wasserbausymposium Aachen, 2011.

WAHL, T.; JENSEN, J. and FRANK, T.: On analysing sea level rise in the German Bight since 1844, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 10, 171–179, 2010.

WAHL, T.; MUDERSBACH, C. and JENSEN J.: Assessing the hydrodynamic boundary conditions for risk analyses in coastal areas: A stochastic storm surge model, Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 11, 2925–2939, doi: 10.5194/nhess-11-2925-2011, 2011.

WAHL, T.; MUDERSBACH, C. and JENSEN J.: Assessing the hydrodynamic boundary conditions for risk analyses in coastal areas: A multivariate statistical approach based on Copula functions, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 12, 495–510, doi: 10.5194/nhess-12-495-2012, 2012.

WAHL, T.; HAIGH, I.D.; WOODWORTH, P.L.; ALBRECHT, F.; DILLINGH, D.; JENSEN, J.; NICHOLLS, R.J.; WEISSE, R. and WÖPPELMANN, G.: Observed mean sea level changes around the North Sea coastline from 1800 to present, Earth-Science Reviews, 124 (2013), 51–67, 2013.

WANNINGER, L.; NIEMEYER, W.; JAHN, C.H. und SUDAU, A: Aufbau eines integrierten Höhenüberwachungssystems in Küstenregionen durch Kombination höhenrelevanter Sensorik (IKÜS), Abschlussbericht, Dresden, KFKI Projekt 03KIS055-058, 2008.

WEISS, R. und SUDAU, A.: Satellitengestützte Überwachung der Pegelnullpunktehöhe in der Deutschen Bucht, Die Küste, 78, 2011.

WOODWORTH, P.L.; TEFERLE, F.N.; BINGLEY, R.M.; SHENNAN, I. and WILLIAMS, S.D.P.: Trends in UK mean sea level revisited, Geophys. J. Int. 176(22), 19–30, doi: 10.1111/j.1365-246X.2008.03942.x, 2009.

WÖPPELMANN, G. and MARCOS, M.: Vertical land motion as a key to understanding sea level change and variability, Rev. Geophys., 54, 64–92, doi: 10.1002/2015RG000502, 2016.

WÖPPELMANN, G.; MIGUEZ, B.M.; BOUIN, M.N. and ALTAMIMI, Z.: Geocentric sea-level trend estimates from GPS analyses at relevant tide gauges world-wide, Global and Planetary Change 57, 369–406, 2007.

WÖPPELMANN, G.; LETETREL, C.; SANTAMARIA, A.; BOUIN, M.N.; COLLILIEUX, X.; ALTAMIMI, Z.; WILLIAMS, S.D.P. and MIGUEZ, B.M.: Rates of sea-level change over the past century in a geocentric reference frame, Geophys. Res. Lett., 36, L12607, 2009.

WEB 1: Stand: 28.05.2014. www.sonel.org/squelettes/mareg/index.php?a=gv&img=cux_1_2510.jpg

Die Küste, 84 (2016), 1-226

Die Küste, 84 (2016), 1-226

Mobiles Laserscanning und Einsatz von Drohnen zur Aufnahme von Küstengebieten und Küstenschutzbauwerken

Lars Tiepolt

Zusammenfassung

In den beiden Forschungsvorhaben „Mobiles Laserscanning und Einsatz von Drohnen zur Aufnahme von Küstengebieten und Küstenschutzbauwerken (LEDA-K)“ und „Laserscanaufnahmen durch Einsatz von Drohnen (Unmanned Arial Vehicles, kurz UAV) zur Aufnahme von Küstengebieten und Entwicklung von teilautomatisierten Softwareverfahren bei der Luftbildauswertung aus UAV-Befliegungen (LEDA-K2)“, federführend bearbeitet von der Dezernatsgruppe Küste des Staatlichen Amtes für Landwirtschaft und Umwelt Mittleres Mecklenburg in Rostock, sollten nur die Voraussetzungen geschaffen werden, dass der Einsatz von Mobilem Laserscanning (MLS) und von Unmanned Aircraft Vehicles (Drohnen) **im direkten ufernahen Küstenbereich und für reine, spezifische Küstenschutzaufgaben an Nord- und Ostsee** erfolgreich durchgeführt werden kann. In beiden Projekten mit den kurzen Projektzeiträumen vier und neun Monate sollten nur die tatsächliche **Anwendbarkeit der vorhandenen technischen Systeme** untersucht werden, so dass die hier dargelegten Ergebnisse nur einen **Erfahrungsbericht des praktischen Einsatzes** und der Möglichkeiten darstellen und nicht auf technische Spezifikationen oder gar Anpassungen der eingesetzten Geräte eingehen können. Die Ergebnisse aus beiden Projekten lassen sich stichpunktartig wie folgt zusammenfassen:

- Für alle morphologischen Naturraummessungen im ufernahen Bereich mittels MLS reichen die erzielbaren Punktdichten (>10 Punkte) und Punktgenauigkeiten (in der Höhe kleiner 5 cm und in der Lage kleiner als 1 dm) aus.
- Die minimale Scanreichweite bei MLS liegt bei 1,5 m, die optimale Scanreichweite sollte die 200-m-Marke nicht überschreiten, die maximale Scanreichweite liegt bei 500 m, wobei eigene Abschattungen durch das System selbst nicht zu verzeichnen sind.
- Die Lasermesspunktgröße sowie die verwendeten Korrelationen von Fahrgeschwindigkeit, Scanrate und Messpunktdichte sind in allen Reichweitenbereichen für Naturraummessungen völlig ausreichend und somit uneingeschränkt nutzbar.
- Bei einer optimalen, durchschnittlichen Fahrgeschwindigkeit mit MLS von 30–40 km/h bei sandigen Flachküstenabschnitten und Deichtrassen können bis zu 80 km am Tag aufgenommen werden.
- Eine Unterscheidung von Gebäuden und befestigten Deichtrassen gegenüber natürlichen Strukturen (Sandstrand, Pflanzen, Bäume) ist bei MLS über die erfassten Rauigkeitsbeiwerte möglich.
- In der Regel sind im ufernahen Bereich alle Vorgaben für die problemlose GNSS/INS Initialisierung und GNSS-Vermessung vorhanden.

- In der Regel gibt es bei der Vermessung mit MLS an sandigen Flachküstenabschnitten vom Strand aus, von der Deichkrone bzw. von der landseitigen Dünen- oder Deichseite keine Probleme, auch nicht bei der Erfassung des Deichfußes.
- Probleme beim MLS gibt es bei Schneebedeckung, die zu quantitativen und qualitativen Verlusten bei den Messergebnissen führen kann sowie an stark steinigen Flachküstenbereichen, an Steilküstenbereichen oder auch bei feinsandigen, neu akkumulierten Strandbereichen, wo die Gefahr des Festfahrens des Fahrzeugs besteht.
- Die Datenmengen und Bearbeitungszeiten sind stark von den Aufnahmeparametern abhängig, bei optimierten Verarbeitungsalgorithmen benötigt man pro 1 MLS-Datenerfassungsstunde 8 Stunden für das Postprocessing.
- Durch Verwendung des LAS-Formates bei MLS ist Standardsoftware verwendbar und es können problemlos Digitale Geländemodelle (DSM, DTM) erzeugt werden, auch verlustfreie CAD-Konvertierungen sind theoretisch möglich.
- Der Einsatz der UAV (Drohne) direkt nach Sturmfluten ist bis Windstärke 4 problemlos möglich, ebenso im Winter, solange keine vollständige Schneebedeckung vorliegt.
- Die optimale Flughöhe von UAVs für Küstenschutzbelange beträgt 80–120 m bei möglichen Fluggeschwindigkeiten von 10–70 km/h, die maximale Windgeschwindigkeit darf dabei 30 km/h nicht überschreiten.
- Die tatsächlichen Flugzeiten der UAVs im Winterbetrieb liegen zwischen 20 und 35 Minuten in Abhängigkeit der verwendeten Akkus und Witterungsverhältnisse.
- Orthophotos von UAVs lassen über manuelle Auswertung eine rein optische Betrachtung des Vegetationszustandes zu, automatische Verfahren mit NIR-Filtern sind nicht zu empfehlen.
- Die Kombination von UAV, MLS- und DGM-Daten ist möglich und sinnvoll, da die Verschneidung dieser Daten zu einem deutlichen Erkenntniszuwachs führt.
- Die Nutzung von Luftbildern aus UAV-Flügen mit dem LEDA-K Flächenflieger (Easy Glider Pro) für Digitale Geländemodelle, für stereoskopische Auswertungen sowie zur Ermittlung von Abbruchraten, Volumen- und Massenberechnungen sind theoretisch möglich, aber derzeit nicht praktikabel (Stand 2014).
- Die verwendete MLS-Technik sowie die Drohnen (UAV) entsprechen für den dienstlichen Einsatz den gesetzlichen Vorgaben und Regelungen, wobei bei der Datenerfassung und -verarbeitung die Datenschutzbestimmungen des jeweiligen (Bundes-) Landes zu beachten sind.

Hinzu kamen zum Einen die praxisreife Entwicklung und der Bau eines Prototyps eines UAV mit Kleinstlaser zur Küstengebietserfassung und damit der Nachweis des grundsätzlichen Einsatzes von Drohnen mit kleinen Laserscannern für die Aufgaben des Küsten- und Umweltschutzes und zum Anderen die spezialisierte Neuentwicklung einer Software, die geeignete Lösungen bietet, um die speziellen Anforderungen an Genauigkeit, Überlappung, Flughöhe und -geschwindigkeit der UAV bei der photogrammetrischen Bearbeitung von Luftbildern sowie an die besondere Morphologie und Bodenbeschaffenheit im Küstenbereich mit den entwickelten Tools praxisrelevant bearbeiten zu können.

Schlagwörter

Mobiles Laserscanning (MLS), Drohnen, UAV (unmanned aircraft vehicle), UAS (unmanned aircraft system), Küstengebiete, Küstenschutz, Nordsee, Ostsee, Luftbilder, Orthophotos, Laservermessung, Softwareentwicklung

Summary

The research projects "Mobile laser scanning and use of unmanned aircraft vehicles for the survey of coastal areas and coastal protection structures (LEDA-K)" and "Laser scan recordings using unmanned aircraft vehicles (UAV) for the survey of coastal areas and development of semi-automated software methods for the evaluation of aerial scenes gathered by UAV-surveying-flights (LEDA-K2)", set the stage for a successful application of mobile laser scanning (MLS) and unmanned aircraft vehicles for issues of coastal protection in the North Sea and Baltic regions. The department group for coastal protection of the State Office for Agriculture and Environment in Rostock was the institution in charge for these projects. Results from both projects can be summarized as follows:

- *Point-densities (>10 per square meter) and -accuracies (< 5cm vertically and < 10 cm horizontally) attainable with MLS are sufficient for all morphological surveys in coastal areas.*
- *Minimum scan range is 1.5 m. Optimal scan range is below 200 m while maximum scan range is 500 m whereupon shadowing effects by the system itself could not be recognized.*
- *The size of laser measurement points as well as the used correlation of flight velocity, scan rate and scan point density are absolutely sufficient at all scales of range and thereby usable without limitations.*
- *In case of sandy shallow coasts and dikes a distance of 80 km can be surveyed per day under assumption of an optimal average flight velocity of 30–40 km per hour.*
- *A distinction between rigid man-made structures as buildings and dikes and natural structures (beaches, vegetation) is possible for MLS by integration of the detected bottom roughness.*
- *Usually, all requirements for a working initialization of GNSS/INS and GNSS-survey are given in coastal areas.*
- *Concerning the survey with MLS at sandy shores, from the top of the dike or from landward dune or dike, no problems could be recognized. Neither could it be with the detection of the dike's bottom line.*
- *For MLS, problems appear with the presence of a snow coverage resulting in a qualitative and quantitative decrease of the survey's information as well as on shallow shores rich with rocks, cliffs, or recently accumulated beaches where the vehicle can get stuck.*
- *The amount of data and the duration of processing vary largely with the recorded parameters. With optimized processing algorithms, post processing takes 8 hours for the data of one hour of survey.*
- *By application of the LAS-file format for MLS also standard software can be used and digital terrain models (DEM, DSM) can easily be generated. Even nondissipative CAD-conversions are possible in theory.*
- *Application of an UAV in close succession to a storm flood is possible for wind speeds of up to 4 bft. The same is valid for winter, as long as there is no dense snow coverage.*
- *Optimal flight altitude for UAV's for coastal protection issues is 80 to 120 m with possible flight velocities of 10 to 70 km/h, while maximum wind speed may not exceed 30 km/h.*
- *Dependig on the batteries used and the contemporary weather conditions, the actual time of flight for a UAV varies between 25 and 30 min in case of an operation during winter.*

- *Using orthophotos gathered by UAVs and including a manual evaluation, information on the condition of the vegetation can be executed in a purely optical way. Automated procedures with NIR-filters are not recommended.*
- *The combination of data from UAV, MLS and digital terrain models is possible and makes sense, since it results in an increase of information.*
- *The usage of aerial images from UAV flights with the LEDA-K plane (Easy Glider Pro) for digital terrain models, stereoscopic analysis as well as the quantification of cliff erosion, calculation of masses and volumes is possible in theory, however, not feasible at this time (2014).*
- *The used MLS-technology just as UAV's are conformable to law if applied for public service. However, regulations for data privacy of every single (federal) country have to be taken into account concerning gathering and processing of data.*

Further aspects were the development and construction of a practically working UAV prototype with small scale laser for the survey of coastal areas and herewith the proof of a fundamental applicability of small laser scanners for the duties of coastal and environmental protection just as the development of a customized software able to cope with the requirements concerning accuracy, overlap, flight speed and altitude of the UAV with regard to photogrammetric processing of aerial images and the unique morphology and soil properties of the littoral.

Keywords

mobile laser scanning, unmanned aircraft vehicle, unmanned aircraft system, coastal protection, shoreline, North Sea, Baltic Sea, aerial photographs, mobile laser scanning, airborne laser scanning, software development

Inhalt

1 Einleitung 151
2 Mobiles Laserscanning 152
2.1 Untersuchungsschwerpunkte Mobiles Laserscanning 153
2.2 Ergebnisse des Mobilen Laserscannings 154
2.2.1 Realisierbare Fahrgeschwindigkeiten 154
2.2.2 Realisierbare Leistungsparameter:km pro h, km pro d, km pro Woche .. 154
2.2.3 Erfassungsgenauigkeiten in Lage und Höhe 155
2.2.4 Scanraten und Lasermesswerte pro m²,Messpunktdichte in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit und der Scanrate 155
2.2.5 Minimum und Maximum von Scanreichweite, Scanbereich und Scanwinkel 157
2.2.6 Lasermesspunktgröße in Anhängigkeit von der Reichweite 158
2.2.7 Korrelation Fahrgeschwindigkeit, Scanrate und Messpunktdichte 158
2.2.8 Erfassung von Rauigkeitsbeiwerten der reflektierten Materialen 158
2.2.9 Navigationspfad, GNSS/INS Initialisierung, GNSS-Abschattungen 159
2.2.10 Probleme durch Laserabschattungen hinsichtlich der Deichfußerfassung 159

3 Einsatz von Flächenfliegern 160
3.1 Untersuchungsschwerpunkte beim Einsatz von UAV 163
3.2 Ergebnisse des Einsatzes von Flächenfliegern 163
3.2.1 Zustandserfassung von Deichen und Dünen im Allgemeinen und für ein Monitoring von Ufer-Strand-Dünen 163
3.2.2 Flughöhe, -geschwindigkeit und -dauer 170
3.2.3 Tatsächliche Windanfälligkeit (nach Sturmflut!) 171
3.2.4 Kombination der UAV-Daten mit MLS und DGM 172
3.2.5 Zustandserfassung/Abbruchraten nach Sturmfluten im Strand- und Dünenbereich/Beitrag zu Volumen- und Massenberechnungen nach Sturmfluten/Monitoring im Steilküstenbereich bzw. Dokumentation 172
3.2.6 Nutzbarkeit als Grundlage für Digitale Geländemodellierung 177
3.2.7 Rückschlüsse auf Vegetation des Deiches, Strandhaferzustand/-dichte in den Dünen 177
3.2.8 Stereoaufnahmen 178
3.2.9 Kombination MLS und Drohne während der Aufnahme 178
3.2.10 Wintereinsatz der Drohne 179
3.2.11 Gesetzliche Bestimmungen (u. a. Datenschutz) 179
4 Einsatz von Multikoptern 180
4.1 Untersuchungsschwerpunkte und Einsatzmöglichkeiten von Multikoptern 180
4.2 Bestandteile des entwickelten LEDA-K2-Multikopters 181
4.2.1 Flugplattform MikroKopter Basisset Hexa XL 181
4.2.2 GPS-Chipset UBX-G5000/G0010 182
4.2.3 Autopilot-Einheit Krooz inklusive IMU-Sensor MPU-6000/6050 182
4.2.4 Recheneinheit PandaBoard ES 182
4.2.5 Wahl des Laserscanners 183
4.2.6 Aufbau der Komponenten 184
4.3 Spezifikationen des LEDA-K2-Multikopters 185
5 Aktuelle Entwicklungen zum Einsatz von UAV 189
6 Danksagung 191
7 Schriftenverzeichnis 191

1 Einleitung

Bisher kamen im Küstenschutz von Mecklenburg-Vorpommern zur Aufnahme der Morphologie und zur Vermessung von Küstenschutzanlagen neben den klassischen tachymetrischen Messverfahren hauptsächlich Airborne Laserscanning (ALS) und vereinzelt terrestrisches Laserscanning zum Einsatz.

Bei der tachymetrischen Vermessung wird der Vorteil der hochgenauen Aufnahme von Objekten inklusive der Attributierung durch die überwiegenden Nachteile von

wenigen Punkten pro Fläche, einem hohen Zeit- und Kostenaufwand und der Notwendigkeit der Interpolation von Zwischenflächen zunichte gemacht.

Demgegenüber wird bei der ALS-Vermessung eine sehr große Fläche in kurzer Zeit aufgenommen, hier fehlen aber dann die Attributierung der Punkte sowie die hohe Genauigkeit und es besteht das Problem der Verfügbarkeit von Flugzeugen/Hubschraubern zum gewünschten Zeitpunkt. Bei zu kleinen Flächen liegen die Mob-/DeMobkosten bzw. An- und Abflugkosten oft über den tatsächlichen Befliegungskosten.

Das terrestrische Laserscanning als Mittelweg durch die Aufnahme mit hoher Punktdichte bei einer größeren Fläche mit schnellerer Verfügbarkeit (als beim ALS), aber mit reduzierter Genauigkeit gegenüber tachymetrischen Verfahren und mittlerem Zeit- und Kostenaufwand ist für kleinflächige Objekte eine gute Alternative, für größere und insbesondere langgestreckte Objekte, wie Dünen und Deiche, aber auch keine befriedigende Lösung.

Die Technikentwicklung der letzten Zeit hat nun zwei weitere mögliche Aufnahmeverfahren zur Marktreife gebracht, deren Anwendung gerade für die Aufgaben des Küstenschutzes, nicht nur in MV sondern in allen Küstenländern, theoretisch vielversprechende Ergebnisse erwarten lässt, zum einen ist dies das Mobile Laserscanning (MLS) und zum anderen der Einsatz ferngesteuerter Drohnen. Beide Verfahren wurden exemplarisch an ausgewählten Küstenschutzstandorten getestet, um entweder ihre praxisrelevante Nutzbarkeit zu bestätigen und damit eine Grundlage für detaillierte Forschungen und Anwendungen zu schaffen oder eben diese Verfahren für Belange des Küstenschutzes in der jetzt vorliegenden Technologie auszuschließen. Dabei wurden die UAV (unmanned aircraft vehicle) sowohl mit Kameras für Fotoaufnahmen als auch mit Kleinstlasern für Laserscanvermessungen ausgestattet und erforscht.

2 Mobiles Laserscanning

Beim Mobilen Laserscanning werden auf einem Fahrzeug montierte Laserscanner zur Aufnahme der direkten Umgebung genutzt, wobei diese ihre Arbeit bei kontinuierlicher Fahrt schneller, flächenhafter und hervorragend für Linienelemente durchführen können. Durch die parallele Aufnahme von Echtfarbvideos kann im Nachhinein ein besonders gutes Zustandsbild von den erfassten Objekten erstellt werden.

Im Projekt kam dabei der RIEGL-Scanner VMX-250 auf verschiedenen Fahrzeugen zum Einsatz sowie ein klassischer terrestrischer RIEGL-Scanner, der auf einen Jeep montiert worden war. Alle erhobenen MLS-Daten wurden von der Firma Milan Geoservice GmbH mit Softwarepaketen ausgewertet, wie sie auch bei der tachymetrischen Landvermessung bzw. bei der ALS-Vermessung verwendet werden, um die tatsächliche Datenqualität zwischen den jeweiligen Verfahren softwareunabhängig und verlustfrei beurteilen zu können.

Abbildung 1: Geländetaugliches Fahrzeug mit montiertem Riegl MLS-System VMX-250.

2.1 Untersuchungsschwerpunkte Mobiles Laserscanning

Der Einsatz von Mobilen Laserscannern bei der Vermessung von urbanen Gebieten, insbesondere von Infrastrukturen in Städten, ist Stand der Technik und stellt derzeit keine besonderen Anforderungen an das Equipment und an das Postprocessing. Ein Einsatz auf schmalen Uferstreifen mit sandigem oder stark steinigem Untergrund bei gleichzeitig wenig baulich festen Strukturen ist bisher nicht probiert worden und stellt auf jeden Fall weit höhere Anforderungen an die Technik (Geländefähigkeit) und an die Nachbearbeitung der Daten. Ziel der Untersuchungen war es, folgende Fragestellungen zu bearbeiten:

- Leistungsparameter, d. h. km pro h, km pro d, km pro Woche
- Fahrgeschwindigkeiten
- Erfassungsgenauigkeiten in Lage und Höhe
- Scanraten, Lasermesswerte pro m²
- Messpunktdichte in Abhängigkeit der Fahrgeschwindigkeit
- Messpunktdichte in Abhängigkeit der Scanrate
- min./max. Scanreichweite, Scanbereich, Scanwinkel
- Lasermesspunktgröße in Anhängigkeit der Reichweite
- Genauigkeitsbetrachtung: Korrelation Fahrgeschwindigkeit, Scanrate, Messpunktdichte
- Erfassung von Rauigkeitsbeiwerten der reflektierten Materialen
- Navigationspfad, GNSS/INS Initialisierung, GNSS-Abschattungen
- Laserabschattungen, Deichfußerfassung
- Zugangsmöglichkeiten bzw. Zugangseinschränkungen des Messfahrzeuges
- Auswirkungen von Schneebedeckung auf die Messergebnisse

- Datenerfassung, Datenmenge, Zeitraum der Bearbeitung
- Datenformate, Datenableitungen, Datenspeicherung
- Datenaufbereitung, u. a. CAD-Modell, Zeit-/Leistungsverhältnis, Genauigkeitsverlust
- Betriebswirtschaftliche Gesamtbewertung, Zeit- und Kostenersparnis
- gesetzliche Forderungen im Bereich des Küstenschutzes
- gesetzliche Bestimmungen, Datenschutz

2.2 Ergebnisse des Mobilen Laserscannings

2.2.1 Realisierbare Fahrgeschwindigkeiten

Die erreichbaren und realisierbaren Fahrgeschwindigkeiten richten sich nach verschiedenen Gesichtspunkten. Erfolgt eine Aufnahme bspw. in bebauten Gebieten auf öffentlichen Straßen, so ist die maximale Geschwindigkeit auf die durch die STVO vorgeschriebene Höchstgeschwindigkeit begrenzt. Diese Beschränkungen gelten auch bei MLS-Aufnahmen auf Deichwegen. Da diese üblicherweise als Rad- und Fußgängerwege ausgelegt sind, ist die Geschwindigkeit zusätzlich so anzupassen, dass weder Menschen noch Tiere zu Schaden kommen können. Die Sperrung von Stränden und Deichwegen ist im Sommer aufgrund der touristischen Nutzung keine Option und auch im Winter sollte/muss eigentlich eine Sperrung nur eine temporärere und räumlich stark begrenzte Möglichkeit sein. Vom Gerätehersteller wird dazu eine maximale Geschwindigkeit von 60–70 km/h vorgesehen, um ein optimales Verhältnis von Punktdichte, Punktgenauigkeit und Datensicherheit bei maximaler Datenaufnahme zu erhalten.

Dies gilt gleichermaßen für MLS-Aufnahmen im Strandgebiet. Im Verlaufe der MLS-Messungen an den Stränden von Wustrow-Dierhagen, Prerow und Hörnum-Odde ergab sich eine maximale Fahrgeschwindigkeit von 40–50 km/h. Höhere Geschwindigkeiten konnten auf Sandboden nicht erreicht werden.

Fazit: Durchschnittliche Fahrgeschwindigkeit bei sandigen Flachküsten und Deichtrassen beträgt bei MLS 30–40 km/h in einem Abschnitt.

2.2.2 Realisierbare Leistungsparameter: km pro h, km pro d, km pro Woche

Angenommen an sandigen Strandbereichen kann über weite Strecken mit der Höchstgeschwindigkeit (40–50 km/h) gefahren werden, dann ergibt sich eine theoretische maximale Aufnahmegeschwindigkeit von 40 bis 50 km Sandstrand pro Stunde. Dies kommt nur in Frage, wenn alle Strandabschnitte direkt miteinander verbunden sind und dadurch nacheinander aufgenommen werden können. Durch den teilweise recht lockeren Sandboden, Hindernisse sowie Passanten ist eher von einer Durchschnittsgeschwindigkeit von ca. 25–30 km/h auszugehen. Des Weiteren wird Zeit für das Umsetzen des Fahrzeuges, für einen eventuellen Austausch der Datensicherungsplatten und auch für die Betankung des Fahrzeuges benötigt. Anhand dieser Faktoren und der im Rahmen des Projektes tatsächlich gefahrenen Kilometer ist von einer Aufnahmelänge von 10 km pro Stunde auszugehen. Damit wären pro Tag 80 km und in einer Woche rund 500–600 km erreichbar.

Fazit: Durchschnittliche Geländeaufnahme bei MLS: 80 km am Tag.

2.2.3 Erfassungsgenauigkeiten in Lage und Höhe

Um die Scanstreifen einander anzupassen wurden Ebenenpaare in benachbarten Scanstreifen gesucht und deren Abstände zueinander berechnet. Diese wiesen eingangs eine Standardabweichung von ca. 4 cm auf. Nach einer Ausgleichung, welche eine Verschiebung und Verkippung der einzelnen Streifen zuließ, betrug die Standardabweichung nur noch ca. 1 cm.

Für die Bestimmung der äußeren Genauigkeit wurde ein Datensatz aus einer ALS-Befliegung aus dem Jahr 2012 verwendet. Dabei wurden wiederum Ebenenpaare zur Berechnung herangezogen. Horizontale Flächen zur Abschätzung der Höhengenauigkeit zeigten Differenzen von <5 cm und schräge Flächen z. B. an Häusern zur Abschätzung der Lagegenauigkeit Differenzen von <10 cm.

Zudem wurde die Höhengenauigkeit mit Hilfe von Profilen aus RTK-GNSS-Messungen ermittelt. Die Profile passen in den befestigten Bereichen wie dem Deich oder an Häusern sehr gut zueinander. Hier liegen die Höhenunterschiede der beiden Messungen bei etwa 4 cm. Im Strandbereich befinden sich keine ebenen und befestigten Flächen die zur Referenzierung verwendet werden können.

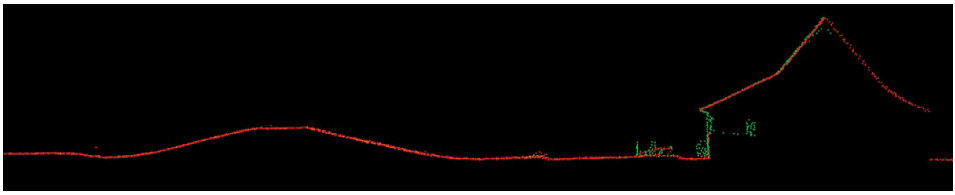

Abbildung 2: Profilvergleich ALS (rot) mit MLS (orange, grün) befestigter Bereich Wustrow.

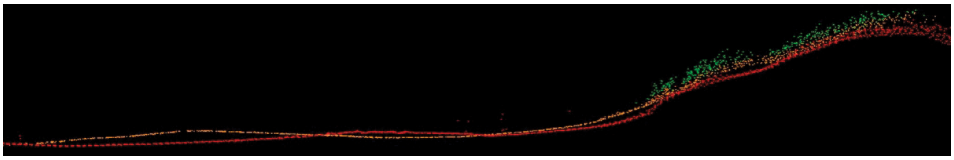

Abbildung 3: Profilvergleich ALS (rot) mit MLS (orange, grün) Strandbereich Wustrow.

Fazit: Erfassungsgenauigkeiten bei MLS in der Höhe definitiv kleiner 5 cm (1–4 cm im Projekt) und in der Lage kleiner als 1 dm.

2.2.4 Scanraten und Lasermesswerte pro m², Messpunktdichte in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit und der Scanrate

Jeder der beiden Riegl VQ-250 Laserscanner weist eine maximale Scanrate von 300 kHz und eine maximale Scangeschwindigkeit von 100 Scanlinien/Sek. auf. Die Anzahl der 3D-Punkte pro m² ist abhängig von der verwendeten Scanrate, der Fahrgeschwindigkeit und der Entfernung zum Laserscanner. Je höher die Scanrate ist, desto mehr Messungen werden auf einen m² durchgeführt. Die Wahl der verwendeten Scanrate ist wiederum davon abhängig, welche maximale Reichweite benötigt wird, um das Zielgebiet aufzunehmen.

