

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

Jürgen Jensen<sup>1</sup>, Arne Arns<sup>2</sup>, Sebastian Niebüser<sup>3</sup>, Holger Schüttrumpf<sup>4</sup>, Verena Krebs<sup>4</sup>, Theide Wöffler<sup>4</sup>, Roger Häußling<sup>5</sup>, Nenja Ziesen<sup>4</sup>, Michael Kleyer<sup>6</sup>, Julia Bass<sup>6</sup>, Hilmar von Eynatten<sup>7</sup>, Volker Karius<sup>7</sup> und Ingo Hache<sup>7</sup>

<sup>1</sup> Universität Siegen, Forschungsinstitut Wasser und Umwelt, Lehrstuhl für Hydromechanik, Binnen- und Küstenwasserbau, [juergen.jensen@uni-siegen.de](mailto:juergen.jensen@uni-siegen.de)

<sup>2</sup> Universität Rostock, Professur Küstenschutz und Küstendynamik

<sup>3</sup> Universität Siegen, Forschungsinstitut Wasser und Umwelt, Lehrstuhl für Hydromechanik, Binnen- und Küstenwasserbau

<sup>4</sup> RWTH Aachen University, Lehrstuhl und Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft

<sup>5</sup> RWTH Aachen University, Institut für Soziologie

<sup>6</sup> Carl von Ossietzky Universität Oldenburg; Landscape Ecology Group Institut für Biologie und Umweltwissenschaften (LÖK)

<sup>7</sup> Georg August Universität Göttingen; Abteilung Sedimentologie und Umweltgeologie

## 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 Ingenieur\*innen, Soziolog\*innen, Ökolog\*innen, Geolog\*innen sowie Behörden und Vertreter\*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*

## 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 Ingenieur\*innen, Soziolog\*innen, Ökolog\*innen, Geolog\*innen sowie Behörden und Vertreter\*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 Bewohner\*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 ermöglichen, die Ursachen und Folgen verschiedener Maßnahmen (z. B. optimierte Deckwerkshöhen, Betriebsarten von Schleusen/Sielen, optimierte landwirtschaftliche Nutzung) abzuschätzen. Konkret wurden die im Folgenden aufgeführten weiteren Forschungsziele definiert:

- 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 Aufwuchsraten für einzelne Sturmflutereignisse.
- Verständnis des Beitrags der Vegetation auf die Sedimentablagerung.

- Akzeptanz durch Einbeziehung der Bewohner\*innen (Bedürfnisse, Erwartungen, 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 Institutionen und Bewohner\*innen (transdisziplinär) einbeziehen (vgl. Kapitel 3).

### 3 Vorgehen

Das Projekt gliederte sich in vier Teilprojekte bzw. Arbeitspakete (vgl. Abbildung 1). Insgesamt waren fünf Forschungsinstitutionen der Universitäten Siegen (Koordinator; Forschungsinstitut 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 Landschaftsökologie (LÖK)) und Göttingen (Geowissenschaftliches Zentrum der Universität Göttingen (GZG)) an dem Verbundprojekt beteiligt.

