

Living CoastLab Halligen: Praxisnahes Küstenlabor zur Entwicklung von kurz- und langfristigen Strategien zum Schutz und zur Bewahrung der schleswig-hol- steinischen Halligen

Schlussbericht zu 3.2 BNBest-BMBF 98

Förderkennzeichen:

03F0759A – 03F0759D

Bewilligungszeitraum:

10/2016 – 09/2019 (kostenneutrale Verlänge-
rung bis 02/2020)

Univ.-Prof. Jürgen Jensen

J.-Prof. Arne Arns

Sebastian Niehüser, M.Sc.

Univ.-Prof. Holger Schüttrumpf

Verena Krebs, M.Sc.

Dr. Theide Wöffler

Univ.-Prof. Roger Häußling

Nenja Ziesen, M.Sc.

Univ.-Prof. Michael Kleyer

Dr. Julia Bass

Univ.-Prof. Hilmar von Eynatten

Dr. Volker Karius

Ingo Hache, M.Sc.

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Forschungsinstitut Wasser und Umwelt (fwu)
Lehrstuhl für Hydromechanik, Binnen- und Küstenwasserbau
Universität Siegen

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

Institut für Soziologie, Lehrstuhl Technik – und Organisationssoziologie (IfS)
RWTH Aachen University

AG Landschaftsökologie, Institut für Biologie und Umweltwissenschaften (LÖK)
Carl von Ossietzky Universität Oldenburg

Geowissenschaftliches Zentrum der Universität Göttingen (GZG)
Universität Göttingen

Siegen, im März 2020

Vorwort

Inmitten des Schleswig-Holsteinischen Wattenmeeres befinden sich die weltweit einzigartigen Halligen. Die kleinen Inseln haben keine Deiche und sind aufgrund ihrer exponierten Lage unmittelbar dem Einfluss von Sturmfluten und dem Meeresspiegelanstieg ausgesetzt. Bis zu 50-mal im Jahr werden die Halligen mit Ausnahme der Warften und der darauf befindlichen Gebäude überflutet. Trotz dieser Überflutungen leben gegenwärtig etwa 270 Bewohner auf den Halligen, deren Lebensweise optimal an diese speziellen Bedingungen angepasst ist. Der Klimawandel wird jedoch für eine Verschärfung der Situation in diesem Lebensraum sorgen. Im Rahmen des Vorgängerprojektes ZukunftHallig konnte gezeigt werden, dass auf den Halligen verbleibende Sedimentablagerungen infolge regelmäßiger Überflutungen ein vertikales Anwachsen der Geländehöhen begünstigen. Gleichzeitig wurde jedoch ein stärkerer Trend im Anstieg der mittleren und extremen Wasserstände beobachtet. Prognosen über zukünftige Wasserstände deuten sogar auf noch stärkere Anstiege hin (Church et al., 2013), welche durch die derzeitigen Sedimentablagerungen voraussichtlich nicht kompensiert werden können. Um die Halligen nachhaltig zu sichern werden daher Strategien benötigt, die deren Anpassungsfähigkeit fördern und gleichzeitig einen unmittelbaren Schutz der Bewohner*innen auf den Warften ermöglichen. Durch ein inter- und transdisziplinäres Team aus Ingenieuren*innen, Soziologen*innen, Ökologen*innen, Geologen*innen sowie Behörden und Vertretern*innen der lokalen Bevölkerung sollen geeignete Strategien untersucht und entwickelt werden. Bei den Forschungsarbeiten wird dabei zwischen kurzfristigen Schutzmaßnahmen und langfristigen Strategien zur Verbesserung der natürlichen Anpassungsfähigkeit der Halligen unterschieden.

Dieser Schlussbericht stellt die wesentlichen Erkenntnisse und Ergebnisse aus dem Verbundvorhaben Living CoastLab Halligen zusammen und gibt einen Überblick über die im Rahmen des Projektes durchgeführten Arbeiten. Als Anhang zum formalen Teil, in dem die verkürzte Darstellung der Ergebnisse gemäß der in Anlage 2 zu Nr. 3.2 BNBest-BMBF 98 vorgegebenen Struktur erfolgt, liegt der fachliche Abschlussbericht der Teilprojekte des Verbundprojektes bei, der für eine Veröffentlichung in der Schriftenreihe „Die Küste“ - herausgegeben durch das Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (KfKI) - vorgesehen ist. Hier findet sich eine detaillierte Darstellung der durchgeführten Arbeiten. An geeigneter Stelle wird im formalen Teil auf diesen ausführlichen Fachbericht verwiesen.

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) unter den Förderkennzeichen 03F0759A, 03F0759B, 03F0759C und 03F0759D gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Living CoastLab Halligen: Praxisnahes Küstenlabor zur Entwicklung von kurz- und langfristigen Strategien zum Schutz und zur Bewahrung der schleswig-holsteinischen Halligen	
Förderkennzeichen: 03F0759A, 03F0759B, 03F0759C, 03F0759D	
Projektlaufzeit: 10/2016 – 09/2019 (kostenneutrale Verlängerung bis 02/2020)	
PROJEKTPARTNER	
	Lehrstuhl für Hydromechanik, Binnen und Küstenwasserbau Forschungsinstitut Wasser und Umwelt (fwu) Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jürgen Jensen
	Lehrstuhl und Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft (IWW) RWTH Aachen University Univ.-Prof. Dr.-Ing. Holger Schüttrumpf
	Institut für Soziologie, Lehrstuhl Technik – und Organisationssoziologie (IfS) RWTH Aachen University Univ.-Prof. Dr. Roger Häußling
	AG Landschaftsökologie, Institut für Biologie und Umweltwissenschaften (LÖK) Carl von Ossietzky Universität Oldenburg Prof. Dr. Michael Kleyer
	Geowissenschaftliches Zentrum Göttingen (GZG), Abtl. Sedimentologie/Umweltgeologie, Georg-August Universität Göttingen Prof. Dr. Hilmar von Eynatten

Anschriften der Projektpartner:

Forschungsinstitut Wasser und Umwelt (fwu)
Universität Siegen
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jürgen Jensen (Koordinator)
Paul-Bonatz-Str. 9-11
D-57076 Siegen
E-Mail: juergen.jensen@uni-siegen.de
Tel.: 0271-7402172; Fax.: 0271-7402722
Internet: www.uni-siegen.de/fb10/fwu/wb/

Lehrstuhl und Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft
RWTH Aachen University
Prof. Dr.-Ing. Holger Schüttrumpf
Mies-van-der-Rohe-Str. 17
D-52056 Aachen
E-Mail: schuettrumpf@iww.rwth-aachen.de
Tel.: 0241-8025262 ; Fax.: 0241-8022348
Internet: <https://www.iww.rwth-aachen.de/go/id/lygz/>

Institut für Soziologie (IfS)
Lehrstuhl für Technik- und Organisationssoziologie
RWTH Aachen University
Prof. Dr.-phil. Roger Häußling
Eilfschornsteinstr. 7
D-52052 Aachen
E-Mail: rhacussling@soziologie.rwth-aachen.de
Tel.: 0241-8096096 ; Fax.: 0241-8092160
Internet: <https://www.soziologie.rwth-aachen.de/cms/Soziologie/~mlmb/>

Arbeitsgruppe Landschaftsökologie
Universität Oldenburg
Prof. Dr. Michael Kleyer
Carl von Ossietzky Str. 9-11
26111 Oldenburg
E-Mail: michael.kleyer@uni-oldenburg.de
Tel.: 0441- 7983278 ; Fax.: 0441- 7985659
Internet: <https://uol.de/landeco/>

Geowissenschaftliches Zentrum Göttingen, Abtl. Sedimentologie/Umweltgeologie

Georg-August Universität Göttingen

Prof. Dr. Hilmar von Eynatten

Goldschmidtstrasse 3

37077 Göttingen

E-Mail: hilmar.von.eynatten@geo.uni-goettingen.de

Tel.: 0551-3914958 ; Fax.: 0551-397996

Internet: <https://www.uni-goettingen.de/de/450866.html>

Für die Kapitel des Schlussberichts verantwortliche Projektpartner:

Schlussbericht (formaler Teil)	Forschungsinstitut Wasser und Umwelt (fwu), Universität Siegen Autoren: S. Niehüser, A. Arns, J. Jensen (in Zusammenarbeit mit allen anderen Projektpartnern)
<u>Anlage (Fachbericht):</u>	
Teil 1	Praxisnahes Küstenlabor zur Entwicklung von kurz- und langfristigen Strategien zum Schutz und zur Bewahrung der schleswig-holsteinischen Halligen (Living CoastLab Halligen) Alle Projektpartner Autoren: J. Jensen, A. Arns, S. Niehüser, H. Schüttrumpf, V. Krebs, T. Wöffler, R. Häußling, N. Ziesen, M. Kleyer, J. Bass, H. von Eynatten, V. Karius, I. Hache
Teil 2	Analysen zum langfristigen Schutz der Halligen - Wechselwirkung zwischen Hydrodynamik und Sedimenttransport Forschungsinstitut Wasser und Umwelt (fwu), Universität Siegen Autoren: S. Niehüser, M. Klein, A. Arns, J. Jensen
Teil 3	Teilstationäre Hochwasserschutzmaßnahmen als kurzfristige Strategie zum Schutz der nordfriesischen Halligen: Einsatztests unter praxisnahen Bedingungen und Berücksichtigung sozialer Bedürfnisse der Bewohner*innen Lehrstuhl und Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft und Institut für Soziologie (IfS), Lehrstuhl für Technik- und Organisationssoziologie, RWTH Aachen University Autoren: V. Krebs, N. Ziesen, T. Wöffler, R. Häußling, H. Schüttrumpf
Teil 4	Der Einfluss von Vegetation auf Höhenänderungen in Salzwiesen Arbeitsgruppe Landschaftsökologie, Universität Oldenburg Autoren: J. Bass, M. Kleyer
Teil 5	Messung, Bewertung und Einflussfaktoren der Trübung in der Wassersäule - Schlussfolgerungen für einen die Sedimentakkumulation optimierenden Küstenschutz auf Hallig Langeneß Geowissenschaftliches Zentrum Göttingen, Abtl. Sedimentologie/Umweltgeologie, Georg-August Universität Göttingen Autoren: I. Hache, V. Karius, H. von Eynatten

Inhaltsverzeichnis

Vorwort.....	III
Inhaltsverzeichnis	VIII
I Eingehende Darstellung.....	1
1 Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse.....	1
1.1 Hallig-A – Einschätzung des Einflusses von Einzelmaßnahmen und Strategieentwicklung (fwu).....	1
1.2 Hallig-B I und II – Bewertung der einzelnen Küstenschutzmaßnahmen unter realen Bedingungen (IWW) und Verknüpfung von wissenschaftlichen Konzepten mit sozialen Bedürfnissen (IfS)	2
1.2.1 Hallig-B I	2
1.2.2 Hallig-B II.....	3
1.3 Hallig-C – Bestimmung biogeomorphologischer Rückkopplungen zwischen Pflanzen und Sedimenten (LÖK)	5
1.4 Hallig-D – Vermessung, Bewertung und Beeinflussung der Trübung der Wassersäule (GZG)	6
2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	7
3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	7
4 Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans.....	8
5 Fortschritt bei anderen Stellen	8
6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse	8
Literaturverzeichnis	14
Anhang.....	16

I Eingehende Darstellung

1 Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse

Eine detaillierte Beschreibung der durchgeführten Arbeiten sowie der erzielten Ergebnisse ist dem angefügten fachlichen Abschlussbericht zu entnehmen. Im Folgenden findet sich eine zusammenfassende Darstellung der erzielten Ergebnisse.

1.1 Hallig-A – Einschätzung des Einflusses von Einzelmaßnahmen und Strategieentwicklung (fwu)

Ob ein natürliches Potential zur Erhöhung der Sedimentdeposition vorhanden ist, hängt einerseits von den Trübstoffkonzentrationen in der Wassersäule rund um die Halligen während eines Hochwasserereignisses, das zu einem Landunter führt, ab. Andererseits muss der Transport der Sedimente auf die Hallig gewährleistet sein. Zur Abschätzung des Sedimenttransportes und den Ablagerungsprozessen sowie dem Einfluss unterschiedlicher Maßnahmen und Eingriffe werden beobachtete und statistisch generierte Daten sowie eine Kombination verschiedener statistischer und numerischer Modelle herangezogen.

Für die statistische Erfassung und Beschreibung der ermittelten Trübewerte in der Wassersäule aus Feldmessungen zur flächigen Übertragung um und auf die Hallig Langeneß kann geschlussfolgert werden, dass die einzelnen Auswertungen der Messstationen unterschiedliche Charakteristiken aufweisen. Dies ist bedingt durch die Komplexität der ablaufenden physikalischen Prozesse und der Unsicherheiten in den Trübungsmessungen. Zudem stellen die verwendeten Daten aus der numerischen Modellierung eine vereinfachte Abbildung der in der Natur auftretenden und hochfrequenten Prozesse. Auf Basis von künstlichen neuronalen Netzen konnten die Trübedaten allerdings für die vorliegende Fragestellung adäquat widergegeben werden (RMSE: 0,03 bis 0,08 g/l; R^2 : 0,64 bis 0,89) und auf das Untersuchungsgebiet angewendet werden. Verbleibende Unsicherheiten resultieren im Wesentlichen aus der Extrapolation für unbekannte Ereignisse.

Die Simulation der Wechselwirkung zwischen hydrodynamischer Einwirkung auf den resultierenden Sedimenttransport auf die Hallig Langeneß hat gezeigt, dass bei moderaten Landunterereignisse, wie sie während der Projektlaufzeit erfasst wurden, deutlich weniger Sedimente und nur feinere Sedimentfraktionen (maßgeblich Schluffe) auf die Hallig gelangen, als beispielsweise bei einer sehr schweren Sturmflut (Schluff bis Feinsand). Diese Erkenntnisse werden gestützt durch die Beobachtungen und Erfahrungen aus den Felduntersuchungen und der Hallig-Bewohner*innen. Die Abschätzung von langfristigen Änderungen der Sedimentation für die Jahre 2030, 2050 und 2080 hat gezeigt, dass sich die Differenzen zwischen einem moderaten Landunter und einer Sturmflut bei einem erhöhten Basiswasserstand in Form des prognostizierten Meeresspiegelanstiegs angleichen. Der Sedi-

menttransport findet, begünstigt durch die hydrodynamischen Verhältnisse und die niedrigere Ausbildung der Halligkante, hauptsächlich im Süden der Hallig Langeneß statt. Die Sedimentation zeigte bei den durchgeführten Analysen Maximalwerte in der Nähe der Siele. Zukünftig ist zu berücksichtigen, dass mit einem steigenden Wasserstand durch den prognostizierten Meeresspiegelanstieg auch die Strömungsgeschwindigkeiten und damit die Sohlschubspannungen zunehmen und einer nachhaltigen Konsolidierung der Sedimente gegenüberstehen können.

Aus diesem Grund wird die Modellkette zur Entwicklung optimierter Schutz- und Managementstrategien für die Halligen bereitgestellt, um Vergleichsbetrachtungen und entsprechende Entscheidungen zum Erhalt der Halligen durchführen zu können (vgl. Karius et al., 2020). Die Untersuchungen lassen u. a. den Schluss zu, dass die Halligkante einen „widersprüchlichen“ Nutzen aufweist. Auf der einen Seite können nur bei ausreichend hohen Wasserständen Sedimente auf die Hallig transportiert werden, die für einen vertikalen Aufwuchs erforderlich sind. Zum anderen wird für die Sedimentation eine ausreichend lange Beruhigung der Strömungsprozesse benötigt. Mit der entwickelten Modellkette können unterschiedliche Fragestellungen zum Erhalt bzw. zur Stabilisierung der Halligen durchgeführt werden, z. B. wie sich unterschiedliche Deckwerksstrukturen und -höhen sowie Sieltoranlagen, Halligpriele und Gräben auf den Transport und die Sedimentation der Trübstoffe in der Wassersäule. Hierbei ist es wichtig, die Erfahrungen der Hallig-Bewohner*innen mit einzubeziehen und zu berücksichtigen.

1.2 Hallig-B I und II – Bewertung der einzelnen Küstenschutzmaßnahmen unter realen Bedingungen (IWW) und Verknüpfung von wissenschaftlichen Konzepten mit sozialen Bedürfnissen (IfS)

1.2.1 Hallig-B I

Im Rahmen des Arbeitspakets Hallig-B I fand die Untersuchung von kurzfristigen Küstenschutzmaßnahmen unter realen Bedingungen statt. Aufbauend auf Vorschlägen aus dem Vorgängerprojekt ZukunftHallig wurde hierzu insbesondere der Einsatz mobiler Hochwasserschutzmaßnahmen als relevant und kurzfristig umsetzbar identifiziert. Aufgrund der Schwierigkeiten, die mit einem ursprünglich geplanten Praxistest der mobilen Maßnahmen auf einer Halligwarft einhergingen (Probleme bei den Genehmigungen durch die Küstenschutzbehörden sowie die Unvorhersehbarkeit des tatsächlichen Eintretens einer Sturmflut während der Projektlaufzeit), fanden die Untersuchungen unter kontrollierten aber dennoch realitätsnahen Bedingungen im Labor statt. Insgesamt wurden drei neuartige Systeme, die bereits im Binnenbereich Anwendung finden, sowie ein konventionelles System (Sandsäcke), das bereits jetzt auf den Halligen eingesetzt wird, getestet (Abbildung 1).



Abbildung 1: Im Labor getestete mobile Hochwasser- bzw. Küstenschutzmaßnahmen.

Zur Bewertung der Wirksamkeit wurden zwei Anwendungsfälle betrachtet: das Verschließen von Stöpen im Ringdeich der Warften und der Objektschutz auf der Warft. Die Maßnahmen wurden im Labor fünf Belastungsfällen (Einstau, Anströmen, Wellenanprall, Überströmen und Treibgutprall) ausgesetzt. Durch Verschiebungsmessungen, die Bestimmung von Leckageraten sowie visuelle Beobachtung wurde die Performance der Maßnahmen bewertet. Die Beurteilung der hydrodynamischen Wirksamkeit im Sturmflutfall erfolgte schließlich aufbauend auf den labortechnischen Ergebnissen getrennt für die beiden Anwendungsfälle.

Generell sind alle untersuchten Maßnahmen auch unter den küstenspezifischen Belastungen hydrodynamisch wirksam. Einschränkungen ergeben sich für zwei Maßnahmen (Sandsäcke und Hydrobaffle) infolge der mangelnden Standsicherheit im Falle einer Überströmung, insbesondere beim Hydrobaffle führt ein Nichteinhalten des Freibords in bestimmten Anwendungsfällen zu einem plötzlichen und schlagartigen Versagen der Maßnahme. Unter Einbeziehung weiterer für die Halligbewohner*innen relevanter Aspekte (Platzbedarf, Wartungsbedarf, Aufbauzeit etc.) ergibt sich ein differenzierteres Bild (siehe Krebs et al., 2020), wobei alle Maßnahmen unter bestimmten Bedingungen für den Einsatz auf den Warften geeignet sind. Sie verfügen damit über das Potenzial, den bestehenden Sturmflutschutz zu ergänzen und an Schwachstellen zu verbessern.

Die Vorstellung der Maßnahmen in Gruppendiskussionen auf den Halligen (s. u.) zeigte ein heterogenes Meinungsbild unter den Halligbewohner*innen hinsichtlich ihrer Einschätzung der Wirksamkeit der Maßnahmen. Für die Zukunft könnte ein beispielhafter Einsatz neuartiger Maßnahmen vor Ort (direkter Einsatz oder Probeaufbau) dazu beitragen, die Akzeptanz in der Bevölkerung zu erhöhen. Die Untersuchungen zeigten, eine Ergänzung der konventionellen Maßnahmen durch innovative mobile Maßnahmen kann den Küstenschutz verbessern und verstärken. Es gilt jedoch zu betonen, dass es sich um kurzfristige Maßnahmen handelt, die generelle Notwendigkeit langfristiger Maßnahmen bleibt hiervon unberührt.

1.2.2 Hallig-B II

Um den Einbezug der Halligbewohner*innen in die Entwicklung alternativer Küstenschutzmaßnahmen zu gewährleisten, wurde sowohl Datenmaterial aus dem Vorgängerprojekt ZukunftHallig verwendet als auch 16 qualitative Interviews geführt und zwei Grup-

pendiskussionen (Hallig Hooe/Hallig Langeneß) arrangiert. Zu den besonderen Merkmalen des Lebensraumes Halligen zählen insbesondere ihre geografische Lage und die daraus entstehenden Einschränkungen. Aufgrund dieser exponierten Lebenslage, dem Leben mit Landunter sowie mit Sturmfluten verfügen insbesondere die schon lange ansässigen Halligbewohner*innen über ein besonderes Erfahrungswissen. Für die Akzeptanz alternativer Maßnahmen ist es wichtig, die Bedürfnisse und Erwartungen der Bewohner*innen miteinzubeziehen, wobei zugleich auch auf die Erfahrungsbestände zurückgegriffen werden kann, um neue Maßnahmen auf praktische Anwendbarkeit zu überprüfen und weiterzuentwickeln. Die bisher auf den Halligen angewandten Küstenschutzmaßnahmen, wie unter anderem Warften, geschlossene Deckwerke und Lahnungen, haben einen sehr hohen Stellenwert. Als zentrale Aspekte, welche neue Küstenschutzmaßnahmen erfüllen sollen, wurden insbesondere die Verträglichkeit mit der Umgebung wie beispielsweise mit den Boden-, Wind-, Wasser-, Strömungsverhältnissen, als auch mit den bisherigen Maßnahmen genannt. Neue Maßnahmen sollten somit kompatibel mit den bisherigen Maßnahmen sein und/oder als Ergänzung fungieren. Außerdem ist die Möglichkeit der Anwendung auf den Halligen besonders zu berücksichtigen: Hierzu zählen die technische Anwendbarkeit, die Personenkraft, als auch die Lagerung und Wartung neuer Maßnahmen sowie die Kosten dieser. Herauszustellen ist die Individualität der einzelnen Halligen und Warften. Daher ist auch über unterschiedliche, individuelle Lösungen nachzudenken. Bezüglich der Sedimentation werden Vermutungen angestellt, dass sich lediglich bei Sturmflut Sediment abgelagert, welches zum Anwachsen führt, jedoch nicht bei normalen Landunter. Dementsprechend kritisch wird auch das Stehenlassen des Wassers betrachtet. Durch den Vortrag zur Sedimentation im Rahmen der Gruppendiskussion konnten bisherige Ergebnisse der Proben auf Hallig Langeneß für die Bewohner*innen transparent gemacht werden, wobei für die Teilnehmer*innen auf Hooe die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf die Hallig Hooe relevant sind. Insgesamt werden generell Maßnahmenvorschläge zur Erhöhung der Sedimentation auf Hooe sowie zum Erhalt der Sandbänke als wünschenswert erachtet. Zudem wird eine intensivere Zusammenarbeit von Küsten- und Naturschutz gewünscht. Bei den vorgestellten Maßnahmen haben sich deutliche Unterschiede im Meinungsbild der Bewohner*innen ergeben: Während die Diskussionsteilnehmer*innen auf Langeneß und Nordstrandischmoor allen vorgestellten Systemen ablehnend gegenüberstehen, erscheint das automatische System Klappschott für die Bewohner*innen von Hooe am geeignetsten, aber auch HWS-mobil wird hier bezüglich einer Erfüllung zentraler Aspekte positiv gewertet. Jedoch zeigte sich weiterer Testungsbedarf bezüglich der Faktoren Starkregen, Salzwasser und Salzluft. Darüber hinaus wird eine Testung in der Versuchshalle von bestehenden Maßnahmen, beispielsweise der herkömmlichen Schotten oder Dammbalken als Einsatz in der Stöpe, für einen Vergleich als wünschenswert erachtet. Außerdem wurden weiterführende, zu untersuchende Vorschläge getätigt (zu finden im Maßnahmenkatalog). Durch das oben genannte partizipative Verfahren gewährleistet durch Interviews und Gruppendiskus-

sionen, konnten und können die Bedürfnisse, Erwartungen und Erfahrungen der Halligbewohner*innen in die (Weiter)-Entwicklung von alternativen Küstenschutzmaßnahmen einfließen.

1.3 Hallig-C – Bestimmung biogeomorphologischer Rückkopplungen zwischen Pflanzen und Sedimenten (LÖK)

In dem dritten Teilprojekt (Hallig-C) wurde der Einfluss von biologischen Eigenschaften der Vegetation auf die Sedimentationsrate in Salzwiesen untersucht. Die biologischen Eigenschaften werden auch durch die Bewirtschaftung der Flächen beeinflusst, so dass die Ergebnisse bei der Entwicklung langfristiger Managementstrategien der Halligen genutzt werden könnten.

Die Integration von Vegetation als Rauheitsbeiwert in hydrodynamischen Modellen hat eine lange Tradition (Manning, 1891; Strickler, 1923). Allerdings wird die Vegetation dafür nur in sehr grobe Klassen unterteilt und es bleibt Raum für subjektive Interpretation (Chow, 1959). Eine bessere Beschreibung der Rauheit der Vegetation liefern messbare, biologische Eigenschaften der Pflanzen (Lavorel et al., 1997). Dennoch gibt es nur wenige – und zum Teil widersprüchliche – Studien, die biologische Merkmale und vertikalen Höhenänderungen in Salzwiesen betrachten (Mudd et al. 2010; Reef et al. 2018).

Mit linearer Regression wurde der Einfluss von Rauheit und Abstand zur Halligkante auf die Sedimentation untersucht. Die Rauheit der Vegetation lässt sich durch die oberirdischen Eigenschaften Wuchshöhe, Stammbiomasse, Blattbiomasse, Blattfläche sowie spezifische Stammlänge als Wert für die Biegsamkeit des Stängels beschreiben. Viele Merkmale krautiger Pflanzen Nord-West Europas sind korreliert (Kleyer et al. 2019), so auch die Eigenschaften der Arten auf den Halligen. Daher gingen sie als aggregierte Variable mit dem Wert der ersten Hauptkomponente in die Regression ein. Lediglich die Wuchshöhe ging als einzelne Variable in die Regression ein.

Die Ergebnisse zeigen einen linearen Zusammenhang zwischen Sedimentation und Distanz zur Halligkante und einen wannenförmigen Zusammenhang zwischen Sedimentation und Wuchshöhe der Pflanzen. Hohe Vegetation nahe der Halligkante führte zu besonders hoher Sedimentation. Die Güte der Modellanpassung war moderat. Andere Parameter der Rauigkeit der Vegetation (spezifische Stängellänge, Biomasse der Stängel, etc.) hatten zwar auf den Halligen keinen signifikanten Einfluss auf die Sedimentation, in natürlicheren Salzwiesen, wie sie an der Festlandküste oder auf den Barriere Inseln zu finden sind, allerdings schon (Bass et al., in prep).

Die Salzwiesen der Halligen sind größtenteils durch Gemeinschaften der oberen Salzwiese geprägt (vorwiegend *Juncus gerardii*-*Festuca rubra*-Typ) und unterschieden sich hauptsächlich durch die Beweidungsintensität. Eine starke Beweidung führt zu einer deutlichen Reduktion der Wuchshöhe am Ende der Vegetationsperiode, wenn die Sturmfluten beginnen,

so dass dieses Merkmal die Rauheit am besten beschreibt. In Salzwiesen mit einer natürlicheren Sukzession und unterschiedlicheren Vegetationsgemeinschaften eignen sich hingegen die anderen biologischen Eigenschaften besser.

Die Ergebnisse des dritten Teilprojekts zeigen, dass die oberirdischen Strukturen der Vegetation einen zusätzlichen Einfluss auf die Sedimentationsrate und somit auf das vertikale Wachstum der Salzwiesen haben. Dieser Einfluss ist allerdings auf den Halligen relative gering, so dass die Berücksichtigung der Vegetation in Modellen zu den Entwicklungen von Salzwiesen die Vorhersagen lediglich leicht verbessern kann. Im Hinblick auf langfristigen Managementstrategien könnte das Aussetzen der Beweidung und eine damit verbundene Steigerung der Rauheit ebenfalls nur zu einer geringen Zunahme der Sedimentablagerungen und resultierendem vertikalen Anwachsen der Geländehöhe führen.

1.4 Hallig-D – Vermessung, Bewertung und Beeinflussung der Trübung der Wassersäule (GZG)

Auf der Hallig Langeness wurde ein Trübungmessnetzwerk errichtet, welches aus sechs Stationen im Watt und zwei Stationen auf der Hallig von Februar 2017 bis März 2020 insbesondere in den Wintermonaten kontinuierlich Trübedaten geliefert hat. Durch entsprechende Kalibration konnten SPM-Gehalte (Suspended particulate matter) bestimmt und mit Sedimentakkumulationsraten, die mit Sedimentfallen auf der Hallig gemessen wurden, korreliert werden. Ausgehend von den meteorologischen Parametern, wie Windrichtung und Windgeschwindigkeit, konnten die zeitliche und räumliche Variabilität des SPM um die Hallig bestimmt werden (Hache et al., 2019).

Im zweiten Schritt wurden bis zu acht „Land unter“ im Zeitraum 2017-2019 einzeln erfasst und die Sedimentakkumulation auf der Hallig zeitlich bestimmt. Dabei wurden Sedimentfallen hinter den Halligkanten in räumlicher Nähe zu den im Watt befindlichen Trübungmessstationen ausgewertet. Mit diesen Sedimentfallen konnten Sedimentakkumulationsraten hinter unterschiedlich hohen Halligrauhstreifen („Igel“) gemessen werden. Im Ergebnis konnten SPM-Gehalte vor der Halligkante gemessen werden, die zwar potentiell zur Sedimentakkumulation auf der Hallig beitragen könnten aber bedingt durch die Küstenschutzmaßnahmen nur teilweise ausgeschöpft werden. Hierbei konnte der Einfluss der Igelhöhe auf die Sedimentakkumulation gezeigt werden (Hache et al., 2020). Über die Wintermonate integrierte Sedimentakkumulationsraten bestätigen die im Vorgängerprojekt „ZukunftHallig“ erhobenen Daten (Schindler et al., 2014).

Im Zeitraum Winter 2019/2020 konnten erstmalig die SPM-Gehalte sowie die Sedimentakkumulation bei echten Sturmflutbedingungen gemessen werden. Insgesamt wurden drei Sturmfluten gemessen. Die akkumulierten Sedimentmengen korrelieren insgesamt sehr gut mit den Trübedaten und zeigen eine bessere Ausnutzung des vorhandenen Potentials bei höheren Wasserständen auf der Hallig. Der Einfluss der Halligrauhstreifen nimmt somit

unter Sturmflutbedingungen ab und die Korngröße der abgelagerten Sedimente nimmt im Median zu (Hache et al., in prep1).

Im letzten Schritt wurden Sedimenttransporte mit dem *Danish Hydraulic Institut's (DHI) Mike21 FM (flexible mesh)* Modellierungsprogramm simuliert. Die grundlegende Modellierung erfolgte durch das Forschungsinstitut Wasser und Umwelt (fwu) der Universität Siegen. Innerhalb dieses Modells nahmen wir Änderungen in der Igelhöhe vor und untersuchten dessen Auswirkung auf den Sedimenttransport. Die Modellergebnisse zeigen, dass nicht jede Herabsetzung des Igels mit einer Erhöhung der Sedimentakkumulation einhergeht. So blieb ein positiver Effekt durch das Herabsetzen des Igels im Norden der Hallig aus. Im Süden von Langeness erhöhte sich jedoch die Sedimentakkumulation deutlich besonders bei normalen „Land unter“ mit moderaten Überflutungshöhen. Die Sedimentakkumulation bei Sturmfluten übertrifft die bei moderaten „Land unter“ allgemein um ein Vielfaches. Dagegen zeigen die Änderungen in der Igelhöhe einen geringeren Unterschied in der Menge der auf die Hallig transportierten Sedimente. Allerdings rücken bei Sturmfluten Sedimentmengen in den Fokus, die zwar auf die Halligoberfläche transportiert werden, jedoch mit dem ablaufenden Wasser die Hallig auch wieder verlassen (Hache et al., in prep2).

Die Ergebnisse verdeutlichen den komplexen Zusammenhang aus (i) der Erhöhung des Transports von ausreichend verfügbarem Sediment (Hache et al., 2020) durch angepasste Küstenschutzmaßnahmen auf die Hallig und (ii) der Minimierung des Verlusts von bereits auf die Hallig transportierten Sedimenten. Dies zeigt weiteren Forschungsbedarf zur Erhöhung der Sedimentakkumulationsraten auf Langeness auf. Die Ergebnisse der Modellierung sollten daher unter natürlichen Bedingungen getestet und validiert werden. Dazu könnten an strategischen Stellen der Hallig die Raustreifen niedriger gestaltet und eine angepasste Steuerung des ablaufenden Wassers bei Sturmfluten umgesetzt werden. Es sollten weiterhin Maßnahmen getroffen werden, die bei kleinen „Land untern“ das Überflutungswasser ungehindert auf die Hallig strömen lassen und bei Sturmfluten das ablaufende Wasser bremsen. Denkbar wäre eine variable Verbauung der Priele vor den Sieltoren und/oder eine variable Sieltorsteuerung.

2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Der zahlenmäßige Nachweis wird für jedes Vorhaben separat übermittelt.

3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die durchgeführten Forschungsarbeiten im Verbundprojekt Living CoastLab sowie die dafür aufgewandten Ressourcen waren notwendig und angemessen, da sie der im Projektantrag formulierten Planung entsprachen und alle wesentlichen im Arbeitsplan formulierten Aufgaben erfolgreich bearbeitet wurden.

Wie im Anhang dieses Schlussberichtes (Fachbericht) und im zahlenmäßigen Nachweis aufgeschlüsselt, wurden die Arbeiten und die finanziellen Mittel entsprechend der Arbeitspakete und an den im Verlauf des Projektes erhaltenen Ergebnissen ausgerichtet.

4 Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Die Ergebnisse des Verbundprojektes Living CoastLab wurden und werden auf Konferenzen und in Veröffentlichungen dargestellt. Die genaue Auflistung der Veröffentlichungen kann Kapitel 6 entnommen werden.

5 Fortschritt bei anderen Stellen

Im Zeitraum des Verbundprojektes Living CoastLab wurden nach Kenntnis der Forschergruppe keine Projekte mit ähnlichem Inhalt an anderen Forschungseinrichtungen bearbeitet bzw. sind deren Erkenntnisse in Form von Tagungsbeiträgen oder Fachartikeln bekannt geworden. Es sind keine Hinweise bekannt, die einzelne Bearbeitungsschritte und Ziele des Forschungsprojektes obsolet machen.

6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse

Für den fachlichen Schlussbericht (s. Anlage) wird eine Veröffentlichung in „Die Küste“, eine Schriftenreihe herausgegeben durch das Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (KfKI), angestrebt. Hierzu werden die Manuskripte nach Übersendung des Schlussberichts eingereicht und durchlaufen dann einen Begutachtungsprozess. Darüber hinaus wurden Teilergebnisse des Verbundprojektes Living CoastLab bereits in Fachzeitschriften veröffentlicht und auf Konferenzen vorgestellt. Eine Übersicht hierzu findet sich im Folgenden.

Journal-Artikel

Bass, J. und Kleyer, M.: Der Einfluss von Vegetation auf Höhenänderungen in Salzwiesen. Eingereicht bei „Die Küste“, 2020. (zur Veröffentlichung eingereicht/in review).

Bass, J.; Granse, D.; Hache, I.; Jensen, K.; Karius, V.; Minden, V.; Stock, M.; Suchrow, S. and Kleyer, M.: Plant traits affect surface elevation change in salt marshes: an example of biogeomorphic ecosystems. Eingereicht bei Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2020. (zur Veröffentlichung eingereicht/in review).

Hache I.; Karius V. and von Eynatten H.: Suspended particulate matter for sediment accumulation on inundated anthropogenic marshland in the southern North Sea – Potential, thresholds and limitations. Eingereicht bei Continental Shelf Research, 2020. (zur Veröffentlichung eingereicht/in review).

- Hache, I.; Karius, V. and von Eynatten, H.: Suspended particulate matter availability at storm surges for sediment accumulation on inundated anthropogenic marshland in the southern North Sea, in prep.
- Hache, I.; Karius, V.; Gutkuhn, J.; von Eynatten H.: The development and application of an autonomous working turbidity measurement network: Assessing the spatial and temporal distribution of suspended particulate matter on tidal flats in the North Frisian Wadden Sea. *Continental Shelf Research*, 176, 36-50. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2019.02.010>, 2019.
- Hache, I.; Niehüser, S.; Karius, V. and von Eynatten, H.: Assessing sediment accumulation at inundated anthropogenic marshland in the southern North Sea: using particle tracking on modified coastal revetments, in prep.
- Jensen, J.; Niehüser, S.; Arns, A.; Krebs, V.; Ziesen, N.; Wöffler, T.; Häußling, R.; Schüttrumpf, H.; Karius, V.; Hache, I.; von Eynatten, H.; Bass, J.; Kleyer, M.: Praxisnahes Küstenlabor zur Entwicklung von kurz- und langfristigen Strategien zum Schutz und zur Bewahrung der schleswig-holsteinischen Halligen. Eingereicht bei „Die Küste“, 2020. (zur Veröffentlichung eingereicht/in review).
- Hache, I.; Karius, V. und von Eynatten, H.: Messung, Bewertung und Einflussfaktoren der Trübung in der Wassersäule - Schlussfolgerungen für einen die Sedimentakkumulation optimierenden Küstenschutz auf Hallig Langeneß. Eingereicht bei „Die Küste“, 2020. (zur Veröffentlichung eingereicht/in review).
- Krebs, V.; Ziesen, N.; Wöffler, T.; Häußling, R. und Schüttrumpf, H.: Teilstationäre Maßnahmen als kurzfristige Strategie zum Schutz der nordfriesischen Halligen - Einsatztests unter praxisnahen Bedingungen und Berücksichtigung sozialer Bedürfnisse der Bewohner*innen. Eingereicht bei „Die Küste“, 2020. (zur Veröffentlichung eingereicht/in review).
- Niehüser, S.; Klein, M.; Arns, A. und Jensen, J.: Analysen zum langfristigen Schutz der Halligen – Wechselwirkung zwischen Hydrodynamik und Sedimenttransport. Eingereicht bei „Die Küste“, 2020. (zur Veröffentlichung eingereicht/in review).
- Wöffler, T.; Schüttrumpf, H.: Ein Sicherheitskriterium für Halligwarften. In: Porth M., Schüttrumpf H. (eds) *Wasser, Energie und Umwelt*. Springer Vieweg, Wiesbaden, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-658-15922-1_57, 2017.

Konferenzenbeiträge

- Hache, I.; Karius, V. und von Eynatten, H.: Vorstellung der Ergebnisse aus der Messperiode 2019/20 und Strategieempfehlungen zum Erhalt der Halligen. Geplant für das 25. KFKI Seminar am 17.11.2020 in Hamburg.
- Jensen, J.; Arns, A. und Mehlhase, S.: Strategien zum Schutz vor Halligen. Living CoastLab Halligen. KüNO Jahrestagung 2017. Rostock, 11.10.2017. Online verfügbar unter

https://deutsche-kuestenfor-schung.de/files/KueNO/Jahresta-gung%202017/Beitraege%20PDF/12_Jensen%20et%20al%20LivingCoast-Lab.pdf, 2017.

- Jensen, J.; Niehüser, S.; Arns, A.; Krebs, V.; Ziesen, N.; Wöffler, T.; Häußling, R.; Schüttrumpf, H.; Karius, V.; Hache, I.; von Eynatten, H.; Bass, J.; Kleyer, M.: Praxisnahes Küstenlabor zur Entwicklung von kurz- und langfristigen Strategien zum Schutz und zur Bewahrung der schleswig-holsteinischen Halligen. Gesamtprojektvorstellung geplant für 2020 in Husum für Interessierte und Hallig-Bewohner*innen.
- Jensen, J.: Strategien zum Schutz und Erhalt von Halligen. Living CoastLab Halligen. KüNO Jahrestagung 2019. Hamburg, 30.10.2019. Online verfügbar unter https://deutsche-kuestenforschung.de/files/KueNO/Abschlusstagung/KueNO_Abschlusstagung_Jensen_Vortrag.pdf, 2019.
- Karius, V.: Strategien zum Schutz von Halligen (LivingCoastLab). KüNO Jahrestagung 2018, Hannover, 28.08.2018. Online verfügbar unter <https://deutsche-kuestenforschung.de/kueno-jahrestagung-20178-programm.html>, 2018.
- Karius, V.: Können Halligen wachsen? - Sedimentologische Untersuchungen um die Hallig Langeneß. 23. KFKI Seminar 2018. KFKI. Hamburg, 05.12.2018, 2018.
- Kleyer, M.: Bewertung der biogeomorphologischen Feedbacks zwischen Pflanzen und Sedimentation. 24. KFKI Seminar 2019. KFKI. Hamburg, 21.11.2019, 2019.
- Mehlhase, S.; Arns, A. und Jensen, J.: 2D-HN-Simulation des vertikalen Wachstums von Halligen während Land unter. In: Jürgen Jensen (Hg.): 19. Treffen junger WissenschaftlerInnen deutschsprachiger Wasserbauinstitute, Bd. 10. 19. Treffen junger WissenschaftlerInnen deutschsprachiger Wasserbauinstitute (JuWi-Treffen). Siegen (Mitteilungen des Forschungsinstituts Wasser und Umwelt der Universität Siegen, 10), S. 73–76. Online verfügbar unter http://dokumentix.ub.uni-siegen.de/opus/volltexte/2017/1215/pdf/Jensen_JuWi_Treffen_2017_Tagungsband.pdf, 2017.
- Mehlhase, S.; Arns, A. und Jensen, J.: 2D-HN-Simulation des vertikalen Wachstums von Halligen während Land unter. 19. Treffen junger WissenschaftlerInnen deutschsprachiger Wasserbauinstitute. Siegen, 24.08.2017, 2017.
- Mehlhase, S.; Arns, A.; Jensen, J.; Bass, J.; Kleyer, M.; Hache, I.; Karius, V.; von Eynatten, H. und Matelski, B.: Langfristige Strategien zur Erhöhung der natürlichen Adaptionskapazität der Halligen gegenüber dem Einfluss steigender Wasserstände. KüNO Jahrestagung 2017. Rostock, 11.10.2017. Online verfügbar unter https://deutsche-kuestenforschung.de/files/KueNO/Jahrestagung%202017/Beitraege%20PDF/P15_Mehlhase%20et%20al.pdf, 2017.

- Niehüser, S.; Arns, A. and Jensen, J.: Development of adaption strategies for barrier islands (Halligen) in the German Bight. European Geosciences Union General Assembly 2019. Wien, Österreich, 07.04.2019, 2019.
- Niehüser, S.; Arns, A. und Jensen, J.: Living CoastLab Halligen: Analysen zum langfristigen Schutz der Halligen - Wechselwirkung zwischen Hydrodynamik und Sedimenttransport. 24. KFKI Seminar 2019. KFKI. Hamburg, 21.11.2019, 2019.
- Wöffler, T.: Optimierung des Küsten- und Hochwasserschutzes auf den Halligen. 35. Jahrestagung des Arbeitskreises Meere & Küsten (AMK) der Deutschen Gesellschaft für Geographie (DGfG), 19.-22.04.2017, Kiel, 2017.
- Wöffler, T.; Jensen, J. and Schüttrumpf, H.: Optimization of coastal protection measures on small islands in the northfrisian part of the North Sea. American Geophysical Union Fall Meeting 2017. New Orleans, USA, 11.-15.12.2017, 2017.

Akademische Abschlüsse (Diplom, Bachelor, Master, PhD, Habilitation)

- Bönisch, S.: Erarbeitung von Bemessungsgrundlagen für Schutzzräume auf den Halligwarften. Bachelorarbeit, Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft (IWW), RWTH Aachen University, 2017.
- Carstens, J. S.; Rüßmann, A.-L.: Wattkartierung um Hallig Langeneß - Bestimmung der Korngrößenverteilung, Karbonatgehalt und organischem Kohlenstoff an ausgewählten Profilen. Bachelorarbeit im Studiengang Geowissenschaften der Georg-August-Universität Göttingen, 2018.
- Fehling, D.: Analyse der Schwebstoffkonzentration um Hallig Langeness in Abhängigkeit von hydrologischen und meteorologischen Parametern sowie der Korngröße. Bachelorarbeit im Studiengang Geographie der Georg-August-Universität Göttingen, 2018.
- Gehrmann, L.: Planung experimenteller Untersuchungen von verschiedenen Küstenschutzmaßnahmen auf einer Hallig, Bachelorarbeit, Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft (IWW), RWTH Aachen University, 2017.
- Gröschl, M. (2020): Umlagerung und Erosion von „Land unter“ Sedimenten auf Hallig Langeness – Anwendung von Muschelschill und Fluorit als anorganische Tracer. Bachelorarbeit im Studiengang Geowissenschaften der Georg-August-Universität Göttingen, 2020 in Bearbeitung.
- Jahnel, S.: Quantitative Bewertung von mobilen Hochwasserschutzmaßnahmen zur Erhöhung der Hochwassersicherheit von Halligwarften. Masterarbeit, Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft (IWW), RWTH Aachen University, 2018.
- Kribben, T.: Planung und Durchführung physikalischer Modellversuche zur hydraulischen Belastbarkeit mobiler Hochwasserschutzmaßnahmen Bachelorarbeit, Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft (IWW), RWTH Aachen University, 2018.

- Richert, M.: Quantitative Bewertung von Maßnahmen zur Erhöhung der Hochwassersicherheit von Halligwarften. Masterarbeit, Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft (IWW), RWTH Aachen University, 2016.
- Schneider, N.: Durchführung physikalischer Modellversuche zur hydraulischen Belastbarkeit mobiler Hochwasserschutzmaßnahmen. Bachelorarbeit, Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft (IWW), RWTH Aachen University, 2018.
- Thérés, N.: Optimierung der Warftentwässerung im Sturmflutfall. Bachelorarbeit, Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft (IWW), RWTH Aachen University, 2017.
- Wöffler, T.: Optimierung des Küsten- und Hochwasserschutzes auf den Halligen. Dissertation, Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft (IWW), RWTH Aachen University, 2016.

Fachliche Abschlussberichte

- Bass, J. und Kleyer, M.: Der Einfluss von Vegetation auf Höhenänderungen in Salzwiesen. Abschlussbericht zum Verbundvorhaben Living CoastLab Halligen – Teil Hallig-C, BMBF-Förderkennzeichen 03F0759C: Vorhaben: Bestimmung biogeomorphologischer Rückkopplungen zwischen Pflanzen und Sedimenten, Arbeitsgruppe Landschaftsökologie, Universität Oldenburg, 2020.
- Jensen, J.; Niehüser, S.; Arns, A.; Krebs, V.; Ziesen, N.; Wöffler, T.; Häußling, R.; Schüttrumpf, H.; Karius, V.; Hache, I.; von Eynatten, H.; Bass, J.; Kleyer, M.: Praxisnahes Küstenlabor zur Entwicklung von kurz- und langfristigen Strategien zum Schutz und zur Bewahrung der schleswig-holsteinischen Halligen. Abschlussbericht zum Verbundvorhaben Living CoastLab Halligen – Übersicht Gesamtprojekt, Forschungsinstitut Wasser und Umwelt (fwu), Universität Siegen, 2020.
- Hache, I.; Karius, V. und von Eynatten, H.: Messung, Bewertung und Einflussfaktoren der Trübung in der Wassersäule - Schlussfolgerungen für einen die Sedimentakkumulation optimierenden Küstenschutz auf Hallig Langeneß. Abschlussbericht zum Verbundvorhaben Living CoastLab Halligen – Teil Hallig-D, Geowissenschaftliches Zentrum Abtl. Sedimentologie/Umweltgeologie, Georg-August Universität Göttingen, 2020.
- Krebs, V.; Ziesen, N.; Wöffler, T.; Häußling, R. und Schüttrumpf, H.: Teilstationäre Maßnahmen als kurzfristige Strategie zum Schutz der nordfriesischen Halligen - Einsatztests unter praxisnahen Bedingungen und Berücksichtigung sozialer Bedürfnisse der Bewohner*innen. Abschlussbericht zum Verbundvorhaben Living CoastLab Halligen – Teil Hallig-B, BMBF-Förderkennzeichen 03F0759B, Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft (IWW) und Institut für Soziologie (IfS) der RWTH Aachen University, 2020.

Niehüser, S.; Klein, M.; Arns, A. und Jensen, J.: Analysen zum langfristigen Schutz der Halligen – Wechselwirkung zwischen Hydrodynamik und Sedimenttransport. Abschlussbericht zum Verbundvorhaben Living CoastLab Halligen – Teil Hallig-A, BMBF-Förderkennzeichen 03F0759A: Vorhaben: Einschätzung des Einflusses von Einzelmaßnahmen und Strategieentwicklung, Forschungsinstitut Wasser und Umwelt (fwu), Universität Siegen, 2020.

(Prof. Dr.-Ing. Jürgen Jensen)

(J.-Prof. Dr.-Ing. Arne Arns)

(Sebastian Niehüser, M.Sc.)

Literaturverzeichnis

- Bass, J. und Kleyer, M.: Der Einfluss von Vegetation auf Höhenänderungen in Salzwiesen. Abschlussbericht zum Verbundvorhaben Living CoastLab Halligen – Teil Hallig-C, BMBF-Förderkennzeichen 03F0759C: Vorhaben: Bestimmung biogeomorphologischer Rückkopplungen zwischen Pflanzen und Sedimenten, Arbeitsgruppe Landschaftsökologie, Universität Oldenburg, 2020.
- Chow, V. T.: Open-channel hydraulics. New York, USA: McGraw-Hill New York, 1959.
- EurOtop: Manual on wave overtopping of sea defences and related structures. An overtopping manual largely based on European research, but for worldwide application. van der Meer, J. W., Allsop, N. W. H., Bruce, T., de Rouck, J., Kortenhaus, A., Pullen, T., Schüttrumpf, H., Troch, P. and Zanuttigh, B., Online verfügbar: www.overtopping-manual.com, 2016.
- Hache, I.; Karius, V. and von Eynatten, H.: Suspended particulate matter for sediment accumulation on inundated anthropogenic marshland in the southern North Sea – Potential, thresholds and limitations. Eingereicht bei Continental Shelf Research, 2020. (zur Veröffentlichung eingereicht/in review).
- Hache, I.; Karius, V.; Gutkuhn, J. and von Eynatten, H.: The development and application of an autonomous working turbidity measurement network: Assessing the spatial and temporal distribution of suspended particulate matter on tidal flats in the North Frisian Wadden Sea. Continental Shelf Research, 176, 36-50. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2019.02.010>, 2019.
- Jensen, J.; Arns, A.; Schüttrumpf, H.; Wöffler, T.; Häußling, R.; Ziesen, N.; Jensen, F.; von Eynatten, H.; Schindler, M. und Karius, V.: ZukunftHallig – Entwicklung von nachhaltigen Küstenschutz- und Bewirtschaftungsstrategien für die Halligen unter Berücksichtigung des Klimawandels. In: Die Küste 84. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau. S. 3-8, online verfügbar: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/105210>, 2016.
- Hache, I.; Karius, V. und von Eynatten, H.: Messung, Bewertung und Einflussfaktoren der Trübung in der Wassersäule - Schlussfolgerungen für einen die Sedimentakkumulation optimierenden Küstenschutz auf Hallig Langeneß. Abschlussbericht zum Verbundvorhaben Living CoastLab Halligen – Teil Hallig-D, Geowissenschaftliches Zentrum Abtl. Sedimentologie/Umweltgeologie, Georg-August Universität Göttingen, 2020.
- Kleyer, M.; Trinogga, J.; Cebrián-Piqueras, M. A.; Trenkamp, A.; Fløjgaard, C.; Ejrnæs, R.; Bouma, T. J.; Minden, V.; Maier, M. and Mantilla-Contreras, J.: Trait correlation network analysis identifies biomass allocation traits and stem specific length as hub traits in herbaceous perennial plants. Journal of Ecology, 107(2), 829-842, 2019.

- Krebs, V.; Ziesen, N; Wöffler, T.; Häußling, R. und Schüttrumpf, H.: Teilstationäre Maßnahmen als kurzfristige Strategie zum Schutz der nordfriesischen Halligen - Einsatztests unter praxisnahen Bedingungen und Berücksichtigung sozialer Bedürfnisse der Bewohner*innen. Abschlussbericht zum Verbundvorhaben Living CoastLab Halligen – Teil Hallig-B, BMBF-Förderkennzeichen 03F0759B, Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft (IWW) und Institut für Soziologie (IfS) der RWTH Aachen University, 2020.
- Lavorel, S.; McIntyre, S.; Landsberg, J. and Forbes, T. D. A.: Plant functional classifications: from general groups to specific groups based on response to disturbance. *Trends in Ecology & Evolution*, 12(12), 474-478, 1997.
- Manning, R.: On the flow of water in open channels and pipes. *Transactions of the Institution of Civil Engineers of Ireland* 20, 161-207, 1891.
- Mudd, S. M.; D'Alpaos, A. and Morris, J. T.: How does vegetation affect sedimentation on tidal marshes? Investigating particle capture and hydrodynamic controls on biologically mediated sedimentation. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 115, F03029, 2010.
- Niehüser, S.; Klein, M.; Arns, A. und Jensen, J.: Analysen zum langfristigen Schutz der Halligen – Wechselwirkung zwischen Hydrodynamik und Sedimenttransport. Abschlussbericht zum Verbundvorhaben Living CoastLab Halligen – Teil Hallig-A, BMBF-Förderkennzeichen 03F0759A: Vorhaben: Einschätzung des Einflusses von Einzelmaßnahmen und Strategieentwicklung, Forschungsinstitut Wasser und Umwelt (fwu), Universität Siegen, 2020.
- Quedens, G.: Die Halligen. Breklumer Verlag, Breklum, 1992.
- Reef, R.; Schuerch, M.; Christie, E. K.; Möller, I. and Spencer, T.: The effect of vegetation height and biomass on the sediment budget of a European saltmarsh. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 202, 125-133, 2018.
- Schindler, M.; Karius, V.; Arns, A.; Deicke, M. and von Eynatten, H.: Measuring sediment deposition and accretion on anthropogenic marshland - part II: The adaption capacity of the North Frisian Halligen to sea level rise. *Estuarine, Coastal, and Shelf Science*, 151, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2014.08.027>, 2014.
- Strickler, A.: Beiträge zur Frage der Geschwindigkeitsformel und der Rauigkeitszahlen für Ströme, Kanäle und geschlossene Leitungen. Bern, Switzerland: Eidg. Amt für Wasserwirtschaft, 1923.

Anhang

FACHBERICHTE

(ungekürzte Fachberichte in dieser Form zur Veröffentlichung in der
Schriftenreihe „Die Küste“ eingereicht)

Praxisnahes Küstenlabor zur Entwicklung von kurz- und langfristigen Strategien zum Schutz und zur Bewahrung der schleswig-holsteinischen Halligen (Living CoastLab Halligen)

Jürgen Jensen, Arne Arns, Sebastian Niebüser, Holger Schüttrumpf, Verena Krebs, Theide Wöffler, Roger Häußling, Nenja Ziesen, Michael Kleyer, Julia Bass, Hilmar von Eynatten, Volker Karius und Ingo Hache

Zusammenfassung

Im Rahmen des Vorgängerprojektes von Living CoastLab Halligen („ZukunftHallig“; Jensen et al. 2016) konnte gezeigt werden, dass auf den Halligen verbleibende Sedimentablagerungen infolge regelmäßiger Überflutungen ein vertikales Anwachsen der Geländehöhen begünstigen. Gleichzeitig wurde jedoch ein stärkerer Trend im Anstieg der mittleren und extremen Wasserstände beobachtet. Prognosen über zukünftige Wasserstände deuten sogar auf noch stärkere Anstiege der Wasserstandsverhältnisse hin (Church et al. 2013). Durch die derzeitigen Aufwuchsraten können die Wasserstandsänderungen voraussichtlich nicht kompensiert werden. Um die Halligen nachhaltig zu sichern, werden daher Strategien benötigt, die diese natürliche Anpassungsfähigkeit fördern und gleichzeitig einen unmittelbaren Schutz der Bewohner*innen auf den Warften ermöglichen. Durch ein inter- und transdisziplinäres Team aus Ingenieuren*innen, Soziologen*innen, Ökologen*innen, Geologen*innen sowie Behörden und Vertretern*innen der lokalen Bevölkerung wurden geeignete Strategien untersucht und entwickelt. Bei den Forschungsarbeiten wurde dabei zwischen kurzfristigen Schutzmaßnahmen und langfristigen Strategien zur Verbesserung der natürlichen Anpassungsfähigkeit der Halligen unterschieden. Das dreijährige Projekt wurde im Rahmen des Förderschwerpunkts „Küstenmeerforschung in Nord- und Ostsee (KüNO)“ mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert. Insgesamt waren fünf Forschungsinstitute an dem Verbundvorhaben Living CoastLab Halligen beteiligt.

Schlagwörter

Halligen, Trübung, Sedimentation, Erosion, Vegetation, Hydrodynamik, Schwebstoffe, Modellierung des Sedimenttransports

Summary

Within the framework of the previous project of Living CoastLab Halligen (ZukunftHallig; Jensen et al. 2016) it could be shown that sediment deposits remaining on the Halligen as a result of regular flooding encouraging a vertical increase of the terrain heights. At the same time, however, a stronger trend in the rise of medium and extreme water levels was observed. Projections of future water levels indicate even stronger increases in water level conditions (Church et al. 2013). The current rates of accretion are unlikely to be

able to compensate for the changes in water levels. In order to secure the Halligen in the long term, strategies are therefore needed that enhance this natural adaptability and at the same time enable direct protection of the inhabitants. Such strategies have been investigated and developed by an inter- and transdisciplinary team of engineers, sociologists, ecologists, geologists, authorities and representatives of the local population. In the research work, a decisive distinction was made between short-term protection measures and long-term strategies to improve the natural adaptability of the Halligen. The three-year project was funded by the Federal Ministry of Education and Research (BMBF) as part of the funding priority " Küstenmeerforschung in Nord- und Ostsee (KüNO)". A total of five research institutes were involved in the joint project Living CoastLab Halligen.

Keywords

Halligen, turbidity, sedimentation, erosion, vegetation, hydrodynamics, suspended particulate matter, sediment transport modelling

Inhalt

1	Einleitung.....	2
2	Ziele	3
3	Vorgehen.....	4
4	Ergebnisse und Ausblick.....	5
4.1	Hallig-A – Einschätzung des Einflusses von Einzelmaßnahmen und Strategieentwicklung (fwu).....	5
4.2	Hallig-B I und II – Bewertung der einzelnen Küstenschutzmaßnahmen unter realen Bedingungen (IWW) und Verknüpfung von wissenschaftlichen Konzepten mit sozialen Bedürfnissen (IfS)	7
4.2.1	Hallig-B I	7
4.2.2	Hallig-B II.....	8
4.3	Hallig-C – Bestimmung biogeomorphologischer Rückkopplungen zwischen Pflanzen und Sedimenten (LÖK)	9
4.4	Hallig-D – Vermessung, Bewertung und Beeinflussung der Trübung der Wassersäule (GZG)	10
5	Danksagung	11
6	Schriftenverzeichnis.....	11

1 Einleitung

Inmitten des Schleswig-Holsteinischen Wattenmeeres, das 2009 in die Liste des UNESCO-Welterbes aufgenommen wurde, befinden sich die weltweit einzigartigen Halligen. Die kleinen Marschinseln haben keine Deiche und sind aufgrund ihrer exponierten Lage unmittelbar dem Einfluss von Sturmfluten und dem Meeresspiegelanstieg ausgesetzt. Bis zu 50-mal

im Jahr werden die Halligen mit Ausnahme der Warften und der darauf befindlichen Gebäude überflutet. Trotz dieser Überflutungen leben gegenwärtig etwa 270 Bewohner auf den Halligen, deren Lebensweise optimal an diese speziellen Bedingungen angepasst ist. Der Klimawandel wird jedoch für eine Verschärfung der Situation in diesem Lebensraum sorgen. Im Rahmen des Vorgängerprojektes „ZukunftHallig“ (Jensen et al. 2016) konnte gezeigt werden, dass auf den Halligen verbleibende Sedimentablagerungen infolge regelmäßiger Überflutungen ein vertikales Anwachsen der Geländehöhen begünstigen. Gleichzeitig wurde jedoch ein stärkerer Trend im Anstieg der mittleren und extremen Wasserstände beobachtet. Prognosen über zukünftige Wasserstände deuten sogar auf noch stärkere Anstiege hin (Church et al. 2013), welche durch die derzeit abgelagerten Sedimentmengen nicht kompensiert werden können. Um die Halligen nachhaltig zu sichern, werden daher Strategien benötigt, die diese natürliche Anpassungsfähigkeit fördern und gleichzeitig einen unmittelbaren Schutz der Bewohner*innen auf den Warften ermöglichen. Im Rahmen des Projektes Living CoastLab Halligen wurden diese Strategien von einem inter- und transdisziplinären Team aus Ingenieuren*innen, Soziologen*innen, Ökologen*innen, Geologen*innen sowie Behörden und Vertretern*innen der lokalen Bevölkerung entwickelt. Im Folgenden werden die übergeordneten Ziele des Verbundvorhabens Living CoastLab Halligen erläutert, das Vorgehen der einzelnen Teilprojekte beschrieben sowie die wichtigsten Erkenntnisse einschließlich eines Ausblicks und verbleibendem Forschungsbedarfs gegeben.