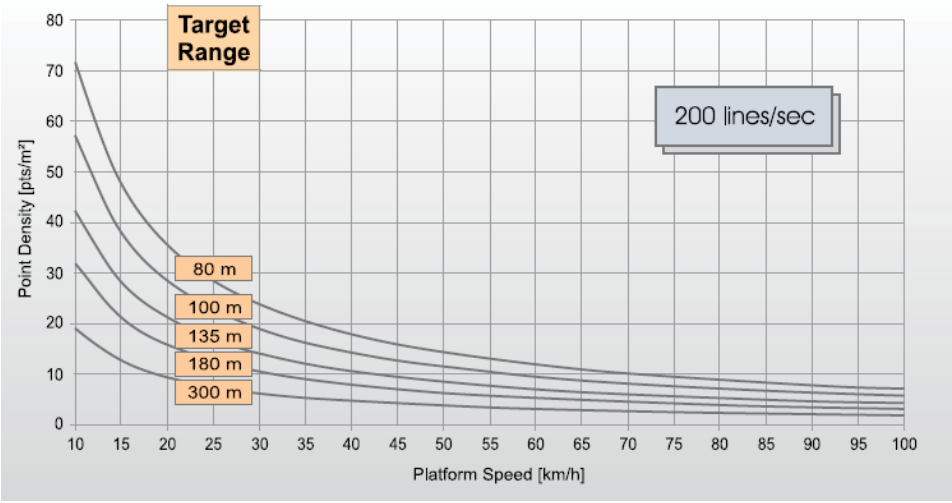

Abbildung 4: Punktdichte bei 100 kHz (2 x 50 kHz) bei langen Zielweiten und verschiedenen Geschwindigkeiten.

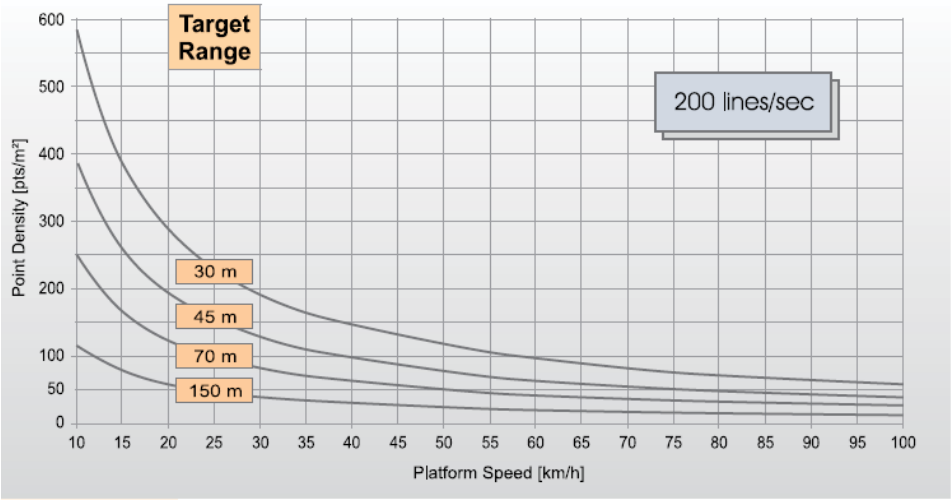

Abbildung 5: Punktdichte bei 300 kHz (2 x 150 kHz) bei mittleren Zielweiten und verschiedenen Geschwindigkeiten.

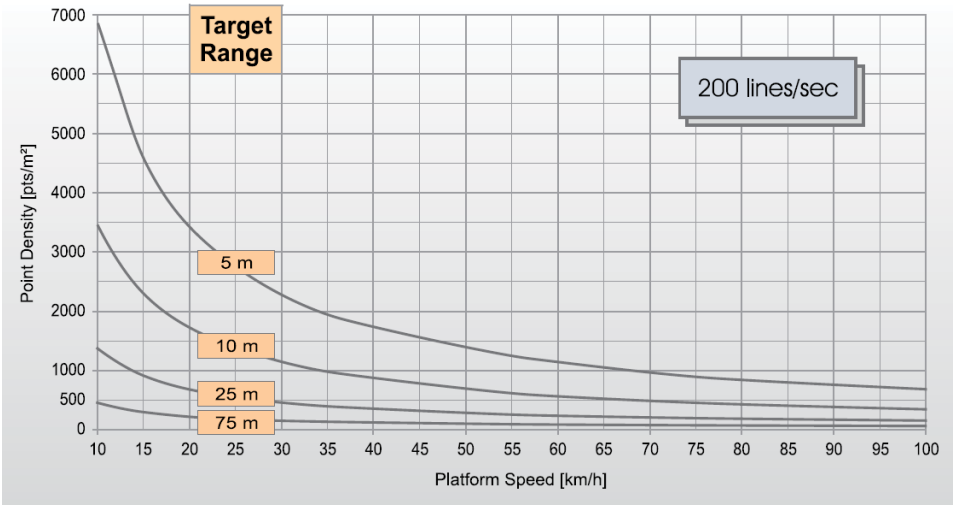

Abbildung 6: Punktdichte bei 600 kHz (2 x 300 kHz) bei kurzen Zielweiten und verschiedenen Geschwindigkeiten.

Die Punktdichte nimmt mit zunehmender Geschwindigkeit des Messfahrzeuges ab. Dies gilt ebenso bei zunehmender Distanz zum Aufnahmeobjekt. Detaillierte Betrachtungen zu den technischen Eigenschaften waren nicht Bestandteil des Projektinhaltes.

2.2.5 Minimum und Maximum von Scanreichweite, Scanbereich und Scanwinkel

Die minimale Reichweite, ab der eine Distanzmessung möglich ist, beläuft sich auf 1,5 m. Die beiden verwendeten Laserscanner haben relativ zueinander einen Abstand von ca. 70 cm und sind üblicherweise auf dem Dach eines Geländefahrzeuges montiert. Aufgrund dieser Konfiguration entstehen praktisch keine Datenlücken. Sollte die Distanz zu einem Objekt die minimale Reichweite einmal nicht erreichen, wird das Objekt durch den zweiten Scanner aufgenommen. Die maximale Reichweite beträgt bei einer gewählten Scanrate von 50 kHz 500 m. Bei 300 kHz wird nur noch eine maximale Reichweite von 200 m erreicht. Die beiden Laserscanner des VQ-250 weisen jeweils ein Sichtfeld von 360° auf und besitzen somit bezüglich des Scanbereiches keine Einschränkungen. Zudem sind sie bezüglich einer horizontalen und vertikalen Ebene schräg angeordnet. Hierdurch können Schattenbereichen des einen Scanners durch den anderen Scanner aufgenommen werden.

Fazit: Die minimale Scanreichweite liegt bei 1,5 m, die maximale Scanreichweite sollte die 200-m-Marke nicht überschreiten, aufgrund der Vorwärtsbewegung des Fahrzeugs und des 360° Scanwinkels sind eigene Abschattungen durch das System selbst nicht zu verzeichnen.

2.2.6 Lasermesspunktgröße in Anhängigkeit von der Reichweite

Der VQ-250 verfügt über eine Strahldivergenz von 0,35 mrad (Milli-Radiant). Das entspricht einem Winkel von 0,02°. Bereits beim Verlassen weist der Laserstrahl eine Breite von 7 mm auf. Bei einer Entfernung von 50 m trifft der Strahl mit einem Durchmesser von 18 mm auf ein Objekt auf und bei einer Entfernung von 100 m bereits mit 36 mm Durchmesser. Für die maximale Reichweite von 500 m ergibt sich demnach eine Punktgröße von 18 cm.

Fazit: Die Lasermesspunktgröße ist im angestrebten Reichweitenbereich von 200 m sehr gut und selbst im maximalen Reichweitenbereich von 500 m für Naturraummessungen völlig ausreichend und somit uneingeschränkt nutzbar.

2.2.7 Korrelation Fahrgeschwindigkeit, Scanrate und Messpunktdichte

Wurden mehrere Scans vorgenommen (bspw. vom Strand und vom Deich aus), können diese zueinander angepasst werden. Zunächst werden mittels der sog. Boresight-Kalibrierung Korrekturen der Orientierung von Scanner und IMU-Einheit zueinander vorgenommen. Diese können durch den Vergleich von Ebenen aus gegenläufigen Scanstreifen bestimmt werden. Die folgende Anpassung der einzelnen Streifen zueinander verläuft ebenfalls über einen Vergleich von Ebenenpaaren. Hausdächer bspw. sind für diesen Vergleich am besten geeignet. In Abschnitt 2.2.4 wurde bereits eingehend behandelt wie sich die Scanrate und die Fahrgeschwindigkeit auf die Messpunktdichte auswirken. Je höher die verwendete Scanrate ist und je langsamer das Fahrzeug fährt, desto höher ist die Anzahl der Punkte pro m².

Fazit: Die bekannten und dargestellten Korrelationen von Fahrgeschwindigkeit, Scanrate und Messpunktdichte liefern in allen Fällen mit den vorgegebenen Parametern sehr gute Ergebnisse.

2.2.8 Erfassung von Rauigkeitsbeiwerten der reflektierten Materialen

Intensitätsbilder der Rückstreuung des Laserscanners können genutzt werden, um Aussagen zur Beschaffenheit der Oberflächen zu machen. Glatte Oberflächen reflektieren das auftreffende Lasersignal eher in einem Winkel, der dem Auftreffwinkel entspricht. Somit kommt nur ein geringer Teil des Signals zurück zum Scanner. Bei rauen Flächen verhält es sich umgekehrt, wodurch Punkte eine höhere Intensität aufweisen. Aufgrund dessen sind in diesem Fall Fassadenpunkte in der folgenden Intensitätsdarstellung heller abgebildet als Punkte des Daches. Natürlich können auch andere Gründe wie Materialeigenschaften und unterschiedliche Reflektivität zu ähnlichen Effekten führen.

Abbildung 7: Intensitätsbild eines Hauses im Gebiet Hörnum-Odde.

Fazit: Eine Unterscheidung von Gebäuden und befestigten Deichtrassen gegenüber natürlichen Strukturen (Sandstrand, Pflanzen, Bäume) ist über die erfassten Rauigkeitsbeiwerte möglich.

2.2.9 Navigationspfad, GNSS/INS Initialisierung, GNSS-Abschattungen

Eine GNSS/INS Initialisierung muss vor Beginn jeder Messungskampagne durchgeführt werden. Für die Initialisierung der GNSS/INS-Einheit muss diese für eine kurze Zeit auf eine Geschwindigkeit von 60–70 km/h beschleunigt werden. Dafür ist eine in der Nähe befindliche Straße zu wählen, auf der mindestens 70 km/h gefahren werden darf.

Der GNSS-Empfänger des Riegl VMX-250-Systems kann Signale von sowohl GPS als auch GLONASS-Satelliten empfangen. Aufgrund dessen ist die Sicht zu ausreichend Satelliten fast immer gegeben. Größere, die Güte der Positionsbestimmung beeinflussende Abschattungen sollten daher weder am Strand noch auf Deichen auftreten und stellen somit kein Problem dar.

Fazit: In der Regel sind im ufernahen Bereich alle Vorgaben für die problemlose GNSS/INS Initialisierung und GNSS-Vermessung vorhanden.

2.2.10 Probleme durch Laserabschattungen hinsichtlich der Deichfußerfassung

Wenn möglich, dann wird sowohl vom Strand als auch vom Deich aus mit dem MLS-Verfahren gescannt. Da von einem Fahrzeug aus gemessen wird, ist eine vollständige Durchdringung des Waldes hinter dem Deich abhängig von der Breite des Waldes. Trotz der flachen Aufnahme der Deichfüße vom Deich aus, ergaben sich keine Probleme bei Rekonstruierung des Deichprofils. Vom Strand aus konnten nur bis zur seeseitigen Dünenoberkannte Punkte aufgenommen werden, sodass der für Küstenschutzfragen wichtige gesamte Dünenkörper mit einer einzigen Aufnahme nicht erfasst werden kann.

3 Einsatz von Flächenfliegern

Bisher wurde zur Ermittlung der Morphologie des Strand-Dünenbereichs und zur Erfassung von Schäden nach Sturmfluten neben den kleinräumigen Profilaufnahmen (von maximal 3 Profilen pro Kilometer bei Naturraummessungen bis zu nur 5 Einzelprofilen an der gesamten Flachküsten nach Sturmfluten) auch für kleinere Gebiete Airborne Laseraufnahmen (5 Gebiete á 5-10 km Küstenlänge pro Jahr bzw. Schadensereignis) verwendet, um Zustand und Schäden des Uferbereiches zu ermitteln. Nach Sturmfluten haben Mitarbeiter der Staatlichen Ämter für Landwirtschaft und Umwelt (StÄLUs) vor Ort Fotoaufnahmen gemacht, mit deren Hilfe dann Abtragsraten und -volumina überschläglich ermittelt wurden, um den monetären Schaden und auch die Notwendigkeit von Reparatur- oder Aufspülmaßnahmen zu beurteilen. Das sind im Endeffekt unsichere Verfahren mit der großen Gefahr von Fehleinschätzungen bzw. -berechnungen. Jede flächenhaftere Aufnahme mit geprüften und einheitlichen Werkzeugen und Methoden muss zwangsläufig zur Verbesserung der Ergebnisse führen. Diesem Ziel standen bisher die viel zu hohen Kosten von klassischer Vermessung und ALS entgegen.

Deshalb wurde der Ansatz verfolgt, neue luftgestütze Aufnahmegeräte, u. a. Multikopter für den speziellen Einsatz im Küstenschutz zu testen, ggf. anzupassen oder sogar neu zu entwickeln.

Zum Einsatz kamen dabei verschiedene, von der Firma CIS GmbH Rostock modifizierte UAVs auf Basis des Modellflugzeuges „Easy Glider Pro“.

Abbildung 8: Foto des Standardflugzeugs Easy Glider Pro.

Abbildung 9: Start des UAV Easy Glider Pro.

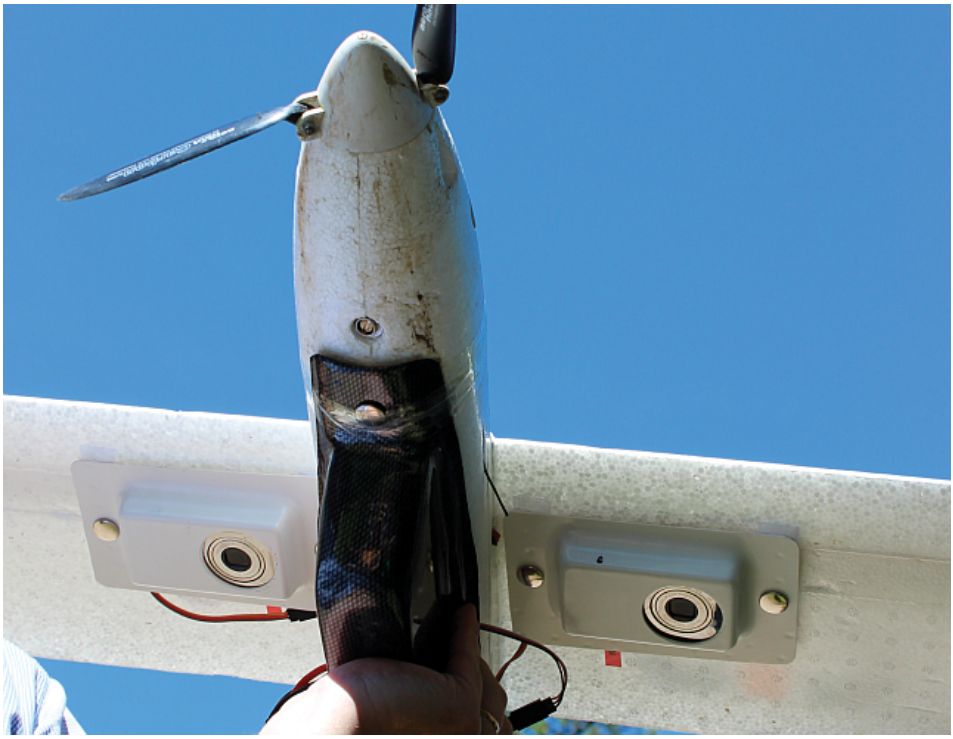

Abbildung 10: Foto der Kameraanordnung an den Flügeln.

Abbildung 11: Foto der Kameraanordnung parallel unter dem Flugzeug im Batteriekasten.

3.1 Untersuchungsschwerpunkte beim Einsatz von UAV

Die Anwendung von Unmanned Aircraft Vehicles (UAV) in fast allen Lebensbereichen hat in den letzten Jahren rasant zugenommen, so dass es für viele Bereiche schon industrielle Lösungen gibt. Allgemein wurde in der Vergangenheit die Meinung geäußert, dass eine Anwendung im Strandbereich der Ostsee oder Nordsee nicht möglich ist, da die ungünstigen naturräumlichen (keine Landung im Sand möglich) und meteorologischen Gegebenheiten (Winde) dies verhindern.

Im Projekt LEDA-K wurde erstmalig der Versuch gestartet, ein Standard-Modellflugzeug so zu modifizieren, dass mit der Verlängerung der Flugzeit durch mehrere oder größere Akkus sowie durch Anpassung der Hard- und Software die Aufnahme von direkten Küstengebieten möglich wird.

Neben den konstruktiven Anforderungen und dem tatsächlichen Bau und Einsatz von Prototypen standen folgende Fragestellungen im Fokus der Forschung:

- Zustandserfassung Deiche und Dünen allgemein
- Zustandserfassung/Abbruchraten nach Sturmfluten im Strand-/Dünenbereich
- Vegetation des Deiches, Strandhaferzustand/-dichte in den Dünen
- Monitoring Ufer-Strand-Dünen
- Monitoring im Steilküstenbereich bzw. Dokumentation von Abbrüchen
- Grundlagen für Digitale Geländemodellierung
- Beitrag zu Volumen-und Massenberechnungen nach Sturmfluten
- Möglichkeit von Stereoaufnahmen mit entsprechenden Verarbeitungsmethoden
- Möglichkeit der Verschneidung der Luftbilddaten aus den UAVs mit den Ergebnissen der MLS-Vermessung

3.2 Ergebnisse des Einsatzes von Flächenfliegern

3.2.1 Zustandserfassung von Deichen und Dünen im Allgemeinen und für ein Monitoring von Ufer-Strand-Dünen

Die allgemeine Zustandserfassung ist sowohl optisch durch generierte Orthophotos als auch rechnerisch durch die erzeugten Punktwolken möglich. Die folgenden Abbildungen zeigen die Zustandserfassung von Hörnum-Odde zu verschiedenen Aufnahmezeitpunkten als Shaded Relief und als Orthophoto:

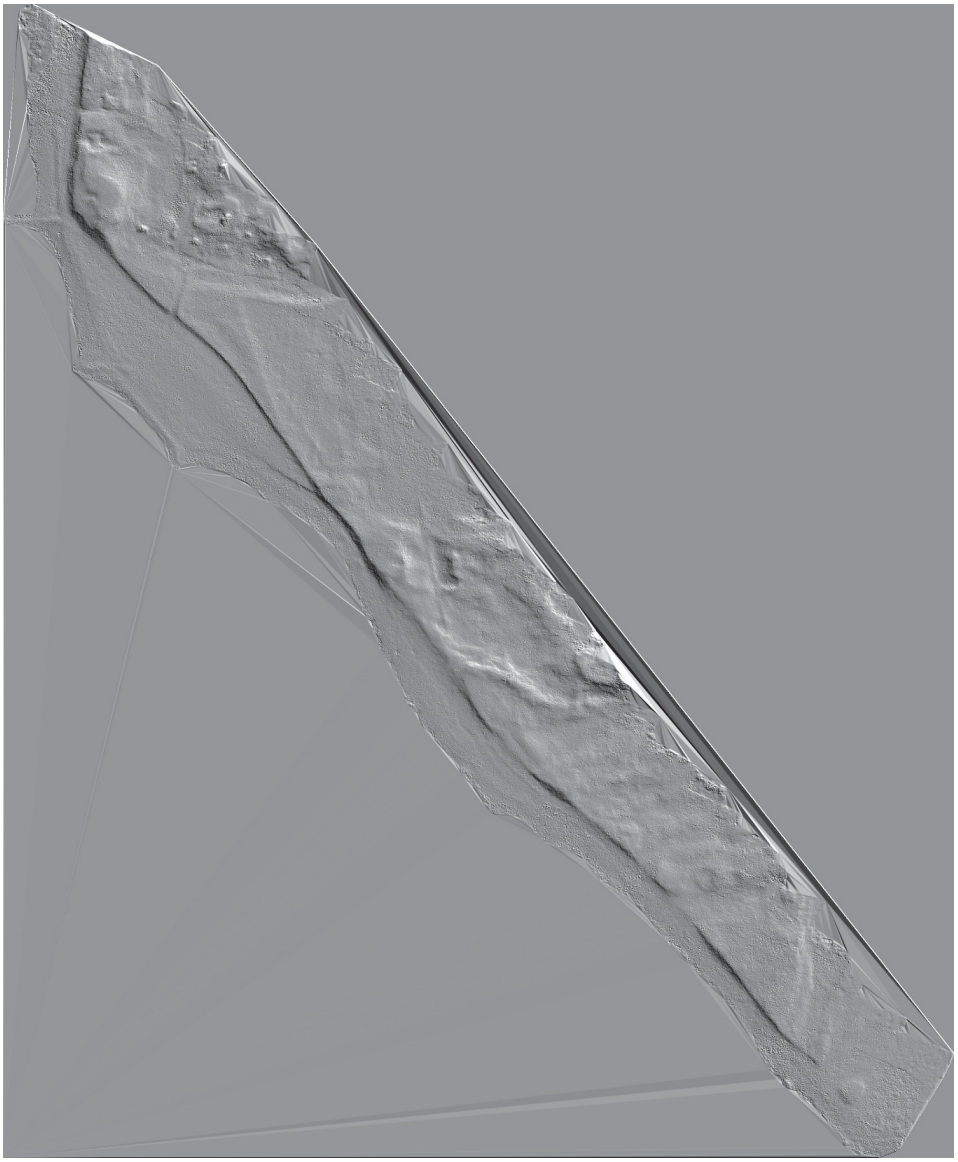

Abbildung 12: Schummerung des Gebietes Hörnum-Odde 06.11.2012.

Abbildung 13: Orthofoto des Gebietes Hörnum-Odde vom 06.11.2012.

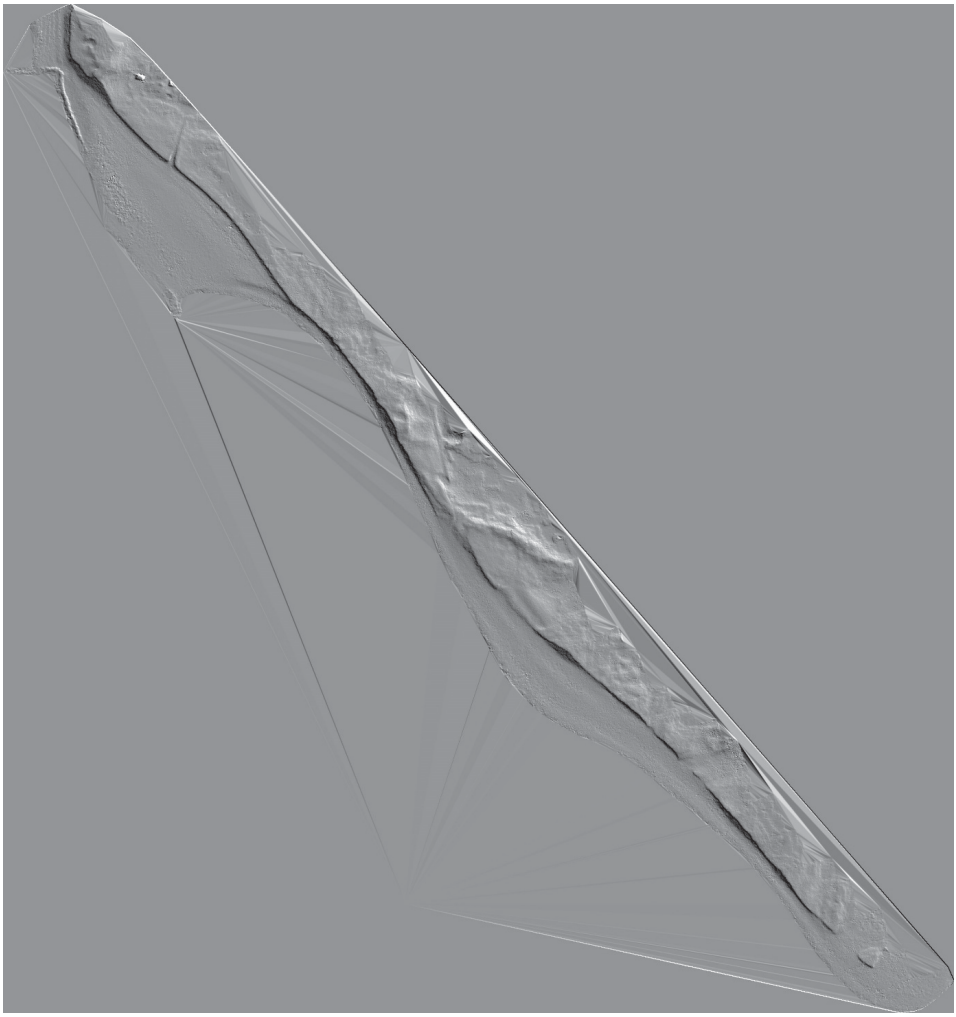

Abbildung 14: Schummerung des Gebietes Hörnum-Odde 25.01.2013.

Abbildung 15: Orthofoto des Gebietes Hörnum-Odde vom 25.01.2013.

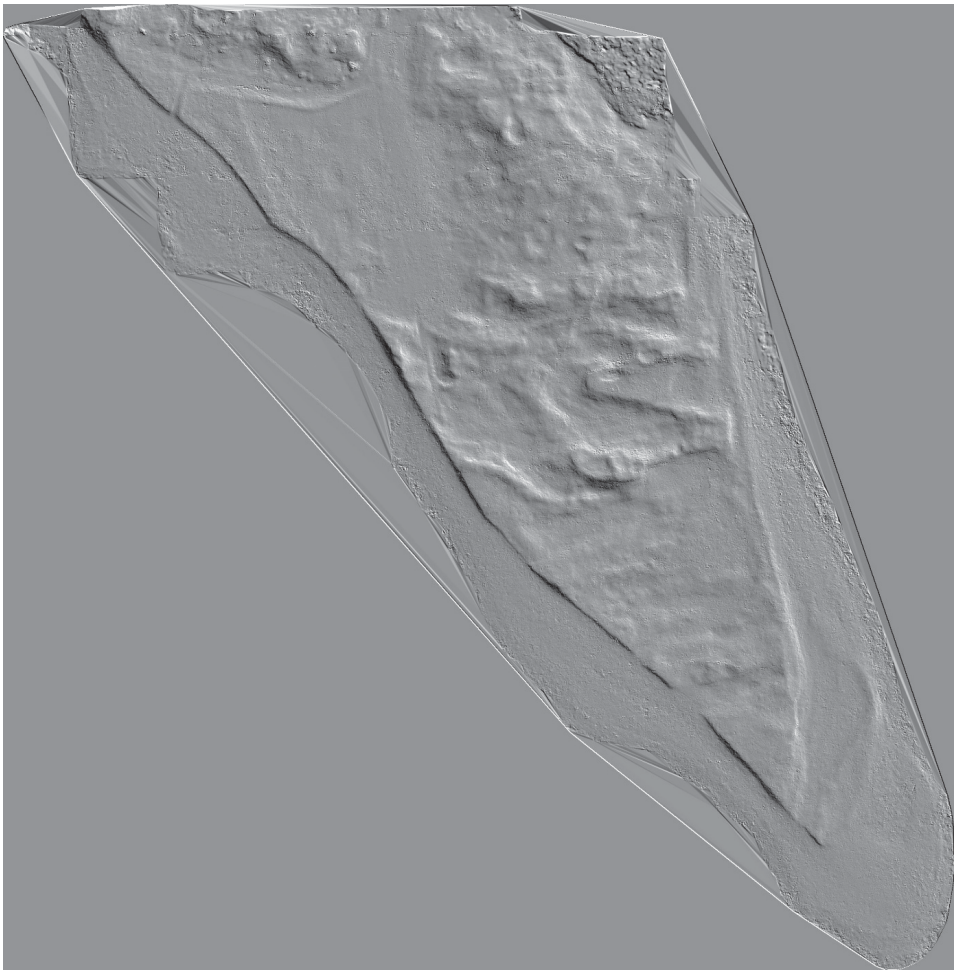

Abbildung 16: Schummerung des Gebietes Hörnum-Odde 05.03.2013.

Abbildung 17: Orthofoto der gesamten Südspitze im Gebiet Hörnum-Odde vom 03.05.2013.

Die Schummerungsdarstellungen der drei Messkampagnen sind im Vergleich zu den MLS-Daten weniger detailliert. Die wesentliche Morphologie kommt zwar zum Vorschein, jedoch haben die Strukturen einen geglätteten Charakter. Teilweise können in den Daten rechteckige Strukturen erkannt werden, welche den Ausdehnungen der Bilder entsprechen. Diese sind auf eine ungenügende Verknüpfung der Bilder zurückzuführen.

Zudem ist der Profilverlauf der aus den Bildern errechneten Punktwolken im Vergleich zu den Referenzdaten äußerst geglättet. Der Grad der Glättung ist im Strandbereich stärker als auf der Düne. Dies ist auf die unterschiedliche Texturierung in den beiden Bereichen und die damit verbundene Robustheit der Punktzuordnung im Anpassungsprozess zurückzuführen. Dadurch kann gesagt werden, dass die auffälligere Bepflanzung auf der Düne zu einer besseren Übereinstimmung mit den Referenzdaten führt.

