

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Article, Online First

Niehüser, Sebastian; Klein, Martin; Arns, Arne; Jensen, Jürgen Analysen zum langfristigen Schutz der Halligen – Wechselwirkung zwischen Hydrodynamik und Sedimenttransport

Die Küste, 89 (Online First)

Zur Verfügung gestellt in Kooperation mit/Provided in Cooperation with:
KFKI - Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (Hg.)

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/108276>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Niehüser, Sebastian; Klein, Martin; Arns, Arne; Jensen, Jürgen (2021): Analysen zum langfristigen Schutz der Halligen – Wechselwirkung zwischen Hydrodynamik und Sedimenttransport. In: Die Küste, 89 (Online First). <https://doi.org/10.18171/1.089110>.

Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



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

Sebastian Niebüser^{1,3}, Martin Klein², Arne Arns³ und Jürgen Jensen²

¹ *Universität Siegen, Forschungsinstitut Wasser und Umwelt, Lehrstuhl für Hydromechanik, Binnen- und Küstenwasserbau, sebastian.niebueser@uni-siegen.de*

² *Universität Siegen, Forschungsinstitut Wasser und Umwelt, Lehrstuhl für Hydromechanik, Binnen- und Küstenwasserbau*

³ *Universität Rostock, Professur Küstenschutz und Küstendynamik*

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-Barrierensystem dar, das 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 wird mittels zweidimensionaler hydrodynamisch-numerischer Modelle der Einfluss der Hydrodynamik auf die Sedimentdynamik und letztlich auf 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 die 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

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 sogenannten „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 vergangenen 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 zurückzuführen 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 bei ruhigem Wetter auftretenden Konzentration betragen kann (Hache et al. 2019). Die Deposition von gelösten Sedimenten hängt von vielen Faktoren, wie beispielsweise 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 ausgeprägter als im Westen. Zusätzlich zeigten Nolte et al. (2018), dass durch die Vegetationshöhe auf Langeneß unbeweidete Flächen größere Sedimentdepositionsraten aufweisen als beweidete Flächen. Das bestätigen Bass et al. (2020) und weisen 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 weiterer 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 Ablagerung 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 auf 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 infolge der simulierten Sturmfluten und Landunter sowie Meeresspiegelanstiegsprojektionen zurückgelegten Pfade der einzelnen Partikel 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 dem 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. Abbildung 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®.

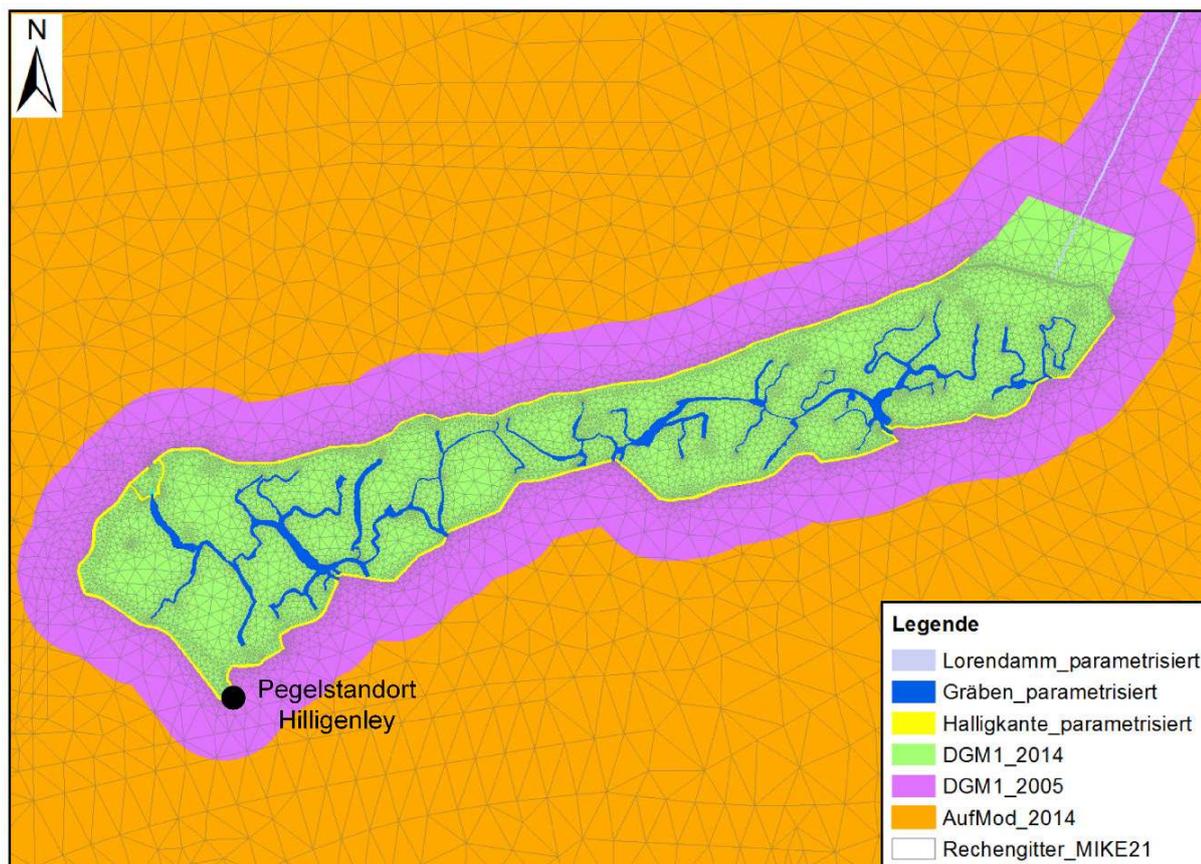


Abbildung 1: Darstellung der unterschiedlichen Datensätze zur Erstellung des Detailmodells der Hallig Langeneß.

Die höhenmäßige Erfassung der Hallig Langeneß mit umgebendem Wattenmeer im Detailmodell basiert auf unterschiedlichen Datensätzen (vgl. Abbildung 1). Die flächendeckende Topographie der Hallig Langeneß und der angrenzenden Wattflächen wird 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 Schrottko 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 Abbildung 1 zusammengetragen.

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 Tabelle 1.

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

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 Szenarienkäufe 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.

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, linearer Regressionsmodelle auf Basis schrittweiser Regression. Die lineare Regression erlaubt die Beschreibung des statistischen Zusammenhangs zwischen einer Zielvariable $T(t)$ und einem oder mehreren Prädiktoren g_j unter Entstehung eines Fehlerterms $e(t)$. Die Größe des statistischen Zusammenhangs zwischen den Prädiktoren und der Zielvariable wird dabei durch den Regressionskoeffizienten a_j 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 Regressionsmodell 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_j 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: einer Eingangsschicht (*engl. Input Layer*), verdeckte Schicht(en) (*engl.*

Hidden Layer) und einer 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 0 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 eine 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 Datensätzen (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 Seegangparametern (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 einer 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 elf 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 Trübemessstationen 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 Trübungsmessstelle 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 zehn 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 („Steuungsungleichheit“) der Residuen als auch auf die Normalverteilung der Residuen geprüft.