2 Ziele

Das übergeordnete Ziel des Verbundvorhabens Living CoastLab Halligen ist, nachhaltige Strategien für den Küstenschutz und das Küstenmanagement der schleswig-holsteinischen Halligen zu entwickeln. Im Forschungsprojekt „ZukunftHallig“ (das Vorläuferprojekt dieses Antrags) identifizierten Jensen et al. (2016) zwei verschiedene Zeitskalen, die bei der Entwicklung solcher Strategien berücksichtigt werden müssen: (i) kurzfristige Schutzmaßnahmen für die Bewohner*innen, die direkt umgesetzt werden könnten, und (ii) langfristige Strategien zur Verbesserung der natürlichen Anpassungsfähigkeit der Halligen. Die damit verbundenen Forschungsfragen lauten:

- i. Welche Küstenschutzmaßnahmen und -strategien werden von den Bewohnern*innen als sinnvoll erachtet, welche sind (technisch) umsetzbar und was sind zentral zu berücksichtigende Aspekte?
- ii. Wie kann die natürliche Anpassungsfähigkeit der Halligen unter Berücksichtigung eines erhöhten Meeresspiegels verbessert werden?

Um diese Fragen zu beantworten, wurde (i) die Wirksamkeit kurzfristiger Maßnahmen (innovative, mobile Hochwasserschutzmaßnahmen) im Labor für unterschiedliche Belastungsfälle getestet und hinsichtlich der für die Hallig-Bewohner*innen elementaren Kriterien bewertet und in Gruppendiskussionen auf den Halligen vorgestellt. Für die Ableitung langfristiger Strategien zur natürlichen Anpassung an den Meeresspiegelanstieg und einen optimierten Küstenschutz wurden (ii) anhand von beobachteten und gemessenen Daten (z. B. Naturmessungen der Trübung, Erfassung des Wellenaufbaus, Einfluss der Vegetation auf die Sedimentablagerung etc.) sowie einer Kombination aus statistischen und hydrodynamisch-numerischen Modellen Analysen durchgeführt und bewertet. Diese ermögli-

chen, die Ursachen und Folgen verschiedener Maßnahmen (z. B. optimierte Deckwerks-höhen, Betriebsarten von Schleusen/Sielen, optimierte landwirtschaftliche Nutzung) abzu-schätzen. Konkret wurden die im Folgenden aufgeführten weiteren Forschungsziele defi-niert:

- Simulation der Wechselwirkung zwischen hydrodynamischer Einwirkung und dem resultierenden Sedimenttransport.
- Abschätzung von langfristigen Änderungen der Sedimentation (für die Jahre 2030, 2050, 2080).
- Bereitstellung optimierter Schutz- und Managementstrategien für die Halligen.
- Erfassen von Trübungsmessungen vor und auf der Hallig und vertikalen Auf-wuchsraten für einzelne Sturmflutereignisse.
- Verständnis des Beitrags der Vegetation auf die Sedimentablagerung.
- Akzeptanz durch Einbeziehung der Bewohner*innen (Bedürfnisse, Erwartun-gen, Erfahrungen) für einen nachhaltigen Langzeitschutz der Halligen.

Um diese Ziele zu erreichen, sind detaillierte Kenntnisse über die lokalen Bedingungen erforderlich. Sowohl der Projektkoordinator als auch die Teilprojektleiter verfügen über eine breite Erfahrung (auch gemeinsam) im Untersuchungsgebiet und haben größtenteils bereits im Projekt „ZukunftHallig“ mitgewirkt. Aufbauend auf diesem Wissen und dieser Erfahrung sind für das hier vorgestellte Nachfolgeprojekt vier Teilprojekte geplant worden, die Sozial-, Natur- und Ingenieurwissenschaften (interdisziplinär) sowie staatliche Institu-tionen und Bewohner*innen (transdisziplinär) einbeziehen (vgl. Kap. 3).

3 Vorgehen

Das Projekt gliederte sich in vier Teilprojekte bzw. Arbeitspakete (vgl. Abb. 1). Insgesamt waren fünf Forschungsinstitutionen der Universitäten Siegen (Koordinator; Forschungs-institut Wasser und Umwelt (fwu)), Aachen (Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft (IWW); Institut für Soziologie, Lehrstuhl Technik- und Organisationssoziologie (IfS)), Oldenburg (Institut für Biologie und Umweltwissenschaften: Arbeitsgruppe Land-schaftsökologie (LÖK)) und Göttingen (Geowissenschaftliches Zentrum der Universität Göttingen (GZG)) an dem Verbundprojekt beteiligt.

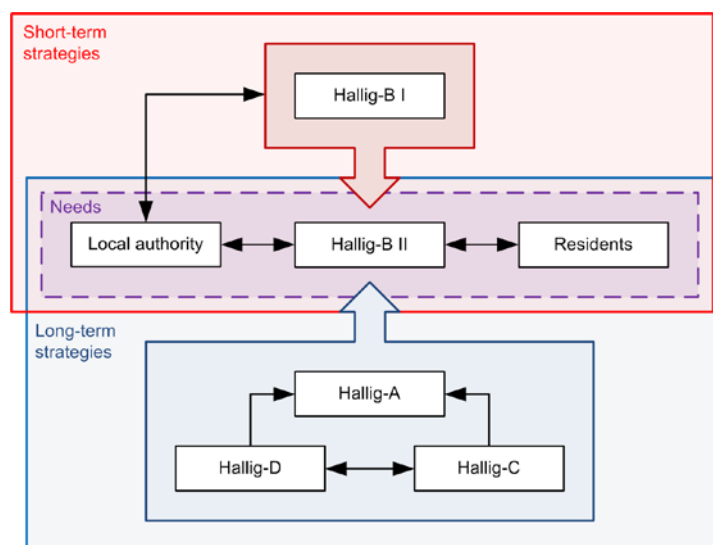


Abbildung 1: Vernetzung der Teilprojekte im Projekt Living CoastLab Halligen.

Im ersten Arbeitspaket (Hallig-A) wurden am fwu multivariate Analysemethoden zur statistischen Erfassung und Beschreibung der ermittelten Werte aus Feldmessungen der Trübung in der Wassersäule zur Übertragung auf das Untersuchungsgebiet verwendet. Anschließend wurden die hydrodynamischen Einwirkungen sowie deren Rückkopplung auf den Sedimenttransport im Untersuchungsgebiet analysiert und modelliert. Übergeordnetes Ziel ist die Abschätzung langfristiger Sedimentationsraten für die Jahre 2030, 2050 und 2080 unter der Berücksichtigung von Meeresspiegelprojektionen, die ein vertikales Anwachsen der Hallig bedingen. Auf Basis dieser Informationen sowie der entwickelten Modellkette können optimierte Schutz- und Managementstrategien erarbeitet werden (Niehüser et al. 2020).

Im Rahmen des zweiten Arbeitspakets wurde die Wirksamkeit kurzfristiger Maßnahmen unter Berücksichtigung von Vorschlägen bewertet, die im Vorläuferprojekt „ZukunftHallig“ gemeinsam mit den Hallig-Bewohnern*innen entwickelt wurden. Im Zentrum stehen dabei mobile Hochwasserschutzmaßnahmen. Diese wurden am IWW in Labortests untersucht und hinsichtlich ihrer technischen Eignung beurteilt (Hallig-B I). Parallel identifizierte das IfS über Expert*innen-Interviews für die Hallig-Bewohner*innen elementare Kriterien (Hallig-B II). In Gruppendiskussionen auf den Halligen wurden die Ergebnisse der Laboruntersuchungen vorgestellt und Meinungsbilder der Bewohner eingeholt (Hallig-B I und II). Ziel ist eine abschließende Bewertung der Wirksamkeit der mobilen Maßnahmen unter Einbeziehung der Hallig-Bewohner*innen und Berücksichtigung aller relevanter Kriterien (Krebs et al. 2020).

Am LÖK in Oldenburg wurde im dritten Arbeitspaket (Hallig-C) der Einfluss von Pflanzengemeinschaften und ihren biologischen Merkmalen auf die Sedimentation in Salzwiesen untersucht. Pflanzengemeinschaften und ihre Merkmale hängen von der Flächenbewirtschaftung durch die Landwirte ab. Somit können die Ergebnisse bei der Entwicklung langfristiger Managementstrategien helfen (Bass et al. 2020).

Das GZG in Göttingen führte im vierten Arbeitspaket (Hallig-D) schließlich Trübmessungen vor und auf der Hallig, Messungen zur Sedimentakkumulation auf der Hallig sowie Sedimenttransportmodellierungen durch. Übergeordnete Ziele waren die Identifikation von Trübstoffen, die auf Grund der Rahmenbedingungen nicht zur Sedimentakkumulation beitragen und die Erarbeitung und modellmäßige Überprüfung von Vorschlägen für einen modifizierten Küstenschutz (Karius et al. 2020).

4 Ergebnisse und Ausblick

4.1 Hallig-A – Einschätzung des Einflusses von Einzelmaßnahmen und Strategieentwicklung (fwu)

Ob ein natürliches Potential zur Erhöhung der Sedimentdeposition vorhanden ist, hängt einerseits von den Trübstoffkonzentrationen in der Wassersäule rund um die Halligen während eines Hochwasserereignisses, das zu einem Landunter führt, ab. Andererseits muss der Transport der Sedimente auf die Hallig gewährleistet sein. Zur Abschätzung des Sedimenttransportes und den Ablagerungsprozessen sowie dem Einfluss unterschiedlicher Maßnahmen und Eingriffe werden beobachtete und statistisch generierte Daten sowie eine Kombination verschiedener statistischer und numerischer Modelle herangezogen.

Für die statistische Erfassung und Beschreibung der ermittelten Trübewerte in der Wassersäule aus Feldmessungen zur flächigen Übertragung um und auf die Hallig Langeneß kann geschlussfolgert werden, dass die einzelnen Auswertungen der Messstationen unterschiedliche Charakteristiken aufweisen. Dies ist bedingt durch die Komplexität der ablaufenden physikalischen Prozesse und der Unsicherheiten in den Trübungsmessungen. Zudem stellen die verwendeten Daten aus der numerischen Modellierung eine vereinfachte Abbildung der in der Natur auftretenden und hochfrequenten Prozesse. Auf Basis von künstlichen neuronalen Netzen konnten die Trübedaten allerdings für die vorliegende Fragestellung adäquat widergegeben werden (RMSE: 0,03 bis 0,08 g/l; R^2 : 0,64 bis 0,89) und auf das Untersuchungsgebiet angewendet werden. Verbleibende Unsicherheiten resultieren im Wesentlichen aus der Extrapolation für unbekannte Ereignisse.

Die Simulation der Wechselwirkung zwischen hydrodynamischer Einwirkung auf den resultierenden Sedimenttransport auf die Hallig Langeneß hat gezeigt, dass bei moderaten Landunterereignisse, wie sie während der Projektlaufzeit erfasst wurden, deutlich weniger Sedimente und nur feinere Sedimentfraktionen (maßgeblich Schluffe) auf die Hallig gelangen, als beispielsweise bei einer sehr schweren Sturmflut (Schluff bis Feinsand). Diese Erkenntnisse werden gestützt durch die Beobachtungen und Erfahrungen aus den Felduntersuchungen und der Hallig-Bewohner*innen. Die Abschätzung von langfristigen Änderungen der Sedimentation für die Jahre 2030, 2050 und 2080 hat gezeigt, dass sich die Differenzen zwischen einem moderaten Landunter und einer Sturmflut bei einem erhöhten Basiswasserstand in Form des prognostizierten Meeresspiegelanstiegs angleichen. Der Sedimenttransport findet, begünstigt durch die hydrodynamischen Verhältnisse und die niedrigere Ausbildung der Halligkante, hauptsächlich im Süden der Hallig Langeneß statt. Die Sedimentation zeigte bei den durchgeführten Analysen Maximalwerte in der Nähe der Siele. Zukünftig ist zu berücksichtigen, dass mit einem steigenden Wasserstand durch den prognostizierten Meeresspiegelanstieg auch die Strömungsgeschwindigkeiten und damit die Sohlschubspannungen zunehmen und einer nachhaltigen Konsolidierung der Sedimente gegenüberstehen können.

Aus diesem Grund wird die Modellkette zur Entwicklung optimierter Schutz- und Managementstrategien für die Halligen bereitgestellt, um Vergleichsbetrachtungen und entsprechende Entscheidungen zum Erhalt der Halligen durchführen zu können (vgl. Karius et al. 2020). Die Untersuchungen lassen u. a. den Schluss zu, dass die Halligkante einen „widersprüchlichen“ Nutzen aufweist. Auf der einen Seite können nur bei ausreichend hohen Wasserständen Sedimente auf die Hallig transportiert werden, die für einen vertikalen Aufwuchs erforderlich sind. Zum anderen wird für die Sedimentation eine ausreichend lange Beruhigung der Strömungsprozesse benötigt. Mit der entwickelten Modellkette können unterschiedliche Fragestellungen zum Erhalt bzw. zur Stabilisierung der Halligen durchgeführt werden, z. B. wie sich unterschiedliche Deckwerksstrukturen und -höhen sowie Sieltoranlagen, Halligpriele und Gräben auf den Transport und die Sedimentation der Trübstoffe in der Wassersäule. Hierbei ist es wichtig, die Erfahrungen der Hallig-Bewohner*innen mit einzubeziehen und zu berücksichtigen.

4.2 Hallig-B I und II – Bewertung der einzelnen Küstenschutzmaßnahmen unter realen Bedingungen (IWW) und Verknüpfung von wissenschaftlichen Konzepten mit sozialen Bedürfnissen (IfS)

4.2.1 Hallig-B I

Im Rahmen des Arbeitspakets Hallig-B I fand die Untersuchung von kurzfristigen Küstenschutzmaßnahmen unter realen Bedingungen statt. Aufbauend auf Vorschlägen aus dem Vorgängerprojekt „ZukunftHallig“ wurde hierzu insbesondere der Einsatz mobiler Hochwasserschutzmaßnahmen als relevant und kurzfristig umsetzbar identifiziert. Aufgrund der Schwierigkeiten, die mit einem ursprünglich geplanten Praxistest der mobilen Maßnahmen auf einer Halligwarft einhergingen (Probleme bei den Genehmigungen durch die Küstenschutzbehörden sowie die Unvorhersehbarkeit des tatsächlichen Eintretens einer Sturmflut während der Projektlaufzeit), fanden die Untersuchungen unter kontrollierten aber dennoch realitätsnahen Bedingungen im Labor statt. Insgesamt wurden drei neuartige Systeme, die bereits im Binnenbereich Anwendung finden, sowie ein konventionelles System (Sandsäcke), das bereits jetzt auf den Halligen eingesetzt wird, getestet (Abb. 2).



Abbildung 2: Im Labor getestete mobile Hochwasser- bzw. Küstenschutzmaßnahmen.

Zur Bewertung der Wirksamkeit wurden zwei Anwendungsfälle betrachtet: das Verschließen von Stöpen im Ringdeich der Warften und der Objektschutz auf der Warft. Die Maßnahmen wurden im Labor fünf Belastungsfällen (Einstau, Anströmen, Wellenanprall, Überströmen und Treibgutprall) ausgesetzt. Durch Verschiebungsmessungen, die Bestimmung von Leckageraten sowie visuelle Beobachtung wurde die Performance der Maßnahmen bewertet. Die Beurteilung der hydrodynamischen Wirksamkeit im Sturmflutfall erfolgte schließlich aufbauend auf den labortechnischen Ergebnissen getrennt für die beiden Anwendungsfälle.

Generell sind alle untersuchten Maßnahmen auch unter den küstenspezifischen Belastungen hydrodynamisch wirksam. Einschränkungen ergeben sich für zwei Maßnahmen (Sandsäcke und Hydrobaffle) infolge der mangelnden Standsicherheit im Falle einer Überströmung, insbesondere beim Hydrobaffle führt ein Nichteinhalten des Freibords in bestimmten Anwendungsfällen zu einem plötzlichen und schlagartigen Versagen der Maßnahme. Unter Einbeziehung weiterer für die Halligbewohner*innen relevanter Aspekte (Platzbedarf, Wartungsbedarf, Aufbauzeit etc.) ergibt sich ein differenzierteres Bild (siehe Krebs et al. 2020), wobei alle Maßnahmen unter bestimmten Bedingungen für den Einsatz auf den Warften geeignet sind. Sie verfügen damit über das Potenzial, den bestehenden Sturmflutschutz zu ergänzen und an Schwachstellen zu verbessern.

Die Vorstellung der Maßnahmen in Gruppendiskussionen auf den Halligen (s. u.) zeigte ein heterogenes Meinungsbild unter den Halligbewohner*innen hinsichtlich ihrer Einschätzung der Wirksamkeit der Maßnahmen. Für die Zukunft könnte ein beispielhafter Einsatz

neuartiger Maßnahmen vor Ort (direkter Einsatz oder Probeaufbau) dazu beitragen, die Akzeptanz in der Bevölkerung zu erhöhen. Die Untersuchungen zeigten, eine Ergänzung der konventionellen Maßnahmen durch innovative mobile Maßnahmen kann den Küstenschutz verbessern und verstärken. Es gilt jedoch zu betonen, dass es sich um kurzfristige Maßnahmen handelt, die generelle Notwendigkeit langfristiger Maßnahmen bleibt hiervon unberührt.

4.2.2 Hallig-B II

Um den Einbezug der Halligbewohner*innen in die Entwicklung alternativer Küstenschutzmaßnahmen zu gewährleisten, wurde sowohl Datenmaterial aus dem Vorgängerprojekt „ZukunftHallig“ verwendet als auch 16 qualitative Interviews geführt und zwei Gruppendiskussionen (Hallig Hooge/Hallig Langeneß) arrangiert. Zu den besonderen Merkmalen des Lebensraumes Halligen zählen insbesondere ihre geografische Lage und die daraus entstehenden Einschränkungen. Aufgrund dieser exponierten Lebenslage, dem Leben mit Landunter sowie mit Sturmfluten verfügen insbesondere die schon lange ansässigen Halligbewohner*innen über ein besonderes Erfahrungswissen. Für die Akzeptanz alternativer Maßnahmen ist es wichtig, die Bedürfnisse und Erwartungen der Bewohner*innen miteinzubeziehen, wobei zugleich auch auf die Erfahrungsbestände zurückgegriffen werden kann, um neue Maßnahmen auf praktische Anwendbarkeit zu überprüfen und weiterzuentwickeln. Die bisher auf den Halligen angewandten Küstenschutzmaßnahmen, wie unter anderem Warften, geschlossene Deckwerke und Lahnungen, haben einen sehr hohen Stellenwert. Als zentrale Aspekte, welche neue Küstenschutzmaßnahmen erfüllen sollen, wurden insbesondere die Verträglichkeit mit der Umgebung wie beispielsweise mit den Boden-, Wind-, Wasser-, Strömungsverhältnissen, als auch mit den bisherigen Maßnahmen genannt. Neue Maßnahmen sollten somit kompatibel mit den bisherigen Maßnahmen sein und/oder als Ergänzung fungieren. Außerdem ist die Möglichkeit der Anwendung auf den Halligen besonders zu berücksichtigen: Hierzu zählen die technische Anwendbarkeit, die Personenkraft, als auch die Lagerung und Wartung neuer Maßnahmen sowie die Kosten dieser. Herauszustellen ist die Individualität der einzelnen Halligen und Warften. Daher ist auch über unterschiedliche, individuelle Lösungen nachzudenken. Bezüglich der Sedimentation werden Vermutungen angestellt, dass sich lediglich bei Sturmflut Sediment ablagert, welches zum Anwachsen führt, jedoch nicht bei normalen Landunter. Dementsprechend kritisch wird auch das Stehenlassen des Wassers betrachtet. Durch den Vortrag zur Sedimentation im Rahmen der Gruppendiskussion konnten bisherige Ergebnisse der Proben auf Hallig Langeneß für die Bewohner*innen transparent gemacht werden, wobei für die Teilnehmer*innen auf Hooge die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf die Hallig Hooge relevant sind. Insgesamt werden generell Maßnahmenvorschläge zur Erhöhung der Sedimentation auf Hooge sowie zum Erhalt der Sandbänke als wünschenswert erachtet. Zudem wird eine intensivere Zusammenarbeit von Küsten- und Naturschutz gewünscht. Bei den vorgestellten Maßnahmen haben sich deutliche Unterschiede im Meinungsbild der Bewohner*innen ergeben: Während die Diskussionsteilnehmer*innen auf Langeneß und Nordstrandischmoor allen vorgestellten Systemen ablehnend gegenüberstehen, erscheint das automatische System Klappschott für die Bewohner*innen von Hooge am geeignetsten, aber auch HWS-mobil wird hier bezüglich einer Erfüllung zentraler Aspekte positiv gewertet. Jedoch zeigte sich weiterer Testungsbedarf bezüglich der Faktoren Starkregen, Salzwasser

und Salzluft. Darüber hinaus wird eine Testung in der Versuchshalle von bestehenden Maßnahmen, beispielsweise der herkömmlichen Schotten oder Dammbalken als Einsatz in der Stöpe, für einen Vergleich als wünschenswert erachtet. Außerdem wurden weiterführende, zu untersuchende Vorschläge getätigt (zu finden im Maßnahmenkatalog). Durch das oben genannte partizipative Verfahren gewährleistet durch Interviews und Gruppendiskussionen, konnten und können die Bedürfnisse, Erwartungen und Erfahrungen der Halligbewohner*innen in die (Weiter-)Entwicklung von alternativen Küstenschutzmaßnahmen einfließen.

4.3 Hallig-C – Bestimmung biogeomorphologischer Rückkopplungen zwischen Pflanzen und Sedimenten (LOK)

In dem dritten Teilprojekt (Hallig-C) wurde der Einfluss von biologischen Eigenschaften der Vegetation auf die Sedimentationsrate in Salzwiesen untersucht. Die biologischen Eigenschaften werden auch durch die Bewirtschaftung der Flächen beeinflusst, so dass die Ergebnisse bei der Entwicklung langfristiger Managementstrategien der Halligen genutzt werden könnten.

Die Integration von Vegetation als Rauheitsbeiwert in hydrodynamischen Modellen hat eine lange Tradition (Manning 1891; Strickler 1923). Allerdings wird die Vegetation dafür nur in sehr grobe Klassen unterteilt und es bleibt Raum für subjektive Interpretation (Chow 1959). Eine bessere Beschreibung der Rauheit der Vegetation liefern messbare, biologische Eigenschaften der Pflanzen (Lavorel et al. 1997). Dennoch gibt es nur wenige – und zum Teil widersprüchliche – Studien, die biologische Merkmale und vertikalen Höhenänderungen in Salzwiesen betrachten (Mudd et al. 2010; Reef et al. 2018).

Mit linearer Regression wurde der Einfluss von Rauheit und Abstand zur Halligkante auf die Sedimentation untersucht. Die Rauheit der Vegetation lässt sich durch die oberirdischen Eigenschaften Wuchshöhe, Stammbiomasse, Blattbiomasse, Blattfläche sowie spezifische Stängellänge als Wert für die Biegsamkeit des Stängels beschreiben. Viele Merkmale krautiger Pflanzen Nord-West Europas sind korreliert (Kleyer et al. 2019), so auch die Eigenschaften der Arten auf den Halligen. Daher gingen sie als aggregierte Variable mit dem Wert der ersten Hauptkomponente in die Regression ein. Lediglich die Wuchshöhe ging als einzelne Variable in die Regression ein.

Die Ergebnisse zeigen einen linearen Zusammenhang zwischen Sedimentation und Distanz zur Halligkante und einen wannenförmigen Zusammenhang zwischen Sedimentation und Wuchshöhe der Pflanzen. Hohe Vegetation nahe der Halligkante führte zu besonders hoher Sedimentation. Die Güte der Modellanpassung war moderat. Andere Parameter der Rauigkeit der Vegetation (spezifische Stängellänge, Biomasse der Stängel, etc.) hatten zwar auf den Halligen keinen signifikanten Einfluss auf die Sedimentation, in natürlicheren Salzwiesen, wie sie an der Festlandküste oder auf den Barriere Inseln zu finden sind, allerdings schon (Bass et al. in prep).

Die Salzwiesen der Halligen sind größtenteils durch Gemeinschaften der oberen Salzwiese geprägt (vorwiegend *Juncus gerardii*-*Festuca rubra*-Typ) und unterschieden sich hauptsächlich durch die Beweidungsintensität. Eine starke Beweidung führt zu einer deutlichen Reduktion der Wuchshöhe am Ende der Vegetationsperiode, wenn die Sturmfluten beginnen, so dass dieses Merkmal die Rauheit am besten beschreibt. In Salzwiesen mit einer

natürlicheren Sukzession und unterschiedlicheren Vegetationsgemeinschaften eigenen sich hingegen die anderen biologischen Eigenschaften besser.

Die Ergebnisse des dritten Teilprojekts zeigen, dass die oberirdischen Strukturen der Vegetation einen zusätzlichen Einfluss auf die Sedimentationsrate und somit auf das vertikale Wachstum der Salzwiesen haben. Dieser Einfluss ist allerdings auf den Halligen relativ gering, so dass die Berücksichtigung der Vegetation in Modellen zu den Entwicklungen von Salzwiesen die Vorhersagen lediglich leicht verbessern kann. Im Hinblick auf langfristigen Managementstrategien könnte das Aussetzen der Beweidung und eine damit verbundene Steigerung der Rauheit ebenfalls nur zu einer geringen Zunahme der Sedimentablagerungen und resultierendem vertikalen Anwachsen der Geländehöhe führen.

4.4 Hallig-D – Vermessung, Bewertung und Beeinflussung der Trübung der Wassersäule (GZG)

Auf der Hallig Langeness wurde ein Trübungmessnetzwerk errichtet, welches aus sechs Stationen im Watt und zwei Stationen auf der Hallig von Februar 2017 bis März 2020 insbesondere in den Wintermonaten kontinuierlich Trübedaten geliefert hat. Durch entsprechende Kalibration konnten SPM-Gehalte (Suspended particulate matter) bestimmt und mit Sedimentakkumulationsraten, die mit Sedimentfallen auf der Hallig gemessen wurden, korreliert werden. Ausgehend von den meteorologischen Parametern, wie Windrichtung und Windgeschwindigkeit, konnten die zeitliche und räumliche Variabilität des SPM um die Hallig bestimmt werden (Hache et al. 2019).

Im zweiten Schritt wurden bis zu acht „Land unter“ im Zeitraum 2017-2019 einzeln erfasst und die Sedimentakkumulation auf der Hallig zeitlich bestimmt. Dabei wurden Sedimentfallen hinter den Halligkanten in räumlicher Nähe zu den im Watt befindlichen Trübungmessstationen ausgewertet. Mit diesen Sedimentfallen konnten Sedimentakkumulationsraten hinter unterschiedlich hohen Halligrauhstreifen („Igel“) gemessen werden. Im Ergebnis konnten SPM-Gehalte vor der Halligkante gemessen werden, die zwar potentiell zur Sedimentakkumulation auf der Hallig beitragen könnten aber bedingt durch die Küstenschutzmaßnahmen nur teilweise ausgeschöpft werden. Hierbei konnte der Einfluss der Igelhöhe auf die Sedimentakkumulation gezeigt werden (Hache et al. 2020). Über die Wintermonate integrierte Sedimentakkumulationsraten bestätigen die im Vorgängerprojekt „ZukunftHallig“ erhobenen Daten (Schindler et al. 2014).

Im Zeitraum Winter 2019/2020 konnten erstmalig die SPM-Gehalte sowie die Sedimentakkumulation bei echten Sturmflutbedingungen gemessen werden. Insgesamt wurden drei Überflutungen gemessen. Die akkumulierten Sedimentmengen korrelieren insgesamt sehr gut mit den Trübedaten und zeigen eine bessere Ausnutzung des vorhandenen Potentials bei höheren Wasserständen auf der Hallig. Der Einfluss der Halligrauhstreifen nimmt somit unter Sturmflutbedingungen ab und die Korngröße der abgelagerten Sedimente nimmt im Median zu (Hache et al. in prep1).

Im letzten Schritt wurden Sedimenttransporte mit dem *Danish Hydraulic Institut's (DHI) Mike21 FM (flexible mesh)* Modellierungsprogramm simuliert. Die grundlegende Modellierung erfolgte durch das Forschungsinstitut Wasser und Umwelt (fwu) der Universität Siegen. Innerhalb dieses Modells nahmen wir Änderungen in der Igelhöhe vor und untersuchten dessen Auswirkung auf den Sedimenttransport. Die Modellergebnisse zeigen, dass

nicht jede Herabsetzung des Igels mit einer Erhöhung der Sedimentakkumulation einhergeht. So blieb ein positiver Effekt durch das Herabsetzen des Igels im Norden der Hallig aus. Im Süden von Langeness erhöhte sich jedoch die Sedimentakkumulation deutlich besonders bei normalen „Land unter“ mit moderaten Überflutungshöhen. Die Sedimentakkumulation bei Sturmfluten übertrifft die bei moderaten „Land unter“ allgemein um ein Vielfaches. Dagegen zeigen die Änderungen in der Igelhöhe einen geringeren Unterschied in der Menge der auf die Hallig transportierten Sedimente. Allerdings rücken bei Sturmfluten Sedimentmengen in den Fokus, die zwar auf die Halligoberfläche transportiert werden, jedoch mit dem ablaufenden Wasser die Hallig auch wieder verlassen (Hache et al. in prep2).

Die Ergebnisse verdeutlichen den komplexen Zusammenhang aus (i) der Erhöhung des Transports von ausreichend verfügbarem Sediment (Hache et al. 2020) durch angepasste Küstenschutzmaßnahmen auf die Hallig und (ii) der Minimierung des Verlusts von bereits auf die Hallig transportierten Sedimenten. Dies zeigt weiteren Forschungsbedarf zur Erhöhung der Sedimentakkumulationsraten auf Langeness auf. Die Ergebnisse der Modellierung sollten daher unter natürlichen Bedingungen getestet und validiert werden. Dazu könnten an strategischen Stellen der Hallig die Raustreifen niedriger gestaltet und eine angepasste Steuerung des ablaufenden Wassers bei Sturmfluten umgesetzt werden. Es sollten weiterhin Maßnahmen getroffen werden, die bei kleinen „Land untern“ das Überflutungswasser ungehindert auf die Hallig strömen lassen und bei Sturmfluten das ablaufende Wasser bremsen. Denkbar wäre eine variable Verbauung der Priele vor den Sieltoren und/oder eine variable Sieltorsteuerung.

5 Danksagung

Das Verbundprojekt Living CoastLab Halligen wurde vom 01. Oktober 2016 bis zum 30. September 2019 als eines von 12 Verbundprojekten mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen des Förderschwerpunkts „Küstenmeerforschung in Nord- und Ostsee (KüNO)“ gefördert (BMBF-Förderkennzeichen: 03F0759A, 03F0759B, 03F0759C, 03F0759D). Es wurde darüber hinaus eine kostenneutrale Verlängerung um fünf Monate, bis zum 29. Februar 2020 bewilligt.

Der Projektkoordinator, die Teilprojektleiter und Mitarbeiter bedanken sich für die intensive Betreuung durch den Projektträger Jülich und die fruchtbare Zusammenarbeit mit den Küstenschutzbehörden sowie der projektbegleitenden Gruppe.

6 Schriftenverzeichnis

- Bass, J. und Kleyer, M.: Der Einfluss von Vegetation auf Höhenänderungen in Salzwiesen. Abschlussbericht zum Verbundvorhaben Living CoastLab Halligen – Teil Hallig-C, BMBF-Förderkennzeichen 03F0759C: Vorhaben: Bestimmung biogeomorphologischer Rückkopplungen zwischen Pflanzen und Sedimenten, Arbeitsgruppe Landschaftsökologie, Universität Oldenburg, 2020.
- Chow, V. T.: Open-channel hydraulics. New York, USA: McGraw-Hill New York, 1959.
- 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. Climate Change 2013.

The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the IPCC. In: Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2013.

Hache I.; Karius V. and von Eynatten H.: Suspended particulate matter for sediment accumulation on inundated anthropogenic marshland in the southern North Sea – Potential, thresholds and limitations. Eingereicht bei Continental Shelf Research, 2020. (zur Veröffentlichung eingereicht/in review).

Hache I.; Karius V.; Gutkuhn J. and von Eynatten H.: The development and application of an autonomous working turbidity measurement network: Assessing the spatial and temporal distribution of suspended particulate matter on tidal flats in the North Frisian Wadden Sea. Continental Shelf Research, 176, 36-50. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2019.02.010>, 2019.

Jensen, J.; Arns, A.; Schüttrumpf, H.; Wöffler, T.; Häußling, R.; Ziesen, N.; Jensen, F.; von Eynatten, H.; Schindler, M. und Karius, V.: ZukunftHallig – Entwicklung von nachhaltigen Küstenschutz- und Bewirtschaftungsstrategien für die Halligen unter Berücksichtigung des Klimawandels. In: Die Küste 84. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau. S. 3-8, online verfügbar: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/105210>, 2016.

Karius, V.; Hache, I. and von Eynatten, H.: Messung und Bewertung von Trübstoffkonzentrationen - Schlussfolgerungen für einen die Sedimentakkumulation optimierenden Küstenschutz auf Hallig Langeness. Abschlussbericht zum Verbundvorhaben Living CoastLab Halligen – Teil Hallig-D, Geowissenschaftliches Zentrum Abtl. Sedimentologie/Umweltgeologie, Georg-August Universität Göttingen, 2020.

Kleyer, M.; Trinogga, J.; Cebrián-Piqueras, M. A.; Trenkamp, A.; Fløjgaard, C.; Ejrnæs, R.; Bouma, T. J.; Minden, V.; Maier, M. and Mantilla-Contreras, J.: Trait correlation network analysis identifies biomass allocation traits and stem specific length as hub traits in herbaceous perennial plants. Journal of Ecology, 107(2), 829-842, 2019.

Krebs, V.; Ziesen, N.; Wöffler, T.; Häußling, R. und Schüttrumpf, H.: Teilstationäre Maßnahmen als kurzfristige Strategie zum Schutz der nordfriesischen Halligen - Einsatztests unter praxisnahen Bedingungen und Berücksichtigung sozialer Bedürfnisse der Bewohner*innen. Abschlussbericht zum Verbundvorhaben Living CoastLab Halligen – Teil Hallig-B, BMBF-Förderkennzeichen 03F0759B, Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft (IWW) und Institut für Soziologie (IfS) der RWTH Aachen University, 2020.

Lavorel, S.; McIntyre, S.; Landsberg, J. and Forbes, T. D. A.: Plant functional classifications: from general groups to specific groups based on response to disturbance. Trends in Ecology & Evolution, 12(12), 474-478, 1997.

Manning, R.: On the flow of water in open channels and pipes. Transactions of the Institution of Civil Engineers of Ireland 20, 161-207, 1891.

Mudd, S. M.; D'Alpaos, A. and Morris, J. T.: How does vegetation affect sedimentation on tidal marshes? Investigating particle capture and hydrodynamic controls on biologically mediated sedimentation. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 115, F03029, 2010.

Niehüser, S.; Klein, M.; Arns, A. und Jensen, J.: Analysen zum langfristigen Schutz der Halligen – Wechselwirkung zwischen Hydrodynamik und Sedimenttransport. Abschlussbericht zum Verbundvorhaben Living CoastLab Halligen – Teil Hallig-A,

BMBF-Förderkennzeichen 03F0759A: Vorhaben: Einschätzung des Einflusses von Einzelmaßnahmen und Strategieentwicklung, Forschungsinstitut Wasser und Umwelt (fwu), Universität Siegen, 2020.

Reef, R.; Schuerch, M.; Christie, E. K.; Möller, I. and Spencer, T.: The effect of vegetation height and biomass on the sediment budget of a European saltmarsh. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 202, 125-133, 2018.

Schindler, M.; Karius, V.; Arns, A.; Deicke, M. and von Eynatten, H.: Measuring sediment deposition and accretion on anthropogenic marshland - part II: The adaption capacity of the North Frisian Halligen to sea level rise. *Estuarine, Coastal, and Shelf Science*, 151, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2014.08.027>, 2014.

Strickler, A.: Beiträge zur Frage der Geschwindigkeitsformel und der Rauigkeitszahlen für Ströme, Kanäle und geschlossene Leitungen. Bern, Switzerland: Eidg. Amt für Wasserwirtschaft, 1923.

Analysen zum langfristigen Schutz der Halligen - Wechselwirkung zwischen Hydrodynamik und Sedimenttransport

Sebastian Niehöser, Martin Klein, Arne Arns und Jürgen Jensen

Zusammenfassung

In den letzten Jahrhunderten verursachten die gemeinsamen Auswirkungen von Meeresspiegelanstieg und Sturmfluten, landwirtschaftliche Nutzung, Setzungen durch Entwässerung und Torfabbau massive Landverluste an der nordfriesischen Küste. Es wird geschätzt, dass in den letzten Jahrhunderten rund 100 Halligen verloren gegangen sind und nur zehn von ihnen bis heute existieren (Quedens 1992). Zu Beginn des 20. Jahrhunderts wurden Deckwerke errichtet und seitdem sind die Halligen weitestgehend größenstabil, aber werden immer noch regelmäßig überflutet. Frühere Forschungsprojekte (z. B. „Sahall“, „ZukunftHallig“) kamen zu dem Schluss, dass die Halligen von diesen Überflutungen durch Sedimentablagerungen profitieren. Hache et al. (2020) zeigen jedoch, dass einige der vorhandenen Deckwerke wie eine Barriere wirken und den Sedimenttransport auf die Halligen teilweise behindern. Die Untersuchungen aus „ZukunftHallig“ zeigten auch, dass der Anstieg des Meeresspiegels größer verlief als die vertikale Akkretion im letzten Jahrhundert (Schindler et al. 2014b). In der Folge würden die Halligen in Zukunft häufiger oder sogar dauerhaft überflutet werden und verloren gehen. Die Qualifizierung und insbesondere die Quantifizierung der Sedimentationsprozesse sind jedoch nach wie vor eine anspruchsvolle Aufgabe. Ein Meeresspiegelanstieg wird auch die Extrem- bzw. Sturmflutereignisse auf höhere Basiswasserstände heben und die hydrodynamischen Einwirkungen erhöhen, die Erosion und Landverluste fördern. Darüber hinaus stellen die Halligen ein Offshore-Barriersystem dar, die die Festlandküste vor starken Windwellen und Vorlanderosionen schützt. Ein nachhaltiger Schutz der Halligen trägt damit auch zum Küstenschutz des schleswig-holsteinischen Festlandes bei.

Bei den vorgestellten Untersuchungen werden mittels zweidimensionaler hydrodynamisch-numerischer Modelle der Einfluss der Hydrodynamik auf die Sedimentdynamik und letztlich das vertikale Anwachsen der Halligen ermittelt. Die in der Wassersäule vorhandenen Sedimentkonzentrationen werden aus vorhandenen Trübungsmessungen vor und auf der Hallig Langeneß (Hache et al. 2019) mittels statistischer Ansätze auf das Modellgebiet projiziert. Dabei werden die verschiedenen erfassten Partikelklassen berücksichtigt. Für die Modellierung der Sedimentdynamik wird schließlich ein, an das hydrodynamisch-numerische Modell gekoppeltes, lagrangesches Partikeltransportmodul verwendet. Dadurch können die zurückgelegten Pfade der einzelnen Partikel, infolge der simulierten Sturmfluten und Landunter sowie Meeresspiegelanstiegsprojektionen, von ihrem Ursprung bis zur Sedimentation nachvollzogen werden. Die Modellkette wird schließlich für Entwicklung optimierter Schutz- und Managementstrategien für die Halligen bereitgestellt.

Schlagwörter

Hydrodynamisch-numerische Modelle, Sedimentation, Erosion, Meeresspiegelprojektion, Halligen

Summary

Over the last centuries, the combined effects of cultivation, subsidence, sea-level rise and storm surges have caused massive land losses on the North Frisian coast. It is estimated that about 100 Halligen have been destroyed in recent centuries and only ten of them have survived to this day (Quedens 1992). At the beginning of the 20th century, revetments were built and since then the Halligen have mostly been stable in size, but still frequently flooded. Earlier research projects (e.g. Saball, ZukunftHallig) concluded that the Halligen benefit from these inundations through sediment deposition. However, Hache et al. (2020) show that some of the existing revetments act as a barrier and partially impede sediment transport on the Halligen. Furthermore, Schindler et al. (2014b) show that sea level rise was faster than vertical accretion in the last century. As a consequence, the Halligen would be flooded more frequently or even permanently in the future. However, quantifying the sedimentation processes is still a challenging task. Sea-level rise will also shift extreme events to higher levels and increase the hydrodynamic impacts that encourage erosion and land losses. Furthermore, the Halligen constitute an offshore barrier system that protects the mainland coast from strong wind waves and foreshore erosion. A sustainable protection of the Halligen thus also contributes to the coastal protection of the Schleswig-Holstein mainland.

In the presented investigations the influence of hydrodynamics on the sediment dynamics and finally the vertical accretion of the Halligen is determined by using two-dimensional hydrodynamic-numerical models. The sediment concentrations in the water column are projected onto the model area from existing turbidity measurements around and on the Hallig Langeneß (Hache et al. 2019) using statistical approaches. The different particle classes recorded are taken into account. For the modelling of the sediment dynamics, a particle transport module coupled to the hydrodynamic-numerical model is used. This allows the trajectories of the individual particles, as a result of the simulated storm surges and inundation events and sea level rise projections, to be traced from their origin to sedimentation. The model chain will finally be made available for the development of optimized protection and management strategies for the Halligen.

Keywords

hydrodynamic-numerical models, sedimentation, erosion, sea level projection, Halligen

Inhalt

1	Einleitung.....	3
2	Methodik und verwendete Datengrundlage.....	5
2.1	Hydrodynamisch-numerische Modellierung.....	5
2.2	Statistische Erfassung der Trübung.....	8
2.3	Sedimenttransport und Sohlschubspannung.....	11
3	Ergebnisse.....	14
3.1	Hydrodynamisch-numerische Modellierung.....	15

3.2	Statistische Erfassung der Trübung	17
3.3	Sedimenttransport	21
3.4	Sohlschubspannung.....	27
4	Schlussfolgerung und weiterer Forschungsbedarf	29
5	Danksagung.....	30
6	Schriftenverzeichnis	31

1 Einleitung

Vor der schleswig-holsteinischen Nordseeküste liegen inmitten des nordfriesischen Wattenmeeres die Halligen. Bei den Halligen handelt es sich um zehn kleine Marschinseln, die um die Nordseeinsel Pellworm angeordnet sind. Die Halligen werden nicht durch Deiche vor Überflutungen geschützt und sind aufgrund ihrer exponierten Lage und ihres geringen Höhenniveaus geprägt durch die Gezeiten der Nordsee. Zusätzlich sind die Halligen dem unmittelbaren Einfluss von Sturmfluten ausgesetzt, wodurch es bis zu 50-mal im Jahr zu einem so genannten „Landunter“ kommt. Bei einem Landunter werden die Halligen nahezu vollständig überflutet, lediglich die 38 „Warften“ (künstliche Erhöhungen), auf denen die Häuser der rund 270 Bewohner der Halligen liegen, ragen dann noch aus dem Meer hervor. Auf einigen Halligen wurden in den vergangenen Jahren Sommerdeiche oder Deckwerke (Halligigel) mit unterschiedlichen Höhen hergestellt, wodurch es auf den verschiedenen Halligen unterschiedlich oft zu Landuntern kommt. Aufgrund dieser regelmäßigen Überflutungen sind die Halligbewohner*innen traditionell auf die Verhältnisse und das Leben auf den Halligen angepasst. Durch den Anstieg des mittleren Meeresspiegels (MSL) in Folge des Klimawandels wird es jedoch zu einem Anstieg der Überflutungshäufigkeiten auf den Halligen kommen. Dies würde unmittelbar zu einer Verschärfung der Lebensbedingungen der dortigen Bewohner*innen führen. Neben der grundlegenden Funktion als Lebensraum für die Hallig-Bewohner*innen erfüllen die Halligen im Wattenmeer zusätzlich Funktionen für den Küstenschutz des Festlandes, da z. B. bei Sturmfluten die Seegangsbelastungen im Wattenmeer aufgrund der geringen Wassertiefen im Bereich der Halligen reduziert werden.

Die Entstehung der Halligen in ihrer heutigen Form unterliegt einer langen Historie. Das Wattenmeer wurde nach den Eiszeiten und einem sich verlangsamen MSL-Anstieg über die vergangen 3.000 Jahre durch natürliche Prozesse geformt (Streif 2004). Gezeiten und Seegang haben Ablagerungen eines ehemaligen Gletschers erodiert, wobei sich der Sand an den Inseln sowie die Feinanteile und Lockersedimente im Wattenmeer abgelagert haben. Durch den hohen Anteil an feinen Sedimenten finden im Wattenmeer, bedingt durch natürliche und anthropogene Prozesse, noch immer signifikante morphologische Veränderungen statt. So bilden die heutigen Halligen nur die Überreste eines ehemals deutlich größeren Marschlandes, das über die vergangenen Jahrhunderte durch Sturmfluten teilweise zerstört wurde (Ricklefs et al. 2015; Quante et al. 2016; Jensen 2019). Auf Grund dieser Effekte, sowie der Kultivierung und erfolgten Setzungen, hat sich die Anzahl der Halligen in den letzten Jahrhunderten bereits von rund 100 auf die zehn Verbliebenen reduziert (Quedens 1992). Generell wird das Watt jedoch als resilient angesehen und kurzfristige Einwirkungen haben somit keine langfristigen Effekte auf die Morphologie. Eine langfristige Änderung im Energieeintrag durch äußere Einwirkungen, beispielsweise durch

den MSL-Anstieg, kann jedoch die Morphodynamik nachhaltig verändern (Bartholomä und Flemming 1996).

Im Watt vor Schleswig-Holstein liegen die abgelagerten Sedimente hauptsächlich als Feinsand und nur in geringeren Fraktionen als Mittel- oder Grobsand vor. In Küstennähe und an den Halligkanten steigen die Anteile an kohäsiven, schlammigen Anteilen deutlich an. Der Bereich um die größte nordfriesische Hallig Langeneß ist ebenfalls dominiert von feinsandigen Sedimenten, während um die Hallig ein schmaler Streifen Mittelsand vorhanden ist. Entlang der südöstlichen Halligkante finden sich zusätzlich hohe Anteile von Schluff und Ton mit über 50 %. Vor dem nordöstlichen Ufer befinden sich Schluff- und Tonanteile von 20 % bis 50 %. Fraktionen mit Grobsand sind erst in weiterem Abstand von Langeneß anzutreffen (Figge 1981). Als signifikanter Indikator morphologischer Aktivitäten gelten die suspendierten Partikel in der Wassersäule (*engl. suspended particulate matter, SPM*) (Pietrzak et al. 2016). Im Wattenmeer treten, im Vergleich zur restlichen Nordsee, relativ hohe SPM Konzentrationen auf, was auf eine ausgeprägte Morphodynamik zurück zu führen ist (van Beusekom 2016). Bei Betrachtung der SPM-Verteilung um Langeneß lässt sich dabei zusätzlich eine hohe Variabilität feststellen. Die SPM-Konzentration wird dabei unter anderem von den meteorologischen Bedingungen, den Jahreszeiten und lokalen Gegebenheiten beeinflusst. Hohe SPM-Konzentrationen treten vor allem bei Sturmfluten bzw. Stürmen auf, bei denen die SPM Konzentration ein Vielfaches der von ruhigem Wetter betragen kann (Hache et al. 2019). Die Deposition von gelösten Sedimenten hängt von vielen Faktoren, wie beispielweise Gelände- und Vegetationshöhen („Auskämmeffekt“), ab (Nolte et al. 2018). Die natürliche Sinkgeschwindigkeit der Partikel führt dazu, dass sich die Sedimente unweit ihrer Quelle akkumulieren (Temmerman et al. 2003). Auf Langeneß dienen die Halligkante und die Sieltore aufgrund der nur temporären Überflutungen häufig als Sedimentquellen (Schindler et al. 2014b). Die Sedimentdynamik auf Langeneß unterscheidet sich leicht in ihrer geografischen Ausprägung. Die Sedimentfracht und -deposition im Osten der Hallig Langeneß ist somit ausgeprägter als im Westen. Zusätzlich zeigten Nolte et al. (2018), dass durch die Vegetationshöhe auf Langeneß unbeweidete Flächen größere Sedimentdespositionsraten aufweisen als beweidete Flächen. Das bestätigen Bass et al. (2020) und wiesen eine Abhängigkeit der Wuchshöhe als funktionelles Merkmal der Vegetation mit der vertikalen Aufwuchsrate nach. Nach Schindler et al. (2014b) werden auf der Hallig durch die regelmäßigen Überflutungen schließlich vertikale Aufwuchsraten von 1,2 mm/a erreicht.

Die Untersuchungen im Vorgängerprojekt „ZukunftHallig“ (Jensen et al. 2016) haben entsprechend gezeigt, dass die Sedimentablagerungen auf den Halligen infolge regelmäßiger Überflutungen ein vertikales anwachsen der Geländehöhen begünstigen. Dem gegenüber wurde jedoch auch ein Anstieg der mittleren und extremen Wasserstände beobachtet. Wegen dieser und weiteren Prognosen, die auf einen noch stärkeren Anstieg der Wasserstände hindeuten (Church et al. 2013), ist jedoch fraglich, ob der Anstieg der Wasserstände vom derzeitigen vertikalen Aufwuchs durch Sedimentablagerungen kompensiert werden kann. In Schindler et al. (2014b) wurde diesbezüglich dargestellt, dass die vertikalen Aufwuchsraten durch Sedimentablagerungen auf den Halligen im Zeitraum von 1915 bis 2011 nicht mit dem Anstieg der Wasserstände mithalten konnten. Zusätzlich konnte ermittelt werden, dass die seit Beginn des 20. Jahrhunderts errichteten Küstenschutzeinrichtungen zwar die Überflutungshäufigkeiten verringert haben, gleichzeitig jedoch auch die Ablage-

rung von Sedimenten behinderten. Vor diesem Hintergrund gilt es, die natürlichen Vorgänge des vertikalen Aufwuchses der Halligen zu analysieren und darauf aufbauend Maßnahmen zum nachhaltigen Schutz und dem Erhalt der Halligen zu entwickeln. Es werden Strategien benötigt, die die natürliche Anpassungsfähigkeit der Halligen zukünftig fördern und damit einen unmittelbaren Schutz der Bewohner*innen auf den Warften ermöglichen.

Zum nachhaltigen Schutz und dem Erhalt der Halligen ist es erforderlich, die derzeitige Dynamik des Sedimenttransportes zu untersuchen und daraus Rückschlüsse auf zukünftige Entwicklungen zu erhalten. Dafür wird im vorliegenden Beitrag der derzeitige Sedimenttransport exemplarisch für die Hallig Langeneß untersucht, um Abschätzungen hinsichtlich zukünftiger Entwicklungen zu ermöglichen. Dabei wird davon ausgegangen, dass sich die gewonnenen Erkenntnisse und Methoden auch auf die anderen Halligen übertragen lassen. Konkret werden folgende Frage- bzw. Aufgabenstellungen bearbeitet:

- Statistische Erfassung und Beschreibung der ermittelten Werte aus Feldmessungen der Trübung in der Wassersäule zur Übertragung auf das Untersuchungsgebiet.
- Simulation der Wechselwirkung zwischen hydrodynamischer Einwirkung auf den resultierenden Sedimenttransport im Untersuchungsgebiet.
- Abschätzung von langfristigen Änderungen der Sedimentation (für die Jahre 2030, 2050, 2080).
- Bereitstellung der Modellkette zur Entwicklung optimierter Schutz- und Managementstrategien für die Halligen.

2 Methodik und verwendete Datengrundlage

Bei den Untersuchungen wird mittels zweidimensionaler hydrodynamisch-numerischer Modelle (HNM) der Einfluss der Hydrodynamik auf die Sedimentdynamik und letztlich das vertikale Anwachsen der Halligen ermittelt. Die in der Wassersäule vorhandenen Sedimentkonzentrationen werden aus vorhandenen Trübungsmessungen vor und auf der Hallig Langeneß (Hache et al. 2019) mittels statistischer Ansätze auf das Modellgebiet projiziert. Es werden außerdem verschiedene Partikelklassen berücksichtigt. Für die Modellierung der Sedimentdynamik wird schließlich ein, an das HNM gekoppeltes, lagrangesches Partikeltransportmodul verwendet. Dadurch können die zurückgelegten Pfade der einzelnen Partikel, infolge der simulierten Sturmfluten und Landunter sowie Meeresspiegelanstiegsprojektionen, von ihrem Ursprung bis zur Sedimentation nachvollzogen werden. In den folgenden Kapiteln wird detaillierter auf die Methodik und die verwendeten Datengrundlagen eingegangen. Es wird dabei maßgeblich zwischen den HNM und den statistischen Verfahren differenziert. Anschließend werden die Ergebnisse vorgestellt, wobei der Schwerpunkt auf den Änderungen als Folge des prognostizierten Meeresspiegelanstiegs in Bezug auf die Hydrodynamik und das Sedimentverhalten liegt. Im letzten Teil werden schließlich mögliche Lösungsstrategien und der weitere Forschungsbedarf dargelegt.

2.1 Hydrodynamisch-numerische Modellierung

Für die Erstellung einer Modellkette zur Simulation der hydrodynamischen Verhältnisse um und auf der Hallig Langeneß wird in einem ersten Schritt auf ein existierendes HNM der gesamten Nordsee einschließlich eines Teils des Nordatlantiks zurückgegriffen (vgl.

Arns et al. 2015). Die verwendeten Randbedingungen sowie die Kalibrierung und Validierung der Modellergebnisse sind in Arns et al. (2015, 2017) erläutert. Das Modell wird entsprechend aktuellster bathymetrischer, Gezeiten und atmosphärischer Randbedingungen angepasst. Der wesentliche Unterschied in den Randbedingungen liegt in dem verwendeten meteorologischen Antrieb. Um die beprobten Landunter-Ereignisse, die während der Projektlaufzeit zwischen 2016 und 2020 erfasst wurden, in den Simulationen zu berücksichtigen, werden möglichst aktuelle Reanalysedaten der Atmosphäre benötigt. Für die vorliegenden Analysen werden die meteorologischen Daten des ERA5-Projekts des „European Centre for Medium-Range Weather Forecasts“ (ECMWF) verwendet (C3S 2017). Die ERA5-Daten bestehen aus der reanalysierten und homogenisierten Kombination eines Wettermodells und Beobachtungen von Satelliten und Wetterstationen weltweit auf einem Gitter mit einer Auflösung von ca. 31 km. Für die HNM werden der Luftdruck sowie die u- und v-Komponenten der Windgeschwindigkeit aus den ERA5-Datensatz verwendet. Die zeitliche Auflösung der meteorologischen Daten beträgt 60 Minuten. Der beobachtete Anstieg des Meeresspiegels wird an den Randbedingungen über die beiden Pegelstandorte Aberdeen und Wick berücksichtigt.

Das Modell der Nordsee liefert schließlich die hydrodynamischen Randbedingungen für ein zweites und hochaufgelöstes Modell des Untersuchungsgebietes Hallig Langeneß (vgl. Abb. 1). Um die benötigten Wasserstands- und Seegangsinformationen zu simulieren, wird ein zweidimensionales, tiefenintegriertes, barotropes HNM entwickelt. Die Simulation erfolgt gekoppelt für die Gezeiten und den atmosphärischen Antrieb, um entsprechend deren Wechselwirkung abbilden zu können. Die Modellerstellung erfolgt mit der Software MIKE21® vom Danish Hydraulic Institute (DHI; Warren und Bach 1992). Das Modell basiert auf der numerischen Lösung der zweidimensionalen Flachwassergleichungen, in Form der tiefenintegrierten, inkompressiblen Reynolds-gemittelten Navier-Stokes-Gleichungen unter Annahme einer hydrostatischen Druckverteilung. Somit besteht das Modell aus Kontinuitäts-, Impuls-, Temperatur-, Salinitäts- und Dichtegleichungen. Die räumliche Diskretisierung der Gleichungen erfolgt mit einem zellzentrierten Finite-Volumen-Verfahren (DHI 2017a). Zusätzlich zu dem Hydrodynamik-Modul wird das MIKE21® „Spectral Wave Model FM (MIKE 21 SW)“ zur Simulation windinduzierter Wellen verwendet. Dabei wird über Modelle das Aufwachsen, die Transformation und der Zerfall der Windwellen im Offshore- und Küstenbereich nach der „wave action conservation“-Gleichung simuliert (DHI 2017b). Die Steuerung und Auswertung der Simulationen erfolgt automatisiert über die Software Matlab®.

Die höhenmäßige Erfassung der Hallig Langeneß mit umgebendem Wattenmeer im Detailmodell basiert auf unterschiedlichen Datensätzen (vgl. Abb. 1). Die flächendeckende Topographie der Hallig Langeneß und den angrenzenden Wattflächen werden über digitale Geländemodelle aus den Jahren 2005 und 2014 auf einem kartesischen Gitter mit einer Auflösung von 1 m (DGM1) berücksichtigt. Weiterhin sind Vermessungsdaten von 2014 aus der Grundinstandsetzung und Erweiterung des Lorendammes zwischen den Halligen Langeneß und Oland eingeflossen. Die Daten wurden seitens des Landesbetriebs für Küstenschutz, Nationalpark und Meeresschutz Schleswig-Holstein (LKN.SH) bereitgestellt. Nicht abgedeckte Bereiche der Wattflächen werden mit der Bathymetrie für das Jahr 2012 aus dem Bodenmodell des KFKI-Forschungsprojekts „Aufbau von integrierten Modellsystemen zur langfristigen Modellierung der Morphodynamik in der Deutschen Bucht“

(AufMod; Heyer und Schrottke 2013) ergänzt. Zur detaillierten Abbildung des Grabensystems und der Halligkante (Deckwerk und Halligigel) wird der Bauwerkskatalog des LKN.SH herangezogen. Die unterschiedlichen Datensätze und das Rechengitter sind in Abb. 1 zusammengetragen.

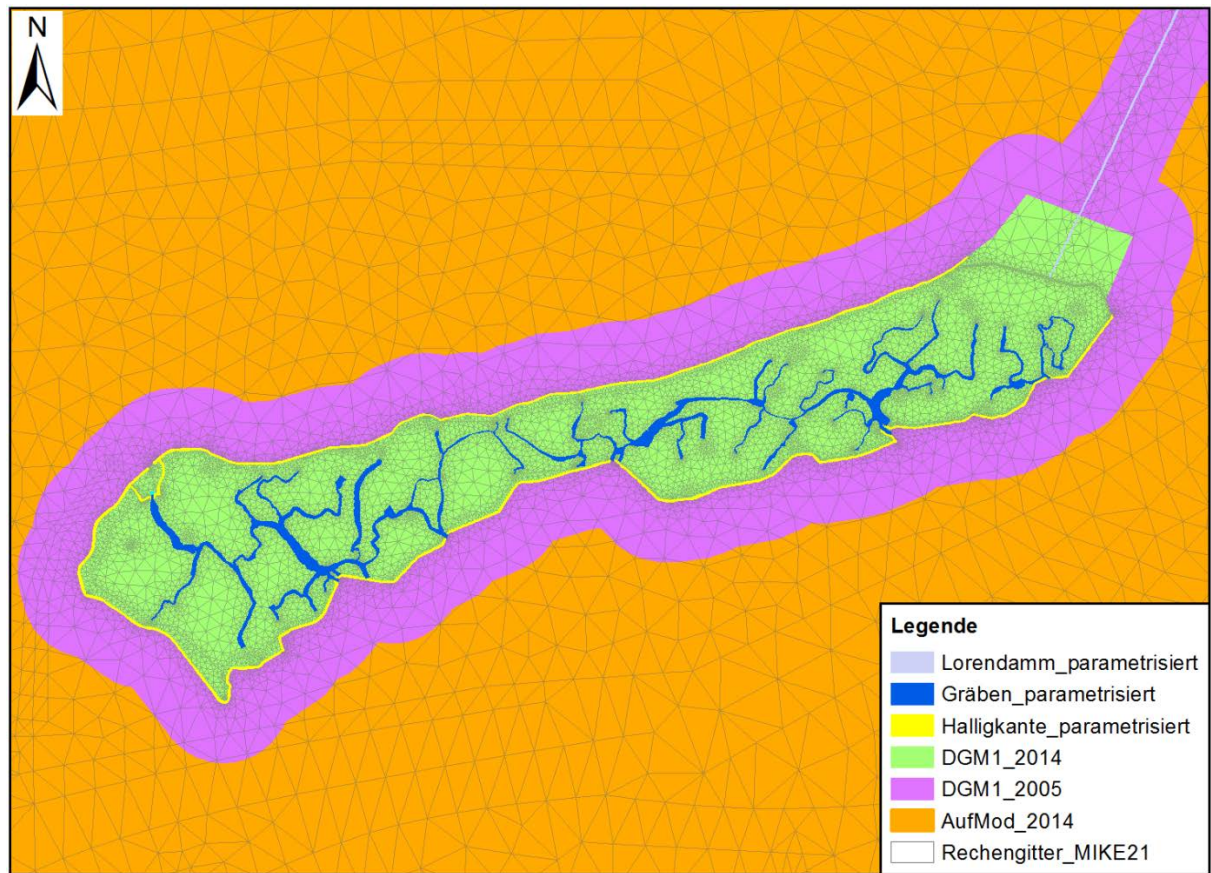


Abbildung 1: Darstellung der unterschiedlichen Datensätze zur Erstellung des Detailmodells der Hallig Langeneß.

Die Simulationen werden insgesamt für zehn erfasste Landunter-Ereignisse zwischen September 2017 und März 2019 durchgeführt. Da in dem Zeitraum keine sehr schwere Sturmflut aufgetreten ist, werden zusätzlich vier Sturmflutereignisse aus der Vergangenheit betrachtet. Jedes Ereignis wird mit einer Vor- und Nachlaufzeit von je einer Woche simuliert. Die Modellergebnisse stellen schließlich die Basis für die Simulation des Sedimenttransports dar. Da die hydrodynamische Ausgabe und die Simulationsergebnisse auch als Prädiktorvariablen für die statistische Erfassung der Trübung dienen, werden zusätzlich die beiden Messzeiträume 2017/18 und 2018/19 vollständig simuliert. Die Zusammenstellung aller betrachteten Simulationen findet sich in Tab. 1.