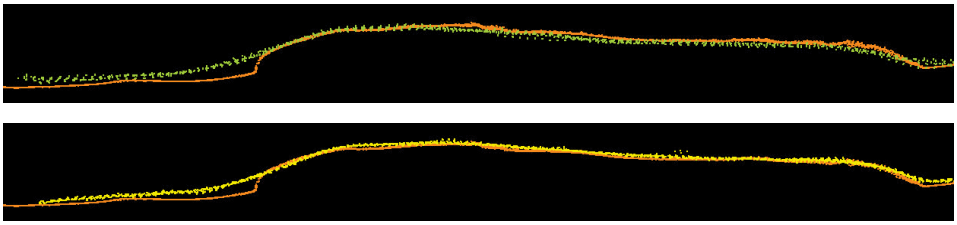

Abbildung 18: Vergleich der ALS-Daten (orange) mit den Ergebnisse der RGB-Datenauswertung (grün, gelb).

Abbildung 19: Zugehöriger Küstenabschnitt.

Fazit: Die allgemeine Zustandserfassung ist sowohl optisch durch generierte Orthophotos als auch rechnerisch durch die erzeugten MLS-Punktwolken möglich.

3.2.2 Flughöhe, -geschwindigkeit und -dauer

Die maximale Flughöhe der Drohne beträgt mit der projektzugehörigen Zuladung etwa 300 m. Im Zuge des Projektes kam die Drohne in einer maximalen Höhe von 200 m zum Einsatz. Als optimale Flughöhe ergab sich aber ein Wert von 120 m. Wird die Flughöhe niedriger angesetzt, weisen die Bilder eine zu geringe Überlappung auf. Wird mehr als 120 m gewählt, zeigen die Fotos aufgrund der größeren Entfernung zum Boden zu wenige Details, wodurch die generierte Punktwolke Einzelheiten ungenügend wieder gibt. Je nach Kamera variieren der Aufnahmebereich/-winkel und die maximale Auflösung. Damit ist die optimale Flughöhe zugleich abhängig von der gewählten Kamera. Im Zuge des LEDA-K Projektes kamen nur Kameras des Typs Casio EX-Z800 zum Einsatz.

Für eine stabile Flugbahn der Drohne wird eine relative Windgeschwindigkeit von mind. 5 km/h benötigt. Die absolute Geschwindigkeit der Drohne zur Zeit der Aufnahme beträgt im Idealfall 72 km/h (~20 m/s). Dabei versucht die Drohne mit maximal 70 % ihrer Motorleistung diese Geschwindigkeit zu erreichen, da dieses Leistungsniveau

auf Dauer den Motor schont. Zusätzlich dazu fällt die Motorleistung beim Rückflug zur Nutzspur auf 30 % zurück.

Die Flugdauer hängt stark sowohl von der Umgebungstemperatur als auch von den vorherrschenden Windverhältnissen ab. Je kälter es ist und je stärker der Wind weht, desto weniger Zeit kann die Drohne in der Luft verbleiben. Denn durch Kälte entladen sich die Akkus schneller und bei viel Wind muss der Motor mehr Leistung aufbringen, um seine absolute Geschwindigkeit bei zu behalten. Beide Einwirkungen erhöhen den Stromverbrauch eines Akkus erheblich. Zusätzlich darf die Drohne nur bis zu einer maximalen Windgeschwindigkeit von 30 km/h betrieben werden. Im Laufe des Testprojektes wurde das Fluggerät zudem so angepasst, dass es 2 Akkus tragen kann und somit die Zuverlässigkeit und Dauer eines Fluges erhöht wurde. Mithilfe der zwei Akkus wurde eine Flugzeit von bis zu 40 min ermöglicht.

Fazit: Die optimale Flughöhe beträgt 80–120 m bei Fluggeschwindigkeiten von 50–70 km/h. Die maximale Windgeschwindigkeit darf dabei 30 km/h nicht überschreiten und die dabei erzielten Flugzeiten im Winterbetrieb liegen zwischen 20 und 35 Minuten in Abhängigkeit der verwendeten Akkus und Witterungsverhältnisse.

3.2.3 Tatsächliche Windanfälligkeit (nach Sturmflut)

Beobachtungen der Pegelstände und Windgeschwindigkeiten zeigten, dass 24 Stunden nach einer Sturmflut der Wind soweit abgeschwächt ist, dass die LEDA-K Drohne sicher zum Einsatz kommen kann. Die beiden folgenden Abbildungen zeigen, dass die Windgeschwindigkeit innerhalb von einem Tag bereits wieder Durchschnittswerte erreicht hat. Zudem erreichen die Windgeschwindigkeiten ihren Spitzenwert bereits bevor der Wasserstand seinen Höchststand erreicht. Das hat zur Folge, dass nach dem Wasserhöchststand durch eine Sturmflut die Windgeschwindigkeit bereits soweit abgeschwächt ist, dass eine Drohnenbefliegung einen Tag nach einer Sturmflut gefahrlos möglich ist.

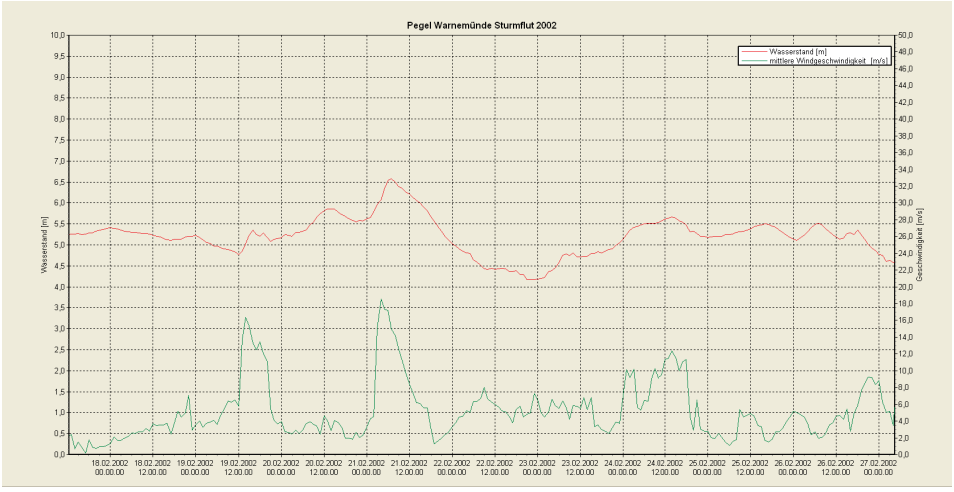

Abbildung 20: Wasserstandsverlauf und Windgeschwindigkeiten während der Sturmflut 2002 am Pegel Warnemünde.

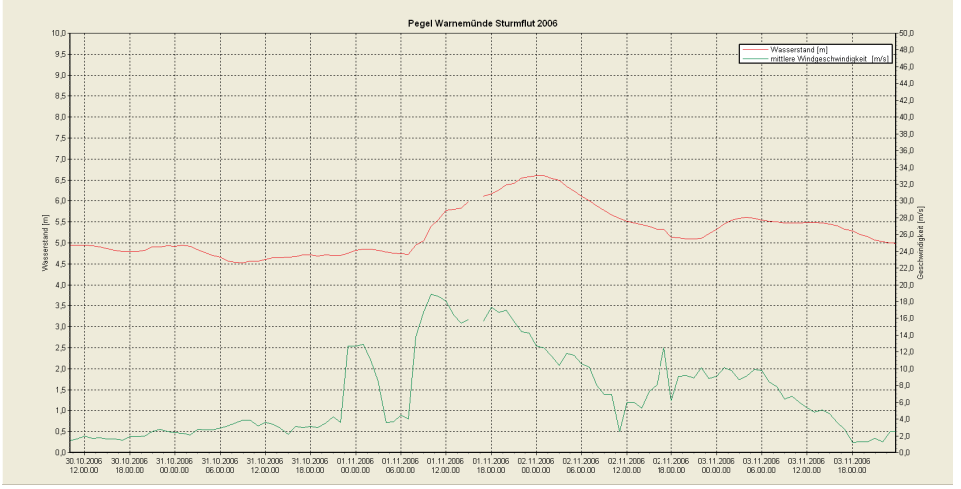

Abbildung 21: Wasserstandsverlauf und Windgeschwindigkeiten während der Sturmflut 2006 am Pegel Warnemünde.

Fazit: Der Einsatz der Drohne direkt nach Sturmfluten ist bis Windstärke 4 problemlos möglich.

3.2.4 Kombination der UAV-Daten mit MLS und DGM

Die durch MLS-Messungen und durch Drohnenbefliegung erzeugten Punktwolken können in gleiche Datenformate ausgegeben werden. Damit ist sowohl ein Vergleich als auch ein Zusammenführen der verschiedenen Datensätze möglich. So können bei MLS-Messungen auftretende Abschattungsbereiche durch Daten der LEDA-K Drohne aufgefüllt werden. Dabei ist zu beachten, dass die aus digitalen Bildern heraus generierte Punktwolke die Erdoberfläche als DSM und nicht als DTM abbildet. Bei normaler bis dichter Begrünung der Flora können durch die Software an diesen Stellen keine Bodenpunkte berechnet werden.

Eine weitere Möglichkeit der Kombination beider Messungen ist die Erstellung eines texturierten DGMs. Dabei werden die Bildinformationen der Drohne auf das Oberflächenmodell projiziert. Dies ermöglicht Echtfarbenansichten und -animationen eines aufgenommenen Geländes für Präsentationen und Kameraflüge.

Fazit: Die Kombination von UAV, MLS- und DGM-Daten ist möglich und sinnvoll, da die Verschneidung dieser Daten zu einem deutlichen Erkenntniszuwachs führt.

3.2.5 Zustandserfassung/Abbruchraten nach Sturmfluten im Strand- und Dünenbereich/Beitrag zu Volumen- und Massenberechnungen nach Sturmfluten/Monitoring im Steilküstenbereich bzw. Dokumentation

Die Zustandserfassung nach Sturmfluten ist prinzipiell möglich. Jedoch müssen Passpunkte über das gesamte Aufnahmegebiet verteilt sein, damit eine genaue Georeferenzierung ermöglicht wird.

Im Gebiet Wustrow-Dierhagen konnte eine günstige Passpunktverteilung erreicht werden. Dies lag einerseits an der Bebauung hinter dem Deich. Andererseits befinden sich im Wasser Buhnen, welche in den ALS-Daten gut lokalisiert und entsprechende Koordinaten abgeleitet werden konnten.

Abbildung 22: Passpunktverteilung im Bereich Wustrow-Dierhagen.

Ein Vergleich mit einem Referenzbild zeigt im überwiegenden Teil eine hohe Übereinstimmung. In den Randbereichen, in denen schon die Zusammensetzung der Einzelbilder nicht überzeugend war, ist folglich auch eine Abweichung zum Referenzbild zu erkennen.

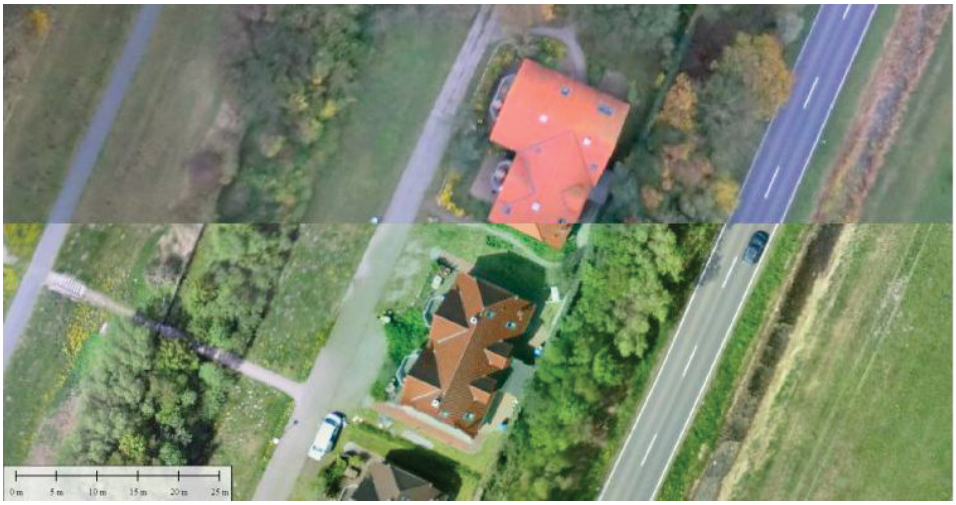

Abbildung 23: Vergleich des erzeugten zum Referenzbild im mittleren Bereich.

Abbildung 24: Vergleich des erzeugten zum Referenzbild im südlichen Randbereich.

Im Gebiet Hörnum-Odde dagegen war die Passpunktverteilung nicht optimal. Geeignete Punkte traten vermehrt im nördlichen Bereich auf. Im Süden konnten Passpunkte lediglich in einem Areal um den Leuchtturm gefunden werden. Eine Folge davon ist, dass die Übereinstimmung der Punktwolken im nördlichen Bereich größer ist als im Süden.

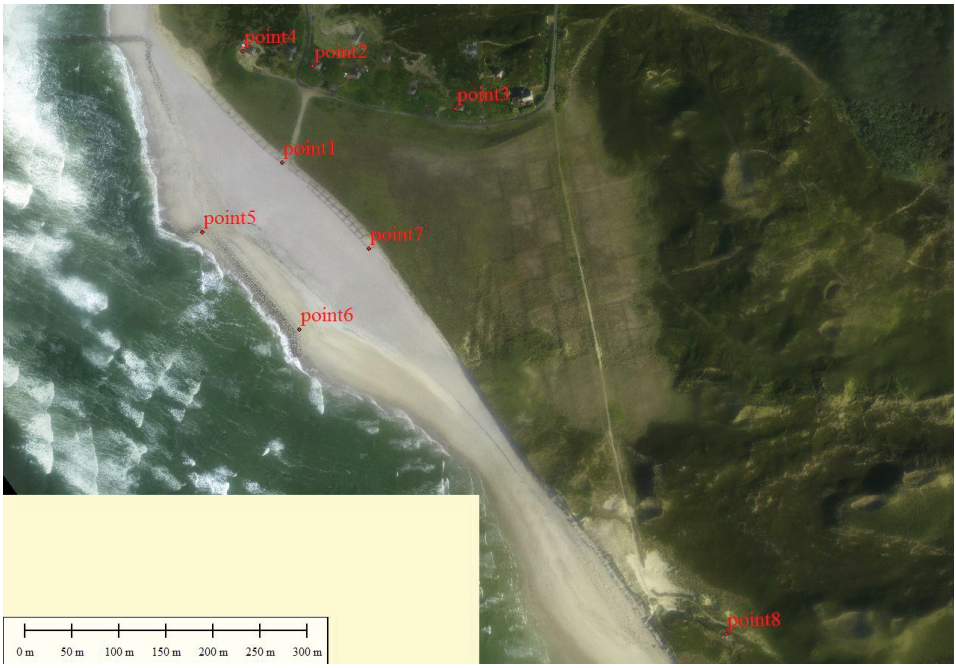

Abbildung 25: Passpunktverteilung im Gebiet Hörnum-Odde.

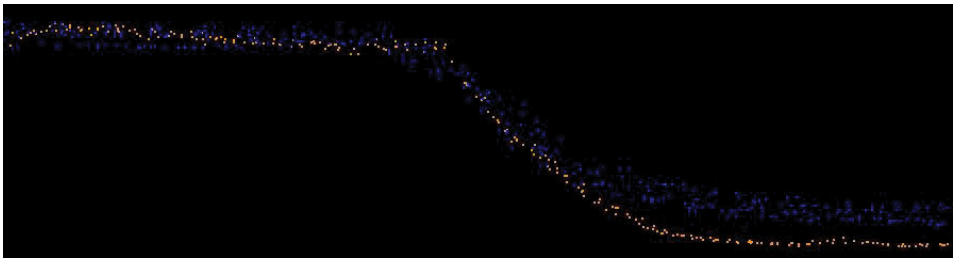

Abbildung 26: Profil im nördlichen Gebiet Hörnum-Odde ALS (orange) vs. DHM 06.11.2012 (blau).

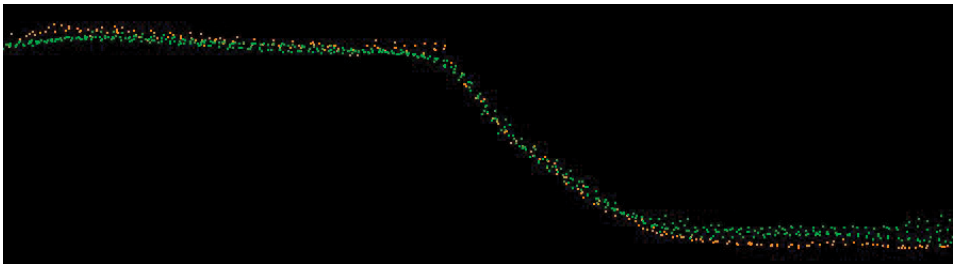

Abbildung 27: Profil im nördlichen Gebiet Hörnum-Odde ALS (orange) vs. DHM 25.01.2013 (grün).

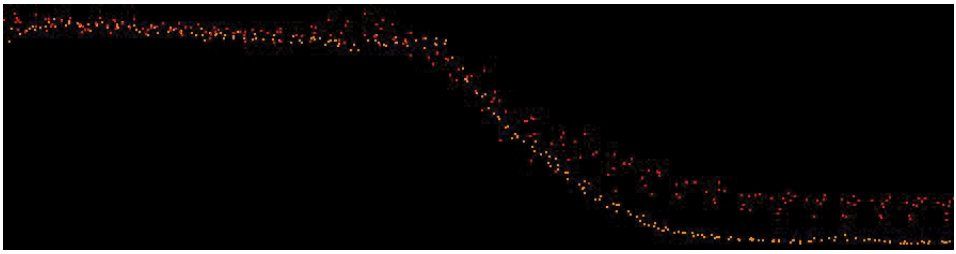

Abbildung 28: Profil im nördlichen Gebiet Hörnum-Odde ALS (orange) vs. DHM 05.03.2013 (rot).

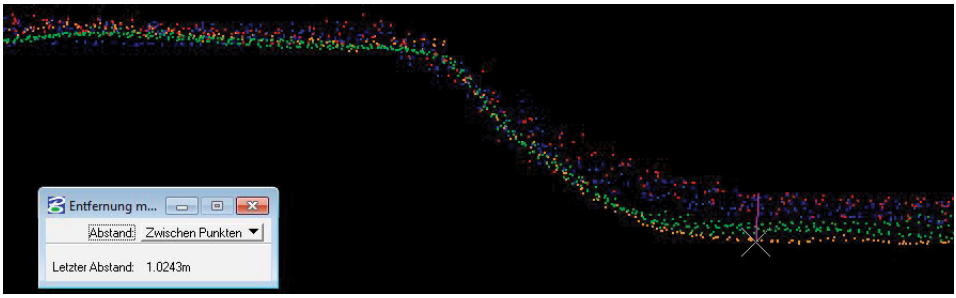

Abbildung 29: Vergleich aller drei DHMs zum ALS-Datensatz mit maximaler Abweichung von 1 m.

Im Gegensatz dazu treten im südlichen Bereich von Hörnum-Odde extreme Höhenunterschiede auf. Die maximalen Abweichungen betragen bis zu 12 m. Die ist höchstwahrscheinlich auf die Passpunktverteilung zurückzuführen. Der südlichste Passpunkt befindet sich ca. in der Mitte des Untersuchungsgebietes. Je weiter südlich man von diesem Passpunkt die Profile vergleicht, desto größer werden die Abweichungen.

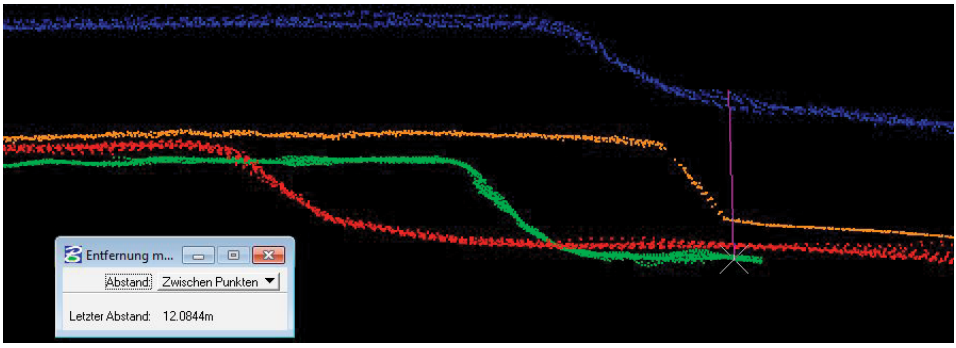

Abbildung 30: Vergleich aller Digitalen Höhenmodelle

Ohne eine genaue Georeferenzierung über geeignete Passpunkte, ist eine zuverlässige Ermittlung von Differenzen zwischen zwei Aufnahmen nicht möglich und damit auch keine zuverlässige Massen- oder Volumenberechnung. Differenzen würden schon allein durch Lageungenauigkeiten zwischen zwei Modellen entstehen. Passpunkte sollten daher möglichst am Rand des Untersuchungsgebietes verteilt sein, um eine stabile Geometrie zu erhalten. Außerdem sollten sie sich auf befestigten Oberflächen befinden und gut

erkennbar sein. Das Auffinden geeigneter Passpunkte ist gerade im Strandbereich schwierig, da es hier kaum befestigte und gut signalisierte Punkte gibt. Abhilfe schafft hier das Anlegen von eigenen Passpunkten vor Ort in Form von Holz- oder Stoffkreuzen, die temporär im lockeren Boden befestigt werden oder durch das Aufbringen von temporären Farbkreuzen auf befestigten Flächen (Straßen, Wege). Dadurch kann die Verteilung der Passpunkte gezielt gesteuert werden. Durch das Anbringen und das Einmessen der Passpunkte vor Ort entsteht allerdings ein zusätzlicher zeitlicher und personeller Aufwand.

Fazit: Abbruchraten, Volumen- und Massenberechnungen sind theoretisch möglich und wurden auch exemplarisch durchgeführt, wobei der tatsächliche Aufwand für belastbare Aussagen mit hoher Genauigkeit mit den verwendeten Verfahren und Softwarepaketen zu hoch ist. Hier besteht zukünftiger Forschungs- und Entwicklungsbedarf.

3.2.6 Nutzbarkeit als Grundlage für Digitale Geländemodellierung

Die aus Drohnendaten generierten Punktwolken können u. U. als Grundlage für digitale Geländemodelle genutzt werden. Dafür müssen jedoch mindestens die folgenden Punkte erfüllt sein.

- Passpunkte müssen gut verteilt, genau bestimmt und auf den Bildern scharf zu erkennen sein.
- Die Kameras müssen stabilisiert und kalibriert sein.
- Die aufgenommenen Bilder müssen scharf sein und ausreichend kontrastreiche Textur aufweisen.

Doch selbst wenn alle eben aufgezählten Punkte beachtet werden, sind ALS- oder MLS-Daten von der Genauigkeit und Aussagekräftigkeit her immer noch den aus Bilddaten heraus erzeugten DGMs vorzuziehen. Zudem gestaltet sich die Ableitung eines DGMs aus den Bilddaten heraus schwierig. Denn die Punkte werden anhand aller Bildinformationen generiert und bilden somit das DSM des Aufnahmegebietes ab. Die Ableitung eines DGMs ist daher nur möglich, wenn auf den Bildern ausreichend Boden abgebildet wird. Dies setzt voraus, dass die Vegetation nicht zu dicht ist. Zur Generierung eines durchgängigen DGMs stellt ALS bisweilen das am geeignetste Verfahren dar.

Fazit: Die Nutzung von UAV-Daten (Orthophotos) für Digitale Geländemodelle ist unter Einhaltung verschiedener Voraussetzungen theoretisch möglich, aber in punkto Genauigkeit und Aufwand derzeit nicht effektiv anwendbar (Stand 2014).

3.2.7 Rückschlüsse auf Vegetation des Deiches, Strandhaferzustand/ -dichte in den Dünen

Durch die Ausstattung der Drohne mit einer Infrarotkamera können die Aufnahmen dazu verwendet werden, Rückschlüsse auf die Gesundheit von Pflanzen zu ziehen. Mithilfe der Rot- und der Infrarotanteile eines jeden Bildpixels, können über den sog. NDVI (normalisierten Vegetationsindex) Rückschlüsse auf die Vegetationsbedeckung gezogen werden. Bei der Ableitung von 3D-Punkten aus digitalen RGB-Bildern, sind Punkte, die zur Vegetation und Punkte, die zum Relief gehören, schwer voneinander zu unterscheiden.

Aussagen über die Vegetation des Deiches und Strandhaferdichte können nur optisch anhand eines generierten Orthophotos und durch den NDVI getroffen werden.

Im Forschungsprojekt kam eine normale RGB-Kamera mit einem NIR-Filter zum Einsatz, deren Bilder befriedigende Ergebnisse bei der Vegetationsauswertung lieferten. Grünland- und Waldflächen sind mit den bekannten Algorithmen sicher auswertbar, für Fragen des Küstenschutzes und hier insbesondere zum Zustand des Strandhafers auf den Dünen und der Grasnarbe auf den Deichen waren die erzeugten Bilder nicht verwertbar. Durch den frühen Totalverlust der Kamera nach einem UAV-Absturz wurden die Arbeiten zu dieser Thematik nicht fortgesetzt, da keine befriedigenden Ergebnisse zu erwarten waren. Sollte diese Fragestellung im Küstenschutz zukünftig doch mehr in den Mittelpunkt gestellt werden müssen, ist hier ein weiterer Forschungs- und Entwicklungsbedarf nötig.

Fazit: Orthophotos lassen über manuelle Auswertung eine rein optische Betrachtung des Vegetationszustandes zu. Automatische Verfahren mit NIR-Filter-Einsatz haben zu keinem verwertbaren Ergebnis geführt.

3.2.8 Stereoaufnahmen

Durch das Mitführen von zwei Kameras gleichzeitig an der Drohne war es möglich, zeitgleich zwei Bilder von jeder Position aufzunehmen. Eine stereoskopische Auswertung anhand von Bildpaaren konnte durch dieses Vorgehen allerdings nicht durchgeführt werden, da der Abstand zwischen den Kameras (ca. 0,5 m) als stereoskopische Basis nicht ausreicht. Für eine gute Höhenbestimmung mittels Stereoskopie wird eine breite Basis der Bildpaare benötigt. Eine Basis von 0,5 m stellt eine unzureichende Länge für eine aussagekräftige Höhenbestimmung dar.

Da bei einer manuellen stereoskopischen Verarbeitungsmethode die Probleme (Bildqualität, Kameraabstand) überwiegen, war eine detailliertere Untersuchung in dem kurzen Projektzeitraum nicht realisierbar. Allerdings ist eine stereoskopische Auswertung von benachbarten Bildern bereits in Verarbeitungsalgorithmen von Softwareprodukten enthalten und läuft automatisch ab. Dadurch erscheint eine manuelle stereoskopische Auswertung zudem als unwirtschaftlich.

Fazit: Eine stereoskopische Auswertung der Luftbilder führte mit den bestehenden Aufnahmetechniken und Softwarepaketen trotz mehrfachen Modifikationen nicht zu verwertbaren Ergebnissen.

3.2.9 Kombination MLS und Drohne während der Aufnahme

Die parallele Durchführung von Drohnenbefliegungen und MLS-Messungen ist logistisch möglich. Dabei entstehen allerdings zusätzliche Kosten, da sowohl für den Betrieb der Drohne als auch des MLS-Systems jeweils zwei Mitarbeiter benötigt werden. Aufgrund dessen müssen vier anstatt zwei Mitarbeiter vor Ort sein.

Die Idee, die Drohne vom Fahrzeug aus parallel zur MLS-Aufnahme zu bedienen, ist nicht realisierbar und scheitert aus einer Vielzahl von Gründen und Problemen (u. a. gesetzliche Bestimmungen, unterschiedliche Geschwindigkeiten, Flugplanungssoftware, Sicherheitsbestimmungen, Streifenproblematik).

Fazit: Eine Steuerung der Drohne vom MLS-Fahrzeug ist nicht möglich.

3.2.10 Wintereinsatz der Drohne

Der Einsatz der Drohne bei Temperaturen unter 0 °C ist prinzipiell möglich. Jedoch hat die Umgebungstemperatur einen Einfluss auf die Dauer des Fluges, da sich die Akkus bei Kälte schneller entladen. Die Verwendung von Isoliermaterial hat hier Verbesserungen erwirkt. Auch das Mitführen von 2 Akkus hat die Zuverlässigkeit und Dauer eines Fluges erhöht.

Bei leichter Schneebedeckung weist das Aufnahmegebiet eine auffälligere Texturierung auf. Matching-Algorithmen liefern hier bessere Ergebnisse da Muster robuster zu erkennen und Zuordnungen in benachbarten Bildern eindeutiger sind. Allerdings ist eine 3D-Punktgenerierung bei vollständiger Schneebedeckung nicht möglich.

Fazit: Der Einsatz der Drohne im Winter ist mit Einschränkungen möglich, solange keine vollständige Schneebedeckung vorliegt.

3.2.11 Gesetzliche Bestimmungen (u. a. Datenschutz)

Rechtliche Vorgaben und die Einstufung von Drohnen finden sich im Luftverkehrsgesetz (LuftVG) und in der Luftverkehrsverordnung (LuftVO) der Bundesrepublik Deutschland. Laut § 1 Absatz 2 Nummer 3 des LuftVG „gelten unbemannte Fluggeräte einschließlich ihrer Kontrollstation, die nicht zu Zwecken des Sports oder der Freizeitgestaltung betrieben werden (unbemannte Luftfahrsysteme)“, als Luftfahrzeug. Zusätzlich dazu können UAV‘s auch zur Gruppe der Flugmodelle gezählt werden, die ebenfalls als Luftfahrzeuge einzustufen sind [LuftVG 2013 § 1 (2) Nr. 9]. Der Betrieb von Drohnen ist nur verboten, „wenn er außerhalb der Sichtweite des Steuerers erfolgt oder die Gesamtmasse des Geräts mehr als 25 Kilogramm beträgt“ [LuftVO § 19a (3)]. Daher müssen UAV‘s auf Sicht gesteuert werden, damit der Benutzer die Kontrolle behält und in einem Notfall manuell eingreifen kann. Ein völlig autonomer Flug eines UAV‘s ist nur mit Ausnahmeregelungen möglich. Grundvoraussetzung dafür ist allerdings, dass weder die Sicherheit des Luftverkehrs gefährdet ist, noch Gefahr für die öffentliche Ordnung besteht [LuftVO § 15a (2)].

