

MODELLUNTERSUCHUNGEN ZUM EINFLUSS EINES MSL-ANSTIEGS AUF DIE BEMESSUNG VON KÜSTENSCHUTZBAUWERKEN (M-LAB)

Sachbericht zum Verwendungsnachweis: Teil II: Eingehende Darstellung

Vorbundprojekt	Modelluntersuchungen zum Einfluss eines MSL Anstiegs auf die Be						
verbundprojekt	messung von Küstenschutzbauwerken						
Akronym	M-Lab						
Vorhaben	Statistische Analysen zur Interaktion von Meeresspiegelanstieg, Sturmfluten und Morphologie im Wattenmeer (StAMSie) und Modelluntersuchungen zur Interaktion von Meeresspiegelanstieg,						
	Sturmfluten und Morphologie im Wattenmeer (MoMSie)						
Förderer	Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)						
Förderkennzeichen	03KIS131 und 03KIS132						
Laufzeit	10/2019 - 09/2022						
Aufgestellt von	DrIng. Sebastian Niehüser & JProf. DrIng. Arne Arns (Koordina- tion), Professur Küstenschutz und Küstendynamik, Agrar- und Um- weltwissenschaftliche Fakultät, Universität Rostock						
	Dr. Ulf Gräwe, Leibniz-Institut für Ostseeforschung Warnemünde (IOW)						

Rostock, im März 2023

J.-Prof. Dr.-Ing. Arne Arns Universität Rostock Agrar- und Umweltwissenschaftliche Fakultät Professur Küstenschutz und Küstendynamik Justus-von-Liebig-Weg 6, Raum 13 18059 Rostock Tel.: 0381/498-3760 Fax: 0381/498-1183702 E-Mail: arne.arns@uni-rostock.de Web: www.auf.uni-rostock.de/kk

Projektpartner im Verbund



Vorwort und Motivation

Der Küstenschutz in Deutschland wird gemäß geltender Anforderungen in den Generalplänen Küstenschutz der Länder für einen sicheren und nachhaltigen Küsten- und Sturmflutschutz geplant, bemessen, gebaut und unterhalten. Grundlegend wird in Deutschland in der Auslegung von Küstenschutzwerken bereits ein Anstieg des Meeresspiegels um 50 cm bis zum Ende des Jahrhunderts berücksichtigt (aktuell wurde das Vorsorgemaß auf 100 cm verdoppelt¹). Einige Szenarien projizieren jedoch bereits heute einen deutlich höheren Anstieg, allerdings mit unscharfer konkreter Ausprägung in Gestalt von Entwicklungsszenarien (RCPs). Aktuelle Untersuchungen (z. B. Arns et al. 2017) stellen die Auswirkungen und impliziten Wechselwirkungen des Meeresspiegelanstiegs (engl. sea level rise, SLR) auf Tide, Windstau und Wellen in der Deutschen Bucht mit einem Fokus auf die Küsten Schleswig-Holsteins heraus. Eine Kernaussage ist, dass es im küstennahen Flachwasserbereich zu nichtlinearen Wechselwirkungen der durch SLR beeinflussten Einwirkungen kommt. Daraus resultierend vergrößern sich die Sturmflutwasserstände und Wellen (und in der Konsequenz die Bemessungshöhen) nicht nur um den zu erwartenden SLR, sondern um einen weiteren Faktor aus nichtlinearen Interaktionen, der an einigen Standorten um mehr als 50 % des zu Grunde liegenden SLR erreichen kann. Aktuell werden die Auswirkungen des SLR im Flachwasserbereich demnach unterschätzt. Unklar ist bislang jedoch, wie sich morphologische Änderungen des Küstenvorfeldes auf diese (bislang beobachtete) Nichtlinearität auswirkt. Hierdurch könnten die nichtlinearen Anstiege zumindest teilweise kompensiert werden. Im Rahmen des Projektes M-Lab soll die Interaktion zwischen Morpho- und Hydrodynamik aus statistischen sowie numerischen Sensitivitätsstudien identifiziert werden. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse liefern direkte Aussagen für Planungsaufgaben (z. B. Sedimentdynamik und zukünftig erforderliche Deichhöhen im Nordfriesischen Wattenmeer) und erweitern den aktuellen Kenntnisstand der Sturmflutdynamik in der Deutschen Bucht deutlich.

¹https://www.nlwkn.niedersachsen.de/jb2021/Niedersaechsischer_Klimadeich/klimawandel-und-kustenschutz-ein-entscheidender-meter-mehr-niedersachsischer-klimadeich-und-verdopplung-des-vorsorgemasses-201169.html

Inhaltsverzeichnis

Projektpartne	er im Verbund	3							
Vorwort und	Motivation	4							
Inhaltsverzei	chnis	5							
Abbildungsv	erzeichnis	7							
Tabellenverz	eichnis	10							
Eingehende l	Darstellung der durchgeführten Arbeiten des Vorhabens	11							
1.	Einleitung	11							
2.	Zielstellung und Ablauf	11							
3.	Stand der Wissenschaft und Technik und bisherige Arbeiten	13							
4.	M-Lab: Eingehende Darstellung der Teilvorhaben	15							
4.1	Statistische Analysen zur Interaktion von Meeresspiegelanstieg, Sturmfluten und Morphologie im Wattenmeer (StAMSie)	15							
4.1.1	Analyse von Wasserstandsdaten (AP 1.1)	15							
4.1.2	Analyse morphodynamischer Karten (AP 1.2)	21							
4.1.3	Aufbereitung von regionalen Meeresspiegelprojektionen (AP 1.3)	24							
4.1.4	Identifizierung potenzieller Veränderungen in den hydrodynamischen Belastungsgrößen (AP 1.4)	26							
4.1.4.1	Allgemeines	26							
4.1.4.2	Modellbasierte Veränderung von mittleren Tideparametern durch die Berücksichtigung veränderlicher Bathymetrien im numerischen Modell	27							
4.1.4.3	Detektion eines globalen Signals im Untersuchungsgebiet mittels Hauptkomponentenanalyse auf Basis der Bathymetrie	29							
4.1.4.4	Extremwertstatistische Analysen zur Interaktion von Meeresspiegelanstieg, Sturmfluten und Morphologie im Nordfriesischen Wattenmeer	34							
4.1.5	Zusammenfassung	34							
4.1.6	Ausblick								
4.2	Modelluntersuchungen zur Interaktion von Meeresspiegelanstieg, Sturmfluten und Morphologie im Wattenmeer (MoMSie)	35							
4.2.1	Implementierung des Modellsystems (AP2.1)								
4.2.2	Kleinskalige Rekonstruktion des Jetzt-Zustandes des Wattenmeeres (AP2.2)	37							
4 2 2 1	Das nordfriesische Wattenmeer								
4 2 2 2	Das ostfriesische Wattenmeer	30							
4 2 3	Vorhersagbarkeit und Variabilität des Jetzt-Zustandes (AP2.3)	40							

4.2.4	Meeresspiegelprojektionen (AP2.4)	42
4.3	Gemeinsame Zusammenfassung zu Zielen, Ergebnissen und Relevanz	
	des Projektes	46
5.	Referenzen	48