Für die Abschätzung von langfristigen Änderungen der Sedimentation für die Jahre 2030, 2050 und 2080 wird zusätzlich jedes Landunter- und Sturmflutereignis unter Berücksichtigung einer herabgesetzten Bathymetrie simuliert. Es werden an dieser Stelle allerdings keine dynamischen Effekte berücksichtigt die einer veränderten Küstenlinie Rechnung tragen. Die Szenarienläufe basieren auf den regionalisierten Meeresspiegeländerungen aus Slangen et al. (2014) unter Berücksichtigung der RCP8.5 (*Representative Concentration Pathways*) Projektionen. Daraus ergeben sich relative Änderungen des mittleren Meeresspiegels von 0,10 m (2030), 0,24 m (2050) und 0,51 m (2080) im Vergleich zum Jahr 2008.

Aufgrund der Unsicherheiten in Projektionen der meteorologischen Randbedingungen werden diese unverändert in die Modellkette eingesteuert.

Tabelle 1: Simulierte Landunter- und Sturmflutereignisse.

Datum	Typ	Simulationszeitraum
24.11.1981	Sturmflut	17.11.1981 - 30.11.1981
26.01.1990	Sturmflut	19.01.1990-01.02.1990
28.01.1994	Sturmflut	21.01.1994- 03.02.1994
06.12.2013	Sturmflut	29.11.2013-12.12.2013
13.09.2017	Landunter	06.09.2017-19.09.2017
29.10.2017	Landunter	22.10.2017-04.11.2017
08.12.2017	Landunter	01.12.2017-14.12.2017
12.02.2018	Landunter	05.02.2018-18.02.2018
08.12.2018	Landunter	01.12.2018-14.12.2018
08.01.2019	Landunter	01.01.2019-14.01.2019
09.02.2019	Landunter	02.02.2019-15.02.2019
05.03.2019	Landunter	26.02.2019-11.03.2019
10.03.2019	Landunter	03.03.2019-16.03.2019
16.03.2019	Landunter	09.03.2019-22.03.2019
---	Saison 2017/18	01.09.2017-01.04.2018
---	Saison 2018/19	01.09.2018-01.04.2019

2.2 Statistische Erfassung der Trübung

Die robuste statistische Erfassung und Beschreibung der gemessenen Trübung in der Wassersäule ist aufgrund der Vielzahl und Komplexität der ablaufenden physikalischen Prozesse eine herausfordernde Aufgabenstellung. Aufgrund dessen werden zwei gängige Verfahren der multivariaten Analysemethoden in Form der Regressionsanalyse und der künstlichen neuronalen Netze (KNN) herangezogen. Beide Verfahren bieten unterschiedliche Vor- und Nachteile. Während die Regressionsanalyse eine transparente Möglichkeit darstellt, eine Beziehung zwischen einer abhängigen und mehreren unabhängigen Variablen herzustellen, bleiben die ermittelten Wirkungsbeziehungen bei KNN unbekannt (Backhaus et al. 2016). Allerdings können über KNN Nichtlinearitäten in der Abhängigkeitsstruktur berücksichtigt werden, die bei der vorliegenden Aufgabenstellung von Interesse sein können. Im Idealfall wird eine Kombination beider Verfahren angestrebt, die sowohl die komplexen Abhängigkeitsstrukturen berücksichtigt als auch die physikalischen Prozesse nachvollziehbar macht. Für beide Ansätze wird entsprechend ein identischer Datensatz verwendet.

Die Regressionsanalyse erfolgt mittels multivariater, linearen Regressionsmodellen auf Basis schrittweiser Regression. Die lineare Regression erlaubt die Beschreibung des statistischen Zusammenhangs zwischen einer Zielvariable $T(t)$ und einem oder mehreren Prädiktoren g_i unter Entstehung eines Fehlerterms $e(t)$. Die Größe des statistischen Zusammenhangs zwischen den Prädiktoren und der Zielvariable wird dabei durch den Regressionskoeffizienten a_i ausgedrückt. Der entstehende Fehlerterm beinhaltet die normalverteilten Residuen zwischen der rekonstruierten Zielvariable aus dem Regressionsmodell und der beobachteten Zielvariable. Bei der schrittweisen Regression wird das Regressionsmo-

dell erstellt indem schrittweise Prädiktoren in das Modell aufgenommen und entfernt werden. Bei jedem Schritt werden die Prädiktoren mit der Nullhypothese auf statistische Signifikanz geprüft und nur diejenigen Prädiktoren g_i in das Regressionsmodell übernommen, die die Beschreibung der Varianz der konstruierten Zielvariablen mit einer signifikanten Wahrscheinlichkeit verbessern. Entsprechend der Nullhypothese wird für jeden Prädiktor anfänglich unterstellt, dass keine Korrelation zwischen Prädiktor und Zielvariable besteht. Durch die Berechnung der Wahrscheinlichkeit (p-Wert), dass diese Nullhypothese zutreffend ist, wird die tatsächliche Signifikanz des jeweiligen Prädiktors bestimmt. In dem vorliegenden Fall wird der kritische p-Wert auf $p \leq 0,05$ (5 %) festgelegt.

$$T(t) = \sum_{j=0}^n a_j g_j(t) + e(t) \quad (1)$$

Das Konstruktionsprinzip von KNN kann im Gegensatz zu Regressionsanalysen aufgrund deren Komplexität nicht verallgemeinert beschrieben werden. Über Sensitivitätsstudien sind entsprechend optimale Konfigurationen zu ermitteln. Generell bestehen KNN aus drei Komponenten: eine Eingangsschicht (*engl. Input-Layer*), verdeckte Schicht(en) (*engl. Hidden-Layer*) und eine Ausgabeschicht (*engl. Output-Layer*) (z. B. Backhaus et al. 2016). Die Eingabeschicht entspricht im vorliegenden Fall den unabhängigen Prädiktoren, während die Ausgabeschicht die abhängige Variable abbildet. Die Anzahl der verdeckten Schichten wird iterativ verändert, um eine optimale Beschreibung der Ausgabeschicht zu erreichen. Zu beachten ist allerdings, dass KNN auch zum sogenannten „Overfitting“ führen können und somit ungeeignet für die Vorhersage auf Basis unbekannter Prädiktoren sind. Entsprechend wird die Eingabeschicht durch Erkenntnisse der Regressionsanalyse angepasst, um keine physikalisch unplausiblen Prädiktoren heranzuziehen.

Zur Beurteilung der Modellgüte (rekonstruierte Zielvariable und beobachtete Zielvariable) werden die im Kontext von Modellierungen gängigen Effizienzkriterien verwendet (vgl. Krause et al. 2005). Konkret werden das Bestimmtheitsmaß R^2 (Perfekte Anpassung: 1) und der Root-Mean-Square Error (RMSE; Perfekte Anpassung: 0) verwendet. Das Bestimmtheitsmaß R^2 wird beschrieben durch das Quadrat der Pearson-Korrelation R :

$$R^2 = \left(\frac{c(x,y)}{\sqrt{c(x,x) \cdot c(y,y)}} \right)^2 \quad (2)$$

C stellt dabei die Kovarianz zweier Zufallsvariablen x und y dar:

$$C(x, y) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu_x) \cdot (y_i - \mu_y) \quad (3)$$

Darin beschreibt n die Länge und μ den Mittelwert der Zeitreihen x und y . Daraus folgt, dass R^2 sich zwischen -1 und 1 bewegt und die erklärte Variabilität der Zeitreihe y anhand der Zeitreihe x beschreibt. Das Bestimmtheitsmaß R^2 gibt jedoch keine Auskunft darüber, wie groß die absoluten Abweichungen zwischen den Zeitreihen x und y sind. Deshalb wird zusätzlich der RMSE verwendet, worüber die mittlere Abweichung der beiden Zeitreihen x und y quantifiziert wird:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{n}} \quad (4)$$

Die Messwerte vom Teilprojekt Hallig-D liefern aus Trübedaten Werte für suspendierte Partikelmengen (SPM) in g/l von acht verschiedenen Standorten auf der Hallig Langeneß (Hache et al. 2019) und dienen bei der Modellerstellung als unabhängige Variablen. Da sich

die Messstationen zur Trübungsmessung vor und auf der Hallig befinden, handelt es sich um eine Zeitreihe mit Lücken außerhalb der Landunter. Die zeitliche Auflösung der Trübedaten beträgt 1 Minute. Die maximale zeitliche Ausdehnung der verwendeten Zeitreihen reicht vom 01.09.2017 bis zum 31.03.2019.

Insgesamt stehen 28 Prädiktoren zur Verfügung, die potentiell zur Beschreibung der Trübung herangezogen werden. Die Prädiktoren setzen sich aus je drei meteorologischen (Luftdruck sowie horizontale und vertikale Windgeschwindigkeit in der zentralen Deutschen Bucht auf Basis des ERA5-Datensatzes) und hydrodynamischen Datensätzen (Wasserstand sowie horizontale und vertikale Strömungsgeschwindigkeit) sowie 22 Seegangsparametern (z. B. signifikante Wellenhöhe, Wellenrichtung, Wellenperiode etc.) zusammen.

Für die Anwendung der multivariaten Analysemethoden müssen die unterschiedlichen Datensätze auf eine äquidistante Zeitskala transformiert werden. Dazu wird als Grundlage die äquidistante Zeitreihe der Hydrodynamik und des Seeganges mit einer Auflösung von 10 Minuten im Zeitraum der Trübungsmessungen verwendet. Die zeitliche Auflösung der meteorologischen Daten wird entsprechend mit einer kubischen Interpolation von 60 Minuten auf die angestrebte 10-minütige Auflösung interpoliert.

Im Rahmen der Datenaufbereitung der Trübedaten werden zunächst unplausible, negative Werte aus den Datensätzen entfernt und anschließend durch die Anwendung eines gleitenden Mittels geglättet. Es wird eine Glättung durchgeführt, da das Signal der Trübedaten aufgrund der minütlichen Auflösung eine hohe Variabilität mit hohen Frequenzanteilen aufweist. Für die Glättung werden unterschiedliche Fenstergrößen von 1 Minute bis 60 Minuten geprüft, um die optimale Glättung im Sinne des geringsten Informationsverlustes zu identifizieren. Bei den Sensitivitätsstudien zur Festlegung der optimalen Fenstergröße werden jeweils die Bestimmtheitsmaße der geglätteten und gemessenen Trübedaten betrachtet. Als optimale Glättung wird eine Mittelung mit der Fenstergröße 11 Minuten festgestellt. Die größeren Mittelungen können zwar infolge der stärkeren Glättung bessere Bestimmtheitsmaße liefern, entfernen sich jedoch zu stark von den Messgrößen und bilden somit die Maximalwerte in den Zeitreihen nicht ausreichend ab. Die Zeitreihen enthalten, je nach geografischer Lage der Messstelle, letztlich eine unterschiedliche Anzahl an Messwerten. Nach der Datenaufbereitung liegen acht Zeitreihen an den Trübungsmessstationen mit Längen zwischen 31.186 und 51 Datenpunkten vor.

Für die bestmögliche Modellierung von Trübedaten mittels multivariater Analyseverfahren werden sowohl ein separates Modell für jede Trübungsmessstation als auch ein übergeordnetes Modell über alle Messstellen getestet. Ein übergeordnetes Modell würde eine Allgemeingültigkeit zur Bestimmung der Trübedaten im Projektgebiet innehaben und ist daher anzustreben. Von einzelnen Regressionsmodellen kann jedoch ein höheres Bestimmtheitsmaß erwartet werden. Des Weiteren wird ein zeitversetzter Einfluss der Prädiktoren auf die Trübung untersucht. Dafür wird ein Zeitversatz von 10 Minuten bis maximal 60 Minuten bei den Prädiktoren berücksichtigt. Es werden somit neun Regressionsmodelle mit je 196 Prädiktoren und maximal 31.186 Zeitpunkten erstellt. Im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse werden nicht signifikante Trübungswerte entfernt sowie die Auswirkungen von Quadrierung und Kubierung verschiedener Prädiktoren untersucht. Zudem werden die Auswirkungen von Interaktionen der Prädiktoren untereinander getestet. Zur Bewertung der statistischen Aussagekraft der Regressionsmodelle werden die Ergebnisse sowohl auf Heteroskedastizität („Streuungsungleichheit“) der Residuen als auch auf die Normalverteilung der Residuen geprüft.

2.3 Sedimenttransport und Sohlschubspannung

Besonders im Bereich der Binnengewässer wurden bereits 2D-HNM erfolgreich für die Simulation der Partikelpfade von Sedimentpartikeln verwendet. So wurde beispielsweise in Thonon et al. (2007) die Änderung der Sedimentdynamik aufgrund verschiedener Einflüsse, wie dem Klimawandel und anthropogenen Eingriffen in die Flussmorphologie, betrachtet. In dem Projekt wurde die Sedimentdynamik an einer niederrheinischen Flussaue in den Niederlanden untersucht. Die modellierten Sedimentdepositionen vom HNM konnten dabei gute Übereinstimmung mit gemessenen Sedimentablagerungen erzielen. Auch in Küstengebieten konnte bereits erfolgreich die Dynamik von Sedimentpartikeln modelliert werden. In Allison et al. (2017) wurde die Effizienz lokaler Maßnahmen im Hinblick auf die Landgewinnung der West Bay am Mississippi Delta (USA) analysiert. Im Fokus stand dabei die Frage, welche Pfade die im Mississippi Delta entlassenen Partikel bis zur Mündung in den Golf von Mexiko nehmen und wo sie sich akkumulieren. In dem verwendeten lagrangeschen Partikeltransportmodell wurden dabei sowohl eine feine (Schluff) als auch eine grobe Sedimentklasse (Sand) simuliert. In der Studie konnte vor allem bei den modellierten feineren Sedimentpartikeln gute Übereinstimmungen mit den gleichzeitig mittels Farbtracern durchgeführten physikalischen Beobachtungen erzielt werden. Partikeltransportmodelle können auch im Bereich von Binnenmeeren angewendet werden. In Liubartseva et al. (2018) wurde die Dynamik von Kunststoffpartikeln im Mittelmeer modelliert. Verwendet wurde dabei ein lagrangesches 2D-HNM, dass die Partikelbewegungen simuliert, um daraus Akkumulationen und Konzentrationen des Kunststoffs abzuleiten. In der Arbeit konnten dadurch Bezüge zwischen den Ablagerungen an Land, auf der Meeresoberfläche und Meeressohle und den Quellen der Kunststoffe hergestellt werden.

An dieser Stelle bildet das hochaufgelöste HNM der Hallig Langeneß die Basis zur Simulation der Sedimenttransportprozesse für die wichtigsten Sedimentfraktionen, die in den beobachteten Datensätzen gefunden werden (Hache et al. 2019; Abb. 2). Zur Simulation der suspendierten Sedimentpartikel wird das „Particle Tracking“-Modul (PT) vom MIKE21® verwendet. In dem Modul wird unter Verwendung der lagrangeschen diskreten Paketmethode unter anderem der Drift, die Dispersion sowie Sedimentation, Auftrieb und Erosion modelliert. Die simulierten Partikel können dabei individuellen Klassen zugeordnet werden, denen jeweils verschiedene Eigenschaften in Bezug auf Zerfall, Auftrieb, Erosion und maximales Alter vergeben werden können (DHI 2017c). Durch die Verwendung des Moduls können die Pfade der einzelnen Partikel sowie deren Sedimentation und Erosion in dem HNM simuliert werden.

Für die Berechnung der Partikelmasse wird die Vereinfachung getroffen, dass es sich bei den Partikeln um Kugeln handelt. Obwohl Sedimente in der Regel nicht als Kugel vorkommen, wird auf die Korrektur mittels eines Formfaktors verzichtet, da nur von vernachlässigbar kleinen Formabweichungen ausgegangen wird. Darüber hinaus liegen keine Informationen über die Dichten der Partikel vor. Da die Dichten von Sedimenten üblicherweise jedoch nicht wesentlich von der des Quarzes abweichen, wird für die Dichte der Partikel $\rho_s = 2650 \text{ kg/m}^3$ angenommen (Markl 2015; Soulsby 1997).

Die Sinkgeschwindigkeit w_s wird nach Soulsby (1997) aus der Dichte ρ_w und der kinematischen Viskosität ν_w von Wasser sowie dem Korndurchmesser D und der Gravitation g anhand des dimensionslosen Korndurchmessers D^* berechnet:

$$D_* = \left[\frac{g \cdot (s-1)}{v^2} \right]^{\frac{1}{3}}. \quad (5)$$

$$w_s = \frac{v}{d} \left[(10,36^2 + 1,049 \cdot D_*^3)^{\frac{1}{2}} - 10,36 \right] \quad (6)$$

Für weitere Details zur Berechnung des Sedimenttransportes in MIKE21® wird an dieser Stelle auf die Scientific Documentation (DHI 2017c) verwiesen.

Particle Class	Name	Abbreviation	Settling velocity [m/s]	Critical bed shear stress [N/m²]	Mass [g]	Diameter [m]
1	silt	U	0.0005	0.415	3.75E-08	3.00E-05
2	fine sand with silt as admixture	fSU	0.0037	0.615	7.10E-07	8.00E-05
3	fine sand	fS	0.0122	0.790	4.68E-06	1.50E-04
4	fine sand with medium sand as admixture	fSms	0.0194	0.878	1.03E-05	1.95E-04
5	medium sand	mS	0.0270	0.954	1.92E-05	2.40E-04

Abbildung 2: Korngröße der Sedimentfraktionen, die neben den Messstationen Sedimentfallen erfasst wurden. Die zugehörigen Sinkgeschwindigkeiten, die kritische Sohlschubspannung und die Einzelmasse sowie der Durchmesser eines Partikels sind ebenfalls dargestellt.

Da aus dem HNM keine Aussagen über die Erosion von vorhandenen Sedimenten gewonnen werden können, wird zusätzlich die Sohlschubspannung als Proxy für den Weitertransport der modellierten Partikel verwendet. Hierbei besteht die Grundannahme, dass sich Sedimente bei einer Sohlschubspannung τ , die die kritische Sohlschubspannung τ_{ce} überschreitet, nicht konsolidieren können und remobilisiert werden. Eine erhöhte Sohlschubspannung behindert somit ein vertikales Aufwachsen der Halligen. Zur Ermittlung der Sohlschubspannung werden die Berechnungsgrößen aus der Hydrodynamik des Detailmodells entnommen. Die Sohlschubspannung wird aus der Strömungsgeschwindigkeit über der Sohle $\vec{u}_b$, der Dichte des Wassers ρ_w und dem Sohlwiderstandskoeffizient c_f berechnet. Die kritische Sohlschubspannung τ_{ce} berechnet sich aus dem kritischen Shieldsparameter Θ_{ce} , der Erdbeschleunigung g , dem jeweiligen Korndurchmesser D sowie den Dichten aus Wasser ρ_w und Sedimentpartikel ρ_s . Die Beziehungen sind in nachfolgenden Gleichungen dargestellt.

$$\frac{\tau_b}{\rho_w} = c_f \vec{u}_b |\vec{u}_b| \quad (7)$$

$$\tau_{ce} = \Theta_{ce} g D (\rho_s - \rho_w) \quad (8)$$

Als Approximation für den kritischen Shieldsparameter kann die empirische Beziehung nach Brownlie (1981) herangezogen werden. Der Definitionsbereich der Formulierung gilt für die Korngrößen $0,062 \leq D_{50} \leq 2,0$. Obwohl die Korngröße von U den Definitionsbereich unterschreitet, wird von der Anwendbarkeit des Verfahrens nach Brownlie (1981) ausgegangen. Nach Brownlie (1981) ist Θ_{ce} von den Dichten ρ_w und ρ_s , den Korndurchmessern D sowie der kinematischen Viskosität des Fluides ν abhängig:

$$\Theta_{ce} = 0.22 R_p^{-0.6} + 0.06 e^{-17.77 R_p^{-0.6}} \quad (9)$$

$$R_p = \sqrt{\frac{R g D D}{\nu}} \quad (10)$$

$$R = \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w} \quad (11)$$

Neben der Simulation der hydrodynamischen Verhältnisse um und auf der Hallig Langeneß wird das Detailmodell verwendet, um den Transport von vorhandenen Sedimenten auf die Hallig bzw. von der Hallig zu betrachten. Als Eingabeparameter werden maßgeblich die beobachteten Trübedaten (Karius et al. 2020) benötigt. Da keine detaillierten Informationen über die Sedimentverfügbarkeit im Wattenmeer vorliegen, werden mittels der multivariaten Analyseverfahren die punktuell verfügbaren Trübedaten in die Fläche um und auf die Hallig Langeneß transferiert. Um die unterschiedlichen Sedimentfraktionen in den Simulationen berücksichtigen zu können, ist es erforderlich, die erfassten Trübedaten in die Anzahl der jeweiligen Partikel umzurechnen. Dafür wird aus der Trübung, die in g/l vorliegt, vereinfacht über die Dichte und die Größe bzw. das Volumen auf die Anzahl der einzelnen Sedimentfraktionen in der Wassersäule geschlossen. Aus den kalibrierten Trübungsmessungen kann darüber auf die Anzahl der Partikel rückgerechnet werden, die pro Zeitschritt an der jeweiligen Messstation in der Wassersäule erfasst wurde. Im nächsten Schritt werden die Auswertungen der Sedimentfallen (Karius et al. 2020) herangezogen um die prozentuale Verteilung der in Abb. 2 dargestellten Sedimentfraktionen zu berücksichtigen. Darüber wird gewährleistet, dass die Anzahl der eingesteuerten Sedimentfraktionen den an den acht Messstationen erfassten Partikeln entspricht. Im Mittel über die acht Messstationen entsprechen ca. 30 % der Sedimente der Klasse U (Minimum: 16 %; Maximum: 43 %), ebenfalls ca. 30 % der Klasse fSU (Minimum: 13 %; Maximum: 45 %), ca. 24 % der Klasse fS (Minimum: 10 %; Maximum: 41 %) und ca. 14 % der Klasse fSms (Minimum: 6 %; Maximum: 23 %). Mit lediglich 2 % im Mittel sind nahezu keine Partikel der Klasse mS erfasst worden. Durch die stark veränderlichen bathymetrischen Verhältnisse beim Übergang des flachen Wattbereiches um die Hallig Langeneß bis in die Norder- bzw. Süderau nehmen die Unsicherheiten bei der flächigen Übertragung der Trübung deutlich zu. Im Rahmen des Projektes wird daher ein Gültigkeitsbereich bestimmt. Dieser wird in einem Bereich um die Hallig Langeneß festgelegt, an dem die bathymetrischen Verhältnisse eine Anwendung der multivariaten Analysemethoden erlauben. Dieser Bereich ist in Abb. 3 dargestellt. Es werden insgesamt die dargestellten 118 Quellen verwendet, um Partikel in das Modell einzusteuern. Entsprechend können beispielsweise Aussagen darüber getroffen werden, aus welcher Quelle Partikel oder welche Sedimente bei welchem Ereignis auf die

Hallig gelangen und ob und wo sie die Hallig wieder verlassen bzw. ob sie für ein vertikales Anwachsen der Hallig sorgen können.

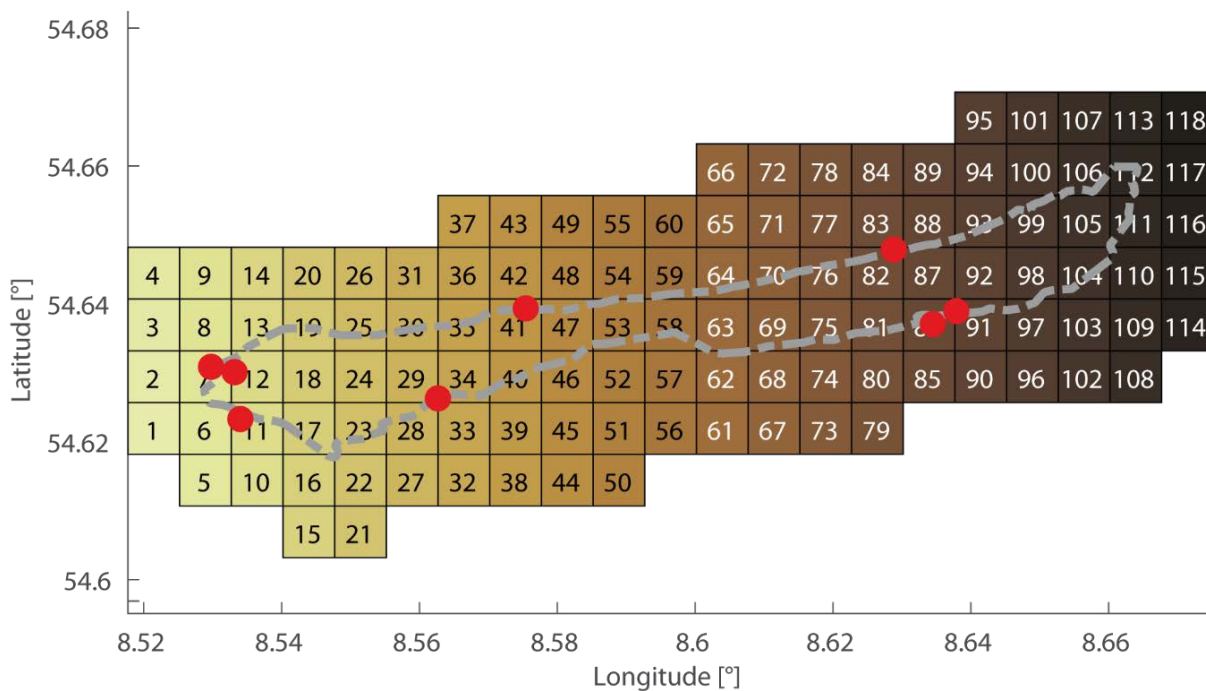


Abbildung 3: Lage der Trübungsmessstationen und Sedimentfallen (rot; Hache et al. 2019) und Lage der 118 gewählten Quellen, an denen Sedimentfraktionen in die Simulation eingesteuert werden.

3 Ergebnisse

Das übergeordnete Ziel der im Folgenden beschriebenen Ergebnisse sind A-B-Vergleiche des IST-Zustandes der Sedimentationsraten auf der Hallig Langeneß mit den betrachteten Meeresspiegelprojektionen, um hierüber zukünftige Veränderungen ableiten zu können. Die im vorigen Kap. 2 beschriebenen Methoden werden dazu zu einer Modellkette zusammengeführt. Aufgrund der Vielzahl der simulierten und betrachteten Ereignisse werden die Ergebnisse exemplarisch für relevante Erkenntnisse aufgeführt. In Kap. 3.1 wird dafür im Wesentlichen auf die simulierten Wasserstandsganglinien der Landunter- und Sturmflutereignisse eingegangen. In Kap. 3.2 werden die Ergebnisse der statistischen Erfassung der Trübung beschrieben, die auf den simulierten Parametern des HNM basieren. In den Kap. 3.3 und Kap. 3.4 wird schließlich auf die aus der Kombination der statistischen und numerischen Verfahren gewonnenen Erkenntnisse zur Veränderung der Sedimentation und Sohlschubspannung auf und um die Hallig Langeneß eingegangen. Insgesamt werden drei Modelle (Nordseemodell/Detailmodell/ Partikeltransportmodell) für 14 Ereignisse verwendet. Für jedes der 14 Ereignisse werden zudem, neben dem IST-Zustand, Projektionen für die Jahre 2030, 2050 und 2080 berechnet. Die Betrachtung der Sedimentation basiert auf fünf berücksichtigten Sedimentfraktionen sowie 118 Quellen auf und um der Hallig Langeneß.

3.1 Hydrodynamisch-numerische Modellierung

In Abb. 4 sind die simulierten Wasserstandsganglinien auf Höhe des Pegelstandortes Hilligenley im Südwesten der Hallig Langeneß darstellt. Zudem ist die mittlere Geländeoberkante der Hallig Langeneß (vgl. Schindler et al. 2014a) als Referenz abgebildet. Es werden sowohl die Bandbreite an unterschiedlichen Ereignissen verdeutlicht, als auch der Unterschied zwischen einem Landunter und einer schweren bis sehr schweren Sturmflut. Im vorliegenden Beispiel beträgt dieser Unterschied bis zu einem Meter im maximalen Wasserstand. Entsprechend stellen sich unterschiedliche Zeiträume ein, in denen die Hallig unter Wasser steht und auch die resultierenden Strömungsgeschwindigkeiten weichen signifikant voneinander ab. Da das Hauptaugenmerk auf dem Vergleich der Ereignisse untereinander und in Bezug auf unterschiedliche Meeresspiegelprojektionen liegt, sind die Absolutwerte der simulierten Wasserstände von untergeordnetem Interesse. Es geht vielmehr darum, dass in den HNM die Wasserstandsverhältnisse auf der Hallig Langeneß adäquat abgebildet werden können. Das betrifft insbesondere Fragestellungen in welchen Bereichen beispielsweise die Wassermassen zuerst auf die Hallig gelangen und wie sich diese verteilen. Hierfür fand während der Projektlaufzeit ein Abgleich mit den Beobachtungen aus den Felduntersuchungen in enger Abstimmung mit den Bearbeitern des Teilprojektes Hallig-D statt. Es konnte ein wesentlicher Erkenntnisgewinn generiert werden, da die modellierten Verhältnisse während eines Landunters nahezu identisch mit den tatsächlichen Verhältnissen waren.

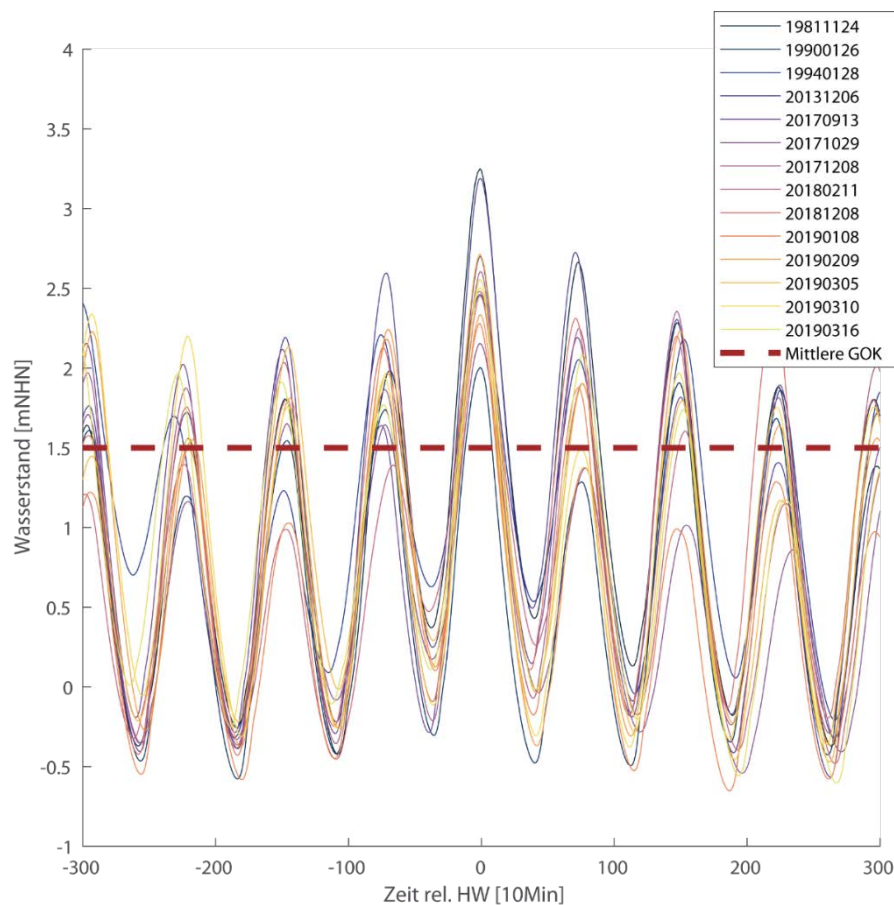


Abbildung 4: Darstellung der simulierten Wasserstandsganglinien der 14 betrachteten Landunter- und Sturmflutereignissen auf Höhe des Pegelstandortes Hilligenley im Südwesten der Hallig Langeneß. Die mittlere Geländeoberkante der Hallig Langeneß ist als gestrichelte Linie abgebildet.

Auf Basis der Sturmflut „Xaver“ vom 06.12.2013 verdeutlicht Abb. 5 die Veränderung der Wasserstandsganglinien unter Berücksichtigung der Meeresspiegelprojektionen für die Jahre 2030, 2050 und 2080 gegenüber dem IST-Zustand. Ein wichtiger Aspekt ist, dass der maximale Wasserstand um bis zu 0,57 m höher aufläuft beim Vergleich des IST-Zustandes mit der Projektion für 2080. Durch den erhöhten Wasserstand können potentiell mehr Sedimente auf die Hallig gelangen. Ein weiterer Aspekt ist, dass sich die Dauer eines Landunters in Zukunft signifikant ändern wird. Wie in der oberen Abb. 5 zu sehen ist, wird die Hallig bereits deutlich früher geflutet und der Wasserstand übersteigt mehrere Tidezyklen die mittlere Geländeoberkante. Die Auswertung der Landunter-Ereignisse zeigt eine identische Veränderung. Während ein gewöhnliches Landunter-Ereignis lediglich einen Tidezyklus dauern kann, muss in Zukunft davon ausgegangen werden, dass sich auch dieser Zeitraum verlängern wird.

Es kann an dieser Stelle festgehalten werden, dass die Auswertungen der Simulationen auf Basis der HNM-Modellkette eine geeignete Möglichkeit darstellen, die Wechselwirkung zwischen hydrodynamischer Einwirkung auf den resultierenden Sedimenttransport sowie die zukünftige Veränderung der Sedimentationsraten auf der Hallig Langeneß zu analysieren.

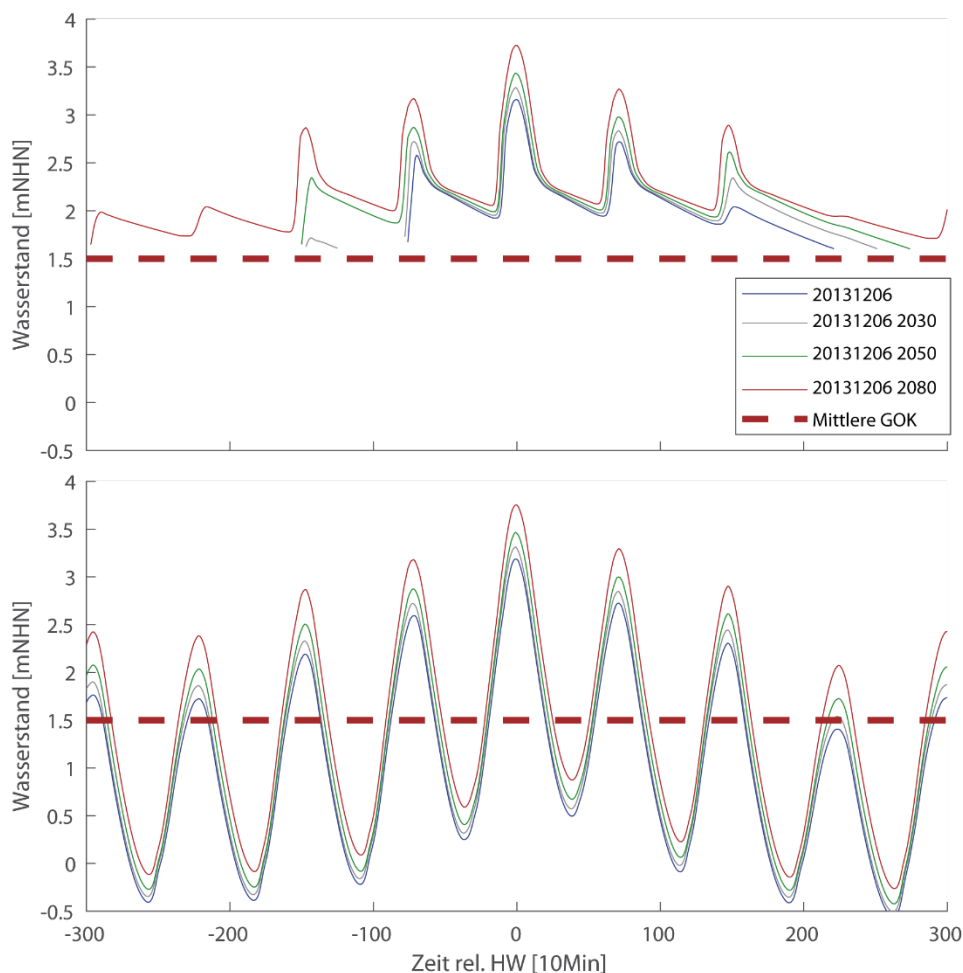


Abbildung 5: Darstellung der simulierten Wasserstandsganglinien während der Sturmflut „Xaver“ vom 06.12.2013 auf Höhe des Pegelstandortes Hilligenley im Südwesten der Hallig Langeneß (unten) und auf der Hallig Langeneß (oben) für den IST-Zustand sowie unter Berücksichtigung der Meeresspiegelprojektionen der Jahre 2030, 2050 und 2080. Die mittlere Geländeoberkante der Hallig Langeneß ist als gestrichelte Linie abgebildet.

3.2 Statistische Erfassung der Trübung

Alle Parameter zur statistischen Erfassung der Trübung sind den Simulationen des Nordseemodells entnommen oder sind Teil der Randbedingungen (z. B. die meteorologischen Prädiktoren). Vor deren Verwendung als Prädiktoren in den multivariaten Analysemethoden werden alle Parameter auf eine identische zeitliche Auflösung interpoliert und Bereiche ohne beobachtete Trübung an den Messstationen aus den Datenreihen eliminiert. In Abb. 6 ist exemplarisch die Korrelation zwischen ausgewählten Prädiktoren und der beobachteten Trübung für vier Tidezyklen dargestellt. Es zeigt sich, dass die Trübedaten mit jedem Prädiktor statistisch signifikant auf dem 5 %-Signifikanzniveau positiv oder negativ korreliert sind. Besonders ausgeprägt sind die Korrelationen beispielsweise zwischen der Trübung und dem Wasserstand, Seegangsparemtern (Wellenrichtung und -periode) und der resultierenden Windgeschwindigkeit.

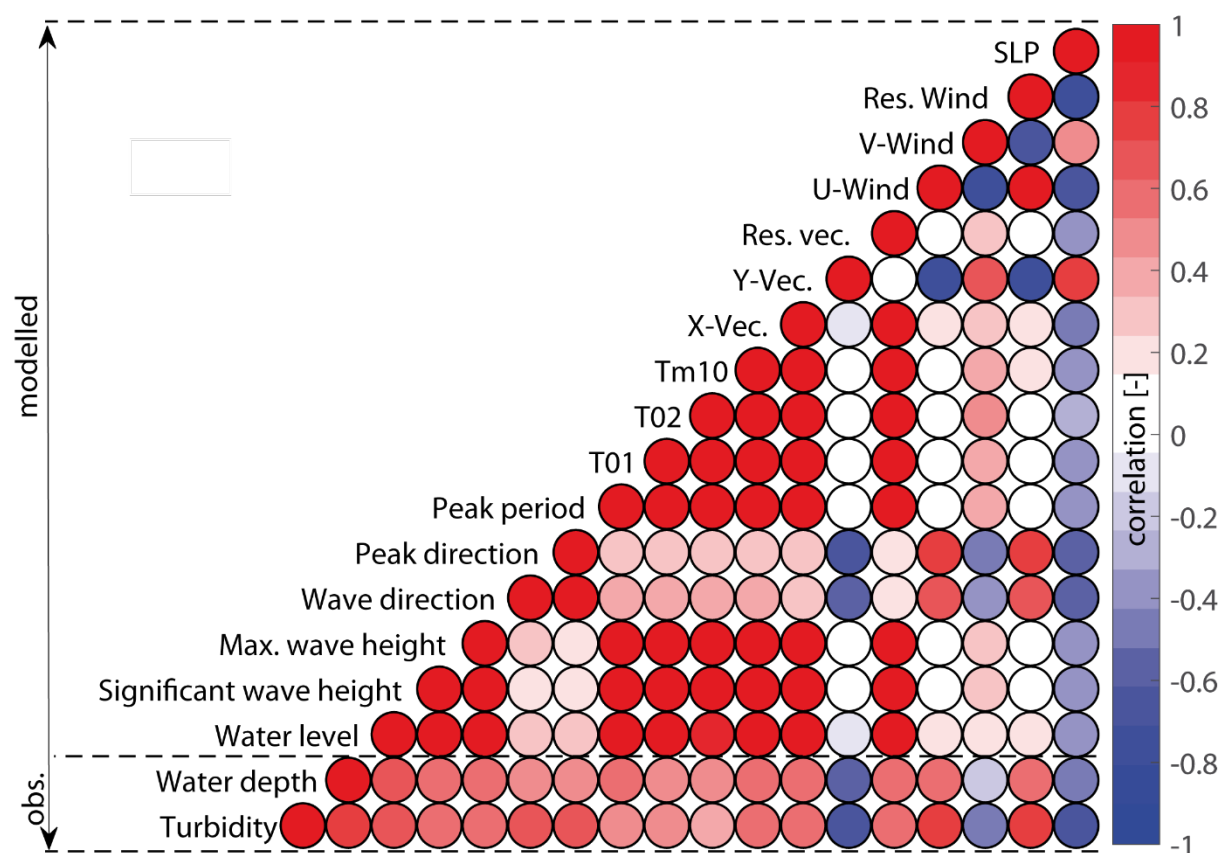


Abbildung 6: Korrelation zwischen ausgewählten hydrodynamischen Variablen aus einer numerischen Modellstudie (*engl. modelled*) und der beobachteten (*engl. observed, obs.*) Trübung und Wassertiefe bei vier Tidezyklen. Nicht signifikante Korrelationen werden als weiße Kreise dargestellt.

Abb. 6 verdeutlicht allerdings auch, dass die Prädiktoren untereinander korrelieren. Bei den verwendeten Prädiktoren muss entsprechend aufgrund der komplexen physikalischen Vorgänge in der Nordsee und der großen Anzahl an Prädiktoren von Multikollinearität ausgegangen werden. In der Forschungspraxis ist eine Multikollinearität in der Regel jedoch nicht zu vermeiden (Urban und Mayerl 2018). Auch in dem vorliegenden Fall muss die Multikollinearität bewusst toleriert werden, da sie aufgrund der Komplexität des hydrodynamischen Systems unvermeidbar ist und die verwendeten Prädiktoren verschiedene physikalische Systeme beschreiben. Um Spezifikationsprobleme weitestgehend ausschließen zu

können, werden nur Prädiktoren in das Regressionsmodell aufgenommen, die in einem physikalisch begründeten Zusammenhang mit der Trübungsdynamik stehen. Darüber hinaus wird die Verwendung von Prädiktoren, die keinen ausreichenden Zusammenhang mit der Trübungsdynamik aufweisen, durch den schrittweisen Regressionsansatz vermieden.

Im ersten Schritt wird die Möglichkeit der multivariaten, linearen Regressionsmodelle auf Basis schrittweiser Regression analysiert. Es werden insgesamt neun Modelle aufgebaut (je ein Modell für jede der acht Trübungsmessstationen und ein Gesamtmodell). Bei der Sensitivitätsanalyse der neun Regressionsmodelle mit je 196 Prädiktoren (unter Berücksichtigung einer zeitversetzten Wirkung) werden nicht signifikante Trübungswerte entfernt sowie die Auswirkungen von Quadrierung und Kubierung verschiedener Prädiktoren untersucht. Außerdem werden die Auswirkungen der Interaktionen der Prädiktoren untereinander getestet. Durch die Sensitivitätsanalyse lassen sich jedoch keine signifikanten Verbesserungen der Parametermanipulation auf das Modellergebnis feststellen. Auch die Untersuchung eines zeitversetzten Wirkens der Prädiktoren auf die Trübung kann in den Modellen nicht nachgewiesen werden. Da keine signifikanten Verbesserungen der Bestimmtheitsmaße zu erkennen sind, wird der Ansatz der zeitversetzten Berücksichtigung der Prädiktoren verworfen. Die Anzahl der Prädiktoren reduziert sich somit auf die ursprünglichen 28.

Des Weiteren wird auch das übergeordnete Regressionsmodell über alle Messstellen verworfen, da lediglich ein Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,25$ erreicht wird. Dass die Trübung nicht mit hoher Abbildungsgenauigkeit durch ein übergeordnetes Regressionsmodell modelliert werden kann, ist auf die unterschiedliche Charakteristik und Inhomogenität der Trübungsverteilung (Hache et al. 2019) auf und um die Hallig Langeneß und die komplexen physikalischen Vorgänge der Trübungsdynamik im Projektgebiet zurück zu führen.

Demgegenüber führt die statistische Erfassung der Trübung mit den acht individuellen Regressionsmodellen der einzelnen Trübungsmessstationen zu höheren Bestimmtheitsmaßen. Ein exemplarisches Ergebnis der Vorhersage der Trübungsdaten an der Messstation LT1 im Südosten der Hallig Langeneß (vgl. Abb. 9) ist in Abb. 7 dargestellt. Der linke Teil der Abb. 7 zeigt den Vergleich der beobachteten (schwarz) mit der rekonstruierten (rot) Trübung. Im rechten Teil der Abb. 7 sind die beobachteten und rekonstruierten Trübedaten als Regressionsplot abgebildet. Die farbliche Abstufung hebt die Anzahl der erfassten Trübedaten hervor, d. h. je dunkler, desto mehr Trübedaten wurden in den Felduntersuchungen gemessen. Die schwarze gestrichelte Linie beschreibt dabei die optimale Anpassung der Rekonstruktion an die Beobachtung. An der Trübungsmessstation LT1 werden Gütemaße von $R^2 = 0,38$ und $RMSE = 0,12$ g/l erzielt. Im Rahmen der schrittweisen Regression werden die Prädiktoren „Maximum wave height“, die „Mean wave period“ und die „Mean wave direction“ als statistisch signifikant vom Algorithmus gewählt. Aus physikalischer Sicht wird das Ergebnis als plausibel eingestuft, da der Seegang und die Wellenenergie die wichtigsten Parameter darstellen, die einen Erosionsprozess initiieren und somit eine Trübung in der Wassersäule hervorrufen. Im Vergleich zu den anderen Trübungsmessstationen zeigt sich ein überwiegend einheitliches Bild. Die Prädiktoren des Seegangs werden immer als statistisch signifikant bei der Erfassung der Trübung ausgewählt. An beispielsweise der Messstation LT2 im Südwesten der Hallig der Hallig Langeneß werden zusätzlich der Wasserstand und die Strömungsgeschwindigkeiten sowie die induzierte Wellenenergie als statistisch signifikante Prädiktoren ermittelt. Auch die meteorologischen Prädiktoren werden z. B. an der Messstation LT4 einbezogen und bestätigen die ermittelte Abhängigkeit aus Hache et al. (2019). Der RMSE variiert über alle Trübungsmessstationen zwischen 0,01 g/l

und 0,12 g/l, während sich das R^2 in einer Spanne zwischen 0,1 und 0,5 bewegt. Aufgrund der geringen Anzahl an erfassten Trübungswerten an den Messstationen LT7 und LT8, die sich auf der Hallig befinden, erreicht das R^2 sogar Werte über 0,8.

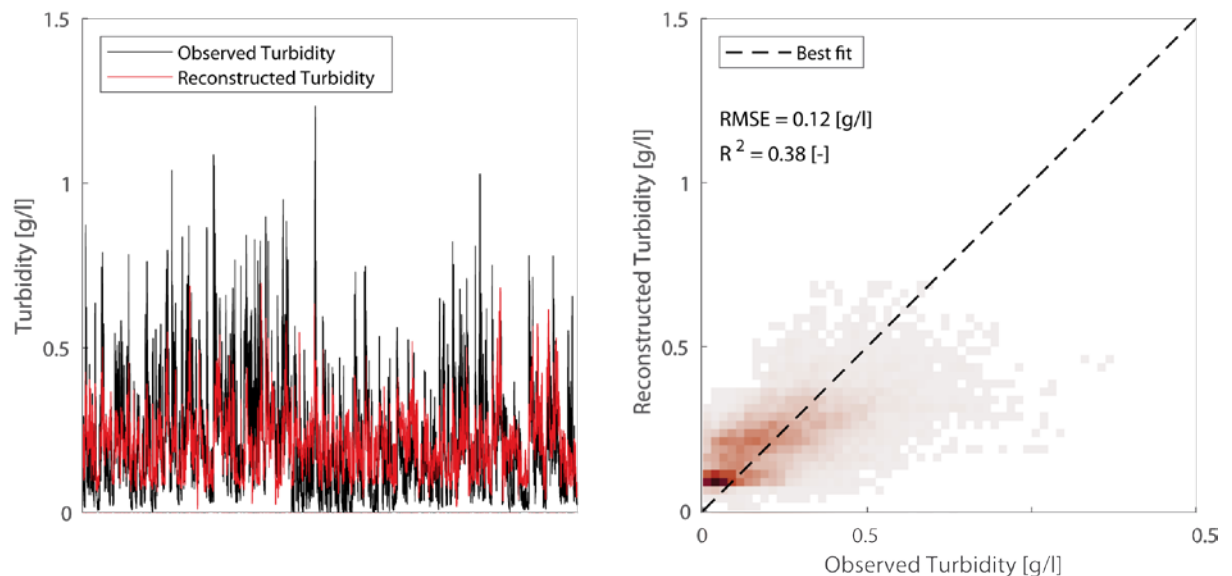


Abbildung 7: Ergebnisse der statistischen Erfassung der Trübung auf Basis der schrittweisen multiplen linearen Regressionsansätze exemplarisch für die Trübungsmessstation LT1.

In Abb. 7 fällt auf, dass insbesondere die „hohen“ Trübungsmessungen im Bereich von größer 0,4 g/l nicht zufriedenstellend abgebildet werden. Bei Betrachtung der statistischen Verteilung der Residuen lässt sich jedoch weitestgehend eine Normalverteilung feststellen, d. h. es werden die relevanten physikalischen Prozesse berücksichtigt. Die Abbildungsgenauigkeit der Modelle ist dennoch mit Unsicherheiten behaftet, die sich auch in einer festgestellten Heteroskedastizität widerspiegelt. Diese Unsicherheiten resultieren einerseits aus den komplexen physikalischen Vorgängen, die sich nur approximativ modellieren lassen und andererseits aus Unsicherheiten infolge der Modellkette sowie der Datenaufbereitung. In Anbetracht der Unsicherheiten und der festgestellten Heteroskedastizität liefern die Regressionsmodelle, vor allem bei den mittleren Trübungswerten, ein im Sinne der aufgeführten Gütekriterien gutes Ergebnis. Um festzustellen, ob die Unterschätzung der hohen erfassten Trübedaten auf die geringere Anzahl der Messwerte zurückzuführen ist, werden zudem verschiedene Schwellenwerte untersucht. Entsprechend werden die hohen Trübedaten separat in individuellen Regressionsmodellen erfasst, während nicht signifikante Trübedaten aus dem Datensatz eliminiert werden. Allerdings führt auch dieser Ansatz zu keiner signifikanten Verbesserung der Ergebnisse.

Es lässt sich schlussfolgern, dass die Komplexität der ablaufenden physikalischen Prozesse sowie die Unsicherheiten in den Trübungsmessungen die statistische Erfassung der Trübung nicht über den gewählten Regressionsansatz realisieren lässt. Allerdings bestätigen die gewonnenen Erkenntnisse aus Abb. 6 und Abb. 7, dass ein physikalisch begründbarer statistischer Zusammenhang zwischen der erfassten Trübung und den gewählten Prädiktoren besteht. Auf dieser Basis werden im nächsten Schritt Sensitivitätsstudien mit KNN und unterschiedlichen Konfigurationen durchgeführt. Ein Beispiel für die Messstation LT1 ist in Abb. 8 dargestellt. Der RMSE kann auf 0,08 g/l und das R^2 auf 0,73 optimiert werden. An den verbleibenden sieben Messstationen zeigt sich ein identisches Bild. Durch die Anwendung der KNN variiert der RMSE zwischen 0,03 und 0,08 g/l, während

das R^2 auf 0,64 bis 0,89 verbessert werden kann. Die Möglichkeit mit KNN ausgeprägte Nichtlinearitäten in der Abhängigkeitsstruktur zu berücksichtigen, liefert für die vorliegende Fragestellung somit eine geeignete Herangehensweise. Abb. 8 verdeutlicht zudem, dass auch die hohen Trübedaten, abgesehen von einzelnen Ausreißern, im Rahmen der Unsicherheiten adäquat erfasst werden.

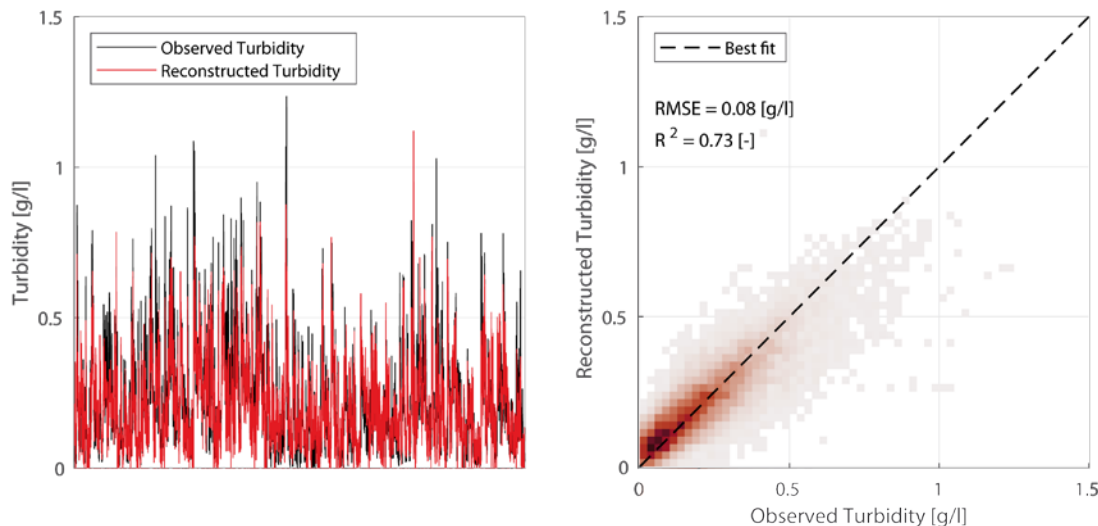


Abbildung 8: Ergebnisse der statistischen Erfassung der Trübung auf Basis der KNN exemplarisch für die Trübungsmessstation LT1.

Für die Generierung der Randbedingungen zur Simulation des Sedimenttransportes werden im weiteren Verlauf die trainierten KNN der einzelnen Trübungsmessstationen verwendet. Abb. 9 verdeutlicht schließlich anhand der eingefärbten Polygone die Zuordnung der in Abb. 3 festgelegten Sedimentquellen zu den einzelnen KNN der acht Messstationen. Aus den in die Fläche transferierten Trübedaten können anhand der in Kap. 2.3 beschriebenen Vorgehensweise die einzusteuernenden Sedimentfraktionen und deren Anzahl bestimmt werden.

Zusammenfassend wird festgehalten, dass die in den Felduntersuchungen auf und um die Hallig Langeneß erfassten Trübedaten in Abhängigkeit deren Lage eine unterschiedliche Charakteristik aufweisen (Hache et al. 2019, 2020). Die gemeinsame statistische Erfassung in einem Gesamtansatz führt entsprechend nicht zu zielführenden Ergebnissen. Auf Basis der durchgeführten Untersuchungen zur statistischen Erfassung der Trübung mit multivariaten Analysemethoden kann allerdings ein signifikanter Zugewinn zum Prozessverständnis geleistet werden. Dies wiederum ist elementar für die Betrachtung des Sedimenttransportes, da über die Trübung auf die Sedimentfraktionen geschlossen wird und letztlich so die Anzahl eingesteuerter Partikel bestimmt wird. Aus der Komplexität der ablaufenden physikalischen Prozesse, den Unsicherheiten in den Trübungsmessungen und der vereinfachten Abbildung der Prozesse in den numerischen Modellen sowie deren zeitlichen Auflösung resultieren allerdings weiterhin Abweichungen zwischen den Beobachtungen und der statistischen Rekonstruktion. Zukünftig sollten insbesondere hochfrequente Prozesse detaillierter betrachtet werden. Eine weitere Einschränkung ergibt sich daraus, dass während der Projektlaufzeit überwiegend moderate Landunter-Ereignisse aufgetreten und erfasst wurden. Für die Betrachtung der Sturmflutereignisse müssen die Trübedaten bei der Anwendung der KNN entsprechend extrapoliert werden, woraus zusätzliche Unsicherheiten resultieren.

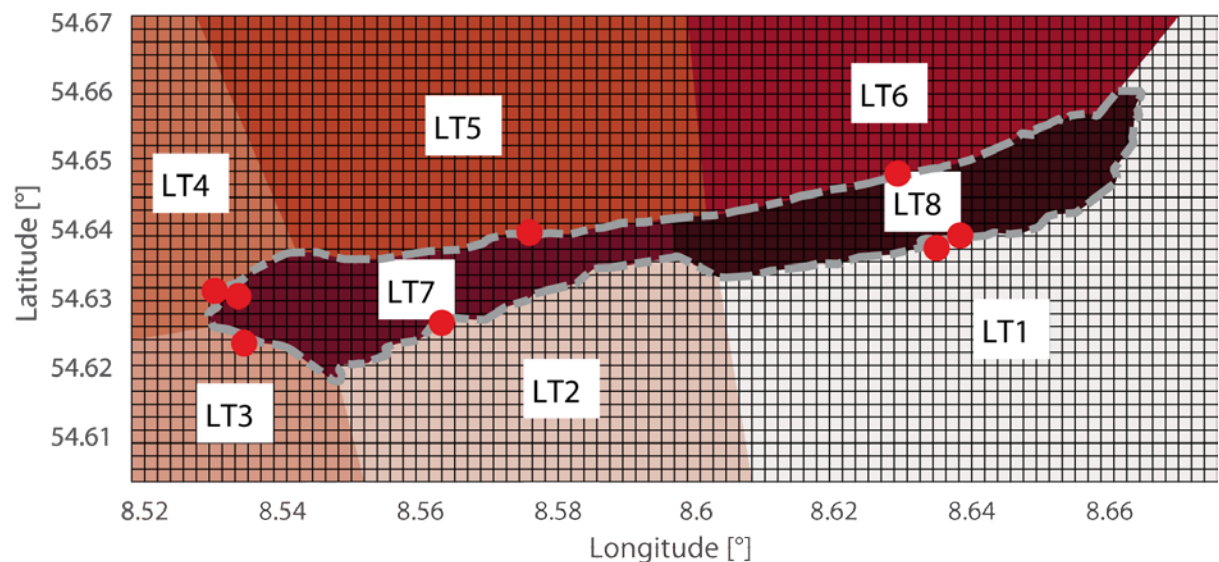


Abbildung 9: Zuordnung der 118 Sedimentquellen zu den zugehörigen Trübungsmessstationen für die flächige Übertragung der Trübungswerte.

3.3 Sedimenttransport

Zur Validierung des gewählten Ansatzes den Sedimenttransport über das Partikeltransportmodell zu beschreiben, wird exemplarisch das Landunter-Ereignis vom 13.09.2017 herangezogen und ausgewertet. Das Resultat ist in Abb. 10 qualitativ anhand der Anzahl sedimentierender Sedimentfraktionen dargestellt. Es wurde zur Validierung des Modells eine beliebige Anzahl an Partikel im Modell simuliert und qualitativ ausgewertet, in welchen Bereichen Sedimentation stattfindet. Die einzelnen Punkte zeigen anhand ihrer Größe und Farbgebung an, an welchen Lokationen tendenziell mehr oder weniger Sedimentation stattfindet. Im Vergleich zur Herangehensweise von Schindler et al. (2014b) zeigen sich gute Übereinstimmungen in Bereichen mit erhöhten Sedimentationsraten. Es finden sich im westlichen und östlichen Langeneß Bereiche mit hohen Sedimentationsraten, die direkt binnenseitig hinter den Deckwerken gelegen sind. Bestätigt werden kann ebenfalls, dass Maximalwerte der Sedimentation in der Nähe der Siele erfasst werden und dass die Sedimentationsraten mit Entfernung zu den Deckwerken Richtung Halligmitte abnehmen. Entsprechend wird die gewählte Vorgehensweise zur Simulation der Wechselwirkung zwischen hydrodynamischer Einwirkung auf den resultierenden Sedimenttransport als plausibel eingestuft. Alle im Folgenden aufgeführten Resultate werden bewusst qualitativ dargestellt und ausgewertet, da es maßgeblich um den A-B-Vergleich unterschiedlicher Ereignisse und Szenarien geht. Für die quantitative Beschreibung von Aufwuchsraten werden weitere Daten sowie gesonderte Modelle benötigt.

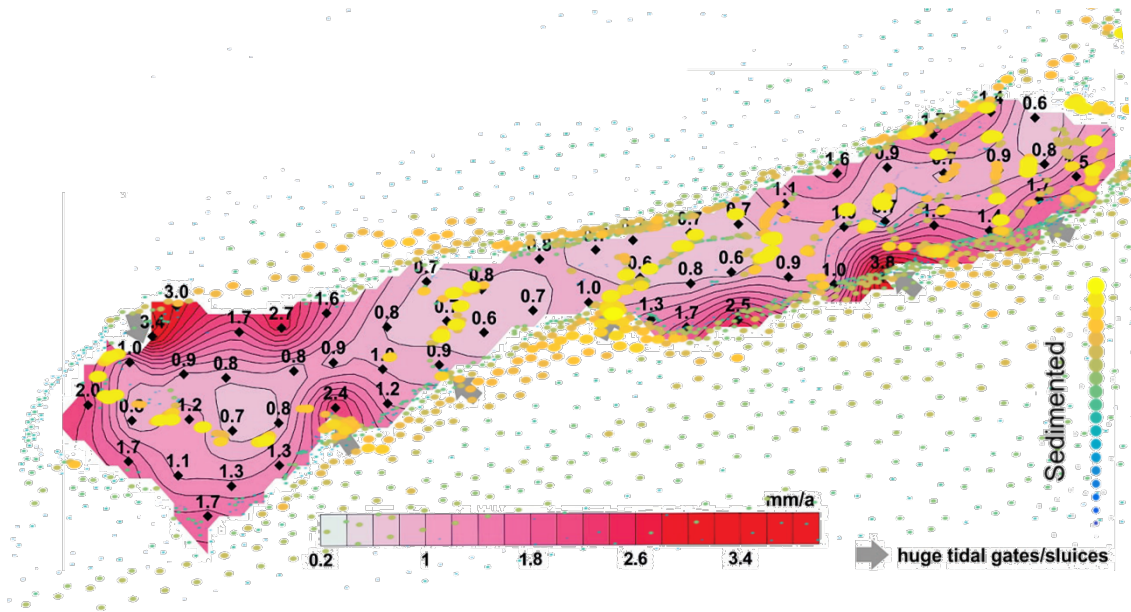


Abbildung 10: Exemplarisches Ergebnis der Berechnung des Sedimenttransports und Validierung anhand von Schindler et al. (2014b).