2.3 Sedimenttransport

Besonders im Bereich der Binnengewässer wurden bereits 2D-HNM erfolgreich für die Simulation der Partikelpfade von Sedimentpartikeln verwendet. So wurde beispielweise in Thonon et al. (2007) die Änderung der Sedimentdynamik aufgrund verschiedener Einflüsse – wie der Klimawandel und anthropogene Eingriffe 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 konnten 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, das die Partikelbewegungen simuliert, um daraus Akkumulationen und Konzentrationen des Kunststoffs abzuleiten. In der Arbeit konnten dadurch Abhängigkeiten zwischen Ablagerungen an Land, auf der Meeressohle und den zugehörigen Quellen der Kunststoffe abgeleitet 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, Abbildung 2). Zur Simulation der suspendierten Sedimentpartikel wird das „Particle Tracking“-Modul (PT) von 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 zugeschrieben 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:

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

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

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

Partikel- klasse	Name	Abkürzung	Sinkge- schwindigkeit [m/s]	krit. Sohlschub- spannung [N/m ²]	Masse [g]	Durch- messer [m]
1	Schluff	U	0.0005	0.415	3.75E-08	3.00E-05
2	schluffiger Feinsand	fSU	0.0037	0.615	7.10E-07	8.00E-05
3	Feinsand	fS	0.0122	0.790	4.68E-06	1.50E-04
4	mittelsandiger Feinsand	fSms	0.0194	0.878	1.03E-05	1.95E-04
5	Mittelsand	mS	0.0270	0.954	1.92E-05	2.40E-04

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

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 Abbildung 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 Norde- bzw. Süderauere 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 Abbildung 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.

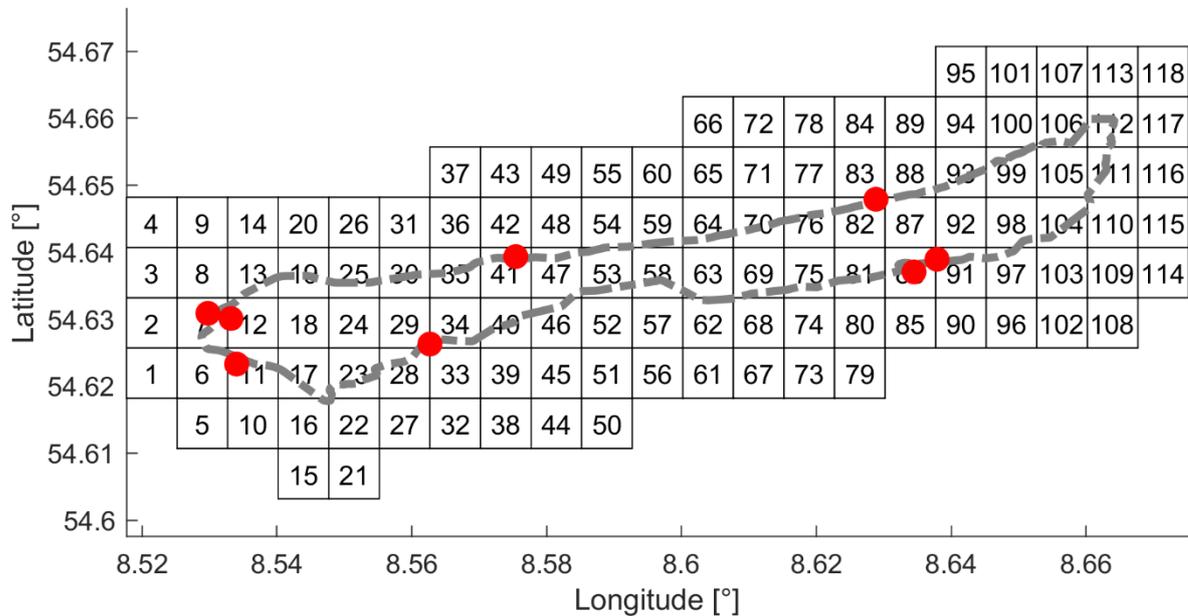


Abbildung 3: Hallig Langeneß – Lage der Trübungsstationen und Sedimentfallen (rot; Hache et al. 2019) und Lage der 118 gewählten Quellen, an denen Sedimentfraktionen in die Simulation eingesteuert werden.

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 Kapitel 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 Kapitel 3.1 wird dafür im Wesentlichen auf die simulierten Wasserstandsganglinien der Landunter- und Sturmflutereignisse eingegangen. In Kapitel 3.2 werden die Ergebnisse der statistischen Erfassung der Trübung beschrieben, die auf den simulierten Parametern des HNM basieren. Im Kapitel 3.3 wird schließlich auf die aus der Kombination der statistischen und numerischen Verfahren gewonnenen Erkenntnisse zur Veränderung der Sedimentation 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 der und um die Hallig Langeneß.

3.1 Hydrodynamisch-numerische Modellierung

In Abbildung 4 sind die simulierten Wasserstandsganglinien auf Höhe des Pegelstandortes Hilligenley im Südwesten der Hallig Langeneß (siehe Abbildung 1) dargestellt. 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 dazu, 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.

Auf Basis der Sturmflut „Xaver“ vom 06.12.2013 verdeutlicht Abbildung 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 Abbildung 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 auf die zukünftige Veränderung der Sedimentationsraten auf der Hallig Langeneß zu analysieren.

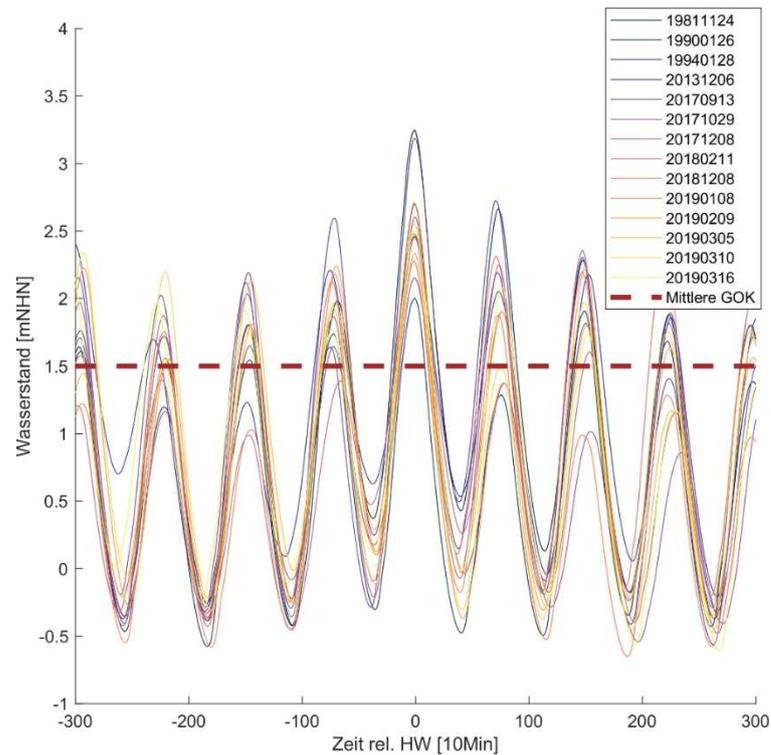


Abbildung 4: Darstellung der simulierten Wasserstandsganglinien der 14 betrachteten Landunter- und Sturmflutereignisse auf Höhe des Pegelstandortes Hilligenley im Südwesten der Hallig Langeneß. Die mittlere Geländeoberkante der Hallig Langeneß ist als gestrichelte Linie abgebildet.