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	: Trends unterschiedlicher Wasserstandsperzentile am Pegel Cuxhaven zwischen 1953 und 2008. Um den Anstieg der höheren Wasserstandperzentile zu verdeutlichen, wurden die Wasserstände um den/die MSL/MThw "reduziert", d. h. der verbleibende Anstieg wurde zusätzlich zum MSL/MThw beobachtet	14
Abbildung 2:	: Wechselwirkung zwischen MSL-Änderungen und der Tidewelle, dem Seegang und dem Wellenauflauf	15
Abbildung 3:	: Lage der betrachteten Pegelstandorte im Untersuchungsgebiet der Deutsche Bucht einschließlich der verfügbaren Zeitreihenlängen.	16
Abbildung 4:	: Plausibilisierung der Wasserstandsrekonstruktion auf Basis des KNN für den Zeitraum vom 14.12.1950 bis 05.01.1951 an den Pegelstandorten Hörnum (oben) und Cuxhaven (unten). Die roten Zeitreihen beschreiben die Beobachtungsdaten, während die schwarzen Zeitreihen die Rekonstruktion durch das KNN zeigen.	17
Abbildung 5:	: Plausibilisierung der Wasserstandsrekonstruktion am Pegelstandort Cuxhaven auf Basis des KNN anhand von Partialtidenanalysen der M2, S2, O1 und M4. Die schwarzen Zeitreihen stellen die Ergebnisse auf Basis der Beobachtungen und die grauen Zeitreihen die Ergebnisse auf Basis des KNN dar.	18
Abbildung 6:	: Vergleich zwischen dem pegelspezifischen und dem theoretischen Nodaltidesignal (oben: Lerwick; unten: Husum). In grün sind die Zeitreihen der Hauptkomponentenanalyse und in blau der HDdU dargestellt. Die schwarzen Kurven zeigen die Differenz zeigen den Vergleich aus der Antwort des Systems "Nordsee" im Vergleich zum theoretischen Potential am jeweiligen Pegelstandort.	20
Abbildung 7:	: Übersicht der ermittelten Cluster auf Basis standardisierter Bathymetriedatensätze.	22
Abbildung 8:	: Detailausschnitt Cluster 1. Oben links sind die negative und oben rechts die positive korrelierten Zeitreihen dargestellt. Unten sind die zugehörigen standardisierten Zeitreihen abgebildet (einschließlich gestricheltem Unsicherheitsbereich).	23
Abbildung 9:	: Korrelation der Bathmetriezeitreihen mit den Tideparametern Thb, Thw, Tnw und MSL	24
Abbildung 10	0: Regionalprojektion des Meeresspiegelanstiegs in Cuxhaven für das Jahr 2100 auf Basis des RCP8.5	26
Abbildung 1 ⁴	1: Exemplarische Darstellung einer Bathymetriezeitreihe über 69 Jahre (1950- 2018) und die rekonstruierten Zeitreihen aus der 1. Hauptkomponente (HK1), der 2. Hauptkomponente (HK2) sowie der kombinierten Rekonstruktion aus 1. und 2. Hauptkomponente (HK1+2).	30
Abbildung 12	2: Datensatz der Bathymetrie für 1950-2018 als Basis für die Hauptkompenentenanlyse.	31

Abbildung 13: Vergleich und Korrelation der Hauptkoponenten 1-6 (PC1-6) mit dem Verlauf des mittleren Meeresspiegels in Cuxhaven: oben: mit linearem Trend; unten: ohne linearen Trend	2
Abbildung 14: Vergleich und Korrelation der Hauptkoponenten 1-6 (PC1-6) mit dem Verlauf der 2. Hauptkomponente des Thb aus Jänicke et al. (2020): oben: mit linearem Trend; unten: ohne linearen Trend	2
Abbildung 15: Nestingstufen des Modellsystems. Grün markiert das 1 nm Setup der Nordsee, blau das 600 m Setup der Deutschen Bucht, rot das 200 m Setup des Nordfriesischen Watts und magenta das 100 m Setup des Ostfriesischen Watts. Die beiden Karten zeigen jeweils die Wassertiefen der finalen Nestingstufen	7
Abbildung 16: Entwicklung verschiedener Parameter für das Lister Gezeitenbecken. Die schwarze Linie stellte die Realisierung des UERRA Datensatzes dar. Zum Vergleich wurden die Datensätze aus dem Aufmod Projekt (blau) und dem EasyGSH Projekt (rot) genutzt	3
Abbildung 17: Entwicklung verschiedener Parameter für das Eider Sperrwerk Gezeitenbecken. Die schwarze Linie stellte die Realisierung des UERRA Datensatzes dar. Zum Vergleich wurden die Datensätze aus dem Aufmod Projekt (blau) und dem EasyGSH Projekt (rot) genutzt	9
Abbildung 18: Entwicklung verschiedener Parameter für das Wangerooger Gezeitenbecken. Die schwarze Linie stellte die Realisierung des UERRA Datensatzes dar. Zum Vergleich wurden die Datensätze aus dem Aufmod Projekt (blau) und dem EasyGSH Projekt (rot) genutzt	9
 Abbildung 19: Bivariates Histogramm der Windfelder der südlichen Nordsee. Links, Histogramm über alle Ensemble Member. Die gestrichelte Linie grenzt die 10 % und 99.5 % Wahrscheinlichkeit ein. Die Kreuze stellen die wahrscheinlichste Richtung und Windgeschwindigkeit der Ensemble Member dar. Rechts, Isolinien der 10 % und 99.5 % Wahrscheinlichkeit der individuellen Ensemble Member	1
Abbildung 20: Entwicklung verschiedener Parameter für das Lister Gezeitenbecken. Zum Vergleich wurden die Datensätze aus dem Aufmod Projekt (blau) und dem EasyGSH Projekt (rot) genutzt. Die dicke schwarze Linie stellt den Ensemble-Mean dar. Die dünnen schwarzen Linien sind das Ensemble- Minimum und Maximum	1
Abbildung 21: Entwicklung verschiedener Parameter für das Eider Sperrwerk Gezeitenbecken. Zum Vergleich wurden die Datensätze aus dem Aufmod Projekt (blau) und dem EasyGSH Projekt (rot) genutzt. Die dicke schwarze Linie stellt den Ensemble-Mean dar. Die dünnen schwarzen Linien sind das Ensemble-Minimum und Maximum	2
Abbildung 22: Entwicklung verschiedener Parameter für das Lister Gezeitenbecken unter verschiedenen Meeresspiegelszenarien. Die dicke Linie stellt jeweils den mittleren Fit dar, die dünnen Linien die 95% Konfidenzintervalle	3
Abbildung 23: Entwicklung verschiedener Parameter für das Eider Sperrwerk Gezeitenbecken unter verschiedenen Meeresspiegelszenarien. Die dicke Linie stellt jeweils den mittleren Fit dar, die dünnen Linien die 95% Konfidenzintervalle	1

44
45
46

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Zielstellung und Ablauf des Verbundvorhabens M-Lab. 12						
Tabelle 2: Trends der Wasserstandszeitreihe in Cuxhaven für den Gesamtwasserstand, die Tidekomponente und das verbleibende Residuum aus Gesamtwasserstand und Tidekomponente (NTR)	19					
 Tabelle 3: Zusammenfassende Auswertung der linearen Trendanalyse an elf Pegelstandorten in der Deutschen Bucht auf Basis des MThw und Beobachtungsdaten sowie verschiedenen Modellläufen. Um den Einfluss der Bathymetrie auf die Tidewasserstände zu untersuchen, werden vier Langzeitsimulationen (LR, engl.: long-run) durchgeführt. Sie unterscheiden sich in den jeweils genutzten Eingangsdaten und Randbedingungen: LR₂₀₁₄: Winddaten und Wasserstände des Jahres 2014, jeweils mit den Bathymetrien von 1950–2018; LR_{stat}: Winddaten und Wasserstände der Jahre 1950–2014, immer mit der Bathymetrie von 2014; LR_{dyn}: Winddaten und Wasserstände der Jahre 1950–2014, jeweils mit der zugehörigen Bathymetrie von 1950–2014; LR_{dyn+MSL}: Winddaten und Wasserstände der Jahre 1950–2014, jeweils mit der zugehörigen Bathymetrie von 1950–2014, jeweils mit der Zugehörigen 	28					
Tabelle 4: Hauptkomponenten und erklärte Variabilität	30					
Tabelle 5: Zusammenfassende Darstellung der Zuordnung von Hauptkomponenten aus dem Bathymetriedatensatz zu physikalischen Phänomenen	33					
Tabelle 6: Auflistung der genutzten atmosphärischen Datensätze	40					