Im Rahmen der Projektbearbeitung wurden unterschiedliche Betrachtungen durchgeführt. So stellt sich beispielsweise die Frage, ob sich ein Unterschied zwischen einem „normalen“ Landunter und einer Sturmflut im Hinblick auf Sedimentation und Transportprozesse ergibt. Darüber hinaus werden im Folgenden die aufgelisteten Fragestellungen detaillierter betrachtet:

- Über welche Bereiche gelangen Partikel auf die Hallig Langeneß und verließen diese?
- Wo findet auf der Hallig Langeneß Sedimentation statt? Welche Sedimentfraktionen sedimentieren?
- Zeigen sich Gemeinsamkeiten oder Unterschiede bei verschiedenen Landunter- bzw. Sturmflutereignissen?
- Welche Veränderungen ergeben sich aus der Berücksichtigung der Meeresspiegelprojektionen für die Jahre 2030, 2050, 2080?

Bezugnehmend auf die erste Fragestellung verdeutlicht Abb. 11 durch die Gegenüberstellung des Landunterereignisses vom 13.09.2017 mit dem Sturmflutereignis vom 06.12.2013, dass die Bewegung und der Transport der Sedimentfraktionen auf die Hallig Langeneß maßgeblich über die südliche Halligkante erfolgt (vgl. Niehüser et al. 2019). Der Unterschied zwischen dem Landunter- und dem Sturmflutereignis zeigt sich im Wesentlichen darin, dass bei dem Sturmflutereignis auch Sedimentfraktionen weiter westlich und östlich auf die Hallig transportiert werden. Diese Erkenntnis kann einheitlich für alle 14 betrachteten Ereignisse festgestellt werden. Im Sinne der Plausibilität wird das Ergebnis als plausibel eingeschätzt, da zum einen die Halligkante auf Langeneß im Süden geringer ausfällt und zum anderen die Transportrichtung der hydrodynamischen Drehbewegung der Gezeiten gegen den Uhrzeigersinn durch die Deutsche Bucht entspricht. Im Gegensatz dazu zeigt Abb. 12 auf, wo die einzelnen Sedimentfraktionen von der Hallig Langeneß herunter transportiert werden. Im Falle des Landunterereignisses vom 13.09.2017 zeigt sich, dass die Partikel hauptsächlich über die südliche Kante die Hallig wieder verlassen. Das trifft auf alle simulierten Landunterereignisse zu. Bei Betrachtung des Ereignisses vom 06.12.2013

wird der Unterschied des Wasserstandes zwischen einem Landunter und einer (sehr schweren) Sturmflut deutlich. Die Simulationsergebnisse zeigen, dass der Sedimenttransport von der Hallig Langeneß über jede Stelle der Halligkante erfolgt.

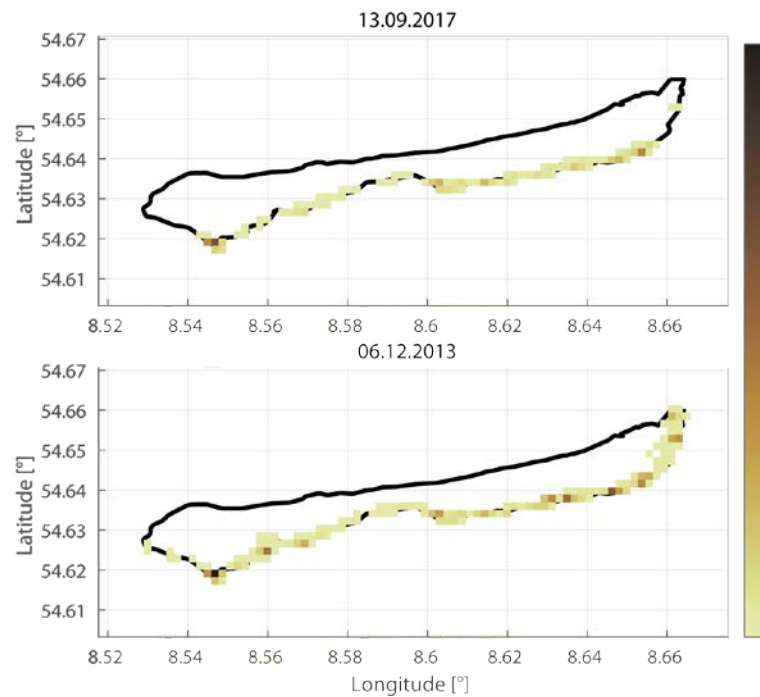


Abbildung 11: Vergleich des Landunter- und Sturmflutereignisses vom 13.09.2017 und 06.12.2013 hinsichtlich der Fragestellung, über welche Bereiche die Sedimentfraktionen auf die Hallig Langeneß transportiert werden.

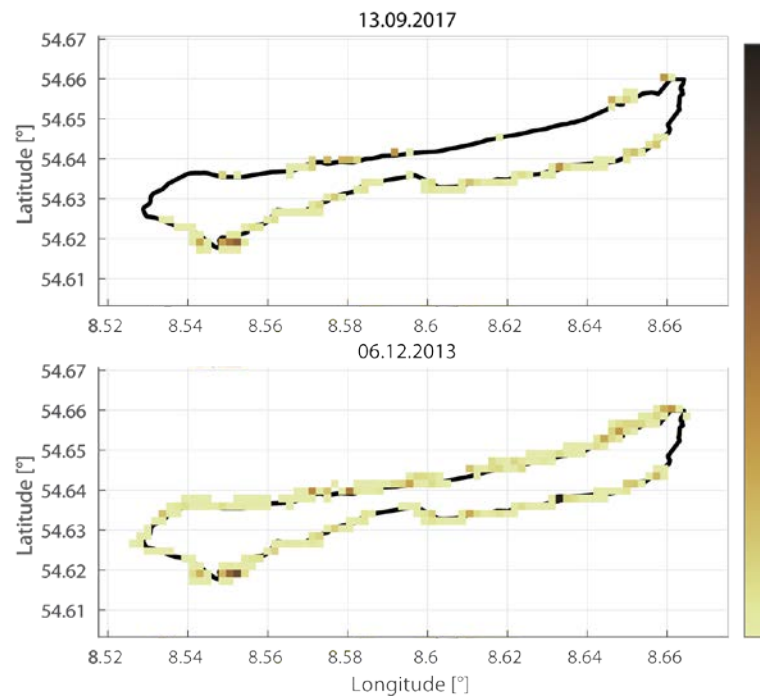


Abbildung 12: Vergleich des Landunter- und Sturmflutereignisses vom 13.09.2017 und 06.12.2013 hinsichtlich der Fragestellung, wo die Sedimentfraktionen von der Hallig Langeneß herunter transportiert werden.

Bei der Berücksichtigung der Meeresspiegelprojektionen für die Jahre 2030, 2050 und 2080 (nicht dargestellt) ergeben sich im Falle der Sturmfluten keine wesentlichen Änderungen hinsichtlich der Sedimenttransportbewegungen. Für die Landunterereignisse lässt sich jedoch feststellen, dass sich der Transport der Sedimente mit einer sukzessiven Erhöhung des Basiswasserstandes an die Ergebnisse der Sturmflutsimulationen angleicht.

Abb. 13 zeigt den Vergleich, wo während der Ereignisse vom 13.09.2017 und vom 06.12.2013 auf der Hallig Langeneß Sedimentation stattfindet. Es wird verdeutlicht, dass ein signifikanter Unterschied zwischen einem Landunter- und einem Sturmflutereignis existiert. Während bei der Sturmflut im unteren Teil der Abb. 13 nahezu auf der gesamten Langeneß Sedimentation stattfindet, beschränkt sich diese bei dem Landunter auf Bereiche entlang der südlichen Halligkante und auch nur im östlichen Teil. Hierbei spielt die Dauer der Ereignisse eine gewichtende Rolle, über wie viele Tidezyklen diese andauern. Entsprechend können bei einer Sturmflut mehr Sedimente auf die Hallig gelangen und sich bei entsprechend beruhigten Strömungsverhältnissen absetzen.

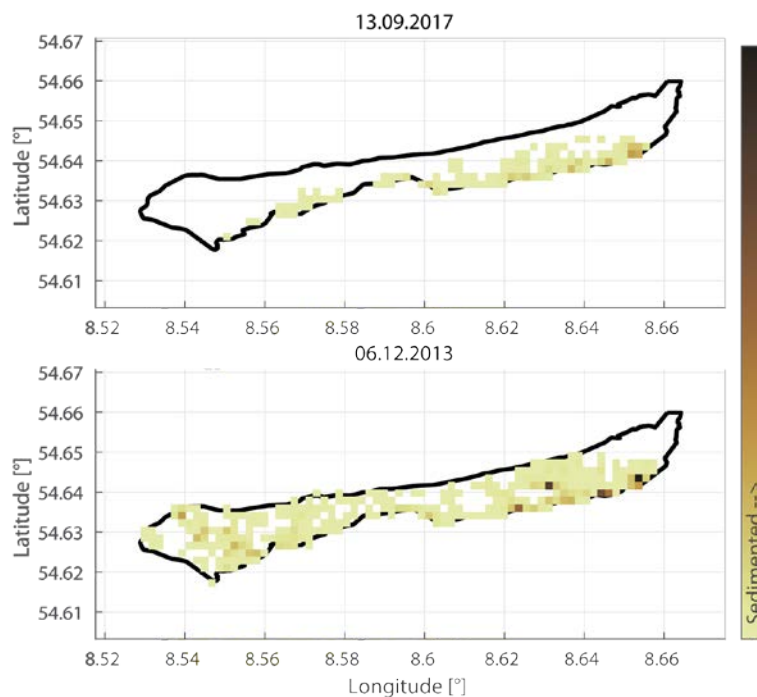


Abbildung 13: Vergleich des Landunter- und Sturmflutereignisses vom 13.09.2017 und 06.12.2013 hinsichtlich der Fragestellung, in welchen Bereichen Sedimentfraktionen auf der Hallig Langeneß sedimentieren.

Dieser Zusammenhang und der Einfluss des maximalen Wasserstandes auf die Sedimentfraktionen, die auf die Hallig Langeneß transportiert werden und dort sedimentieren, wird in Abb. 14 verdeutlicht. Der Sedimenttransport und die Sedimentation auf der Hallig wird bei den erfassten Landunterereignissen maßgeblich durch Schluff dominiert (Abb. 14 oben links). Auch bei den Sturmflutereignissen wird der maßgebende Anteil an transportierten und sedimentierten Partikeln von der Klasse U dominiert. Allerdings werden hier, im Gegensatz zu den Landunterereignissen, auch Partikel der Klasse fSU auf die Hallig transportiert, die sich wiederum in tiefliegenden Bereichen auf der Halligoberkante absetzen können. Bei den Landunterereignissen findet dieser Prozess lediglich entlang der südlichen Halligkante statt. Darüber hinaus werden keine signifikanten Sedimentfraktionen größer

der Klasse fSU während eines Landunters auf die Hallig transportiert. Bei dem Sturmflutereignis findet dieser Transport, wenn auch im Vergleich zu den anderen Sedimentfraktionen deutlich reduziert, hingegen statt. Zudem beschränkt sich die Sedimentation auf die südliche Halligkante. Der Transport von Mittelsanden (mS) konnte in keiner der Simulationen beobachtet werden, was durch die sehr geringe Verfügbarkeit ($< 2\%$) zu erklären ist. Die Auswertung der 118 unterschiedlichen Sedimentquellen hat zudem gezeigt, dass die Sedimentfraktionen, die zu einer Sedimentation auf der Halligoberfläche führen, auch aus dem südlich gelegenen Bereich des Wattes stammen. Es finden entsprechend keine signifikanten räumlichen Umverteilungen der Sedimente, beispielsweise aus dem nördlichen Bereich, statt. Die erzielten Ergebnisse wurden während der Projektlaufzeit in bilateralen Projekttreffen mit den Projektpartnern diskutiert und bestätigen die Plausibilität der Ergebnisse anhand deren Beobachtungen. Hierbei ist hervorzuheben, dass die Beobachtungen und Erfahrungen der Bewohner*innen der Hallig Langeneß zeigen, dass „gute“ Sedimente, die zu einem Aufwuchs der Halligoberkante führen, nur im Sturmflutfall auf die Hallig transportiert werden und diese Beobachtung mit den vorgestellten Simulationsergebnissen übereinstimmen.

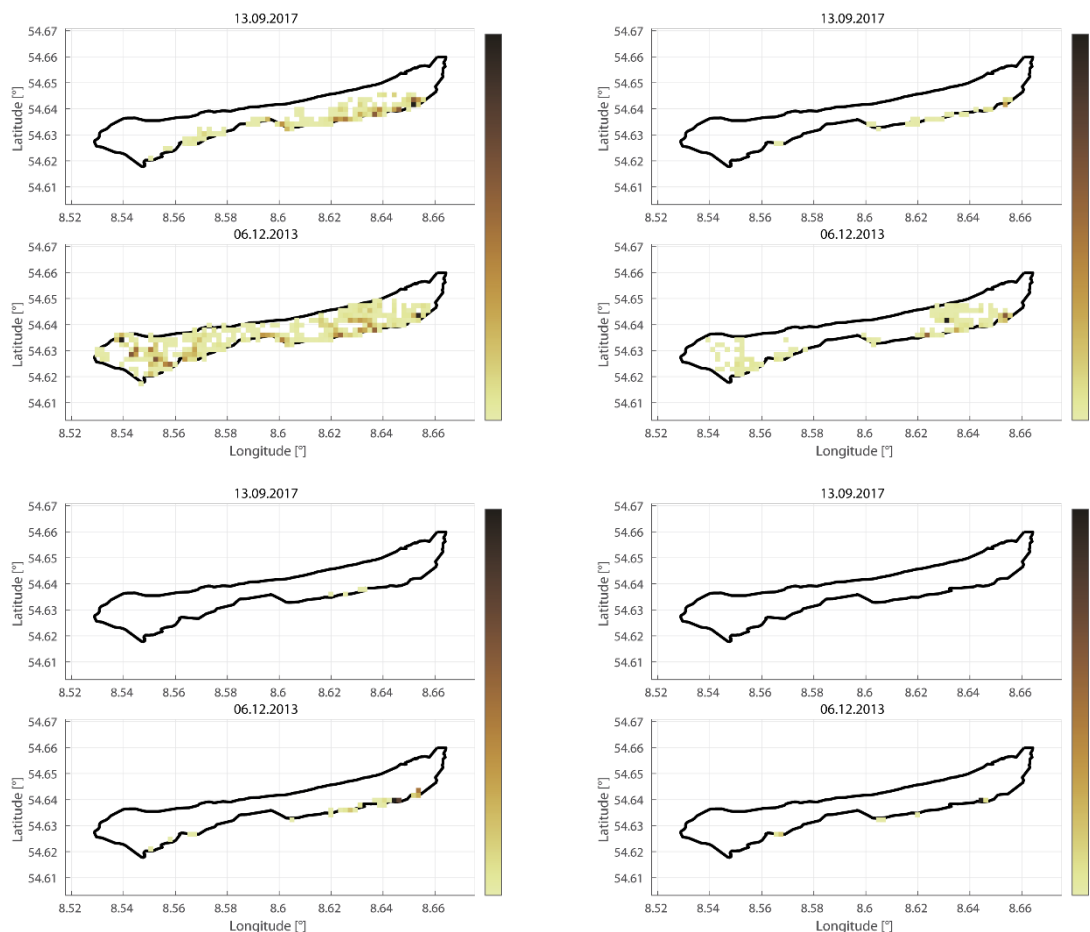


Abbildung 14: Vergleich des Landunter- und Sturmflutereignisses vom 13.09.2017 und 06.12.2013 hinsichtlich der Fragestellung, welche Sedimentfraktionen auf der Hallig Langeneß sedimentieren (oben links: U; oben rechts: fSU; unten links: fS; unten rechts: fSms).

Im letzten Schritt zeigt die Abb. 15 den Vergleich der Veränderung der Sedimentation auf der Hallig Langeneß unter Berücksichtigung der Meeresspiegelprojektionen für die Jahre

2030, 2050 und 2080 für Landunterereignisse. Wie bereits oben für den Transport der Sedimente auf und von der Hallig festgestellt wird, gleichen sich die Ergebnisse der simulierten Landunter mit einer sukzessiven Erhöhung des Basiswasserstandes an die Ergebnisse der Sturmflutsimulationen an. Es kann entsprechend unter zukünftigen Bedingungen davon ausgegangen werden, dass auch moderate Landunterereignisse größere Sedimentfraktionen auf die Hallig Langeneß transportiert werden und potentiell zu einem Aufwuchs führen können. Demgegenüber stehen allerdings Erosionsprozesse, die bei den bisherigen Betrachtungen vernachlässigt werden. In Kap. 3.4 wird hierfür die Veränderung der kritischen Sohlschubspannung als Proxy für sich ändernde Erosionsprozesse unter zukünftigen Meeresspiegelprojektionen betrachtet.

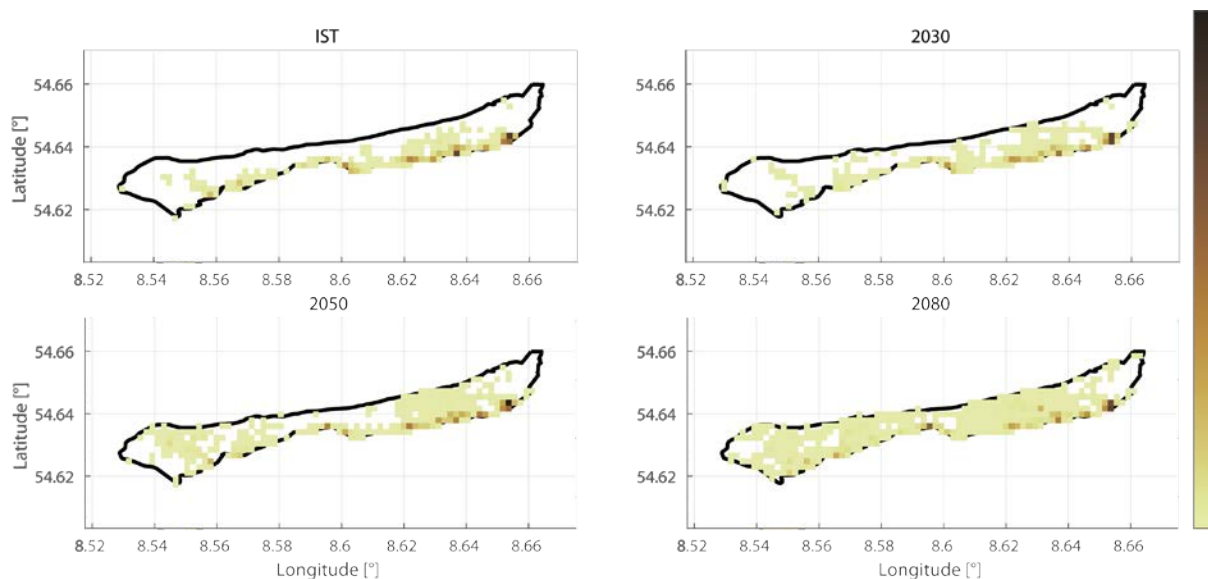


Abbildung 15: Vergleich der Veränderung der Sedimentation auf der Hallig Langeneß unter Berücksichtigung der Meeresspiegelprojektionen für die Jahre 2030, 2050 und 2080 für Landunterereignisse.

Zusammenfassend bestätigen die Simulationsergebnisse des Sedimenttransportes und der Sedimentation bekannte physikalische Prozesse und Erkenntnisse aus dem Vorgängerprojekt „ZukunftHallig“ (Jensen et al. 2016). So kann beispielsweise bestätigt werden, dass Maximalwerte der Sedimentation in der Nähe der Siele auftreten. Durch die Modellkette ist es darüber hinaus möglich, Aussagen zu flächigen Betrachtungen und zukünftigen Veränderungen bei geänderten Randbedingungen hinsichtlich Meeresspiegelprojektionen zu tätigen. Es wird gezeigt, dass der Transport der Sedimente im Wesentlichen über die südliche Halligkante erfolgt, ungeachtet ob es sich um ein Landunter- oder Sturmflutereignis handelt. Bei der Sedimentation der betrachteten Partikelklassen wird ein signifikanter Unterschied zwischen Landunter- und Sturmflutereignis festgestellt. Bei Sturmfluten kommt mehr und gröberes Material auf die Hallig als bei moderaten Landunterereignissen (siehe auch Hache et al. 2020). Eine wesentliche Erkenntnis ist zudem, dass sich durch die mögliche Erhöhung des Basiswasserstandes im Zuge des Klimawandels ein Angleichen des Sedimenttransportes und der Sedimentation zwischen moderaten Landunter- und Sturmflutereignissen einstellen wird.

3.4 Sohlschubspannung

Bei der Betrachtung der kritischen Sohlschubspannung handelt es sich um eine rein theoretische Darstellung als Approximation dafür, ob sich Sedimente während es Landunter- bzw. Sturmflutereignisses auf der Halligoberfläche absetzen können oder bereits konsolidiertes Material erodiert werden kann. Eine erhöhte Sohlschubspannung kann somit den vertikalen Aufwuchs der Hallig Langeneß verhindern. Die Sohlschubspannung auf Basis der HNM wird maßgeblich aus der vorhandenen Strömungsgeschwindigkeit ermittelt und soll an dieser Stelle verwendet werden um den IST-Zustand der zukünftigen Situation unter Berücksichtigung der Meeresspiegelprojektionen für die Jahre 2030, 2050 und 2080 gegenüberzustellen.

In Abb. 16 ist der Vergleich der Veränderung der kritischen Sohlschubspannung auf der Hallig Langeneß unter Berücksichtigung der Meeresspiegelprojektionen für die Jahre 2030, 2050 und 2080 für das Landunterereignis vom 13.09.2017 gezeigt. Die ermittelten Sohlschubspannungen werden dafür den fünf betrachteten Sedimentfraktionen zugeordnet, deren kritische Sohlschubspannung überschritten wird. Farblich weiß markiert sind entsprechend Bereiche, in denen die vorhandene Sohlschubspannung nicht ausreicht, um entsprechende Partikel potentiell zu erodieren. Ausgehend von Abb. 16 oben links, die den IST-Zustand zeigt, werden in den weiteren Abbildungen nur die Bereiche farblich markiert, in denen sich Änderungen gegenüber dem IST-Zustand ergeben. Für den IST-Zustand kann festgehalten werden, dass die induzierte Sohlschubspannung auf der Halligoberfläche nicht ausreicht, um Sedimente zu remobilisieren. Im westlichen und nördlichen Bereich außerhalb der Hallig Langeneß bewegen sich die Strömungsgeschwindigkeiten in einer Größenordnung, die im Wesentlichen die kritischen Sohlschubspannungen der Sedimentfraktionen U bis fS überschreiten. Im südlichen Bereich der Hallig Langeneß bis unmittelbar an die Halligkante erreicht die kritische Sohlschubspannung den Wert von mS, was die Erkenntnisse aus Kap. 3.3 bestätigt. Die Betrachtung der Veränderungen unter Berücksichtigung der Meeresspiegelprojektionen zeigt, dass die induzierte Sohlschubspannung auf der Halligoberfläche zunimmt, wenn auch erst signifikant für das Jahr 2080 (Abb. 16 unten rechts). Die Veränderungen werden insbesondere im nördlichen Teil der Hallig Langeneß sichtbar.

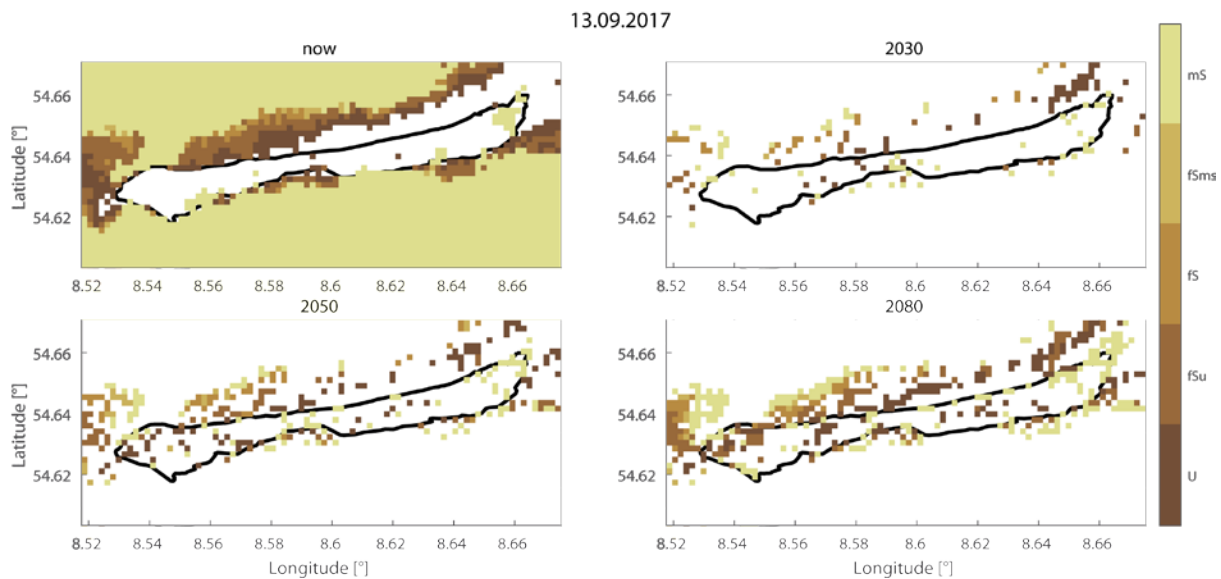


Abbildung 16: Vergleich der Veränderung der Sohlschubspannung auf der Hallig Langeneß unter Berücksichtigung der Meeresspiegelprojektionen für die Jahre 2030, 2050, 2080 für das Landunterereignis vom 13.09.2017.

Vergleichend zeigt Abb. 17 die Veränderung der Sohlschubspannung auf der Hallig Langeneß unter Berücksichtigung der Meeresspiegelprojektionen für die Jahre 2030, 2050, 2080 für das Sturmflutereignis vom 06.12.2013. Es wird deutlich, dass die induzierten Sohlschubspannungen auf der Halligoberfläche bei einem Sturmflutereignis deutlich höher ausfallen, als bei einem Landunter-Ereignis. Insbesondere im Bereich der Gräben und Sieltore sowie entlang der nördlichen binnenseitigen Halligkante reichen die Sohlschubspannungen aus, um Mittelsande zu remobilisieren. Unter Berücksichtigung der Meeresspiegelprojektion bis 2080 erweitert sich dieser Bereich nahezu auf die gesamte Hallig Langeneß. Die Bereiche außerhalb der Halligoberfläche zeigen hingegen nur marginale Unterschiede zwischen Abb. 16 und Abb. 17.

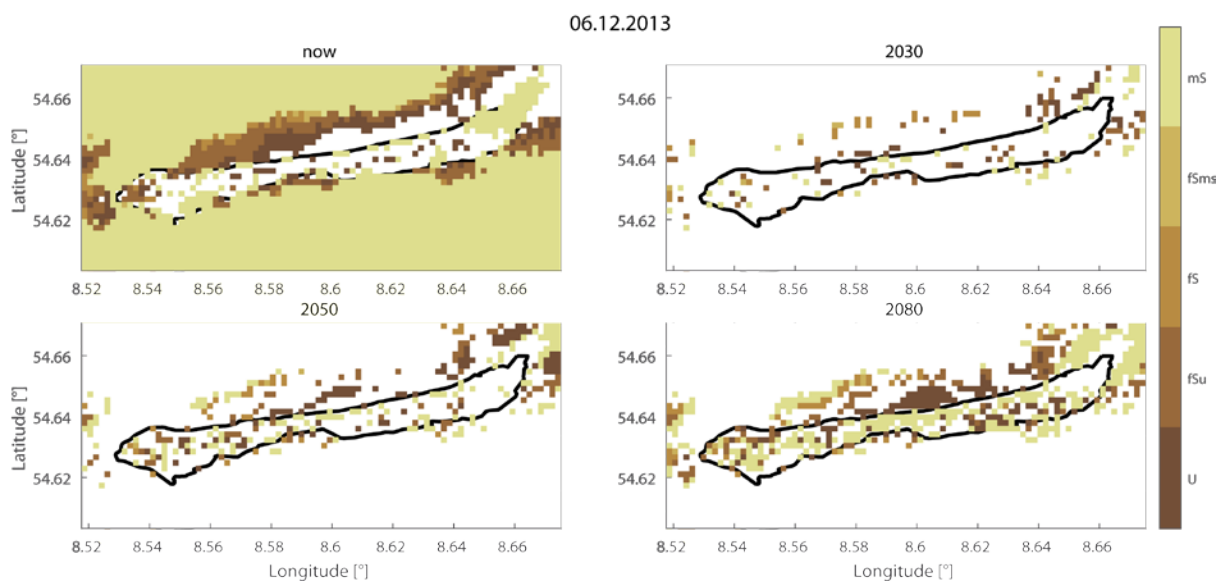


Abbildung 17: Vergleich der Veränderung der Sohlschubspannung auf der Hallig Langeneß unter Berücksichtigung der Meeresspiegelprojektionen für die Jahre 2030, 2050 und 2080 für das Sturmflutereignis vom 06.12.2013.

Die vorgestellten Erkenntnisse aus der theoretischen Betrachtung der (kritischen) Sohl-schubspannung als Proxy für Erosionsprozesse zeigen, dass für zukünftige Betrachtungen hinsichtlich der Veränderung von Aufwuchsraten auf der Hallig Langeneß nicht nur die Sedimentation(vgl. Kap. 3.3) betrachtet werden sollte. Es ist ebenso von einer Erhöhung der erosionsfördernden Prozesse auszugehen, die eine nachhaltige Konsolidierung von Sedimentfraktionen verhindern können. Entsprechend sind Schutz- und Managementstrategien für die Halligen zu entwickeln, die einerseits das erhöhte Potential von Sedimenten, die auf die Hallig transportiert werden, zu nutzen und andererseits in der Lage sind, diese nachhaltig auf der Hallig zu konservieren. Weitere Ausführungen hierzu sind im folgenden Kap. 4 zusammengetragen.

4 Schlussfolgerung und weiterer Forschungsbedarf

Die Basis der vorgestellten Untersuchungen und den Ergebnissen bildet das Vorgängerprojekt „ZukunftHallig“ (Jensen et al. 2016). Es konnte gezeigt werden, dass die Sedimentablagerungen auf den Halligen infolge regelmäßiger Überflutungen ein vertikales anwachsen der Geländehöhen begünstigen (Schindler et al., 2014b). Dem gegenüber wurde jedoch auch ein Anstieg der mittleren und extremen Wasserstände beobachtet. Wegen dieser Meeresspiegelerhöhung und auch weiteren Prognosen, die auf einen noch stärkeren Anstieg der Wasserstände hindeuten (Church et al. 2013), ist jedoch fraglich, ob der Anstieg der Wasserstände vom derzeitigen vertikalen Aufwuchs durch Sedimentablagerungen kompensiert werden kann. Dementsprechend standen langfristige Strategien zur Erhöhung der natürlichen Adaptionskapazität der Halligen gegenüber dem Einfluss steigender Wasserstände im Fokus der Untersuchungen. Ob ein natürliches Potential zur Erhöhung der Sedimentdeposition vorhanden ist, hängt einerseits von den Trübstoffkonzentrationen in der Wassersäule rund um die Halligen während eines Hochwasserereignisses, das zu einem Landunter führt, ab. Andererseits muss der Transport der Sedimente auf die Hallig gewährleistet sein. Zur Abschätzung des Sedimenttransportes und den Ablagerungsprozessen sowie dem Einfluss unterschiedlicher Maßnahmen und Eingriffe werden beobachtete und statistisch generierte Daten sowie eine Kombination verschiedener statistischer und numerischer Modelle herangezogen.

Für die statistische Erfassung und Beschreibung der ermittelten Trübewerte in der Wassersäule aus Feldmessungen zur flächigen Übertragung um und auf die Hallig Langeneß kann geschlussfolgert werden, dass die einzelnen Auswertungen der Messstationen unterschiedliche Charakteristiken aufweisen. Dies ist bedingt durch die Komplexität der ablaufenden physikalischen Prozesse und der Unsicherheiten in den Trübungsmessungen. Zudem stellen die verwendeten Daten aus der numerischen Modellierung eine vereinfachte Abbildung der in der Natur auftretenden und hochfrequenten Prozesse. Auf Basis von künstlichen neuronalen Netzen konnten die Trübedaten allerdings für die vorliegende Fragestellung adäquat widergegeben werden (RMSE: 0,03 bis 0,08 g/l; R^2 : 0,64 bis 0,89) und auf das Untersuchungsgebiet angewendet werden. Verbleibende Unsicherheiten resultieren im Wesentlichen aus der Extrapolation für unbekannte Ereignisse.

Die Simulation der Wechselwirkung zwischen hydrodynamischer Einwirkung auf den resultierenden Sedimenttransport auf die Hallig Langeneß hat gezeigt, dass bei moderaten Landunterereignisse, wie sie während der Projektlaufzeit erfasst wurden, deutlich weniger

Sedimente und nur feinere Sedimentfraktionen (maßgeblich Schluffe) auf die Hallig gelangen, als beispielsweise bei einer sehr schweren Sturmflut (Schluff bis Feinsand). Diese Erkenntnisse werden gestützt durch die Beobachtungen und Erfahrungen aus den Felduntersuchungen und der Hallig-Bewohner*innen. Die Abschätzung von langfristigen Änderungen der Sedimentation für die Jahre 2030, 2050 und 2080 hat gezeigt, dass sich die Differenzen zwischen einem moderaten Landunter und einer Sturmflut bei einem erhöhten Basiswasserstand in Form des prognostizierten Meeresspiegelanstiegs angleichen. Der Sedimenttransport findet, begünstigt durch die hydrodynamischen Verhältnisse und die niedrigere Ausbildung der Halligkante, hauptsächlich im Süden der Hallig Langeneß statt. Die Sedimentation zeigte bei den durchgeführten Analysen Maximalwerte in der Nähe der Siele. Zukünftig ist zu berücksichtigen, dass mit einem steigenden Wasserstand durch den prognostizierten Meeresspiegelanstieg auch die Strömungsgeschwindigkeiten und damit die Sohlschubspannungen zunehmen und einer nachhaltigen Konsolidierung der Sedimente gegenüberstehen können.

Aus diesem Grund wird die Modellkette zur Entwicklung optimierter Schutz- und Managementstrategien für die Halligen bereitgestellt, um Vergleichsbetrachtungen und entsprechende Entscheidungen zum Erhalt der Halligen durchführen zu können (vgl. Karius et al. 2020). Die Untersuchungen lassen u. a. den Schluss zu, dass die Halligkante einen „widersprüchlichen“ Nutzen aufweist (siehe auch Hache et al. 2020). Auf der einen Seite können nur bei ausreichend hohen Wasserständen Sedimente auf die Hallig transportiert werden, die für einen vertikalen Aufwuchs erforderlich sind. Zum anderen wird für die Sedimentation eine ausreichend lange Beruhigung der Strömungsprozesse benötigt. Mit der entwickelten Modellkette können unterschiedliche Fragestellungen zum Erhalt bzw. zur Stabilisierung der Halligen durchgeführt werden, z. B. wie sich unterschiedliche Deckwerksstrukturen und -höhen sowie Sieltoranlagen, Halligpriele und Gräben auf den Transport und die Sedimentation der Trübstoffe in der Wassersäule. Hierbei ist es wichtig, die Erfahrungen der Hallig-Bewohner*innen mit einzubeziehen und zu berücksichtigen.

5 Danksagung

Das Verbundprojekt *Living CoastLab Halligen* wurde vom 01. Oktober 2016 bis zum 30. September 2019 als eines von 12 Verbundprojekten mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen des Förderschwerpunkts „Küstenmeerforschung in Nord- und Ostsee (KüNO)“ gefördert (BMBF-Förderkennzeichen: 03F0759A). Es wurde darüber hinaus eine kostenneutrale Verlängerung um fünf Monate, bis zum 29. Februar 2020 bewilligt.

Der Projektkoordinator, die Teilprojektleiter und Mitarbeiter bedanken sich für die intensive Betreuung durch den Projektträger Jülich und die fruchtbare Zusammenarbeit mit den Küstenschutzbehörden sowie der projektbegleitenden Gruppe.

Bei der Erstellung des hydrodynamisch-numerischen Modells kam das Softwarepaket MIKE21® zum Einsatz, dass von DHI-WASY zur Verfügung gestellt wurde.

6 Schriftenverzeichnis

- Allison, M. A.; Yuill, B. T.; Meselhe, E. A.; Marsh, J. K.; Kolker, A. S. and Ameen, A. D.: Observational and numerical particle tracking to examine sediment dynamics in a Mississippi River delta diversion, 2017.
- Arns, A.; Dangendorf, S.; Jensen, J.; Talke, S.; Bender, J. and Pattiaratchi, C.: Sea-level rise induced amplification of coastal protection design heights. In: Scientific reports 7, S. 40171. doi: 10.1038/srep40171, 2017.
- Arns, A.; Wahl, T.; Haigh, I. D. and Jensen, J.: Determining return water levels at ungauged coastal sites: a case study for northern Germany. In: Ocean Dynamics 65 (4), S. 539-554. doi: 10.1007/s10236-015-0814-1, 2015.
- Backhaus, K.; Erichson, B.; Plinke, W. und Weiber, R.: Multivariate Analysemethoden. 14. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; Imprint: Springer Gabler, 2016.
- Bartholomä, A. und Flemming, B. W.: Zur Sedimentdynamik in den ostfriesischen Rückseitenwatten und den Veränderungen durch natürliche und anthropogene Einflüsse. In: Schutzgemeinschaft Deutsche Nordseeküste e. V. (Hrsg.): Klimaänderung und Küste. Schriftenreihe der Schutzgemeinschaft Deutsche Nordseeküste Heft Nr. 1: S. 70-90, 1996.
- Bass, J.; Granse, D.; Hache, I.; Jensen, K.; Karius, V.; Minden, V.; Stock, M.; Suchrow, S. and Kleyer, M.: Plant traits affect surface elevation change in salt marshes: an example of biogeomorphic ecosystems. Eingereicht bei Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2020. (zur Veröffentlichung eingereicht/in review).
- Brownlie, W. R.: Prediction of flow depth and sediment discharge in open channels. Pasadena, Kalifornien (USA): W. M. Keck Laboratory of Hydraulics and Water Resources, 1981. Report No. KH-R-43A, 1981.
- 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. Climate Change 2013. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the IPCC. In: Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2013.
- Copernicus Climate Change Service (C3S): ERA5: Fifth generation of ECMWF atmospheric reanalyses of the global climate. Copernicus Climate Change Service Climate Data Store (CDS), 2017. Stand 14.04.2020: <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/home>.
- DHI: MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM - Particle Tracking Module. Scientific Documentation. Hg. v. Danish Hydraulic Institute (DHI), 2017c.
- DHI: MIKE 21 Flow Model FM. Hydrodynamic Module - User Guide. Hg. v. Danish Hydraulic Institute (DHI), 2017a.
- DHI: MIKE 21 Spectral Waves FM. Spectral Wave Module - User Guide. Hg. v. Danish Hydraulic Institute (DHI), 2017b.
- Figge, K.: Sedimentverteilung in der Deutschen Bucht. Deutsches Hydrographisches Institut, Karte Nr. 2900 (mit Begleitheft), 1981.

- Hache I.; Karius V. and von Eynatten H.: Suspended particulate matter for sediment accumulation on inundated anthropogenic marshland in the southern North Sea – Potential, thresholds and limitations. Eingereicht bei Continental Shelf Research, 2020. (zur Veröffentlichung eingereicht/in review).
- Hache, I.; Karius, V.; Gutkuhn, J. and Eynatten, H.: The development and application of an autonomous working turbidity measurement network: Assessing the spatial and temporal distribution of suspended particulate matter on tidal flats in the North Frisian Wadden Sea. In: Continental Shelf Research 176, S. 36-50. doi: 10.1016/j.csr.2019.02.010, 2019.
- Heyer, H. und Schrottke, K.: Aufbau von integrierten Modellsystemen zur Analyse der langfristigen Morphodynamik in der Deutschen Bucht: AufMod; gemeinsamer Abschlussbericht für das Gesamtprojekt mit Beiträgen aus allen 7 Teilprojekten. Unter Mitarbeit von TIB - Technische Informationsbibliothek Universitätsbibliothek Hannover und Technische Informationsbibliothek (TIB), 2013.
- Jensen, J.: Genesis of the German North Sea Coastline in Context of Sea Level Rise and Storm Surges over the past 1000 years. In: Ping Wang, Julie D. Rosati und Mathieu Vallee (Hg.): Coastal Sediments 2019. International Conference on Coastal Sediments 2019. Tampa/St. Petersburg, Florida, USA, 27 – 31 May 2019: WORLD SCIENTIFIC, S. 2345–2362, 2019.
- Jensen, J.; Arns, A.; Schüttrumpf, H.; Wöffler, T.; Häußling, R.; Ziesen, N.; Jensen, F.; von Eynatten, H.; Schindler, M. und Karius, V.: ZukunftHallig – Entwicklung von nachhaltigen Küstenschutz- und Bewirtschaftungsstrategien für die Halligen unter Berücksichtigung des Klimawandels. In: Die Küste 84. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau. S. 3-8, online verfügbar: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/105210>, 2016.
- Karius, V.; Hache, I. und von Eynatten, H.: Messung und Bewertung von Trübstoffkonzentrationen - Schlussfolgerungen für einen die Sedimentakkumulation optimierenden Küstenschutz auf Hallig Langeness. Abschlussbericht zum Verbundvorhaben Living CoastLab Halligen – Teil Hallig-D, Geowissenschaftliches Zentrum Abtl. Sedimentologie/Umweltgeologie, Georg-August Universität Göttingen, 2020.
- Krause, P.; Boyle, D. P. and Bäse, F.: Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. Advances in Geosciences, 5, 89–97, doi: 10.5194/adgeo-5-89-2005, 2005.
- Liubartseva, S.; Coppini, G.; Lecci, R. and Clementi, E.: Tracking plastics in the Mediterranean: 2D Lagrangian model, Marine Pollution Bulletin, Volume 129, Issue 1, doi: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.02.019>, 2018.
- Markl, G.: Minerale und Gesteine. Springer, 2015. ISBN: 978-3-662-44627-0, Berlin, 2015.
- Niehüser, S.; Arns, A. and Jensen, J.: Development of adaption strategies for barrier islands (Halligen) in the German Bight. European Geosciences Union General Assembly 2019. Vienna, Austria, 2019.
- Nolte, S.; Jensen, K. und Schulze, D.: Untersuchung der Sedimentablagerung auf unterschiedlich gemanagten und exponierten Flächen der Hallig Langeneß. Abschlussbericht. Universität Hamburg. Hamburg, 2018.
- Pietrzak, J.; Souza, A. J. and Huthnance, J.: Recent Change - North Sea: Suspended Particulate Matter and Turbidity. In: North Sea Region Climate Change Assessment. doi: 10.1007/978-3-319-39745-0, S. 109-116, 2016.

- Quante, M.; Colijn, F. and Sterr. H.: North Sea and Bounding Countries - A General Overview. In: North Sea Region Climate Change Assessment. doi: 10.1007/978-3-319-39745-0, S. 2-7, 2016.
- Quedens, G.: Die Halligen. Breklumer Verlag, Breklum, 1992.
- Ricklefs, K.; Arp, D. und Stage, M.: Zur zeitlichen Variabilität der Sedimentverteilung. In: Die Küste 83. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau. S. 77-102, online verfügbar: <https://henry.baw.de/handle/20.500.11970/101739>, 2015.
- Schindler, M.; Karius, V.; Arns, A.; Deicke, M. and von Eynatten, H.: Measuring sediment deposition and accretion on anthropogenic marshland - part II: The adaption capacity of the North Frisian Halligen to sea level rise. *Estuarine, Coastal, and Shelf Science*, 151, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2014.08.027>, 2014b.
- Schindler, M.; Karius, V.; Deicke, M. and von Eynatten, H.: Measuring sediment deposition and accretion on marshland - part I: Methodical evaluation and Development. *Estuarine, Coastal, and Shelf Science*, 151, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2014.08.029>, 2014a.
- Slangen, A. B. A.; Carson, M.; Katsman, C. A.; van de Wal, R. S. W.; Köhl, A.; Vermeersen, L. L. A. and Stammer, D.: Projecting twenty-first century regional sea-level changes. In: *Climatic Change* 124 (1-2), S. 317–332. DOI: 10.1007/s10584-014-1080-9, 2014.
- Soulsby, R.: Dynamics of marine sands. New York, USA: American Society of Civil Engineers, Publications Sales Department, 1997.
- Streif, H.: Sedimentary Record of Pleistocene and Holocene marine inundations along the North Sea coast of Lower Saxony, Germany *Quaternary International*, 112, 3-28, doi: 10.1016/S1040-6182(03)00062-4, 2004.
- 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. *Earth Surf Process Landforms* 28:739–755. doi: 10.1002/esp.495, 2003.
- Thonon, I.; de Jong, K.; van der Perk, M. and Middelkoop, H.: Modelling floodplain sedimentation using particle tracking, *Hydrol. Process.*, 21: 1402-1412. doi: 10.1002/hyp.6296, 2007.
- Urban, D. und Mayerl, J.: *Angewandte Regressionsanalyse: Theorie, Technik und Praxis*, 5, Springer VS, 2018.
- van Beusekom, J.: Recent Change - North Sea: Wadden Sea. In: North Sea Region Climate Change Assessment. doi: 10.1007/978-3-319-39745-0, S. 124-127, 2016.
- Warren, I. R. and Bach, H. K.: MIKE 21: a modelling system for estuaries, coastal waters and seas. In: *Environmental Software* 7 (4), S. 229–240. DOI: 10.1016/0266-9838(92)90006-P, 1992.

Teilstationäre Hochwasserschutzmaßnahmen als kurzfristige Strategie zum Schutz der nordfriesischen Halligen – Einsatztests unter praxisnahen Bedingungen und Berücksichtigung sozialer Bedürfnisse der Bewohner*innen

Verena Krebs, Nenja Ziesen, Theide Wöffler, Roger Häußling, Holger Schüttrumpf

Zusammenfassung

JENSEN ET AL. (2016) definierten zwei Zeitskalen, die bei der Entwicklung von Strategien für den Küstenschutz und das Küstenmanagement der schleswig-holsteinischen Halligen berücksichtigt werden müssen: (i) kurzfristige Schutzmaßnahmen für die Bewohner*innen, die sofort umgesetzt werden könnten, und (ii) langfristige Strategien zur Verbesserung der natürlichen Anpassungsfähigkeit an den Klimawandel.

Der vorliegende Beitrag beschäftigt sich mit der Frage, welche kurzfristigen Küstenschutzmaßnahmen und -strategien von den Hallig-Bewohnern*innen als sinnvoll erachtet werden, welche (technisch) umsetzbar sind und welche zentralen Aspekte dabei zu berücksichtigen sind. Hierzu wurde die Wirksamkeit kurzfristiger Maßnahmen im Labor unter Berücksichtigung von Vorschlägen bewertet, die im Vorläuferprojekt *ZukunftHallig*¹ gemeinsam mit den Hallig-Bewohnern*innen entwickelt wurden. Im Zentrum standen innovative, mobile Hochwasserschutzmaßnahmen, die bislang vorwiegend im Binnenbereich Anwendung finden. Zur Untersuchung der Anwendbarkeit auf den Halligen wurden zwei Anwendungsfälle betrachtet: das Verschließen von Stöpen im Ringdeich der Warften und der Objektschutz auf der Warft. Die Maßnahmen wurden im Labor unter fünf Belastungsfällen (Einstau, Anströmen, Wellenanprall, Überströmen, Treibgutprall) getestet und zusätzlich hinsichtlich der für die Hallig-Bewohner*innen elementaren Kriterien (Platzbedarf, Wartungsaufwand, Aufbauzeit etc.) bewertet.

Die Berücksichtigung sozialer Aspekte (Bedürfnisse, Erwartungen, Anforderungen seitens der Bewohner*innen) erfolgte durch einen Mixed-Method-Ansatz, bestehend aus qualitativen Interviews mit Bewohnern*innen und Zukunftswerkstätten (Ergebnisse aus *ZukunftHallig*), Experten*innen-Interviews und Gruppendiskussionen. Die Zusammenführung der hieraus hervorgehenden Anforderungen mit technischen Aspekten (technisch umsetzbare Maßnahmen) ermöglichten eine ganzheitliche soziotechnische Perspektive.

Alle untersuchten mobilen Hochwasserschutzmaßnahmen erwiesen sich unter den küstenspezifischen Belastungen generell als hydrodynamisch wirksam und die meisten der Maßnahmen erscheinen für den Einsatz auf den Warften geeignet. Sie verfügen über das Potenzial, als kurzfristige Maßnahmen den bestehenden Sturmflutschutz zu ergänzen, an Schwachstellen zu verbessern und so die Zeit bis zu einer langfristig notwendigen Warftverstärkung zu überbrücken. In Gruppendiskussionen auf den Halligen wurden die Ergebnisse der Laboruntersuchungen vorgestellt. Meinungsbilder hinsichtlich der Akzeptanz der Maßnahmen seitens der Bewohner*innen fielen heterogen – hallig- sowie warftspezifisch divers – aus.

¹ Das Vorhaben *ZukunftHallig* wurde vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) über das Kuratorium für das Küsteningenieurwesen (KFKI) gefördert (Laufzeit: 01.12.2011-30.11.2013).

Schlagwörter

Halligen, kurzfristige Küstenschutzstrategien, mobile Hochwasserschutzsysteme, teilstationäre Küstenschutzmaßnahmen, soziotechnischer Ansatz, partizipativer Technikgestaltungs- und Entwicklungsprozess

Summary

JENSEN ET AL. (2016) defined two time scales that have to be considered developing strategies for coastal protection and coastal management of the North Frisian Hallig islands: (i) short-term protection measures for the inhabitants, which could be implemented immediately, and (ii) long-term strategies to improve the natural adaptability of the islands to climate change.

This paper deals with the question which short-term coastal protection measures and strategies are considered reasonable by the islands' inhabitants, which ones are (technically) feasible and which central aspects have to be considered. For this purpose, the effectiveness of short-term measures was evaluated in the laboratory, considering suggestions that were developed together with the inhabitants in the predecessor project ZukunftHallig. The focus was on innovative, mobile flood protection systems, which have so far mainly been used in inland areas. To investigate the applicability of these systems, two application cases were considered: the closing of apertures in the ring dike of the dwelling mounds and the protection of objects on the dwelling mounds. The systems were tested in the laboratory under five load cases (pondage, upstream flow, wave impact, overflow, debris impact) and additionally evaluated with regard to criteria elementary for the islands' inhabitants (space requirement, maintenance effort, construction time, etc.).

The consideration of social aspects (needs, expectations, requirements on the part of the residents) was carried out by a mixed-method approach, consisting of qualitative interviews with residents and future workshops (results from ZukunftHallig), expert interviews and group discussions. The combination of the resulting requirements with technical aspects (technically feasible measures) enabled a holistic socio-technical perspective.

All investigated mobile flood protection measures proved to be hydrodynamically effective under the coast-specific loads and most of the measures appear to be suitable for the use on the Hallig islands. As short-term measures, they have the potential to complement existing storm surge protection, to improve at potentially weak points, and thus to bridge the time span until long-term reinforcements of the mounds are implemented. The results of the laboratory investigations were presented in group discussions on the Hallig islands. Opinions regarding the acceptance of the measures by the residents were heterogeneous - island and mound specific diverse.

Keywords

Hallig islands, short-term coastal protection strategies, mobile flood protection systems, semi-stationary coastal protection measures, socio-technical approach, participatory technology design and development process

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
2	Mobile Hochwasserschutzsysteme	2
2.1	Definition und Eigenschaften	2
2.2	Einsatzmöglichkeiten auf den Halligen.....	3

2.3	Betrachtete mobile HWS-Systeme.....	4
3	Vorgehen zur Bewertung der mobilen HWS-Maßnahmen.....	5
3.1	Bewertungskriterien	5
3.2	Laboruntersuchungen zur Betriebssicherheit mobiler HWS-Systeme	7
3.3	Einbindung der Hallig-Bewohner*innen durch Mixed-Method-Ansatz.....	11
3.3.1	Experten*innen-Interviews	11
3.3.2	Gruppendiskussionen	12
4	Ergebnisse.....	13
4.1	Auswertung der hydraulischen Belastungstests	13
4.2	Bewertung der mobilen HWS-Systeme.....	17
4.3	Auswertung der soziologischen Teilstudie	20
4.3.1	Experten*innen-Interviews	20
4.3.2	Gruppendiskussionen	23
4.3.3	Fazit: Anforderungskatalog.....	24
5	Fazit und Ausblick	27
6	Danksagung	28
7	Literaturverzeichnis	28

1 Einleitung

Der besondere Lebensraum der Halligen ist geprägt durch eine einzigartige und exponierte Lage mit Sturmflut- und Landunterrisiken, die sich im Kontext des Klimawandels verstärken werden. Bereits im Verbundprojekt „Entwicklung von nachhaltigen Küstenschutz- und Bewirtschaftungsstrategien für die Halligen unter Berücksichtigung des Klimawandels – *ZukunftHallig*“¹ wurde deutlich, dass – infolge regelmäßiger Überflutungen – auf den Halligen verbleibende Sedimentablagerungen zwar ein vertikales Anwachsen der Geländehöhen begünstigen, jedoch gleichzeitig ein stärkerer Trend im Anstieg der mittleren und extremen Wasserstände beobachtet werden kann (JENSEN ET AL. 2016). Es ist nicht davon auszugehen, dass die natürlichen Sedimentablagerungen die Anstiege dauerhaft kompensieren, so dass zum dauerhaften Schutz der Halligen langfristige wie auch kurzfristige Schutzmaßnahmen ergriffen werden müssen.

Um einen partizipativen Technikgestaltungs- und Entwicklungsprozess zu gewährleisten, ist eine interaktive Beteiligung der Bewohner*innen unabdingbar (vgl. u. a. WEYER 1997; ABELS & BORA 2004; HAUG ET AL. 2017). Mit einem solchen partizipativen Verfahren wird durch eine Integration der Bürger*innen in den Lösungsprozess das kommunikative, diskursive Handeln in den Mittelpunkt der Technikgestaltung gestellt – in diesem Fall der Gestaltung von Küstenschutzmaßnahmen. Vor allem, wenn räumliche Aspekte berührt werden und Bürger*innen selbst betroffen sind, bieten sich partizipative Verfahren an, um eine Perspektivenvielfalt und Akzeptanz späterer Anwender*innen zu erhalten (vgl. SCHMIDT 2003: 159; HAUG ET AL. 2017: 582 ff.).

In Zukunft-Workshops wurde im Jahr 2013 gemeinsam mit den Bewohnern*innen der Halligen ein umfangreicher Katalog möglicher Maßnahmen zum langfristigen Schutz und Erhalt der Halligen erarbeitet (HÄUBLING ET AL. 2016), im Anschluss fand eine Bewertung ausgewählter Maßnahmen aus wasserbaulicher Perspektive statt (WÖFFLER & SCHÜTTRUMPF 2016). Bei der Evaluation der einzelnen Maßnahmen waren insbesondere Faktoren wie die Wirkung auf den Wellenüberlauf an der Warft, die Betriebssicherheit, der Bauaufwand, der Einfluss auf das Landschaftsbild sowie der Naturschutz ausschlaggebend. Neben Warftverstärkungen und der Errichtung geeigneter Schutzräume, die als wirkungsvollste Maßnahme für den langfristigen Schutz der Halligbewohner*innen und -häuser identifiziert wurden, konnte auch für eine mobile Schutzmaßnahme („mobiler Deichschlauch“) eine hohe hydrodynamische Wirksamkeit gezeigt werden. Die Betriebssicherheit des sich automatisch aufbauenden, wassergefüllten Schlauchsystems wurde jedoch als fehleranfällig beurteilt (WÖFFLER & SCHÜTTRUMPF 2016). Die Bewertung der Maßnahmen fußte dabei auf numerischen Simulationen sowie theoretischen Betrachtungen, praktische Untersuchungen unter Berücksichtigung der hallig-spezifischen Bedingungen und zur Praktikabilität der Maßnahmen lagen bislang nicht vor.

Im Rahmen des Folgeprojekts *Living CoastLab Halligen*² wurden die vorausgegangenen theoretischen Betrachtungen nun um praktische Untersuchungen ergänzt. Während Warftverstärkungen als erforderliche Maßnahmen zum langfristigen Schutz der Halligen unstrittig sind und deren Umsetzung mit Beschluss des 30 Mio. € schweren Warftverstärkungs-

² Das Vorhaben *Living CoastLab Halligen* wurde ebenfalls vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) über das Kuratorium für das Küsteningenieurwesen (KFKI) gefördert (Laufzeit: 01.10.2016-30.09.2019).

programms bereits begonnen hat (MELUND SH, 02.02.2016), stehen hier mobile Hochwasserschutzsysteme (HWS-Systeme) als kurzfristige Schutzmaßnahmen im Fokus. Zentral sind dabei die Fragen: Verfügen mobile HWS-Systeme über das Potential, den Küstenschutz kurzfristig zu verbessern? Wie können sie existierende Schwachstellen verstärken, um die Zeit bis zu einer Warftverstärkung zu überbrücken? Im Rahmen der Untersuchungen wurden vier mobile HWS-Systeme in hydraulischen Modellversuchen unter realitätsnahen, küstenspezifischen Belastungen getestet und ihre Eignung für einen Einsatz auf den Halligen anhand acht verschiedener Kriterien bewertet.

Die begleitende soziologische Teilstudie forciert eine Verknüpfung zwischen wissenschaftlichen Konzepten und sozialen Bedürfnissen. Ziel ist die Entwicklung eines Anforderungskatalogs zur Bewertung technisch möglicher Maßnahmen unter Einbezug der Bedürfnisse, Erfahrungen und Erwartungen der Hallig-Bewohner*innen. Das Vorgehen folgt dabei der Leitfrage: Welche Küstenschutzmaßnahmen und -strategien werden von den Bewohnern*innen als sinnvoll erachtet, welche sind (technisch) umsetzbar und was sind zentral zu berücksichtigende Aspekte? Zudem werden aus soziologischer Perspektive erfahrungsgeneriertes Wissen sowie stattfindende Wandlungsprozesse betrachtet.

2 Mobile Hochwasserschutzsysteme

2.1 Definition und Eigenschaften

Mobile HWS-Systeme sind temporär aufgestellte, wasserdichte Konstruktionen aus Stahl, Holz, Leichtmetall, Kunststoff oder Gummi. Sie werden dort installiert, wo das Landschaftsbild nicht beeinträchtigt werden soll, wo kein Platz zur Verfügung steht oder Verkehrsbeziehungen beibehalten werden sollen. Gegenüber stationären HWS-Systemen (z. B. Deiche, Warften, Mauern) besteht ein erhöhtes Risiko: Da die Systeme erst im Hochwasser- bzw. Sturmflutfall manuell aufgestellt werden, besteht bereits vor dem eigentlichen Einsatz die Gefahr des Versagens von Mensch oder Technik. Zudem sind mobile Konstruktionen meist leichter als stationäre Systeme. Dadurch sind sie unter Umständen bei gleichen Abmessungen weniger widerstandsfähig. Es wird in planmäßige und notfallmäßige Systeme unterschieden (BWK, 2005).

Planmäßige (oder auch teil-stationäre) HWS-Systeme sind örtlich gebunden, da sie stationäre, feste Installationen benötigen. Sie bedürfen einer Genehmigung durch die örtlichen Aufsichtsbehörden, unterliegen deren Sicherheitskriterien und werden für die Anforderungen und Rahmenbedingungen des spezifischen Orts bemessen. Es wird in Standardsysteme (S-Systeme), welche sich durch häufigen Einsatz unter verschiedenen Bedingungen bewährt haben, und Sondersysteme (So-Systeme) unterschieden. Sondersysteme sollten nur errichtet werden, falls sie zuvor an einem Funktionsmodell unter gleichen Bedingungen wie denen des Einsatzes getestet worden sind (BWK, 2005).

Notfallmäßige HWS-Systeme (auch: Sandsackersatzsysteme) sind flexibel und ortsunabhängig. Primäres Einsatzgebiet ist der Katastrophenschutz, in besonderen Fällen kann eine stationäre Verwendung erfolgen, um z. B. Genehmigungszeiträume von planmäßigen Systemen zu überbrücken. Sie werden auf allgemeine Anforderungen bemessen und in verschiedenen Ausführungen angeboten.