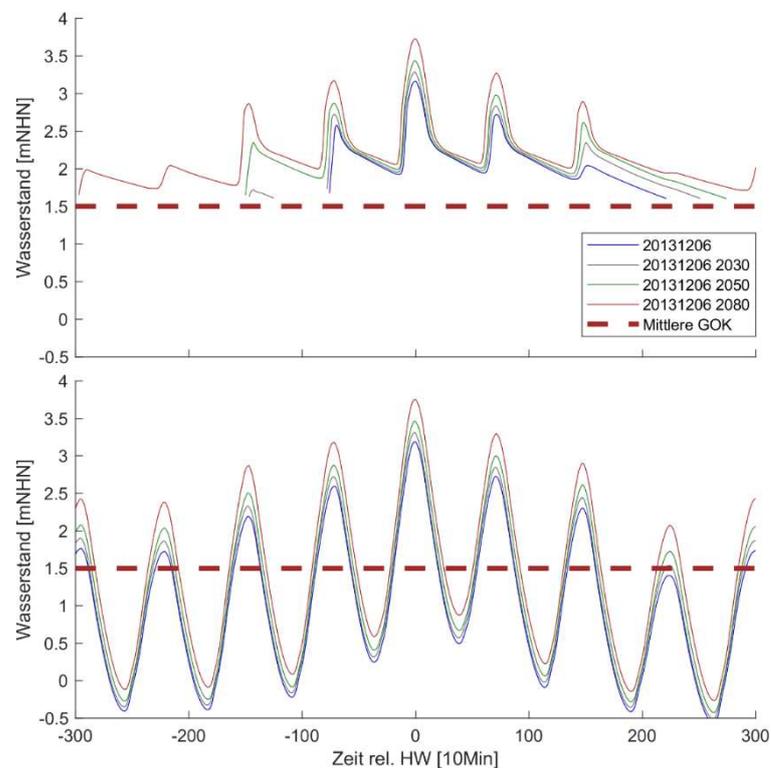


Abbildung 5: Darstellung der simulierten Wasserstandsganglinien während der Sturmflut „Xaver“ vom 06.12.2013 auf Höhe des Pegelstandortes Hilligenley im Südwesten der Hallig Langeneß (unten) und auf der Hallig Langeneß (oben) für den IST-Zustand sowie unter Berücksichtigung der Meeresspiegelprojektionen 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 Abbildung 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, den Seegangparametern (Wellenrichtung und -periode) und der resultierenden Windgeschwindigkeit.

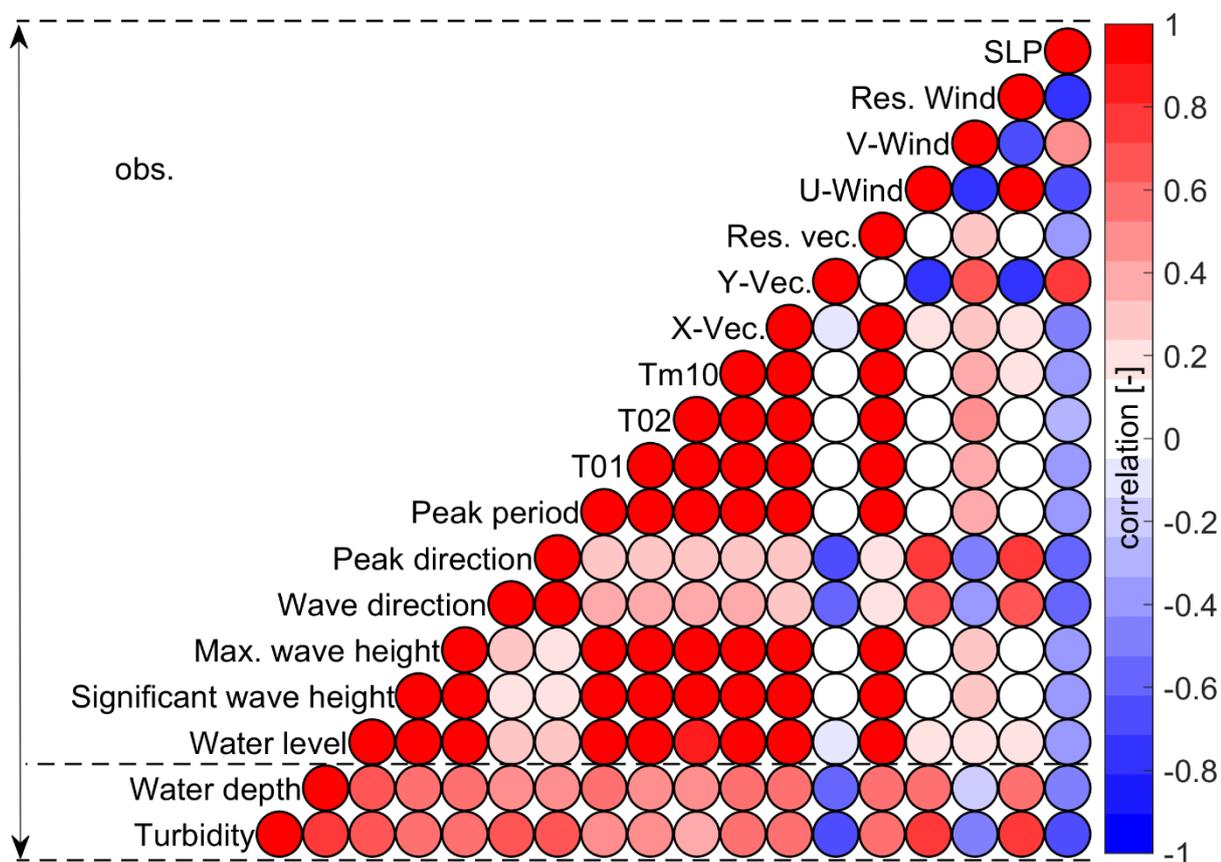


Abbildung 6: Korrelation zwischen ausgewählten hydrodynamischen Variablen aus einer numerischen Modellstudie (*engl. modelled*) und der beobachteten (*engl. observed, obs.*) Trübung und Wassertiefe bei vier Tidezyklen. Nicht signifikante Korrelationen werden als weiße Kreise dargestellt.

Abbildung 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 Trübemesstationen 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 der und um die Hallig Langeneß und die komplexen physikalischen Vorgänge der Trübungsdynamik im Projektgebiet zurückzuführen.

Demgegenüber führt die statistische Erfassung der Trübung mit den acht individuellen Regressionsmodellen der einzelnen Trübemesstationen zu höheren Bestimmtheitsmaßen. Ein exemplarisches Ergebnis der Vorhersage der Trübungsdaten an der Messstation LT1 im Südosten der Hallig Langeneß (vgl. Abbildung 9) ist in Abbildung 7 dargestellt. Der linke Teil der Abbildung 7 zeigt den Vergleich der beobachteten (schwarz) mit der rekonstruierten (rot) Trübung. Im rechten Teil der Abbildung 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 Trübemesstation LT1 werden Gütemaße von $R^2 = 0,38$ und $RMSE = 0,12 \text{ g/l}$ 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 Trübemesstationen zeigt sich ein überwiegend einheitliches Bild. Die Prädiktoren des Seegangs werden immer als statistisch signifikant bei der Erfassung der Trübung ausgewählt. An der Messstation LT2 im Südwesten der Hallig Langeneß beispielsweise werden zusätzlich der Wasserstand und die Strömungsgeschwindigkeiten sowie die induzierte Wellenergie 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 Trübemesstationen 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 Trübewerten an den Messstationen LT7 und LT8, die sich auf der Hallig befinden, erreicht das R^2 sogar Werte über 0,8.