Eingehende Darstellung der durchgeführten Arbeiten des Vorhabens

1. Einleitung

Sturmtiden und Sturmfluten stellen eine wesentliche Gefährdung für niedrig gelegene Küsten dar. Eindrucksvolle Beispiele sind hierzu die beiden Nordseesturmfluten 1953 und 1962, die jeweils große Landstriche überfluteten und über tausend Todesopfer forderten. Seit diesen beiden Ereignissen wurde der Küstenschutz in den niedrig gelegenen Küstenbereichen beträchtlich verbessert. In jüngster Zeit wurden entlang der deutschen Nordseeküste Sturmfluten beobachtet, die zum Teil erheblich höher als die beiden oben erwähnten Ereignisse ausfielen. So verursachte beispielsweise die Allerheiligenflut im November 2006 an Teilen der deutschen Nordseeküste neue Rekordwasserstände. Im Dezember 2013 führte der Sturm Xaver zu neuerlichen Rekordwasserständen auf Norderney und zu außergewöhnlich hohen Wasserständen entlang der gesamten niedersächsischen Nordseeküste. Aufgrund des verstärkten und verbesserten Küstenschutzes verursachten diese Sturmfluten im Gegensatz zu den verheerenden Ereignissen 1953 und 1962 jedoch keine wesentlichen Schäden. Gleichzeitig ist angesichts des kontinuierlich erhöhten Schutzniveaus die öffentliche Wahrnehmung von Sturmflutrisiken und Gefahren in den letzten Jahren gesunken. Die Risiken sind jedoch nach wie vor existent und können sich im Zuge des erwarteten anthropogenen Klimawandels weiter verschärfen. Als wesentliche Konsequenz gilt dabei der Anstieg des mittleren Meeresspiegels sowie der damit verbundene Anstieg extremer Wasserstände (d. h. Sturmfluten). Das Verbundprojekt "Modelluntersuchungen zum Einfluss eines MSL-Anstiegs auf die Bemessung von Küstenschutzbauwerken (M-Lab)" verfolgt das Ziel, potentiell zukünftigen Veränderungen in Sturmflutwasserständen robuster abschätzen zu können.

Die Abschätzung zukünftiger Extremwasserstände basiert in der Regel auf wissenschaftlich fundierten Projektionen des mittleren Meeresspiegels, welche den gegenwärtigen Sturmfluthöhen additiv hinzugefügt werden (siehe z. B. Smith et al. 2010). Diese vereinfachende Annahme konnte an den meisten Standorten global zumindest für die Vergangenheit anhand von langjährigen Wasserstandsbeobachtungen verifiziert werden (siehe z. B. Woodworth und Blackman 2004; Menendez und Woodworth 2010; Haigh et al. 2010; Woodworth et al. 2011). Und auch für die Zukunft kann an diesen Standorten von einem ähnlichen Verhalten ausgegangen werden. In der Deutschen Bucht weisen wissenschaftliche Analysen von langjährigen Pegelbeobachtungen dagegen auf eine immer stärker werdende Diskrepanz zwischen mittleren und extremen Wasserständen hin, welche vor allem durch nichtlineare Änderungen in der Tidekomponente des Wasserstandes und weniger durch Änderungen des Sturmklimas erklärt werden kann (siehe z. B. Jensen 1984; Mudersbach et al. 2013; Dangendorf et al. 2014; Arns et al. 2015). Diese nichtlinearen Effekte werden primär durch die Interaktion zwischen Tidewelle und der bathymetrischen Beschaffenheit des Küstenvorfeldes verursacht (sog. Flachwasser- und Reibungseffekte) (siehe hierzu z. B. Arns et al. 2015; Arns et al. 2017; Arns et al. 2020; Haigh et al. 2019). Unklar ist dabei bislang, wie sich morphologische Änderungen des Küstenvorfeldes auf die (bislang beobachtete) Nichtlinearität der Extremwasserstände auswirkt.

2. Zielstellung und Ablauf

Die Interaktion zwischen der Sediment- und Sturmflutdynamik muss in zukünftigen Untersuchungen bzw. Planungsaufgaben dringend berücksichtigt werden, da das erforderliche Schutzniveau ansonsten deutlich unterschätzt werden könnte. Im Rahmen des Verbundvorhabens M-Lab soll hierzu in enger Kooperation zwischen dem Leibniz-Institut für Ostseeforschung Warnemünde (IOW) und der

Universität Rostock eine realistische Abschätzung des Sturmflutrisikos entlang der gesamten Deutschen Bucht für die Zustände MSL + {50,100,150} cm durchgeführt werden. Hierzu werden im Einzelnen gekoppelte zwei- sowie dreidimensionale numerisch-morphodynamische Modelle zur Abschätzung der Sediment- bzw. Wattflächendynamik sowie numerisch-statistische Ansätze zur Abschätzung daraus resultierender, potentieller Sturmflut- bzw. Wellenhöhen entlang der gesamten Küstenlinie des nordfriesischen Wattenmeeres eingesetzt.

Das Verbundvorhaben M-Lab ist unterteilt in zwei Vorhaben (siehe Tabelle 1), die beide das übergeordnete Ziel verfolgen, verlässliche Belastungsgrößen zu quantifizieren, Unsicherheiten zu bestimmen sowie Aussagen zu potenziell zukünftigen Belastungsgrößen an der Deutschen Nordseeküste abzuleiten. Unterschiede existieren dabei jedoch in der Herangehensweise.

Tabelle 1: Zielstellung und Ablauf des Verbundvorhabens M-Lab.

<u>StAMSie</u>									
<u>St</u> atistische <u>A</u> nalysen zur Interaktion von <u>M</u> eeresspiegelanstieg, <u>S</u> turmfluten und Morpholog <u>ie</u> im Wattenmeer									
Ablauf	Mit Hilfe von statistischen Analyseverfahren werden die Wechselwir- kungen von Meeresspiegelanstieg, Sturmfluthöhen, Wellen und Mor- phologie entlang der deutschen Nordseeküste untersucht.								
Verantwortlicher Part- ner	Universität Rostock								
MoMSie									
<u>Mo</u> delluntersuchungen zur Interaktion von <u>M</u> eeresspiegelanstieg, <u>S</u> turmfluten und Morphologi im Wattenmeer									
Ablauf	Mit Hilfe von rechnergestützten Modelluntersuchungen werden die Wechselwirkungen von Meeresspiegelanstieg, Sturmfluthöhen, Wellen und Morphologie entlang der deutschen Nordseeküste untersucht.								
Verantwortlicher Part- ner	Leibniz-Institut für Ostseeforschung Warnemünde (IOW)								
<u>Ziele des Verbund-</u> vorhabens	 die Bereitstellung umfassender Kenntnisse und von Wissen zur In- teraktion zwischen hydrodynamischen und morphologischen Ent- wicklungen durch die Bewertung extremer Sturmflutgefahren im Zu- sammenhang mit der Veränderung des Küstenvorfeldes 								
	 die Integration und Verwertung existierenden Wissens und Know- hows durch das Zusammenbringen komplementärer Expertise Na- tur- und Ingenieurswissenschaften 								
	 die Unterstützung des wechselseitigen Wissenstransfers aus der Wissenschaft in die Anwendung und umgekehrt durch die aktive Ein- bindung von Behörden in den Forschungsprozess (z. B. über die pro- jektbegleitende Gruppe des KFKI). 								