BWK (2005) beschreibt Planung und Einsatz von mobilen HWS-Systemen und stellt Grundlagen zu Standsicherheitsnachweisen für die Systeme zusammen. Technische Anforderungen und Vorschriften zur Zertifizierung mobiler HWS-Systeme liegen in Deutschland jedoch im Gegensatz zum englischsprachigen Raum (z. B. FM APPROVALS 2014) bislang nur bedingt vor. Der EUROPAVERBAND HOCHWASSERSCHUTZ E.V. (2014) legt zwar Güte- und Prüfbestimmungen zur Klassifizierung mobiler Hochwasserschutzsysteme fest, als Kriterium zur Beurteilung der Leistungsfähigkeit der Anlagen wird jedoch lediglich die Dichtigkeit herangezogen. WAGENHUBER (2016) fordert eine Zertifizierung mit weitreichenderen Tests, die neben der abdichtenden Wirkung auch die Standsicherheit bei Treibgutprall, Strömung und Wellen sowie die Überströmbarkeit der Systeme sicherstellen. Ferner gilt es Qualität bzw. Lebensdauer und eine Mindestsicherheit gegen Vandalismus zu prüfen.

2.2 Einsatzmöglichkeiten auf den Halligen

Auf den Halligen bzw. insbesondere den Warften existieren verschiedene Möglichkeiten zum Einsatz mobiler HWS-Maßnahmen. Im Folgenden werden insbesondere zwei Einsatzorte betrachtet: Warften, die über einen Ringdeich mit Stöpen verfügen, können im Bereich der Stöpen durch mobile HWS-Systeme vor Wellenüberlauf geschützt werden (Abbildung 2-1). In diesem Bereich des Warftrandes setzt sich die zu erwartende Belastung der HWS-Systeme aus *Einzelwellen* und *Windlast* zusammen.



Abbildung 2-1: Möglicher Einsatz einer mobilen HWS-Maßnahme zum Verschluss einer Stöpe.

Der zweite Einsatzbereich befindet sich im zentralen Bereich der Warft: Hier können die mobilen HWS-Maßnahmen als Objektschutz eingesetzt werden und die Gebäude vor Wasser schützen, das in Folge von Wellenüberlauf auf die Warft gelangt (Abbildung 2-2). Neben der Windlast ist im zentralen Warftbereich vor allem mit den Lastfällen „*Einstau*“ und „*Anströmen*“ zu rechnen. In beiden Einsatzbereichen ist zusätzlich der Lastfall „*Treibgutprall*“ möglich.

H_s	Signifikante Wellenhöhe am Warftfuß	[m]
HW	Wasserstand	[m]
α	Böschungswinkel	[°]
R_c	Freibordhöhe	[m]
h_{Warft}	Wassertiefe auf der Warft	[m]
q	Wellenüberlaufe	[l/(s·m)]
h_k	Kronenhöhe	[m]
$h_{\text{Tür}}$	Höhe der Türschwelle	[m]

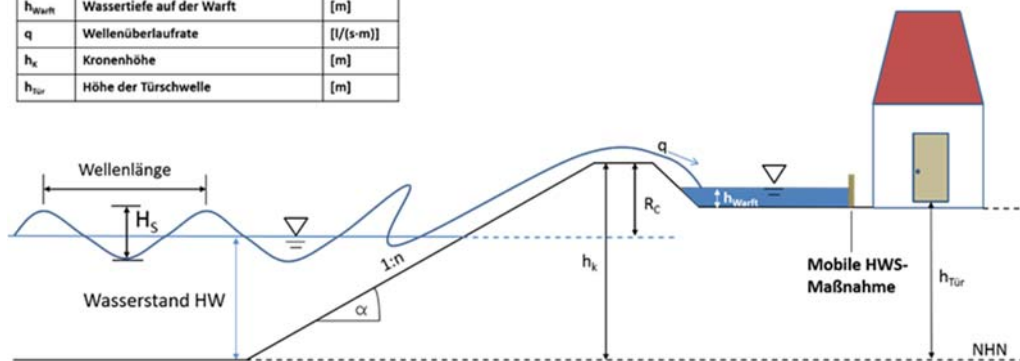


Abbildung 2-2: Mobile HWS-Maßnahme als Objektschutz im zentralen Warftbereich sowie geometrische und hydraulische Parameter an einer Warft (nach WÖFFLER & SCHÜTTRUPF 2017).

2.3 Betrachtete mobile HWS-Systeme

Im Rahmen des Projektes werden zwei planmäßige (*Aquawand* und *HWS-mobil*) sowie zwei notfallmäßige (*Hydrobaffle* und *Sandsackdeich*) HWS-Systeme hinsichtlich ihrer Einsatzfähigkeit auf einer Hallig bewertet. Bei den Systemen handelt es sich außer bei den Sandsäcken um Sonderlösungen, die von den herstellenden Unternehmen für hydraulische Tests kostenlos zur Verfügung gestellt wurden. Tabelle 2-1 stellt die wesentlichen Merkmale der untersuchten Systeme zusammen, Abbildung 2-3 zeigt die für Praxistests in einer Versuchsrinne des IWW eingesetzten Maßnahmen. Zusätzlich wurde auf Wunsch der Hallig-Bewohner*innen ein planmäßiges, vollautomatisches System (*Klappschott*) in die Bewertung aufgenommen. Hierzu fanden jedoch keine Praxistests statt.

Tabelle 2-1: Für den Einsatz auf einer Hallig-Warft betrachtete mobile HWS-Systeme (alle Angaben zur Aufbauzeit sind Herstellerangaben).

Planmäßige mobile HWS-Systeme	
Aquawand <i>Aquaburg Hochwasserschutz GmbH, Münster</i>	System aus Kunststoffplane, Edelstahlnetz, Edelstahlpfosten, alle Bestandteile miteinander verbunden und vor Ort in einer im Boden installierten Betonrinne versenkbar, Höhen von 0,7–2 m verfügbar, Aufbauzeit: 100 m in 45 Minuten (2 Personen)
HWS-mobil <i>HOWATEC GmbH, Siegen</i>	Montage der Stützen an im Boden betonierten Anschlussrühren, Einbau gewölbter, verzinkter Stahlbleche zwischen Stützen, Höhen von 0,64–1,3 m verfügbar (ab 0,7 m zusätzliche Abstützung erforderlich), Aufbauzeit: 100 m in ca. 7–12 h (2 Personen)
CHT-Klappschott <i>Chiemgauer Hochwasser Technik Hochwasserschutz Reitthaler GmbH, Bergen/Bernhaupten</i>	vollautomatischer Aufbau bei ansteigendem Wasserstand mittels Gasdruckzylinder, geeignet zur Abdichtung von Türen und Garageneinfahrten, bis 50 cm Einstauhöhe verfügbar Aufbauzeit: < 1 Minute
Notfallmäßige mobile HWS-Systeme	
Hydrobaffle <i>Hochwasserschutz Agentur, Frankfurt</i>	mit Wasser befülltes Schlauchsystem (gewebte Polyestermembran, PVC-beschichtet) mit internem Stabilisierungsglied, in Höhen von 0,31–2,44 m verfügbar, max.

	Wassertiefe (1,83 m) Aufbauzeit abhängig von Wasserförderleistung
Sandsackdeich	mit Sand gefüllte Kunststoffgewebesäcke, Höhe, Breite und Form variabel, für 100 m Länge (1 m Höhe) ca. 350 m ³ Sand erforderlich, Aufbauzeit: 100 m (0,5 m hoch) in 1 h (20 Personen)



Abbildung 2-3: Untersuchte mobile Hochwasser- bzw. Küstenschutzmaßnahmen während der Testphase in der wasserbaulichen Versuchshalle.

3 Vorgehen zur Bewertung der mobilen HWS-Maßnahmen

3.1 Bewertungskriterien

Die Bewertung der mobilen HWS-Systeme hinsichtlich ihrer Einsatzfähigkeit zur Verbesserung des Küstenschutzes auf den Halligen erfolgt anhand von acht Kriterien (Tabelle 3-1). Für den Einsatzfall zum *Verschließen der Stöpen* werden jeweils Systeme mit 20 m Breite und 1 m Schutzhöhe verglichen. Für den *Objektschutz* wird ein Haus mit drei zu verschließenden Türöffnungen betrachtet. Ziel ist ein möglichst objektiver Vergleich der Maßnahmen, wozu sie für jedes Kriterium analog zu WÖFFLER (2017) auf einer Skala von 0 (schlechteste) bis 1 (beste Bewertung) bewertet werden. Die Gesamtbewertung erfolgt durch Bildung des geometrischen Mittels, sodass eine Maßnahme, die in einem Kriterium mit 0 Punkten bewertet wird, eine Gesamtbewertung von 0 Punkten erhält. Aufgrund ihrer hohen Bedeutung gehen die *hydrodynamische Wirksamkeit* sowie die *Betriebssicherheit* jeweils mit doppelter Gewichtung in die Bewertung ein.

Tabelle 3-1: Bewertungskriterien und -schema zum Vergleich der mobilen HWS-Systeme.

		Bewertung				
		0	0,25	0,5	0,75	1
Bewertungskriterien	Hydrodynamische Wirksamkeit (1) Reduzierung Wassertiefe auf Warft (2) Leckagerate	<0% sehr hoch	1–25% hoch	26–50% mittel	51–75% niedrig	76–100% keine
	Betriebssicherheit	Mittelwert der Bewertungen aller Gefährdungsszenarien (vgl. Tabelle 3-2)				
	Bauaufwand System-, Bau- + Planungskosten [€/m ²]	>5.000	2.000–5.000	1.000–2.000	500–1.000	<500

	Landschaftsbild/ Naturschutz	hohe Beeinträchtigung		niedrige Beeinträchtigung		keine
	Wartungsaufwand (in Abbildung 3-1 erreichte Punktzahl)	sehr hoch (0–5)	hoch (6–10)	mittel (11–15)	niedrig (16–20)	sehr niedrig (>20)
	Bereitstellungszeit [h] für die zwei An- wendungsfälle	>20 h (zu groß)	5–20 h (groß)	1–5 h (mittel)	0–1 h (niedrig)	keine
	Lagerung Platzbedarf in [m ³] (1) Verschluss der Stöpen (2) Objektschutz	>20 m ³ >10 m ³	10–20 m ³ 5–10 m ³	5–10 m ³ 3–5 m ³	0–5 m ³ 0–3 m ³	–
	Akzeptanz	Bewertung erfolgt durch soziologische Teilstudie (vgl. Abschnitt 4.3)				

Die Bewertung der *hydrodynamischen Wirksamkeit* erfolgt auf Grundlage des in WÖFFLER & SCHÜTTRUMPF (2017) vorgeschlagenen Sicherheitskriteriums: die maximale, während eines Sturmflutereignisses auftretende Wassertiefe an den Türschwellen der Warft ($h_{Warft,max}$). Hierzu wird beispielhaft die Süderhörn-Warft auf Langeneß betrachtet, auf der sich im Osten zwei niedrig gelegene Toreinfahrten befinden, die durch mobile HWS-Maßnahmen verschlossen werden können. Der Einbau der mobilen HWS-Systeme wird durch eine Erhöhung der Warft im Bereich der Stöpen berücksichtigt und die Maßnahmen gehen als Kronenmauer in die Formeln zur Berechnung des Wellenüberlaufs (gemäß EUROTOP 2016) ein. Die veränderten Wellenüberlauraten werden in ein numerisches Modell (Software: *Delft3D*, für Modellaufbau siehe WÖFFLER & SCHÜTTRUMPF 2017) der Warft als Randbedingungen eingesteuert, der Verlauf des Wasserstands an den Türschwellen ausgewertet und mit dem Wasserstand des Referenzzustands (Stöpen unverschlossen) verglichen. Für den Objektschutz ist die Dichtigkeit der Maßnahmen (Leckagerate) entscheidend, die Beurteilung erfolgt hier qualitativ aus den Ergebnissen der Laborversuche (Kapitel 3.2).

Die Beurteilung der *Betriebssicherheit* erfolgt anhand der Bewertung verschiedener Gefährdungsszenarien (nach BWK 2005) unter Berücksichtigung ihrer Eintrittswahrscheinlichkeit sowie der Vulnerabilität des Systems gegenüber der jeweiligen Gefährdung (Tabelle 3-2). Zur Ermittlung der Vulnerabilität der Systeme erfolgt die Durchführung von Belastungstests an den Maßnahmen (vgl. Abschnitt 3.2 und 4.1).

Tabelle 3-2: Betrachtete Gefährdungsszenarien und Vorgehen zur Bewertung der *Betriebssicherheit*.

Gefährdungsszenarien		Bewertung				
<u>Äußere Einwirkungen</u> : Treibgutanprall (A), Schiffsanprall (B), Fahrzeuganprall (C), Überströmen (D) <u>System</u> : Geschiebe/Verlegung (E), Korrosion/Alterung (F), technischer Ausfall (G) <u>Sicherheit</u> : Sabotage/Diebstahl (H) <u>Logistik</u> : Aufbau/Abbau (I), Transport (J)		Vulnerabilität				
		<u>HWS-System</u>				
		gering	mittel	hoch		
		Exposition	Marginal	1	1	0,75
			Gering	1	0,75	0,5
			Mittel	0,75	0,5	0,25
Hoch	0,5		0,25	0		

Eine Beeinträchtigung von *Landschaftsbild* und *Naturschutz* ist durch mobile HWS-Systeme nur sehr geringfügig gegeben, die Bewertung wird daher an dieser Stelle nicht weiter erläutert. Zur Beurteilung des *Wartungsaufwands* wird eine einmal jährlich stattfindende Überprüfung betrachtet, die Bewertung der Systeme erfolgt dabei nach Abbildung 3-1.

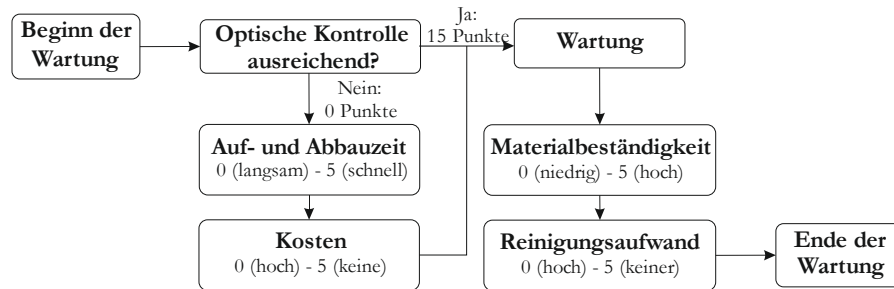


Abbildung 3-1: Fließdiagramm zur Bewertung des *Wartungsaufwands*, Punkte sind zu summieren.

3.2 Laboruntersuchungen zur Betriebssicherheit mobiler HWS-Systeme

Zur Bewertung der Betriebssicherheit unter möglichst realitätsnahen Bedingungen fanden Versuche zur hydraulischen Belastbarkeit der mobilen HWS-Systeme in einer Strömungsrinne in der wasserbaulichen Versuchshalle des IWW statt (Abbildung 3-2). Insgesamt wurden die Maßnahmen fünf Belastungen unterzogen: *Einstau*, *Anströmen*, *Überströmen*, *Einzelwellen* und *Treibgutanprall* (vgl. Tabelle 3-3).

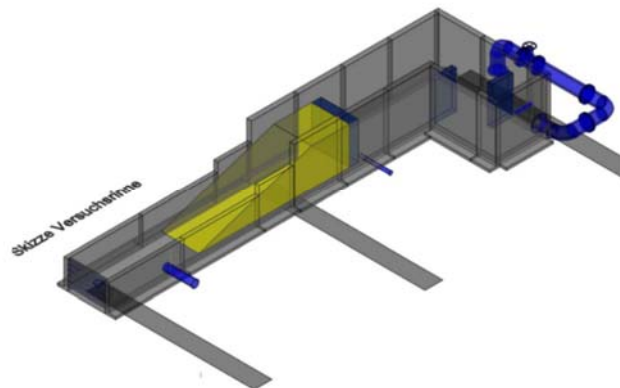


Abbildung 3-2: Versuchstand in der wasserbaulichen Versuchshalle des IWW.

Die Maßnahmen werden für die Untersuchungen im Bereich des Deichfußes eingebaut (Abbildung 3-3). Die Strömungsrinne verfügt über 2,00 m lichte Breite und der Deich über ein überströmsicheres Deckwerk. Der Zufluss in den Einlaufbereich kann mittels eines elektronisch steuerbaren Schiebers reguliert werden, übersteigt der Wasserstand im Einlaufbereich die Kronenhöhe des Deiches (2,00 m) fließt das Wasser über die Deichböschung in den Versuchstand, an dessen Ende die mobilen HWS-Systeme eingebaut sind. Ein Bodenablauf hinter der Maßnahme dient dazu, austretendes oder überströmendes Wasser abzuführen. Vor der Maßnahme ist ein seitlicher Ablauf vorhanden, der für die Lastfälle „*Einstau*“ und „*Überströmen*“ mit einem Deckel verschlossen wird. Für den Lastfall „*Einzelwellen*“ wird das Wasser durch eine Klappe bis zu 35 cm oberhalb der Deichkrone zurückgestaut, bevor die mit Elektromagneten gehaltene Klappe schlagartig geöffnet wird (Abbildung 3-4).

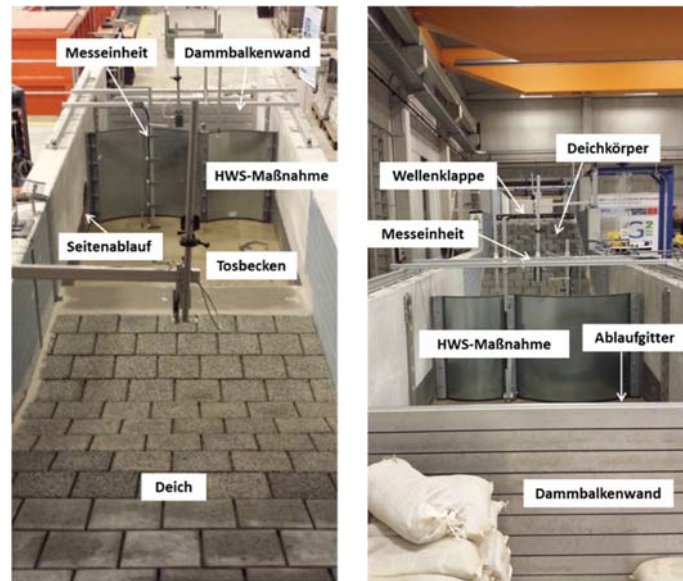


Abbildung 3-3: Versuchstand (links: Blickrichtung von Deichkrone, rechts: polderseitiger Blick).



Abbildung 3-4: Wellenklappe in geschlossenem (links) und geöffnetem (rechts) Zustand.

An den HWS-Systemen werden folgende Messgrößen aufgezeichnet:

- Druck in fünf verschiedenen Höhen,
- Strömungsgeschwindigkeit
- und Pegelstand jeweils vor dem HWS-System sowie
- die Auslenkung des HWS-Systems.

Die Druckmessung erfolgt durch fünf Druckmessdosen (Messbereich: 0 bis 400 mbar). Diese sind senkrecht an einer Stange im Abstand von 0,25 m montiert, die unterste Dose befindet sich 0,024 m über dem Rinnenboden. Die Anströmgeschwindigkeit wird auf Höhe der untersten Druckmessdose über einen Messflügel (Modell *Mini Water6 Micro*) bestimmt. Die Bestimmung des Pegelstandes erfolgt für Testphase 1 bis 3 über eine Ultraschallsonde, aufgrund der zu erwartenden schnellen Veränderung der Wasseroberfläche wird in Testphase 4 ein Wellenpegelmesser *GHM Wave Height Meter* verwendet.



Abbildung 3-5: Anordnung der Messgeräte.

Die Verschiebung bzw. Rotation der HWS-Systeme wird mit Hilfe eines Laser-Distanz-sensors gemessen (Abbildung 3-6). Der Laser ist hinter der Maßnahme angebracht und misst die Verschiebung Δx . Die Versuche werden zusätzlich durch drei Videokameras auf-gezeichnet.

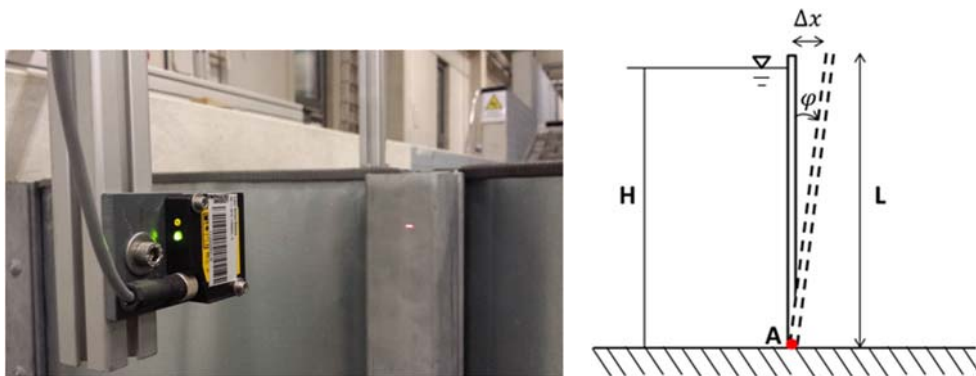


Abbildung 3-6: Laser-Distanzsensoren zur Bestimmung der Verschiebung bzw. Rotation.

Testphase 5 erfolgt mit einem Anprallkörper aus Holz (Abbildung 3-10). Mithilfe der an-gebrachten Markierungen kann aus den Videoaufnahmen die Geschwindigkeit des Anprall-körpers ermittelt werden. Während der Anpralltests ist das HWS-System eingestaut, der Anprallkörper wird auf die Wasseroberfläche gebracht und mit einem Seil gegen die insta-bilste Stelle der Maßnahme gezogen. Tabelle 3-3 stellt die Versuchsbedingungen für alle Testphasen zusammen. Abbildung 3-7 bis Abbildung 3-10 zeigen Eindrücke der fünf Test-phasen an den verschiedenen HWS-Systemen.

Tabelle 3-3: Versuchsbedingungen für die fünf Testphasen.

Testphase	Versuchsbedingungen
1: Einstau 	▪ linearer Anstieg des Wasserspiegels ▪ bis zum Versagen oder Volleinstau ▪ je drei Wiederholungen

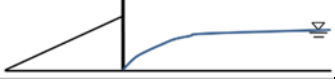
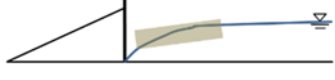
2: Anströmen 	▪ senkrechte Anströmung ▪ Steigerung des Abflussvolumens in fünf Stufen von 820 l/s auf 1.730 l/s ▪ Belastungsdauer je Stufe: 3 Minuten
3: Überströmen 	▪ max. Überströmhöhen von 5–26 cm ▪ Steigerung der Überströmhöhen für <i>HWS-mobil</i> und <i>Aquawand</i> bis OK Versuchsrinne, für <i>Sandsackdeich</i> und <i>Hydrobaffle</i> bis zum Versagen
4: Einzelwellen 	▪ je acht Schwallwellen mit bis zu 35 cm Schwallhöhe ▪ vor Belastung ca. 20 cm Einstauhöhe
5: Treibgutprall 	▪ nur für <i>HWS-mobil</i> und <i>Aquawand</i> durchgeführt ▪ 80 kg Anprallkörper, Anprallgeschwindigkeit bis zu 2,1 m/s ▪ 20 cm Freibordhöhe während Versuch ▪ je fünf Wiederholungen



Abbildung 3-7: Testphase 1 und 2 – Einstau und Anströmen an *HWS-mobil* und *Aquawand*.



Abbildung 3-8: Testphase 3 – Überströmen von *Sandsackdeich*, *HWS-mobil* und *Aquawand*.



Abbildung 3-9: Testphase 4 – Wellenanprall auf *HWS-mobil*, *Hydrobaffle* und *Aquawand*.



Abbildung 3-10: Anprallkörper (links) und Anprallversuch an der *Aquamwand* (rechts).

3.3 Einbindung der Hallig-Bewohner*innen durch Mixed-Method-Ansatz

Das soziologische Vorhaben setzte sich insgesamt aus den folgenden Bestandteilen zusammen:

- qualitative Analyse der Erhebungen und des Datenmaterials aus dem Vorgängerprojekt *ZukunftHallig* zur Filtrierung zentraler Aspekte für Küstenschutzmaßnahmen (Analyse von qualitativen Interviews und Zukunftswerkstätten mit Bewohnern*innen),
- qualitative Experten*innen-Befragung zu Wandlungsprozessen auf den Halligen sowie zu bestehenden und potentiellen Küstenschutzmaßnahmen,
- Gruppendiskussionen mit den Hallig-Bewohnern*innen und Experten*innen, um verschiedene Perspektiven bezüglich einer Evaluation getesteter Hochwasserschutzsysteme einzubeziehen.

Anschließend wurden die wissenschaftlichen Erkenntnisse zu den getesteten Maßnahmen, zu der Akzeptanz der Bevölkerung und der Übertragbarkeit zusammengeführt. Ziel des Vorgehens war ein Anforderungskatalog, der zentrale Aspekte (Bedürfnisse, Erwartungen, Akzeptanz) zu Küstenschutzmaßnahmen beinhaltet.

Der auf den lokalen Kontext zugeschnittene Ansatz ermöglichte eine Berücksichtigung sozialer Aspekte (Bedürfnisse, Erwartungen, Anforderungen) und Zusammenführung mit technischen Aspekten (technisch umsetzbare Maßnahmen), im Rahmen einer Evaluation seitens des Wasserbauingenieurwesens, im Sinne einer ganzheitlichen interdisziplinären, soziotechnischen Perspektive.

Im Folgenden werden als zwei zentrale Facetten des soziologischen Vorhabens die durchgeführten Experten*innen-Interviews und die Gruppendiskussionen herausgegriffen und zentrale Erkenntnisse dargestellt.

3.3.1 Experten*innen-Interviews

Die Auswahl der Experten*innen für die qualitativen Interviews erfolgte im Hinblick auf deren vorhandene Expertise vor Ort, da diese, als Teil des zu untersuchenden Handlungsfeldes, über repräsentative, besondere Informationen verfügen (vgl. MEUSER 1989; MEUSER & NAGEL 2005). So leben die Interviewten auf einer der Halligen und/oder sind diesen aus beruflichen Gründen, beispielsweise durch eine Tätigkeit im Küstenschutz, stark verbunden.

Insgesamt wurden 18 Experten*innen angefragt und es konnten 16 Interviews realisiert werden. Eine angefragte Person hat eine Gesprächsteilnahme verweigert, bei einer Person

konnte das Interview aufgrund technischer Schwierigkeiten (fehlender Telefonanschluss) nicht umgesetzt werden. Unter Rücksprache mit Vertretern*innen der Halligen sowie Projektpartnern*innen wurde der folgende Experten*innen-Kreis ausgewählt: Sieben Gemeindevorteiler*innen der Halligen; fünf Vorarbeiter*innen im Küstenschutz; vier Personen aus der Verwaltung und/oder Projekten zum Biosphärenreservat der Halligen.

Die Experten*innen wurden zweimalig via Email Anfang sowie Mitte November 2017 angefragt. Bei ausbleibender Rückmeldung wurde telefonisch Kontakt aufgenommen. An diese Kontakt- und Akquisezeit schloss dann die Interviewphase ab Dezember 2017 an. Die Interviews wurden telefonisch durchgeführt und aufgezeichnet, wobei die Zustimmung zur Gesprächsaufzeichnung zu Anfang des Interviews abgefragt wurde, unter Zusicherung eines Schutzes der Daten durch eine vertrauliche Behandlung sowie eine Anonymisierung. Insgesamt fanden die Telefoninterviews in einem Zeitfenster von circa 26 Minuten bis zu einer Stunde statt.

3.3.2 Gruppendiskussionen

Um eine Partizipation seitens der Hallig-Bewohner*innen zu gewährleisten, wurden zwei Gruppendiskussionen auf der Hallig Hooge (27.08.2018) und der Hallig Langeneß (28.08.2018), in enger Kooperation mit den dortigen Vertretern*innen, initiiert.

Als eine Erhebungsmethode der empirischen Sozialforschung bieten Gruppendiskussionen eine Möglichkeit, um thematische Aussagen, Meinungen, Sichtweisen und Einstellungen, aber auch die Kommunikation, Geschichten und Selbstrepräsentationen in einem kulturellen sowie kollektiven Kontext zu erfassen (vgl. MÄDER 2013: 24). Zentrale Charakteristiken von solch qualitativen Methoden sind die *Offenheit*, *Kommunikativität*, *Naturalisizität* und *Interpretativität* (vgl. LAMNEK 1995: 17 ff.). Gruppendiskussionen geben zudem einen Einblick in die Konstitution und Konstruktion von Wirklichkeit sowie in den Prozesscharakter von Alltagsinteraktionen (vgl. KUTSCHER 2002: 59). Dabei sind Meinungsbildungsprozesse und Gruppendynamiken – nachvollziehbar anhand des Diskussionsverlaufs – von zentralem Interesse (vgl. LAMNEK 2005: 69-77) sowie die Rekonstruktion von deutungs- und handlungsgenerierenden Strukturen (vgl. MRUCK UND MEY 2005: 7). So stellt die Gruppendiskussion eine Erhebungsmethode dar, um Fragestellungen sowie sensible bzw. komplexe Themen aus der Perspektive zentraler Beteiligter zu untersuchen oder neue Forschungsgebiete zu explorieren (vgl. MÄDER 2013: 29). Entsprechend ist hiermit eine Gleichwertigkeit sowie Ergänzung in Mixed-Methods-Ansätzen – mit (Experten*innen-) Interviews (vgl. KUTSCHER 2002: 75) und/oder (teilnehmenden) Beobachtungen, aber auch mit quantitativen Ansätzen – gegeben (vgl. MÄDER 2013: 29 ff.).

Da die Entstehung eines Meinungsbildes – vor dem Hintergrund eines geteilten Erfahrungskontexts und auf Basis eines Austauschs bzw. der Rekonstruktion eines Diskussionsverlaufs – zu sensiblen und komplexen Themen mittels Gruppendiskussionen erfassbar ist, wurden entsprechend der hier dargelegten Methodik die Gruppendiskussionen auf der Hallig Hooge und der Hallig Langeneß durchgeführt und ausgewertet. Besonders der Aspekt, dass hiermit eine Partizipation von Betroffenen gewährleistet sein kann, begründet den Einbezug dieses Erhebungsinstruments in das Forschungsdesign. Zudem erscheint vorteilhaft, dass es sich bei den Teilnehmern*innen um eine *Realgruppe* handelt und eine Übertragbarkeit auf weitere Prozesse gegeben ist.

Für die geplanten Diskussionen auf der Hallig Hooge und der Hallig Langeneß wurden Flyer als Einladung und Information für die Bewohner*innen erstellt sowie in enger Kooperation mit den Vertretern*innen der Halligen abgestimmt und in Umlauf gebracht.³

Zu Beginn der Gruppendiskussionen wurden das *Projekt Living CoastLab Halligen* vorgestellt und Bezüge zu dem Vorgängerprojekt *ZukunftHallig* seitens der Soziologin Nenja Ziesen hergestellt, mit einem kurzen Rekurs auf zentrale Ergebnisse. Dabei wurde auch um eine kritische Diskussion gebeten. Zudem wurde betont, dass jegliche Anmerkungen, Überlegungen und Kritikpunkte offen geäußert werden können. Anschließend wurde der Ablauf der Gruppendiskussion erläutert: Zunächst stellte die Geologie aus Göttingen, vertreten durch Ingo Hache, Ergebnisse zur Sedimentation vor. Im Anschluss präsentierte Theide Wöffler, als Vertreter des *Instituts für Wasserbau und Wasserversorgung (IWW)* der *RWTH Aachen University*, Naturmessungen auf Hooge sowie mobile Hochwasserschutzsysteme, die in der Versuchshalle des *IWW* getestet wurden. Nach Verständnisfragen zu den jeweiligen Vorträgen konnten kritische Aspekte diskutiert werden.

Insgesamt dienten beide Vorträge als *Grundreiß* und Grundlage für die folgende Diskussion. Abschließend wurde um eine Bewertung gebeten, bezüglich zentraler Aspekte, die Schutzmaßnahmen auf den Halligen erfüllen sollten, sowie der vom *IWW* vorgestellten Maßnahmen. Dabei wurde ein eigens erstelltes Bewertungssystem erläutert und auf die seitens der Soziologie durchgeführten Interviews im November/Dezember 2017 mit Experten*innen verwiesen, aus denen die benannten zentralen Aspekte hervorgingen. So wurde für eine explizite Bewertung durch die Bewohner*innen eine Tabelle erstellt, welche eine Bewertung der Maßnahmen anhand der, in den Interviews bestätigten, zentralen Aspekte gewährleistet. Zudem wurden Aspekte in die Tabelle aufgenommen, die für die Testung der Maßnahmen seitens des *IWW* bedeutsam sind.⁴ Den Bewohnern*innen wurde die Möglichkeit gegeben, jeder Maßnahme für jeden Aspekt einen Wert von 0 bis 4 zuzuordnen (0 = Der Aspekt wird gar nicht erfüllt; 1 = Der Aspekt wird eher nicht erfüllt; 2 = Der Aspekt wird teils erfüllt und teils nicht; 3 = Der Aspekt wird eher erfüllt; 4 = Volle Erfüllung des Aspektes). Während der abschließenden Bewertungsphase konnten die Bewohner*innen weiterhin frei miteinander diskutieren sowie den anwesenden Experten*innen Fragen stellen.

4 Ergebnisse

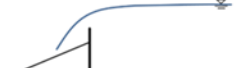
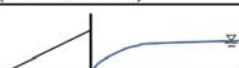
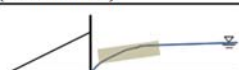
4.1 Auswertung der hydraulischen Belastungstests

Im Rahmen der Modellversuche wurden die mobilen HWS-Maßnahmen hinsichtlich ihrer Vulnerabilität gegenüber verschiedenen Belastungen bzw. Gefährdungsszenarien untersucht. Die Ergebnisse der Modellversuche sind in Tabelle 4-1 zusammengefasst.

³ An dieser Stelle gilt besonderer Dank den Kooperationspartnern*innen auf den Halligen, für die gegenüber der Soziologie entgegengebrachte Offenheit und Unterstützung.

⁴ Zu den Aspekten, die aus der Sicht des Wasserbauingenieurwesens relevant sind, gehören: Hydrodynamische Wirksamkeit, Betriebssicherheit, geringer Wartungsaufwand und geringer Zeitaufwand/Bereitstellungszeit.

Tabelle 4-1: Ergebnisse der Belastungstests für die untersuchten mobilen HWS-Maßnahmen⁵, ein grüner Haken bedeutet, dass das System die Belastung unbeschadet überstanden hat, die Zeile darunter gibt die maximal getestete Belastung an, ein Kreuz steht für ein Versagen der Maßnahme während der Belastungstests, ein Kreis für eine eingeschränkte Leistungsfähigkeit.

	Aquawand	Hydrobaffle	HWS-mobil	Sandsackdeich
				
 Testphase 1: Einstau (erforderliches Freibord)	✓ Volleinstau (100 mbar)	○ 10 % Freibord erforderlich	✓ Volleinstau (100 mbar)	○ Volleinstau, hohe Leckagerate
 Testphase 2: Anströmen (Anströmvolumina)	✓ $0,85 \text{ m}^3 / (\text{s} \cdot \text{m})$	✓ $0,85 \text{ m}^3 / (\text{s} \cdot \text{m})$	✓ $0,85 \text{ m}^3 / (\text{s} \cdot \text{m})$	✓ $0,85 \text{ m}^3 / (\text{s} \cdot \text{m})$
 Testphase 3: Überströmen (Überströmhöhe)	✓ mind. 0,15 m	✗ Überströmung bei Kombination mehrerer Elemente möglich	✓ mind. 0,11 m	○ < 0,16 m, danach Versagen
 Testphase 4: Einzelwellen (Schwallhöhe)	✓ 0,35 m	✗ Wellenanprall stabil, Versagen inf. anschl. Überströmung	✓ 0,35 m	✗ Wellenanprall stabil, Versagen inf. anschl. Überströmung
 Testphase 5: Anprall (max. Impuls)	✓ $\approx 160 \text{ (kg} \cdot \text{m) / s}$	✗ nicht durchgeführt, da Versagen erwartbar	✓ $\approx 160 \text{ (kg} \cdot \text{m) / s}$	✗ nicht durchgeführt, da Versagen erwartbar

Für die Maßnahmen *Aquawand* und *HWS-mobil* ist ein Einstau (Testphase 1) bis zur Oberkante der Maßnahme möglich, ohne dass es zu einer erhöhten Leckage durch die Maßnahmen kommt. Leichte Undichtigkeiten zeigen sich hier jedoch im unteren Bereich der Wand- und Stützenanschlüsse sowie für das System *HWS-mobil* zwischen Blech und Boden. Auch der *Sandsackdeich* hält einem Volleinstau stand, allerdings ergeben sich hier im Vergleich deutlich höhere Sickerwassermengen. Der *Hydrobaffle* konnte über die vom Hersteller angegebene Einstauhöhe hinaus belastet werden, ohne dass es zu einem Versagen kam. Eine Freibordhöhe von 10–20 % der Gesamthöhe ist jedoch in jedem Fall einzuhalten: Bei einer weiteren Erhöhung des Wasserspiegels nimmt die Lageänderung des *Hydrobaffle* derart zu, dass dieser durch Wegrollen plötzlich versagt. Auch beim *Hydrobaffle* zeigten sich Undichtigkeiten an den Seitenwänden der Betonrinne.

Einer Anströmung (Testphase 2) konnten alle Maßnahmen widerstehen, sofern es nicht in ihrer Folge zu einer zu starken Erhöhung des Wasserspiegels oder einer Überströmung kam, die zumindest für *Sandsackdeich* und *Hydrobaffle* eine kritische Belastung darstellen können (vgl. Testphase 1 und 3).

⁵ Für den Sandsackdeich wurden drei verschiedene Aufbauten getestet. Gezeigt sind hier nur die Ergebnisse des stabilsten Aufbaus. Entscheidend insbesondere für den Widerstand während Überströmung ist die Lage der oberen Sandsackreihen, die Aufbauten mit einer Längsausrichtung der Sandsäcke waren stabiler, erfordern jedoch auch eine höhere Anzahl an Sandsäcken.

Eine Überströmung (Testphase 3) war für *Aquawand* und *HWS-mobil* ohne Beeinträchtigung der Funktionstüchtigkeit möglich. Eine Erhöhung der maximal getesteten Überfallhöhen (vgl. Tabelle 4-1) war im Versuchsaufbau nicht möglich, da das Wasser sonst über die seitlichen Wände der Versuchsrinne geströmt wäre. Die Auswertung der Videoaufnahmen sowie der Daten des Laserscanners zeigt, dass beide Maßnahmen während der Überströmung weder in Schwingung geraten noch die Auslenkung der Mittelstützen durch die Überströmung verstärkt wird. Beim Überströmen des *Hydrobaffle* kam es durch eine Drehbewegung zum schlagartigen Versagen und damit einem plötzlichen Wegfall der wasser-rückhaltenden Funktion. Die Kombination aus zwei hintereinander gereihten *Hydrobaffle* hat hingegen einer Überströmhöhe von 0,26 m standhalten können.

Während der Wellenanprallversuche konnte der Hydrobaffle den Belastungen des Wellenanpralls standhalten, die anschließend stattfindende Überströmung ließ die Maßnahme jedoch versagen. Das gleiche Verhalten ließ sich bei der Schwallwellenbelastung des Sandsackdeichs beobachten. Die Maßnahmen *HWS-mobil* und *Aquawand* hielten dem Wellenanprall ohne Probleme stand. Während der dynamischen Belastung ließ sich aus der Distanzmessung an der Mittelstütze eine Auslenkung der Systeme von bis zu 10 mm (*HWS-mobil* ohne zusätzliche Abstützung) und bis zu 20 mm (*Aquawand*) beobachten (Abbildung 4-1), nach der Belastung kehrten beide Systeme wieder in ihren Ausgangszustand zurück und zeigten keine Beeinträchtigung der Gebrauchstauglichkeit.

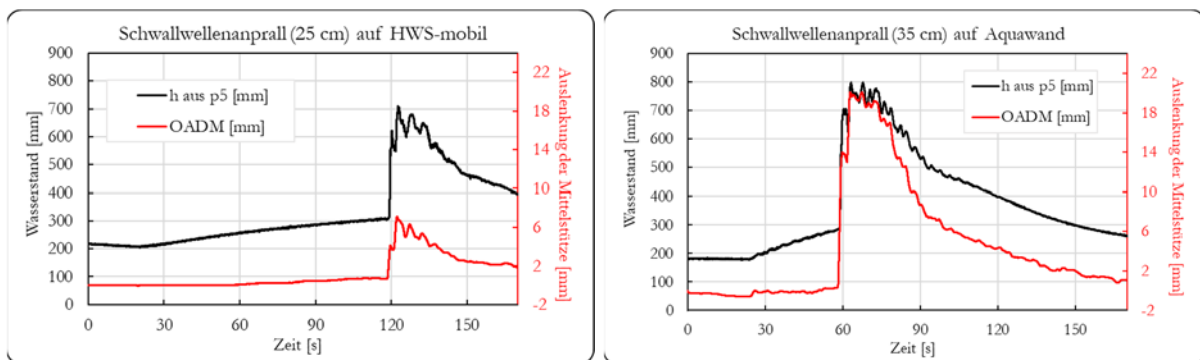


Abbildung 4-1: Verlauf des Wasserstands unmittelbar vor dem System und Auslenkung der Mittelstütze während Wellenanprall auf die Maßnahmen *HWS-mobil* (ohne zusätzliche Abstützung, links) und *Aquawand* (rechts).

Die durchgeführten Anpralltests verursachten bei der Maßnahme *HWS-mobil* eine Lageveränderung der Stütze, die sich mit jedem Anprall vergrößerte (bis zu 20 mm, vgl. Abbildung 4-2). Traf der Anprallkörper anstatt der Stütze auf die gebogenen Stahlbleche, wurde der Anprall gedämpft, hier kam es jedoch teils zu irreversiblen Verformungen (Beulen im Blech, Abbildung 4-2 rechts). Weder die Standsicherheit noch die Funktionstüchtigkeit des Systems wurden durch die Verschiebungen und Verformungen beeinträchtigt. Auch an der *Aquawand* führten die Anpralltests zu einer deutlichen Verschiebung der Stütze (bis zu 10 cm). Traf der Anprallkörper anstelle der Stütze auf die Plane, so kam es an einer Stelle zu einem Riss im Stahlnetz, dies hatte jedoch kein Versagen der Maßnahme zur Folge. Auch nach den Anpralltests verlief ein erneuter Auf- und Abbau beider Systeme ohne Schwierigkeiten und beide Systeme waren weiterhin funktionstüchtig.

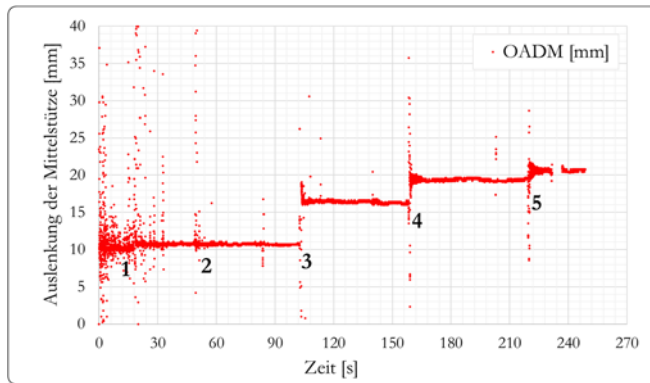


Abbildung 4-2: Auslenkung der Mittelstütze infolge Treibgutprall an der Maßnahme *HWS-mobil* (ohne zusätzliche Abstützung) und Verformungen am Stahlblech nach Abschluss der Anprallversuche.

Für die Maßnahme *HWS-mobil* kann eine erhöhte Stabilität durch den Einbau einer zusätzlichen Abstützung (vom Hersteller ab einer Höhe von 0,7 m empfohlen) erreicht werden. Alle Testphasen wurden mit und ohne Zusatzstütze durchgeführt. Das System ohne Zusatzstütze wurde zwar stärker ausgelenkt, diese Auslenkung hatte jedoch keine Auswirkungen auf die Standsicherheit. Das System ist somit auch ohne die Zusatzstütze standsicher und gebrauchstauglich.

Die Ergebnisse der Modellversuche erlauben eine Bewertung der Vulnerabilität der Maßnahmen gegenüber Treibgutprall und Überströmung, welche in die Ermittlung der Betriebssicherheit der Maßnahmen eingeht (Tabelle 4-2). Die Dichtigkeit der Maßnahmen sowie die Widerstandsfähigkeit gegenüber Wellenanprall ist für die Ermittlung der hydrodynamischen Wirksamkeit relevant (vgl. Kapitel 3.1). Ferner wurde im Rahmen der Untersuchungen die Aufbauzeit der einzelnen Maßnahmen überprüft, die im Wesentlichen mit den Angaben der Hersteller (Tabelle 2-1) übereinstimmte.

Tabelle 4-2: Einschätzung der Vulnerabilität gegenüber ausgewählten Gefährdungsszenarien. Die Bewertung ergibt sich jeweils aus der Kombination von Exposition und Vulnerabilität (s. Tabelle 3-2), die Gesamtbewertung der Betriebssicherheit (unterste Zeile) bildet sich aus dem geometrischen Mittel der Einzelbewertungen aller Gefährdungsszenarien nach Tabelle 3-2, auf eine Darstellung aller Einzelbewertungen wird aus Platzgründen verzichtet.

Gefährdungsszenario Exposition	Aquawand	HWS-mobil	Klappschott ⁶	Hydrobaffle	Sandsäcke
Treibgutprall (A) mittel	mittel / 0,5	gering / 0,75	gering / 0,75	hoch / 0,25	mittel / 0,5
Überströmen (D) gering	gering / 1,00	gering / 1,00	gering / 1,00	hoch / 0,5	mittel / 0,75
Verlegung (E) mittel	gering / 0,75	gering / 0,75	hoch / 0,25	gering / 0,75	gering / 0,75
...	...	...	...	...	...
Gesamtbewertung Betriebssicherheit	0,70	0,75	0,67	0,63	0,63

⁶ Maßnahme wurde nicht getestet, die Bewertung erfolgt auf einer Einschätzung auf Grundlage der zum System öffentlich zugänglichen Informationen.

4.2 Bewertung der mobilen HWS-Systeme

Die Bewertung der *hydrodynamischen Wirksamkeit* bei Einsatz der mobilen Maßnahmen zum *Verschluss von Stöpen* im Ringdeich erfolgt für alle Maßnahmen identisch und wie unter Abschnitt 3.1 erläutert. Im Folgenden wird hierzu sowohl das HW_{100} als auch das HW_{20} betrachtet. Abbildung 4-3 zeigt beispielhaft das Ergebnis der Berechnung für die Warft Süderhorn auf Langeneß.

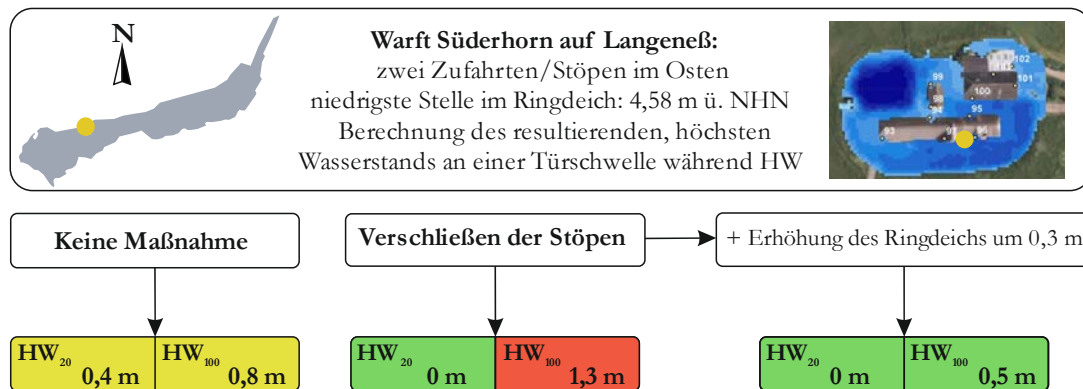


Abbildung 4-3: Während HW_{20} und HW_{100} maximal berechnete Wasserstände an den Türschwellen ($h_{\text{Warft,max}}$) am Beispiel der Warft Süderhorn auf Langeneß für den Ist-Zustand, bei Verschließen der Stöpen mit einer 1 m hohen mobilen HWS-Maßnahme und einem Stöpenverschluss bei gleichzeitiger Ringdeicherhöhung im Süden, Südosten und Südwesten der Warft.

Im Ist-Zustand ohne Maßnahme werden die Grenzwerte für das Sicherheitskriterium nach WÖFFLER & SCHÜTTRUMPF (2017) (für HW_{20} : $h_{\text{Warft,max}} < 0,2$ m, für HW_{100} : $h_{\text{Warft,max}} < 0,5$ m) für beide Hochwasserereignisse nicht erfüllt. Durch ein Verschließen der Stöpen mit einer 1 m hohen mobilen HWS-Maßnahme wird der resultierende Wasserstand an der Türschwelle während eines 20-jährlichen Hochwassers auf 0 m gesenkt, für das 100-jährliche Hochwasser zeigt sich jedoch eine Erhöhung des berechneten Wasserstands, da sich das durch Wellenüberlauf auf die Warft gelangte Wasser höher einstauen kann. Während auch hier im Bereich der nun verschlossenen Stöpen die Wellenüberlauraten auf 0 l/s reduziert werden können, läuft die Warft durch den an anderen Stellen unveränderten Wellenüberlauf voll. Der Verschluss der Stöpen bewirkt, dass das Wasser nur bedingt ablaufen kann, resultiert so in einer Erhöhung der Wasserstände auf der Warft und hat in diesem Beispiel einen negativen Einfluss. Eine iterative Berechnung ergibt, dass für die betrachtete Warft eine Erhöhung des Ringdeichs im Süden der Warft um 0,3 m erforderlich ist, damit durch Verschließen der Stöpen die Wasserstände an den Türschwellen während eines HW_{100} soweit gesenkt werden können, dass das Sicherheitskriterium eingehalten wird.

Die Berechnungen sind nicht auf andere Warften übertragbar und die Warften sind in Abhängigkeit ihrer jeweiligen Geometrie und hydrodynamischen Belastung einzeln zu betrachten. Dennoch zeigten Berechnungen einen ähnlichen Trend und es wird deutlich, dass die abschnittsweise Verwendung von mobilen HWS-Systemen für extreme Hochwasserereignisse nur bei gleichzeitiger Warftverstärkung erfolgsversprechend ist. Die hydrodynamische Wirksamkeit der mobilen Maßnahmen für ein HW_{100} wird somit für alle betrachteten Systeme mit „0“ bewertet, woraus ein Ausschluss aller Maßnahmen für diesen Anwendungsfall folgt. Die Maßnahmen eignen sich jedoch für die Abwehr kleinerer Hochwässer, wie dem hier betrachteten HW_{20} . Bei diesem kann die mobile Maßnahme den Wellenaufbau in der Stöpe erfolgreich kehren (die hydraulischen Belastungstests bestätigen eine Stabilität gegenüber Wellenanprall für alle Maßnahmen), ein Volllaufen der Warft verhindern und

den resultierenden Wasserstand auf der Warft signifikant reduzieren. Die Wirksamkeit der Maßnahmen wird für ein HW_{20} mit „1“ bewertet. Damit erfüllen die Maßnahmen die angestrebte kurzfristige Schutzwirkung: Durch mobile HWS-Maßnahmen kann ein Schutz vor Hochwässern mit niedriger Jährlichkeit geschaffen werden, bis langfristige Warftverstärkungen zur Abwehr von seltenen Extremereignissen abgeschlossen sind.

Bei Einsatz als *Objektschutz* (zum Verschließen von Tür- und Fensteröffnungen oder umlaufend) sind die Maßnahmen auch während eines HW_{100} wirksam. Entscheidend für die Wirksamkeit ist hier die Dichtigkeit sowie die Standsicherheit der Systeme bei Volleinstau, weshalb die Bewertung für die verschiedenen Maßnahmen getrennt (und auf Grundlage während der Belastungstests gesammelter Erfahrungen) erfolgt. Hier können mobile Maßnahmen dazu beitragen die Güter auf der Hallig bereits vor Abschluss der Warftverstärkungen auch vor extremen Ereignissen zu schützen.

Die resultierende Bewertung der betrachteten Maßnahmen für alle Kriterien ist in Tabelle 4-3 zusammengefasst, für die hydrodynamische Wirksamkeit, für Landschaftsbild/Naturschutz sowie Zeitaufwand und Lagerung ergeben sich je nach Anwendungsfall (Stöpenverschluss/Objektschutz) unterschiedliche Bewertungen.

Tabelle 4-3: Bewertung der mobilen HWS-Systeme für die Anwendungsfälle Stöpenverschluss/Objektschutz (1 – beste Bewertung, 0 – schlechteste Bewertung) für alle Bewertungskriterien sowie Gesamtbewertung (durch Bildung des geometrischen Mittels, hydrodynamische Wirksamkeit und Betriebssicherheit mit doppelter Gewichtung).

Stöpenverschluss ⁷ / Objektschutz	Aquawand	HWS-mobil	Klappschott	Hydrobaffle	Sandsäcke
Hydrodynamische Wirksamkeit	1 / 0,75	1 / 0,75	1 / 0,75	1 / 0,5	1 / 0,25
Betriebssicherheit	0,7	0,75	0,67	0,63	0,63
Bauaufwand	0,75	0,5	0,25	1	1
Landschaftsbild bzw. Naturschutz	0,89 / 1	0,94 / 1	0,89 / 1	1 / 1	1 / 1
Wartungsaufwand	0,75	1	0,75	1	0,75
Zeitaufwand	0,75 / 0,75	0,5 / 0,75	1 / 1	0,25 / 0,5	0,25 / 0,5
Lagerung	1 / 1	0,75 / 0,75	1 / 1	0,75 / 0,75	0 / 0,25
Gesamtbewertung	0,83 / 0,78	0,77 / 0,77	0,75 / 0,71	0,75 / 0,69	0 / 0,5
Akzeptanz ⁸ (Hooge/Langeneß)	–/–	+/–	+/–	–/–	+/+

Aus technischer Sicht (hydrodynamische Wirksamkeit, Betriebssicherheit) können insbesondere die Systeme *HWS-mobil* und *Aquawand*, aber auch das *Klappschott* (keine hydraulischen Belastungstests, die Bewertung stützt sich nur auf öffentlich zugängliche Informationen des Herstellers) für den Einsatz auf der Hallig empfohlen werden. Auch bei Berücksichtigung weiterer hallig-spezifischer Aspekte können die drei Systeme überzeugen. Unterschiede ergeben sich hier hinsichtlich des Bauaufwands (Kosten) sowie Lagerung und

⁷ Der Anwendungsfall Stöpenverschluss bezieht sich, wie oben dargestellt, nur auf Hochwässer geringer Jährlichkeit (HW_{20}).

⁸ Die Bewertung (– negative / + positive Beurteilung) erfolgt auf Grundlage der im August 2018 stattgefundenen Gruppendiskussion auf Hooge und Langeneß (vgl. Kapitel 4.3).

Wartungsaufwand: Die Systeme *Klappschott* und *Aquawand* werden vor Ort im Boden gelagert. Dies ist zwar hinsichtlich des Zeitaufwands und möglicher Fehlerquellen bei Transport und Aufbau (unter Betriebssicherheit berücksichtigt) positiv zu beurteilen, kritisch wirkt sich dies jedoch auf Alterung und Korrosion (ebenfalls unter Betriebssicherheit berücksichtigt) sowie den Wartungsaufwand aus. Die etwas schlechtere Gesamtbewertung des Klappschotts lässt sich auf die hohen Investitionskosten sowie die Gefahr des Versagens der automatischen Teile (z. B. infolge Verlegung, schlägt sich in der Bewertung der Betriebssicherheit nieder) zurückführen. Für das System *HWS-mobil* müssen die Bauteile erst zum Einsatzort transportiert werden. Die gebogenen Stahlbleche sind sehr leicht und können unter normalen Witterungsverhältnissen ohne Schwierigkeiten von 1–2 Personen getragen und aufgebaut werden. Während eines starken Sturms könnten Transport und Aufbau der Stahlbleche herausfordernd sein. Aufgrund fehlender Praxistests vor Ort kann hierzu jedoch keine fundierte Einschätzung gegeben werden.

Auch der *Hydrobaffle* eignet sich prinzipiell zu einer temporären Freiborderhöhung und damit dem Schutz vor Wellenanprall und -überlauf, sein Einsatz ist allerdings nur zu empfehlen, wenn ein erhöhter Einstau ausgeschlossen oder der *Hydrobaffle* zusätzlich durch andere Maßnahmen vor Wegrollen geschützt werden kann. Die Verwendung einer Dichtungsfolie auf der Oberseite des wassergefüllten Systems, wie in WAGENHUBER (2016) beschrieben, empfiehlt sich für einen Einsatz auf den Halligen aufgrund der hohen zu erwartenden Windgeschwindigkeiten nicht. Vorteil des *Hydrobaffle* liegt in seiner flexiblen und mobilen Anwendungsmöglichkeit, da keine Anschlüsse im Boden oder an angrenzender Bebauung erforderlich sind. Es ist allerdings in jedem Fall zu klären, woher das Füllwasser für den *Hydrobaffle* bezogen werden kann. Eine Bezugsmöglichkeit bilden gegebenenfalls nahegelegene Priele sowie die Fethinge. Sollte das Füllwasser hier entnommen werden, so ist für einen ausreichenden Schutz gegen Verstopfen der Schläuche und Pumpe zu sorgen. Zusätzlich sollte eine Ersatzpumpe zur Verfügung stehen, da bei Ausfall der Pumpe das gesamte System nicht einsatzfähig ist. Eine Befüllung über die Hausanschlüsse auf einer Warft wird zu langen Füllzeiten führen. Ferner ist unklar, wie sich das gleichzeitige Befüllen mehrerer *Hydrobaffles* auf einer Warft oder Hallig auswirkt.

Als konventionelle, mobile Schutzmaßnahme ist zusätzlich ein *Sandsackdeich* betrachtet worden. Hinsichtlich der Betriebssicherheit und hydrodynamischen Wirksamkeit ist diese Maßnahme mit dem *Hydrobaffle* vergleichbar. Allerdings besteht hier eine geringere Gefahr des schlagartigen Versagens, dafür kommt es bei einem Volleinstau zu höherer Leckage. Für den betrachteten Anwendungsfall *Stöperverschluss* fällt die Maßnahme aufgrund des hohen Platzbedarfs für die Lagerung durch. Ein Einsatz im *Objektschutz* ist denkbar, allerdings müssen die hohen Leckageraten in Kauf genommen werden. Ferner gilt stets zu bedenken, dass für größere Sandsackmengen eine hohe Anzahl an einsatzfähigen Helfern für den Aufbau erforderlich sind. Als zusätzliche Verstärkung oder zur schnellen Abdichtung von Fehlstellen bieten Sandsäcke jedoch eine sinnvolle Ergänzung.

4.3 Auswertung der soziologischen Teilstudie

4.3.1 Experten*innen-Interviews

Die Transkription und Auswertung der Interviews verlief ohne die Personalien in pseudonymisierter Form, sodass alle Experten*innen ein Kürzel erhielten (E1 bis E16). Die verschriftlichten Transkripte umfassen insgesamt circa 236 Seiten und dienten als Basis für die qualitative Auswertung mittels der Software MaxQDA (KUCKARTZ 2012). Im Folgenden sind die zentralen Ergebnisse der qualitativen Interviewauswertung, entlang der vier Themenblöcke aus dem konzipierten Leitfaden, wiedergegeben.

Themenblock 1: Eigene Erfahrungswerte

- **Merkmale der Halligen:** Einzigartige geografische Lage, Leben mit der Natur und den Gezeiten, Leben auf Warften, Ruhe.
- **Besonderheiten des alltäglichen Lebens:** Geprägt durch geografische Lage, Verkehrsanbindungen, an Wetter sowie Gezeiten angepasste Struktur, verbunden mit Einschränkungen, Gleichzeitigkeit von regelmäßiger Planung und Flexibilität, Arbeitsalltag bezogen auf Küstenschutz, Tourismus und Land- bzw. Viehwirtschaft.
- **Umgang mit den vorherrschenden Bedingungen:** Unterscheidung zwischen *normalen* Landunter-Situationen und Sturmfluten, Gewohnheit und gelassener Umgang bei Landunter, größere Sorge und Vorsicht bei Sturmfluten.
- **Charakterisierung der Hallig-Bewohner*innen:** Heterogen und dennoch gemeinsame Grundmerkmale, wie Gelassenheit, Besonnenheit, Naturverbundenheit, Bodenständigkeit und Stolz sowie Unterscheidung zwischen *Zugezogenen* und *Alteingesessenen* (begründet mit unterschiedlichen Erfahrungswerten).
- **Spezifische Wissens- und Erfahrungsbestände:** Implizites *Halligwissen*, verbunden mit Erfahrungen aus Natur- und Wetterbeobachtungen sowie generationenübergreifende Traditionen, angepasst an die exponierte Lage.

Themenblock 2: Einschätzung der Entwicklungen und Wandlungsprozesse

- **Entwicklungen auf den Halligen:** Meeresspiegelanstieg, Veränderungen in der Häufigkeit und Intensität von Landunter und Sturmfluten, Wandlungsprozesse im Watt, in der Tierwelt und in der Vegetation.
- **Weitere (zukünftige) Entwicklungen:** Unterschiedliche Antizipationen, keine konkreten zukünftigen Prognosen, demografischer Wandel und Sorge bezüglich der Umsetzung von Schutzmaßnahmen.
- **Umgang mit Entwicklungen und Reaktionen:** Heterogene Umgangsweisen mit den klimatischen Entwicklungen, Gelassenheit und Ruhebewahren, Sensibilisierung und Fokussierung auf (präventive) Schutzmaßnahmen, Differenzen in der Perspektive (Kurzfristigkeit vs. Langfristigkeit).
- **Einlassen auf Wandlungsprozesse:** Heterogen/divers, Einbezug der Bewohner*innen für Akzeptanz/Offenheit notwendig.
- **Allgemeines und verändertes Bewusstsein:** Gestiegene Aufmerksamkeit, Bewusstseinsschärfung und Sensibilisierung im Kontext schwerer Stürme, wie Anatol (1999), Xaver und Christian (2013).