Ein weiterer Punkt ist die Notwendigkeit einer Erlaubnis zur Nutzung des Luftraumes. Zwar dürfen Flugmodelle mit weniger als 5 kg Gesamtmasse, elektrischem Antrieb und mehr als 1,5 km Entfernung zu einem Flugplatz, ohne Erlaubnis betrieben werden [LuftVO § 20 (1) Nummer 1]. Doch wird in § 16 Absatz 1 Nummer 7 LuftVO festgelegt, dass der „Aufstieg von unbemannten Luftfahrtsystemen“ einer Erlaubnis bedarf. Eine Erlaubnis ist bei der örtlich zuständigen Behörde des entsprechenden Bundeslandes, in dem der Flug stattfinden soll, einzuholen [LuftVO § 20 (3)].

Fazit: Die verwendete MLS-Technik sowie die Drohnen (UAV) entsprachen zum Zeitpunkt der Untersuchungen und dem Verfassen dieses Beitrages den gesetzlichen Vorgaben und Regelungen, wobei bei der Datenerfassung und -verarbeitung die Datenschutzbestimmungen des jeweiligen (Bundes-)Landes zu beachten sind. Gegenwärtig sind aber Veränderungen und Konkretisierungen zu den Vorschriften des Einsatzes von UAV und ggf. sogar neue gesetzliche Bestimmungen in Vorbereitung und Diskussion.

4 Einsatz von Multikoptern

4.1 Untersuchungsschwerpunkte und Einsatzmöglichkeiten von Multikoptern

Flugzeuggetragene klassische und digitale Luftbildsysteme sind bei kleineren Gebieten (Einzelobjekte bis einige 100 ha) sehr teuer und durch die große Wetterabhängigkeit nicht flexibel genug. Oft ist gerade eine hohe Zeitnähe sehr wichtig, z. B. zur Ermittlung von Momentanzuständen, u. a. nach Sturmfluten, Starkregenereignissen, Überschwemmungen und anderen Katastrophen sowie menschlichen Tätigkeiten im Gebiet.

Eine preiswerte und flexible Alternative dazu sind autonome, unbemannte Flugobjekte (UAV), die in niedrigen Höhen und unter den Wolken operieren können und damit bis auf den Wind weitgehend wetterunabhängig sind. Ein wesentlicher Schritt hin zu verwertbaren Lösungen unbemannter Fluggeräte ist die Entwicklung von miniaturisierten autonomen Steuerungen, die per GNSS und inertialer Messtechnik (Inertial Navigation System INS) auch eine selbständige Flugführung ermöglichen. Über programmierbare Autopiloten können so systematische und koordinatenbezogene Aufnahmen gemacht werden. Bei nur vom Boden aus gesteuerten Modellflugzeugen hingegen erfolgt die Auslösung nicht nach vorgegebenen Positionen sondern in bestimmten Zeitintervallen.

Jedoch ist der spezielle Aufwand, ein UAV für fernerkundliche bzw. photogrammetrische Zwecke einzusetzen recht groß, da es an die jeweilige Fragestellung angepasster, hardwareseitiger Tests und Entwicklungen bedarf bzw. methodische Untersuchungen fehlen, um geeignete Lösungen zu finden.

Erst die Kombination von digitaler Photogrammetrie und dem Airborne-Laserscanning in Verbindung mit unbemannten Flugkörpern bringt die notwendige Genauigkeit, Schnelligkeit und Informationsvielfalt für ein technologisch motiviertes Vermessen in diversen Bereichen wie z. B. dem Umweltmonitoring, dem Küsten- und Katastrophenschutz sowie darüber hinaus für viele weitere Anwendungen in Industrie und Wirtschaft.

Ein Hauptschwerpunkt des Forschungsprojektes LEDA-K2: „Laserscanaufnahmen durch Einsatz von Drohnen (UAV) zur Aufnahme von Küstengebieten und Entwicklung von teilautomatisierten Softwareverfahren bei der Luftbildauswertung aus UAV-Befliegungen“ war die Neuentwicklung eines Multikopters mit einem Kleinstlasersystem für Airborne Laservermessungen (ALS) in Küstengebieten.

Das geplante ALS-Drohnensystem sollte dabei aus den gleichen Komponenten wie ein herkömmliches ALS-System bestehen. Dazu zählen ein Miniaturlaserscanner, Positionierungssystem (GNSS-Antenne), IMU, Recheneinheit inklusive Datenaufzeichnung und der Drohne als Trägerplattform selbst. In dem Projekt sollte zunächst die Kopplung der einzelnen Baugruppen hergestellt, sowie, wenn möglich, mehrere verschiedene Komponenten getestet werden. Weiter galt es, die Kommunikation der einzelnen Elemente untereinander zu ermöglichen und eine geeignete Recheneinheit für diese Aufgabe zu finden. Diese sollte sowohl als Verbindungsstelle als auch zur Datenaufzeichnung dienen. Auch die zeitliche Synchronisation der aufgezeichneten Messwerte (Positionsdaten, Orientierungs- und Bewegungsdaten, Distanzmessungen) musste mithilfe der Recheneinheit gelöst werden. Weiterhin sollten die aus den einzelnen Flugrouten erhaltenen gescannten Spuren durch geeignete Anpassungsalgorithmen miteinander verknüpft werden.

Als Einsatzmöglichkeiten von ALS mit Drohnen im Küstenschutz wurden insbesondere folgende Aufgaben gesehen:

- Kontroll- und Deformationsmessungen von Bauwerken
- Vermessung für Archäologie und Baudenkmalpflege
- Erfassung von Hafen- und Industrieanlagen
- Erfassung und Kontrolle von Ufer-, Strand- und Küstenprofilen im Rahmen eines effizienten Küstenschutzes
- Katastrophenschutz und schneller Einsatz bei Unfällen bzw. nach Unwettern
- Erstellung von Orthophotokarten
- Erstellung digitaler Geländemodelle
- Bestandseinmessungen

4.2 Bestandteile des entwickelten LEDA-K2-Multikopters

4.2.1 Flugplattform MikroKopter Basisset Hexa XL

Als Flugplattform kommt das Hexakopter-Modell Hexa XL der Firma MikroKopter zur Anwendung.

Abbildung 31: MikroKopter Basisset Hexa XL.

Wie der Name schon impliziert, erfolgt der Auftrieb der Drohne über sechs Rotoren (weitere Spezifikationen kann man der folgenden Tabelle entnehmen). Es handelt sich um ein Set zum Bau der Drohne. Der Zusammenbau und die Anbringung aller Komponenten erfolgte, genau wie bei der LEDA-K Drohne, durch die CIS GmbH Rostock.

Tabelle 1: Technische Daten MikroKopter Basisset Hexa XL.

Gewicht ohne Akku [g]	1600
Maximale Nutzlast [g]	1500
Durchmesser [mm]	730
Höhe [mm]	410
Flugzeit (mit 14,8V 6600 mAh LiPo-Akku) [min]	13–28 (variiert je nach Nutzlast)

4.2.2 GPS-Chipset UBX-G5000/G0010

Die Chipsätze UBX-G5000 und G0010 der schweizerischen Firma U-Blox sind ein Positionierungssystem und durch ihre geringe Größe und geringes Gewicht geeignet für Anwendungen wie die Positionierung von unbemannten Fluggeräten, in denen die Größe und das Gewicht eine zentrale Rolle spielen. Sie unterstützen die L1-Frequenzen mit dem C/A-Code der GPS- und auch die L1-Frequenzen der zukünftigen Galileo-Satelliten.

Tabelle 2: Technische Daten UBX-G5000/G0010.

Maximale Updaterate [Hz]	< 4 ROM / 2 Flash
Genauigkeit [m]	2,5
Maximale Geschwindigkeit [m/s]	500
Maximale Einsatzhöhe [m]	5000
Messbedingungen [°C]	-40 ~ +85
Abmessungen [mm]	UBX-G5000: 9 x 9 x 0.91 UBX-G0010: 4 x 4 x 0.85

Durch die hohe Unempfindlichkeit gegenüber Störungen erfolgt eine Positionierung auch bei schwierigen Satelliten-Sichtverhältnissen, wie bspw. in Häuserschluchten, und in Gebieten mit schwacher Signalabdeckung.

4.2.3 Autopilot-Einheit Krooz inklusive IMU-Sensor MPU-6000/6050

Bei dem Autopiloten Board „Krooz" handelt es sich um ein Board, welches speziell für die Steuerung von Fluggeräten entworfen wurde. Das Board kann mit verschiedensten Sensoren, Modulen und Einheiten bestückt werden und ist durch seine geringe Größe ideal für UAV-Systeme.

Unter anderem wurde das Krooz-Board mit einem MPU-6000/6050-Modul ausgestattet, welcher zur Gewinnung der Orientierungsdaten dient. Das Modul enthält eine mikroelektro-mechanische IMU und einen 3-Achsen Beschleunigungssensor, die auf ein und demselben Siliziumchip montiert sind. Zusätzlich befindet sich noch ein digitaler Bewegungsprozessor an Bord.

4.2.4 Recheneinheit PandaBoard ES

Das PandaBoard ES ist die Plattform für die LEDA-K2 Drohne, in der alle Komponenten zusammenlaufen. Das Board besitzt einen leistungsstarken Dual-Core Prozessor mit 1,2 GHz pro Kern. Als Arbeitsspeicher stehen 1 GB DDR 2 RAM zur Verfügung. Des Weiteren besitzt das Board neben insgesamt 2 USB-Schnittstellen auch einen SD/MMC-Card-Leser, der auch Karten mit hohen Geschwindigkeiten und hoher Speicherkapazität beschreiben kann. Eine SD-Karte dient im LEDA-K2 Projekt als Speichermedium für die gewonnenen Daten und Messwerte sowie für das Betriebssystem und die benötigte Software. Weiterhin besitzt das Board ein WLAN-Modul.

4.2.5 Wahl des Laserscanners

Aufgrund der möglichen geringen Zuladung des Hexakopters, ergab sich nur eine kleine Anzahl infrage kommender Kompaktscanner. Zudem sollte der Scanner eine entsprechend hohe Scanrate und Einzelpunktmessgenauigkeit bieten. In der näheren Auswahl wurden folgende Scanner betrachtet:

Tabelle 3: Technische Spezifikationen der untersuchten Scanner.

Parameter	Hokuyo UTM-30LX	Sick LD-MRS	Riegl VUX-1
Reichweite [m]	30	250	150
Genauigkeit [mm]	50	100	10
Scannrate [Hz]	43.200	50	500.000
Öffnungswinkel [°]	270	85	330
Abmessungen [mm]	60x60x85	94x165x88	227x180x125
Gewicht [g]	370	1000	3.600

Das Gerät der Firma Riegl verspricht die beste Scanleistung, sodass hier die besten Ergebnisse zu erwarten waren. Ein UAV, welches eine Masse von 3,6 kg tragen kann, hat jedoch ein Gesamtabfluggewicht, welches deutlich über 5 kg liegt. Da in Deutschland bei Geräten von unter 5 kg nur eine allgemeine Aufstiegsgenehmigung für den Betrieb benötigt wird, wurde entschieden, dass nur solche Systeme für das Projekt in Frage kommen. Somit wurde die Verwendung des Riegl VUX-1 beim LEDA-K2 Projekt ausgeschlossen.

Das Gewicht von ca. 1 kg des LD-MRS von Sick ist im Bereich der Nutzlast von auf dem Markt verfügbaren Drohnen, welche eine Maximum Takeoffweight (MTOW) von unter 5kg haben. Hier jedoch wurden die Scanleistungen für nicht ausreichend befunden. Zum einen können mit 50 Hz nur mit hohem zeitlichem Aufwand Produkte erstellt werden, die wie im herkömmlichen ALS Punktdichten von 10–20 Punkten/m² liefern. Zum anderen liegt die Genauigkeit mit 100 mm außerhalb der gewünschten Parameter. Das Gesamtsystem soll eine absolute Punktgenauigkeit von 10–20 cm aufweisen. Bei einer Genauigkeit von 10 cm des Laserscanners bleibt demnach zu wenig Spielraum für die Komponenten GNSS und IMU.

Somit fiel letztendlich die Wahl auf den UTM-30LX von Hokuyo. Die Parameter Gewicht und Abmessungen erlauben den Einsatz auf einem Multikopter mit einem MTOW von 5 kg. Die Scanrate und Genauigkeit sind ausreichend um Punktwolken entsprechend den Daten aus ALS-Befliegungen zu erzeugen. Lediglich die Reichweite von 30 m muss als einschränkender Faktor bewertet werden. Somit sind nur Flughöhen von ca. 25 m realistisch. Flächenhafte Erfassungen benötigen somit erhöhten Aufwand.

Für das gestellte Anwendungsfeld des LEDA-K2-Projektes, Profile entlang der Küste zu erfassen, ist dies jedoch ausreichend.

Abbildung 32: Kompaktlaserscanner Hokuyo UTM-30LX.

Die hinsichtlich des Projekts wichtigsten Daten des Laserscanners von Hokuyo sind in der folgenden Tabelle aufgelistet.

Tabelle 4: Technische Spezifikationen Hokuyo UTM-30LX.

Reichweite [m]	garantiert: 0,1 – 30 maximal: 0,1 – 60
Genauigkeit [mm]	Bei 3000 lx: auf weißem Papier ± 30 Bei 100000 lx: auf weißem Papier ± 50
Auflösung und Wiederholgenauigkeit [mm]	1 mm Bei 3000 lx: σ =10 (weißes Papier bis zu 10 m) Bei 100000 lx : σ = 30 (weißes Papier bis zu 10 m)
Aufnahmewinkel [°]	270
Abtastungen pro Zeile	1080
Winkelauflösung [°]	0,25 (270°/1080 Abtastungen)
Scangeschwindigkeit [Hz]	40 (= 25 Millisekunden)
Gewicht [g]	210 (inklusive Kabel: 370)
Abmessungen [mm]	60 x 60 x 85
Messbedingungen [°C]	-10 ~ +50 weniger als 85% relative Luftfeuchte
Erhaltungstemperatur [°C]	-25 ~ +75
Energieverbrauch [Watt]	weniger als 8

4.2.6 Aufbau der Komponenten

Das Anbringen aller Komponenten an dem Hexakopter erfolgte durch die CIS GmbH in Rostock. Die folgende Abbildung zeigt die Drohne mit allen verbauten Komponenten. Der Laserscanner wurde horizontal an der Unterseite der Drohne befestigt mit Nullrichtung zum Boden.

Das Krooz-Board samt IMU-Sensor befindet sich unter der Abdeckung der Drohne auf Höhe der Rotorstreben. Unter dem Krooz-Board sind der Akku und darunter das PandaBoard platziert. Eine der sechs Rotorstreben ist rot und zeigt die Vorwärtsflugrichtung der Drohne an. Die GNSS-Antenne befindet sich auf einem vertikal angebrachten Rohr, welches am Anfang der roten Rotorstrebe befestigt ist. Um eine Höhere Nutzlast realisieren zu können, wurden, anstelle der Verwendung eines Oktokopters, leistungsstärkere Motoren statt der Standardmotoren durch die CIS GmbH verbaut. Zusätzlich zur Stabilisierung der gesamten Flugeinheit, wurde Angelschnur von Rotorstrebe zu Rotorstrebe angebracht.

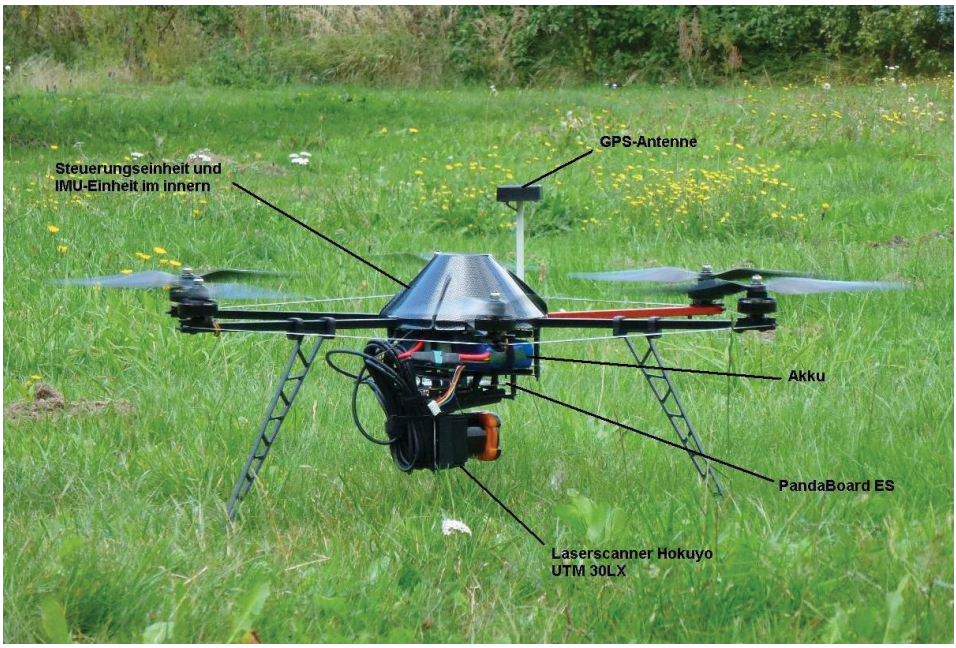

Abbildung 33: LEDA-K2 Hexakopterdrohne mit allen montierten Komponenten.

4.3 Spezifikationen des LEDA-K2-Multikopters

Mit dem fertigen Aufbau des Multikopters (siehe Punkt 4.2.6) wurden mit allen Komponenten eine Reihe von Versuchen und Messungen durchgeführt, um die tatsächliche Praxistauglichkeit des Fluggerätes zu beweisen. Die ausführlichen Tests mit Messprotokollen, Parametern und Beschreibungen zu den Eigenschaften sind im Abschlussbericht zum o. g. Projekt (Förderkennzeichen 03KIS105, Laufzeit des Projektes und Berichtszeitraum: 01.05.2013–31.01.2014), welcher dem Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Januar 2015 übergeben wurde, enthalten und können dort nachgelesen werden. Im Folgenden sind nur die Ergebnisse zu den Spezifikationen und Leistungsmerkmalen des Kopters für seine einzelnen Bestandteile aufgeführt.

Für die IMU-Einheit ist herauszustellen, dass sich die drei Orientierungswinkel innerhalb von etwa 30 Minuten jeweils einem Wert annähern. Erst nach dieser Zeit können die einzelnen Messreihen relativ zueinander passen. Nach dem Anbringen von

Korrekturwerten in Abhängigkeit von der Temperatur konnte dieses Verhalten jedoch nicht vollständig ausgeglichen werden. Die festgestellten Schwankungen bei laufenden Motoren im Stand üben einen großen Einfluss auf die Orientierungswinkel aus. Jedoch konnte nicht geklärt werden, ob der Einfluss so groß bleibt, wenn sich die Drohne mit laufenden Rotoren in der Luft befindet und nicht am Boden. Des Weiteren laufen die Rotoren im Stand nur auf einem Bruchteil ihrer Leistung. Offen geblieben ist, wie groß der tatsächliche Einfluss auf die Orientierungswinkel bei einem Flug mit entsprechender Gebrauchsleistung tatsächlich ist.

Zur Genauigkeit und Verlässlichkeit des GPS-Chipset UBX-G5000/G0010 konnte festgestellt werden, dass bei der Positionsbestimmung ein Höhenfehler von ca. 6 bis 7 m vorliegt, dessen Ursache noch nicht identifiziert werden konnte. Gemessene Scanstreifen müssen daher in der Höhe entsprechend an Referenzdaten angepasst werden. Die erhaltene absolute Lagegenauigkeit liegt mit 1,6 m in einem Bereich entsprechend der Herstellerangaben. Für eine genauere Georeferenzierung muss die Ursache für den Höhenfehler identifiziert werden, ansonsten muss der Ausgleich bzw. die Korrektur im Postprocessing erfolgen.

Untersuchungen zur Genauigkeit an dem im Projekt verwendeten Laserscanners Hokuyo UTM-30LX haben ergeben, dass die Distanzmessgenauigkeit besser ist, als vom Hersteller angegeben. Die Soll-Ist-Abweichung der vom Scanner ausgegeben Austrittswinkel der Laserstrahlen von 0,001° bewirkt auf die maximal garantierte Zielweite (30 m) nur einen minimalen Lagefehler von 0,5 mm.

Beim Zusammenspiel der einzelnen Komponenten konnte zunächst festgestellt werden, dass eine individuelle Anpassung des Yaw-Winkel für jeden Streifen im Laufe der Punktberechnung notwendig ist. Insgesamt lässt sich jedoch sagen, dass die IMU- und die GNSS-Einheit die Schwachstelle der Kopter-Konstruktion darstellen. Schnelle und starke Veränderungen in den Orientierungswinkeln und/oder der dreidimensionalen Lage werden nicht mit der nötigen Aktualisierungsrate durch die Sensoren erfasst und Oberflächen werden dadurch ca. 2- bis 6-mal schlechter abgebildet. Bisweilen müssen mehrere zusammengehörende Spuren im Nachhinein noch automatisch bzw. manuell zueinander in der Lage und Orientierung angepasst werden. Diese Anpassung erfolgt ähnlich der des MLS (Kap. 2.2.3) mit firmeneigener Software. Die erzeugten Punktwolken des Scansystems zeigen die folgenden Abbildungen:

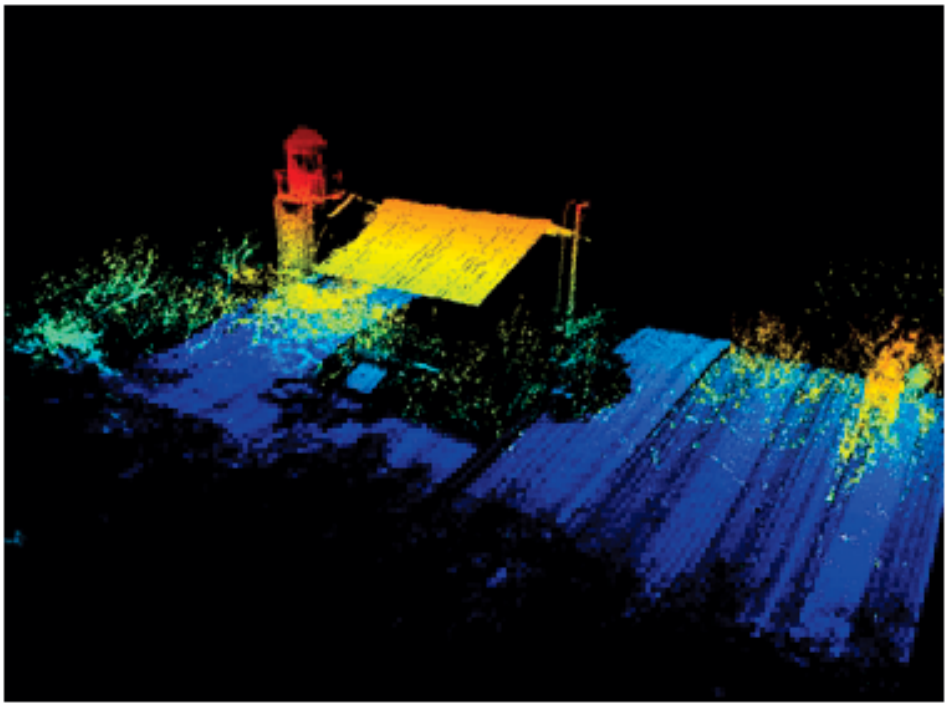

Abbildung 34: Punktwolke einer Spur des Laserscanners Hokuyo UTM 30LX.

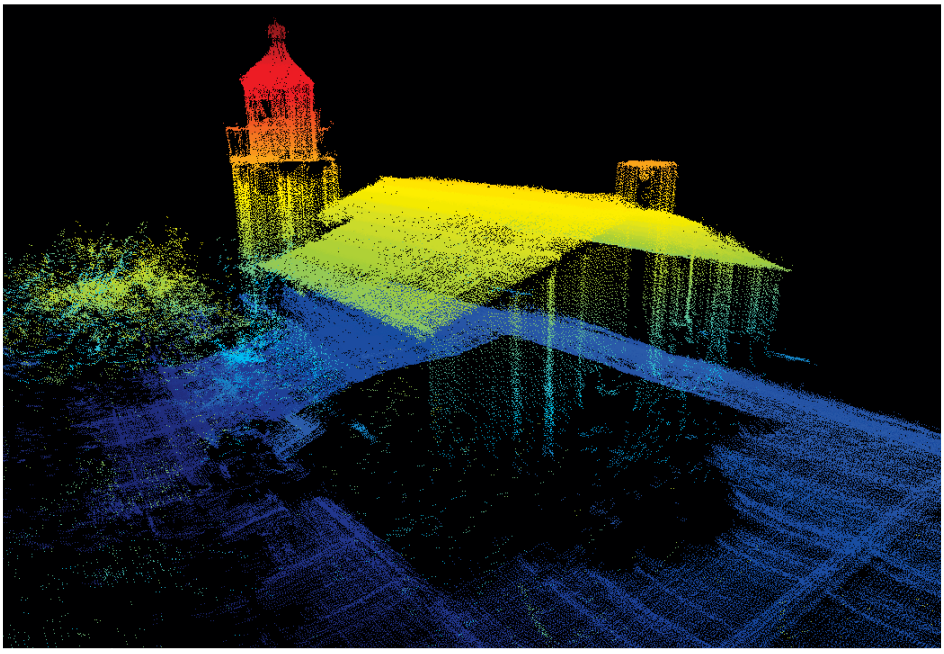

Abbildung 35: Punktwolke aller Spuren des Laserscanners Hokuyo UTM 30LX.

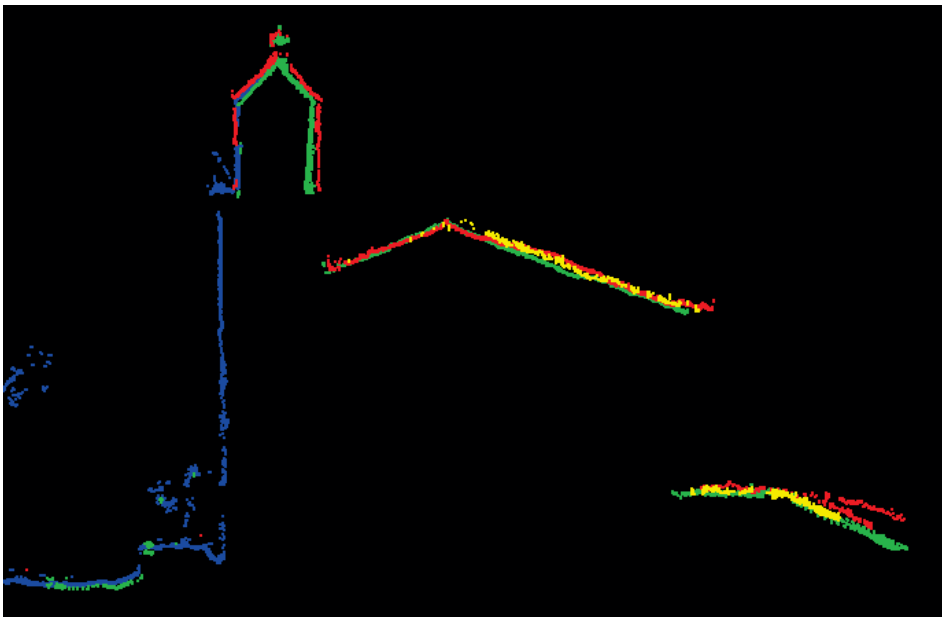

Abbildung 36: Querschnitt durch die Punktwolken aller angepassten Spuren des Laserscanners Hokuyo UTM 30LX.

Die gemessenen Standardabweichungen für ein definiertes, eingemessenes Objekt sind in der folgenden Tabelle aufgeführt:

Tabelle 5: Standardabweichungen der Punktwolken von der ausgleichenden Ebene.

Spur	Std-abw. der Punkte von der Ebene [m]	Anzahl der Punkte
Spur 1	0,012	60257
Spur 2	0,020	77747
Spur 3	0,042	65361
Spur 4	0,024	75862
Spur 5	0,076	66713
Spur 6	0,027	11607

Die Befliegungen mit dem neu entwickelten LEDA-K2-Multikopter bei normalen meteorologischen und morphologischen Bedingungen haben eindeutig bewiesen, dass die Gesamtkonstruktion (sowie alle Einzelkomponenten) durchaus in der Lage ist, ein Abbild der Erdoberfläche als Punktwolke geometrisch korrekt mit einer relativen Genauigkeit innerhalb des Streifens besser als 3 cm aufzunehmen und somit für kleinräumige Gebiete und kurzfristige Aufgabenstellungen im Küstenbereich und für Küstenschutzaufgaben eine sinnvolle Alternative zu den klassischen ALS-Aufnahmen auf Flugzeugen bieten. Da die anwendungsbezogenen Fragestellungen für den reinen Küstenschutz im Vordergrund standen, konnte auch insbesondere in Anbetracht des kurzen Projektzeitraums weitere

wichtige Fragestellungen wie z. B. eine Abschätzung der absoluten Genauigkeit des Gesamtsystems im Vergleich zur photogrammetrischen Auswertung nicht erfolgen. Besonders im Hinblick der zu klärenden groben Fehler der GNSS-Einheit und der ungenügenden IMU-Performance war dies nicht im Rahmen des Projektzeitraums bearbeitbar und bedarf weiterer Forschungs- und Entwicklungsarbeit (Stand 2014).