3. Stand der Wissenschaft und Technik und bisherige Arbeiten

Sturmfluten führen uns immer wieder vor Augen, wie verwundbar unsere Gesellschaft gegenüber extremen und potenziell gefährlichen Naturereignissen ist. Für die Planung von Schutzmaßnahmen ist es daher besonders wichtig, die hydrodynamischen Belastungsgrößen (Sturmflut- und Wellenhöhen) möglichst verlässlich zu ermitteln. Wasserstände an den Küsten werden durch das Zusammenspiel und die Wechselwirkung verschiedener Faktoren verursacht. Diese umfassen zum Beispiel die astronomischen Gezeiten, die Wirkung starker auflandiger Winde (Windstau) sowie die saisonalen, interannualen oder langfristigen Schwankungen und Veränderungen des mittleren Meeresspiegels. Insbesondere in küstennahen Flachwasserbereichen können zusätzlich nichtlineare Wechselwirkungseffekte wie zum Beispiel die von der Tidephase abhängige Effizienz des Windes bei der Erzeugung von Windstau, die vom Windstau beeinflusste Geschwindigkeit der Gezeitenwelle, und die Interaktion zwischen Tide und Untergrund (Bathymetrie) Eigenschaften bedeutsam werden.

Für die deutsche Nordseeküste existiert eine Vielzahl von Studien, die sich mit der Analyse der Variabilität und/oder von langfristigen Veränderungen extremer Wasserstände beschäftigt (z. B. Dangendorf et al. 2014). Das Hauptaugenmerk solcher Studien liegt sowohl allgemein auf der Beschreibung vergangener und gegenwärtig ablaufender (Weisse & Pluess 2006) oder möglicher zukünftiger (Gaslikova et al. 2013) Variabilität und/oder Veränderung als auch auf der Analyse möglicher zugrunde liegender Antriebsmechanismen (Woodworth et al. 2007). Dabei wurden sowohl Untersuchungen basierend auf Beobachtungen (Butler et al. 2007) als auch anhand von numerischen (Woth et al. 2006) oder statistischen Modellen (Mudersbach et al. 2013) durchgeführt. Die Mehrzahl der Studien richtet die Aufmerksamkeit dabei auf die Analyse einzelner Faktoren oder den Gesamtwasserstand, wogegen Wechselwirkungseffekte für die deutschen Küsten weniger umfassend erforscht sind.

Die Mehrheit der heute existierenden Untersuchungen kommt dabei zu dem Schluss, dass sich die Extremwasserstände entlang der deutschen Nordseeküste über die letzten ca. 100 Jahre erhöht haben (z. B. Jensen & Mudersbach, 2006). Hauptursache dieses Anstiegs ist der über diesen Zeitraum erfolgte Anstieg des mittleren Meeresspiegels. Veränderungen im Windklima verursachen Schwankungen der extremen Wasserstände auf inter-annualen und dekadischen Zeitskalen, aber bisher keinen längerfristigen Trend (Weisse et al. 2012). Veränderungen in der Tidedynamik und im Gezeitenregime haben ebenfalls einen Einfluss (Arns et al. 2015; Arns et al. 2017; Haigh et al. 2019). Für die Zukunft sehen die meisten gegenwärtigen Studien einen weiteren Anstieg extremer Wasserstände hauptsächlich in Folge eines weiter ansteigenden mittleren Meeresspiegels. Diese vereinfachende Annahme konnte weltweit an den meisten Standorten zumindest für die Vergangenheit anhand von langjährigen Pegelbeobachtungen verifiziert werden (siehe z. B. Woodworth & Blackman, 2004; Menéndez & Woodworth, 2010; Haigh et al., 2010; Woodworth et al., 2011). Und auch für die Zukunft kann an diesen Standorten von einem ähnlichen Verhalten ausgegangen werden. In der Deutschen Bucht weisen wissenschaftliche Analysen von langjährigen Pegelbeobachtungen dagegen auf eine immer stärker werdende Diskrepanz zwischen mittleren und extremen Wasserständen hin (siehe Abbildung 1; siehe auch Jensen 1984; Mudersbach et al. 2013; Dangendorf et al. 2014; Arns et al. 2015).

Diese Entwicklung konnte jüngst auch auf Basis umfassender numerisch basierter Sensitivitätsanalysen zum Einfluss von Meeresspiegeländerungen sowohl auf Sturmflutwasserstände als auch auf Wellen im Bereich der nordfriesischen Küste bestätigt werden (Arns et al. 2017). Darüber hinaus zeigen die Untersuchungen, dass insbesondere in den flachen Wattbereichen Nordfrieslands dynamische und komplexe Wechselwirkungen zwischen Änderungen des Meeresspiegels und extremen Wasserständen auftreten. Als Konsequenz werden die Sturmflutwasserstände etwas stärker ansteigen als der Meeresspiegel. Auch auf den Seegang hat ein steigender Meeresspiegel eine erhöhende Wirkung. So wird der Seegang in Zukunft weniger durch die Wattflächen beeinflusst, kann einfacher in Richtung Küste und Schutzbauwerke propagieren und daher größer ausfallen als bisher angenommen (siehe Abbildung 2).



Abbildung 1: Trends unterschiedlicher Wasserstandsperzentile am Pegel Cuxhaven zwischen 1953 und 2008. Um den Anstieg der höheren Wasserstandperzentile zu verdeutlichen, wurden die Wasserstände um den/die MSL/MThw "reduziert", d. h. der verbleibende Anstieg wurde zusätzlich zum MSL/MThw beobachtet.

In den hydrodynamischen Belastungsgrößen zeigen sich räumlich insgesamt sehr inhomogene Anstiege, die stark durch lokale Bathymetrien beeinflusst werden (siehe auch Abbildung 2). Betrachtet man die Interaktion zwischen den hydrodynamischen Komponenten, dann führt dies z. T. zu einer deutlichen Zunahme des erforderlichen Schutzniveaus entlang der nordfriesischen Küste (und vermutlich auch in anderen Teilen der Deutschen Bucht), welches den projizierten MSL im statistischen Mittel um das 1,5-fache übersteigt.

Gleichzeitig basieren die Untersuchungen von Arns et al. (2017) jedoch auf der Annahme, dass im Bereich der Wattflächen keine morphologischen Veränderungen auftreten (d. h. unter Verwendung einer statischen Bathymetrie zwischen 1970 und 2013), da insbesondere die zukünftige Entwicklung der Wattflächen bislang schwer abschätzbar ist. Hierdurch könnten die oben genannten hydrodynamischen Effekte zumindest teilweise kompensiert werden. Aktuelle Untersuchungen (Hofstede et al., 2016 Becherer et al., 2017) zeigen jedoch, dass auch in der Morphodynamik des Küstenvorfeldes mit einer inhomogenen Entwicklung zu rechnen ist, welche in einigen Bereichen zu anwachsenden Wattflächen und in anderen Bereichen zu eher stagnierenden bzw. abnehmenden Wattflächen führen könnte.



Abbildung 2: Wechselwirkung zwischen MSL-Änderungen und der Tidewelle, dem Seegang und dem Wellenauflauf.

4. M-Lab: Eingehende Darstellung der Teilvorhaben

Deckwerke, See- und Ästuardeiche an der deutschen Küste werden entsprechend der geltenden Anforderungen für einen sicheren und nachhaltigen Sturmflutschutz geplant, bemessen und gebaut. Bislang schwierig ist dabei jedoch die Abschätzung der zukünftig erforderlichen Bemessungsgrößen, insbesondere durch den Einfluss von Meeresspiegeländerungen und die damit einhergehenden hydro- und morphodynamischen Prozesse. Durch eine Kombination aus numerischen sowie statistischen Analysen sollen die wissenschaftlich-technischen Grundlagen für zukunftsfähige Küstenschutzstrukturen an Nord- und Ostseeküste gelegt werden.