- **Unterschiede zwischen den Generationen** sowie zwischen Alteingesessenen und Zugezogenen bezüglich der Wahrnehmung, des Bewusstseins und des Umgangs mit Wandlungsprozessen, kein einheitliches Bild innerhalb dieser Differenzierungen.
- **„Neues Denken“ im Küstenschutz:** Wandlungstendenzen, in Form neuer Maßnahmen (wie Klimadeiche) und Initiativen, stärkerer Einbezug der Bewohner*innen als positiver Aspekt, Langwierigkeit von Genehmigungsverfahren als Kritik.

Themenblock 3: Bewertung bisheriger Maßnahmen

- **Bewertung der traditionellen Maßnahmen:** Alle bisherigen Maßnahmen erfahren weiterhin einen hohen Stellenwert, vor allem Warften, geschlossene Deckwerke und Lahnungen:

Tabelle 4-4: Bewertung bisheriger Schutzmaßnahmen.

Maßnahme/ Wichtigkeit	Wichtig bis sehr wichtig	Weniger wichtig bis nicht wichtig	Keine Ein- schätzung
Warften	16 (100%)	0	0
Deckwerke (geschlossene bzw. Steindecke)	16 (100%)	0	0
Buschlahnungen	16 (100%)	1	0
Holzlahnungen	16 (100%)	1	0
Steinlahnungen	16 (100%)	1	0
Buhne	15 (93,75%)	1	1
Schleuse	15 (93,75%)	1	0
Schotten	15 (93,75%)	1	0
Stöpe	15 (93,75%)	1	0
Deckwerke (offene)	14 (87,5%)	0	2
Igel	14 (87,5%)	3	0
Schutzraum	14 (87,5%)	2	0
Ringdeiche	13 (81,25%)	2	1
Damm	12 (75%)	3	1
Sandsäcke	11 (68,75%)	4	1
Bauweise der Hallighäuser	10 (62,5%)	5	1
Sommerdeich	10 (62,5%)	4	2
Elastocoast	6 (37,5%)	9	1

- Hoher bis sehr hoher Stellenwert der bisherigen, traditionellen Schutzmaßnahmen insgesamt.
- Veränderungs- und Optimierungsbedarf: Diverse Vorschläge, vor allem Warften betreffend, aber auch bezüglich der Bauweise der Hallighäuser, der Genehmigungsverfahren und Arbeitsplätze im Küstenschutz sowie hinsichtlich eines intensivierten Einbezugs der Hallig-Bewohner*innen.
- Zentrale Aspekte, die Schutzmaßnahmen auf den Halligen erfüllen sollten: Verträglichkeit mit Boden-, Wind-, Wasser- und Strömungsverhältnissen, Kombination von Maßnahmen zur gegenseitigen Ergänzung, Kompatibilität von Maßnahmen, generationsübergreifende Nachhaltigkeit, eine Berücksichtigung des demografischen Wandels/Personenkraft, einfache technische Anwendbarkeit.

Tabelle 4-5: Zentrale Aspekte, die Schutzmaßnahmen für die Halligen erfüllen sollten.

Zentrale Aspekte/ Wichtigkeit	Wichtig bis sehr wichtig	Weniger wichtig bis nicht wichtig
Verträglichkeit mit Boden-, Wind-, Wasser- und Strömungs- verhältnissen	16 100%	0
Kombination von Maßnahmen zur gegenseitigen Ergänzung	16 100%	0
Kompatibilität von Maßnahmen	16 100%	0
Generationenübergreifende Nachhaltigkeit	16 100%	0
Personenkraft/ Berücksichtigung des demografi- schen Wandels	16 100%	0
Einfache technische Anwendbar- keit/Anwendung	16 100%	0
Halligtypisches beibehalten	15 93,75%	1
Aktiver Einbezug/Partizipation	15 93,75%	1
Naturverträglichkeit/ Vereinbarkeit von Küsten- und Naturschutz	14 87,5%	2
Objektschutz im Fokus	13 81,25%	3
Material- und platzsparend	13 81,25%	3
Kostenaspekt	11 68,75%	5

Themenblock 4: Bewertung zukünftiger und alternativer Maßnahmen

- **Sinnvolle alternative Küstenschutzmaßnahmen:** Bedeutung der Fortführung traditioneller Maßnahmen, Kompatibilität sowie Ergänzung von Maßnahmen, beispielsweise auch Wasserabfluss auf den Halligen oder den Erhalt des Wattgebiets aufgreifen.

- **Präferierte alternative Maßnahmen:** HWS-mobil, jedoch Erfüllung zentraler Aspekte generell bezweifelt (Verträglichkeit mit Boden-, Wind-, Wasser- und Strömungsverhältnissen, mangelnde Personenkraft, Anwendungsaufwand, Lagerprobleme, Haltbarkeitsschwierigkeiten, aufwendige Wartung).
- **Keine Veränderungen der Lebenssituation** auf den Halligen, da vorgeschlagene Maßnahmen so dauerhaft nicht umsetzbar seien; ansonsten erhöhte Sicherheit als positive Veränderung und zusätzliche Aufwände sowie Einschränkungen im Alltag als negative Auswirkungen.
- **Stehenlassen von Seewasser und Böden-Produktivität:** Heterogenes Meinungsbild, Skepsis bezüglich des Sinns und der Zweckmäßigkeit, kritische Betrachtung vermuteter Einschränkungen sowie der Quantität/Qualität der Sedimentationsablagerungen nach einem gewöhnlichen Landunter (im Gegensatz zu denen nach einer Sturmflut).
- Grundlegende **Bedeutung des Hallig-Anwachsens** für die Bewohner*innen, aber auch heterogenes Meinungsbild; Zweifel bezüglich eines hinreichenden Wachstums der Halligen durch Sedimentablagerungen, verbunden mit starken Einschränkungen in der alltäglichen Lebensführung.
- **Bereitschaft zur Sedimentationserhöhung:** Heterogen/divers, keine allzu großen Einschränkungen in der alltäglichen Lebensführung/im Wirtschaften, Begründung der Sinnhaftigkeit und Transparenz notwendig, unter Einbezug der Bewohner*innen.
- **Mitnahme und Partizipation der Bewohner*innen** wird auch nochmals in den freien Anmerkungen der Experten*innen unterstrichen.

Die Bedeutung eines Einbezugs der Bewohner*innen ist in den qualitativen Interviews insgesamt deutlich geworden. Um eine partizipative Einbringung final zu ermöglichen, wurde als letztes Element im Mixed-Method-Ansatz das qualitative Instrument der Gruppendiskussion umgesetzt.

4.3.2 Gruppendiskussionen

Bei den Gruppendiskussionen auf der Hallig Hooge und der Hallig Langeneß haben die gesetzten *Grundreize* (siehe Kapitel 3.3.2), in Form zweier Vorträge aus der Geologie und dem Wasserbauingenieurwesen, eine freie sowie ungezwungene Beteiligung der Bewohner*innen angeregt. Zudem hat es sich als vorteilhaft für eine vertraute sowie offene Diskussion erwiesen, dass es sich bei den Teilnehmern*innen um eine *Realgruppe* handelte und eine Übertragbarkeit auf weitere Prozesse gegeben ist, mit einem direkten Bezug zum eigenen Lebensraum.

Bei einer Betrachtung der Ergebnisse der Gruppendiskussionen auf der Hallig Hooge und der Hallig Langeneß offenbaren sich sowohl Gemeinsamkeiten als auch Unterschiede. Bezüglich der vorgestellten Messungen und Ergebnisse zur Sedimentation zeigen die Bewohner*innen von Langeneß ein besonderes Interesse, da die Untersuchungen direkt auf ihrer Hallig stattfanden und ihre Lebens- sowie Wirtschaftens-Grundlage betreffen. Entsprechend konnte mit den präsentierten Inhalten eine Transparenz für die Bewohner*innen zu Sedimentationsentwicklungen geschaffen werden. Auf Hooge zeigen sich hingegen bestehende offene Fragen: Insgesamt werden generell Maßnahmenvorschläge zur Erhöhung der Sedimentation auf Hooge sowie zum Erhalt der Sandbänke als wünschenswert erachtet. Auch die Frage, wie die Ergebnisse zur Sedimentation von der Hallig Langeneß auf Hooge

übertragen werden können, ist in diesem Kontext zentral. Zudem wird eine intensivere Zusammenarbeit von Küsten- und Naturschutz gewünscht.

Zusammenfassend kann bezüglich der Hochwasserschutzsysteme auf den Halligen festgehalten werden, dass die Aspekte *Verträglichkeit mit Boden-/ Wind-/ Wasser- und Strömungsverhältnissen*, eine (zeitlich) *einfache technische Anwendbarkeit/ Anwendung*, *Personenkraft/ Berücksichtigung des demografischen Wandels* und *Halligtypisches beibehalten/ Landschaftsbild* unter den zentralen Aspekten eine besonders wichtige Position einnehmen. Aber auch die *Verwendung von einfachem Material*, der *Kostenfaktor* und die *Wartungsintensität* bzw. *Lagerung*, so im Verlauf der Diskussionen deutlich geworden, nehmen eine herausragende Bedeutung ein, verbunden mit der Sorge um eine finanzielle Belastung und im Vergleich zu bestehenden Systemen, die weiterhin einen zentralen Stellenwert für die Bewohner*innen haben (siehe auch Kapitel 4.3.1). Zudem wird als bedeutsam der *Objektschutz* und der *Schutz der gesamten Warft* hervorgehoben. Darüber hinaus zeigt sich eine Parallele zu den Ergebnissen aus *ZukunftHallig* dahingehend, dass individuelle Lösungen für die einzelnen Halligen bzw. Warften und Häuser als sinnvoll erachtet werden.

Bezüglich der vorgestellten Maßnahmen haben sich deutliche Unterschiede im Meinungsbild der Bewohner*innen ergeben: Während die Diskussionsteilnehmer*innen von Langeneß und Nordstrandischmoor generell allen vorgestellten Systemen ablehnend gegenüberstehen, erscheint das automatische System *Klappschott* für die Bewohner*innen von Hooge am geeignetsten, aber auch *HWS-mobil* wird hier bezüglich einer Erfüllung zentraler Aspekte positiv gewertet. Allerdings kann bezüglich *Klappschott*, aus beiden Diskussionen hervorgehend, auch ein weiterer Handlungs- bzw. Testungsbedarf mit Blick auf die Faktoren Starkregen, Salzwasser und Salzlufte identifiziert werden. Zudem zeigen sich Übereinstimmungen in der Kritik der Schutzsysteme, beispielsweise *Hydrobaffle* betreffend: Diese Maßnahme würde einen zu geringen Wasserdruck gewährleisten und sei schwer mit den bestehenden Leitungsrohren sowie angesichts der vorherrschenden Windverhältnisse zu befüllen. Darüber hinaus wird eine Testung in der Versuchshalle von bestehenden Maßnahmen, beispielsweise der herkömmlichen Schotten oder Dammbalken als Einsatz in der Stöpe, für einen Vergleich als wünschenswert erachtet. In beiden Diskussionen wurden weiterführende, zu untersuchende Vorschläge getätigt, wie automatisch fungierende Stöpen, Gabionen für eine Sicherheitsgewährleistung, einsetzbare Wellenbremsen oder eine Betonmauer als festinstalliertes System.

4.3.3 Fazit: Anforderungskatalog

Der auf den lokalen gesellschaftlichen und sozialen Kontext zugeschnittene Ansatz des Teilprojektes *Hallig-B* ermöglichte eine Berücksichtigung sozialer Aspekte (Bedürfnisse, Erwartungen, Anforderungen seitens der Bewohner*innen) und Zusammenführung mit technischen Aspekten (technisch umsetzbare Maßnahmen) im Sinne einer ganzheitlichen *sozio-technischen* Perspektive.

Aus dem vorangegangenen Mixed-Method-Ansatz, bestehend aus qualitativen Interviews mit Bewohnern*innen und Zukunftswerkstätten (Ergebnisse aus *ZukunftHallig*), Experten*innen-Interviews (Kapitel 4.3.1) und Gruppendiskussionen (Kapitel 4.3.2), werden im Folgenden zusammenfassend zum einen Maßnahmenvorschläge⁹ katalogisiert, die in

⁹ Diese Vorschläge betreffen nicht ausschließlich den Hochwasserschutz, sondern beispielsweise auch Ideen für stärkere Sedimentablagerungen.

den Erhebungen artikuliert wurden. Zum anderen wird final ein Anforderungskatalog formuliert, basierend auf den Bedürfnissen, Erwartungen und der Akzeptanz seitens der Hallig-Bewohner*innen. Diese Anforderungen ermöglichen zum einen eine Orientierung bei der Testung und Implementierung von – auch zukünftigen – Schutzmaßnahmen. Zum anderen sind Transfermöglichkeiten aufgrund des Abstraktionsniveaus gegeben. Weiterhin ist der Anforderungskatalog nicht als abgeschlossen und endgültig zu betrachten, sondern es sind weitere Anschluss- und Ergänzungsmöglichkeiten gegeben. Die aufgeführten Aspekte stehen zudem nicht in einer klaren abstufenden Rangordnung zueinander.

Tabelle 4-6: Maßnahmen-Tableau aggregiert aus ermittelten Vorschlägen des soziologischen Mixed-Method-Ansatzes.

Generelle Bedeutung	
Traditionelle, bestehende Maßnahmen ausbauen/optimieren	Vor allem die Folgenden: Warften, Deckwerke, Lahnungen, Buhnen, Schleusen, Schotten, Stöpen, Igel, Schutzräume, Ringdeiche, Sandsäcke (Ergebnis aus Bewohner*innen- und Experten*innen-Interviews)

Ideen aus Zukunftswerkstätten seitens der Bewohner*innen und deren Beurteilung (Ergebnis aus <i>ZukunftHallig</i>)	
Um die gesamte Warft verlaufender Ringdeich	Wirksam und technisch machbar
Raupflasterung der Warften	Wirksam und technisch machbar
Mobiler Deichschlauch	Wirksam und technisch machbar
Abflachung der Warft/Ringdeich auf der Warftkrone	Wirksam und technisch machbar
Einrichtung geeigneter Schutzräume	Wirksam und technisch machbar
Aufwarftung	Wirksam und technisch machbar
Verbindung und Bepflanzung der Außensände	Keine Wirksamkeit auf den Wellenüberlauf
Hydraulische Hochwasserschutzwand	Hoher Bauaufwand/gering einzustufende Betriebssicherheit
Hydraulische Warft	Nicht wirksam und nicht technisch machbar, u.a. hoher Bauaufwand, Veränderung des Landschaftsbildes und Inkompatibilität mit dem Naturschutz
Eindeichung des Wattenmeers	Nicht wirksam und nicht technisch machbar, u.a. hoher Bauaufwand, Veränderung des Landschaftsbildes und Inkompatibilität mit dem Naturschutz

Weitere Vorschläge aus Experten*innen-Interviews	
Glaswandschutz um die Warften	Individueller Schutz der Warften, vergleichbar beim Klimadeich auf Nordstrand
Neue/zusätzliche Warften	Schaffung neuen Lebens- und Wohnraumes sowie weiterer Infrastruktur
Schacht in Warftkrone mit verankertem Plastikblock	Hier würden unterhalb Rohre herausführen zur Wasserableitung; abfließendes Wasser füllt Schacht, drängt Plastikblock nach oben und führe zu einer Warfterhöhung
Anlegung verteilter Siele	Verbesserung des Wasserabflusses auf den Halligen mittels der Anlegung kleiner, verteilter Siele für ein schnelles und strukturiertes Hinauslaufen des Wassers

Schaffung kleiner Löcher als Sedimentsammler	Ziel: Bessere Ablagerung von Sedimenten
Lahnungen im Watt als Schlickfänger	Ziel: Abnahme des Wattgebiets entgegenwirken und Ablagerung von Sinkstoffen vor den Halligen erreichen/Anwachsen der Halligen

Zusätzliche Vorschläge von den Bewohnern*innen (aus Gruppendiskussionen)	
Automatische Stöpe	Vorschlag aus Gruppendiskussion Hooge
Gabionen	Vorschlag aus Gruppendiskussion Hooge
Wellenbremsen	Vorschlag aus Gruppendiskussion Hooge
Hochleistungspumpe	Vorschlag aus Gruppendiskussion Hooge
Betonwand/-mauer	Vorschlag aus Gruppendiskussion Langeneß

Wertung der getesteten mobilen HWS-Maßnahmen seitens der Bewohner*innen	
Klappschott	Präferiertes System in der Gruppendiskussion auf Hallig Hooge, abgelehnt in der Gruppendiskussion auf Langeneß
HWS-mobil	Positive Wertung in der Gruppendiskussion auf Hallig Hooge, abgelehnt in der Gruppendiskussion auf Langeneß
Aquawand	Negative Wertungen in der Gruppendiskussion auf Hallig Hooge und Hallig Langeneß
Hydrobaffle	Negative Wertungen in der Gruppendiskussion auf Hallig Hooge und Hallig Langeneß

Tabelle 4-7: Anforderungskatalog zu Hochwasserschutzmaßnahmen auf den Halligen.

Zentrale Aspekte	Erläuterungen
Partizipation	Maßnahmen spiegeln bestehende, artikuliert Bedürfnisse und Erwartungen wieder
Umgebungsverträglichkeit	Berücksichtigung der regionalen/spezifischen Boden-/Wind-/Wasser- und Strömungsverhältnisse
Personenkraft	Vorhandene Personenkraft vor Ort und demografischen Wandel bzw. eine älter werdende Bevölkerung berücksichtigen
Einfache Anwendung	Einfacher Auf- und Abbau von Maßnahmen, geringer Zeitaufwand
Kostenaspekt	Berücksichtigung finanzieller Belastungen sowie vorhandener Einkommens-/Vermögensverhältnisse
Kombination	Einsatz von Maßnahmen zur gegenseitigen Ergänzung
Kompatibilität	Kompatibilität/Vereinbarkeit mit weiteren (bestehenden) Maßnahmen, beispielsweise auch notwendigen Vorkehrungen bei Landunter-/Sturmflutereignissen
Materialaspekt	Verwendung von einfachem Material (auch mit Blick auf bereits Verwendetes bei bestehenden Maßnahmen/Kostenfaktor)
Nachhaltigkeit	Langfristige und generationenübergreifende Perspektive
Landschaftsbild	Geringfügige Veränderungen des bestehenden Landschaftsbildes, beispielsweise Halligtypisches (markante Charakteristiken) beibehalten
Naturverträglichkeit	Vereinbarkeiten von Natur- und Küstenschutz
Objektschutz	Im Fokus des Schutzes stehen einzelne Objekte, wie Häuser
Flächenschutz	Weitreichender Schutz, wie der gesamten Warft
Individualität bzw. Heterogenität	Berücksichtigung individueller/heterogener Gegebenheiten und Bedürfnisse/Präferenzen (auch zur Gewährleistung einer adäquaten Anwendung, Pflege und Lagerung)

Lagerung	Material- und platzsparend, wenig Aufwand sowie Haltbarkeit gewährleisten
Wartung	Geringer Wartungs- und Pflegeaufwand sowie Gewährleistung dessen; zentraler Aspekt aus wasserbaulicher Sicht (IWW)
Hydrodynamische Wirksamkeit	Zentraler Aspekt aus wasserbaulicher Sicht (IWW)
Betriebssicherheit	Zentraler Aspekt aus wasserbaulicher Sicht (IWW)
Bereitstellungszeit	Zentraler Aspekt aus wasserbaulicher Sicht (IWW)

An dieses Maßnahmen- und Anforderungstableau können zukünftige Forschungsvorhaben anknüpfen und gegebenenfalls eine praktische Umsetzung erfahren. Das Erfahrungswissen der Hallig-Bewohner*innen, hinsichtlich ihrer speziellen, ökonomischen und landuntergefährdeten Lage, wird in der längerfristigen, wechselseitigen Praxis im Umgang mit Materialien – wie Schutzmaßnahmen – und konkreten Situationen gewonnen. Um eine Bezugnahme neuer potenzieller Küstenschutz- und Bewirtschaftungsstrategien auf die bereits etablierten, weitergegebenen sowie beherrschten Kompetenzen zu gewährleisten, erscheint es sinnvoll, die Bewohner*innen – bzw. allgemein direkt Betroffene – als *erfahrene Praktiker*innen* im Umgang mit Sturmflut- und Landunterrisiken zu betrachten und diese partizipativ einzubeziehen.

5 Fazit und Ausblick

Die Landesregierung Schleswig-Holsteins hat im Jahr 2016 zum langfristigen Schutz und Erhalt der nordfriesischen Halligen ein Programm zur Verstärkung und Entwicklung der Warften beschlossen (MELUND SH, 02.02.2016). Dabei wird für die Anpassung der 32 bewohnten Warften über einen Zeitraum von bis zu 25–30 Jahren mit jährlichen Kosten von etwa 1 Mio. € gerechnet. Da für die geplanten Warftverstärkungsmaßnahmen Priorisierungen vorgenommen werden müssen, ergeben sich bei einigen Warften längere Zeiträume bis zur Warftverstärkung, die es durch kurzfristig umsetzbare Hochwasserschutzmaßnahmen zu überbrücken gilt.

Vor diesem Hintergrund fand die Suche nach möglichen, kurzfristigen Schutzmaßnahmen statt. Hierzu erfolgte die Bewertung fünf verschiedener, mobiler HWS-Systeme hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit auf den Halligwarften. Bei der Beurteilung der mobilen Maßnahmen ist neben Funktionalität, Betriebssicherheit und hydrodynamischer Wirksamkeit auch die Anwendbarkeit (Platzbedarf, Bereitstellungszeit, Akzeptanz seitens der Bewohner*innen) sowie der Einfluss auf das Landschaftsbild berücksichtigt worden.

Die Untersuchungen zeigen, dass sich die betrachteten mobilen HWS-Systeme prinzipiell zur Ergänzung des Hochwasserschutzes auf den Warften eignen. Betrachtet wurde jeweils der Einsatz zum Verschließen der Stöpen im Ringdeich und damit einer temporären Freiborderhöhung und der Einsatz zum Objektschutz. Bei Verwendung in den Stöpen des Ringdeichs dienen die Maßnahmen vor allem zur Abwehr kleinerer Hochwässer. Während extremer Ereignisse kann ein Verschließen der Stöpen ohne begleitende Warftverstärkungsmaßnahmen negative Folgen haben, dies ist jedoch für jede Warft einzeln zu betrachten. Im Objektschutz bieten die Maßnahmen auch bei Extremereignissen und ausbleiben der Warftverstärkung eine Erhöhung der Schutzwirkung.

Unterschiede zwischen den verschiedenen HWS-Systemen zeigten sich hinsichtlich des Bau-, Wartungs- und Zeitaufwands, aber auch in der Betriebssicherheit. Die neuartigen Systeme können durch höhere Materialbeständigkeit, einfacheren (teilweise automatischen)

Aufbau sowie geringeren Platzbedarf Vorteile gegenüber herkömmlichen Systemen bieten und so Problemen im Zuge des demographischen Wandels und der abnehmenden Personenzahl je Warft begegnen.

Untersuchungen zur Akzeptanz der neuartigen HWS-Systeme seitens der Bewohner*innen fielen heterogen aus: Während prinzipiell die Forderung nach möglichst einfach aufzubauenden Systemen besteht (insbesondere die vollautomatische Maßnahme erscheint reizvoll), gibt es Bedenken hinsichtlich der Beständigkeit unter küstenspezifischer Witterung und des Risikos infolge eines technischen Ausfalls. Ferner werden erhöhte Kosten im Vergleich zu traditionellen Systemen befürchtet und es wurden weitere, vergleichende Tests herkömmlicher, vermeintlich günstigerer Systeme vorgeschlagen (Schotten und Dammbalken aus Holz).

Für weiterführende Untersuchungen werden Probeeinsätze der mobilen HWS-Systeme auf den Halligen empfohlen, die die durchgeführten Labortests sinnvoll ergänzen. Diese können zum einen die Akzeptanz neuartiger Maßnahmen erhöhen, des Weiteren können so Randbedingungen, die in den hydraulischen Modellversuchen in der Versuchshalle nicht abgebildet werden konnten, Berücksichtigung finden. Hierzu zählt unter anderem der Einfluss von Salzwasser und Seeluft sowie der Aufbau der Maßnahmen unter Sturmbedingungen.

6 Danksagung

Das Vorhaben wurde als Teil des Verbundprojekts *LivingCoastLab Halligen* vom 01. Oktober 2016 bis zum 30. September 2019 mit Mitteln des *Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF)* im Rahmen des Förderschwerpunkts *Küstenmeerforschung in Nord- und Ostsee (KüNO)* gefördert (BMBF-Förderkennzeichen: 03F0759B).

Die Autoren*innen danken für die Betreuung durch den Projektträger Jülich sowie dem BMBF für die Förderung und Ermöglichung des Projekts. Weiterer Dank gilt allen Projektpartnern und dem *Landesbetrieb für Küstenschutz, Nationalpark und Meeresschutz Schleswig-Holstein (LKN.SH)* für die gute Zusammenarbeit. Ferner wird den Firmen *Aquaburg Hochwasserschutz GmbH*, *Hochwasserschutz Agentur* und *HOWATEC GmbH* für die kostenlose Bereitstellung der getesteten, mobilen Hochwasserschutzsysteme gedankt.

7 Literaturverzeichnis

- ABELS, G. & BORA, A.: Demokratische Technikbewertung. transcript-Verlag, Bielefeld, 2004.
- BWK: Merkblatt BWK-M 6: Mobile Hochwasserschutzsysteme – Grundlagen für Planung und Einsatz. Sindelfingen: Bund der Ingenieure für Wasserwirtschaft, Abfallwirtschaft und Kulturbau (BWK) e.V., Sindelfingen, 2005.
- CHURCH, J. A.; CLARK, P. U.; ANNY CAZENAVE; JONATHAN M. GREGORY; JEVREJEVA S.; LEVERMANN, A.; MERRIFIELD, M. A.; MILNE, G. A.; NEREM, R. S.; NUNN, P. D.; PAYNE, A. J.; PFEFFER, W. T.; STAMMER, D. und UNNIKRISHNAN, A. S.: Sea Level Change; In: STOCKER, T. F., QIN, D., PLATTNER, G.-K.; TIGNOR, M. M.B.; ALLEN, S. K.; BOSCHUNG, J.; NAUELS, A.; XIA, Y.; BEX, V. und MIDGLEY, P. M. (Hrsg.): 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/New York, 1137-1216, 2013.

- EUROPAVERBAND HOCHWASSERSCHUTZ E.V.: Herstellung, Lieferung und Erstmontage von technischen Hochwasserschutzprodukten - Durchführungsbestimmungen für Systemprüfungen. In: Güte- und Prüfbestimmungen zur Erlangung und Verleihung der Gütezeichen Technischer Hochwasserschutz, VR-Nr. 20890, Europaverband Hochwasserschutz e.V., 2014.
- EUROTOP: Manual on wave overtopping of sea defences and related structures. An overtopping manual largely based on European research, but for worldwide application. VAN DER MEER, J.W., ALLSOP, N.W.H., BRUCE, T., DE ROUCK, J., KORTENHAUS, A., PULLEN, T., SCHÜTTRUMPF, H., TROCH, P.; ZANUTTIGH, B., 2016. Online verfügbar: www.overtopping-manual.com.
- FM APPROVALS: American National Standard for Flood Abatement Equipment. ANSI/FM Approvals 2510, Approved American National Standard, 2014.
- HAUG, S.; WEBER, K. und VERNIM, M.: Soziale und planerische Aspekte der energetischen Gebäudemodernisierung. Partizipative Planung, Zielkonflikte und Akzeptanz; In: GROSSMANN, K.; SCHAFFRIN, A. und SMIGIEL, C. (Hrsg.): Energie und soziale Ungleichheit. Zur gesellschaftlichen Dimension der Energiewende in Deutschland und Europa. Springer VS-Verlag, Wiesbaden, 579-608, 2017.
- HÄUBLING, R.; ZIESEN, N.; DORGEIST, M.; KAIP, E.: Eine partizipative und interdisziplinäre Gestaltung von Küstenschutzmaßnahmen auf den Halligen. In: Die Küste, Heft 84, 45-65, Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau, 2016. Online verfügbar: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/105212>.
- JENSEN, J.; ARNS, A.; SCHÜTTRUMPF, H.; WÖFFLER, T.; HÄUBLING, R.; ZIESEN, N.; JENSEN, F.; VON EYNATTEN, H.; SCHINDLER, M.; KARIUS, V.: ZukunftHallig – Entwicklung von nachhaltigen Küstenschutz- und Bewirtschaftungsstrategien für die Halligen unter Berücksichtigung des Klimawandels. In: Die Küste, Heft 84, 3-8, Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau, 2016. Online verfügbar: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/105210>.
- KUCKARTZ, U.: Qualitative Inhaltsanalyse. Methoden, Praxis, Computerunterstützung. Beltz-Verlag, Weinheim/Basel, 2012.
- KUTSCHER, N.: Moralische Begründungsstrukturen professionellen Handelns in der Sozialen Arbeit. Eine empirische Untersuchung zu normativen Deutungs- und Orientierungsmustern in der Jugendhilfe. Bielefeld University, Bielefeld, 2002.
- LAMNEK, S.: Gruppendiskussion. Theorie und Praxis. 2. Auflage. Beltz-Verlag, Weinheim/Basel/Stuttgart, 2005.
- LAMNEK, S.: Qualitative Sozialforschung. Band 2: Methoden und Techniken. 3. Auflage. Psychologie Verlags Union, Weinheim, 1995.
- MÄDER, S.: Die Gruppendiskussion als Evaluationsmethode – Entwicklungsgeschichte, Potenziale und Formen; In: Zeitschrift für Evaluation, 12 (1), 23-51, 2013.
- MINISTERIUM FÜR ENERGIEWENDE, LANDWIRTSCHAFT, UMWELT, NATUR UND DIGITALISIERUNG (MELUND SH): Sichere Zukunft für die Halligen: Landesregierung beschließt Programm zur Verstärkung der Warften. Pressemitteilung vom 02.02.2016, Kiel. Stand 31.03.2020: www.schleswig-holstein.de/DE/Landesregierung/V/Presse/PI/2016/0216/MELUR_160202_Halligen_Wattverstaerkungen.html
- MEUSER, M. & NAGEL, U.: ExpertInneninterviews – vielfach erprobt, wenig bedacht. Ein Beitrag zur qualitativen Methodendiskussion; In: BOGNER, A.; LITTIG, B. und MENZ,

- W. (Hrsg.): Das Experteninterview. Theorie, Methode, Anwendung. 2. Auflage. VS-Verlag für Sozialwissenschaften, Wiesbaden, 71-93, 2005.
- MEUSER, M.: Gleichstellung auf dem Prüfstand: Frauenförderung in der Verwaltungspraxis. Centaurus, Pfaffenweiler, 1989.
- MRUCK, K. & MEY, G.: Qualitative Forschung: zur Einführung in einen prosperierenden Wissenschaftszweig; In: Historical Social Research, 30(1). 5-27, 2005.
- SCHMIDT, J. C.: Die Gestaltungskette der Technikentwicklung. Ein Beitrag zu möglichen Angriffspunkten einer politischen Gestaltung von Technik; In: MENSCH, K. und SCHMIDT, J. C. (Hrsg.): Technik und Demokratie. Zwischen Expertokratie, Parlament und Bürgerbeteiligung. Leske+Budrich, Opladen, 131-156, 2003.
- WAGENHUBER, W. : Zertifizierung von Katastrophenschutz Systemen - Warum die Zertifizierung von mobilen Hochwasserschutz-Systemen notwendig ist. In: Mobil oder Nicht-Mobil? Konventioneller und innovativer Hochwasserschutz in Praxis und Forschung. 46. Internationales Wasserbausymposium Aachen (IWASA), 7./8. Januar 2016. Shaker-Verlag, Aachen, 2016.
- WEYER, J.: Partizipative Technikgestaltung. Perspektiven einer neuen Forschungs- und Technologiepolitik; In: WEYER, J.; KIRCHNER, U.; RIEDL, L. und SCHMIDT, J. F. (Hrsg.): Technik, die Gesellschaft schafft: Soziale Netzwerke als Orte der Technikgenese. Edition Sigma, Berlin, 329-346, 1997.
- WÖFFLER, T.: Optimierung des Küsten- und Hochwasserschutzes auf den Halligen. Dissertation, Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, RWTH Aachen University, 2017. Online verfügbar: <http://publications.rwth-aachen.de/record/689764/files/689764.pdf>.
- WÖFFLER, T. & SCHÜTTRUMPF, H.: Risikoanalysen und Entwicklung neuer Küstenschutzkonzepte für die Halligen. In: Die Küste, Heft 84, 67-93, Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau, 2016. Online verfügbar: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/105213>.
- WÖFFLER, T. & SCHÜTTRUMPF, H.: Ein Sicherheitskriterium für Halligwarften. In: PORTH, M. und SCHÜTTRUMPF, H. (Hrsg.): Wasser, Energie und Umwelt, Springer Fachmedien, Wiesbaden, 467-475, 2017.

Der Einfluss von Vegetation auf Höhenänderungen in Salzwiesen. Abschlussbericht zum Verbundvorhaben Living CoastLab Halligen – Teil Hallig-C

Julia Bass und Michael Kleyer

Zusammenfassung

Die Halligen vor der Schleswig-Holsteinischen Festlandküste sind von großer soziokultureller und ökologischer Bedeutung. Gleichzeitig sind sie besonders durch einen steigenden Meeresspiegel bedroht, da sie größtenteils nur knapp über dem mittleren Tidehochwasser liegen und keine Möglichkeit der landwärtigen Migration haben. Die einzige Möglichkeit für ein langfristiges Fortbestehen der Halligen ist eine ausreichende Akkretion der Hallig-Salzwiesen. Die Veränderung der Oberflächenhöhe resultiert aus dem Höhenzuwachs durch Sedimentation und der Höhenabnahme durch Erosion und Verdichtung. Diese Prozesse werden durch abiotische und biotische Faktoren beeinflusst – die Interaktionen sind aber noch nicht ausreichend verstanden. Wir wollen daher mit Hilfe von multiplen Regressionsanalysen untersuchen, wie biotische Faktoren, ausgedrückt durch biologische Eigenschaften der Pflanzen die die Rauheit der Vegetation bestimmen, und die Entfernung zur Halligkante als abiotischer Faktor, die Akkretion der Hallig-Salzwiesen beeinflussen. Die mittlere Akkretion der Halligen Langeneß, Hooge und Nordstrandischmoor lag unter dem beobachteten Meeresspiegelanstieg. Dies stellt die Fähigkeit der Halligen mit dem Meeresspiegelanstieg mitzuwachsen in Frage. Es gab jedoch ausgeprägte lokale Unterschiede in der Akkretion. Die höchsten Akkretionen sind nahe der Salzwiesenkante bei hoher Vegetation. Diese Ergebnisse legen nahe, die Vegetation in Modellierungen zu den Entwicklungen der Salzwiesen zu berücksichtigen und die Vegetation als zusätzlich Möglichkeit der Regulation der Sedimentation zu nutzen.

Schlagwörter

Salzwiesen, traits, Akkretion

Summary

The Halligen off the mainland coast of Schleswig-Holstein are of great socio-cultural and ecological importance. At the same time, they are particularly threatened by rising sea levels, as they are only just above the mean high tide and have no possibility of landward migration. The only possibility for a long-term survival of the Hallig is a sufficient accretion of the Hallig salt marshes. The change in surface height results from a positive surface elevation change through sedimentation and a negative surface elevation change through erosion and compaction. These processes are influenced by abiotic and biotic factors. However, the interactions are not yet sufficiently understood. Therefore, we want to use multiple regression analyses to investigate how biotic factors, expressed by plant functional traits that determine vegetation roughness, and the distance to the Hallig edge as abiotic factor, influence the accretion of the Hallig salt marshes. The mean

accretion of the Halligen Langeneß, Hooge and Nordstrandischmoor was below the observed sea level rise. This questions the ability of the Halligen to survive under sea-level rise. However, there were pronounced local differences in accretion rates. The highest accretion rates were found close to the salt marsh edge in areas with high vegetation. These results suggest that the vegetation should be considered when modelling the development of the salt marshes and that vegetation could be used as an additional possibility to regulate sedimentation and thus enhance long-term adaption capacity of the salt marshes to sea-level rise.

Keywords

accretion, functional traits, salt marsh

Inhalt

1	Einleitung.....	2
1.1	Salzwiesen im Klimawandel.....	2
1.2	Biogeomorphologische Prozesse in Salzwiesen.....	3
1.3	Biologische Merkmale der Pflanzen.....	4
1.4	Merkmal-basierter Ansatz in Salzwiesen.....	4
2	Methoden.....	5
2.1	Untersuchungsgebiet.....	5
2.2	Datenerhebung.....	5
2.2.1	Akkretion.....	5
2.2.2	Biologische Merkmale.....	5
2.2.3	Abstand zur Halligkante.....	6
2.3	Statistische Analyse.....	6
3	Ergebnisse.....	10
4	Diskussion.....	11
4.1	Abiotische Faktoren.....	11
4.2	Biotische Faktoren.....	12
4.3	Implikationen für den Schutz der Halligen.....	12
5	Schriftenverzeichnis.....	13

1 Einleitung

1.1 Salzwiesen im Klimawandel

Salzwiesen sind weltweit durch einen steigenden Meeresspiegel bedroht (Murray et al. 2014; Watson et al. 2017). Der Weltklimarat IPCC (in press) sagt einen Anstieg des mittleren Meeresspiegels von 0,29 m bis 1,1 m bis zum Ende dieses Jahrhunderts voraus. Dies würde im gleichen Zeitraum zu einem Verlust von 20 bis 50 % der weltweiten Salzwiesen führen (Craft et al. 2009; McFadden et al. 2007). Besonders gefährdet sind die Salzwiesen der nordfriesischen Halligen, kleine Marschinseln die während vergangener Sturmflutereignisse

vom deutschen Festland abgetrennt wurden, da diese größtenteils nur knapp über dem mittleren Tidehochwasser (MThw) liegen (Schindler et al. 2014a). Dies ist besonders besorgniserregend, da die Halligen wichtige soziokulturelle und ökologische Funktionen erfüllen und eine wichtige Rolle beim Schutz der Schleswig-Holsteinischen Festlandküste spielen. Historisch gesehen haben Salzwiesen auf den Anstieg des Meeresspiegels mit Akkretion und/oder einer landwärtigen Migration reagiert (Donnelly und Bertness 2001). Auch bei dem momentanen Meeresspiegelanstieg werden die Salzwiesen nur fortbestehen können, wenn ihr Höhenwachstum das des Meeresspiegelanstiegs übersteigt, oder sie sich schneller landeinwärts ausdehnen können als die seewärtige Erosion stattfindet. Auf den Halligen ist dieser landwärtige Rückzug, genau wie an zahlreichen Festlandsalzwiesen die durch Infrastruktur wie Deiche und Siedlungen beschränkt sind, nicht möglich. Sie können ausschließlich durch eine ausreichende Akkretion fortbestehen (Morris et al. 2002).

1.2 Biogeomorphologische Prozesse in Salzwiesen

Die Zu- und Abnahme der Oberflächenhöhe von Salzwiesen wird durch Sedimentation und Erosion bzw. Bodenverdichtung bedingt. Abiotische Faktoren wie die Konzentration von Schwebstoffen und die Sedimentablagerung sind positiv mit einer Zunahme der Oberflächenhöhe korreliert (Anderson et al. 2011). Der Abstand zur Salzwiesenkante, die Entfernung zu Prielen, die Höhe sowie die Strömung und Wellen sind negativ mit einer Abnahme der Oberflächenhöhe korreliert (Cadot et al. 2014; Esselink et al. 1998; Kirwan et al. 2016; Kolker et al. 2010). Auch biotische Faktoren werden hinsichtlich ihres Einflusses auf die Höhenänderung von Salzwiesen diskutiert. Salzwiesen sind ein klassisches Beispiel für biogeomorphologische Ökosysteme, in denen die Wechselwirkungen zwischen Pflanzen und geomorphologischen Prozessen die Form und Funktion des Ökosystems bestimmen (Corenblit et al. 2015). Biogeomorphologische Ökosysteme, zu denen neben Salzwiesen auch Seegraswiesen, Küstendünen und Mangrovenwälder zählen, gehören zu den dynamischsten Ökosystemen weltweit. Je nach den regionalen und lokalen geologischen, geomorphologischen und bioklimatischen Gegebenheiten, haben sich unterschiedliche Landschaftsformen und Artzusammensetzungen entwickelt. Die Beziehungen zwischen den geomorphologischen Prozessen und den Lebewesen sowie ökologischen und evolutionären Prozessen haben aber sie alle gemein.

Es wird angenommen, dass die Salzwiesenvegetation die Akkretion auf drei Arten beeinflusst. Zum einen wird die Akkretion direkt verstärkt, da die Vegetation durch die Produktion organischer Substanz zur Bodenbildung beiträgt (Schile et al. 2014). Des Weiteren wird durch die Rauheit der oberirdischen Vegetationsstrukturen die Wellenenergie gedämpft und der Wasserfluss verlangsamt, was das Absinken von mineralischen Sedimenten verstärkt (Mudd et al. 2010). Zuletzt wird durch die Verringerung der Schleppspannung und die Verankerung der Wurzeln auch die Resuspension abgelagerter Sedimente auf Salzwiesenoberflächen sowie die direkte Erosion der Oberflächen reduziert (Francalanci et al. 2013; Temmerman et al. 2012).

1.3 Biologische Merkmale der Pflanzen

Die Einbeziehung der Vegetation in hydrodynamischen Modelle hat eine lange Tradition (Manning 1891; Strickler 1923), die Vegetation geht dann als Rauheitsbeiwert in die Berechnungen ein. Allerdings wird die Vegetation hier lediglich in grobe Kategorien eingeteilt, wie z.B. "kurzes Gras" oder "hohes Gras" für Wiesen Vorländer, was viel Raum für subjektive Interpretationen lässt (Chow 1959). Biologische Merkmale der Pflanzen (Lavorel et al. 1997) können ein mechanistischeres Verständnis der Rauheit ermöglichen, da sie messbare Eigenschaften der Pflanzen sind (Garnier et al. 2007; Kleyer 1999). Der von Díaz Cabido (1997) implementierte Ansatz in der Vegetationsökologie klassifiziert Pflanzen nicht anhand ihrer Phylogenie sondern anhand der Ausprägung ihrer biologischen Merkmale („traits“). Ein Merkmal ist jedes morphologische, physiologische oder phänologische vererbte Merkmal, das auf der individuellen Ebene von der Zelle bis zum gesamten Organismus messbar ist (Garnier et al. 2016). Aus den Merkmalskombinationen können Pflanzenstrategien abgeleitet und Pflanzen in "funktionelle Typen" gruppiert werden. Dies ist eine nicht-phylogenetische Gruppierung von Arten, die als Reaktion auf abiotische und biotische Bedingungen ähnliche Merkmale aufweisen, da das gleiche Maß an Stress und Störungen die gleiche Pflanzenstrategie auch bei taxonomisch unterschiedlichen Arten hervorruft.

1.4 Merkmal-basierter Ansatz in Salzwiesen

Bis jetzt haben nur wenige Studien einen merkmalsbasierten Ansatz verfolgt, um die biologisch vermittelte Akkretion und die Wellendämpfung in Salzwiesen zu bewerten (Bouma et al. 2005; Mudd et al. 2010). Diese Studien kommen zum Teil zu sehr unterschiedlichen Ergebnissen: So wurde z.B. festgestellt, dass die Wellendämpfung positiv mit der Blatt- und Sprosssteifigkeit (Paul et al. 2012; Rupprecht et al. 2017), der Vegetationshöhe (Rupprecht et al. 2017) sowie der Sprossdicke und der Sprossmasse (Paul et al. 2012) korreliert ist. Reef et al. (2018) hingegen fanden keinen signifikanten Einfluss der Vegetationshöhe und der Biomasse auf die Akkretion, obwohl sie bei Flut die Ablagerung von Sediment auf den Pflanzen und dem Boden nachweisen konnten. Sogar negative Auswirkungen der Vegetation auf die Akkretion von Salzwiesen wurden gefunden, wenn die Bewegungen der Pflanzen bei Einwirkung von Wellen und Strömungen die Oberfläche erodiert (Temmerman et al. 2007). Dies gilt für eine lückenhafte Vegetation, wie sie in den Pionierzonen und entlang der seewärtigen Salzwiesenkante zu finden ist. Widdows et al. (2008) wiesen zudem darauf hin, dass sich die kleinräumigen Effekte der Vegetation auf die Akkretion der Salzwiesen nicht zwingend auf großflächige Veränderungen in der Salzwiese übertragen lassen.

Diese gegensätzlichen Ergebnisse zeigen ein mangelndes Verständnis der Wechselwirkungen zwischen Vegetation und Akkretion in Salzwiesen. Das derzeitige fragmentierte Wissen bedingt daher, dass viele Modellierer biogeomorphologische Rückkopplungen in ihren Modellen zur Salzwiesenresistenz gegenüber dem Meeresspiegelanstieg nicht berücksichtigen.

Um ein besseres Verständnis der Wechselwirkungen zwischen Vegetation und Akkretion in Salzwiesen zu bekommen, soll diese Studie die Auswirkungen von biologischen Merkmalen auf die Akkretion in Salzwiesen der Halligen untersuchen. Folgenden Hypo-

thesen sollen getestet werden: (1) Die Akkretion der Hallig-Salzwiesen nimmt mit der Entfernung zur Salzwiesenkante ab. (2) Die Akkretion der Hallig-Salzwiesen wird durch eine raue Vegetation, die aus Pflanzen mit hoher Wuchshöhe, großem Stängel- und Blattmassen, steifen Stängeln und großen Blattflächen besteht, verstärkt.

2 Methoden

2.1 Untersuchungsgebiet

Um die Wirkung von biologischen Merkmalen auf die Akkretion von Hallig-Salzwiesen zu klären, haben wir insgesamt 113 Flächen auf den Halligen Hooge, Langeneß und Nordstrandischmoor untersucht. Die Flächen sind gleichmäßig über die Halligen und in unterschiedlichen Entfernungen zur Halligkante verteilt. Das Überflutungsregime auf den Halligen führt dazu, dass die Hallig-Salzwiesen größtenteils durch Arten der oberen Salzwiese charakterisiert sind.

2.2 Datenerhebung

2.2.1 Akkretion

Als erklärende Variable sollte die Akkretion in die Regressionsanalyse eingehen. Diese wurde auf den Halligen mit Sedimentfallen gemessen. Zum einen wurden Daten von Langeneß, Hooge und Nordstrandischmoor der Jahre 2010 bis 2013 genutzt (veröffentlicht in Schindler et al. (2014a)), zum anderen wurden Daten von Langeneß der Jahre 2016 und 2017 genutzt (Hache, unveröffentlichte Daten). Eine genaue Beschreibung der Methode ist Schindler et al. (2014b) zu entnehmen.

2.2.2 Biologische Merkmale

Als eine der unabhängigen Variablen sollten die biologischen Merkmale der Arten in die Regressionsanalyse eingehen. Dazu wurde die Vegetation in der Nähe der Sedimentfallen mit einer Frequenzanalyse auf einem $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ großen Quadrat kartiert. Die Nomenklatur folgte Jäger (2016). Um die Rauheit der Vegetation mit den funktionellen Merkmalen beschreiben zu können, wurden folgende Merkmale der Arten gemessen: Kronenhöhe (Abstand zwischen dem höchsten ausgewachsenen Blatt und der Bodenoberfläche; cm), Stängelmasse (mg), Blattmasse (mg), Blattfläche (mm^2) und spezifische Stängellänge (Länge eines Stängels geteilt durch seine Masse; mm/mg). Die spezifische Stängellänge beschreibt die Biegsamkeit des Stängels, da steifere Stängel dichtere, verholzte Strukturen ausbilden als flexible Stängel und daher eine höhere Masse pro Längeneinheit haben. Alle Merkmale der Salzwiesenarten wurden von zufällig ausgewählten Individuen im Feld nach den in Knevel et al. (2005), Pérez-Harguindeguy et al. (2013) und Kleyer et al. (2019) beschriebenen Standards gesammelt, wenn auch nicht auf den gleichen Flächen wie die Kartierungen. Die meisten Pflanzen wurden auf Festland- und Inselfalzwiesen in Niedersachsen gesammelt (Mellum, Spiekeroog, Leybucht, Norderland, Jadebucht). Wir gingen davon aus, dass

aufgrund der regionalen Nähe dieser Flächen zu den Halligen und ihres ähnlichen Umweltregimes Merkmale, die von Populationen in anderen Salzwiesen gesammelt wurden, den Populationen auf den Halligen zugeordnet werden konnten.

Die biologischen Merkmale werden an vollentwickelten Individuen gemessen, die kurz vor dem aussamen stehen. Um die lokale Biomasseentnahme durch Rinder und Schafe zu berücksichtigen, mussten die größenabhängigen Merkmalswerte entsprechend der Bewirtschaftungsintensität angepasst werden. Diese ging aus Interviews mit Landwirten und anderen Landnutzern hervor. Durch Beweidung, die auf den Halligen in unterschiedlichen Intensitäten vorkommt, werden die Pflanzenhöhe und die oberirdische Biomasse verringert (Davidson et al. 2017). Das "Hallig-Programm", ein Landesprogramm zur Unterstützung der Halligbauern bei gleichzeitiger Förderung des Naturschutzes, beschränkt die Anzahl der Vieheinheiten pro Hektar (GVE) auf ca. 1 GVE*ha⁻¹, so dass die Beweidungsintensität hauptsächlich mit den Weidetagen und nicht mit den Besatzzahlen variiert. Die Untersuchungsflächen wurden entsprechend der erfassten Weideintensität in drei Gruppen eingeteilt: nicht beweidet, mittlere Weideintensität (< 300 Weidetage*LSU) und hohe Weideintensität (> 300 Weidetage*LSU). Auf der Grundlage eigener Beobachtungen wurde die Kronenhöhe der Individuen, die auf Flächen mit mittlerer und hoher Beweidungsintensität wachsen, auf 14±0,5 cm bzw. 7±0,5 cm reduziert. Anschließend wurden Stängel- und Blattmasse zu gleichen Anteilen reduziert.

2.2.3 Abstand zur Halligkante

Als abiotischer Faktor für die Analyse wurden die Abstände zur Halligkante (m) aus Luftbildern bestimmt.

2.3 Statistische Analyse

Mithilfe einer multiplen linearen Regression wurde der Einfluss der Entfernung zur Halligkante sowie der Rauheit der Vegetation auf die Akkretion der Salzwiesen bestimmt. Um die Voraussetzungen des Modells zu erfüllen, wählten wir geeignete Transformationen unter Verwendung des "bestNormalize"-Pakets (Peterson 2017) (siehe Tabelle 1 für angewandte Transformationen).

Tabelle 1: Abhängige und unabhängige (abiotische und biotische) Variablen. Angegeben sind die funktionellen Eigenschaften der Pflanze, die in dieser Studie verwendeten Abkürzungen sowie die aggregierten Variabel, die auf einer Hauptkomponentenanalyse basieren (bei korrelierten biologischen Merkmalen) und die in die multiple lineare Regression einbezogen werden. Angegeben sind auch Einheiten und angewandte Transformation; ORQ, „ordered quantile normalization transformation“.

	Variable	Abk.	Aggr. Variable	Einheit	Transform.
abhängig	Akkretion	Akk		mm	-
unabhängig; abiotisch	Distanz zur Halligkante	Dist		m	boxcox
unabhängig;	Kronenhöhe	KH		cm	ORQ

biotisch	Stängelmasse	SBM		mg	boxcox
	Blattmasse	BBM	'Spross-	mg	arcsin
	Blattfläche	BF	masse'	mm ²	ORQ
	spezifische Stängellänge	SSL		mm/m g	ORQ

Hochkorrelierte biologische Merkmale wurden auf der Grundlage einer Hauptkomponentenanalyse (HKA) aggregiert (siehe Abbildung 1 und Tabelle 2), um Multikollinearität im Regressionsmodell zu vermeiden. Die oberirdischen Merkmale Stängelmasse (SBM), Blattmasse (BBM), spezifische Stängellänge (SSL) und Blattfläche (BF) wurden unter Verwendung der Werte der ersten HKA-Achse, die 66 % der Variation der vier Variablen erklärten, zur 'Sprossmasse' aggregiert. SBM, BBM und BF waren positiv und SSL negativ mit der ersten HKA-Achse korreliert. Somit weisen steigende Werte der HKA-"Sprossmasse" auf eine zunehmende Rauheit der Vegetation hin (die Werte für häufige Salzwiesenarten liegen zwischen +3,06 und -2,27; siehe Tabelle 1 und Abbildung 1). Salzwiesenarten mit hohen 'Sprossmasse'-Werten waren *Limonium vulgare* (Mill.), *Aster tripolium* (L.), *Spartina anglica* (C.E. Hubb.), *Atriplex prostrata* (D.C.) und *Halimione portulacoides* (L.). Die Kronenhöhe war nicht mit den anderen Merkmalen korreliert und erfüllte somit die Annahme der Unabhängigkeit und ging direkt, d.h. ohne Aggregation, in die statistische Analyse ein.

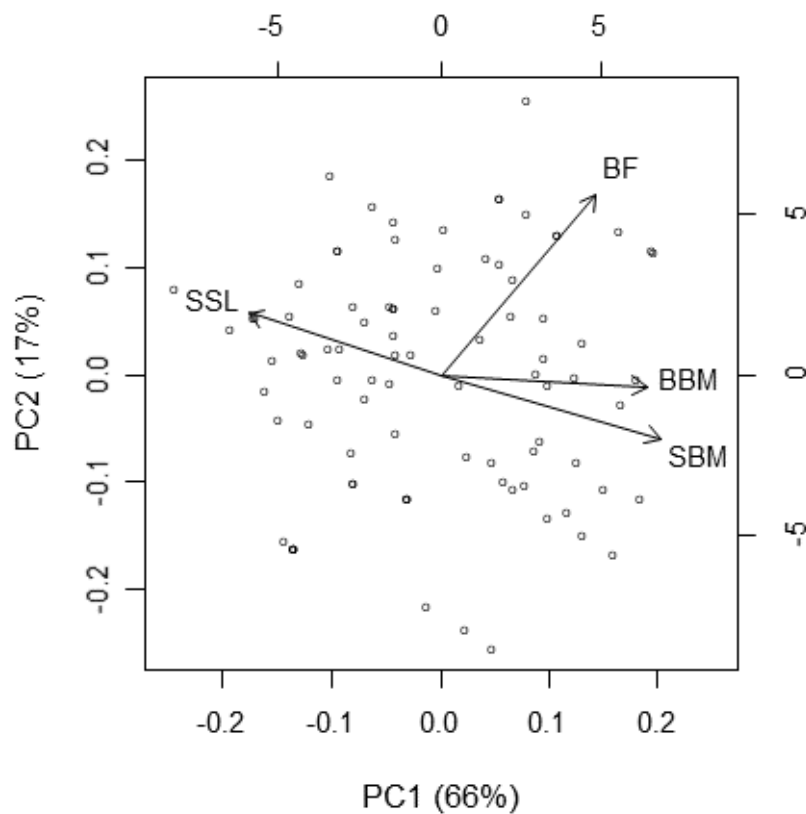


Abbildung 1: Zweidimensionale Illustrationen der Hauptkomponentenanalyse. Die Werte der ersten Achse (PC1) sind im Regressionsmodell als "Sprossmasse" enthalten. BBM, Blattmasse; SBM, Stängelmasse; SSL, spezifische Stängellänge; BF, Blattfläche.

Tabelle 2: Biologische Merkmale und die aggregierte Variable 'Sprossmasse' häufiger Salzwiesenarten entlang der Nordseeküste. KH, Kronenhöhe (cm); SBM, Stängelmasse (mg); BBM, Blattmasse (mg); SSL, spezifische Stängellänge (mm/mg); BF, Blattfläche (mm²).

Art	'Sprossmasse'	KH	SBM	BBM	SSL	BF
<i>Agrostis stolonifera</i> (L.)	-0,64	31,08	233,36	50,17	3,57	207,70
<i>Armeria maritima</i> (Mill.) Willd.	-0,38	5,88	197,30	353,11	3,94	68,30
<i>Artemisia maritima</i> (L.)	1,87	33,25	1765,65	675,61	0,66	208,50
<i>Aster tripolium</i> (L.)	2,89	60,84	10074,12	1174,96	0,60	663,90
<i>Atriplex littoralis</i> (L.)	2,37	70,13	17259,26	509,12	0,69	494,60
<i>Atriplex prostrata</i> (D.C.)	2,64	42,07	9519,62	2354,47	1,51	815,80
<i>Cochlearia danica</i> (L.)	-0,52	7,40	374,18	145,27	4,71	127,70
<i>Elytrigia atherica</i> (Link.)	1,41	38,90	1036,67	314,35	0,98	773,60
<i>Elytrigia repens</i> (L.) Gould	1,05	51,25	720,52	241,33	1,88	904,60
<i>Festuca rubra</i> (L.)	-0,96	37,42	144,79	228,60	6,86	126,10
<i>Festuca rubra litoralis</i> (G.F.W. Meyer)	-2,27	26,83	91,32	28,74	7,21	94,00
<i>Glaux maritima</i> (L.)	-1,97	8,10	72,94	67,14	4,48	17,00
<i>Halimione portulacoides</i> (L.) Aellen	2,51	28,71	9183,15	2869,74	0,95	186,20
<i>Juncus gerardii</i> (Lois.)	-1,36	24,72	129,48	54,96	5,04	139,40

<i>Limonium vulgare</i> (Mill.)	3,06	14,51	1193,61	4172,17	0,75	1681,30
<i>Lolium perenne</i> (L.)	0,35	34,18	620,65	99,19	2,16	461,60
<i>Lotus corniculatus</i> (L.)	-0,56	27,80	135,99	116,48	4,29	374,60
<i>Plantago maritima</i> (L.)	1,73	13,15	688,29	1239,13	3,08	1401,70
<i>Poa pratensis</i> (L.)	-0,52	31,09	213,71	86,00	4,42	285,70
<i>Potentilla anserina</i> (L.) Rydb.	-0,54	19,94	209,64	386,61	9,28	773,30
<i>Puccinellia maritima</i> (Huds.) Parl.	-1,17	28,82	209,93	62,52	4,63	76,20
<i>Salicornia europaea</i> (L.)	1,11	17,24	719,96	799,62	1,49	162,40
<i>Spartina anglica</i> (C.E. Hubb.)	2,83	44,27	1425,34	764,80	0,51	1380,20
<i>Spergularia maritima</i> (L.)	-1,15	26,75	548,28	126,09	1,93	46,55
<i>Spergularia media</i> (L.) C. Presl	-0,58	7,72	261,52	173,81	7,08	446,10
<i>Suaeda maritima</i> (L.) Dumort.	0,80	25,02	1602,82	494,34	1,27	32,00
<i>Trifolium repens</i> (L.)	-1,34	10,96	75,27	56,77	5,82	474,60
<i>Triglochin maritimum</i> (L.)	1,11	22,57	380,47	574,31	2,25	931,50
<i>Vicia cracca</i> (L.)	-0,87	27,50	112,19	162,58	4,51	142,10

Für jede Untersuchungsfläche wurde der mit der Abundanz der Arten gewichtete Mittelwert berechnet (community weighted mean, CWM; d.h. der durchschnittliche Merkmalswert oder aggregierte Score aller in einer Fläche vorkommenden Arten, gewichtet nach ihrer Häufigkeit; siehe Garnier et al. (2007)).

Um die besten Prädiktoren für die Akkretion auszuwählen, wurde eine stufenweise Variablenauswahl verwendet, um so das Modell mit dem niedrigsten AIC (Akaike Information Criterion) zu identifizieren. Alle statistischen Analysen wurden in R (Version 3.5.2) durchgeführt.

3 Ergebnisse

Die Salzwiese der drei untersuchten Halligen zeigten Akkretionen zwischen 0,4 bis 8,9 mm/a mit einem Mittelwert von 2,1 mm/a. Die Stärke der Akkretion konnte durch die Distanz zur Halligkante und durch die Kronenhöhe der Vegetation erklärt werden. Die Regression zeigte eine lineare Beziehung der Akkretion mit der Entfernung zur Halligkante und eine wannenförmige Beziehung mit der Kronenhöhe. Die Akkretion war auf Flächen nahe der Halligkante mit hoher Vegetation am höchsten (Abbildung 2 und Tabelle 3). Das Modell hat mit einem $R^2 = 0,30$ (korrigiertes $R^2 = 0,29$) eine moderate Anpassungsgüte (Cohen 2013) (Tabelle 3).