5 Aktuelle Entwicklungen zum Einsatz von UAV

Schon im Bearbeitungszeitraum des Projektes LEDA-K2 Ende 2013 bzw. Anfang 2014 wurde deutlich, dass insbesondere die rasante Entwicklung der Photogrammetrie dazu geführt hat, dass der tatsächliche Einsatz von Kleinstlasern auf Drohnen zukünftig wahrscheinlich nicht mehr nötig sein wird, da die einfachere, schnellere und sicherere Anwendung von RGB-Kameras auf UAV-Basis für die Geländemodellierung mindestens gleichwertige Ergebnisse bieten kann. Deshalb wurde ebenfalls ein weiteres System mit einer normalen Kamera auf einem Multikopter installiert und parallel und kostenneutral zum Projektantrag getestet. Dabei kam die speziell für den Einsatz in Küstengebieten entwickelte Photogrammetrie-Software EDA-K der Firma CIS GmbH Rostock zur Anwendung.

Das Programm "EDA-K – Einsatz von Drohnen zur Aufnahme von Küstengebieten" ist ein von der CIS GmbH entwickeltes Geographisches Informationssystem (GIS). Es enthält spezielle Funktionen zur Arbeit mit Luftbildern, die z. B. bei einer Befliegung mit unbemannten Flugsystemen entstehen sowie Funktionen zur Auswertung von 3D-Modellen, die aus diesen Luftaufnahmen abgeleitet werden können.

Neben diesen Spezialfunktionen enthält das Programm GIS Funktionen zum Im- und Export von geographischen Datensätzen, zur Koordinatentransformation sowie zum Erzeugen von Geometrischen Objekten und die Verknüpfung mit bzw. Abfrage und Bearbeitung von Sachdaten. Weiterhin besteht die Möglichkeit Daten von WebMapServices (WMS) zu beziehen, um sich so eine Hintergrundkarte anzeigen zu lassen (z. B. amtliche Luftbilder, topographische Karten etc.).

Unter dem Menüpunkt „UAV" sind alle wichtigen Funktionen zur Arbeit mit den UAV Daten zusammengefasst. Zunächst sollte man im entsprechenden Untermenü die Voreinstellungen prüfen und insbesondere die für den aktuellen Flug verwendete Kamera samt Kalibrierung einstellen oder auswählen.

Danach kann ein Flugprotokoll eingelesen werden. Dieses Protokoll enthält eine Aufzeichnung des vom Fluggerät zurückgelegten Weges sowie die Punktpositionen, an denen die Kamera eine Aufnahme erstellt hat.

Diesen Fotopunkten werden beim Einlesen mehrere Objektvariablen zugeordnet, in denen unter anderem die Dateinamen der Fotodatei und die aufgezeichneten Flugwinkel gespeichert sind. Diese Werte können dazu verwendet werden, die Bilder perspektivisch und in Flugrichtung gedreht anzuzeigen.

Weiterhin kann aus den einzelnen Aufnahmen ein Bildmosaik erstellt werden, so dass man eine flächendeckende Gesamtaufnahme des beflogenen Gebietes erhält. Zu diesem Zweck müssen noch die zu verwendenden Flugpunkte ausgewählt werden (entweder manuell oder automatisch über die Flughöhe und Flugwinkel), um ein möglichst gutes Gesamtergebnis zu erhalten.

Eine weitere Funktion, die hier im Hinblick auf die 3D-Auswertung erwähnt werden muss, ist die Möglichkeit, die EXIF-Informationen der Fotodateien um die räumliche Lage (GNSS-Positionen) zu erweitern. Dies kann dazu genutzt werden, bei der Erstellung der 3D-Modelle bessere Ergebnisse zu erzielen und von vornherein eine genauere Platzierung der Modelle zu erreichen.

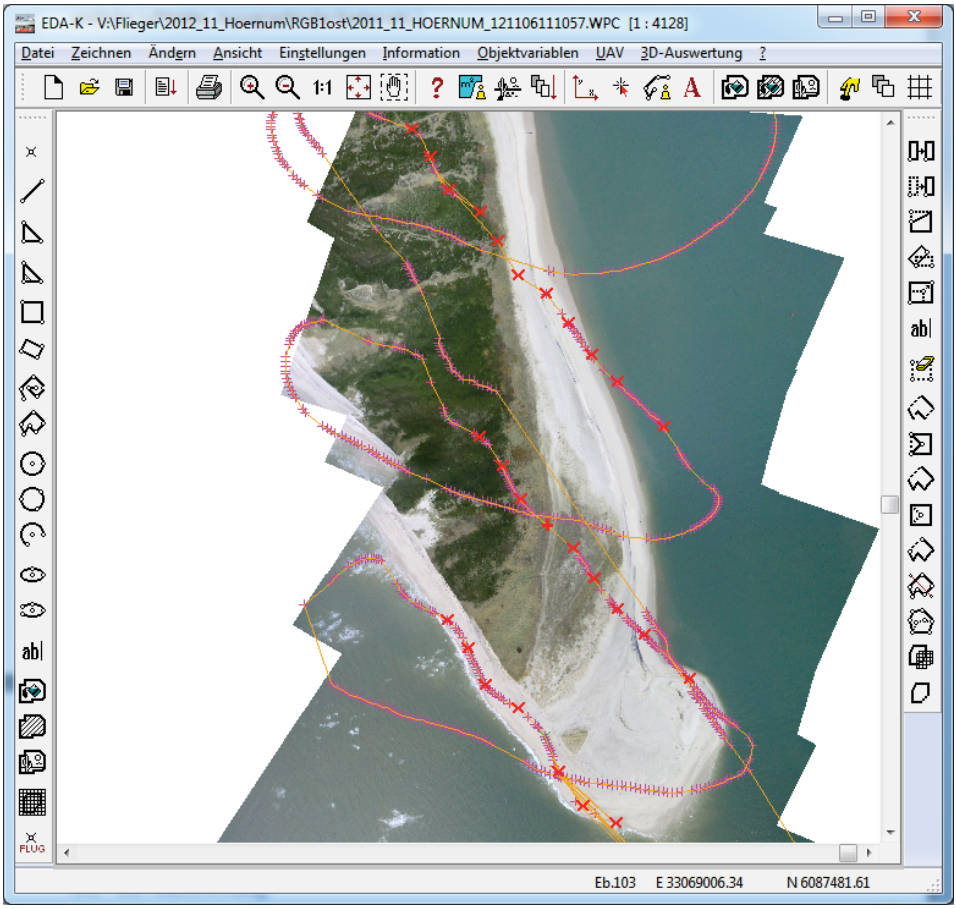

Abbildung 37: Oberfläche von EDA-K mit geladenem Flugprotokoll und Bildmosaik einer Befliegung der Südspitze von Sylt.

Nach dem Projektende haben neben den beteiligten Firmen CIS GmbH und Milan Geoservice GmbH viele weitere Firmen und Hardwareproduzenten Lösungen auf den Markt gebracht, die heute eingesetzt werden, um schnell und effizient über normale Bildbefliegungen hochgenaue dreidimensionale Geländemodelle zu erzeugen. Trotzdem bleibt auch der Spezialeinsatz von Kleinstlasern auf Multikoptern eine wichtige Methode zur Aufnahme besonderer Strukturen unter besonderen Aufnahmebedingungen.

6 Danksagung

Das Forschungsvorhaben LEDA-K wurde vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) unter der Fördernummer 03KIS104 (2012–2013) gefördert und vom Projektträger Jülich begleitet.

Alle Abbildungen und Fotos sind projektbezogen entstanden und von den beteiligten Firmen/Institutionen erstellt/aufgenommen worden:

- Staatliches Amt für Landwirtschaft und Umwelt Mittleres Mecklenburg
- Milan Geoservice GmbH
- CIS Gmbh Rostock

7 Schriftenverzeichnis

LUFTVERKEHRSGESETZ (LUFTVG): BGBl. I 2007 S. 698.
https://www.bgbl.de/xaver/bgbl/start.xav#__bgbl__%2F%2F*[%40attr_id%3D%27bgbl107s0698.pdf%27]__1493306927143

LUFTVERKEHRSVERORDNUNG (LUFTVO): BGBl. I 2015 S. 1894.
https://www.bgbl.de/xaver/bgbl/start.xav?start=%2F%2F*[%40attr_id%3D%27bgbl115s1894.pdf%27]#__bgbl__%2F%2F*[%40attr_id%3D%27bgbl115s1894.pdf%27]__1493307156671
https://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/luftvo_2015/gesamt.pdf

Unter anderem wurden folgende Quellen zur Beantragung des Projekts herangezogen:

IGI MBH: Aerooffice User Manual, Version V5.0b Release 12.01.2004, 2005.

AGISOFT LLC: Agisoft PhotoScan User Manual: Professional Edition, Version 0.9.0, 2012.

BAUER, M.: Vermessung und Ortung mit Satelliten – Globale Navigationssatellitensysteme (GNSS) und andere satellitengestützte Navigationssysteme, 6., neu bearbeitete und erweiterte Auflage, Herbert Wichmann Verlag, Berlin, Offenbach, 2011.

BECKER, M. und HEHL, K.: Geodäsie, Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt, 2012.

BAUMANN, E.: Vermessungskunde, Lehr- und Übungsbuch für Ingenieure – Band 1 Einfache Lagemessung und Nivellement, 5., bearbeitete und erweiterte Auflage, Ferd. Dümmler Verlag, Bonn, 1999.

BRENNER, C.: Aerial Laser Scanning – Systems, Processing, Applications (Tutorial), in: International Summer School Digital Recording and 3D Modeling, 24–29. April 2006, Greece, 2006.

BUNDESMINISTERIUM DER JUSTIZ: Luftverkehrsgesetz, neugefasst durch B. v. 10.05.2007 BGBI. I S. 698; zuletzt geändert durch Artikel 29 G. v. 26.06.2013 BGBI. I, S. 1809, 2013.

BUNDESMINISTERIUM DER JUSTIZ: Luftverkehrsordnung, neugefasst durch B. v. 27.03.1999 BGBI. I, S. 580; zuletzt geändert durch Artikel 3 G. v. 08.05.2012 BGBI. I S. 1032, 2012.

CONTE, G.; KLEINER, A.; RUDOL, P.; KORWEL, K.; WZOREK, M. and DOHERTY, P.: Performance Evaluation of a light-weight multi-echo Lidar for unmanned Rotorcraft applications, in: International Archives of the Photogrammetry, Remote

Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XL-1/W2, Rostock, Deutschland, 2013.

GERBETH, V.: Photogrammetrie, 3. Auflage, Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden, 2007.

GRUBER, F.J. und JOECKEL, R.: Formelsammlung für das Vermessungswesen, 13. Erweiterte und aktualisierte Auflage, B. G. Teubner Verlag, Stuttgart, Leipzig, Wiesbaden, 2007.

HOKUYO AUTOMATIC CO., LTD: Spezifikation des Scanning Laser Range Finder UTM-30LX/LN, 2008.

JOECKEL, R.; STOBER, M. und HUEP. W.: Elektronische Entfernungs- und Richtungsmessung – und ihre Integration in aktuelle Positionierungsverfahren, 5. neu bearbeitete und erweiterte Auflage, Herbert Wichmann Verlag, Verlagsgruppe Hüthig Jehle Rehm GmbH, Heidelberg, München, Landsberg, Berlin, 2008.

KAGER, H.: Discrepancies Between Overlapping Laser Scanner Strips – Simultaneous Fitting of Aerial Laser Scanner Strips, Proceedings XXth ISPRS Congress, Istanbul, Vol. XXXV, Part B /1, S. 555–560, 2004.

KING, A.D.: Inertial Navigation – Forty Years of Evolution, GEC Review, Vol. 13, NO. 3, 1998.

MILAN GEOSERVICE GMBH: Informationen anhand der Praxiserfahrungen der Firma MILAN Geoservice GmbH, 2013.

SCHREITER, M.: EVALUIERUNG des Einsatzpotentials des Kompaktlaserscanners UTM-30LX für photogrammetrische Anwendungen, Bachelorarbeit, Technische Universität Dresden, 2012.

SHAN, J and TOTH, C.K.: Topographic laser ranging and scanning: principles and processing, CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, Florida, USA, 2009.

SIEBERT, S.; KLONOWSKI, J. und NEITZEL, F.: Unmanned Aerial Vehicles (UAV) – Historische Entwicklung, rechtliche Rahmenbedingungen und Betriebskonzepte. In: LUHMANN, T. und MÜLLER, C. (Hrsg.): Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik – Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2009, Herbert Wichmann Verlag, Verlagsgruppe Hüthig Jehle Rehm GmbH, Heidelberg, München, Landsberg, Frechen, Hamburg, 2009.

SZELISKI, R.: COMPUTER Vision – Algorithms and Applications, Springer Verlag, London, 2011.

RIEGL LMS GMBH: VMX-250 Datenblatt, 2012.

U-BLOX AG: UBX-G5010, G5000/G0010 Datenblatt, 2009.

VERHOEVEN, G.: Software Review, Taking Computer Vision Aloft – Archaeological Three-dimensional Reconstructions from Aerial Photographs with Photoscan, Wiley Online Library, John Wiley & Sons, Ltd., 2011.

VOSSELMANN, G. and MAAS, H.-G.: Airborne and terrestrial laser scanning, Whittles Publishing, Dunbeath, Scotland, 2011.

Die Küste, 84 (2016), 1-226

Das Schwingungsverhalten der Tideelbe hinsichtlich Resonanz

Finn Hartwig

Zusammenfassung

Das Schwingungsverhalten der Tideelbe wurde während der vergangenen Jahrzehnte im Zuge unterschiedlicher strombaulicher Maßnahmen verändert. Eine Folge dieser Veränderungen ist ein Anstieg der Tidenhübe. Eine beginnende Resonanz mit der M_2-Gezeit steht in Verdacht, einer der hierfür verantwortlichen Mechanismen zu sein. Diese Studie stellt eine modellgestützte Untersuchung des Schwingungsverhaltens der Tideelbe hinsichtlich dieser Resonanz dar. Die Tidenhübe und die Strömungen werden auf Veränderungen hin untersucht, die sich zeitlich parallel zu den Vertiefungen der Fahrrinne vollzogen haben. Auf diese Weise wird gezeigt, dass die Eigenperiode der Tideelbe durch die beiden letzten Fahrrinnenanpassungen um 5 Stunden auf 20,5 Stunden verringert wurde. Im Falle einer weiteren Verringerung um 8 Stunden wäre volle Resonanz zu erwarten. Gleichzeitig werden eine Verlängerung der Flutdauer sowie Veränderungen der Übergänge zwischen Flut- und Ebbströmung deutlich, die eine problematische Entwicklung der Sedimentdynamik der Tideelbe unterstützen könnten.

Schlagwörter

Resonanz, hydrodynamisch-numerisches Modell, Elbe, Tidenhübe, Strömungen, Beschleunigung, Vertiefung

Summary

During the last decades, the oscillation behavior of River Elbe was changed by several river-engineering measures. One consequence of these changes is the rise of tidal range. Commencing resonance of the M_2-tide is supposed to be one of the acting mechanisms. This study investigates the tidal oscillations of River Elbe with respect to this resonance. The tidal ranges and currents are examined for changes which coincide with the dredging of the main channel. Thereby, it is found that the eigenperiod of River Elbe was reduced by 5 hours to 20.5 hours during the last two dredgings. Fully developed resonance can be expected in the case of a further reduction of the eigenperiod by 8 hours. In addition, an increase in flood duration and a shift in the transition from ebb to flood currents are found as a result of the dredging. These changes can support a problematic evolution of the sediment dynamics of River Elbe.

Keywords

resonance, hydrodynamical numerical model, River Elbe, tidal ranges, currents, acceleration, dredging

Inhalt

1 Einleitung 194
2 Grundlagen 195
2.1 Gestalt und Bathymetrie des Elbeästuars 195
2.2 Tidedynamik der Elbe 196
2.3 Resonanz 197
3 Das numerische Modell 199
3.1 Aufbau und zu Grunde liegende Gleichungen 199
3.2 Anregung 200
3.3 Topographien 200
3.4 Kalibrierung 200
4 Resultate 201
4.1 Das Eigenspektrum der Tideelbe 201
4.2 Strömungen 203
4.3 Beschleunigungen 205
4.4 Reflektoren der Tidewelle 207
4.5 Weitere Annäherung an die Erfüllung des Resonanzkriteriums 209
5 Schlussfolgerungen 210
6 Schriftenverzeichnis 212

1 Einleitung

Seit beinahe 200 Jahren erfährt die Tideelbe anthropogene Vertiefungen, um für die immer größer werdenden Schiffe trotz ihres stetig zunehmenden Tiefgangs sicheren Zugang zum Hamburger Hafen zu gewährleisten. Hierdurch ist die durchgehend schiffbare Tiefe zwischen Hamburg und der Nordsee mittlerweile um über 10 m auf -15,8 m Normalnull (NN) angewachsen (WSV und WSA HAMBURG 1997). Im Zuge dieser und weiterer strombaulicher Maßnahmen wurde das Schwingungsverhalten der Tideelbe verändert. Ein Resultat dieser Veränderungen ist ein starker Anstieg der Tidenhübe. Im Bereich um St. Pauli (Stromkilometer 623,1) beträgt dieser Anstieg seit den 1950er Jahren mehr als 1 m (Abb. 1). Diese Veränderung stellt eine Herausforderung für den Hochwasserschutz, die Befestigung der Ufer und den Schiffsverkehr dar.

Es existiert die theoretische Möglichkeit, einen Gezeitenfluss durch Vertiefung in einen Zustand der Resonanz mit der ihn anregenden Gezeit zu versetzen, das heißt in einen Zustand eines verstärkten Mitschwingens. Eine beginnende Resonanz mit der halbtägigen M_2-Gezeit der Deutschen Bucht würde eine Erklärung für die heutige Verteilung der Tidenhübe entlang der Elbe liefern. Da die Tidenhübe stetig weiter zunehmen, besteht vor dem Hintergrund weiterer Vertiefungen und des ebenfalls vertiefend wirkenden Anstiegs des Meeresspiegels auch für andere tidebeeinflusste Ästuare ein Interesse, diese Zusammenhänge genauer zu verstehen.

Die Hauptaufgabe dieser Studie besteht darin, das Vorliegen einer Resonanz zu verifizieren sowie ihr Ausmaß zu ermitteln und ihre Entwicklung zu verdeutlichen. Zu diesem

Zweck werden die Eigenperioden der Tideelbe verschiedener Jahre bestimmt und mit ihrer Hilfe ein Resonanzkriterium auf Erfüllung überprüft. Um die Eigenperiode zu bestimmen, wird das Reaktionsverhalten der Tideelbe auf eine Variation der Anregungsperiode hin analysiert. Dies verdeutlicht zudem den Einfluss der natürlichen Schwankungen der Gezeitenperiode auf die Hydrologie. Darüber hinaus werden die Hydrologie und die Fahrrinnentiefe auf zeitlich parallel verlaufende Entwicklungen hin untersucht, um Zusammenhänge zu verdeutlichen bzw. auszuschließen. Um ein besseres Verständnis für die Tidedynamik zu schaffen, wird zudem der jeweilige Einfluss mehrerer potentieller Reflektoren der Tidewelle ermittelt. Abschließend folgt ein Blick in die Zukunft in Form zweier Szenarien, in denen die Resonanz auf verschiedenen Wegen verstärkt wird.

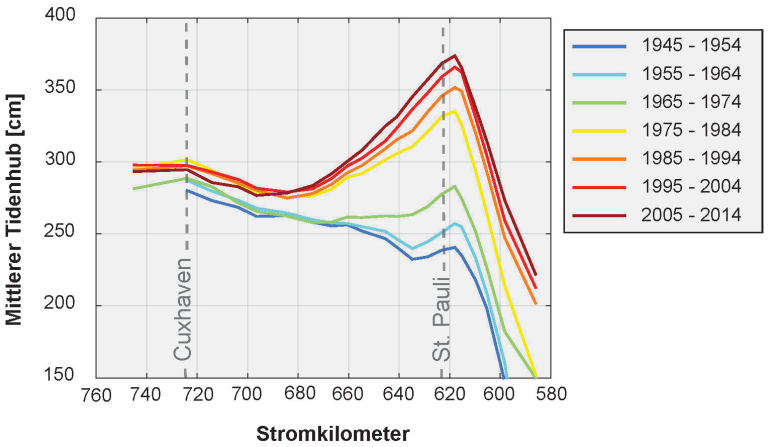

Abbildung 1: 10-Jahres-Mittel von Messdaten der Tidenhübe entlang der Tideelbe 1945–2014 (HPA et al. 2016).

2 Grundlagen

2.1 Gestalt und Bathymetrie des Elbeästuars

Das Ästuar der Elbe erstreckt sich aus hydrographischer Sicht vom Wehr Geesthacht, das eine künstliche Tidegrenze bildet, stromabwärts bis ins Wattenmeer hinein (ROHDE 1971) (Abb. 2). Dieser auch als Tideelbe bezeichnete Bereich wird seinerseits in mehrere Abschnitte unterteilt. Vom Wehr in Geesthacht bis nach Bunthaus (Stromkilometer 609,8) erstreckt sich die „obere Tideelbe“. Dieser Abschnitt ist typischerweise 300–500 m breit und -5 bis -6 m NN tief. Bei Bunthaus beginnt die „Unterelbe“, die zunächst in Form der „Norder- und Süderelbe“ das Hamburger Stromspaltungsgebiet umrandet. Beide Arme weisen im Bereich Hamburgs Sohlsprünge auf, durch die die Wassertiefe bis zu ihrer Vereinigung im Hamburger Hafen auf -17 m NN ansteigt (Stromkilometer 625). Von hier verläuft die Fahrrinne der Tideelbe mit einer Mindesttiefe von -15,8 m NN. Ab Brunsbüttel (Stromkilometer 695) weitet sich die Elbe und erreicht schließlich eine maximale Breite von 17,5 km (Cuxhaven-Trischendamm) bei Hoch- bzw. 1,5 km bei Niedrigwasser. Der letzte Abschnitt der Tideelbe ist die „Außenelbe“, welche sich von Cuxhaven

(Stromkilometer 724) bis in den Bereich der Großbaken A und Z (Stromkilometer 755,6 bzw. 756,2) nördlich des Scharhörn-Riffs erstreckt (BOEHLICH 2003).

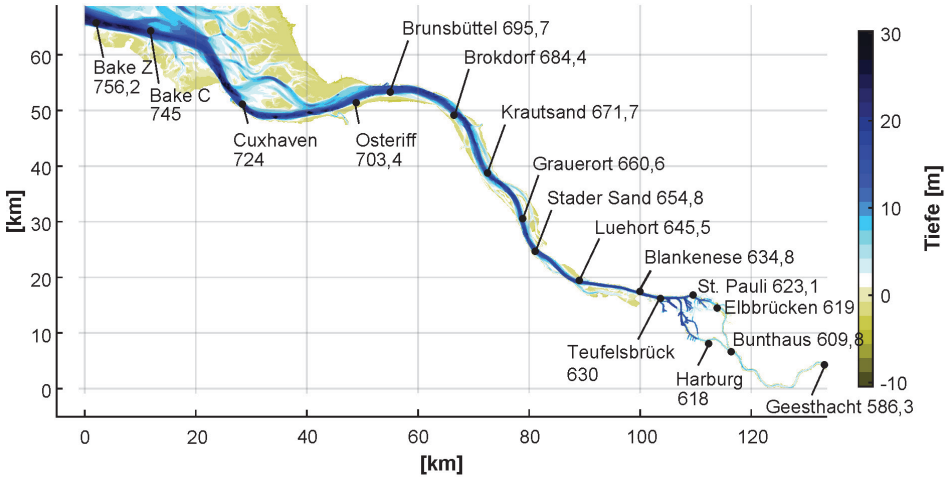

Abbildung 2: Topographie des Elbeästuars von 2010 mit Namen und Stromkilometern der hier relevanten Pegel.

Die Fahrrinne stromabwärts des Hamburger Hafens wurde in der Vergangenheit mehrfach vertieft. Die für die hier vorliegende Untersuchung relevanten Baumaßnahmen sind die der Jahre 1974–1978 um 1,5 m auf -13,50 m Seekartennull (SKN) sowie 1999/2000 um 0,9 m auf -14,40 m SKN (BAW 2006).

2.2 Tidedynamik der Elbe

Die Tideelbe ist ein Oszillator, der an seinem offenen Rand durch die Gezeiten der Nordsee zum Schwingen angeregt wird. Die Gezeitenkräfte des Mondes und der Sonne erzeugen im Nordatlantik Tidewellen, die über die offenen Ränder in die Nordsee und schließlich in die Elbe eindringen, wobei die halbtägige Hauptmondtide (M_2) die dominante Partialtide darstellt. Die unterschiedlichen Amplituden und Perioden weiterer Partialtiden (S_2, N_2, K_2, O_1, P_1, K_1) führen jedoch dazu, dass die gemessene Tide schwankende Amplituden und Perioden aufweist.

Auf ihrem Weg stromaufwärts wird die Gezeitenwelle zum einen durch Dissipation, Mündungskonvergenz, variable Wassertiefe und den Oberwasserzufluss verformt, zum anderen erfährt sie partielle Reflexionen (BOEHLICH 2003; MALCHAREK 2010). Die beobachtete Verteilung von Tidenhüben resultiert aus der Interferenz der verformten einfallenden mit partiell reflektierten Gezeitenwellen. Vom seeseitigen Rand des Ästuars stromaufwärts blickend steigt der heutige mittlere Tidenhub bis etwa zum Pegel Cuxhaven (Stromkilometer 724) zunächst um wenige Zentimeter, gefolgt von einer Abnahme um etwa 20 cm bis zum Pegel Brokdorf (Stromkilometer 684,4). Von Brokdorf bis St. Pauli (Stromkilometer 623,1) in der Norderelbe bzw. bis Harburg (Stromkilometer 615) in der Süderelbe steigt der mittlere Tidenhub um etwa 1m. Stromaufwärts dieser

beiden Pegel sinkt der mittlere Tidenhub mit zunehmender Nähe zum Wehr Geesthacht (Stromkilometer 586,3) bis um etwa 2 m in unmittelbarer Nähe zum Wehr (siehe Abb. 1).

Die Maxima im Bereich Hamburgs begannen sich erst zu Beginn der 1960er Jahre auszubilden und wachsen bis heute an (PROJEKTGRUPPE STROMBAU 2007). Seit Beginn der 1970er Jahre übertreffen diese Maxima die Amplitude der in die Außenelbe einfallenden Gezeitenwelle. Diese Verstärkung ist indikativ für ein Wirken von Resonanz.

2.3 Resonanz

Resonanz beschreibt in der Physik das verstärkte Mitschwingen eines schwingfähigen Systems. Weist ein Ästuar eine Geometrie auf, die eine einfallende Welle in einer Entfernung von einem Viertel ihrer Wellenlänge von der Mündung reflektiert, so addieren sich am geschlossenen Ende des Ästuars Oberflächenauslenkungen gleichen Vorzeichens, wohingegen sich an der Mündung Oberflächenauslenkungen unterschiedlichen Vorzeichens gegenseitig aufheben. Die Amplitude innerhalb des Ästuars wird folglich gegenüber jener an seiner Mündung im Rhythmus der Periode der Anregung verstärkt, das Ästuar befindet sich in Resonanz mit der Anregung (PROJEKTGRUPPE STROMBAU 2007). Das Kriterium für Resonanz ist demnach das „Quarter Wavelength"-Kriterium (QWL):

$$L = \lambda/4\,, \tag{1}$$

mit L der Länge des Ästuars und λ der Länge der anregenden Welle (PROUDMAN 1953; DEFANT 1961; GODIN 1993). Schreibt man die Wellenlänge der anregenden Welle als Produkt aus ihrer Phasengeschwindigkeit und ihrer Periode:

$$L = \frac{1}{4} \cdot \lambda = \frac{1}{4} \cdot \sqrt{gh} \cdot \tau_{Anr}, \tag{2}$$

mit g der Gravitationsbeschleunigung, h der Tiefe und τ_{Anr} der Periode der Anregung, und setzt dies in die Periode der Eigenschwingung eines einseitig offenen Ästuars ein:

$$\tau_{Seiche} = 4L/\sqrt{gh} = \tau_{Anr}, \tag{3}$$

mit τ_{Seiche} der Eigenperiode des Ästuars, so ergibt sich, dass für ein Wirken von Resonanz die Eigenperiode des Ästuars τ_{Seiche} mit der Periode der Anregung τ_{Anr} übereinstimmen muss.

Dissipation wirkt verlängernd auf die Eigenperiode eines Oszillators (DIETRICH et al. 1975). Dies vermag der Erfüllung der Resonanzbedingung der Periodengleichheit entgegenzuwirken. Darüber hinaus bewirkt Reibung jedoch auch eine Ausdehnung des Periodenbereiches, in dem eine Verstärkung auftritt (BACKHAUS 2015). Folglich kann Resonanz in einer latenten Form bereits unter Ungleichheit beider Perioden $\tau_{Seiche} \neq \tau_{Anr}$ auftreten und durch eine weitere Annäherung beider Perioden verstärkt werden.

Um diesen Sachverhalt darzustellen, wird sich im Folgenden eines analytischen eindimensionalen Modells bedient. Dieses wird durch eine Lösung der horizontalen Bewegungsgleichungen und der Kontinuitätsgleichung für eine harmonische Oszillation eines einseitig offenen Beckens gebildet (PROUDMAN 1953):

$$\eta(x,t) = A_L \cdot \frac{cos(k \cdot x)}{cos(k \cdot L)} \cdot cos(\omega \cdot t), \tag{4}$$

mit $\eta(x,t)$ der Oberflächenauslenkung in der Entfernung x zum geschlossenen Ende ($x = 0$) zum Zeitpunkt t, A_L der Amplitude am offenen Rand in der Entfernung L zum geschlossenen Ende, $k = 2\pi/\lambda$ der Wellenzahl und $\omega = 2\pi/\tau$ der Kreisfrequenz.