- 4.1 Statistische Analysen zur Interaktion von Meeresspiegelanstieg, Sturmfluten und Morphologie im Wattenmeer (StAMSie)
- 4.1.1 Analyse von Wasserstandsdaten (AP 1.1)

Das wesentliche Ziel von AP 1.1 ist das Zusammentragen, Plausibilisieren und Analysieren der für die Untersuchungen relevanten Parameter (an dieser Stelle maßgeblich beobachtete Wasserstandsdaten) zur Identifikation der Abhängigkeit zwischen Hydro- und Morphodynamik. in In den weitergehenden Analysen soll der Frage nachgegangen werden, ob eine Veränderung der Tidedynamik (bzw. der Tidekurve) einen Einfluss auf tidebedingte Strömungen und hierdurch induzierte Umlagerungsprozesse zufolge hat.

Es erfolgte eine Bestandsaufnahme und Aktualisierung der bereits vorhandenen und der extern zu beschaffenden Datengrundlage, wodurch der Meilenstein M1 als erfüllt betrachtet werden kann. Es werden für die Modellkalibrierung und -plausibilisierung aus dem Vorhaben MoMSie die in Abbildung 3 dargestellten elf Pegelstandorte betrachtet. An den meisten der Pegelstandorte (Ausnahme: Cuxhaven) liegen erst seit Mitte der 1990er kontinuierlich hochaufgelöste (mind. Stundenwerte) Wasserstandsbeobachtungen vor. Im Zeitraum davor beschränkt sich die Datengrundlage überwiegend auf Scheitelwerte der Tidehoch- und Niedrigwasser (Thw und Tnw). Sowohl für die Gezeitenanalyse als auch für die Ableitung der pegelspezifischen Entwicklung des mittleren Meeresspiegels (MSL) werden allerdings hochauflösende Wasserstandsbeobachtungen erforderlich. Um das Defizit bei der Ermittlung des MSL zu umgehen, wurde bereits von Lassen (1989) das sogenannte "k-Wert" Verfahren etabliert, dass beispielsweise in Jensen et al. (2011) auf diverse Pegelstandorte in der Deutschen Bucht angewendet wurde. Hierdurch wird es ermöglicht, aus der Differenz zwischen Thw und Tnw (entspricht dem Tidehalbwasser (T1/2w)) den MSL zu bestimmen, indem eine Korrektur von etwa 0,4 bis 0,5 (in der Deutschen Bucht) angebracht wird, um der Deformation der Tidekurven Rechnung zu tragen. Jedoch muss der k-Wert auf Basis hochauflösender Wasserstandsdaten abgeleitet und stationär in die Vergangenheit übertragen werden. Zudem werden keine Veränderungen der Scheiteleintrittszeiten berücksichtigt. An diesem Beispiel kann verdeutlicht werden, dass für viele

Fragestellungen hochauflösende Datengrundlagen von übergeordneter Bedeutung sind. Daher ist in AP 1.1 zusätzlich eine Methodik zur Generierung hochauflösender Wasserstandsdaten entwickelt worden. Es ist ein künstliches neuronales Netz (KNN) mit der Software Matlab© entwickelt worden. Zum Trainieren des KNN werden hochauflösende Wasserstandsbeobachtungen (Minutenwerte) als Ausgabeparameter verwendet. Die assoziierten Eingabeparameter stellen Scheitelwerte und meteorologische Parameter (u-, v-Wind, Luftdruck) dar. Somit ist es schließlich möglich, hochauflösende Wasserstandszeitreihen rein auf Basis von Scheitelwertzeitreihen zu reproduzieren. Anhand des Trainingszeitraums werden für die elf betrachteten Pegelstandorte Werte des Bestimmtheitsmaßes R² zwischen 0,996 und 0,999 erreicht. Der mittlere quadratische Fehler RMSE bewegt sich zwischen 29 und 84 mm.



Abbildung 3: Lage der betrachteten Pegelstandorte im Untersuchungsgebiet der Deutsche Bucht einschließlich der verfügbaren Zeitreihenlängen.

Für die Plausibilisierung der Resultate werden die Pegelstandorte Hörnum und Cuxhaven genutzt, für die digitalisierte Stundenwerte vorliegen. Die Ergebnisse sind in Abbildung 4 dargestellt. Mit einem Bestimmtheitsmaß R² von 0,993 (Hörnum) und 0,996 (Cuxhaven) weisen die rekonstruierten Wasserstände eine identische Größenordnung, wie sie in dem bekannten Trainingszeitraum erreicht werden konnten. Der RMSE bezogen auf den Gesamtwasserstand liegt in beiden Fällen bei etwa 70 mm und bestätigt somit ebenfalls die Eignung der Methodik zur Rekonstruktion der Wasserstände. Eine weitere Möglichkeit der Plausibilisierung der KNN-Rekonstruktionen stellen Partialtidenanalysen dar. In Abbildung 5 ist exemplarisch ein Ausschnitt des zeitlichen Verlaufs der Amplituden der Partialtiden M2, S2, O1 und M4 für den Pegelstandort Cuxhaven dargestellt. Die Tideana-

lysen wurden mithilfe des Matlab©-Pakets "UTide" (Codiga et al. 2011) durchgeführt. Auch hier zeigen sich, dass sowohl die Variabilität als auch die Größenordnung der Amplituden plausibel wiedergegeben werden, weshalb die Rekonstruktionen ebenfalls für die Validierung der Modellergebnisse aus MoMSie herangezogen werden. Für die weitere Bearbeitung des Vorhabens bietet die Herangehensweise eine Reihe von weiteren Anwendungsmöglichkeiten und stellt einen elementaren Baustein dar. Für die weitere Verwendung der Resultate wird auf die folgenden Abschnitte verwiesen. Darüber hinaus ist geplant, den generierten Datensatz in einem internationalen Journal zu veröffentlichen.



Abbildung 4: Plausibilisierung der Wasserstandsrekonstruktion auf Basis des KNN für den Zeitraum vom 14.12.1950 bis 05.01.1951 an den Pegelstandorten Hörnum (oben) und Cuxhaven (unten). Die roten Zeitreihen beschreiben die Beobachtungsdaten, während die schwarzen Zeitreihen die Rekonstruktion durch das KNN zeigen.



Abbildung 5: Plausibilisierung der Wasserstandsrekonstruktion am Pegelstandort Cuxhaven auf Basis des KNN anhand von Partialtidenanalysen der M2, S2, O1 und M4. Die schwarzen Zeitreihen stellen die Ergebnisse auf Basis der Beobachtungen und die grauen Zeitreihen die Ergebnisse auf Basis des KNN dar.

Ein weiterer Arbeitsschritt im Vorhaben StAMSie umfasst die Detektion eines gemeinsamen (globalen) Signals aller Pegel im Untersuchungsbereich für Hoch und Niedrigwasser bzw. in den hochaufgelösten Zeitreihen mittels Hauptkomponentenanalyse einschließlich der Auflistung lokaler bzw. globaler Auffälligkeiten in den Zeitreihen. Diese Fragestellung konnte erfolgreich beantwortet werden und wurde in Jänicke et al. (2020) in einem internationalen Journal veröffentlicht.