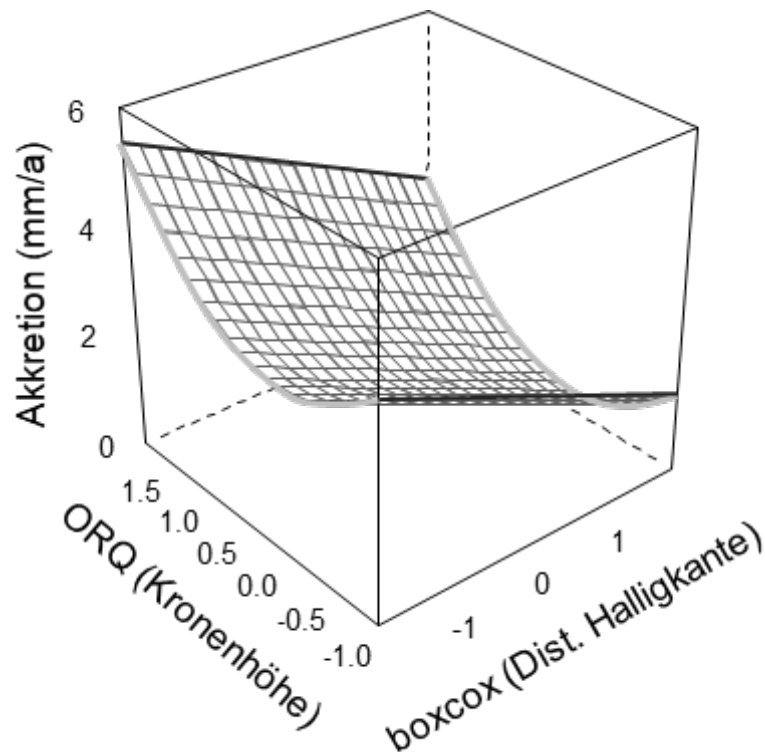


Abbildung 2: Faktoren, die die Akkretion der Halligsalzwiesen erklären. Die Entfernung zur Halligkante ist boxcox-transformiert, ein Wert von -1 entspricht 77 m, ein Wert von +1 entspricht 431 m. Die Kronenhöhe (KH) ist ORQ-transformiert, ein Wert von -1 entspricht 6,8 cm, ein Wert von +1 entspricht 28,2 cm.

Tabelle 3: Ergebnisse des multiplen linearen Regressionsmodells und der schrittweisen Variablenauswahl. Angegeben sind Schätzungen, Standardfehler (SE), t-Werte und Signifikanzniveaus. Signifikante p-Werte unter $\alpha = 0,05$ sind fettgedruckt dargestellt. Zusätzlich ist das Maß der Modellleistung gezeigt.

	Schätzungen	SE	t	p
Konstante	1.70	0.15	11.669	<0.001 ***
Distanz zur Halligkante	-0.68	0.14	-5.016	<0.001 ***
CH ²	0.82	0.19	4.195	<0.001 ***
Adj. $R^2 = 0.29$; $F(2,110) = 23.7$, $p < 0.001$				

4 Diskussion

Die Salzwiesen der Halligen sind besonders durch einen Anstieg des Meeresspiegels gefährdet, da sie nur knapp über dem mittleren Meeresspiegel liegen und keine Möglichkeit zur landwärtigen Migration haben. Um die Halligen langfristig zu erhalten, muss die Oberflächenhöhe der Salzwiesen durch Sedimentation stärker ansteigen als der Meeresspiegel. Der Interquartilsbereich der gemessenen Akkretion reicht von 0,9 bis 2,8 mm/a. Unter der Annahme ähnlicher Akkretions-Raten in der Zukunft, stellen diese Beobachtungen die Fähigkeit der untersuchten Salzwiesen in Frage, ausreichend zu wachsen, um den jüngsten Meeresspiegelanstieg (Wahl et al. 2011) und den vorhergesagten zukünftigen Meeresspiegelanstieg (IPCC in press) zu folgen.

Unsere Ergebnisse zeigen eine gewisse Variation in den Akkretionen der Untersuchungsflächen. Dies ist teilweise auf den starken stochastischen Beitrag von Sturmfluten zurückzuführen. Im Gegensatz zum deterministischen tageszeitlichen Gezeitenregime kann eine einzelne Sturmflut große Mengen an Sedimenten oder organischem Material ablagern. Die Akkretion kann je nach dem Zusammentreffen von Hochwasser, Wellenenergie, Wasserströmung und Windrichtung stark variieren (Hache et al. 2019). So könnten auch Flächen in einem Jahr von hoher, in einem anderen Jahr von geringer Sedimentation profitieren. Darüber hinaus hängt die Sedimentation von der Schwebstoffkonzentration im Meerwasser ab (French 2006), ein Parameter, den wir nicht in die Modelle einbeziehen konnten. Die räumlich-zeitliche Stochastizität der Überflutungsintensität und des Sedimenttransports könnte die moderate Anpassungsgüte unserer Modelle erklären. Dies ist in Übereinstimmung mit anderen Studien. So fanden beispielsweise Boorman et al. (1998) eine Korrelation zwischen der Vegetationshöhe und der Akkretion in einem Salzwiesengebiet aber nicht in einem anderen. Dennoch zeigen unsere Ergebnisse, dass die Akkretion mit dem Abstand zur Halligkante und mit den biologischen Eigenschaften der Salzwiesenvegetation zusammenhängt. Die Rauheit der Vegetation verstärkt die Sedimentation auf nichtlineare Weise und unterstützt daher den Anstieg der Oberflächenhöhe.

4.1 Abiotische Faktoren

Die Entfernung zur Halligkante war eine signifikante Erklärungsvariable für die Akkretion auf der Hallig, wobei die Akkretion weiter landeinwärts abnahm. Dies steht im Einklang mit früheren Arbeiten, die die höchste Sedimentation in der Nähe von Salzwiesenkanten zeigten (Cadol et al. 2014; Schindler et al. 2014a; Suchrow et al. 2012). Der Hauptgrund dafür dürfte eine starke Abnahme der Wellenenergie und der Stromstärke an der Grenze zwischen Wattenmeer und Salzwiesen sein, wo die Salzwiese die Energie dissipiert (Möllerund Spencer 2002). Allerdings tritt das Wasser bei Sturmfluten nicht an allen Stellen gleichstark über den Sommerdeich, so dass auch die Entfernung zu den Prielen einen Effekt haben wird (Temmerman et al. 2005), der hier aber nicht untersucht wurde. Damit wäre die Entfernung zu den Prielen wichtiger als die Entfernung zur Halligkante.

4.2 Biotische Faktoren

Die Rauheit der Vegetation erhöhte signifikant die Akkretion auf den Halligen. Die Rauheit ist eine zusammengesetzte Eigenschaft, die durch die Kronenhöhe, die Blattfläche und -masse, die Stängelmasse und die -biegsamkeit bestimmt wird.

Die Vegetation der Halligen ist hauptsächlich durch Vegetationsgemeinschaften der oberen Salzwiese mit unterschiedlicher Beweidungsintensität gekennzeichnet. Starke Beweidung verändert die Kronenhöhe, was zu einer niedrigen, homogenen Grasnarbe am Ende der Vegetationsperiode, wenn die Sturmflutsaison beginnt, führt. Brach liegende oder weniger stark beweidete Flächen können eine ähnliche Artenzusammensetzung wie die beweideten Teile aufweisen (hauptsächlich vom Typ *Juncus gerardii*-*Festuca rubra*), aber mit ausgewachsenen, oft alternden Stängeln. Daher war der wichtigste Rauheits-Indikator, der die Sedimentation auf Salzwiesen der Halligen erklärt, die Höhe der Vegetation. In Salzwiesen der Festlandküste, die einer natürlichen Sukzession von Pionierzone, Untere- und Obere Salzwiese mit sehr unterschiedliche Arten folgen, wird die Akkretion besser durch Stängelmasse, Blattmasse, Blattfläche und Biegsamkeit des Stängels beschrieben (Bass et al., unveröffentlichte Daten). Ähnliche Ergebnisse zum Einfluss der Vegetation auf die Akkretion in Salzwiesen fanden Bouma et al. (2010) die zeigten, dass starre und aufrechte Stängel zu mehr Sedimentation führten. Zudem konnte gezeigt werden, dass Beweidung zu einer Änderung der Vegetation führt und dies wiederum eine Änderung in der Sedimentation bedingt (Andersen et al. 2011; Stock 2011).

Unsere Ergebnisse unterstützen das Konzept der Ökosystemingenieure in biogeomorphologischen Ökosystemen wie den Salzwiesen. Lebensraumgestaltende Arten (Ecosystem engineers) sind in der Lage, die physikalischen Umweltbedingungen ihrer unmittelbaren Umgebung zu modifizieren, was wiederum in einer Vielzahl Habitat-relevanter Prozesse resultiert. Eine Salzwiesenart, die besonders für ihren Effekt auf geologische Prozesse bekannt ist, ist *Spartina* spp. (Christiansen et al. 2000). In unserer Studie wiesen die Stängелеigenschaften von *Spartina anglica* auf eine hohe Stammsteifigkeit (*S. anglica* SSL: 0,51 mm/mg; Mittelwert aller Salzwiesenarten: 3,39 mm/mg) und eine hohe Blattfläche (*S. anglica* LA: 1380,2 mm²; Mittelwert aller Salzwiesenarten: 514,19 mm²) hin.

4.3 Implikationen für den Schutz der Halligen

Unsere Studie untersucht den Einfluss von abiotischen und biotischen Faktoren auf die Akkretion der Hallig-Salzwiesen. Die mittlere jährlichen Akkretion auf den Halligen war niedriger als der jährliche Meeresspiegelanstieg (Wahl et al. 2011). Ob die Akkretion mit dem zunehmenden Meeresspiegelanstieg in Zukunft Schritt halten kann, bleibt daher fraglich. Ein besseres Verständnis der Sedimentation und der Erosion ist notwendig, um Vorhersagen über die zukünftige Akkretion zu treffen.

Die Akkretion wird auch durch biologische Merkmale der Pflanzen und die Entfernung zur Halligkante beeinflusst. Wir kommen zu dem Schluss, dass die Vegetation der Salzwiesen geeignet sein kann, die Akkretion zu modifizieren. Die Verwendung von biologischen Merkmalen anstelle von Artenidentitäten erhöhte die Vorhersagbarkeit, da Studien, die die Artenzusammensetzung als Prädiktor verwendeten, keine schlüssigen Auswirkungen auf die Akkretion fanden (Brown 1998; Silva et al. 2009). Empirisch gemessene biologische Merkmale beschreiben die Rauheit der Vegetation auf eine mechanistischere Art und Weise

als die in der Hydraulik weit verbreiteten Rauheitsbeiwerte der Gauckler-Manning-Strickler-Formel (Chow 1959). Unsere Regressionsfunktion erlaubt es, in Verbindung mit den biologischen Merkmalen der Salzwiesenarte und Vegetationskarten, die für die Wattenmeerregion verfügbar sind, räumlich explizite Akkretionen zu modellieren, um die Akkretion von Salzwiesen zu steuern. Auf den Halligen beispielsweise wäre eine niedrige Pflanzenhöhe nahe dem Halligrand und eine höhere Höhe in größerer Entfernung günstig, um Sediment vom Halligrand ins Halliginnere zu verteilen. Dies könnte durch die Beweidungsintensität bewusst gesteuert werden.

5 Schriftenverzeichnis

- Andersen, T. J.; Svinth, S. and Pejrup, M.: Temporal variation of accumulation rates on a natural salt marsh in the 20th century – the impact of sea level rise and increased inundation frequency. *Marine Geology*, 279(1-4), 178-187, 2011.
- Anderson, M. E.; Smith, J. M. and McKay, S. K.: Wave dissipation by vegetation: US Army Engineer Research and Development Center Coastal and Hydraulics, 2011.
- Boorman, L. A.; Garbutt, A. and Barratt, D.: The role of vegetation in determining patterns of the accretion of salt marsh sediment. *Geological Society, London, Special Publications*, 139(1), 389-399, 1998.
- Bouma, T.; De Vries, M.; Low, E.; Peralta, G.; Tánčzos, I. v.; van de Koppel, J. and Herman, P. M. J.: Trade-offs related to ecosystem engineering: A case study on stiffness of emerging macrophytes. *Ecology*, 86(8), 2187-2199, 2005.
- Bouma, T. J.; de Vries, M. B. and Herman, P. M. J.: Comparing ecosystem engineering efficiency of two plant species with contrasting growth strategies. *Ecology*, 91(9), 2696-2704, 2010.
- Brown, S. L.: Sedimentation on a Humber saltmarsh. *Geological Society*, 139(1), 69-83, 1998.
- Cadol, D.; Engelhardt, K.; Elmore, A. and Sanders, G.: Elevation-dependent surface elevation gain in a tidal freshwater marsh and implications for marsh persistence. *Limnology and Oceanography*, 59(3), 1065-1080, 2014.
- Chow, V. T.: Open-channel hydraulics. New York, USA: McGraw-Hill New York. 1959.
- Christiansen, T.; Wiberg, P. L. and Milligan, T. G.: Flow and sediment transport on a tidal salt marsh surface. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 50(3), 315-331, 2000.
- Cohen, J.: Statistical power analysis for the behavioral sciences: Academic press. 2013
- Corenblit, D.; Baas, A.; Balke, T.; Bouma, T. J.; Fromard, F.; Garófano-Gómez, V.; González, E.; Gurnell, A. M.; Hortobágyi, B. and Julien, F.: Engineer pioneer plants respond to and affect geomorphic constraints similarly along water-terrestrial interfaces world-wide. *Global Ecology and Biogeography*, 24(12), 1363-1376, 2015.
- Craft, C.; Clough, J.; Ehman, J.; Joye, S.; Park, R.; Pennings, S.; Guo, H. and Machmuller, M.: Forecasting the effects of accelerated sea-level rise on tidal marsh ecosystem services. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 7(2), 73-78, 2009.
- Davidson, K. E.; Fowler, M. S.; Skov, M. W.; Doerr, S. H.; Beaumont, N. and Griffin, J. N.: Livestock grazing alters multiple ecosystem properties and services in salt marshes: a meta-analysis. *Journal of Applied Ecology*, 54(5), 1395-1405, 2017.
- Díaz, S. and Cabido, M.: Plant functional types and ecosystem function in relation to global change. *Journal of Vegetation Science*, 8(4), 463-474, 1997.

- Donnelly, J. P. and Bertness, M. D.: Rapid shoreward encroachment of salt marsh cordgrass in response to accelerated sea-level rise. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 98(25), 14218-14223, 2001.
- Esselink, P.; Dijkema, K. S.; Reents, S. and Hageman, G.: Vertical accretion and profile changes in abandoned man-made tidal marshes in the Dollard estuary, the Netherlands. *Journal of Coastal Research*, 14(2), 570-582, 1998.
- Francalanci, S.; Bondoni, M.; Rinaldi, M. and Solari, L.: Ecomorphodynamic evolution of salt marshes: Experimental observations of bank retreat processes. *Geomorphology*, 195, 53-65, 2013.
- French, J.: Tidal marsh sedimentation and resilience to environmental change: exploratory modelling of tidal, sea-level and sediment supply forcing in predominantly allochthonous systems. *Marine Geology*, 235(1-4), 119-136, 2006.
- Garnier, E.; Lavorel, S.; Ansquer, P.; Castro, H.; Cruz, P.; Dolezal, J.; Eriksson, O.; Fortunel, C.; Freitas, H.; Golodets, C.; Grigulis, K.; Jouany, C.; Kazakou, E.; Kigel, J.; Kleyer, M.; Lehsten, V.; Lepš, J.; Meier, T.; Pakeman, R.; Papadimitriou, M.; Papanastasis, V. P.; Quested, H.; Quétier, F.; Robson, M.; Roumet, C.; Rusch, G.; Skarpe, C.; Sternberg, M.; Theau, J.-P.; Thébault, A.; Vile, D. and Zarovali, M. P.: Assessing the effects of land-use change on plant traits, communities and ecosystem functioning in grasslands: a standardized methodology and lessons from an application to 11 European sites. *Annals of Botany*, 99(5), 967-985, 2007.
- Garnier, E.; Navas, M.-L. and Grigulis, K.: *Plant functional diversity: Organism traits, community structure, and ecosystem properties*. Oxford, UK: Oxford University Press. 2016.
- Hache, I.; Karius, V.; Gutkuhn, J. and von Eynatten, H.: The development and application of an autonomous working turbidity measurement network: Assessing the spatial and temporal distribution of suspended particulate matter on tidal flats in the North Frisian Wadden Sea. *Continental Shelf Research*, 176, 36-50, 2019.
- IPCC. Summary for Policymakers. In H. O. Pörtner; D. C. Roberts; V. Masson-Delmotte; P. Zhai; M. Tignor; E. Poloczanska; K. Mintenbeck; M. Alegria; M. Nicolai; A. Okem; J. Petzold and B. W. Rama, N. M. (Eds.), *IPCC Intergovernmental Panel on Climate Change*: Geneva, Switzerland. in press.
- Jäger, E. J.: *Rothmaler-Exkursionsflora von Deutschland. Gefäßpflanzen: Grundband*. Heidelberg, Germany: Springer Spektrum. 2016.
- Kirwan, M. L.; Temmerman, S.; Skeechn, E. E.; Guntenspergen, G. R. and Fagherazzi, S.: Overestimation of marsh vulnerability to sea level rise. *Nature Climate Change*, 6(3), 253-260, 2016.
- Kleyer, M.: Distribution of plant functional types along gradients of disturbance intensity and resource supply in an agricultural landscape. *Journal of Vegetation science*, 10(5), 697-708, 1999.
- Kleyer, M.; Trinogga, J.; Cebrián-Piqueras, M. A.; Trenkamp, A.; Fløjgaard, C.; Ejrnæs, R.; Bouma, T. J.; Minden, V.; Maier, M. and Mantilla-Contreras, J.: Trait correlation network analysis identifies biomass allocation traits and stem specific length as hub traits in herbaceous perennial plants. *Journal of Ecology*, 107(2), 829-842, 2019.
- Knevel, I. C.; Bekker, R. M.; Kunzmann, D.; Stadler, M. and Thompson, K.: The LEDA traitbase collecting and measuring standards of life-history traits of the Northwest

- European Flora. Groningen, Netherlands: University of Groningen, Community and Conservation Ecology Group, 2005.
- Kolker, A. S.; Kirwan, M. L.; Goodbred, S. L. and Cochran, J. K.: Global climate changes recorded in coastal wetland sediments: empirical observations linked to theoretical predictions. *Geophysical Research Letters*, 37(14), L14706, 2010.
- Lavorel, S.; McIntyre, S.; Landsberg, J. and Forbes, T. D. A.: Plant functional classifications: from general groups to specific groups based on response to disturbance. *Trends in Ecology & Evolution*, 12(12), 474-478, 1997.
- Manning, R.: On the flow of water in open channels and pipes. *Transactions of the Institution of Civil Engineers of Ireland* 20, 161-207, 1891.
- McFadden, L.; Spencer, T. and Nicholls, R. J.: Broad-scale modelling of coastal wetlands: what is required? *Hydrobiologia*, 577(1), 5-15, 2007.
- Möller, I. and Spencer, T.: Wave dissipation over macro-tidal saltmarshes: Effects of marsh edge typology and vegetation change. *Journal of Coastal Research*, 36(1), 506-521, 2002.
- Morris, J. T.; Sundareshwar, P. V.; Nietch, C. T.; Kjerfve, B. and Cahoon, D. R.: Responses of coastal wetlands to rising sea level. *Ecology*, 83(10), 2869-2877, 2002.
- Mudd, S. M.; D'Alpaos, A. and Morris, J. T.: How does vegetation affect sedimentation on tidal marshes? Investigating particle capture and hydrodynamic controls on biologically mediated sedimentation. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 115, F03029, 2010.
- Murray, N. J.; Clemens, R. S.; Phinn, S. R.; Possingham, H. P. and Fuller, R. A.: Tracking the rapid loss of tidal wetlands in the Yellow Sea. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 12(5), 267-272, 2014.
- Paul, M.; Bouma, T. J. and Amos, C. L.: Wave attenuation by submerged vegetation: combining the effect of organism traits and tidal current. *Marine Ecology Progress Series*, 444, 31-41, 2012.
- Pérez-Harguindeguy, N.; Díaz, S.; Garnier, E.; Lavorel, S.; Poorter, H.; Jaureguiberry, P.; Bret-Harte, M. S.; Cornwell, W. K.; Craine, J. M.; Gurvich, D. E.; Urcelay, C.; Veneklaas, E. J.; Reich, P. B.; Poorter, L.; Wright, I. J.; Ray, P.; Enrico, L.; Pausas, J. G.; de Vos, A. C.; Buchmann, N.; Funes, G.; Quétier, F.; Hodgson, J. G.; Thompson, K.; Morgan, H. D.; ter Steege, H.; Sack, L.; Blonder, B.; Poschlod, P.; Vaieretti, M. V.; Conti, G.; Staver, A. C.; Aquino, S. and Cornelissen, J. H. C.: New handbook for standardised measurement of plant functional traits worldwide. *Australian Journal of Botany*, 61(3), 167, 2013.
- Peterson, R. A.: Estimating normalization transformations with bestNormalize. 2017.
- Reef, R.; Schuerch, M.; Christie, E. K.; Möller, I. and Spencer, T.: The effect of vegetation height and biomass on the sediment budget of a European saltmarsh. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 202, 125-133, 2018.
- Rupprecht, F.; Möller, I.; Paul, M.; Kudella, M.; Spencer, T.; Van Wesenbeeck, B. K.; Wolters, G.; Jensen, K.; Bouma, T. J. and Miranda-Lange, M.: Vegetation-wave interactions in salt marshes under storm surge conditions. *Ecological Engineering*, 100, 301-315, 2017.
- Schile, L. M.; Callaway, J. C.; Morris, J. T.; Stralberg, D.; Parker, V. T. and Kelly, M.: Modeling tidal marsh distribution with sea-level rise: evaluating the role of vegetation, sediment, and upland habitat in marsh resiliency. *Plos One*, 9(2), e88760, 2014.

- Schindler, M.; Karius, V.; Arns, A.; 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. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 151, 246-255, 2014a.
- 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, 2014b.
- Silva, H.; Dias, J. and Caçador, I.: Is the salt marsh vegetation a determining factor in the sedimentation processes? *Hydrobiologia*, 621(1), 33-47, 2009.
- Stock, M.: Patterns in surface elevation change across a temperate salt marsh platform in relation to sea-level rise. *Coastline Reports*, 17(3), 33-48, 2011.
- Strickler, A.: Beiträge zur Frage der Geschwindigkeitsformel und der Rauheitszahlen für Ströme, Kanäle und geschlossene Leitungen. Bern, Schweiz: Eidg. Amt für Wasserwirtschaft, 1923.
- Suchrow, S.; Pohlmann, N.; Stock, M. and Jensen, K.: Long-term surface elevation changes in German North Sea salt marshes. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 98, 71-83, 2012.
- Temmerman, S.; Bouma, T. J.; Govers, G.; Wang, Z. B.; De Vries, M. B. and Herman, P. M. J.: Impact of vegetation on flow routing and sedimentation patterns: three-dimensional modeling for a tidal marsh. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 110, F04019, 2005.
- Temmerman, S.; Bouma, T. J.; Van de Koppel, J.; Van der Wal, D.; De Vries, M. B. and Herman, P. M. J.: Vegetation causes channel erosion in a tidal landscape. *Geology*, 35(7), 631-634, 2007.
- Temmerman, S.; Moonen, P.; Schoelynck, J.; Govers, G. and Bouma, T. J.: Impact of vegetation die-off on spatial flow patterns over a tidal marsh. *Geophysical Research Letters*, 39(3), L03406, 2012.
- 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 Dynamics*, 61(5), 701-715, 2011.
- Watson, E. B.; Wigand, C.; Davey, E. W.; Andrews, H. M.; Bishop, J. and Raposa, K. B.: Wetland loss patterns and inundation-productivity relationships prognosticate widespread salt marsh loss for southern New England. *Estuaries and Coasts*, 40(3), 662-681, 2017.
- Widdows, J.; Pope, N. D. and Brinsley, M. D.: Effect of *Spartina anglica* stems on near-bed hydrodynamics, sediment erodability and morphological changes on an intertidal mudflat. *Marine Ecology Progress Series*, 362, 45-57, 2008.

Messung, Bewertung und Einflussfaktoren der Trübung in der Wassersäule - Schlussfolgerungen für einen die Sedimentakkumulation optimierenden Küstenschutz auf Hallig Langeneß

Ingo Hache, Volker Karius und Hilmar von Eynatten

Kurzfassung

Auf Hallig Langeneß wurde ein Trübungsmessnetzwerk errichtet, welches aus 6 Stationen im Watt und zwei Stationen auf der Hallig von Februar 2017 bis März 2020 insbesondere in den Wintermonaten kontinuierlich Trübedaten geliefert hat. Ausgehend von den meteorologischen Parametern, wie Windrichtung und Windgeschwindigkeit, konnten die zeitliche und räumliche Variabilität des SPM (suspended particulate matter) um die Hallig bestimmt werden.

Es wurden bis zu 11 „Land unter“ im Zeitraum 12/2017-02/2020 einzeln erfasst und die Sedimentakkumulation auf der Hallig zeitgleich bestimmt. Mit Sedimentfallen konnten Sedimentakkumulationsraten hinter unterschiedlich hohen Halligrauhstreifen („Igel“) gemessen werden. Im Ergebnis konnten SPM Gehalte vor der Halligkante gemessen werden, die zwar potentiell zur Sedimentakkumulation auf der Hallig beitragen könnten aber bedingt durch die jeweiligen Küstenschutzmaßnahmen nur teilweise ausgeschöpft werden.

Der Einfluss der Halligrauhstreifen konnte durch Messung einerseits und Sedimenttransportmodellierung andererseits quantifiziert werden. Eine Anpassung der Küstenschutzbauwerke im Süden der Hallig hat das Potential, die Sedimentakkumulation auf der Hallig zu verdoppeln.

Schlagwörter

Trübungsmessung, SPM, Sedimentakkumulation, Sedimenttransportmodellierung, Deckwerk, Halligen

Summary

An autonomously operating network for turbidity measurements was developed and installed on Hallig Langeneß. Six units were placed on the tidal flats in front of the Hallig and additional two units were installed on the Hallig. Data were generated from February 2017 until March 2020. The spatial and temporal variability of the turbidity was assessed under consideration of meteorological and hydrodynamic parameters. Up to 11 inundations events were recorded between December 2017 and February 2020 and for each event the sediment accumulation was measured with sediment traps on the Hallig. The influence of the coastal revetments, especially the height of the revetments, could be quantified by sediment trapping and sediment transport modelling. The suspended particulate matter which is available outside of the Hallig is only partially transported onto the Hallig during an inundation. An adjustment of the coastal revetments in the south of Langeneß may potentially increase the sediment accumulation by a factor of two.

Keywords

Turbidity measurement, Suspended particulate matter, SPM, sediment transport modelling, revetment, Halligen

Inhalt

1	Einleitung.....	2
2	Material und Methoden.....	4
2.1	Trübungsmesssystem.....	4
2.2	Kalibration der Trübesensoren.....	7
2.3	Sedimentfallen.....	8
2.4	Hydrologische und Meteorologische Daten.....	9
2.5	Korngrößenkartierung.....	9
2.6	Sedimenttransportmodell.....	10
3	Ergebnisse.....	10
3.1	Trübedaten.....	11
3.2	Sedimentakkumulation.....	14
3.3	Sedimentverfügbarkeit.....	17
3.4	Sedimenttransportmodellierung.....	20
4	Schlussfolgerung und weiterer Forschungsbedarf.....	23
5	Danksagung.....	24
6	Schriftenverzeichnis.....	24

1 Einleitung

Die nordfriesischen Halligen (Abbildung 1) sind ein weltweit einzigartiges Ökosystem. Menschen, Tiere und Pflanzen bilden dort eine über mehrere Jahrhunderte gewachsene Einheit, die mitten im National Park Schleswig-Holsteinisches Wattenmeer liegt. Seit 2009 gehört das Wattenmeer zum UNESCO Weltnaturerbe und die Halligen zur Entwicklungszone des UNESCO Biosphärengebietes Schleswig-Holsteinisches Wattenmeer und Halligen. Der beschriebene Status dieser Region rechtfertigt vielfältige Forschungsaktivitäten, die auf den Erhalt des Gebietes zielen, aber auch grundlegende Erkenntnisse zu dem Verhalten von unbedeichten Küstenvorländern im Kontext von sich ändernden Wasserständen liefern. Der Fokus dieser Arbeit liegt auf den Höhenänderungen der Landoberfläche, die durch die Ablagerung von Sedimenten hervorgerufen werden. Zumeist in den Wintermonaten kommt es auf den größeren Halligen bis zu 15 mal zu „Land unter“ genannten Überflutungen (Schindler und Willim 2015). In den Projekten SAHall (Deicke et al. 2009) und ZukunftHallig (Schindler 2014; Schindler et al. 2014b; Schindler et al. 2014a) konnten die Sedimentakkumulation und die sedimentationsbedingten Höhenänderungen (Aufwuchsraten) für ausgewählte Halligen quantifiziert werden. Die Aufwuchsraten betragen demnach 1-3 mm/Jahr und können somit den Anstieg des regionalen mittleren Tidehochwassers (MTHW) derzeit nicht kompensieren. Es ist möglich, dass

bei weiter steigendem globalen Meeresspiegel die Wasserstände bei Extremereignissen im Wattenmeer sogar überproportional ansteigen werden (Arns et al. 2015a). Deshalb stellt sich die Frage, wie die Halligen mittelfristig gegenüber dieser Gefahrenlage abgesichert werden sollen. Während eines „Land unters“ wird das Überleben von Mensch und Vieh durch die Warften (auf Langeneß Warfen) sichergestellt. Dies sind Wohnhügel, deren Oberfläche ca. 5m über MTHW liegt. Die notwendige Höhe der Warften hängt nicht nur von den Extremwasserständen sondern auch vom Wellenauflauf während eines Sturmes ab. Der Wellenauflauf hängt dabei wiederum auch von dem Wasserstand auf der Hallig über der Geländeoberkante (GOK) ab. Insofern trägt ein Sedimentaufwuchs zu einer verbesserten Sicherheit für Mensch und Vieh auf den Halligen bei. Drei grundsätzlich unterschiedliche Strategien zur Sicherung des Habitats Hallig erscheinen denkbar.

- Erhöhung der Küstenschutzbauten bzw. Bau von Deichen (Minimierung des Überflutungsrisikos)
- Erniedrigung der Küstenschutzbauten (Erhöhung der Anzahl von „Land untern“ und damit der Sedimentation)
- Künstliche Erhöhung der Halligoberfläche durch Aufspülung von Sediment
- Steigerung des Sedimenttransportes auf die Hallig während eines „Land unters“ ohne die Anzahl von „Land untern“ nennenswert zu erhöhen.

Die im Rahmen des BMBF geförderten Forschungsprojekts „Living Coast Lab“ vom Geowissenschaftlichen Zentrum, Göttingen, Abteilung Sedimentologie/Umweltgeologie auf der Hallig Langeneß durchgeführten Arbeiten dienen dazu festzustellen, ob es ein ungenutztes Potential von Sedimenten gibt, die während eines „Land unter“ auf die Hallig transportiert werden könnten und damit zur Erhöhung der Halligoberfläche gegenüber dem Meeresspiegel beitragen. Als Arbeitshypothese wird angenommen, dass dieses Potential wegen der aktuellen Strategien zum Küstenschutz und der momentanen Wasserhaltung auf der Hallig nicht voll ausgeschöpft werden kann, weil die Trübstoffe nicht vollständig auf die Hallig gelangen oder dort nicht abgelagert bzw. wieder erodiert werden. Im Einzelnen sollen folgende Fragen beantwortet werden:

- Wie lassen sich Trübedaten um Langeneß mit hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung erfassen, um durch geeignete Kalibration Feststoffgehalte (SPM) zu bestimmen
- Wie werden SPM Gehalte durch meteorologische und hydrodynamische Bedingungen beeinflusst
- Wie korreliert SPM mit der Sedimentakkumulation auf der Hallig
- Welchen Einfluss nehmen die Küstenschutzbauwerke auf die Sedimentakkumulation
- Welche Maßnahmen können die Sedimentakkumulation auf der Hallig erhöhen

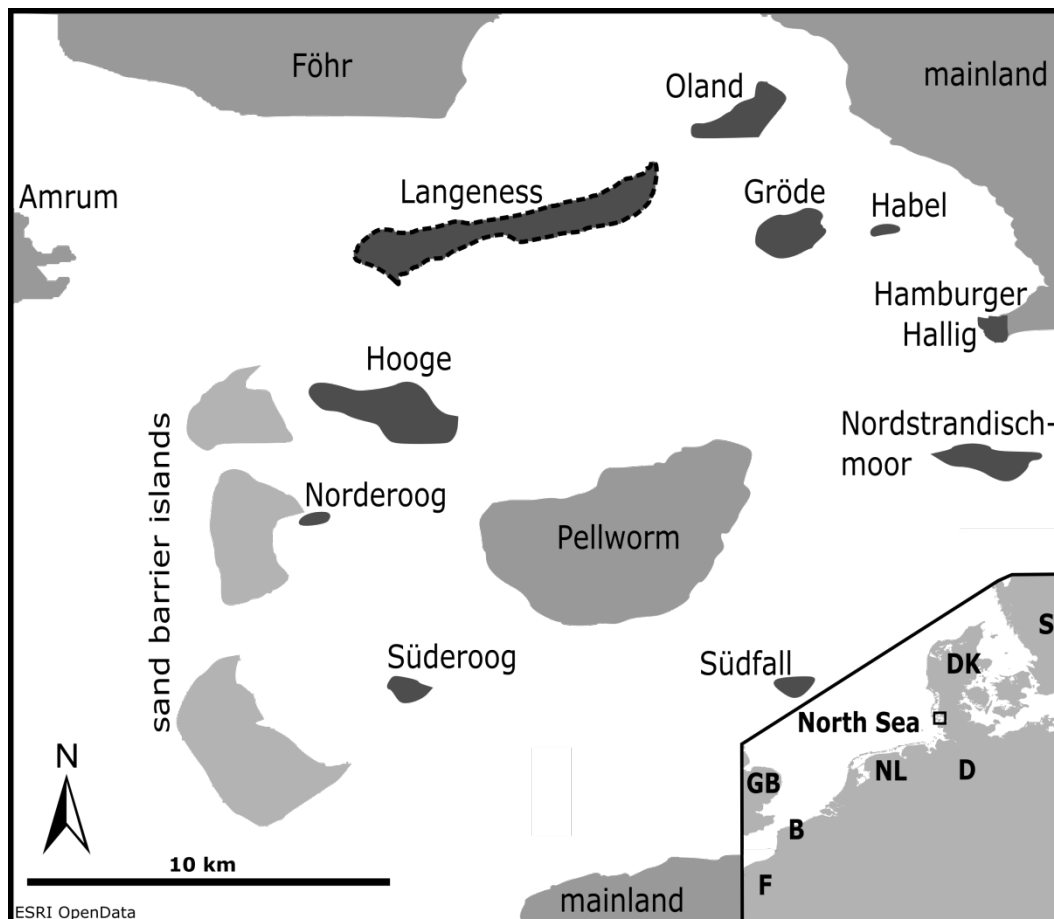


Abbildung 1: Karte des Arbeitsgebietes. Die Halligen sind in dunkelgrau dargestellt. Die Arbeiten fanden ausschließlich auf Hallig Langeneß (gestrichelt) statt (nach Hache et al. 2019).

2 Material und Methoden

Zur Beantwortung der Forschungsfragen wurde im Winter 2016/2017 ein Trübungemesssystem entwickelt und um und auf Langeneß aufgebaut. In der Folge wurden schwerpunktmäßig in den Wintermonaten kontinuierliche Trübungemessungen durchgeführt. Durch Sedimentsammler wurden bei „Land unter“ Bedingungen Sedimente in situ gewonnen, die zur Kalibration der Trübungemessdaten verwendet wurden. Zeitgleich wurde mit Sedimentfallen an ausgewählten Punkten der Hallig die Sedimentakkumulation erfasst. Dabei wurden „Land unter“ Ereignisse jeweils separat beprobt. Mit einem numerischen Detailmodell wurden schließlich verschiedene Szenarien mit unterschiedlichen Änderungen an den bestehenden Küstenschutzbauwerken und deren Einfluß auf die potentielle Sedimentakkumulation simuliert.

2.1 Trübungemesssystem

Das Messsystem besteht aus 6 autonom arbeitenden Messeinheiten, die im Watt innerhalb der Bühnenfelder, die Langeneß umgeben installiert sind. Auf der Hallig befinden sich zwei weitere Messstationen, die während eines „Land unters“ Daten von dem Überflutungswasser liefern. Alle Stationen messen im Minutenabstand je einen Wert und zwar

in der Phase, in der sich der Messsensor vollständig unter Wasser befindet. Dies wird durch einen Wasserstandssensor gewährleistet. Sobald der Wasserstand unter das Niveau des Trübungssensors gesunken ist, endet der jeweilige Messzyklus und die Daten werden per Funk (ISM Band, 869 MHz) zu einer Zentralstation in der Halligmitte übertragen. Abbildung 2 zeigt exemplarisch eine Messstation.

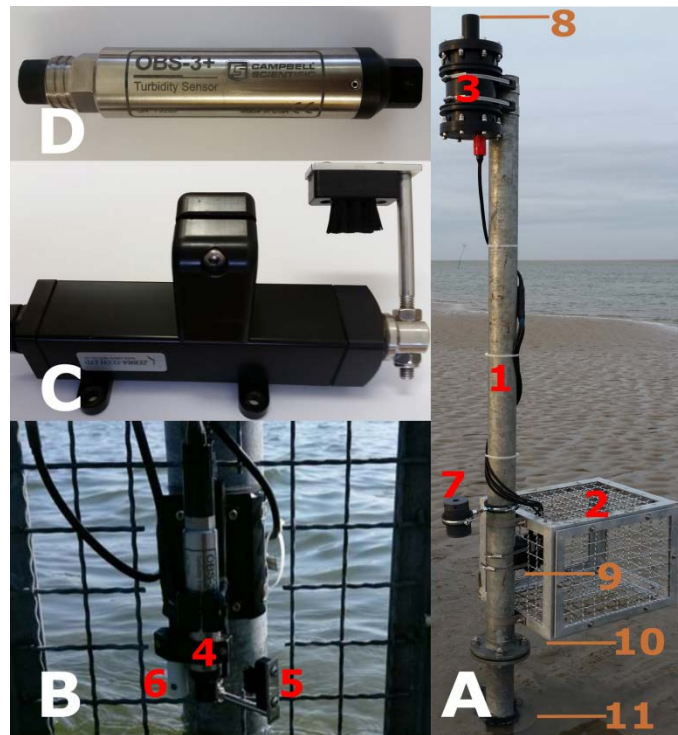


Abbildung 2: Messeinheit bestehend aus Pfahl (1), Schutzkäfig mit Sensoreinheit (2), Elektronik (3), OBS3+ Trübungssensor (4), Wischereinheit (5), Wasserstandssensor (6) und Sedimentsammler (7). Die Ziffern 8-11 bezeichnen Höhenmarken, die gegen NHN nivelliert wurden (nach Hache et al. 2019).

Der Trübungssensor ist ein OBS-3+ (campbell© scientific) und arbeitet nach dem IR Rückstreu Prinzip (Optical Back Scatter). Die Daten werden bis zur Funkübertragung im Datenlogger CR200X (campbell© scientific) gespeichert, der sich zusammen mit der Funkeinrichtung im Elektronikgehäuse befindet. Die Reinigungseinheit wischt zweimal zu Beginn des Messzyklus über den OBS Sensor, um anhaftenden Schmutz zu entfernen. Von der Zentralstation werden die Daten über ein GSM Modul an einen Server übertragen, von dem sie in Echtzeit abrufbar sind. Eine weitergehende Beschreibung geben Hache et al. (2019).

Eine Übersicht über die Lage aller Stationen und sonstigen Messeinrichtungen ist in Abbildung 3 dargestellt.

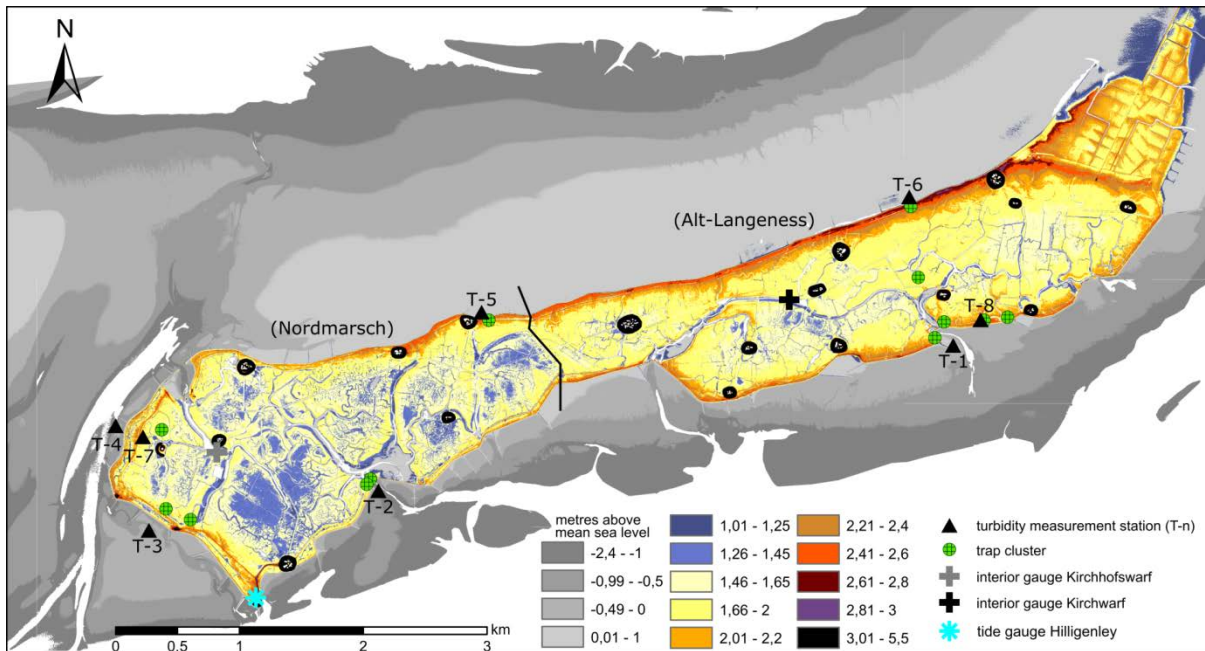


Abbildung 3: Digitales Höhenmodell von Langeneß mit Standorten von Pegeln, Sedimentfallen und Trübungsmessstationen (nach Hache et al. 2019).

Da die Zeiten der Wasserüberdeckung der Sensoren standortabhängig erheblich voneinander abweichen, sind die Gesamtmesszeiten der einzelnen Stationen sehr unterschiedlich (Tabelle 1). Die Wattflächen liegen im Norden der Hallig um bis zu 2 m höher als im Süden, was sich in den deutlich geringeren Messzeiten der Stationen T-5 und T-6 widerspiegelt. Die Station T-4 liegt direkt an einem Ausläufer der südlich an der Hallig vorbeilaufenden Prieles Süderau (Abbildung 3) und weist daher die längste Messdauer auf. Die Anzahl der erfassten „Land unter“ variiert geringfügig zwischen den Stationen T-1 bis T-6 was an gelegentlichen Ausfällen wegen Wartung zu erklären ist. Auf der Hallig erfassen die Stationen T-7 und T-8 nur die „Land unter“, deren Wasserstand ausreicht, um den OBS Sensor zu bedecken. Es wurden daher insgesamt 11 „Land unter“ vollständig erfasst.

Tabelle 1: Messzeiten und Anzahl der erfassten „Land unter“ pro Messtation

Station	Messzeit [Tage]	Anzahl „Land unter“
T-1	253	16
T-2	304	13
T-3	305	15
T-4	392	15
T-5	90	17
T-6	74	17
T-7	2	13
T-8	2	11

2.2 Kalibration der Trübesensoren

OBS Sensoren müssen für eine möglichst präzise Messung von SPM Werten regelmäßig mit dem in situ vorhandenen Material kalibriert werden (Sternberg et al. 1986; Downing und Beach 1989; Kineke und Sternberg 1992), da die gemessenen Trüberohdaten stark von der Korngröße der rückstreuenden Partikel abhängen (Down und Lehr 2005; Downing 2006). Dabei reicht es nicht aus, abgelagertes Sediment vor Ort zu beproben, da dieses teilweise um bis zu 5 mal größer ist als das unter Messbedingungen suspendierte Material (Poerbandono und Mayerle 2005). Eigene Messungen konnten dies bestätigen.

Für eine regelmäßige Kalibration der Trübesensoren werden Sedimente benötigt, die den vor Ort in der Wassersäule vorhandenen Partikeln entsprechen. Diese Sedimente wurden in mehreren Sedimentsammlern aufgefangen, die in Höhe des OBS Sensors an jeder Messstation angebracht wurden (Abbildung 2 und Abbildung 4). Die Sedimentsammler wurden nach dem Design IM+P (Ingenieur Büro Dr.-Ing. Manzenrieder und Partner GbR, <http://www.imp-ol.de>) in der Werkstatt des GZG gefertigt.



Abbildung 4: Sedimentsammler nach Manzenrieder & Partner (nach Hache et al. 2019). A: Skizze des Sammlers mit innerem Prallrohr (gestrichelt), B: geschlossener Sammler, C: geöffneter Sammler

Zusätzlich zu den Sedimentsammlern in Höhe der OBS Sensoren (Bottom) wurde jeweils ein Sammler am oberen Ende des Messpfahls befestigt (Top) um die Homogenität der Wassersäule bezüglich der Korngröße suspendierter Partikel zu untersuchen.

Die Sedimentsammler haben eine Kapazität von 350 cm³. Durch 6 kreisförmig angeordnete 8 mm Einlassöffnungen im nach oben abgeschlossenen Sammler werden Partikel eingesammelt und sedimentieren im Sammler. Das Aspektverhältnis der zylindrischen Sammler beträgt 3.6 und erfüllt damit die Empfehlungen von Gardner (1980a, 1980b) um Resuspendierung weitestgehend zu vermeiden. Unter normalen Wetterbedingungen konnten die Sammler ca. einen Monat betrieben werden, bis sie geleert werden mussten. Während Sturmflutbedingungen waren die Sammler innerhalb weniger Stunden bis Tagen gefüllt. Um die Sensoren mit den entsprechenden Sedimenten kalibrieren zu können, wurden die Sammler jeweils vor und nach jedem „Land unter“ beprobt.

Die eigentliche Kalibration der individuellen Sensoren wurde unter Laborbedingungen in einem zylindrischen Tank durchgeführt, in dem eine Suspension kontinuierlich umge-

wälzt wurde, und der definierte Aliquote des zu kalibrierenden Sedimentes hinzugefügt wurden (Hache et al. 2019). Dieser Vorgang wurde für nahezu jedes beprobte „Land unter“ wiederholt. Die ermittelten Kalibrationsgeraden sind exemplarisch in Abbildung 5 dargestellt.

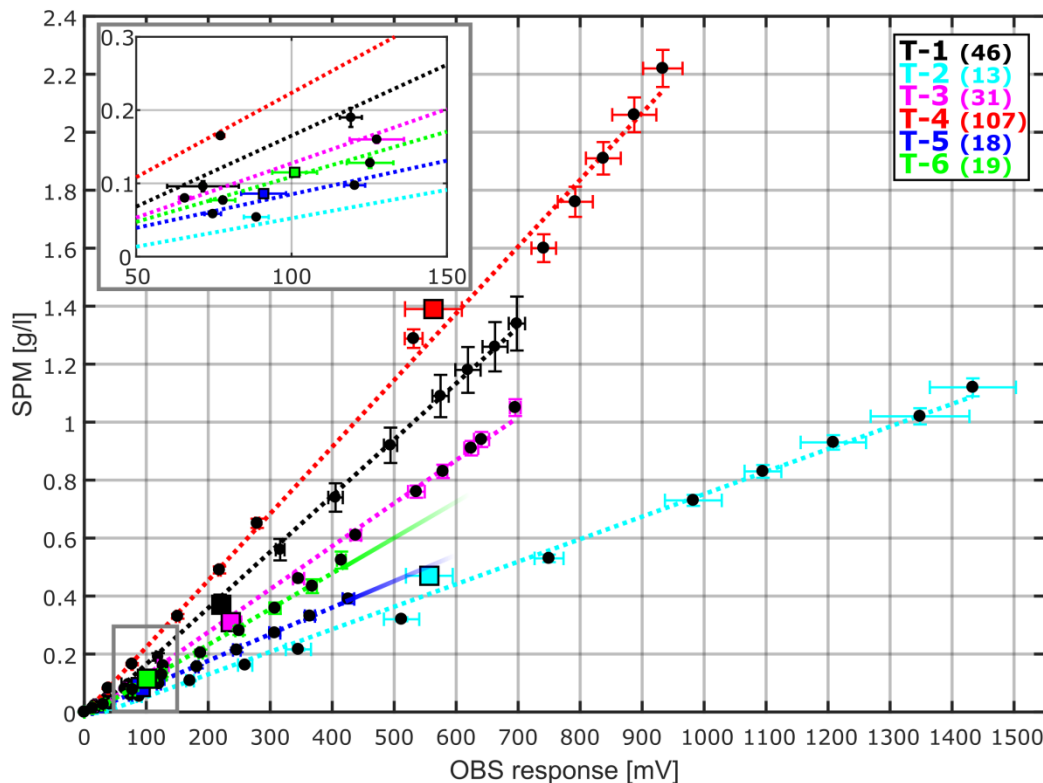


Abbildung 5: Kalibrationsergebnis für 6 Messstationen. Die Geraden decken den maximal vorkommenden SPM Bereich ab (nach Hache et al. 2019).

2.3 Sedimentfallen

In den Wintermonaten wurde die Sedimentakkumulation in ausgewählten Bereichen der Hallig im räumlichen Bezug zu den Trübungsmessstellen mit Sedimentfallen bestimmt. Dazu wurden 14 Fallenfelder mit jeweils fünf 1L LDPE Flaschen sowie 5 Kunstrasenmatten angelegt (Abbildung 6). Eine ausführliche Beschreibung der Methode geben Schindler et al. (2014b). Die Fallenfelder wurden ca. 10-500 m von der Halligkante entfernt installiert, in der Regel zwischen Halligrauhstreifen (Igel) und Sommerdeich (Abbildung 3), zusätzlich zwei Fallenfelder an den Trübungsmessstationen T-7 und T-8 und zwei Cluster jeweils im östlichen und westlichen Teil von Langeneß, welche schon im Projekt Zukunft Hallig betrieben wurde und repräsentativ für die durchschnittliche Sedimentakkumulation in diesem Bereich (Alt-Langeneß) sind (Schindler 2014).

In Bereichen, wo unterschiedlich hohe Igel aufeinandertreffen, wurden zwei Felder jeweils hinter dem höheren und dem niedrigeren Igel angelegt. Die Flaschen wurden unmittelbar vor einem „Land unter“ geleert und unmittelbar nach dem „Land unter“ beprobt. Die Matten wurden jeweils nach Ablauf einer Sturmflut Saison (Oktober - April) beprobt. Im Labor wurden die Sedimente entsalzt, getrocknet, gewogen, der Glühverlust bestimmt und die Partikelgrößen analysiert. Die Korngrößenanalytik wurde mit einem

Laser Particle Sizer (LS 13320 Fa. Beckman&Coulter) durchgeführt. Dabei wurde ein Messbereich von 0.4-2000 nm gemessen und die Beugungsdaten mit dem Fraunhofer Model in Kornverteilungen umgerechnet. Weitere Informationen zu den angewendeten Methoden geben Schindler et al. (2014b) und Hache et al. (eingereicht).

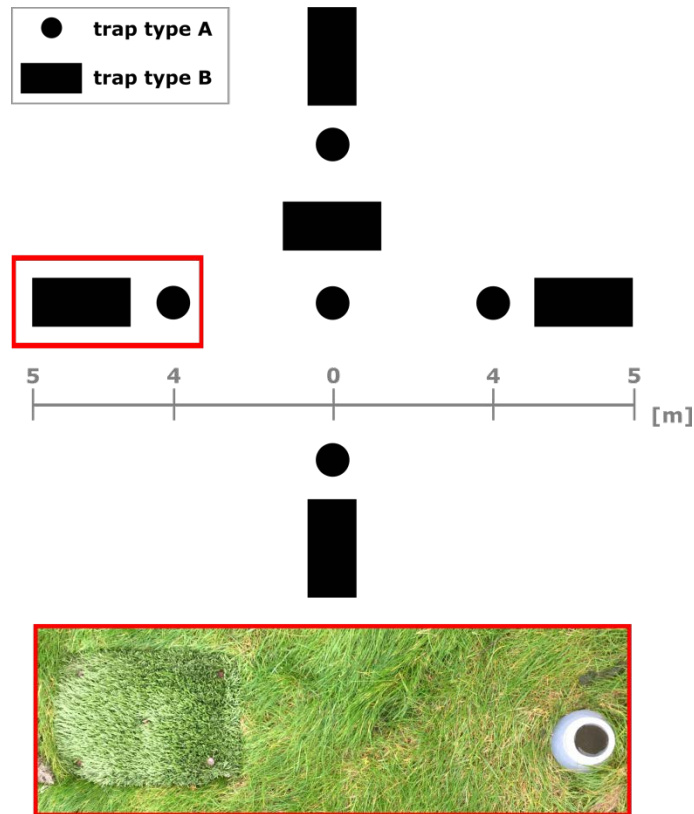


Abbildung 6: Sedimentfallenfeld mit 1L LDPE Flasche und Kunstrasenmatte

2.4 Hydrologische und Meteorologische Daten

Wasserstandsdaten wurden an drei Pegelstandorten erhoben. Der Außenpegel Hilligenley liegt im Südwesten der Hallig Langeneß, direkt am Fähranleger, zwei Binnenpegel stehen auf der Hallig, einmal im Westen an der Kirchhofswarf und im Osten an der Kirchwarf (vergl. Abbildung 3). Signifikante Wellenhöhen werden an einer Wellenboje in der Süderau gesammelt. Die Pegel- und Wellendaten wurden vom LKN-SH für diese Studie zur Verfügung gestellt. Winddaten werden vom Deutschen Wetterdienst an der Wetterstation Strucklahnungshörn auf der Insel Nordstrand ca. 22 km südöstlich vom Pegel Hilligenley erhoben und wurden für diese Studie zur Verfügung gestellt.

2.5 Korngrößenkartierung

Um für die Modellierung des Sedimenttransportes notwendige Korngrößeninformationen zu erlangen, wurde eine Kartierung des Wattes um Langeneß durch Fingerprobe durchgeführt. Dazu wurden im Oberflächensediment zwischen den Buhnen die Hauptkomponente sowie bis zu zwei Nebenkomponeenten bestimmt (Carstens und Rüßmann 2018). Dabei wurde in Anlehnung an die Bodenkundliche Kartieranleitung vorgegangen (Bo-

denkundliche Kartieranleitung 2005). Einzelne Transsekte wurden bis in 5cm Tiefe beprobt und im Labor mittels Laser Diffraction analysiert. Somit wurde auch die Korngrößeninformation mittels Fingerprobe überprüft.

2.6 Sedimenttransportmodell

Um Auswirkungen von Höhenänderungen von Küstenschutzbauwerken, insbesondere Igelhöhen, auf Sedimenttransport und Sedimentablagerung zu modellieren wurde die Software MIKE21® vom Danish Hydraulic Institute (DHI; Warren und Bach 1992) verwendet. Mit dieser wurde am Forschungsinstitut Wasser und Umwelt (fwu) der Universität Siegen ein Detailmodell der Hallig Langeneß erstellt. Die hydrodynamischen Randbedingungen für das Detailmodell generierte ein bereits entwickeltes Regionalmodell der Nordsee und Teilen des Nordatlantiks (Arns et al. 2015b; Arns et al. 2017). Diese Randbedingungen sind für jeden betrachteten Zeitraum individuell erzeugt worden und wurden ebenfalls vom fwu zur Verfügung gestellt. Folglich war es möglich, die hydrodynamischen Bedingungen von „Land unter“ Ereignissen im Detailmodell zu simulieren (detailliert in Hache et al. in Vorbereitung). Jedes „Land unter“ wurde mit einer Woche *spin-up* Zeit bis einschließlich dem ersten auf das „Land unter“ folgenden Tidenzyklus simuliert. Anschließend konnten bei jeder betrachteten Simulation mit dem *particle tracking* (PT) Modul von MIKE21®, Partikel eingesteuert werden, um suspendierte Sedimente und deren Verteilung während eines Land unters zu simulieren. Diese Art der Partikelverfolgung hat sich zu einer bewährten Methode entwickelt, die erst kürzlich von Stanev et al. (2019) genutzt wurde, um die Ausbreitungswege von Meeresmüll in der südlichen Nordsee zu untersuchen.

Das verwendete hydrodynamische Modell, welches die Randbedingungen für das Detailmodell liefert, tendiert dazu Sturmflutwasserstände zu unterschätzen (Arns et al. 2015b). Deshalb wurden für den angestrebten Vergleich zwischen moderatem „Land unter“ und „Land unter“ bei Sturmflutbedingungen und deren Auswirkung auf die Partikelakkumulation nach unterschiedlichen Höhenanpassungen der Küstenschutzbauwerke zwei historische Ereignisse ausgewählt, deren modellierte Wasserstände den angestrebten Randbedingungen entsprechen. Für ein moderates „Land unter“ betragen die Scheitelwasserstände zwischen 0,92-1,5 m über MTHW und für Sturmfluten 1,5 -2,5 m über MTHW. Das moderate „Land unter“ vom 05. März 2019 zeigte im Modell einen Scheitelwasserstand von 1,30 m über MTHW und die Sturmflut vom 24. November 1981 lieferte 1,83 m über MTHW. Als Referenz wurde der Pegel Dagebüll vom BSH mit einem MTHW von 1,42 m über NHN gewählt. Für diese beiden Ereignisse wurden die hydrodynamischen Bedingungen nach jeder Höhenanpassung der Küstenschutzbauwerke neu simuliert, um anschließend die Partikel einzusteuern und auszuwerten.

3 Ergebnisse

Im Rahmen der Studie konnten Erkenntnisse über die räumliche und zeitliche Verteilung der Trübe um Hallig Langeneß während unterschiedlicher meteorologischer Bedingungen gewonnen werden (Hache et al. 2019; Hache et al. eingereicht). Ergänzt werden diese Informationen um Korngrößendaten vom Wattboden, der als potentielle Quelle für die in Suspension befindlichen Partikel angesehen werden kann. Weiterhin konnten die Un-

terschiede bezüglich der Korngrößen im Watt, in der Wassersäule und in den Sedimentfallen aufgezeigt werden. Diese Daten lassen Rückschlüsse über den Sedimenttransport während eines „Land unters“ von außerhalb der Hallig auf die Hallig zu. Schließlich konnten Zusammenhänge hergestellt werden zwischen den Trübedaten vor der Hallig und den Sedimentakkumulationsraten auf der Hallig.

3.1 Trübedaten

Die von den OBS Sensoren gemessenen Rohdaten wurden durch Kalibration in Konzentrationen von suspendiertem Material umgerechnet. Daher werden im Folgenden die Begriffe Trübe und SPM gleichbedeutend verwendet.

Es gibt wie erwartet deutliche Unterschiede zwischen der Trübe bei normalen Wetterbedingungen und bei stürmischen Bedingungen während eines „Land unter“. Es zeigen sich aber auch ausgeprägte Unterschiede in der räumlichen Verteilung, sowohl was die SPM Konzentration als auch die relativen Unterschiede zwischen den unterschiedlichen Wetterbedingungen angeht (Abbildung 7). Alle Stationen zeigen einen deutlichen Anstieg der Trübe bei „Land unter“ Bedingungen. Dieser ist im Südwesten an der Station T-2 am geringsten und an den Stationen im Nordwesten (T-4) und Südosten (T-1) am stärksten ausgeprägt. Während die Trübewerte bei Schönwetter relativ konstant an den einzelnen Stationen sind, kommt es während stürmischem Wetter zu stärkeren Schwankungen.

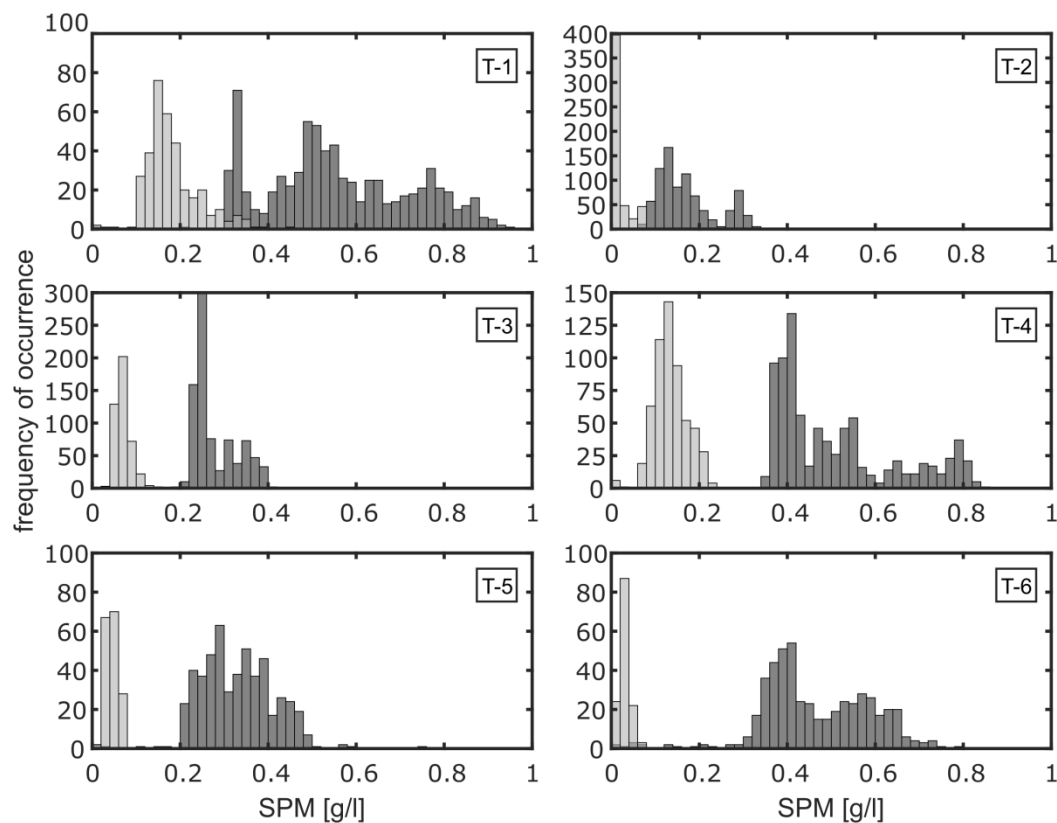


Abbildung 7: Häufigkeitsverteilungen von SPM Konzentrationen während jeweils zwei Tidenzyklen bei unterschiedlichen Wetterbedingungen. In hellgrau dargestellt ruhiges Wetter (30.11.2017) in dunkelgrau „Land unter“ Bedingungen am 11.02.2018 (nach Hache et al. 2019).