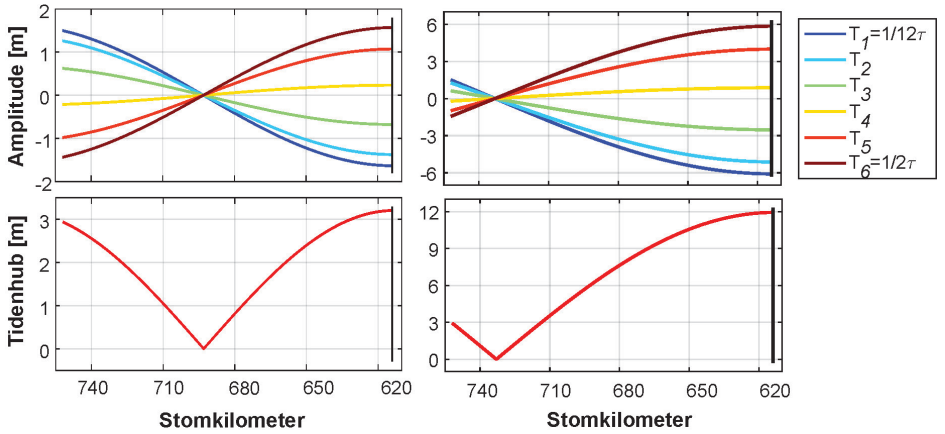

Abbildung 3: Ergebnisse von Glg. (4) für $\lambda/4 \ll L \approx \lambda/2$ (λ = 320km, L = 139 km ~ Bake Z – Stromkilometer 617) (links) und $\lambda/4 \approx L \ll \lambda/2$ (λ = 480km, L = 139km) (rechts) während der Dauer einer halben Periode bei A_L = 1,5 m.

Das analytische Modell verdeutlicht die Bedeutung der Geometrie für das Ausmaß einer Resonanz (Abb. 3). Das geschlossene Ende des Elbeästuars bildet in diesem Modell der Stromkilometer 617, da in dessen Bereich der maximale Tidenhub auftritt (siehe Kap. 4.4). Das Modell liefert für L = 139 km (Bake Z bis Stromkilometer 617) unter einer Anregung der Amplitude A_L = 1,5 m sowie der Wellenlänge λ = 320 km, also $L \approx \lambda/2$ = 160 km und $L \gg \lambda/4$ = 80 km, eine Verstärkung der Schwingung von 20 cm im Inneren des Ästuars (Abb. 3 links). Dabei besteht ein ortsfester Knotenpunkt bei Stromkilometer 694, etwa auf halber Länge des Ästuars. Für λ = 480 km, also $L \approx \lambda/4$ = 120 km und $L \ll \lambda/2$ = 240 km, folglich für eine weitreichendere Erfüllung des Resonanzkriteriums Glg. (1), erfährt der Tidenhub im Inneren des Ästuars eine Verstärkung auf den vierfachen Wert des Tidenhubs an der Mündung, wobei sich der Knotenpunkt der Mündung bis auf 20 km annähert (Abb. 3 rechts). Die hier simulierte Erhöhung der Wellenlänge λ der Anregung ist nach Glg. (2) äquivalent zu einer Steigerung der Tiefe h, wie sie die Tideelbe in der Vergangenheit mehrfach erfahren hat.

Glg. (4) beschreibt die Überlagerung zweier entgegengesetzt strebender Partialwellen identischer Amplitude (HARTWIG 2016). In der Tideelbe treten jedoch zwei entgegengesetzt strebende Partialwellen unterschiedlicher Amplitude auf, wobei die Amplitude der zweiten Welle derjenigen der ersten Welle minus dem Verlust durch Reflexion und Dissipation entspricht. Um dies zu berücksichtigen, werden im Folgenden beide Partialwellen mit einer konstanten Dämpfung c_{damp} sowie die nach links laufende Welle mit einem Reflexionskoeffizienten c_{refl} multipliziert, die den dissipativen Energieverlust bzw. den Grad der Reflexion angeben. Hieraus resultiert eine Oberflächenauslenkung $\eta \neq 0$ am Knotenpunkt. Abschließend berücksichtigt die Anwendung einer Phasenverschiebung φ auf die nach links laufende Partialwelle einen bei der Reflexion auftretenden

Phasensprung. Mittels dieser Ergänzungen und eines Additionstheorems für den Kosinus folgt aus Glg. (4)

$$\eta(x,t) = c_{damp} \cdot \frac{A}{2} \cdot \left[cos(k \cdot x - \omega \cdot t) + c_{refl} \cdot \cos(k \cdot (x + \varphi) + \omega \cdot t)\right], \quad (5)$$

mit $A = A_L / \cos(k \cdot L)$. Um realistische Oberflächenauslenkungen η zu generieren, bedarf Glg. (5) einer Amplitude $A_L \gg \eta$, da die Dämpfung c_{damp} die Amplituden reduziert und da sich die Auslenkungen beider entgegengesetzt propagierender Partialwellen teilweise aufheben. Die im Folgenden gewählten Werte der Dämpfung c_{damp}, der Amplitude A_L, des Reflexionskoeffizienten c_{refl} und der Wellenlänge λ entstammen experimentellen Abschätzungen. Nach Wahl von L entsprechend der Tideelbe, τ entsprechend der M_2-Gezeit und φ entsprechend einer experimentellen Identifikation (siehe Kap. 4.4) gibt das analytische Modell trotz der zu Grunde liegenden Approximation die Verteilung der im Jahr 2008 gemessenen mittleren Tidenhübe im Wesentlichen wieder (Abb. 4).

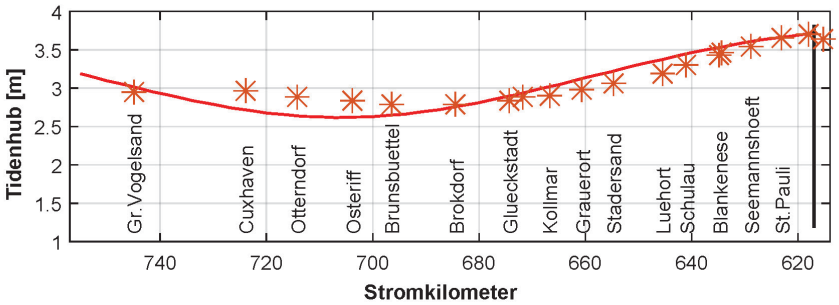

Abbildung 4: Ergebnisse des analytischen Modells für $L = 139$ km ~ Bake Z –Stromkilometer 617, $\lambda = 420$ km, $\tau = 44712$ s $= \tau_{M2}$, $A_L = 8{,}7$ m , $c_{refl} = 0{,}18$, $c_{damp} = 0{,}18$, $\varphi = 30{,}0$ km: Tidenhub der errechneten partiell stehenden Welle (Linie) und Messwerte von 2008 (Sterne).

3 Das numerische Modell

3.1 Aufbau und zu Grunde liegende Gleichungen

Das Modell VOM-SW2D („Vector-Ocean Model Shallow Water 2-dimensional“) wurde am Institut für Meereskunde der Universität Hamburg entwickelt. Es beruht auf den nicht-linearen primitiven Gleichungen und berechnet Oberflächenauslenkungen und tiefengemittelte Strömungen auf einem horizontalen Gitter. Das Modell besitzt einen offenen Rand und eine freie Oberfläche. Die Bodenreibung wird mit Hilfe eines semi-impliziten Ansatzes berücksichtigt, der auch bei geringen Tiefen und hohen Strömungsgeschwindigkeiten numerische Stabilität gewährleistet (BACKHAUS 2012). Das Modell dissipiert lateralen Impuls mit Hilfe des skalenselektiven Laplace-Operators SAL (Spatially Averaged Laplace). Hierbei wird ein klassischer 5-Punkt-Laplace-Operator auf alle 5 Gitterpunkte angewendet, die er selbst abdeckt, wodurch er insgesamt 16 Gitterpunkte miteinbezieht. Für Reibung an der Küste ist in jeden der sich daraus ergebenden fünf Laplace-Operatoren eine variable Slip-Bedingung implementiert. Der SAL enthält ein skalenselektiv wirkendes Element, das bevorzugt Wellen der Länge $2 \cdot \Delta d - 4 \cdot \Delta d$ (d = Gitterschrittweite) dissipiert, wie sie z. B. durch den beweglichen Rand entstehen

können (BACKHAUS persönl. Komm.). Der SAL-Operator operiert mit einem positiven Diffusionskoeffizienten, während der üblicherweise verwendete bi-harmonische Operator Δ^2 zwar die gewünschten skalenselektiv dämpfenden Eigenschaften besitzt, dafür jedoch mit einem negativen Diffusionskoeffizienten arbeitet, für den es keine physikalische Begründung gibt (BACKHAUS 2012). Die Modellgleichungen sind auf ein Arakawa C-Gitter diskretisiert (ARAKAWA und LAMB 1977). Jede Zelle des Gitters kann geflutet werden und trockenfallen, was durch die Implementierung eines Algorithmus für einen beweglichen Rand ermöglicht wird. Zudem ist dieses Gitter in VOM anpassungsfähig: Eine prozessorientierte Erhöhung der Auflösung an topographischen Abhängen ermöglicht eine detaillierte Berücksichtigung der hier stattfindenden Prozesse (BACKHAUS et al. 2016). Da das Wattenmeer eine nur geringe Tiefe aufweist und während jeder Gezeit zu großen Teilen trockenfällt, hat die Bodentopographie hier einen besonders großen Einfluss auf die Dynamik. Aus diesem Grund stellt VOM das geeignete Instrument dar, um die Dynamik des Elbeästuars zu untersuchen.

3.2 Anregung

In das Modell wurde eine asymmetrische Sinusschwingung mit steilerem Flut- und flacherem Ebbast sowie einer Amplitude $A = 1{,}5$ m implementiert. Diese gleicht in ihrer Form der realen Ganglinie des Pegels Bake Z und in ihrer Wellenhöhe dem mittleren Tidenhub der Außenelbe. Mit dieser Schwingung wurde das Modell an jedem Punkt des offenen Westrandes mit Perioden von 3 bis 26 Stunden zur Erstellung von Periodogrammen bzw. von 12,42 Stunden zur Simulation der M_2-Gezeit angetrieben, jeweils über 5 bis 6 Perioden, bis das System eingeschwungen war. Die südlichen Randpunkte zum Watt wurden als Land behandelt. Der nördliche Rand wurde mit einer von-Neumann-Bedingung versehen, die jede ihn erreichende Oberflächenauslenkung zurückspiegelt.

3.3 Topographien

Das hydrodynamisch-numerische Modell wurde auf Topographien der Tideelbe aus den Jahren 1970, 1990, 2003 und 2010 angewendet. Diese bilden mit einer horizontalen Auflösung von 50 Metern und einer vertikalen Auflösung von 10 cm (1970 und 1990) bis 1 cm (2003 und 2010) die Bathymetrie des Elbeästuars von der Bake Z im Westen und Friedrichskoog im Norden bis zum Wehr Geesthacht im Südosten ab (siehe Abb. 2).

3.4 Kalibrierung

Unter Verwendung der Topographie von 2010 wurden die Amplitude der Anregung, der Oberwasserzulauf und die räumlich variablen Dissipationsparameter dahingehend variiert, dass sich die modellierten Niedrigwasser- und Hochwasserstände den entsprechenden Messwerten von 2010 annäherten. Die Variation der Dissipationsparameter dient der Berücksichtigung der räumlich variablen Verteilung Energie dissipierender kleinskaliger Unebenheiten, die in der Topographie aufgrund ihrer Rastergröße nicht aufgelöst sind.

Für den Bereich der Außenelbe ergab sich ein optimaler Bodenreibungsparameter von $17{,}5 \cdot 10^{-4}$ m²/s in Kombination mit einem Slip-Wert von 0,8 (1 = full, -1 = no-slip). Für

die Unterelbe bis Hamburg lieferten die Werte $7{\cdot}10^{-4}$ m²/s und 0,85 die besten Ergebnisse. Aufgrund der Abwesenheit ausgedehnter Watten nehmen die Flachwasserbereiche an diesem Flussabschnitt einen im Verhältnis geringeren Anteil des Gewässerquerschnittes ein. Dadurch fällt hier der hydraulische Radius $r_{hy} = A/L_U$, das Verhältnis des Querschnitts A zum benetzten Umfang L_U, größer aus als in der Außenelbe, was den geringeren Einfluss von Reibung erklärt. Für den Hafen und den Abschnitt zwischen Hamburg und Geesthacht wurden Reibungsparameter von $20{\cdot}10^{-4}$ m²/s bzw. $55{\cdot}10^{-4}$ m²/s gewählt. Für diese beiden Abschnitte ist keine separate Slip-Funktion für die laterale Reibung in das Modell implementiert, es wirkt der Wert der Unterelbe. Der hohe Wert des zuletzt genannten Flussabschnittes kompensiert den Reibungsbeitrag zahlreicher Buhnen. Neben diesen Parametern wurde ein Oberwasserzulauf von 500 m³/s implementiert, was einem häufigen Mittelwert vieler vergangener hydrologischer Jahrgänge entspricht und eine realistische Verteilung von Oberflächenauslenkungen unterstützt.

Diese Einstellungen wurden für alle Simulationen beibehalten. Eine separate Kalibrierung jedes einzelnen simulierten Jahres hätte das Modell zwar insgesamt realistischere Wasserstände erzeugen lassen, die angestrebte Vergleichbarkeit der unterschiedlichen Ausbaustufen hätte jedoch darunter gelitten.

4 Resultate

4.1 Das Eigenspektrum der Tideelbe

Die Ergebnisse der Modellläufe unter Benutzung der Topographie von 2010 sind in Form eines Periodogramms dargestellt (Abb. 5). Die Tidenhübe unterliegen einer deutlichen Frequenzabhängigkeit.

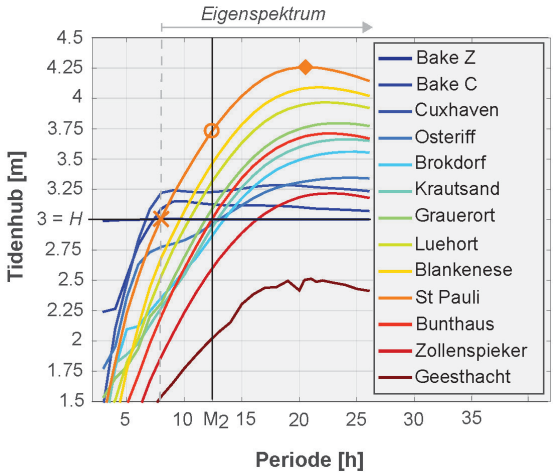

Abbildung 5: Periodogramm der Tideelbe 2010 mit Markierungen des maximalen Tidenhubs (Raute), des maximalen M_2-Tidenhubs (Kreis) und des St. Pauli-Tidenhubs gleich $H = 3\text{m}$ (Kreuz).

Der maximale Tidenhub tritt am Pegel St. Pauli unter einer Periode von 20,5 Stunden auf (Abb. 5, Raute). Dies stellt somit die Eigenperiode der Tideelbe dar. Die Menge aller

Perioden, aus denen am Ort der größten Oszillation (St. Pauli) Tidenhübe größer gleich der Wellenhöhe der Anregung $H = 2 \cdot A = 3$ m resultieren (Abb. 5, Kreuz), bildet das Eigenspektrum. Dieses erstreckt sich über alle simulierten Perioden größer gleich 8 Stunden. Sowohl die halbtägigen als auch die ganztägigen Gezeiten sind Element des Eigenspektrums. Aus der Eigenperiode kann mit Hilfe der Formel der Eigenschwingung eines einseitig offenen Beckens Glg. (3) dessen integrale Tiefe, die Laufzeittiefe berechnet werden (BACKHAUS 2015). Diese betrug 2010 5,8 m.

Die Ergebnisse der Modellläufe unter Benutzung der Topographien von 1970, 1990 und 2003 zeigen eine Zunahme des maximalen M_2-Tidenhubs in St. Pauli von 3,06 m über 3,60 m auf 3,78 m (Abb. 6, Kreise). Dies geht einher mit einer Verringerung der Eigenperiode von 25,55 Stunden über 22,5 Stunden hin zu 20,4 Stunden. Daraus folgen Laufzeittiefen von 3,7 m, 4,8 m und 5,8 m. Die untere Grenze des Eigenspektrums verschiebt sich von 12 Stunden über 9 Stunden hin zu 8 Stunden (Abb. 6, Kreuze). St. Pauli stellt in allen Periodogrammen den Pegel des größten Tidenhubs dar. Die Pegel stromauf davon werden zu Gunsten der Übersichtlichkeit nicht abgebildet.

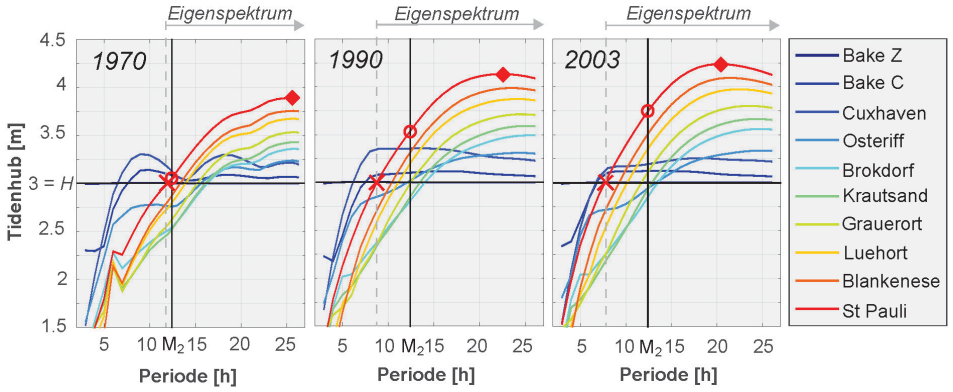

Abbildung 6: Periodogramme der Tideelbe zwischen Bake Z und St. Pauli für die Jahre 1970, 1990 und 2003 mit Markierungen der maximalen Tidenhübe (Rauten), der maximalen M_2-Tidenhübe (Kreise) und der St. Pauli-Tidenhübe gleich $H = 3\text{m}$ (Kreuze).

Die Zunahme der maximalen und der M_2-Tidenhübe sowie die Verringerung der Eigenperiode waren zwischen 1970 und 1990 am stärksten ausgeprägt, also in genau demjenigen Zeitraum, in dem die Fahrrinne ihre größte Vertiefung erfuhr. Innerhalb des Zeitraums 1990 bis 2003 wurde die Fahrrinne in geringerem Maße vertieft und sowohl die Zunahme der Tidenhübe als auch die Verringerung der Eigenperiode waren geringer ausgeprägt. Zwischen 2003 und 2010 schließlich wurde die Fahrrinne nicht vertieft und sowohl die Tidenhübe als auch die Eigenperiode blieben nahezu konstant. Dies verdeutlicht, dass zwischen den Vertiefungen der Fahrrinne auf der einen Seite und dem Anstieg der Tidenhübe und der Verringerung der Eigenperiode auf der anderen Seite ein Wirkzusammenhang besteht.

4.2 Strömungen

So wie die Tidenhübe sind auch die Strömungen entlang der Tideelbe Funktionen des Abstandes zur Mündung und der Periode der Anregung (Abb. 7).

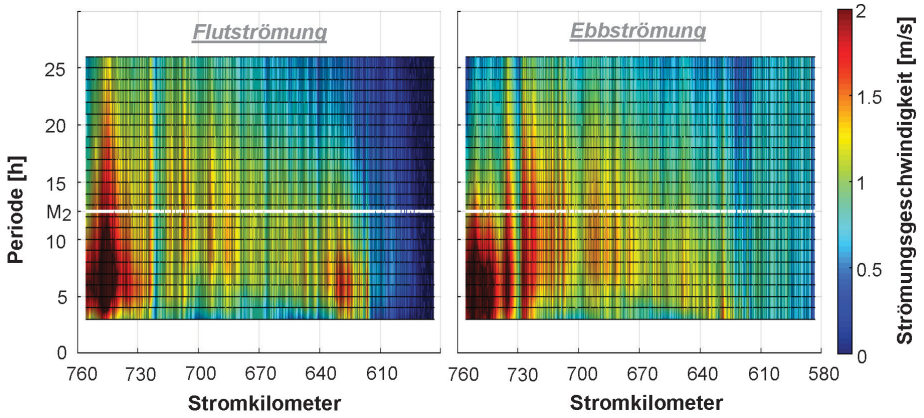

Abbildung 7: Simulierte Maxima der Geschwindigkeiten der Flutströmung (links) und der Ebbströmung (rechts) entlang des Fahrwassers der Tideelbe 2010 durch die Norderelbe in Abhängigkeit von der Periode der Anregung mit Markierung der M_2-Periode (weiße Linie).

Generell nehmen die Beträge der Strömungsgeschwindigkeiten mit wachsendem Abstand zur Mündung ab. Darüber hinaus hängen die Geschwindigkeiten von der Periode der Anregung, der Strömungsrichtung und der Bathymetrie ab.

Neben der Stärke der Strömungen ist v. a. die Differenz der maximalen Flut- und Ebbströmungsgeschwindigkeiten, die resultierende Strömungsgeschwindigkeit, eines jeden Ortes von Interesse, denn diese prägt den Residualtransport gröberer Sedimente in Suspension (DRONKERS 1986). Eine positive resultierende Strömungsgeschwindigkeit charakterisiert den jeweiligen Flussabschnitt als flutströmungsdominiert während eine negative resultierende Strömungsgeschwindigkeit Ebbströmungsdominanz indiziert (Abb. 8).

Die Außenelbe ist zwischen den Stromkilometern 735 und 750 unabhängig von der Periode der Anregung klar flut- sowie zwischen den Stromkilometern 715 und 725 ebbströmungsdominiert. Darüber hinaus wird eine deutliche Flutströmungsdominanz der Stromkilometer 615 bis 640 ersichtlich. Dieser wird der Transport großer Mengen Sedimentes in den Hamburger Hafen zugeschrieben. Sie fällt unter Perioden kürzer derer der M_2 maximal aus. Dieser Bereich unterliegt also stets einer Flutströmungsdominanz, deren Ausprägung jedoch je nach Mondphase variiert. Die Stromkilometer 580 bis 615 stromauf der Sohlsprünge des Hamburger Hafens weisen einen kleineren Querschnitt auf, wodurch der Oberwasserzufluss hier einen größeren Einfluss auf die Strömungen ausübt. Der Großteil der Gezeitenenergie wird bereits vor Erreichen dieses Flussabschnittes dissipiert bzw. reflektiert, so dass die maximalen Beträge der hier auftretenden Flut- und Ebbströmungsgeschwindigkeiten gering sind. Zu deren geringer Differenz addiert sich die negative Strömungsgeschwindigkeit des Oberwasserzuflusses, weshalb dieser Flussabschnitt eine deutlich negative resultierende Strömungsgeschwindigkeit aufweist.

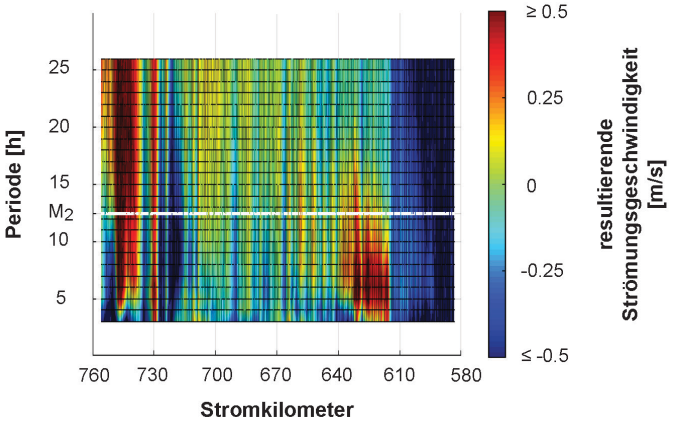

Abbildung 8: Simulierte resultierende Strömungsgeschwindigkeit der Tideelbe 2010 entlang des Fahrwassers durch die Norderelbe mit Markierung der Periode der M_2-Gezeit (weiße Linie).

Weder die Periodogramme der Strömungsgeschwindigkeiten noch jenes der resultierenden Strömungsgeschwindigkeit weisen eine besondere Ausprägung unter der zuvor ermittelten Eigenperiode von 20,5 Stunden auf (siehe Kap. 4.1). Vergleiche der vier zur Verfügung stehenden Jahre zeigen, dass beide Parameter Veränderungen erfahren haben, die sich jedoch unstetig und daher ohne Analogie zu der Entwicklung der Fahrrinnentiefe vollzogen haben (HARTWIG 2016). Auf die Abbildung dieser Vergleiche wird hier aus Platzgründen verzichtet.

Parallel zur Zunahme der Fahrrinnentiefe vollzog sich im Gegensatz zu den Strömungsgeschwindigkeiten eine Veränderung der Strömungsdauern (Abb. 9).

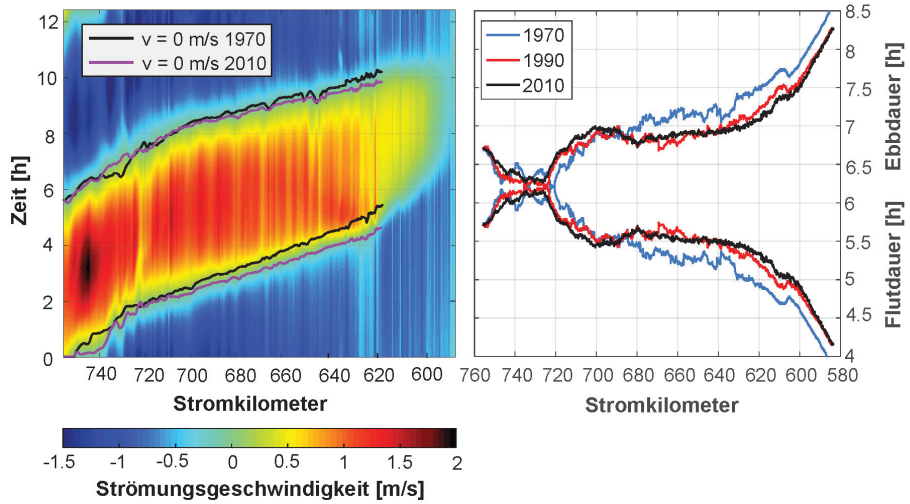

Abbildung 9: Simulierte Strömungsgeschwindigkeit entlang des Fahrwassers der Tideelbe 2010 während einer M_2-Periode mit den Kenterpunkten von 1970 und 2010 (links) und simulierte Flut- und Ebbdauern entlang des Fahrwassers der Tideelbe 1970, 1990 und 2010 (rechts).

Die Darstellung der Strömungsgeschwindigkeiten in Form eines Hovmöller-Diagrammes offenbart eine Verlagerung der Kenterpunkte zwischen 1970 und 2010 (Abb. 9 links). Entlang der unteren Tideelbe findet 2010 die Kenterung der Strömungsrichtung mit wachsender Entfernung von der Außenelbe gegenüber 1970 zunehmend früher statt. Vor allem die Flutströmung setzt hier früher ein. Es resultiert eine Zunahme der Flutdauer. Eine genauere Bezifferung der Flut- und Ebbdauern der Modellergebnisse (Abb. 9 rechts) zeigt eine während der Jahre 1970, 1990 und 2010 fortwährende Zunahme der Flutdauer von bis zu 30 min in und stromabwärts von Hamburg sowie eine entsprechende Verkürzung der Ebbdauer. Um den Pegel Krautsand (Stromkilometer 670) betrug die Verlängerung der Flutdauer zwischen 1970 und 1990 ebenfalls bis zu 30 min, erfuhr bis 2010 jedoch wieder eine Verkürzung um bis zu 10 min. Messdaten bestätigen diese Aussagen generell (HARTWIG 2016). Die Kurven von 2003 ähneln denen von 2010 und werden hier zu Gunsten der Übersichtlichkeit nicht abgebildet.

Die Flutdauer im Bereich von Hamburg erfuhr zwischen 1970 und 1990 eine deutliche sowie zwischen 1990 und 2003 eine geringe Zunahme und blieb zwischen 2003 und 2010 konstant. Die Veränderungen verliefen somit in einem Verhältnis zueinander, analog zu jenem der Entwicklung der Fahrinnentiefe.

4.3 Beschleunigungen

Die Strömungen entlang der Tideelbe unterliegen kontinuierlichen Veränderungen im Takt der Gezeiten. Die Veränderung einer Bewegung entspricht physikalisch einer Beschleunigung. Die Darstellung der Strömung in Richtung des Fahrwassers und der resultierenden Beschleunigung in Form von Hovmöller-Diagrammen ermöglicht ein genaueres Verständnis der zeitlichen Abläufe (Abb. 10).

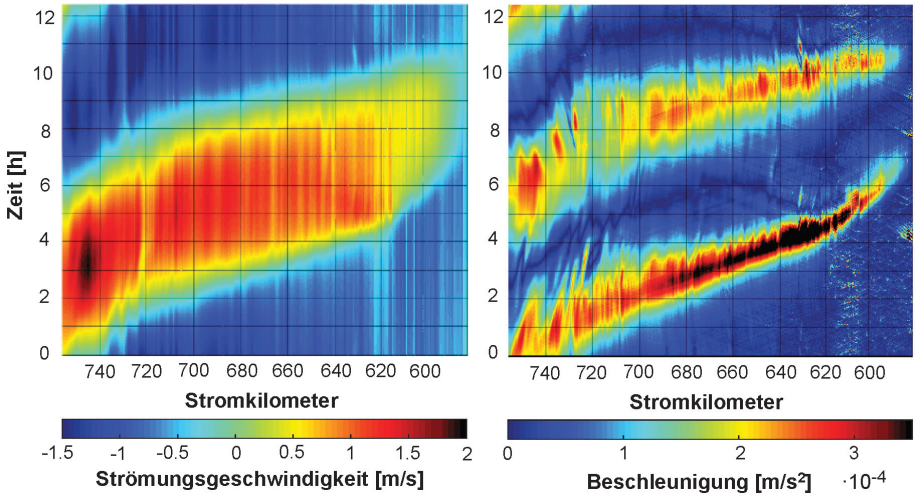

Abbildung 10: Simulierte Strömungsgeschwindigkeiten (links) und resultierende Beschleunigungen (rechts) entlang und in Richtung des Fahrwassers der Tideelbe 2010 durch die Norderelbe während einer M_2-Periode.