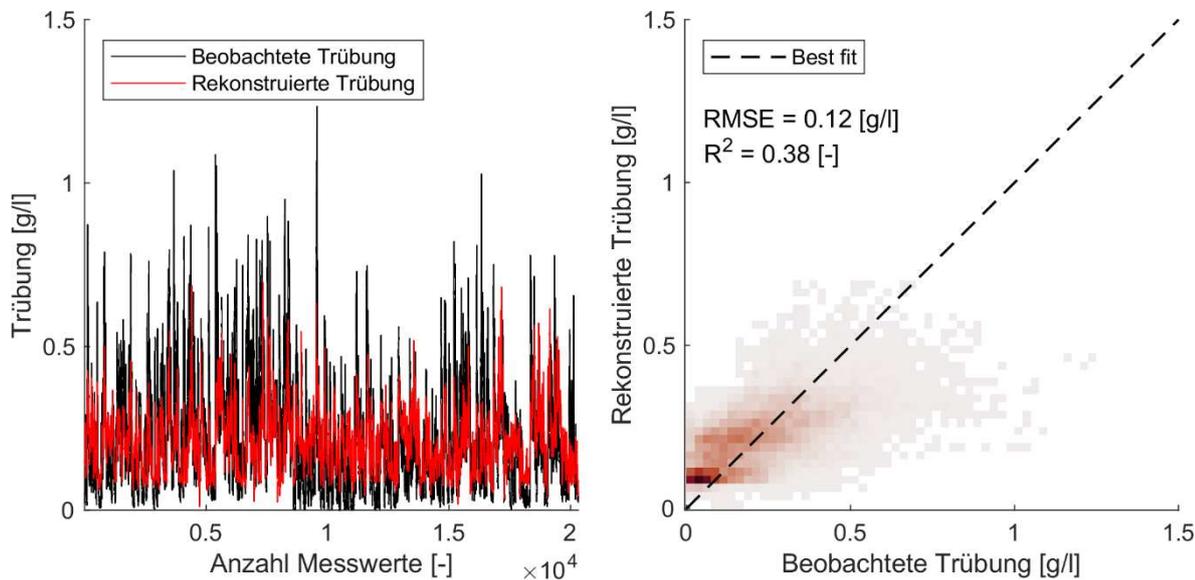


Abbildung 7: Ergebnisse der statistischen Erfassung der Trübung auf Basis der schrittweisen multiplen linearen Regressionsansätze, exemplarisch für die Trübemesstation LT1.

In Abbildung 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 höheren 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 sich die statistische Erfassung der Trübung aufgrund der Komplexität der ablaufenden physikalischen Prozesse sowie der Unsicherheiten in den Trübungsmessungen nicht über den gewählten Regressionsansatz realisieren lässt. Allerdings bestätigen die gewonnenen Erkenntnisse aus Abbildung 6 und 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 Abbildung 8 dargestellt. Der RMSE kann auf 0,08 g/l und das R^2 auf 0,76 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. Abbildung 8 verdeutlicht zudem, dass auch die hohen Trübedaten, abgesehen von einzelnen Ausreißern, im Rahmen der Unsicherheiten adäquat erfasst werden.

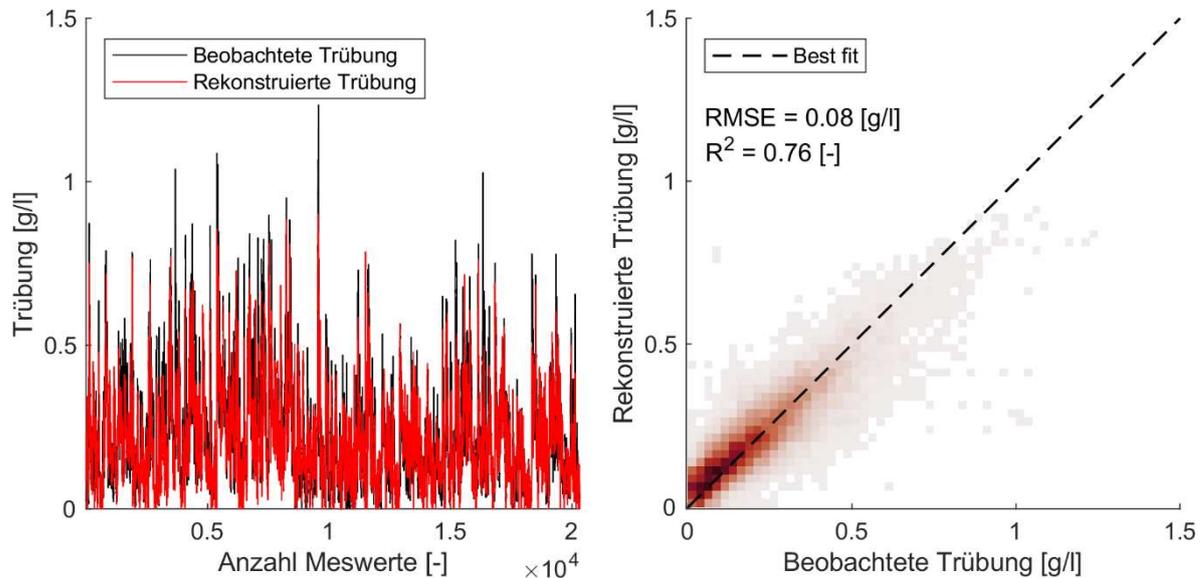


Abbildung 8: Ergebnisse der statistischen Erfassung der Trübung auf Basis der KNN, exemplarisch für die Trübungsmessstation LT1.

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

Zusammenfassend wird festgehalten, dass die in den Felduntersuchungen auf der und um die Hallig Langeneß erfassten Trübedaten in Abhängigkeit von 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 zeitlicher 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.