Betrachtet man die Windverhältnisse (Abbildung 8 und Abbildung 9) so zeigen die Dichteverteilungen der Trübe und der Windrichtung für alle Stationen Maxima bei Windrichtungen um W – SW. Die häufigsten SPM Konzentrationen unterschieden sich allerdings. Die Stationen T-1, T-4, und T-6 zeigen vergleichsweise hohe Werte um 0,2 – 0,4 g/l während die Stationen T-3 und T-5 nur Werte um 0,1 g/l zeigen. Die Trübe an der Station T-2 ist unter den hauptsächlich auftretenden Windrichtungen mit Werten deutlich unter 0,1 g/l am geringsten. An den Stationen T-1, T-3, T-5 und T-6 treten die maximalen SPM Gehalte bei Windrichtungen auf, die auch im Maximum der Dichteverteilung vorliegen. Bei den Stationen im Westen der Hallig (T-3, T-4) sind die SPM Werte deutlich weniger von der Windrichtung beeinflusst und zeigen auch bei anderen Windrichtungen als W-SW Maxima. Lediglich bei der Station T-2 treten die maximalen SPM Werte abweichend von den vorherrschenden Windrichtungen auf. Hier spielt die geschützte Lage innerhalb des Bühnenfeldes in dem die Station steht die entscheidende Rolle. Da sich das Feld nach Südosten öffnet, treten die maximalen SPM Werte bei der entsprechenden Windrichtung auf.

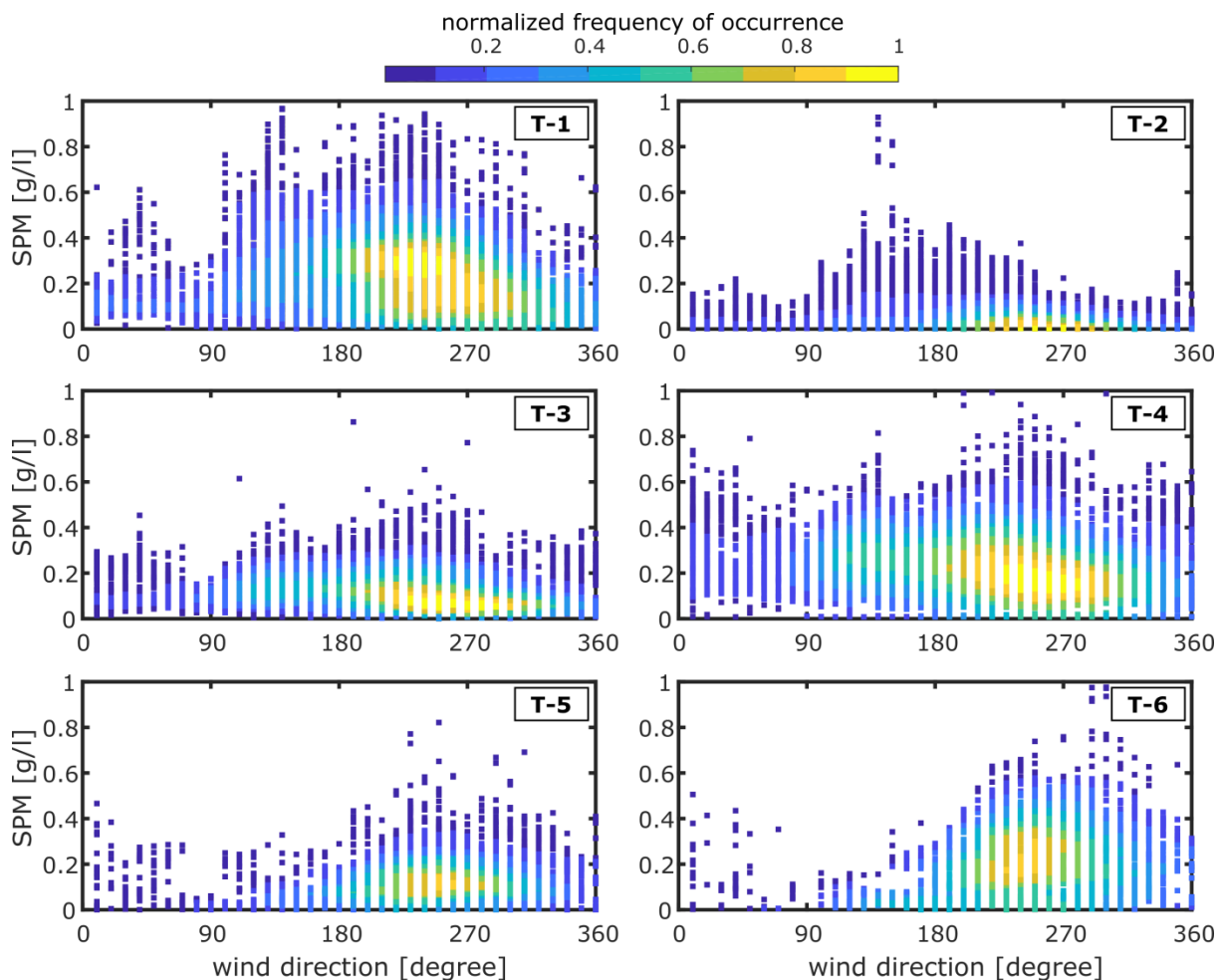


Abbildung 8: Dichteverteilung von SPM Konzentrationen in Abhängigkeit von der Windrichtung. Es sind Daten aus dem Zeitraum 01.10.2017-15.02.2018 für sechs Trübemesstations im Watt dargestellt (nach Hache et al. 2019)

Die Windgeschwindigkeit beeinflusst die Trübe an den Stationen sehr unterschiedlich, sowohl bezüglich Standort als auch der Windrichtung (Abbildung 9). Während die Statio-

nen im Süden der Hallig (T-1, T-2) bei Winden aus nordwestlicher Richtung kaum einen Zusammenhang mit der Windgeschwindigkeit zeigen, so steigt bei südwestlicher Windrichtung die Trübe mit zunehmender Windgeschwindigkeit an. Die Station T-4 zeigt unabhängig von der Windrichtung nur einen schwachen Zusammenhang zwischen Trübe und Windgeschwindigkeit.

Die Unterschiede zwischen den Stationen können durch die an den jeweiligen Stationen herrschenden Strömungsverhältnissen erklärt werden. So liegen die Stationen T-4, T-3 und T-1 jeweils in der Nähe eines zur Süderauë führenden Prieles, während sich die Stationen T-5 und T-6 in größerer Entfernung zur Norderaue befinden und daher wahrscheinlich stärker durch Seegang beeinflusst werden als durch Strömung. Die Station T-2 liegt in einem besonders engen Buhnenfeld in unmittelbarer Nähe zu einer Buhne und ist damit sowohl gegen Seegang als auch gegen Strömung relativ geschützt.

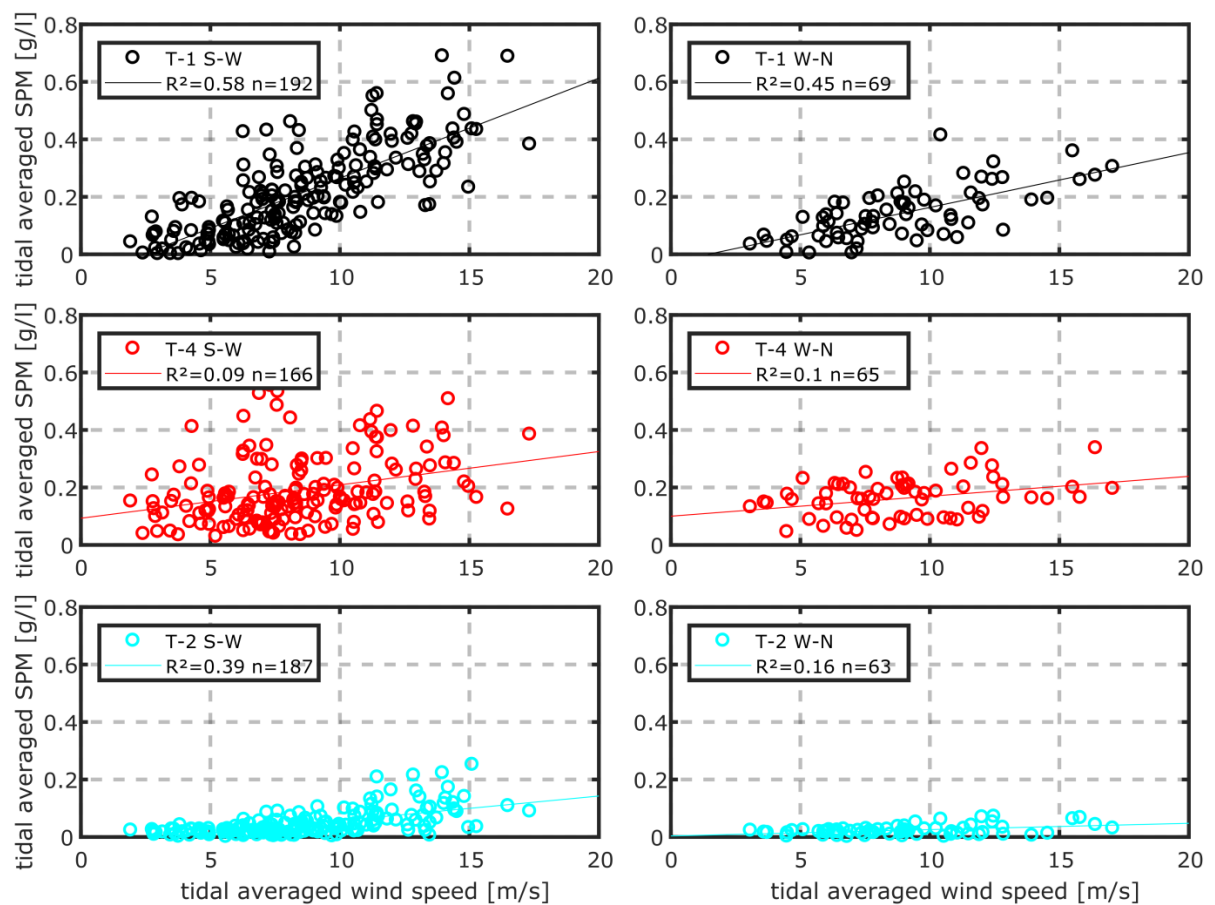


Abbildung 9: Zusammenhang von über einen Tidezyklus gemittelten Windgeschwindigkeiten und SPM Konzentrationen. Es sind Daten aus zwei Wintern 01.10.2017-15.02.2018 und 01.09.2018 - 01.03.2019 für drei Trübungsmessstationen im Watt dargestellt. R^2 ist der Korrelationskoeffizient nach Pearson und n die Anzahl der Messungen (nach Hache et al. eingereicht) .

Aus diesen Informationen lässt sich zusammenfassend ableiten, dass es ein hohes Potential an Trübe bei südwestlicher Windrichtung gibt, welches insbesondere im Südosten der Hallig mit zunehmender Windgeschwindigkeit ansteigt. Die Trübungswerte im Westen und Nordwesten der Hallig sind generell weniger stark vom Wettergeschehen beeinflusst.

3.2 Sedimentakkumulation

Die in drei Messwintern erfassten „Land unter“ sind in Tabelle 2 und Tabelle 3 dargestellt. Die Anzahl der erfassten „Land unter“ entspricht der Anzahl an vollständigen Land unter nach der Definition von (Schindler und Willim 2015) d.h., die Binnenpegel zeigen einen maximalen Wasserstand oberhalb der mittleren Höhe der nicht permeablen Deckwerke ($>2,34$ m NHN). Die Sedimentakkumulation pro „Land unter“ ist als Mittelwert über alle Sedimentfallen dargestellt. Die Werte gruppieren sich in zwei Kategorien. Werte zwischen $99\text{--}225$ g/m² gehören zu den häufig vorkommenden „normalen“ „Land unter“, die mit moderaten Wasserständen einhergehen. „Land unter“, die mit Sturmfluten einhergehen (Scheitelwasserstände $> \text{MTHW} + 1,5$ m) zeigen hier Sedimentakkumulationen zwischen $572\text{--}2112$ g/m². Die Sturmfluten traten ausschließlich im Messwinter 2019/20 auf, was sich auch an den deutlich erhöhten Sedimentaufwuchsraten von $5,9 \pm 3,8$ mm/a in diesem Jahr zeigt.

Tabelle 2: Hydrodynamische, meteorologische und sedimentologische Charakteristika der erfassten „Land unter“ im Zeitraum 08.12.2017 – 13.02.2020

Inundation	wind speed [m/s]	wind direction [degree]	significant wave height [m]	av SPM [g/l]	mean M_s accumulation [g/m ²]	mean inundation height [m above m.s.l.]
1. (08.12.2017)	8.1 ± 2.6	268.9 ± 19.8	0.41 ± 0.11	0.19 ± 0.12	132.8 ± 90	2.46 ± 0.01
2. (04.01.2018)	10.7 ± 3.8	280.6 ± 8.7	0.48 ± 0.19	0.28 ± 0.17	158.6 ± 84.4	2.74 ± 0.02
3. (12.02.2018)	14.2 ± 1.7	243.3 ± 11	0.69 ± 0.11	0.39 ± 0.15	179.6 ± 118.5	2.61 ± 0.01
4. (08.12.2018)	14.6 ± 1.5	239.5 ± 12.5	0.72 ± 0.13	0.19 ± 0.13	100.6 ± 71.7	2.49 ± 0.04
5. (08.01.2019)	14.5 ± 2.3	332.1 ± 12.9	0.62 ± 0.11	0.16 ± 0.1	99.2 ± 50.2	2.79 ± 0.05
6. (09.02.2019)	17.3 ± 1.4	227.1 ± 7	0.74 ± 0.14	0.32 ± 0.18	224.8 ± 206.5	2.3 ± 0.16
7. (05.03.2019)	15.4 ± 2.8	251.6 ± 3.7	0.77 ± 0.14	0.23 ± 0.18	172.8 ± 167.5	2.51 ± 0.04
8. (10.03.2019)	11.4 ± 10.8	256 ± 3.6	0.54 ± 0.25	0.13 ± 0.09	79.9 ± 58.5	2.49 ± 0.06
9. (15.12.2019)	16 ± 4.7	245.3 ± 10.4	NaN	NaN	1154.2 ± 833.9	3.37 ± 0.12
10. (15.01.2020)	15.5 ± 0.1	201 ± 3.1	NaN	NaN	572 ± 419.2	3.16 ± 0.08
11. (10-13.02.2020)	15.9 ± 0.8	263.7 ± 5.4	NaN	NaN	2112.2 ± 1127.6	3.32 ± 0.37

Der Mittelwert aller Sedimentaufwuchsraten im Projektzeitraum beträgt $2,4 \pm 1,8$ mm/a und liegt damit deutlich über dem Wert von $1,2 \pm 0,8$ mm/a, der Mittelwert (2010–2013) für Langeneß angegeben ist (Schindler et al. 2014a). Die Diskrepanz ist dadurch zu erklä-

ren, dass in dieser Studie absichtlich nahezu alle Sedimentfallen in unmittelbarer Nähe zur Halligkante platziert wurden, während in der Arbeit von (Schindler et al. 2014a) die Fallen gleichmäßig über Langeneß verteilt waren. Die Sedimentation ist kantennah deutlich höher als in der Halligmitte. Zusätzlich wurden aber auch zwei zentral gelegene Fallencluster beprobt, die nach (Schindler et al. 2014a) als repräsentativ für die Hallig anzusehen sind. Der 4-Jahresmittelwert der zentralen Fallenfelder FF1 und FF2 beträgt 1.17 ± 0.22 mm/a und ist damit vergleichbar mit den Werten der älteren Arbeit.

Tabelle 3: Sedimentaufwuchs der erfassten „Land unter (LU)“ im Zeitraum 08.12.2017 – 13.02.2020 und Überflutungshöhen an den Binnenpegeln Kirchhofswarf (KHK) und Kirchwarf (KW).

Winter	Erfasste LU	ΔH [mm/a]	Mittlere Überflutungshöhe KHW [m NHN.]	Mittlere Überflutungshöhe KW [m NHN.]
16/17	6	1.9 ± 1.9	2.9 ± 0.41	2.94 ± 0.45
17/18	3	0.9 ± 0.5	2.5 ± 0.21	2.44 ± 0.35
18/19	5	1 ± 0.9	2.46 ± 0.2	2.56 ± 0.15
19/20	3	5.9 ± 3.8	3.24 ± 0.33	3.36 ± 0.31
Mittelwert		2.4 ± 1.8	2.78 ± 0.29	2.83 ± 0.32

3.2.1 Einfluss der Halligrauhstreifen

Assoziiert zu den Trübungsmessstationen T-1, T-2 und T-3 befinden sich jeweils zwei Sedimentfallencluster, die hinter unterschiedlich hohen Igelu liegen. Die Igelhöhen wurden den entsprechenden Katastern des LKN-SH entnommen und sind zusammen mit der mittleren Sedimentakkumulation in Tabelle 4 dargestellt. Eine nach einzelnen „Land untern“ differenzierte Darstellung der Sedimentakkumulation zeigt Abbildung 10.

Tabelle 4: Sedimentologische und morphologische Merkmale der Sedimentfallencluster hinter unterschiedlich hohen Halligrauhstreifen (H = hoch, L = niedrig) im Süden der Hallig Langeneß

trap cluster	barrier height [m]	distance to Hallig margin [m]	average Ms accumulation [g/m ²]	average inundation SPM [g/l]
1H	2.69 ± 0.14	30	263 ± 132	0.34 ± 0.12
1L	2.22 ± 0.04	40	329 ± 151	0.34 ± 0.12
2H	3.58 ± 0.23	32	75 ± 32	0.06 ± 0.05
2L	3.2 ± 0.11	33	149 ± 49	0.06 ± 0.05
3H	3.24 ± 0.06	120	43 ± 21	0.14 ± 0.07
3L	2.87 ± 0.11	121	176 ± 46	0.14 ± 0.07

Die Differenz zwischen den jeweiligen Igelhöhen beträgt 37 bis 47 cm und ist damit in etwa vergleichbar hoch. Sowohl die mittlere als auch die individuellen Sedimentakkumulationen sind immer höher hinter dem jeweils niedrigeren Igel. Dabei profitieren offenbar besonders die Regionen, in den eher geringe Sedimentakkumulationen vorliegen (T-2, T-3) prozentual stärker, wenn die Igelhöhe geringer ist. Die absolute Höhe der Igel korreliert offenbar negativ mit der mittleren Sedimentakkumulation, so werden z.B. die höchsten Sedimentakkumulationen in der Region T-1 hinter den niedrigsten Igelu gemes-

sen und die niedrigsten Akkumulationen hinter den deutlich höheren Igeln in der Region T-2 und T-3.

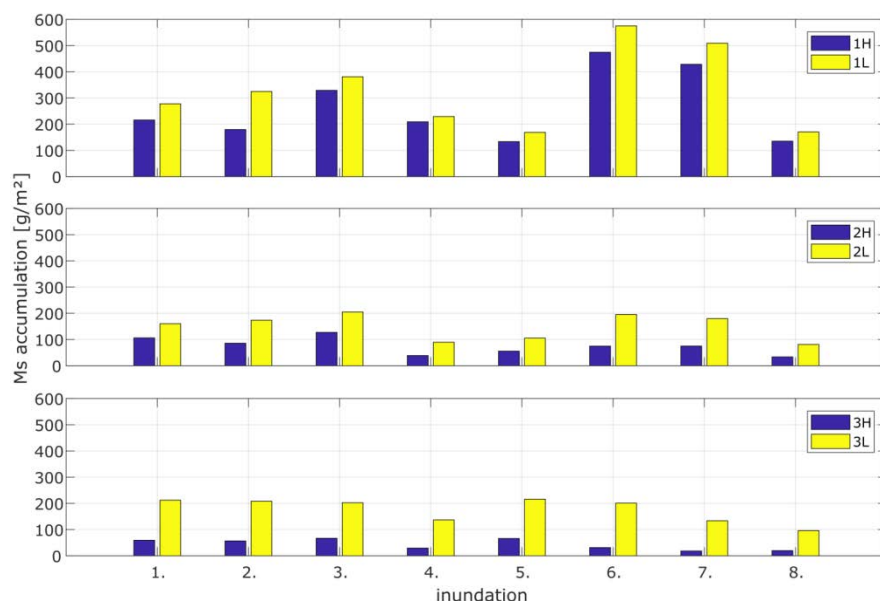


Abbildung 10: Sedimentakkumulation hinter unterschiedlich hohen Halligrauhstreifen „Igel“ bei einzelnen „Land untern“ im Zeitraum 08.12.2017 – 10.03. 2019 (nach Hache et al. eingereicht)

Die Igelhöhe wirkt sich auch auf die Korngröße des abgelagerten Sedimentes aus. Die durchgeführte Wattkartierung erbrachte das Ergebnis, dass das Watt um Langeneß im Wesentlichen von Feinsand mit leicht variierenden Siltanteilen dominiert ist. Lediglich an der Station T-2 liegen tonig Silte vor und an der Station T-4 Mittelsande. Während unter Schönwetterbedingungen hauptsächlich die Siltanteile in Suspension gehen, werden unter Wetterbedingungen, die zu „Land untern“ führen verstärkt auch die Sandanteile des Sedimentes resuspendiert. Abbildung 11 zeigt die einzelnen Kornfraktionen exemplarisch an der Messstation T-1 und den assoziierten Sedimentfallenclustern während der „Land unter“ 3 und 6 (vergl. Tabelle 2). Die dominierende Korngröße in den Sedimentsammlern ist hier Feinsand. Der geringe Unterschied zwischen den jeweiligen Sammlern „Top“ und „Base“ zeigt, dass die Wassersäule wahrscheinlich gut durchmischt ist in Bezug auf die Korngröße der suspendierten Partikel. In Sedimentfallen hinter den Halligrauhstreifen dominieren gleichzeitig Grobsilt und Feinsand. Allerdings zeigt sich hier ein deutlicher Unterschied zwischen Sedimentfallen hinter hohem und niedrigem Igel. Während hinter dem hohen Igel Grobsilt die häufigste Korngröße ist, so ist es hinter dem niedrigen Igel Feinsand. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass die Halligkante generell ein Hindernis für den Sedimenttransport darstellt und dass insbesondere grobe Partikel sowohl von der Halligkante als auch von den Halligrauhstreifen davon abgehalten werden, auf die Hallig zu gelangen. Dieser Effekt verstärkt sich mit zunehmender Igelhöhe.

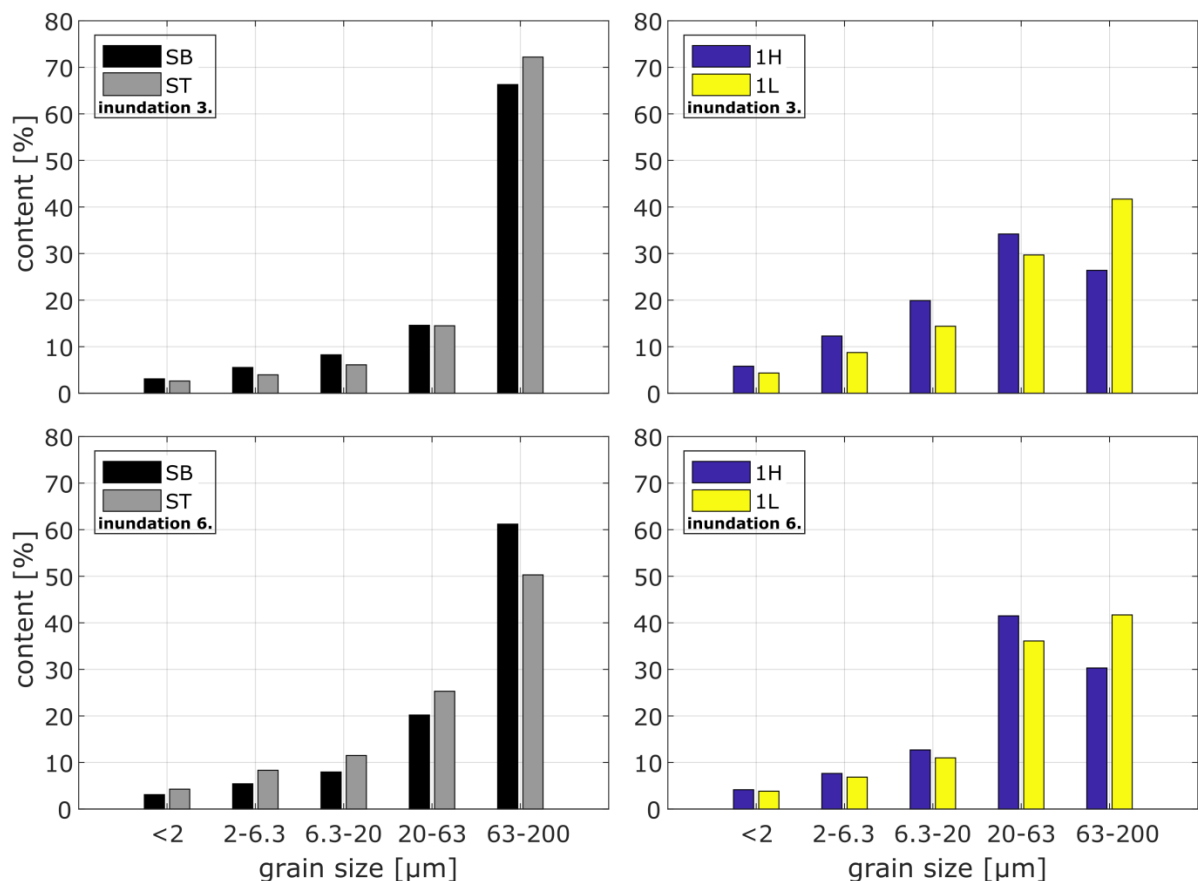


Abbildung 11: Korngrößenverteilung der Sedimentsammler (links), differenziert nach Top (ST) und Base (SB) an der Messstation T-1 bei zwei ausgewählten „Land untern“ (vergl. Tabelle 2) und der Sedimentfallcluster (rechts) hinter unterschiedlichen hohen Halligrauhstreifen „Igel“ im Bereich der Messstation T-1 (nach Hache et al. eingereicht).

3.3 Sedimentverfügbarkeit

Die zentrale Frage der Studie lautet, ob es ein Potential an verfügbaren Sedimenten gibt, die zwar im Watt resuspendiert werden, aber nicht auf die Hallig transportiert werden. Da die Untersuchungen zur räumlichen Verteilung der Trübe gezeigt haben, dass die Trübewerte rund um die Hallig stark variieren und auf der Hallig nur zwei Messstationen zur Verfügung stehen, wurden die Trübewerte der Stationen auf der Hallig nur mit den dazu räumlich assoziierten Messstationen im Watt verglichen. Dementsprechend wurden Messungen des SPM Gehaltes an den Stationen T-1 mit denen der Station T-8 bzw. T-4 mit T-7 (vergl. Abbildung 3) verglichen, die während der erfassten „Land unter“ gewonnen wurden. Die Ergebnisse sind in Abbildung 12 dargestellt. Mit steigenden Trübewerten im Watt erhöhen sich auch die SPM-Gehalte im Überflutungswasser auf der Hallig. Es zeigt sich aber, dass die Messstationen auf der Hallig nur in etwa 10-50% der im Watt gemessenen Trübe detektieren. Die „Effektivität“ eines „Land unters“ bezüglich des Sedimenttransportes steigt dabei offenbar mit der Stärke des „Land unters“, wenn als Maß dafür die Trübewerte im Watt herangezogen werden.

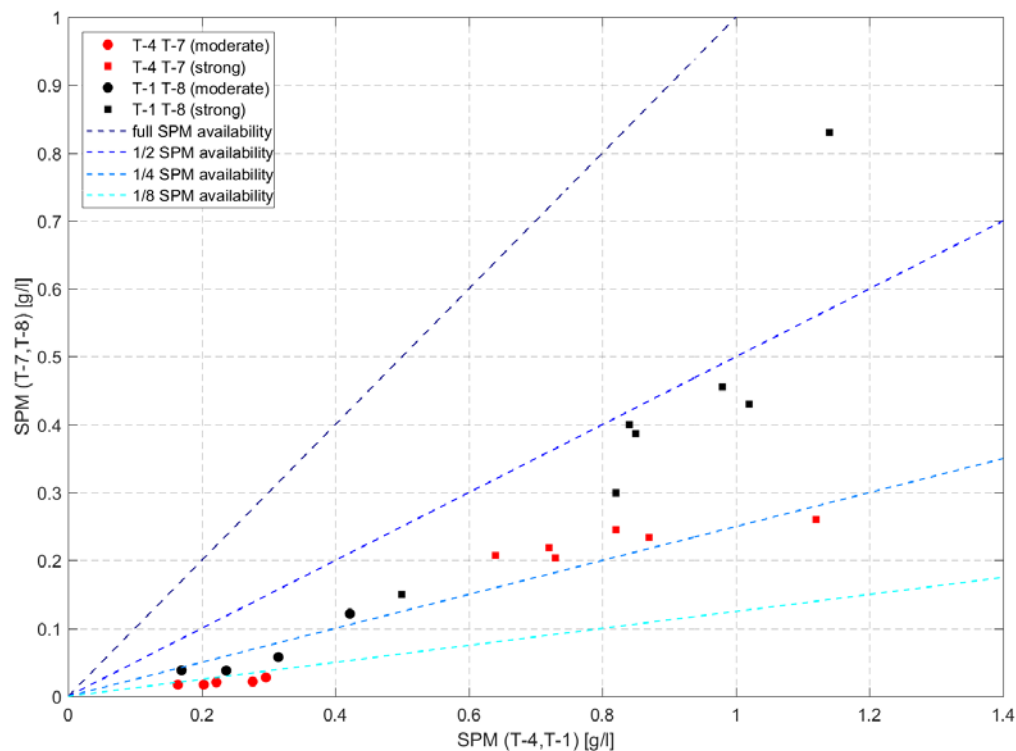


Abbildung 12: Verhältnis zwischen an den Messtationen ausserhalb der Hallig Langeneß verfügbarem Gehalt an suspendiertem Material (SPM) und dem zeitgleich auf die Hallig transportierten SPM. Die gestrichelten Linien zeigen unterschiedliche Perzentilwerte der auf der Hallig gemessenen Trübe in Relation zu den Werten im Watt (Hache et al. eingereicht)

Gleichzeitig besteht eine gute Korrelation zwischen SPM Werten der jeweiligen Messstation auf der Hallig und der genau dort resultierenden Sedimentakkumulation (Abbildung 13). An der Station T-7 im Westen der Hallig werden allerdings insbesondere bei hohen SPM Gehalten wesentlich geringe Sedimentakkumulationen gemessen als an der Station T-8 im Osten von Langeneß. Dieser Unterschied geht vermutlich auf einen Korngrößeneffekt zurück. Der Zusammenhang zwischen Korngröße und Sedimentakkumulation ist in Abbildung 14 dargestellt. Je größer die abgelagerten Sedimente sind, desto höher ist auch die Sedimentakkumulation insgesamt. Die Korngrößen der an der Station T-7 abgelagerten Sedimente sind auf Grund der Entfernung der Station zur Halligkante und des gegenüber der Station T-8 deutlich höheren Igels geringer als an der Station T-8.

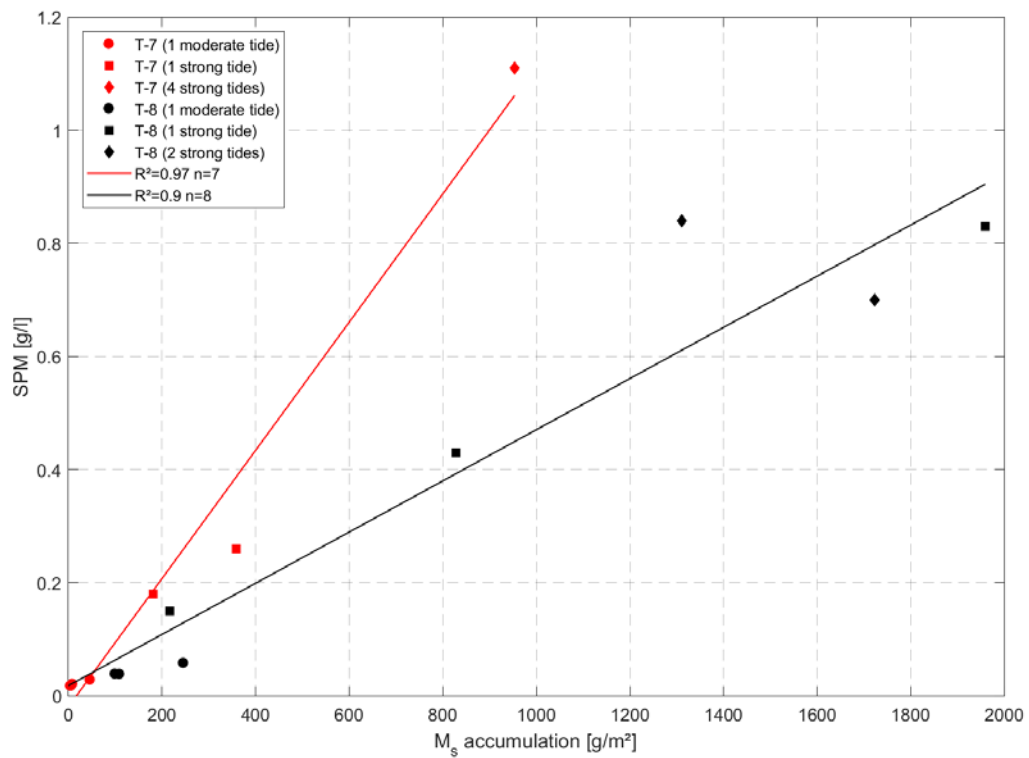


Abbildung 13: Korrelation zwischen SPM Gehalten und Sedimentakkumulation an den Trübe-
messstationen auf der Hallig Langeneß. Zwischen dem 10.02 und 13.02.2020 kam es während
Sturm Sabine zu vier aufeinanderfolgenden „Land unter“ Tiden. Im Westen von Langeneß (T-7)
war eine Beprobung des Fallenfeldes zwischen den einzelnen Tidezyklen nicht möglich. Daher
erfolgt bei T-7 für diese Sturmflut eine Mittelung über alle vier Tidezyklen. Im Osten konnte
das Fallenfeld bei Station T-8 jeweils tagsüber beprobt werden und somit erfolgt hier eine Mit-
telung von jeweils zwei Tidezyklen (Hache et al. eingereicht).

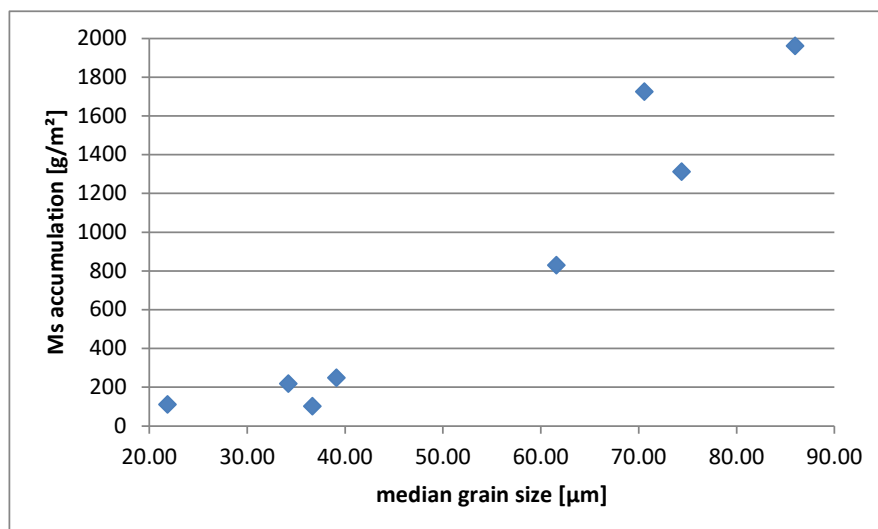


Abbildung 14: Zusammenhang zwischen Sedimentakkumulation und medianer Korngröße in
Sedimentfallen auf der Hallig bei Station T-8 im Westen der Hallig.

3.4 Sedimenttransportmodellierung

Die Modellierung verfolgt das Ziel, den Einfluß von Veränderungen in der Höhe der Halligraustreifen (Igel) auf den Sedimenttransport sowie die Ablagerung und Resuspension individueller Partikel zu zeigen (detailliert in Hache et al. in Bearbeitung). Abbildung 15 zeigt das verwendete Modellgitter und die Punkte außerhalb der Hallig, an denen fortwährend bei jedem Modellschritt Partikel eingesteuert wurden. Die Auflösung des Gitters ist an die Morphologie des Geländes angepasst. Insbesondere die Halligpriele sind sehr hoch aufgelöst.

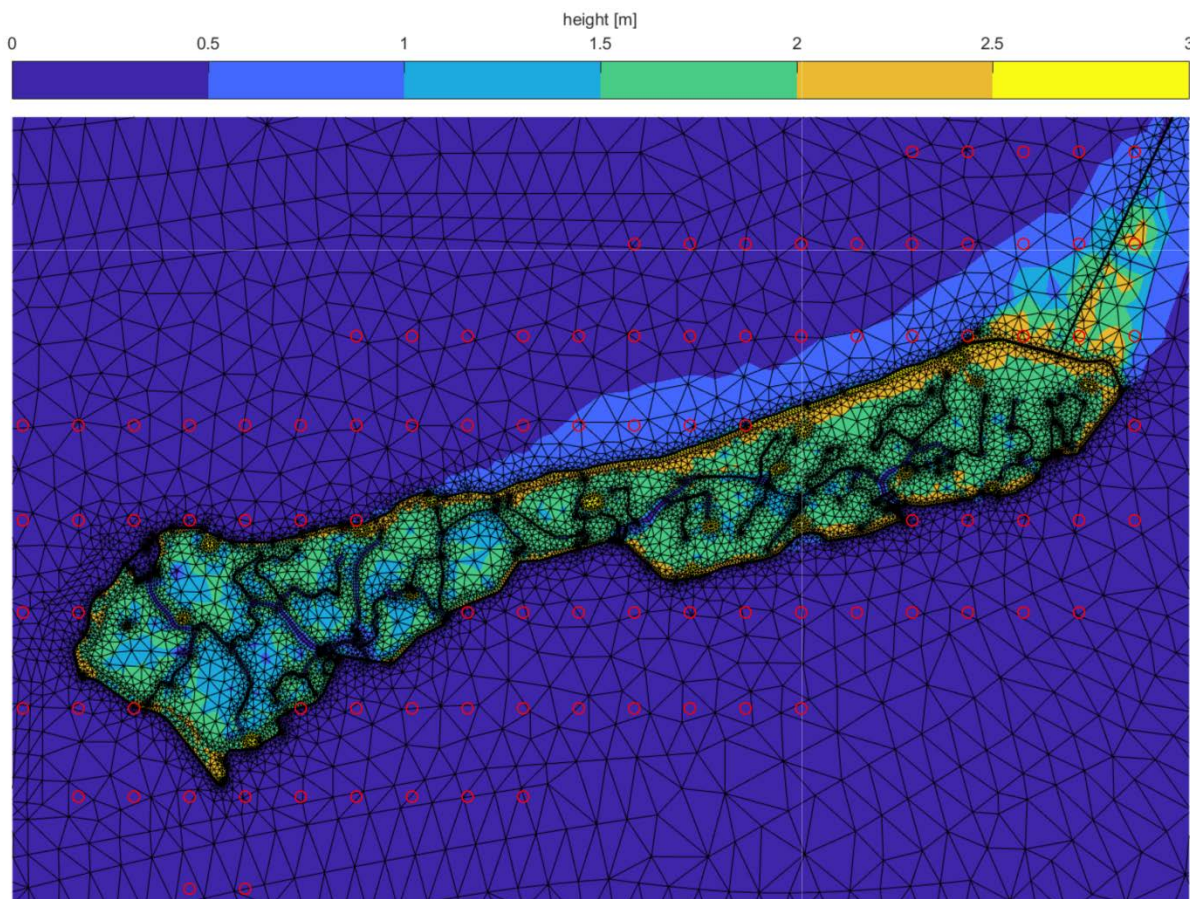


Abbildung 15: Modellgitter und die Punkte, an denen im Modellauf fortwährend Partikel eingesteuert wurden (rote Kreise) (Hache et al, in Vorbereitung)

Eine Änderung der Deckwerkshöhen wurde in denselben Bereichen untersucht wie bei der Messung der Sedimentakkumulation mit Sedimentfallen (Hache et al. eingereicht) (vergl. Abbildung 10). Dabei wurden in den rot markierten Bereichen (Abbildung 16) die Deckwerkslinie auf die jeweils niedrigste dort aktuell bestehende Höhe angeglichen.

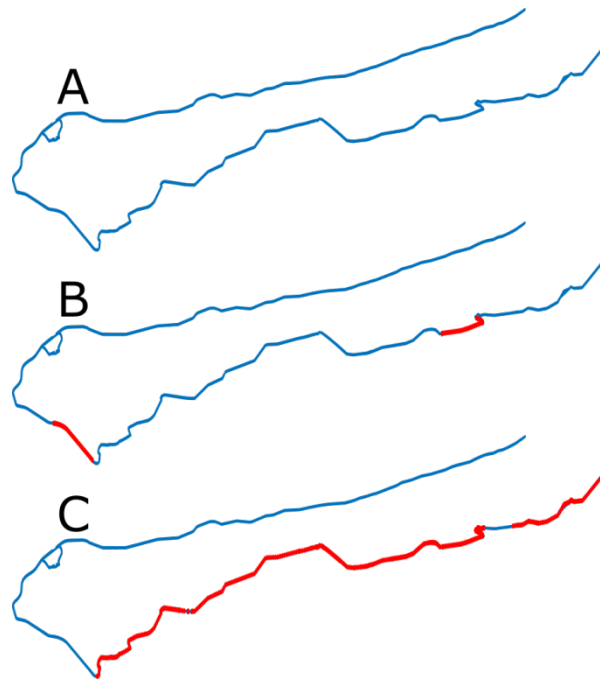


Abbildung 16: Drei Szenarien zur Deckwerkslinie von Langeneß (A = Ist-Zustand). Rot markierte Stellen in B und C wurden während der Modellierung in der Höhe herabgesetzt (Hache et al, in Vorbereitung).

Anschließend wurden drei Szenarien modelliert. Dabei wurde als Partikelgröße die auf der Hallig vorherrschende mediane Korngröße verwendet (Silt, $30\mu\text{m}$). Es wurde zunächst der Ist-Zustand (A) bezüglich der Deckwerkshöhen für jeweils ein moderates „Land unter“ und eine Sturmflut modelliert. Im zweiten Szenario wurden die Deckwerkshöhen an ausgewählten Stellen angepasst (B) und im dritten die gesamte Deckwerkslinie im Süden der Hallig herabgesetzt (C). Da mit dem Modell keine realen Sedimentakkumulationen berechnet werden können sind die Ergebnisse nur vergleichend zu interpretieren. Die Anzahl der abgelagerten Partikel für die unterschiedlichen Szenarien sind in Abbildung 17 dargestellt. Während bei einem moderaten „Land unter“ wie es relativ häufig vorkommt im ersten Szenario nur wenige Partikel vorwiegend nahe der Halligkante im Süden abgelagert werden, erhöht sich die Anzahl während einer Sturmflut deutlich und die Partikel verteilen sich gleichmäßiger über die Halligfläche. Dies entspricht den mit Sedimentfallen erfassten Daten weitgehend und zeigt, dass das Modell realistische Werte liefert. Im zweiten Szenario zeigt sich eine deutliche Erhöhung der abgelagerten Partikelmenge im Bereich des Osterwehls und nur eine sehr geringe Erhöhung im westlichen Bereich der Hallig. Auch das entspricht weitgehend den realen Daten (vergl. Abbildung 10). Dabei nimmt die Partikelanzahl am Osterwehl einerseits zu, andererseits werden die Partikel auch weiter Richtung der Hallig Mitte transportiert. Der Unterschied ist besonders bei moderaten „Land unter“ zu beobachten, während bei Sturmfluten der Effekt des Igels offenbar geringer ist (siehe Vergleich A2 vs. B2 in Abbildung 17). Eine Anpassung des Igels im gesamten Süden der Hallig (Szenario C) wirkt sich bei moderaten Events besonders im Osten der Hallig aus, während bei Sturmflut die Partikel deutlich weiter in den Norden der Hallig transportiert werden als im Ist-Zustand (Vergleich A2 vs. C2).

Abbildung 18 zeigt die kumulierte Anzahl von transportierten, abgelagerten und wieder erodierten Partikeln.

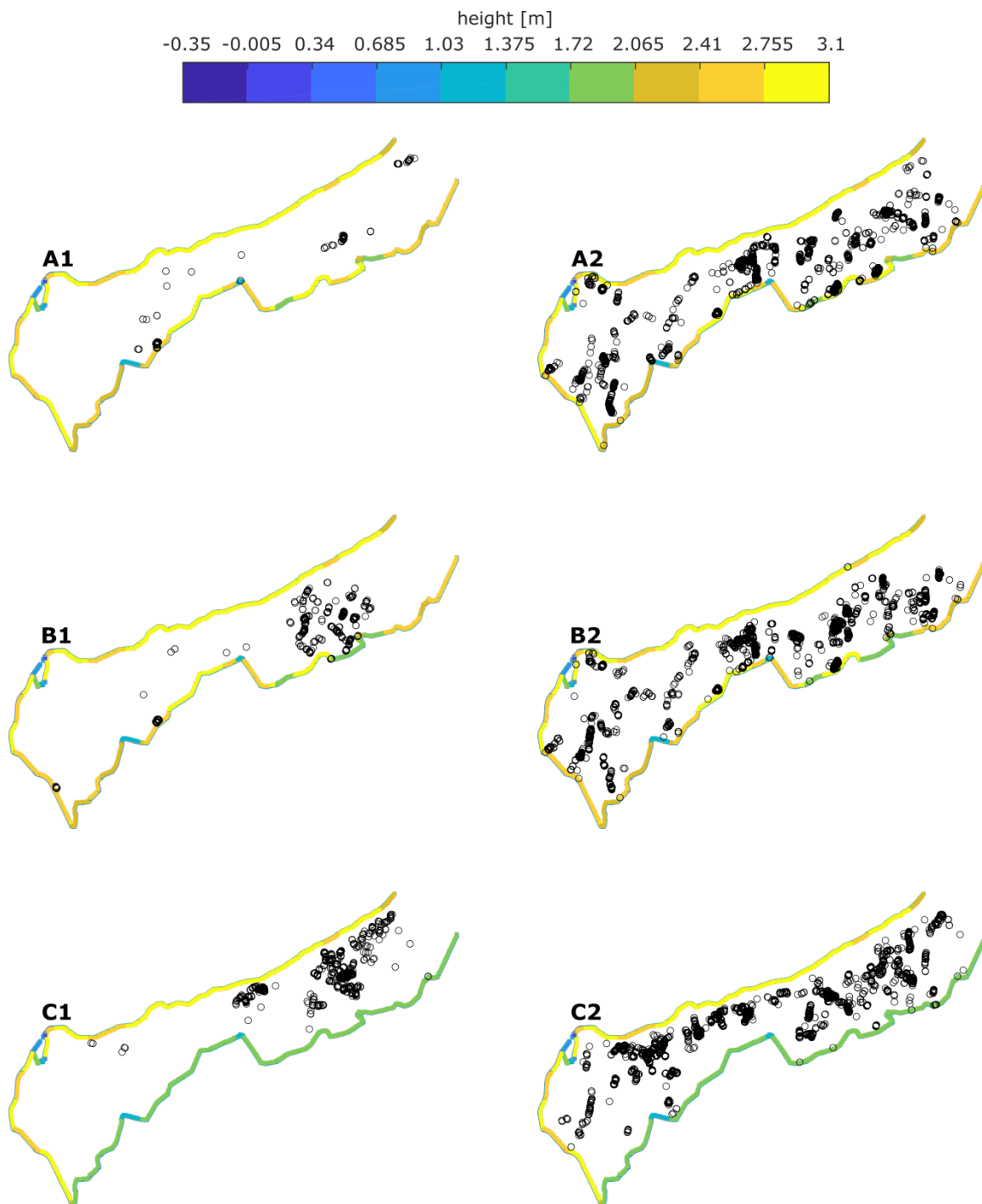


Abbildung 17: Ablagerungsort modellierter Silt-Partikel (30µm) bei verschiedenen Szenarien. Die mittleren Höhen der Deckwerkslinie von Langeneß sind farblich markiert. A: Ist-Zustand der Deckwerke, B: Anpassung nur im Bereich des Sieles am Osterwehl und an der Deichlinie im Westen, C: Anpassung im gesamten Süden der Hallig. A1-C1: moderates „Land unter“, A2-C2: Sturmflut (Hache et al, in Vorbereitung)

Die Modellergebnisse zeigen, dass sich die Sedimentakkumulation besonders bei moderaten „Land untern“ durch Änderung der Deckwerkshöhe in etwa verdoppeln lässt (C1 vs A1 in Abbildung 18), während sich bei Sturmfluten die Anpassung der Deckwerke auf die Anzahl der transportierten Partikel kaum auswirkt. Es konnte allerdings auch gezeigt werden, dass bei Sturmfluten ein erheblicher Teil (ca. 20-35%) der hohen Anzahl an auf die Hallig gelangenden Partikel dort nicht abgelagert wird, sondern mit dem ablaufenden

Wasser wieder von der Hallig entfernt wird, während es beim moderaten Ereignis zu keinem Partikelverlust kam. Hier zeigt sich ein weiterer Ansatzpunkt für die Erhöhung der Sedimentakkumulation. Es steht zu vermuten, dass der Sedimentverlust verringert werden könnte, wenn nach Sturmfluten das ablaufende Wasser gebremst würde.

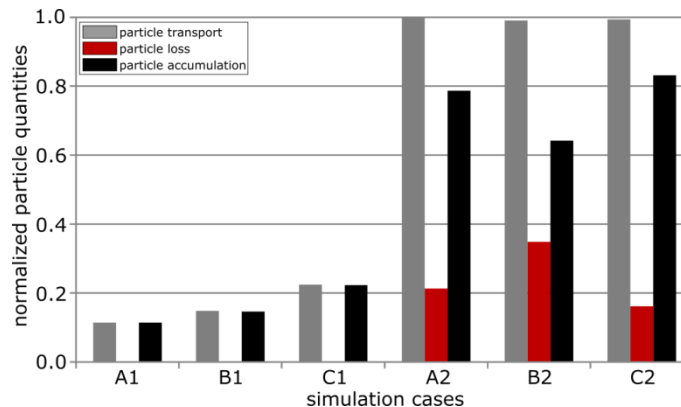


Abbildung 18: Kummulierte modellierte Silt-Partikelanzahl ($30\ \mu\text{m}$) für unterschiedliche Szenarien auf die höchste Säule normiert (A2). A: Ist-Zustand der Deckwerke, B: Anpassung nur im Bereich des Sieles am Osterwehl, C: Anpassung im gesamten Süden der Hallig. A1-C1: moderates „Land unter“, A2-C2: Sturmflut (Hache et al, in Vorbereitung)

4 Schlussfolgerung und weiterer Forschungsbedarf

Die Studie zeigt gute und in sich konsistente Ergebnisse bezüglich der gemessenen Trübungswerte in der Wassersäule, der gemessenen Sedimentakkumulation auf der Hallig sowie der Modellierung des Partikeltransportes. Die eingangs gestellten Fragen konnten weitgehend beantwortet werden. Das entwickelte Trübungmessnetzwerk hat über annähernd 3,5 Jahre bei nur geringen Ausfallzeiten kontinuierlich Daten in überzeugender Qualität geliefert. Aus den Rohdaten konnten durch individuelle Kalibration der einzelnen Sensoren an den jeweiligen Stationen SPM Daten erzeugt werden, die die räumliche und zeitliche Variation der suspendierten Sedimentmenge um Hallig Langeneß abbilden. Insbesondere Stürme aus südwestlicher Richtung sorgen mit zunehmender Windgeschwindigkeit für ein gesteigertes SPM Potential in der Wassersäule, das im Falle eines „Land unters“ auf die Hallig transportiert werden kann. Im Westen der Hallig werden die SPM Gehalte weniger stark von den meteorologischen Bedingungen beeinflusst als im Süden und Norden der Hallig. Der Einfluss der Strömung in dem westlich an der Hallig entlanglaufenden Priel dominiert hier offenbar die Trübungswerte. Es zeigte sich eine sehr gute Korrelation zwischen gemessenen SPM Gehalten und der realen Sedimentakkumulation am Ort der Messung auf der Hallig. Weiterhin zeigen die Ergebnisse, dass sich während eines „Land unters“ die SPM Gehalte im Überflutungswasser auf der Hallig deutlich von denen des Wassers außerhalb der Hallig unterscheiden. Nur etwa 10-50% des zur Verfügungen stehenden SPM Potentials gelangt tatsächlich auf die Hallig und sorgt dort für eine Sedimentakkumulation. Dabei stellt die Halligkante mit den darauf befindlichen Deckwerken offenbar die entscheidende Hürde da. Sowohl Korngröße als auch Menge der abgelagerten Sedimente sind hinter höheren Igeln durchgehend geringer als hinter niedrigeren. Die Ergebnisse der Modellierung zeigen gute Übereinstimmung mit den Messergebnissen und legen den Schluss nahe, dass besonders bei den häufig auftretenden moderaten „Land

untern“ eine deutliche Steigerung der Sedimentakkumulation um bis zu Faktor zwei möglich sein könnte, wenn die Deckwerke auf der Südseite der Hallig herabgesetzt würden. Die Modellergebnisse legen weiterhin den Schluss nahe, dass unabhängig von der Veränderung der Deckwerkshöhen bei den seltener auftretenden Sturmfluten ein erhebliches Potential an Sedimenten zur Verfügung steht, das durch das ablaufende Überflutungswasser von der Hallig gespült wird.

Die Ergebnisse der Modellierung sollten unter natürlichen Bedingungen getestet und validiert werden. Dazu könnten an strategischen Stellen der Hallig die Raustreifen niedriger gestaltet und eine angepasste Steuerung des ablaufenden Wassers bei Sturmfluten umgesetzt werden. Es sollten weiterhin Maßnahmen getroffen werden, die bei kleinen „Land untern“ das Überflutungswasser ungehindert auf die Hallig strömen lassen und bei Sturmfluten das ablaufende Wasser bremsen. Denkbar wäre eine variable Verbauung der Priele vor den Sieltoren und/oder eine variable Sieltorsteuerung.

5 Danksagung

Die Autoren danken allen Bewohner*innen von Langeneß für ihre freundliche Unterstützung. Ohne die Gewährung von Zutrittsrechten für Fennen und Warfen wäre diese Studie nicht möglich gewesen. Insbesondere danken wir Hans-Werner Johannsen für die Versorgung unserer Zentralstation mit Strom. Wir möchten uns bei Britta und Honke sowie Helgard und Frerk Johannsen für ihre Gastfreundschaft und für vielfältige Hilfestellungen bei der Durchführung der Geländearbeiten bedanken. Dem BMBF wird für die finanzielle Förderung gedankt (Projekt *Living Coast Lab Hallig*, 03F0759C) und dem KFKI und den Mitgliedern der Projektbegleitenden Gruppe für ihre konstruktiven Anregungen. Für die Durchführung von Land unter und Sturmflutsimulationen kam das Softwarepaket MIKE21® zum Einsatz, dass uns freundlicherweise von DHI-WASY zur Verfügung gestellt wurde. Jörg Gutkuhn (Fa. Argus) und Lothar Laake sowie allen Mitarbeitern der Metallwerkstatt des Geowissenschaftlichen Zentrums Göttingen gebührt Dank und Anerkennung für herausragende technische und handwerkliche Arbeiten an dem Trübemesssystem.

6 SchriftenverzeichnisPublication bibliography

Arns, A.; Wahl, T.; Dangendorf, S.; Jensen, J. (2015a): The impact of sea level rise on storm surge water levels in the northern part of the German Bight. In *Coastal Engineering* 96, pp. 118–131. DOI: 10.1016/j.coastaleng.2014.12.002.

Arns, Arne; Dangendorf, Sönke; Jensen, Jürgen; Talke, Stefan; Bender, Jens; Pattiaratchi, Charitha (2017): Sea-level rise induced amplification of coastal protection design heights. In *Scientific reports* 7, p. 40171. DOI: 10.1038/srep40171.

Arns, Arne; Wahl, Thomas; Haigh, Ivan D.; Jensen, Jürgen (2015b): Determining return water levels at ungauged coastal sites. A case study for northern Germany. In *Ocean Dynamics* 65 (4), pp. 539–554. DOI: 10.1007/s10236-015-0814-1.

Carstens, Judith Sophie; Rüßmann, Anna-Lena (2018): Wattkartierung um Hallig Langeneß - Bestimmung der Korngrößenverteilung, Karbonatgehalt und organischem Koh-

lenstoff an ausgewählten Profilen. Bachelorarbeit im Studiengang Geowissenschaften der Georg-August-Universität Göttingen.

Deicke, Matthias; Karius, Volker; Eynatten, Hilmar von (2009): Bestimmung der Sedimentaufwachsraten auf den Halligen Hooe, Langeneß, Nordstrandischmoor und Süderoog Sedimentakkumulation Halligen (SAHALL). Endbericht. Georg-August Universität Göttingen.

Down, R. D.; Lehr, J. H. (2005): Environmental Instrumentation and Analysis Handbook. Chapter 24. Turbidity Monitoring, pp. 511–547. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.

Downing, John P. (2006): Twenty-five years with OBS sensors. The good, the bad, and the ugly. In *Continental Shelf Research* 26, 2006 (17-18), pp. 2299–2318. DOI: 10.1016/j.csr.2006.07.018.

Downing, John P.; Beach, Reginald A. (1989): Laboratory apparatus for calibrating optical suspended solids sensors. In *Marine Geology* 86 (2-3), pp. 243–249. DOI: 10.1016/0025-3227(89)90053-4.

Gardner, Wilford D. (1980a): Field assessment of sediment traps. In *Journal of Marine Research* 38, pp. 41–52.

Gardner, Wilford D. (1980b): Sediment trap dynamics and calibration: a laboratory evaluation. In *Journal of Marine Research* 38, pp. 17–39.

Hache, Ingo; Karius, Volker; Eynatten, Hilmar von (eingereicht): Suspended particulate matter for sediment accumulation on inundated anthropogenic marshland in the southern North Sea – Potential, thresholds and limitation. In *Continental Shelf Research* eingereicht.

Hache, Ingo; Karius, Volker; Gutkuhn, Jörg; Eynatten, Hilmar von (2019): The development and application of an autonomous working turbidity measurement network: Assessing the spatial and temporal distribution of suspended particulate matter on tidal flats in the North Frisian Wadden Sea. In *Continental Shelf Research* 176, pp. 36–50. DOI: 10.1016/j.csr.2019.02.010.

Kineke, G.C; Sternberg, R.W (1992): Measurements of high concentration suspended sediments using the optical backscatterance sensor. In *Marine Geology* 108, 1992 (3-4), pp. 253–258. DOI: 10.1016/0025-3227(92)90199-R.

Poerbandono, Poerberbandono; Mayerle, Roberto (2005): Composition and Dynamics of Sediments in Tidal Channels of the German North Sea Coast. In *Die Küste* 69, pp. 63–91.

Schindler, Malte (2014): Challenges and perspectives of the North Frisian Halligen Hooe, Langeneß and Nordstrandischmoor. Marshland accretion and adaptation capacity to sea-level-rise. Dissertation. University Göttingen, Göttingen.

Schindler, Malte; Karius, Volker; Arns, Arne; Deicke, Matthias; Eynatten, Hilmar von (2014a): 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, pp. 246–255. DOI: 10.1016/j.ecss.2014.08.027.

Schindler, Malte; Karius, Volker; Deicke, Matthias; Eynatten, Hilmar von (2014b): Measuring sediment deposition and accretion on anthropogenic marshland – Part I. Methodi-

cal evaluation and development. In *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 151, pp. 236–245. DOI: 10.1016/j.ecss.2014.08.029.

Schindler, Malte; Willim, Katharina (2015): Berechnung langjähriger Überflutungshäufigkeiten für die Halligen Hooge, Langeneß und Nordstrandischmoor auf Basis regionaler Pegel­daten. In *Coastline Reports* 24, pp. 53–65.

Bodenkundliche Kartieranleitung. Mit 103 Tabellen (2005). With assistance of Herbert Sponagel. 5., verb. und erw. Aufl. Stuttgart: Schweizerbart.

Stanev, E. V.; Badewien, T. H.; Freund, H.; Grayek, S.; Hahner, F.; Meyerjürgens, J. et al. (2019): Extreme westward surface drift in the North Sea. Public reports of stranded drifters and Lagrangian tracking. In *Continental Shelf Research* 177, pp. 24–32. DOI: 10.1016/j.csr.2019.03.003.

Sternberg, R. W.; Johnson, R. V.; Cacchione, D. A.; Drake, D. E. (1986): An instrument system for monitoring and sampling suspended sediment in the benthic boundary layer. In *Marine Geology* 71, 1986 (3-4), pp. 187–199. DOI: 10.1016/0025-3227(86)90069-1.

Warren, I. R.; Bach, H. K. (1992): MIKE 21: a modelling system for estuaries, coastal waters and seas. In *Environmental Software* 7 (4), pp. 229–240. DOI: 10.1016/0266-9838(92)90006-P.