Es zeigt sich, dass das Auftreten von Beschleunigungen in Richtung des Fahrwassers auf kurze Intervalle beschränkt ist. Während die meiste Zeit Beträge der Größenordnung 10^{-5} m/s² vorherrschen, steigen diese während des Wechsels von Ebbe zu Flut um eine und vereinzelt auch um zwei Größenordnungen an. Die simulierten Beschleunigungen um den Kenterpunkt von der Ebb- zur Flutströmung beschränken sich mit wachsendem Abstand zur Mündung bei steigenden Beträgen auf immer kürzere Intervalle und nehmen kurz vor Hamburg ihr Maximum von $2{,}6 \cdot 10^{-3}$m/s² an. Im Folgenden wird ihre Entwicklung auf Analogien mit den Vertiefungen der Fahrrinne hin untersucht (Abb. 11).

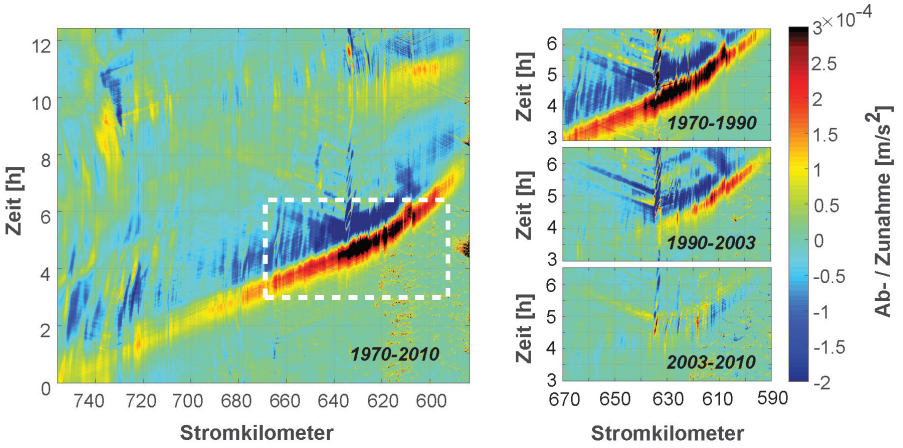

Abbildung 11: Entwicklung der Beschleunigungen entlang des Fahrwassers der Tideelbe von 1970 bis 2010 mit Markierung der maximalen Veränderungen (links) und Entwicklung des markierten Bereiches von 1970 bis 1990, 1990 bis 2003 und 2003 bis 2010 (rechts).

Der sich über etwa 3,5 Stunden zwischen den Stromkilometern 590 und 670 erstreckende Dipol aus Zunahme und Abnahme der Beschleunigung (Abb. 11 links, Markierung) hat seine Ursache in dem zunehmend früheren Einsetzen der Flutströmung (siehe Abb. 9). Die durchschnittliche Beschleunigung pro Gitterpunkt dieses Bereichs weist eine Zunahme auf, jedoch verläuft diese nicht kontinuierlich. Von 1970 bis 1990 zeigt sich eine deutliche Zunahme der durchschnittlichen Beschleunigung von $1{,}02 \cdot 10^{-4}$m/s² auf $1{,}17 \cdot 10^{-4}$m/s² (Abb. 11 rechts). Diese resultiert aus einer Verstärkung des Maximums bei gleichzeitiger Verlagerung hin zu einem früheren Einsetzen. Eine Auffälligkeit ist dabei die Entstehung mehrerer zeitlich nacheinander auftretender lokal beschränkter extremer Beschleunigungen von kurzer Dauer, die im Bereich von Blankenese bei Stromkilometer 633 auftreten. Bis 2003 setzt sich die Verlagerung des Beschleunigungsmaximums fort, wobei ebenfalls eine zusätzliche Verstärkung auftritt. Da jedoch die sich zeitlich wiederholenden Extrema bei Stromkilometer 633 wieder vollständig verschwunden sind, sinkt der Durchschnittswert des betrachteten Bereiches auf $1{,}07 \cdot 10^{-4}$m/s². Zwischen 2003 und 2010 schließlich ist keine deutliche zeitliche Verlagerung des Maximums mehr zu erkennen. Der Durchschnittswert steigt jedoch auf $1{,}12 \cdot 10^{-4}$ m/s².

Eine exakte Bezifferung der Beschleunigungen ist problematisch. Die Durchschnittswerte werden dadurch verzerrt, dass zum einen die Extremwerte ein bis zwei Größenordnungen höher ausfallen und zum anderen variable lang andauernde lokale Extrema auftreten. Bezieht man die im Jahr 1990 im Bereich des Stromkilometers 633

auftretenden lokalen Extrema nicht mit ein, so ist eine fortwährende Zunahme der durchschnittlichen Beschleunigung zu erwarten. Anhand der Diagramme (Abb. 11 rechts) lässt sich abschätzen, dass sich diese Verstärkung größtenteils zwischen 1970 und 1990 und zu einem geringeren Teil zwischen 1990 und 2003 vollzog, während sich zwischen 2003 und 2010 nur minimale Veränderungen ergaben. Demnach verliefen die Verstärkungen der Beschleunigungen im gleichen Verhältnis zueinander wie die Vertiefungen der Fahrrinne.

Die gezeigten Beschleunigungen sind gleichbedeutend mit Veränderungen der Strömungsgeschwindigkeit und sie treten um die Kenterpunkte der Strömungsrichtung auf. Besteht eine Asymmetrie zwischen beiden Kenterpunkten, so dass die Geschwindigkeitsveränderung von der Flut- zur Ebbströmung langsamer stattfindet als von der Ebb- zur Flutströmung, begünstigt dies einen landeinwärts gerichteten Residualtransport feiner Sedimente in Suspension (DRONKERS 1986). Eine eben solche Asymmetrie wurde hier nachgewiesen (Abb. 10 rechts). Ihre ebenfalls gezeigte Verstärkung (Abb. 11) erklärt folglich eine Zunahme des landeinwärts gerichteten Residualtransportes.

4.4 Reflektoren der Tidewelle

Ein integraler geometrischer Aspekt eines jeden Oszillators sind seine reflektierenden Enden. Im Falle der Tideelbe lassen sich mehrere potentielle Reflektoren der Tidewelle im Bereich Hamburgs identifizieren. Um ihren jeweiligen Einfluss auf die Resonanz abschätzen zu können, wurden sie schrittweise aus der Topographie entfernt und das Modell auf die so reduzierte Topographie angewendet (Abb. 12).

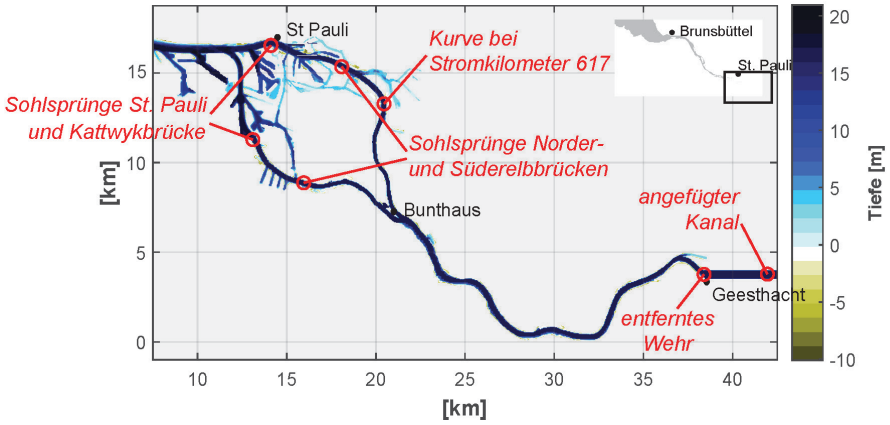

Abbildung 12: Ausschnitt der Modelltopographie nach Entfernung aller Sohlsprünge, Entfernung des Wehres Geesthacht und Anfügen eines Kanals abnehmender Tiefe mit Markierungen der potentiellen Reflektoren der Tidewelle.

Zuerst wurden die Sohlsprünge Norder- und Süderelbbrücken sowie das Wehr Geesthacht aus der Topographie entfernt. Dies geschah durch eine konstante Vertiefung von stromabwärts der Sohlsprünge bis nach Geesthacht auf diejenige Tiefe, die stromabwärts der Sohlsprünge vorliegt sowie das Anfügen eines 200 km langen nach Osten verlaufenden Kanals abnehmender Tiefe. Dieser diente zur Dissipation der Wellenenergie. In der

zweiten Simulation folgte die zusätzliche Entfernung der Sohlsprünge St. Pauli und Kattwyk-Brücke wiederum auf die Tiefe, die stromabwärts dieser Sohlsprünge zu finden ist. In einer dritten Simulation wurde die zusätzliche Entfernung der Flussbiegungen von Norder- und Süderelbe simuliert. Hierzu wurde die Süderelbe entfernt und die Norderelbe ab St. Pauli durch den nach Osten verlaufenden Kanal abnehmender Tiefe ersetzt.

Die Ergebnisse der Simulationen (Abb. 13 links) schreiben der Reflexion allein in den Kurven von Norder- und Süderelbe rund 1 m des Hamburger Tidenhubs zu. Die Reflexionen an den Sohlsprüngen St. Pauli und Kattwyk-Brücke erhöhen den Tidenhub um 20 cm sowie diejenige an den Sohlsprüngen Elbrücken und dem Wehr um weitere 30 cm. Das Maximum des Tidenhubs entlang der Norderelbe liegt mit wie auch ohne Sohlsprünge bei Stromkilometer 617, was für eine Dominanz dieser Reflexionsstelle gegenüber allen anderen spricht. Hier weist der Verlauf der Norderelbe eine Biegung von geringem Radius auf, in der der Großteil der kurvenbedingten Reflexion stattfindet. Der mündungsnahe Schwingungsbauch bleibt während aller Simulationen erhalten. Die Kurve der letztgenannten Simulation endet auf Höhe von St. Pauli, da der reale Verlauf der Norderelbe von hier an durch den Kanal abnehmender Tiefe ersetzt wurde. Aus der unveränderten Lage des Knotenpunktes am Stromkilometer 684 lässt sich schließen, dass an keinem dieser Reflektoren ein nennenswerter Phasensprung stattfindet. Die Ergebnisse wurden im Rahmen einer zweiten Reihe von Simulationen verifiziert, während derer die Modifikationen in anderer Reihenfolge vorgenommen wurden (HARTWIG 2016).

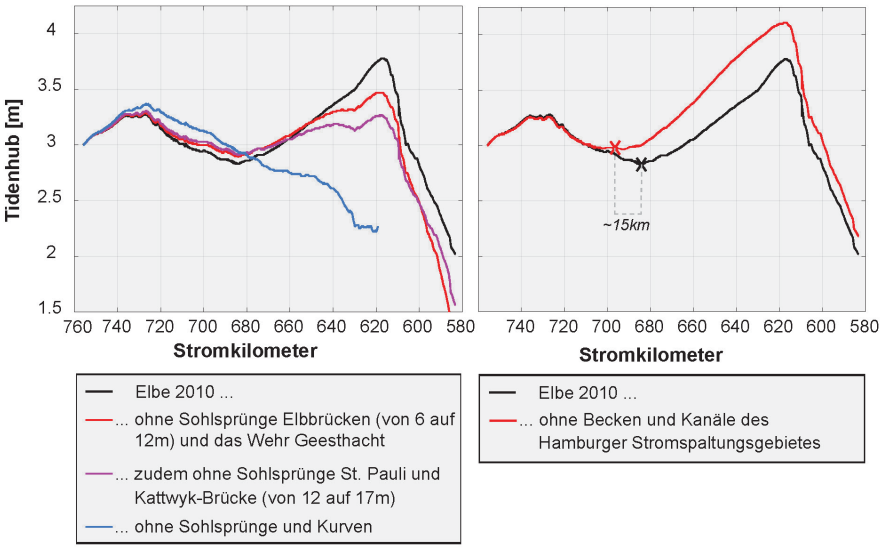

Abbildung 13: Simulierte Tidenhübe der Elbe 2010, ohne Sohlsprünge Elbbrücken, ohne Sohlsprünge des Hamburger Hafens, ohne Sohlsprünge und Flussbiegungen des Bereichs Hamburg (links) und der Elbe 2010 sowie ohne Kanäle und Becken des Hamburger Hafens (rechts) mit Markierung der Knotenpunkte (Kreuze), jeweils entlang der Fahrrinne durch die Norderelbe.

Zuletzt folgt die Betrachtung des Einflusses der Hafenbecken und Kanäle auf das Tidegeschehen (Abb. 13 rechts). Hierzu wurden diese aus der Topographie entfernt, unter Beibehaltung aller Sohlsprünge und Flussbiegungen. Es zeigt sich, dass die Becken und Kanäle des Hamburger Hafens keinerlei Reflexion bewirken, sondern im Gegenteil einen

erheblichen Teil der Gezeitenenergie dissipieren. Sie dämpfen den Tidenhub um 33 cm. Zudem wandert der Knotenpunkt ohne ihr Wirken um etwa 15 km in Richtung der Mündung, folglich verursachen sie eine Phasenverschiebung. Tritt bei der Reflexion einer einfallenden Welle eine Phasenverschiebung φ auf, so ist die aus der einfallenden und der verschobenen reflektierten Welle resultierende stehende Welle phasenverschoben um $\varphi/2$. Die Verschiebung des Knotenpunktes um etwa 15 km bedeutet folglich, dass eine Phasenverschiebung der reflektierten Welle von etwa 30 km auftritt, bzw. ein Phasensprung von 32° bezüglich der errechneten Wellenlänge $\lambda_{M2} = \tau_{M2} \cdot \sqrt{gh} =$ 337 km, was mittels der Laufzeittiefe $h =$ 5,8 m (s. Kap. 4.1) aus Glg. (3) folgt. Nimmt man den Ort der größten Reflexion, den Stromkilometer 617, als Ende des Oszillators, liegt der Knotenpunkt ohne den Einfluss der Becken und Kanäle des Hamburger Hafens bei Stromkilometer 700 gerade in einem Abstand von 83 km $\approx \lambda_{M2}/4 =$ 84,25 km zu diesem Ende, stimmt also nach Glg. (1) sehr gut mit der Theorie eines resonanten Ästuars überein.

4.5 Weitere Annäherung an die Erfüllung des Resonanzkriteriums

Volle Resonanz mit der M_2-Gezeit läge nach Glg. (3) genau dann vor, wenn die Eigenperiode der Tideelbe 12,42 Stunden betrüge. Eine beginnende Resonanz tritt jedoch schon vor der vollen Erfüllung des Resonanzkriteriums auf (siehe Kap. 2.3). Seit 1970 geht eine Verringerung der Eigenperiode in Richtung der M_2-Periode mit einem Anstieg der Tidenhübe einher. Ist dieser Anstieg durch eine Zunahme der Resonanz bedingt, muss eine weitere Verringerung der Eigenperiode, also eine zunehmende Erfüllung des Resonanzkriteriums, die Resonanz und somit die Tidenhübe weiter verstärken. Ein Weg, die Eigenperiode zu verringern, besteht in der Erhöhung der integralen Tiefe, z. B. durch eine Erhöhung des Wasserstandes im Zuge eines meteorologischen Ereignisses. Die Auswirkungen solcher Änderungen von $\pm$ 0,35 m wurden unter Verwendung des hydrodynamisch-numerischen Modells mit der Topographie von 2010 ermittelt (Abb. 14).

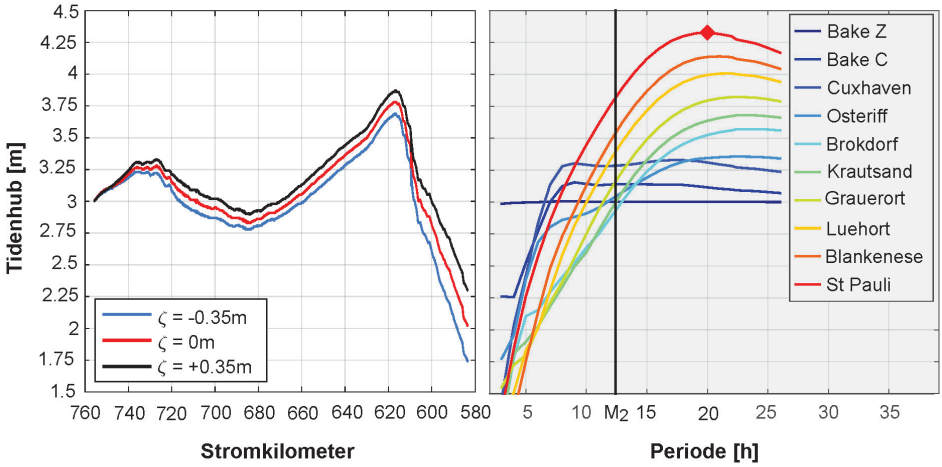

Abbildung 14: Simulierter Tidenhub entlang des Fahrwassers der Tideelbe 2010 sowie für Wasserstandsänderungen von $\pm$ 0,35 m (links) und Periodogramm der Tideelbe 2010 mit Wasserstandserhöhung von 0,35 m (rechts).

Aus der Zunahme der integralen Tiefe um 0,35 m resultieren sowohl Anstiege der Tidenhübe um 5 cm auf Höhe von Cuxhaven und 9 cm bei Stromkilometer 617 (Abb. 14 links) als auch eine Verringerung der Eigenperiode um weitere 0,5 Stunden (Abb. 14 rechts). Also geht eine weitere Annäherung an die Erfüllung des Resonanzkriteriums mit einem weiteren Anstieg der Tidenhübe einher. Im Gegenschluss muss eine Verringerung des mittleren Wasserstandes das Resonanzkriterium von seiner Erfüllung entfernen. In Übereinstimmung mit dieser Annahme produziert das Modell unter diesen Voraussetzungen eine Verringerung der Tidenhübe.

Auch der Bau einer Tidebarriere kann die Eigenperiode verringern, bedingt durch die Reduzierung der Länge des Oszillators und deren Proportionalität zur Eigenperiode (siehe Glg. (3)) (Abb. 15). Die Modellergebnisse der Simulation einer Tidebarriere auf Höhe von Teufelsbrück (Stromkilometer 630) zeigen, dass ein solches Bauwerk die Tidenhübe um 70 cm steigen lässt und den Knotenpunkt in Richtung der Mündung versetzt (Abb. 15 links) sowie die Eigenperiode um 4,5 auf 16 Stunden reduziert (Abb. 15 rechts).

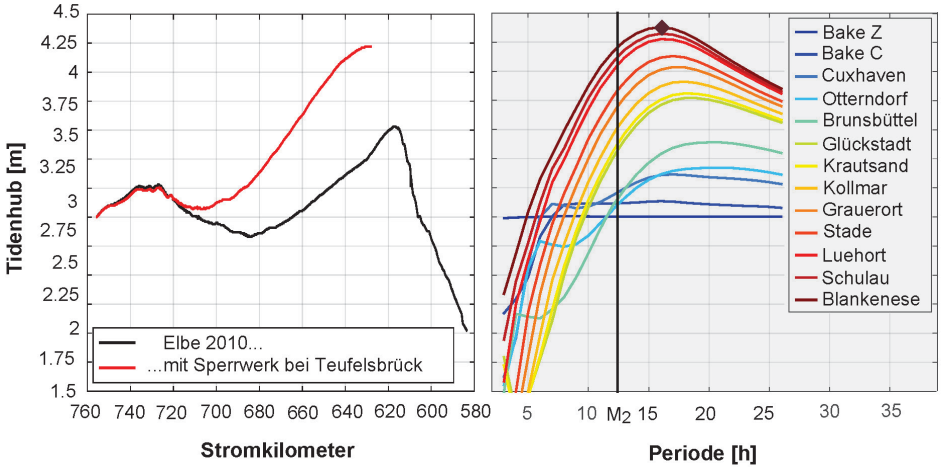

Abbildung 15: Simulierter Tidenhub entlang des Fahrwassers der Tideelbe 2010 sowie mit Tidebarriere auf Höhe von Teufelsbrück (links) und Periodogramm der Tideelbe 2010 mit Tidebarriere auf Höhe von Teufelsbrück (rechts).

Beide Simulationen zeigen übereinstimmend, dass eine zunehmende Erfüllung des Resonanzkriteriums mit einer Verstärkung der resonanten Charakteristika einhergeht.

5 Schlussfolgerungen

Es wurde gezeigt, dass die Tideelbe seit 1970 im Zuge zweier Fahrrinnenanpassungen einen Anstieg der Tidenhübe und eine Verringerung ihrer Eigenperiode von 25,55 auf 20,50 Stunden erfahren hat. Die Theorie besagt, dass sich im Falle einer weiteren Verringerung um 8 Stunden die Tideelbe in voller Resonanz mit der M_2-Gezeit befände, was maximale Tidenhübe zur Folge hätte. Die Frage, ob die heutige Tidedynamik bereits in beginnender Art und Weise von dieser Resonanz beeinflusst wird, ist ein Streitpunkt.

Dass seit den 1970er Jahren jede zunehmende Erfüllung des Resonanzkriteriums mit einer weiteren Verstärkung der anregenden Gezeit einhergeht, deutet jedoch darauf hin.

Für den Nachweis einer Resonanz wurden Vertiefungen und Verkürzungen der Tideelbe von 2010 simuliert, die das Resonanzkriterium der Erfüllung näherbringen. Die Ergebnisse dieser Simulationen weisen eine Verstärkung der bereits vorhandenen resonanten Charakteristika auf. Dies lässt den Schluss zu, dass durch die Modifikationen tatsächlich eine Resonanz verstärkt wurde. Die Verstärkung einer Resonanz impliziert, dass bereits eine zumindest latente Resonanz vorliegt. Die Ausdehnung des Eigenspektrums von 2010 deutet darauf hin, dass sich die Tideelbe tatsächlich in latenter Resonanz sowohl mit den halbtägigen als auch mit den ganztägigen Gezeiten befindet.

Die Simulation einer Tidebarriere stromab des Hamburg Hafens führt sowohl zu einer deutlichen Erhöhung der Tidenhübe als auch zu einer Verlagerung des Knotenpunktes in Richtung der Außenelbe. Beides bedeutet eine Verstärkung resonanter Charakteristika (siehe Abb. 2). Folglich dämpft der Hamburger Hafen die Resonanz. Die Simulation der Schließung der Becken und Kanäle des Hamburger Stromspaltungsgebietes zeigt, dass eben diese die Dämpfung der Resonanz hervorrufen.

Eine Untersuchung der Strömungen zeigt eine allgemeine Frequenzabhängigkeit sowie eine starke räumliche Variabilität mit einer Aufteilung in flut- und ebbströmungsdominierte Bereiche. Es wurde keine besondere Ausprägung unter einer Anregung der Eigenperiode und folglich kein Zusammenhang mit der Resonanz ersichtlich. Auch konnte keine Entwicklung aufgezeigt werden, die zeitlich parallel zu den Vertiefungen verlief.

Gemeinsam mit den Fahrrinnenanpassungen verlief hingegen eine Verlängerung der Flut- und Verkürzung der Ebbdauer vom Knotenpunkt bei Brokdorf bis nach Hamburg. Die Verlängerung der Flutdauer von bis zu 30 Minuten kann einen stromaufwärtigen Residualtransport von Schwebstoffen begünstigen. In der Tat stiegen die Mengen der Unterhaltungsbaggerungen entlang der gesamten Unterelbe während der 1970er Jahre an, wobei sich ein Schwerpunkt dieser Maßnahmen seit dem letzten Ausbau der Fahrrinne 1999/2000 in den Hamburger Hafen verschoben hat (HPA und WSV 2008), was sich mit den gewonnenen Erkenntnissen deckt (siehe Abb. 9 rechts).

Ein weiterer Zusammenhang zu den Vertiefungen wurde bezüglich einer Veränderung in der Periodizität der Strömungsverläufe entlang des Fahrwassers offenbar. Der Wechsel zwischen den Strömungsrichtungen stellt physikalisch eine Beschleunigung dar. Diese überwiegt deutlich um den Kenterpunkt von der Ebb- zur Flutströmung und nimmt von der Mündung in Richtung Hamburg stetig zu. Die Asymmetrie zwischen den Beschleunigungen beider Kenterpunkte begünstigt einen landeinwärts gerichteten Residualtransport feiner Sedimente in Suspension (DRONKERS 1986). Die Beschleunigung erfuhr im Zuge der Fahrrinnenanpassungen eine Verstärkung, was folglich eine mögliche Erklärung für die Zunahme des stromaufwärtigen Residualtransportes darstellt.

Zusammengefasst vollzogen sich parallel zu den Vertiefungen der Fahrrinne eine weitere Annäherung an das Resonanzkriterium durch eine Verringerung der Eigenperiode, Anstiege der Tidenhübe, Verkürzungen der Ebb- und Verlängerungen der Flutdauer sowie eine Beschleunigung der Kenterung von der Ebb- zur Flutströmung.

Wie gezeigt wurde, ist die Tiefe der Tideelbe eng verknüpft mit ihrer Eigenperiode. Diese wiederum ist gemeinsam mit den unveränderlichen Perioden der anregenden Gezeiten ausschlaggebend für das Ausmaß der Resonanz. Weitere Vertiefungen der Fahrrinne werden die Eigenperiode weiter verringern. Dies bedeutet eine weitere Annäherung

an das Resonanzkriterium. Es muss damit gerechnet werden, dass sich die Prozesse, die hiermit in Verbindung gebracht werden konnten, in Folge dessen ebenfalls verstärken.

6 Schriftenverzeichnis

ARAKAWA, A. and LAMB, V.R.: Computational Design of the Basic Dynamical Processes of the UCLA General Circulation Models of the Atmosphere, 1977.

BACKHAUS, J.O.: Introduction to Modelling of Ocean Physics, Script of a two-hourly Lecture with exercises, ZMAW, University of Hamburg, Wintersemester, 2012.

BACKHAUS, J.O.: Latent Resonance on Tidal Rivers – With applications to River Elbe. Journal of Marine Systems (accepted with minor revisions), 2015.

BACKHAUS, J.O.; HÜBNER, U. und PÄTSCH, J.: Dynamik und Ökologie von Schelfmeersystemen – HAMSON und ECOHAM.
Stand 30.05.2016: https://www.ifm.uni-hamburg.de/research/shelf-dynamic.html

BAW: Gutachten zur ausbaubedingten Änderung der morphodynamischen Prozesse: Fahrrinnenanpassungen Unter- und Außenelbe – Transportprozesse und Morphodynamik, BAW-Nr. A3955 03 10062, Seite VI – H1 c, August 2006.

BOEHLICH, M.J.: Tidedynamik der Elbe, Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau Nr. 86, S. 55–60, 2003.

DEFANT, A.: Physical oceanography. Pergamon Press, New York, 1961.

DIETRICH, G.; KALLE, K.; KRAUSS W. und SIEDLER, G.: Allgemeine Meereskunde, Gebr. Borntraeger, Berlin-Stuttgart, 1975.

DRONKERS, J.: Tidal Asymmetry and Estuarine Morphology, Netherlands Journal of Sea Research, Heft 20 (2/3), 117–131, 1986.

GODIN, G.: On tidal resonance. Continental Shelf Research 13, 89–107, 1993.

HARTWIG, F.: Resonanz in Tideflüssen mit Anwendung auf die Elbe. Diplomarbeit. Institut für Meereskunde der Universität Hamburg, 2016.

HPA und WSV: Strombau- und Sedimentmanagementkonzept für die Tideelbe, 2008.

HPA; WSA HAMBURG; WSA CUXHAVEN und WSA LAUENBURG: Tidehochwasser-, Tideniedrigwasser- und Tidenhubdaten der Pegel Bake A, Bake C, Blankenese, Brokdorf, Brunsbüttel Mole 4, Bunthaus, Cuxhaven-Steubenhöft, Glückstadt, Grauerort, Harburg, Kollmar, Krautsand, Lühort, Osteriff, Otterndorf, Over, Schöpfstelle, Schulau, Seemannshöft, Stadersand, St. Pauli, Wehr Geesthacht UP, Zollenspieker.
Stand 22.02.2016: http://www.portal-tideelbe.de/

MALCHAREK, A.: Gezeiten und Wellen. Vieweg+Teubner, 2010.

PROJEKTGRUPPE STROMBAU: Bericht zum ganzheitlichen Strombau- und Sedimentmanagementkonzept für die Unter- und Außenelbe (unveröffentlicht), 2007.

PROUDMAN, J.: Dynamical Oceanography. Pergamon, 1953.

ROHDE, H.: Eine Studie über die Entwicklung der Elbe als Schifffahrtsstraße; Mitteilungen des Franzius-Instituts für Grund- u. Wasserbau, Technische Universität Hannover, Heft 36, 17–241, 1971.

WSV und WSA HAMBURG: Umweltverträglichkeitsuntersuchung zur Anpassung der Fahrrinne der Unter- und Außenelbe an die Containerschiffahrt, Abschnitt 8.2.5 Grundwasser, 1997.