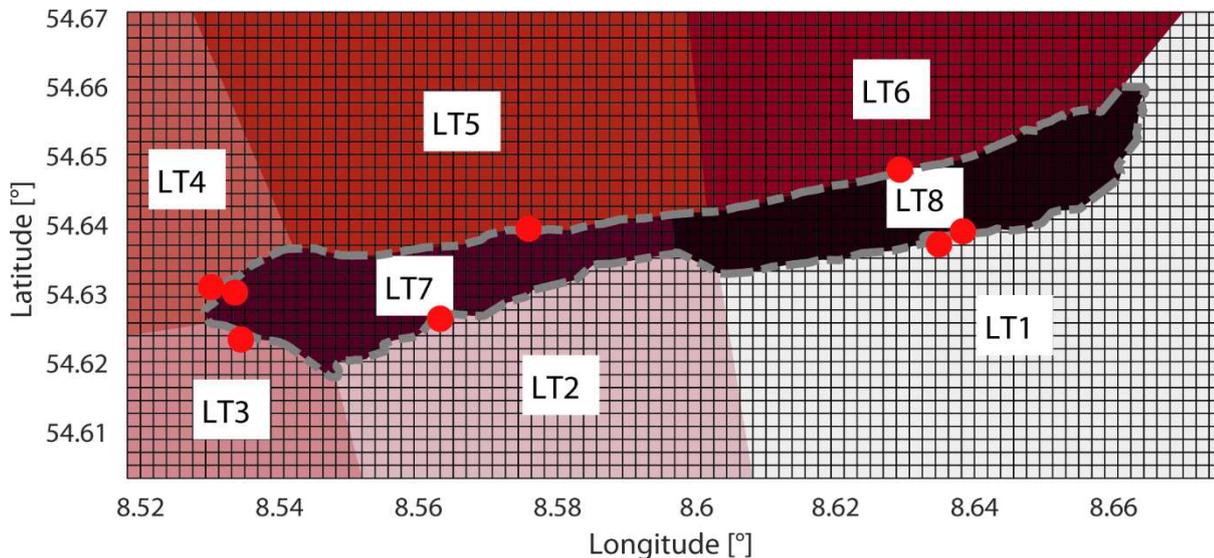


Abbildung 9: Zuordnung der 118 Sedimentquellen zu den zugehörigen Trübemesstationen für die flächige Übertragung der Trübewerte.

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 Abbildung 10 qualitativ anhand der Anzahl sedimentierter Sedimentfraktionen dargestellt. Es wurde zur Validierung des Modells eine beliebige Anzahl an Partikeln 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 und resultierendem 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.

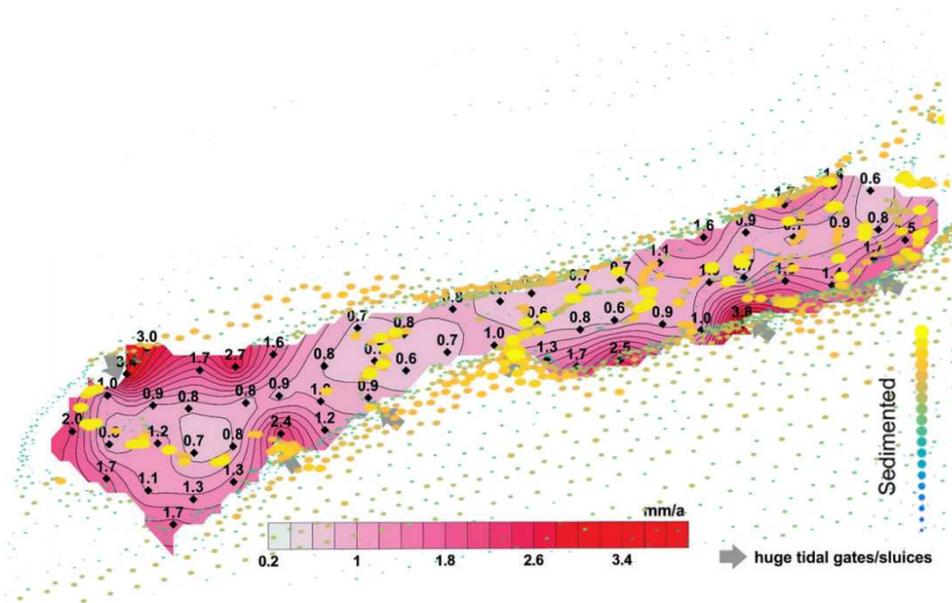


Abbildung 10: Exemplarisches Ergebnis der Berechnung des Sedimenttransports und Validierung anhand von Schindler et al. (2014b).

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 wo verlassen sie diese wieder?
- 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 Abbildung 11 durch die Gegenüberstellung des Landunter-Ereignisses 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 Abbildung 12 auf, wo die einzelnen Sedimentfraktionen von der Hallig Langeneß heruntertransportiert werden. Im Falle des Landunter-Ereignisses vom 13.09.2017 zeigt sich, dass die Partikel die Hallig hauptsächlich über die südliche Kante wieder verlassen. Das trifft auf alle simulierten Landunter-Ereignisse 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.

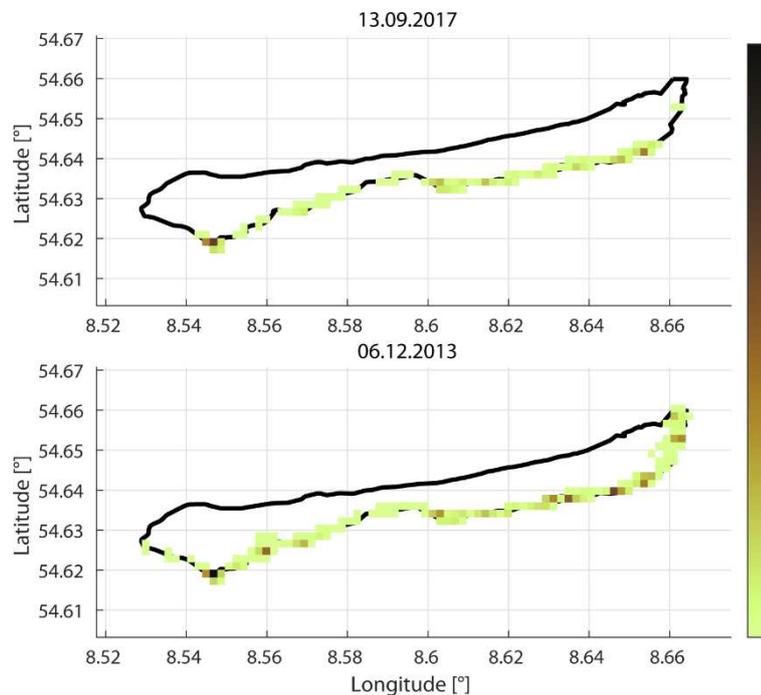


Abbildung 11: Vergleich des Landunter- und Sturmflutereignisses vom 13.09.2017 und 06.12.2013 hinsichtlich der Fragestellung, über welche Bereiche die Sedimentfraktionen auf die Hallig Langeneß transportiert werden.

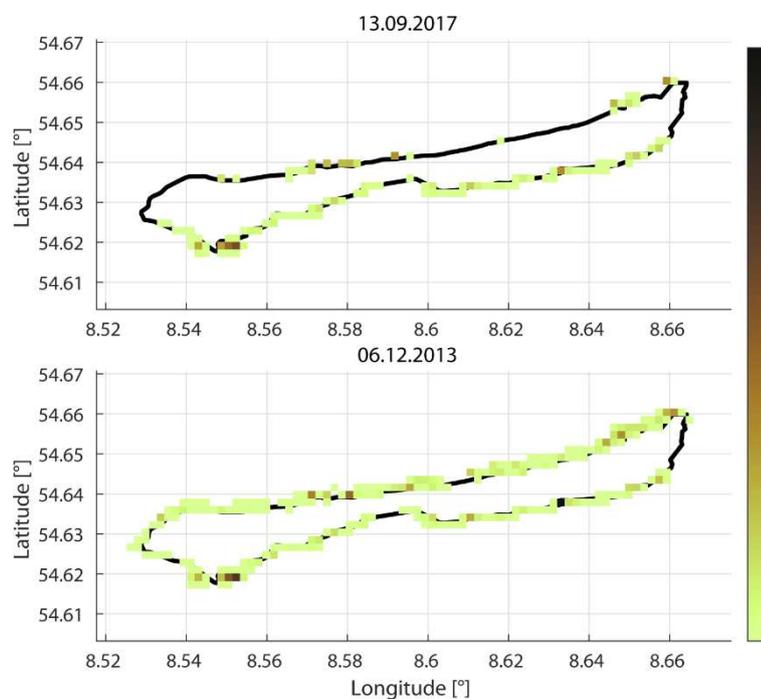


Abbildung 12: Vergleich des Landunter- und Sturmflutereignisses vom 13.09.2017 und 06.12.2013 hinsichtlich der Fragestellung, wo die Sedimentfraktionen von der Hallig Langeneß heruntertransportiert werden.