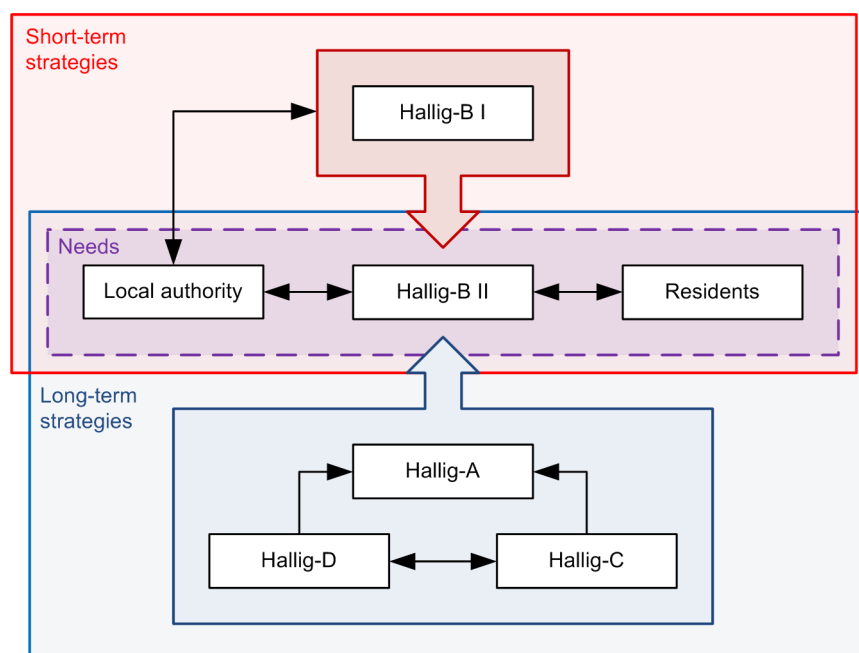


Abbildung 1: Vernetzung der Teilprojekte im Projekt Living CoastLab Halligen.

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-Bewohner\*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 unter 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 Trübe-messungen 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 der Ablagerungsprozesse sowie des Einflusses 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 dar. Auf Basis von künstlichen neuronalen Netzen konnten die Trübedaten allerdings für die vorliegende Fragestellung adäquat wiedergegeben werden (RMSE: 0,03 bis 0,08 g/l; R<sup>2</sup>: 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 und resultierendem Sedimenttransport auf die Hallig Langeneß hat gezeigt, dass bei moderaten Landunterereignissen, 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 aus den Felduntersuchungen und die Erfahrungen 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 untersucht 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 auswirken. 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 (Abbildung 2).



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

Zur Bewertung der Wirksamkeit wurden zwei Anwendungsfälle betrachtet: das Verschießen 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 Potential, 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 zum einen Datenmaterial aus dem Vorgängerprojekt „ZukunftHallig“ verwendet; zum anderen wurden 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, aber 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 sowohl die technische Anwendbarkeit und 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 Diskussteilnehmer\*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 von bestehenden Maßnahmen in der Versuchshalle, beispielsweise ein Test 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 (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 vertikale 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 Nordwesteuropas 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. 2020).

Die Salzwiesen der Halligen sind größtenteils durch Gemeinschaften der oberen Salzwiese geprägt (vorwiegend vom Typ *Juncus gerardii* und *Festuca rubra*) und unterscheiden 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 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 einem dadurch resultierenden 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 Landunter 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. 2020).

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 deren 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 Landunter mit moderaten Überflutungshöhen. Die Sedimentakkumulation bei Sturmfluten übertrifft die bei moderaten Landunter 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. 2020).

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 Landuntern 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 Literaturverzeichnis

Bass, J.; 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.; 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.; von Eynatten H.: Suspended particulate matter for sediment accumulation on inundated anthropogenic marshland in the southern North Sea – Potential,

thresholds and limitations. In: *Continental Shelf Research*, 207, 1042142020, <https://doi.org/10.1016/j.csr.2020.104214>, 2020.

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. In: *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.; Karius, V.: ZukunftHallig – Entwicklung von nachhaltigen Küstenschutz- und Bewirtschaftungsstrategien für die Halligen unter Berücksichtigung des Klimawandels. In: *Die Küste*, 84, Wasserbau., 3–8, <https://hdl.handle.net/20.500.11970/105210>, 2016.

Karius, V.; Hache, I.; 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.; Mantilla-Contreras, J.: Trait correlation network analysis identifies biomass allocation traits and stem specific length as hub traits in herbaceous perennial plants. In: *Journal of Ecology*, 107(2), 829–842, 2019.

Krebs, V.; Ziesen, N.; Wöffler, T.; Häußling, R.; 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.; Forbes, T. D. A.: Plant functional classifications: from general groups to specific groups based on response to disturbance. In: *Trends in Ecology & Evolution*, 12(12), 474–478, 1997.

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

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

Niehüser, S.; Klein, M.; Arns, A.; 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.; Spencer, T.: The effect of vegetation height and biomass on the sediment budget of a European saltmarsh. In: *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 202, 125–133, 2018.

Schindler, M.; Karius, V.; Arns, A.; Deicke, M.; 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. In: *Estuarine, Coastal, and Shelf Science*, 151. <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, Schweiz: Eidg. Amt für Wasserwirtschaft, 1923.