Zudem wurde sich in AP 1.1 mit der Thematik auseinandergesetzt, dass in der Deutschen Bucht wissenschaftliche Analysen von langjährigen Pegelbeobachtungen auf eine immer stärker werdende Diskrepanz zwischen mittleren und extremen Wasserständen hinweisen, welche vor allem durch nichtlineare Änderungen in der Tidekomponente des Wasserstandes und weniger durch Änderungen des Sturmklimas erklärt werden kann (siehe z. B. Jensen 1984; Mudersbach et al. 2013; Dangendorf et al. 2014; Arns et al. 2015). Hierfür sind wiederum die Resultate des KNN von Bedeutung, da mit den hochauflösenden Wasserstandszeitreihen detaillierte Gezeitenanalysen durchgeführt werden können. Hierfür sind in Tabelle 2 erste Ergebnisse am Pegelstandort Cuxhaven aufgeführt, die auf Änderungen in der Tidekomponente und nahezu konstante meteorologische Verhältnisse hinweisen. Es wurden die Trends für den Zeitraum von 1851 bis 2018 auf Basis des Gesamtwasserstandes, der Tidekomponente und des verbleibenden Residuums zwischen Gesamtwasserstand und Tidekomponente (engl.: non-tidal residual (NTR); entspricht approximativ dem meteorologischen Anteil des Wasserstandes) ermittelt. Die Tidekomponente wurde in dem Beispiel auf Basis der "Harmonischen Darstellung der Ungleichheiten (HDdU)" (Müller-Navarra 2013) abgeschätzt. Dabei wurde die Tidekomponente einmal für den Gesamtzeitraum konstant betrachtet (Gezeiten (const.)) und einmal für 19-jährige gleitende Mittelwerte separat (Gezeiten (var.)) und je getrennt für die Thw und Tnw. Anhand von Tabelle 2 wird deutlich, dass sich der Trend des Gesamtwasserstands entweder vollständig in den Gezeiten bzw. im NTR wiederfindet, je nachdem, ob die Gezeiten konstant oder variabel betrachtet werden. Wären langfristige nicht-periodische Veränderungen im NTR vorhanden, würde sich die Abbildung der Trends anders verhalten und nicht vollständig in eine

der beiden Komponenten verschoben werden. Für diese Schlussfolgerung spielt die Kenntnis darüber, dass keine signifikanten Änderungen in der meteorologischen Komponente stattgefunden haben, eine große Rolle. Denn methodisch bedingt resultieren an dieser Stelle sonst Fehlinterpretationen, da ein linearer Trend, wie er in den Gesamtwasserständen enthalten ist, bei der Separierung in Gezeiten und NTR, in einem der beiden Parameter zu finden sein muss. In Anbetracht der Betrachtung von Extremwasserständen respektive von Sturmfluten und deren zukünftigen Entwicklung sind entsprechend die Veränderungen der Gezeiten einzubeziehen, um robuste Prognosen ableiten zu können.

Tabelle 2:	Trends der	Wasserstan	dszeitreihe in	Cuxhaven	für den	Gesamtwa	sserstand,	die	Tidekomponente u	ind das
	verbleit	bende Residu	um aus Ges	amtwassers	stand un	nd Tidekom	ponente (N	ITR)).	

[mm/a]	Thw	Tnw
Gesamt	2.43	0.94
Gezeiten (const.)	0.03	0.01
Gezeiten (var.)	2.40	0.90
NTR (const.)	2.40	0.93
NTR (var.)	0.03	0.05

Zur prozessorientierten Analyse der Wasserstände ist es zudem wichtig, die in den Wasserständen an der Nordsee enthaltene Variabilität so weit wie möglich zu reduzieren. Diese Variabilität setzt sich aus kurz- und langfristigen Prozessen wie beispielsweise aus dem MSL, der Gezeiten und dem meteorologischen Anteil zusammen. Die Schwierigkeit besteht darin, diese sich z. T. (nichtlinear) überlagernden und amplifizierenden Prozesse zu separieren und zu verstehen. Das Ziel ist entsprechend die deterministischen bzw. bekannten Einzelkomponenten zu ermitteln und aus dem Wasserstand zu eliminieren, damit diese das Gesamtsignal nicht mehr maskieren. Das verbleibende Signal kann schließlich weiter analysiert werden.

Eine dieser Einzelkomponenten ist die sogenannte Nodaltide (längste bekannte und analysierbare Partialtide), die als theoretisches Potential für Wasserstandsveränderungen mit einer Periode von etwa 18,6 Jahren verantwortlich ist (Pugh & Woodworth 2014). Deren Betrachtung wurde in einem letzten Schritt angestrebt. In der Deutschen Bucht wurden Betrachtungen dazu bereits in der Vergangenheit (z. B. Jensen 1991) durchgeführt und rücken aktuell aufgrund verbesserter Datengrundlage und Rechenkapazitäten wieder in den wissenschaftlichen Fokus (z. B. Hagen et al. 2021). Im Rahmen der Bearbeitung zur Veröffentlichung des Beitrags Jänicke et al. (2020) konnte eine Methodik entwickelt werden, die auf Basis von Hauptkomponentenanalysen erlaubt, die theoretische Nodaltide in der gesamten Nordsee abzuleiten. Mit der HDdU kann diese Partialtide hingegen pegelspezifisch extrahiert werden. Die Untersuchungen werden sowohl auf die Thw und Tnw als auch auf den Tidehub (Thb) angewendet. Die Differenzen zwischen der Nodaltide aus der Hauptkomponentenanalyse und der HDdU ergeben schließlich die "mittlere Abweichung" vom Pegelsignal zum Nodalsignal der gesamten Nordsee. Damit kann beantwortet werden, ob an den Pegelstandorten in der Deutschen Bucht ein abweichendes Signal ankommt, als es beispielsweise in Lerwick (Charakteristik folgt dem Signal aus dem Atlantik) beobachtet wird. Es kann somit der Fehler, durch die Vernachlässigung beckenspezifischer Prozesse und Betrachtung des rein theoretischen Gezeitenpotentials, der bei der "klassischen" Gezeitenanalyse gemacht wird umgangen werden. Durch die Differenzenbildung zwischen der Hauptkomponentenanalyse und der HDdU kann der Anteil quantifiziert werden, der durch Reibung, Reflexion, Resonanz etc. hervorgerufen wird. Anhand von Abbildung 6 kann das Vorgehen verdeutlicht werden. Die obere Grafik zeigt am Beispiel des o.g. Pegelstandortes Lerwick, dass (im Rahmen der Unsicherheiten) keine Unterschiede zwischen Theorie und Nordseesignal zu detektieren sind und dieser als "unbeeinflusster" Referenzpegel betrachtet werden kann (schwarze Linie). Richtung Südengland am Pegelstandort Lowestoft (nicht dargestellt) stimmt die Phase weiterhin gut überein. Folgt man der Tidewelle weiter bis in die Deutsche Bucht, zeigt sich am Pegelstandort LT Alte Weser (nicht dargestellt) ein leichter Phasenversatz. Je weiter man in das Wattenmeer kommt (z. B. Husum in Abbildung 6 unten) desto größer wird dieser Phasenversatz und es werden Differenzen in den approximierten Amplituden deutlich. Diese Entwicklung kann an den meisten Pegelstandorten in der Deutschen Bucht bzw. im Wattenmeer beobachtet werden.



Abbildung 6: Vergleich zwischen dem pegelspezifischen und dem theoretischen Nodaltidesignal (oben: Lerwick; unten: Husum). In grün sind die Zeitreihen der Hauptkomponentenanalyse und in blau der HDdU dargestellt. Die schwarzen Kurven zeigen die Differenz zeigen den Vergleich aus der Antwort des Systems "Nordsee" im Vergleich zum theoretischen Potential am jeweiligen Pegelstandort.

Der Punkt der Ermittlung der Nodaltide auf Basis der Hauptkomponentenanalyse in Kombination mit der HDdU zur Detektion pegelspezifischer Veränderungen der Antwort des Systems auf das Gezeitenpotential zeigt vielversprechende Ergebnisse. Es wird weiterhin angestrebt die zeitliche Veränderung der Pegelcharakteristik zu analysieren, mit dem Ziel z. B. den Einfluss von größeren Baumaßnahmen auf die Gezeitencharakteristik zu quantifizieren. Nach Abschluss der Projektlaufzeit ist eine Veröffentlichung zu der Thematik geplant, die sich bereits in Bearbeitung befindet. Die Rekonstruktionen der hochauflösenden Wasserstände auf Basis des KNN bieten in Summe ein enormes Potential, um unterschiedliche Fragestellung vertieft und aktualisiert betrachten zu können, die innerhalb der Projektlaufzeit nicht zu realisieren waren.