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 Landunter-Ereignisse lässt sich jedoch feststellen, dass sich der Transport der Sedimente mit einer sukzessiven Erhöhung des Basiswasserstandes an die Ergebnisse der Sturmflutsimulationen angleicht.

Abbildung 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 Abbildung 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 gewichtige Rolle, d. h., über wie viele Tidezyklen diese andauern. Entsprechend können bei einer Sturmflut mehr Sedimente auf die Hallig gelangen und sich bei entsprechend beruhigten Strömungsverhältnissen absetzen.

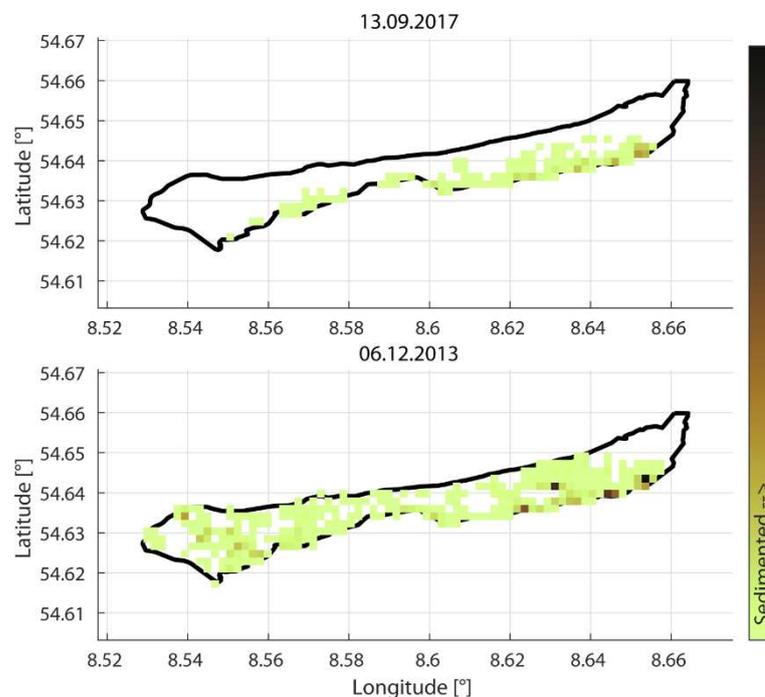


Abbildung 13: Vergleich des Landunter- und Sturmflutereignisses vom 13.09.2017 und 06.12.2013 hinsichtlich der Fragestellung, in welchen Bereichen Sedimentfraktionen auf der Hallig Langeneß sedimentieren.

Dieser Zusammenhang sowie der Einfluss des maximalen Wasserstandes auf die Sedimentfraktionen, die auf die Hallig Langeneß transportiert werden und dort sedimentieren, werden in Abbildung 14 verdeutlicht. Der Sedimenttransport und die Sedimentation auf der Hallig werden bei den erfassten Landunter-Ereignissen maßgeblich durch Schluff dominiert (Abbildung 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 Landunter-Ereignissen, auch Partikel der Klasse fSU auf die Hallig transportiert, die sich wiederum in tiefliegenden Bereichen auf der Halligoberkante absetzen können. Bei den Landunter-Ereignissen 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 hingegen statt, wenn auch im Vergleich zu den anderen Sedimentfraktionen deutlich reduziert. 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 dementsprechend 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 von 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 übereinstimmt.