Die Küste, 84 (2016), 1-226

33rd International Conference on Ocean, Offshore & Arctic Engineering in San Francisco, USA

Markus Brühl

1 Einleitung

Die 33. Konferenz der American Society of Mechanical Engineers (ASME) zum Thema „Ocean, Offshore and Arctic Engineering" fand vom 8. bis 13. Juni 2014 in San Francisco, Kalifornien, USA, statt. Die OMAE-Konferenzreihe wird seit 1982 von der "Ocean, Offshore and Arctic Engineering Divison (OOAE)" innerhalb der ASME als jährliche Konferenz organisiert. Von 1982 bis 2008 trug die Konferenz den Titel „Offshore Mechanics and Arctic Engineering" und wurde 2009 in „Ocean, Offshore and Arctic Engineering" umbenannt. Das Akronym „OMAE" wurde jedoch beibehalten, da es sich als bekannter Begriff in den entsprechenden Fachkreisen etabliert hatte.

Die Konferenz fand in den ersten Jahren regelmäßig in den Vereinigten Staaten statt, doch mittlerweile liegen die Konferenzorte in Nord- und Südamerika, Europa und Asien. Unterstützt wird die OOAE hierbei jeweils von lokalen Einrichtungen aus Wissenschaft und Industrie. Den Vorsitz über die Konferenz führten im Jahr 2014 Professor Ronald W. Yeung von der University von Berkeley und Dr. Dominique Roddier von Marine Innovation & Technology.

2 Konferenzort

Die OMAE2014 fand im Palace Hotel in der Innenstadt von San Francisco statt. Die Stadt liegt an der Westküste der Vereinigten Staaten direkt am Pazifischen Ozean und ist mit ca. 800.000 Einwohnern die viertgrößte Stadt Kaliforniens. Gleichzeitig ist die auf der nördlichen Spitze der San-Francisco-Halbinsel gelegene Innenstadt aber angenehm klein, so dass alle wichtigen Orte und Sehenswürdigkeiten entweder in fußläufiger Entfernung liegen oder mit dem öffentlichen Nahverkehr sehr gut zu erreichen sind. Besondere Höhepunkte sind die Fahrt mit den aus dem Fernsehen und alten Krimiserien bekannten „Cable-Cars", die die zum Teil sehr steilen Berge in der Innenstadt überwinden sowie ein Besuch von Chinatown, einem der größten Chinesenviertel außerhalb Chinas.

3 Review-Prozess und Konferenzpräsentationen

Im Vorfeld der Konferenz wurden 1561 Abstracts (max. 400 Worte, nur Text) für die insgesamt 12 Symposien eingereicht. Anhand der Abstracts erfolgt eine vorläufige Annahme des geplanten Beitrags. Nach erfolgter Annahme des Abstracts mussten – ebenfalls vor der Konferenz – die Konferenzbeiträge zunächst als „full-length draft paper" eingereicht werden. Diese wurden jeweils von zwei Gutachtern gelesen und mit Anmerkungen, Korrekturvorschlägen und einer Bewertung versehen. Unter Beachtung dieser Hinweise musste dann das „revised paper" eingereicht werden. Nach erfolgter Freigabe der Korrekturen bzw. falls keine Korrekturen erforderlich waren, wurde schließlich das

„final paper“ eingereicht. Die Beiträge zur OMAE fallen unter die ASME-Kategorie „Technische Publikation“ und dürfen max. 10 Seiten lang sein. Jeder Autor darf zwei Beiträge einreichen und auf der Konferenz präsentieren. Nach Abschluss dieses Peer-Review-Prozesses wurden schließlich 965 Beiträge in den digitalen Proceedings auf DVD veröffentlicht und den Teilnehmern mit den Konferenzunterlagen ausgehändigt. Trotz dieser hohen Anforderungen und des Peer-Review-Prozesses werden OMAE-Paper jedoch leider in der Regel nicht als „peer-reviewed“ betrachtet, sondern mit Konferenzen ohne Peer-Review auf eine Stufe gestellt.

4 Teilnehmer

Die über 1000 Teilnehmer an der OMAE2014 kamen aus aller Welt, hauptsächlich jedoch aus Nord- und Südamerika und Europa. Aufgrund der Entstehungsgeschichte der Konferenz als Symposium für Offshore Mechanics ist die Erdöl- und Erdgasindustrie von jeher dort sehr stark vertreten, um sich dort über neue Fördertechniken, -verfahren und technische Neuerungen auszutauschen. Gleichzeitig ist dort auch die Forschung durch Universitäten, private Forschungsinstitute und die Forschungsabteilungen der Energiekonzerne sehr stark vertreten. Diese Mischung aus Industrie und Forschung macht den Besuch der Konferenz zu einem unvergleichlichen Erlebnis und führt dazu, dass beide Seiten sich intensiv austauschen und über den jeweiligen Tellerrand blicken.

Innerhalb der ASME waren die Abteilungen „Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE)“ und „Ocean Engineering (OE)“ ursprünglich getrennt voneinander und wurden dann zur „Ocean, Offshore and Arctic Engineering Division (OOAE)“ zusammengeschlossen. Als Folge dieser Fusion findet seit 2002 innerhalb der Konferenz auch das Ocean Engineering Symposium statt, das sich u.a. auch mit Fragen zur Wellenmechanik, Wellenanalyse und zum Küsteningenieurwesen auseinander setzt und die Fachleute auf diesem Gebiet jährlich zusammenführt.

Neben den Konferenzpräsentationen gibt es jeweils auch eine Fachausstellung mit Vertreten der Erdöl- und Gasindustrie, Anbietern von Software zur numerischen Simulation hydraulischer Problemstellungen, Herstellern von Messtechnik, Instituten für hydraulische Modellversuche und Ingenieurbüros.

5 Nachwuchsförderung

Im Rahmen der OMAE-Konferenzreihe gibt ein spezielles Programm zur Nachwuchsförderung, das *Outreach for Engineers Specialty Forum*. Das Programm richtet sich an Bachelor- und Masterstudenten, Doktoranden und Berufseinsteiger aus den Ingenieur- und Naturwissenschaften, die Interesse an den Konferenzinhalten, besonders aber an der Öl- und Gasindustrie sowie der Meerestechnik haben. Das Outreach-Forum findet jeweils parallel zur OMAE-Konferenz statt und bietet den Teilnehmern die Teilnahme an der Konferenz sowie einige Zusatzveranstaltungen zur Netzwerkbildung. Das Outreach-Forum wird von der Industrie finanziert, die auf diese Weise Nachwuchswerbung betreibt. Informationen zum Outreach-Form sowie zur Beantragung der Stipendien sind auf der jeweiligen Konferenzwebseite zu finden.

Das Forum vergibt Stipendien für die Konferenzteilnahme. Stipendieninhaber nehmen an den Outreach-Veranstaltungen teil und können kostenlos die Konferenz

besuchen. Die Konferenzgebühr für Studenten betrug in 2014 $ 400 bei Frühbuchung. Wird ein Konferenzbeitrag präsentiert ist auch für Studenten eine reguläre Registrierung erforderlich, die (jeweils bei Frühbuchung) für ASME-Mitglieder $ 995 und für Nicht-Mitglieder $ 1.300 kostet. Diese Kosten entfallen bei der Erteilung eines Stipendiums. Zusätzlich besteht die Möglichkeit neben der Konferenzteilnahme auch Reisestipendien zu beantragen, die jedoch in geringerer Anzahl vergeben werden.

6 Konferenzinhalte

Vor dem eigentlichen Konferenzbeginn am Sonntagabend werden am Wochenende eintägige Kompaktkurse angeboten. In 2014 waren dies die vier Kurse „Marine Reneable Energy", „Vortex-induced Vibrations", „Transportation Engineering" und „Fundamentals of Deepwater Riser Engineering". Am Sonntagabend fand dann die Welcome Reception statt, in der formlos alte Bekanntschaften erneuert und neue Kontakte geknüpft werden konnten.

Der offizielle Teil der Konferenz wurde dann am Montag mit Vorträgen von Dr. Kirsi Tikka, Präsidentin und COO von ABS Europe Division, zum Thema „Energy Efficiency: Regulatory Impact and the Role of the Technology" und von Dr. Bas Buchner, Präsident von MARIN, zum Thema „Research for Future Offshore Structures: From Concept to Operations" eröffnet. Anschließend begannen dann die auf 12 Symposien verteilten 952 Vorträge, die in bis zu 16 Räumen parallel abgehalten wurden.

Die 12 Symposien der Konferenz lauteten:

- SYMP 1: Offshore Technology
- SYMP 2: Structures, Safety and Reliability
- SYMP 3: Materials Technology
- SYMP 4: Pipeline and Riser Technology
- SYMP 5: Ocean Space Utilization
- SYMP 6: Ocean Engineering
- SYMP 7: Polar and Arctic Science and Technology
- SYMP 8: CFD and VIV
- SYMP 9: Ocean Renewable Energy
- SYMP 10: Offshore Geotechnics
- SYMP 11: Petroleum Technology
- SYMP 12: Professor Emeritus J. Randolph Paulling Honoring Symposium on Ocean Technology

Das Interesse des Autors galt insbesondere dem Symposium 6, Ocean Engineering, dessen Inhalte sich auf 14 verschiedene Themenblöcke verteilten:

- Advanced Ship Hydromechanics and Marine Technology
- Wave Mechanics and Wave Effects
- Model Tests
- Towed and Undersea Cables and Pipes, Mooring, and Buoy Technology
- Advanced Underwater Vehicles and Design Technology
- Unsteady Hydrodynamics, Vibrations, Acoustics and Propulsion
- Computational Mechanics and Design Applications

- Fluid-Structure, Multi-Body and Wave-Body Interaction
- Marine Environment and Very Large Structures
- Offshore Industry: Aquaculture, mining, etc.
- Offshore Industry: Structures, and Design
- Ocean Measurement and Data Interpretation
- Ocean Engineering Technology
- Coastal Engineering

Viele dieser 14 Themenblöcke wurden wiederum auf verschiedene Sessions aufgeteilt, so dass das Symposium 6 schließlich 30 verschiedene Sessions beinhaltete.

7 Exkursionsziele

Parallel zur Konferenz war es für Teilnehmer und Begleitpersonen möglich verschiedene Touren durch San Francisco (einschließlich Alcatraz Island) oder Ausflüge in die nähere Umgebung zu unternehmen, wie z. B. zu den Riesenbäumen im Muir Wood oder in den Yosemite-Nationalpark.

Im Rahmen der technischen Exkursion am letzten Konferenztag wurden zwei verschiedene Touren angeboten:

- „University of California Berkeley Campus & Lawrence Hall of Science Tour“: Zunächst stand ein Besuch des Campus der Universität von Berkeley auf dem Programm einschl. der Besteigung des Sather Tower, einem ca. 100 m hohen Uhrenturm auf dem Universitätsgelände, mit einer Aussicht über den Campus und die Bucht von Berkeley. Anschließend erfolgte ein Besuch der Lawrence Science Hall, einem öffentlichen Wissenschaftszentrum bzw. -museum auf dem Universitätsgelände.
- „MBARI and Aquarium Tour“: Hier stand ein Besuch des Monterey Bay Aquarium Research Institute (MBARI) auf dem Programm, einem gemeinnützigen, von einer Stiftung finanzierten ozeanographischen Forschungszentrum in Moss Landing in der Bucht von Monterey. Das MBARI zeichnet sich durch seine Nähe zu einem vor der Küste liegenden Tiefseegraben aus, wodurch Messungen unter Tiefseebedingungen auch in Form von Tagestouren möglich sind, da die sonst übliche lange Anfahrt hier entfällt. Anschließend klang die Tour im Monterey Bay Aquarium aus.

8 Ausblick

Die nächste OMAE wird in 2018 in der Zeit vom 17. bis 22. Juni in Madrid, Spanien, stattfinden. In 2019 ist Glasgow, Schottland, der Veranstaltungsort, bevor mit Fort Lauderdale, Florida, in 2020 die Konferenz wieder in den Vereinigten Staaten stattfindet. Nach Oslo, Norwegen (in 2002), Chaldiki, Griechenland (2005), Hamburg (2006), Estoril, Portugal (2008), Rotterdam, Niederlande (2011), Nantes, Frankreich (2013) und Trondheim, Norwegen (2017) wird die OMAE2018 in Madrid die 37. Konferenz dieser Serie seit 1982 sein, und die 14. in der Geschichte der OMAE, die in Europa stattfindet.

9 Danksagung

Der Autor dankt dem Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI) für die finanzielle Unterstützung der Teilnahme an der OMAE2014 in San Francisco, USA.

10 Beiträge von Autoren und Ko-Autoren deutscher Forschungseinrichtungen und Unternehmen

In den digitalen Konferenzproceedings sind insgesamt 965 Beiträge als pdf-Datei enthalten, verteilt auf 12 Symposien mit jeweils zwischen 27 und 134 Beiträgen je Symposium. Im Folgenden werden die Beiträge derjenigen Erst- und Ko-Autoren aufgeführt, die ihre Beiträge zur OMAE2014 im Namen deutscher Forschungseinrichtungen oder Unternehmen eingereicht haben. Darüber hinaus nahmen zahlreiche weitere deutsche Teilnehmer an der Konferenz teil, die an ausländischen Einrichtungen forschen oder für ausländische Unternehmen tätig sind und die daher hier nicht aufgeführt sind.

ADAM, F.; MYLAND, T.; DAHLHAUS, F. and GROßMANN, J.: Scale tests of the GICON®-TLP for wind turbines.

ARNOLD, M.; CHENG, P.W.; DAUS, P. and BISKUP, F.: Tidal current turbine wake and park layout in transient environments.

AUGENER, P.H. and HATECKE, H.: Sea-keeping analysis of an offshore wind farm installation vessels during the jack-up process.

AUGENER, P.H. and KRÜGER, S.: Computation of drift forces for dynamic positioning within the very early design stage of offshore wind farm installation vessels.

BITTENCOURT, C.; ARGYRIADIS, K. and STEINIGER, M.: Type classification for horizontal axis tidal turbine (HATT) – An important step towards commercialization.

BITTENCOURT, C.; ZARRAONANDIA, G.; VINOGRADOV, A. and COCHO, M.: The first standard for certification of HATT – The application of risk based approach.

BOECK, F.; GOLZ, M.; RITZ, S. and HOLBACH, G.: SMIS – Subsea monitoring via intelligent swarms, Design challenges of an autonomous seabed station.

BONAKDAR, L. and OUMERACI, H.: Small and large scale experimental investigations of wave loads on a slender pile within closely spaced neighbouring piles.

BRÜHL, M. and OUMERACI, H.: The inverse KdV-based nonlinear Fourier transform (KdV-NLFT): Nonlinear superposition of cnoidal waves and reconstruction of the original data.

BRÜHL, M. and OUMERACI, H.: Analysis of propagation of long waves in shallow water using the KdV-based nonlinear Fourier transform (KdV-NLFT).

CHABCHOUB, A.; PERIC, R. and HOFFMANN, N.P.: Dynamics of unstable Stokes waves: A numerical and experimental study.

CLAUSS, G.F.; KLEIN, M.; DUDEK, M. and ONORATO, M.: Application of higher order spectral method for deterministic wave forecast.

CLAUSS, G.F.; STUPPE, S. and DUDEK, M.: Transient wave packages – New applications in CFD-methods.

DANKOWSKI, H.; RUSSELL, P. and KRÜGER, S.: New insights into the flooding sequence of the Costa Concordia accident.

DOSTAL, L. and KREUZER, E.: Assessment of extreme rolling of ships in random seas.

EL SAFTI, H.; BONAKDAR, L. and OUMERACI, H.: A hybrid 2D-3D CFD model system for offshore pile groups subject to wave loading.

FRICKE, W.; GERLACH, B. and GUIARD, M.: Experimental and numerical investigation on the load carrying behaviour of large ship windows.

GRABE, J.; BUSCH, P. and HAMANN, T.: On the set-up of piles.

HACKBARTH, A.; KREUZER, E. and SCHRÖDER, T.: CFD in the loop – Ensemble Kalman filtering with underwater mobile sensor networks.

HANSEN, A.; KREUZER, E. and RADISCH, C.: Handling of partially filled tank containers by means of cranes.

HATECKE, H.; KRÜGER, S.; CHRISTIANSEN, J. and VORHÖLTER, H.: A fast sea-keeping simulation method for heavy-lift operations based on multi-body system dynamics.

KREUZER, E.; KRUMM, L. and PICK, M.-A.: Investigation of the influence of screw connections in drill strings on the propagation of torsional waves with respect to advanced stick-slip controllers.

KREUZER, E.; SOLOWJOW, E.; QIU, G.; HAMANN, T. and GRABE, J.: Leg-seabed interactions of jack-up vessels due to motions in irregular waves.

KRÜGER, S.; HATECKE, H.; RINKE, A. and TAMMEN, K.: Analysis of the German Navy stability standard BV 1030 with respect to operability in heavy weather.

LÄSCHE, C.; PINKOWSKY, J.; GERWINN, S.; DROSTE, R. and HAHN, A.: Model-based risk assessment of offshore operations.

LEY, J.; SIGMUND, S. and EL MOCTAR, O.: Numerical prediction of the added resistance of ships in water.

LEY. J. and EL MOCTAR, O.: An enhanced 1-way coupling method to predict elastic global hull girder loads.

LIU, X.; LIMPASURAT, A.; FALCONE, G. and TEODORIU, C.: Investigation of back pressure effects of transient gas flow through porous media via laboratory experiments and numerical simulation.

LONGREE, M. and HOOG, S.: Backbone for escape, evacuation and rescue from arctic facilities – A systematic approach.

LORKOWSKI, O.; DANDOWSKI, H. and KLUWE, F.: An experimental study on progressive and dynamic damage stability scenarios.

LUQUE, J.; HAMANN, R. and STRAUB, D.: Spatial model for corrosion in ships and FPSOs.

MICHEL, J.; GARKE, S. and KEADING, P.: Simulations of mountings on offshore platforms in arctic regions.

MYLAND, D. and EHLERS, S.: Theoretical investigation on ice resistance prediction methods for ships in level ice.

NONN, A.; ERDELEN-PEPPLER, M.; WESSEL, W. and MAHN, D.: How reliable are the current testing procedures for the safety assurance against crack propagation in seamless gas pipelines?

PIEHL, H. and EL MOCTAR, O.: Bilge keel forces and vortex shedding – A numerical analysis with OpenFOAM.

PODRYABINKIN, E.; AHMED, R.; TARASEVICH, V. and MAY, R.: Evaluation of pressure change while steady-state tripping.

POPKO, W.: Comparison of full-scale and numerical model dynamic responses of Nordströmsgrund lighthouse.

ROBERTSON, A.; JONKMAN, J.; VORPAHL, F.; POPKO, W.; QVIST, J.; FRØYD, L.; CHEN, X.; AZCONA, J.; UZUNOGLU, E.; GUEDES SOARES, C.; LUAN, C.; HUAN, Y.; FU, P.; YDE, A.; LARSEN, T.; NICHOLS, J; BUILS, R.; LEI, L.; NYGAARD, T.A.; MANOLAS, D.; HEEGE, A.; RINGDALEN VATNE, S.; ORMBERG, H.; DUARTE, T.; GODREAU, C.; HANSEN, H.F.; NIELSEN, A.W.; RIBER, H.; LE CUNFF, C.; BEYER, F.; YAMAGUCHI, A.; KWANG, J.J.; SHIN, H.; WEI, S.; PARK, H.; ALVES, M. and GUÉRINEL, M.: Offshore code comparison collaboration continuation within IEA WIND Task 30: Phase II results regarding a floating semisubmersible wind system.

ROX, N.: Improving the early steel design process by integrating strength calculation and drule checking capabilities in a ship design pool.

RUDOLPH, C.; GRABE, J. and BIENEN, B.: Drift of piles subjected to cyclic lateral loading from a varying direction: System vs. soil element behavior.

SANDNER, F.; SCHLIPF, D.; MATHA, D. and CHENG, P.W.: Integrated optimization of floating wind turbine systems.

SCHAUMANN, R.; RABE, A. and BECHTEL, A.: Effects of attrition due to water in cyclically loaded grouted joints.

STEFANAKOS, C.N.; SCHINAS, O. and EIDNES, G.: Application of fuzzy time series techniques in wind and wave data forecasting.

SCHOOP-ZIPFEL, J. and ABDEL-MAKSOUD, M.: Maneuvering in waves based on potential theory.

SHIGUNOV, V.; VON GRAEFE, A. and EL MOCTAR, O.: Calculation of horizontal sectional loads and torsional moment.

SHIGUNOV, V. and SCHELLIN, T.E.: Tow forces for emergency towing of containerships.

SPAGNOLI, G.; DOHERTY, P.; BELLATO, D. and WEIXLER, L.: Latest technological developments in offshore deep mixing for piled oil & gas platforms.

STADE, E.: The experiences from the first round of offshore wind farm installation in the German EEZ (both Baltic and North Sea) and lessons learnt to achieve serial production status – A consultant's perspective.

STEMPINSKI, F.; WENZEL, S.; LÜKING, J.; MARTENS, L. and HORTAMANI, M.: Modelling installation and construction of offshore wind farms.

VON GRAEFE, A.: Rankine source method for seakeeping analysis in shallow water.

VORHÖLTER, H.; CHRISTIANSEN, J. and HATECKE, H.: Universal crane model for the ship design system E4.

WILL, J. and GREITSCH, L.: Optimized propulsor retrofit for slow steaming for a post pan-max container vessel.

ZIEMER, G. and EVERS, K.-U.: Ice model tests with a compliant cylindrical structure to investigate ice-induced vibrations.

ZIEMER, T.: Towards a lateral line sensor to supplement sonar in shallow water.

Die Küste, 84 (2016), 1-226

Die Küste, 84 (2016), 1-226

11th International Conference on Hydroinformatics in New York City, USA

Yohannis B. Tadesse

1 Background

The International Conference on Hydroinformatics is a biennial conference organized under the auspices of the International Association for Hydro-Environmental Engineering and Research (IAHR) and the International Water Association (IWA). The conference started in 1994 G. C. hosted in Delft, The Netherlands. It is no wonder that it started in Delft as the very idea of Hydroinformatics is the brain child of Prof. Michael B. Abbott who used to work at the International Institute for Infrastructure, Hydraulic and Environmental Engineering – IHE, Delft, The Netherlands (ABBOTT 1999).

2 Conference Organisation

The 11th International Conference on Hydroinformatics is hosted by The City College of New York, New York City, USA from 17–21 August 2014 with the theme „Informatics and the Environment: Data and Model Integration in a Heterogeneous Hydro World". The organization of the conference was chaired by Dr. Michael Piasecki of The City College of New York.

3 Conference Program

The conference is comprised of two preconference short courses, four key note speeches (Plenary sessions), twelve parallel sessions each with four to six talks, and technical and city tour.

The preconference short courses took place on 16 August 2014, eve of the conference start date. There were two such courses. The first was on ‚Standardization of Water Data Exchange' and the second on ‚Optimization of Reservoir Systems'.

Opportunities and challenges of data and model integration dominated the key note speeches, which opened each day.

The themes of the parallel sessions include established and new disciplines of hydroinformatics such as hydrologic modelling, hydrodynamic modelling, sediment transport modelling, flood resilience in urban areas, water distribution networks, modelling of urban flooding, reservoir operation and management, coastal and estuarine modelling, data processing, web-based systems for sharing of data and models, etc.

The last day of the conference was a technical tour and harbor cruise. The technical tour was to the Davidson laboratory at Stevens Institute of Technology. Founded in 1935, The Davidson Laboratory hosts a hydrodynamic and ocean engineering research facility and it is worth visiting for a Hydraulic Engineer. A harbor cruise, which provided a spectacular viewing of the Manhattan's skyscrapers, Brooklyn Bridge, and the Statue of Liberty, closed the conference.

The next HIC, took place in Songdo Convensia, Incheon, South Korea from 21–25 August 2016. The upcoming HIC2018 will take place in Palermo, Italy from 1–6 July 2018.

4 Acknowledgement

The author thanks Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI) for the financial support of his participation in HIC2014 in New York City.

5 Reference

ABBOTT, M.B.: Introducing Hydroinformatics, Journal of Hydroinformatics, 1, 3–19, 1999.

Die Küste, 84 (2016), 1-226

11th International Conference on Hydroscience & Engineering „Hydro-Engineering for Environmental Challenges" in Hamburg, Germany

Sandra Hellmers, Giovanni Palmaricciotti und Justus Patzke

1 Konferenzorganisation

Die ICHE 2014 in Hamburg ist eine alle zwei Jahre stattfindende Hydro-Science & Engineering Konferenz. Die Konferenz fand erstmals 1993 in Washington, D. C. statt. Beijing organisierte die ICHE 1995, gefolgt von Cottbus (1998), Seoul (2000), Warsaw (2002), Brisbane (2004), Philadelphia (2006), Nagoya (2008), Chennai (2010) und Orlando (2012).

Die Proceedings können unter dem folgenden Link heruntergeladen werden: http://mdi-de.baw.de/icheArchive

Das internationale Organisationsteam der ICHE Hamburg bestand aus:
Prof. Sam S. Y. Wang, University of Mississippi, U.S.A.
Prof. K.-Peter Holz, University of Cottbus, Germany
Prof. Mutsuto Kawahara, Chuo University, Japan
Dr. Rainer Lehfeldt, Organizing Secretary, Germany

Das heimische Organisationsteam bestand aus:
Prof. Dr. Peter Fröhle, Hamburg University of Technology TUHH, Institute of River and Coastal Engineering
Dr. Harro Heyer, Federal Waterways Engineering and Research Institute BAW
Prof. Dr. Reinhard Hinkelmann, TU Berlin, Chair of Water Resources Management and Modeling of Hydrosystems
Prof. Dr. Jürgen Jensen, University Siegen, Research Institute for Water and Environment
Dr. Rebekka Kopmann, Federal Waterways Engineering and Research Institute BAW
Dr. Andreas Kortenhaus, Technical University Brunswick
Dr. Rainer Lehfeldt, German Coastal Engineering Research Council KFKI
Dr. Stephan Mai, Federal Institute of Hydrology
Prof. Dr. Andreas Malcherek, Bundeswehr University Munich
Prof. Dr. Roberto Mayerle, Christian Albrechts University Kiel
Dr. Peter Mewis, Darmstadt University of Technology
Prof. Dr. Peter Milbradt, smile GmbH
Prof. Dr. Frank Molkenthin, Brandenburg University of Technology Cottbus-Senftenberg
Prof. Dr. Torsten Schlurmann, Franzius-Institute for Hydraulic, Estuarine and Coastal Engineering
Prof. Dr. Kerstin Schrottke, University Kiel, Institute of Geosciences
Prof. Dr. Holger Schüttrumpf, RWTH Aachen University
Prof. Dr. Heiko Sieker, Ingenieurgesellschaft Prof. Dr. Sieker mbH
Dr. Torsten Stengel, Federal Waterways and Shipping Authority WSA Bremen
Dr. Oliver Stoschek, DHI-WASY

Prof. Dr.-Ing. Jann Strybny, University of Applied Science Emden-Leer
Prof. Dr. Karl-Peter Traub, Hafen City University Hamburg

Der Konferenzort war das Hauptgebäude der Universität Hamburg am Dammtor.

2 Konferenzprogramm

Vertreter aus unterschiedlichen Ländern präsentierten während der vier Konferenztage über 200 Vorträge und etwa 10 Poster.

Das Programm war untergliedert in 12 Themenfelder:

- Water Resources Planning and Management
- Experimental and Computational Hydraulics
- Groundwater Hydrology, Irrigation
- Urban Water Management
- River, Estuarine and Coastal Dynamics
- Sediment Transport and Morphodynamics
- Interaction between Offshore Utilisation and the Environment
- Climate Change, Adaptation and Long-Term Predictions
- Eco-Hydraulics and Eco-Hydrology
- Integrated Modeling of Hydro-Systems
- Remote Sensing and Field Monitoring
- Information Management and Decision Support Systems

und vier Mini-Symposien:

- CFD in the Nearfield of Structures
- Impacts of Climate Change
- Data Management in Hydro-Engineering
- Modeling Methodology for Agricultural Research

Drei Fachexkursionen wurden am Dienstagnachmittag angeboten:

- Hamburger Hafenrundfahrt (s. Abb. 1 und 2) (Hellmers)
- Schiff-Aufzug in Scharnebeck (s. Abb. 3 und 4) (Palmaricciotti, Patzke)
- Hochwasserschutzsysteme in der Innenstadt

Abbildung 1: Beladung von Containerschiff.

Abbildung 2: Container Hafen Hamburg.

Abbildung 3: Schiff-Aufzug in Perspektive.

Abbildung 4: Sicht aus dem Aufzug.

Am Mittwochabend wurde ein soziales Begleitprogramm angeboten, an dem zum Einen der Austausch von Fachgesprächen vertieft werden konnte, aber auch Unterhaltungen über andere Themen in lockerer Atmosphäre stattfinden konnten (s. Abb. 5).

Abbildung 5: Konferenzdinner.

3 Beiträge der Autoren

PALMARICCIOTTI, G.; PATZKE, J.; HELLMERS, S.; MANOJLOVIC, N.; FRÖHLE, P.: Rainfall Simulator RS TUHH – Planning, Construction and Use.

HELLMERS, S.; MANOJLOVIC, N.; PALMARICCIOTTI, G.; FRÖHLE, P.: Modelling decentralised Systems for Urban Drainage and Flood Mitigation.

4 Vernetzung

Während der vier Konferenztage hatten die Autoren die Möglichkeit, andere Teilnehmer kennenzulernen und sich mit ihnen über relevante Aspekte aus deren Forschung auszutauschen. Vor allem ist der wissenschaftliche Austausch mit Herrn Prof. Dr. Hinkelmann sowie Herrn Prof. Dr. Jensen und ihren jeweiligen Mitarbeitern hervorzuheben.

5 Danksagung

Die drei Autoren danken dem Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen für die finanzielle Unterstützung bei der Teilnahme an der ICHE 2014 in Hamburg sowie allen Referenten für Ihre Beiträge zum wissenschaftlichen Austausch.

Die nächste ICHE wird 2016 vom 6. bis 10. Oktober in Tainan, Taiwan stattfinden.