4.1.2 Analyse morphodynamischer Karten (AP 1.2)

Im Rahmen des Vorhabens StAMSie werden Analysen von bisher beobachteten morphologischen Änderungen durchgeführt. Dabei sollen in AP 1.2 insbesondere die Interaktionen zwischen morphodynamischen Prozessen und deren (generellen) Auswirkungen auf Wasserstände identifiziert werden. Dazu müssen in einem ersten Schritt die benötigen Daten angefragt, zusammengetragen und aufbereitet werden. Die Bathymetrie ist die topographische Gestalt des Meeresbodens und ein relevanter Faktor für eine Vielzahl von Fachbereichen, z. B. Wasserbau, Meereskunde, Hochwasseroder Umweltschutz und für die Sicherheit des küstennahen Schiffsverkehres. Die Bathymetrie unterliegt aufgrund der Umlagerung von Sedimenten durch natürliche und anthropogene Prozesse stetigen Veränderungen.

Auf dem deutschen Gebiet unterliegt die Vermessung des Meeresbodens dem Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) und den zuständigen Wasser- und Schifffahrtsämtern (WSÄ). Während das BSH für die Erstellung von Seekarten zuständig ist und damit eher großflächige Untersuchungen durchführt, sind die WSÄ für die Fahrwasserunterhaltung und Strombaumaßnahmen verantwortlich, weshalb in der Regel nur Fahrrinnen und Priele regelmäßig vermessen werden. Grundsätzlich können Bathymetriedaten aber auch von Ingenieurbüros oder weiteren Ämtern für bestimmte Projekte erhoben werden (Milbradt 2011; Milbradt et al. 2005). Die Vermessung selbst kann auf verschiedenen Arten erfolgen. Die Gebräuchlichste ist das Echolotverfahren. Dabei wird auf einem Schiff ein Sensor angebracht, der ein akustisches Signal in Richtung Meeresboden abgibt und die Zeit misst, in der das reflektierte Signal den Sensor wieder erreicht. Daraus lässt sich auf die Tiefe des Meeresgrunds schließen. Eine andere Möglichkeit ist der Einsatz vom Flugzeuglaserscanningverfahren. Hierbei wird ein Laser und ein Sensor an einem Flugzeug befestigt, welches das Untersuchungsgebiet überfliegt und den Gewässerboden im grünen Wellenbereich abtastet. Ebenfalls wird aktuell der Einsatz von Satellitenbildern und unbemannten Messplattformen (Drohnen, autonom fahrende Vermessungsboote) zur Erhebung der Bathymetriedaten geprüft. Da diese Verfahren jedoch nur für Wassertiefen von bis zu 10 m und einem geringen Trübungsgrad geeignet sind, werden sie als Ergänzung zum Echolotverfahren angesehen (WEB 1).

Während die Wasserstandsaufzeichnungen in der Deutschen Bucht an vielen Standorten mit langen und oftmals auch lückenlosen Zeitreihen in hoher räumlicher Dichte verfügbar sind, existieren zur Beschreibung der Morphodynamik nur vereinzelte Datensätze (z. B. Wattgrundkarten), die darüber hinaus zeitlich inkonsistent sind und eine geringe räumliche Auflösung aufweisen. Ein Projekt, dass sich der Fragestellung angenommen hat, ist das Vorhaben "KoDiBa - Entwicklung und Implementierung von Methoden zur Aufbereitung konsistenter digitaler Bathymetrien" (Milbradt et al. 2005). Bis 2011 wurden hier die Daten zahlreicher Vermessungsvorhaben zusammengetragen. Als Quelle dienten die Vermessungsdaten der Ämter und Ingenieurbüros, digitalisierte historische Karten (Huettemeyer et al. 1999) und Modelle anthropogener Eingriffe (Milbradt 2011). Insgesamt lagen somit mehrere Zeitreihen vor, die in verschiedenen zeitlichen Abschnitten einen bestimmten Raum beschreiben. Zur Erzeugung digitaler Bathymetriedaten wurden Interpolationsverfahren herangezogen, die auf die Struktur der Basisdaten angepasst wurden (z. B. Isolinien- oder Profilinterpolation) und sowohl räumlich als auch zeitlich interpolieren. Somit ist es möglich eine Zeitreihenanalyse an einem bestimmten Punkt, aber auch die Gesamtverteilung der Tiefenwerte bezogen auf ein Jahr zu betrachten (Milbradt 2011). Für dieses Vorhaben wurden die Bathymetriedaten des sogenannten "Funktionalen Bodenmodells" angefragt (Milbradt et al. 2015), wodurch in der Deutschen Bucht flächendeckend Bathymetrien von 1950 bis 2018 für die Analysen vorliegen. Auch hier sind Abweichungen zwischen Natur und Modell zu erwarten, jedoch liefern diese Daten ausreichend Stützstellen zur Beschreibung der bathymetrischen Entwicklung über die letzten Dekaden.

Für die Implementierung und Analyse der Auswirkungen von dynamischen Bathymetrien liegt somit die Datenbasis vor und der Meilenstein M2 ist erfüllt. Die Bathymetrien werden im weiteren Verlauf des Vorhabens weiter analysiert und insbesondere als dynamische Sohle in die Modellkette der Nordsee/Deutschen Bucht eingebunden (Vorhaben: MoMSie) und ermöglichen, unabhängig von der absoluten Genauigkeit, die Analyse und Bewertung zur Ursache-Wirkung Kette über Sensitivitätsstudien und zu Langzeitveränderungen der bathymetrischen Beschaffenheit sowie der Identifikation besonders auffälliger Bereiche. Letztere sind insbesondere notwendig, um die Interaktionen zwischen der Hydro- und Morphodynamik ableiten zu können.

In AP 1.2 wurden bereits Analysen einerseits zu Langzeitveränderungen der bathymetrischen Beschaffenheit sowie der Identifikation besonders auffälliger Bereiche und zu den Interaktionen zwischen der Hydro- und Morphodynamik durchgeführt. Eine Einschränkung stellt die zeitliche Auflösung der Bathymetriedaten dar, die lediglich jahresweise vorliegen. In einem hochdynamischen System wie dem Wattenmeer gehen dadurch Informationen verloren und zur Beurteilung der Interaktion zwischen Hydro- und Morphodynamik können entsprechend nur Jahreswerte (Mittelwerte, Extremwerte) herangezogen werden. Zur Beurteilung der Langzeitveränderungen wurden die Daten so aufbereitet, dass diese auf die 20 m-Tiefenlinie begrenzt wurden. Anschließend wurden die Zeitreihen an den Gitterpunkten mit Bathymetrieinformationen zur besseren Vergleichbarkeit standardisiert. Um Verfälschungen durch größere sprunghafte Änderungen von einem zum anderen Jahr auszuschließen, wurden 5-jährige gleitende Mittelwerte der Zeitreihen verwendet, die in eine Clusteranalyse eingeflossen sind. Die Clusteranalyse basiert im Wesentlichen auf der linearen Korrelation R respektive dem Bestimmtheitsmaß R² bei einem Grenzwert von R² >0,8, damit den Zeitreihen eine Ähnlichkeit unterstellt wird. Hierzu wurden im Vorfeld verschiedene Sensitivitätsstudien durchgeführt, die u. a. auch die Trendbereinigung der Zeitreihen umfasst hat. Das Bestimmtheitsmaß R² wurde hauptsächlich verwendet, um positive und negative Korrelationen R zusammenführen zu können, damit Umlagerungsprozesse berücksichtigt werden können. Letztlich wurden zehn Cluster bestimmt, die als Übersicht in Abbildung 7 dargestellt sind.