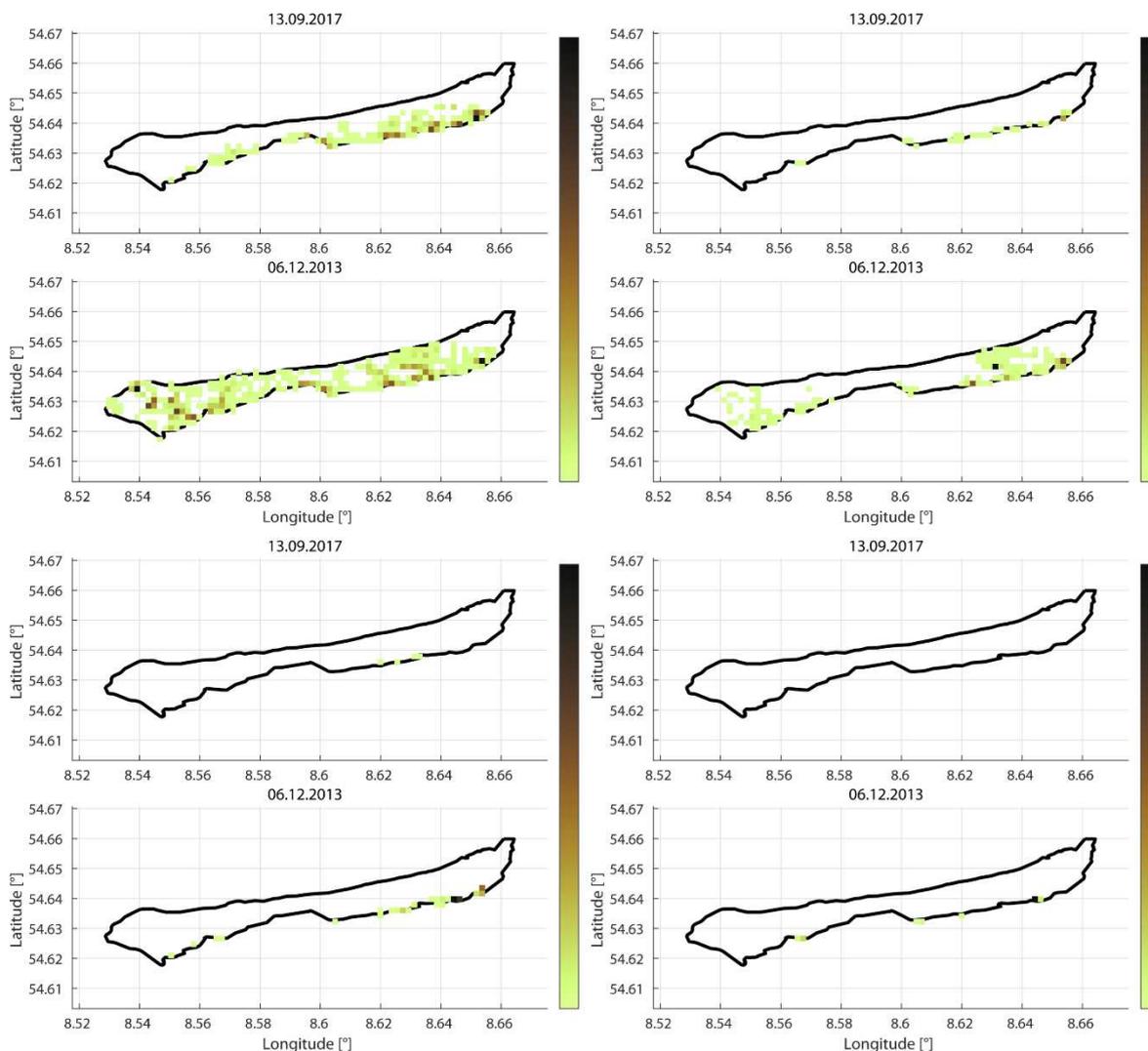


Abbildung 14: Vergleich des Landunter- und Sturmflutereignisses vom 13.09.2017 und 06.12.2013 hinsichtlich der Fragestellung, welche Sedimentfraktionen auf der Hallig Langeneß sedimentieren (oben links: U; oben rechts: fSU; unten links: fS; unten rechts: fSms).

Im letzten Schritt zeigt die Abbildung 15 den Vergleich der Veränderung der Sedimentation auf der Hallig Langeneß unter Berücksichtigung der Meeresspiegelprojektionen für die Jahre 2030, 2050 und 2080 für Landunter-Ereignisse. 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 Landunter-Ereignisse größere Sedimentfraktionen auf die Hallig Langeneß transportieren werden und potentiell zu einem Aufwuchs führen können. Demgegenüber stehen allerdings Erosionsprozesse, die bei den bisherigen Betrachtungen vernachlässigt werden. Es ist auch 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, nutzen und andererseits in der Lage sind, diese nachhaltig auf der Hallig zu konservieren.

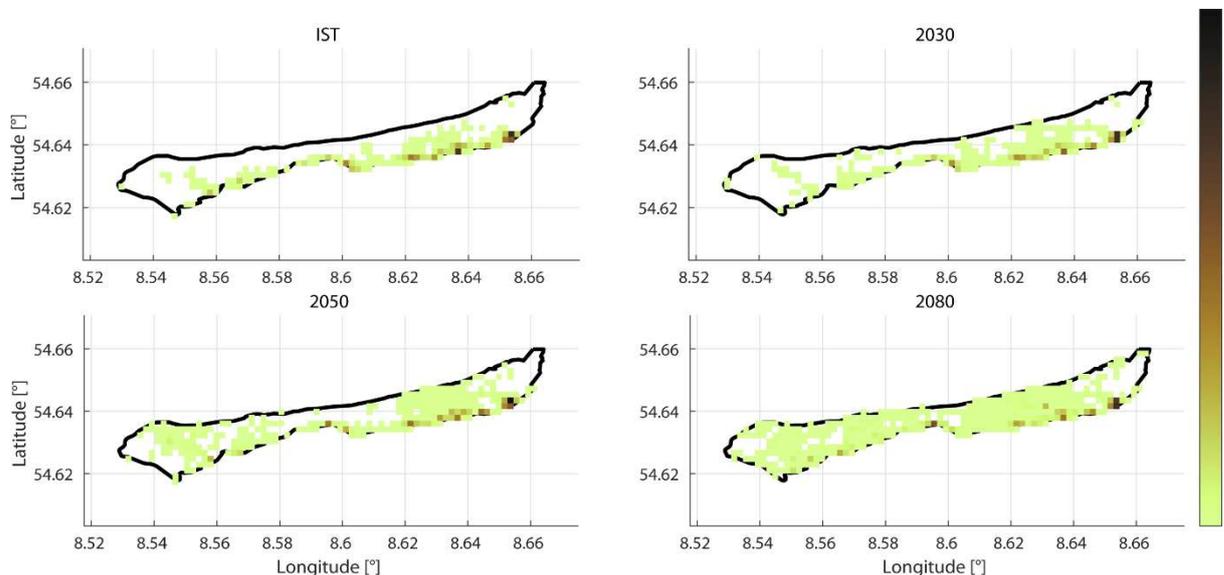


Abbildung 15: Vergleich der Veränderung der Sedimentation auf der Hallig Langeneß unter Berücksichtigung der Meeresspiegelprojektionen für die Jahre 2030, 2050 und 2080 für Landunter-Ereignisse.

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 dessen, 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 Landunter-Ereignissen (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.

4 Schlussfolgerung und weiterer Forschungsbedarf

Die Halligen im nordfriesischen Wattenmeer als Reste früherer Inseln sind in den vergangenen Jahrhunderten durch Sedimentablagerungen bei Landunter mit dem Meeresspiegelanstieg angewachsen. Dieser natürliche Prozess wurde durch verschiedene Schutzmaßnahmen (z. B. Verstärkung und Erhöhung der Halligkante) gestört. In Verbindung mit einem beschleunigten Meeresspiegelanstieg ist die zukünftige Existenz der Halligen bedroht, weshalb im Forschungsprojekt „Living CoastLab Halligen“ Analysen zu deren nachhaltigem Schutz durchgeführt wurden.

Die Basis der vorgestellten Untersuchungen und der Ergebnisse bildet das Vorgängerprojekt „ZukunftHallig“ (Jensen et al. 2016). Es konnte gezeigt werden, dass die Sedimentablagerungen auf der Halligoberfläche infolge regelmäßiger Überflutungen ein vertikales Anwachsen der Geländehöhen begünstigen (Schindler et al. 2014b). Demgegenüber wurde ein Anstieg der mittleren und extremen Wasserstände beobachtet. Für die Zukunft skizzieren aktuelle Projektionen darüber hinaus einen noch stärkeren Anstieg der Wasserstände (Church et al. 2013). Dabei ist fraglich, ob der Anstieg der Wasserstände vom derzeitigen vertikalen Aufwuchs durch Sedimentablagerungen kompensiert werden kann. Im Fokus der Untersuchungen standen dementsprechend langfristige Strategien zur Erhöhung der natürlichen Adaptionskapazität der Halligen. Ob dieser Anpassungsmechanismus ausreicht, den Anstieg der Wasserstände zu kompensieren, hängt im Wesentlichen von den Trübstoffkonzentrationen in der Wassersäule rund um die Halligen während eines Hochwasserereignisses, das zu einem Landunter führt, ab. Zudem muss der Transport der Sedimente auf die Hallig gewährleistet sein. Zur Abschätzung des Sedimenttransportes und der resultierenden Ablagerungsprozesse in Abhängigkeit von unterschiedlichen Maßnahmen und Eingriffen werden beobachtete und statistisch generierte Daten sowie eine Kombination verschiedener statistischer und numerischer Modelle herangezogen.

Die statistische Beschreibung der aus Naturmessungen gewonnenen Trübungswerte in der Wassersäule und die anschließende flächige Extrapolation zeigen, dass die Daten der einzelnen Messstationen unterschiedliche Charakteristiken aufweisen. Dies ist einerseits in der Komplexität der ablaufenden physikalischen Prozesse begründet und andererseits in den Unsicherheiten der Trübungsmessungen. Weitere Unsicherheiten resultieren aus den numerisch generierten Daten, die als Prädiktoren in die statistischen Modelle eingeflossen sind und eine vereinfachte Abbildung der in der Natur auftretenden hochfrequenten Prozesse darstellen. Auf Basis von künstlichen neuronalen Netzen konnten die Trübedaten allerdings für die vorliegende Fragestellung adäquat wiedergegeben (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 anschließende numerische Simulation zur Beschreibung der Wechselwirkung zwischen hydrodynamischer Einwirkung und resultierendem Sedimenttransport auf der Hallig Langeneß hat gezeigt, dass bei moderaten Landunter-Ereignissen, 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. Insgesamt zeigt sich, dass der Sedimenttransport hauptsächlich im Süden der Hallig Langeneß stattfindet. Begünstigt wird dies durch die hydrodynamischen Verhältnisse (Strömungsgeschwindigkeit und -richtung) und die niedrigere Ausbildung der Halligkante. Die Sedimentation zeigte bei den durchgeführten Analysen Maximalwerte in der Nähe der Siele.

Die Abschätzung von langfristigen Änderungen der Sedimentation unter Berücksichtigung von Meeresspiegelprojektionen für die Jahre 2030, 2050 und 2080 hat gezeigt, dass sich die Differenzen zwischen einem moderaten Landunter und einer Sturmflut angleichen. Zu berücksichtigen ist dabei jedoch, dass bei erhöhtem Meeresspiegel auch die Strömungsgeschwindigkeiten und damit die Sohlschubspannungen zunehmen und einer nachhaltigen Konsolidierung der Sedimente gegenüberstehen könnten. Hierzu sind jedoch weitere systematische Analysen notwendig.

Die hier vorgestellte Modellkette wurde anschließend zur Entwicklung optimierter Schutz- und Managementstrategien für die Halligen herangezogen, um Vergleichsbetrachtungen und entsprechende Entscheidungen zum Erhalt der Halligen durchführen zu können (vgl. Karius et al. 2020). Auf Basis der hier 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 auswirken. Hierbei ist es wichtig, die Erfahrungen der Hallig-Bewohner*innen mit einzu beziehen und zu berücksichtigen. Diese Untersuchungen lassen u. a. den Schluss zu, dass die Halligkante einen „widersprüchlichen“ Nutzen aufweist (siehe auch Hache et al. 2020). Einerseits können nur bei ausreichend hohen Wasserständen Sedimente auf die Hallig transportiert werden, die für einen vertikalen Aufwuchs erforderlich sind. Andererseits wird für die Sedimentation eine ausreichend lange Beruhigung der Strömungsprozesse benötigt; erhöhte Wasserstände tragen jedoch mehr Energie auf die Hallig und fördern somit die (Re-)Mobilisierung der Sedimente.

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, das von DHI-WASY zur Verfügung gestellt wurde.

6 Literaturverzeichnis

Allison, M. A.; Yuill, B. T.; Meselhe, E. A.; Marsh, J. K.; Kolker, A. S.; 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.; Pattiaratchi, C.: Sea-level rise induced amplification of coastal protection design heights. In: *Scientific reports* 7, S. 40171, <https://doi.org/10.1038/srep40171>, 2017.

Arns, A.; Wahl, T.; Haigh, I. D.; Jensen, J.: Determining return water levels at ungauged coastal sites: a case study for northern Germany. In: *Ocean Dynamics* 65 (4), 539–554, <https://doi.org/10.1007/s10236-015-0814-1>, 2015.

Backhaus, K.; Erichson, B.; Plinke, W.; Weiber, R.: *Multivariate Analysemethoden*. 14. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; Imprint: Springer Gabler, 2016.

Bartholomä, A.; Flemming, B. W.: Zur Sedimentdynamik in den ostfriesischen Rückseitenwatten und den Veränderungen durch natürliche und anthropogene Einflüsse. In: *Schutzgemeinschaft Deutsche Nordseeküste e. V. (Hg.): Klimaänderung und Küste. Schriftenreihe der Schutzgemeinschaft Deutsche Nordseeküste, Heft 1*, 70–90, 1996.

Bass, J.; Granse, D.; Hache, I.; Jensen, K.; Karius, V.; Minden, V.; Stock, M.; Suchrow, S.; 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).

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.

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.; 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, <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.

Heyer, H.; 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*, 2345–2362, 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, 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.

Krause, P.; Boyle, D. P.; Bäse, F.: Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. In: *Advances in Geosciences*, 5, 89–97, <https://doi.org/10.5194/adgeo-5-89-2005>, 2005.

Liubartseva, S.; Coppini, G.; Lecci, R.; Clementi, E.: Tracking plastics in the Mediterranean: 2D Lagrangian model, *Marine Pollution Bulletin*, Volume 129, Issue 1, <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.02.019>, 2018.

Markl, G.: *Minerale und Gesteine*. Springer, Berlin, 2015.

Niehüser, S.; Arns, A.; 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.; Schulze, D.: Untersuchung der Sedimentablagerung auf unterschiedlich gemanagten und exponierten Flächen der Hallig Langeneß. Abschlussbericht. Universität Hamburg. Hamburg, 2018.

Pietrzak, J.; Souza, A. J.; Huthnance, J.: Recent Change – North Sea: Suspended Particulate Matter and Turbidity. In: *North Sea Region Climate Change Assessment*. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-39745-0>, S. 109-116, 2016.

Quante, M.; Colijn, F.; Sterr, H.: North Sea and Bounding Countries – A General Overview. In: North Sea Region Climate Change Assessment, 2–7, <https://doi.org/10.1007/978-3-319-39745-0>, 2016.

Quedens, G.: Die Halligen. Breklumer Verlag, Breklum, 1992.

Ricklefs, K.; Arp, D.; Stage, M.: Zur zeitlichen Variabilität der Sedimentverteilung. In: Die Küste, 83, 77–102, <https://henry.baw.de/handle/20.500.11970/101739>, 2015.

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>, 2014b.

Schindler, M.; Karius, V.; Deicke, M.; von Eynatten, H.: Measuring sediment deposition and accretion on marshland - part I: Methodical evaluation and Development. In: Estuarine, Coastal, and Shelf Science, 151, <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.; Stammer, D.: Projecting twenty-first century regional sea-level changes. In: Climatic Change 124 (1–2), 317–332, <https://doi.org/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. In: Quaternary International, 112, 3–28, [https://doi.org/10.1016/S1040-6182\(03\)00062-4](https://doi.org/10.1016/S1040-6182(03)00062-4), 2004.

Temmerman S.; Govers G.; Wartel S.; Meire P: Spatial and temporal factors controlling short-term sedimentation in a salt and freshwater tidal marsh, Scheldt estuary, Belgium, SW Netherlands. In: Earth Surf Process Landforms, 28, 739–755, <https://doi.org/10.1002/esp.495>, 2003.

Thonon, I.; de Jong, K.; van der Perk, M.; Middelkoop, H.: Modelling floodplain sedimentation using particle tracking. In: Hydrol. Process., 21, 1402–1412, <https://doi.org/10.1002/hyp.6296>, 2007.

Urban, D.; 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, 124–127, <https://doi.org/10.1007/978-3-319-39745-0>, 2016.

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