Abbildung 7: Übersicht der ermittelten Cluster auf Basis standardisierter Bathymetriedatensätze.

In Abbildung 8 sind exemplarisch die zu Cluster 1 gehörigen Gitterpunkte sowie die zugehörigen standardisierten Zeitreihen dargestellt. Die Idee, auffällige Bereiche sowie Umlagerungen zu identifizieren ist über die Clusteranalyse möglich. Die Bewertung der Interaktion zwischen Hydro- und Morphodynamik wird im weiteren Verlauf durch den Vergleich der Modellergebnisse aus dem Vorhaben MoMSie mit statischer und variabler Bathymetrie und den Clusterzeitreihen durchgeführt.



Abbildung 8: Detailausschnitt Cluster 1. Oben links sind die negative und oben rechts die positive korrelierten Zeitreihen dargestellt. Unten sind die zugehörigen standardisierten Zeitreihen abgebildet (einschließlich gestricheltem Unsicherheitsbereich).

Des Weiteren wurden die beobachteten mittleren Tideparameter Thb, Thw und Tnw sowie der MSL auf Jahresbasis mit den individuellen Bathymetriezeitreihen korreliert. Beispielhaft sind die erzielten Resultate in Abbildung 9 für den Pegelstandort Cuxhaven gezeigt. Auffällig sind die signifikanten Korrelationen zwischen dem mittleren Thb und der Bathymetrie. Denn in KFKI-geförderten Projekten (z. B. Analysing long-term changes of tidal dynamics in the German Bight (ALADYN)) wurden die signifikanten Änderungen im Thb seit den 1950er Jahren detailliert betrachtet. Auf Basis dieser Auswertungen deuten diese beobachteten Veränderungen auf eine Reaktion des Tideregimes auf die morphologische Entwicklung oder umgekehrt hin. Werden das Thw und das Tnw separat betrachtet, fällt zudem auf, dass die Korrelation maßgeblich auf die Tnw zurückzuführen sind. Da die Grundlage zur Bestimmung des Thb die Thw und Tnw sind, kann die Entwicklung der Thb schließlich auf die Tnw zurückgeführt werden. Insbesondere das Tnw im Wattenmeer ist stark durch nichtlineare Flachwassereffekte beeinflusst, weshalb die Ergebnisse sehr plausibel erscheinen und somit eine Grundlage für die weitere Bearbeitung zur Erreichung der Projektziele bilden. Bezogen auf den MSL finden sich nur vereinzelt signifikante Korrelationen zur Bathymetrie, die ebenfalls im weiteren Verlauf des Vorhabens über Sensitivitätsstudien mit den numerischen Modellen detaillierter betrachtet werden. Für weitere im Projektverlauf durchgeführte Analysen bezogen auf die Interaktionen zwischen morphodynamischen Prozessen und deren Auswirkungen auf Wasserstände wird auf den Abschnitt 4.1.4 verwiesen.



Abbildung 9: Korrelation der Bathmetriezeitreihen mit den Tideparametern Thb, Thw, Tnw und MSL.

4.1.3 Aufbereitung von regionalen Meeresspiegelprojektionen (AP 1.3)

Das Ziel des AP 1.3 ist die Zusammenstellung von globalen Meeresspiegelprojektionen auf dem aktuellen Stand der Wissenschaft und Ableitung von Regionalprojektionen für das Untersuchungsgebiet. Kenntnisse über den bis zu erwartenden MSL Anstieg sind notwendig, um Aussagen über die potentielle Morphodynamik über die kommenden Dekaden ableiten zu können. Hierdurch lassen sich realistischere Entwicklungsszenarien in der Modellkette skizzieren. Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die Festlegung der Berücksichtigung der abgeleiteten Meeresspiegelprojektionen im Verbundprojekt, d. h. in den unterschiedlichen Modellen. Der zugehörige Meilenstein M3 kann als erfüllt betrachtet werden. Zur Ermittlung des Einflusses von potenziell zukünftigen Wasserstandsänderungen auf die Sediment- und Sturmflutdynamik werden konsistente und regionsspezifische Projektionen des MSL benötigt. Insbesondere werden Regionalprojektionen des MSL für den Untersuchungsbereich abgeleitet. Im Laufe der letzten Dekaden wurden unterschiedlichste Projektionen des mittleren Meeresspiegels publiziert. Infolge eines zunehmenden Prozessverständnisses konnte das Gesamtsystem dabei immer besser erfasst werden. Eine wesentliche Erkenntnis ist dabei, dass der lokale mittlere Meeresspiegel deutlich vom globalen Mittel abweichen kann. Aus diesem Grund werden im Rahmen des Vorhabens StAMSie Regionalprojektionen verwendet. Dabei lassen sich sowohl gängige Representative Concentration Pathways (RCP) (z. B. RCP8.5) sowie unterschiedliche globale Temperaturveränderungen von +1.5°C und +2,0°C berücksichtigen. Die Daten wurden mit Erfüllung von Meilenstein M3 an das Vorhaben MoMSie übergeben. Hierdurch lassen sich Rückschlüsse und Vergleiche zu den gewählten MSL-Anstiegsszenarien ziehen. Diese Kenntnisse über den zu erwartenden MSL Anstieg sind notwendig, um auf Basis des zuvor entwickelten Prozessverständnisses Aussagen über die potentielle Hydro- und Morphodynamik über die kommenden Dekaden ableiten zu können. Existieren hier statistisch signifikante Zusammenhänge, dann lassen sich mit Hilfe dieser Information potenziell zukünftige Entwicklungen realistischerer abschätzen und skizzieren.

Änderungen des MSL sind eine der meistdiskutierten Folgen des Klimawandels. Nach aktuellen Studien könnte der globale MSL im 21. Jahrhundert um mehr als 2,0 m ansteigen (Bamber et al. 2019). Aus Sicht des Küstenschutzes sind dabei insbesondere die Auswirkungen auf Extremereignisse wie z. B. Sturmfluten relevant. Steigt der MSL, ändert sich hierdurch auch die Basis, auf der Sturmfluten aufsatteln, d. h. Sturmfluten werden zukünftig sowohl höher als auch häufiger auftreten. Weiterhin unklar ist jedoch, wie stark die Änderungen des MSL bis 2100 sein werden. Aktuelle Projektionen des 5. Sachstandsberichts des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) berücksichtigen bereits Einflüsse aus Landwasserspeichern, Gletschern, Eisschilden (zusammengefasst als Masseeintrag) sowie der Dichteänderung infolge thermaler Expansion (d. h. Volumenänderungen), siehe hierzu z. B. Church et al. (2013, http://icdc.cen.uni-hamburg.de/1/daten/ocean/ar5slr.html). Der Beitrag der Eisschilde ist dabei bislang jedoch nur rudimentär (unterschätzt) berücksichtigt worden. Aus diesem Grund werden die Beiträge der Eisschilde aus dem AR5 in M-Lab gegen neue, belastbarere Schätzungen getauscht. Hierzu wurden der Eismassenverlust der Szenarien RCP4.5 und RCP8.5 im Jahr 2100 auf Basis aktueller Veröffentlichungen (z. B. Bamber et al. 2019) geschätzt, mit normierten Fingerprints der Einzelkomponenten (siehe Frederikse et al. 2018) multipliziert und dann anschließend mit den anderen Komponenten linear addiert. Die resultierenden Projektionen des Meeresspiegelanstiegs werden lokal für die Nordsee und die Deutsche Bucht berechnet. Exemplarisch für den Pegelstandort Cuxhaven ist in Abbildung 10 die Regionalprojektion des Meeresspiegelanstiegs für das Jahr 2100 auf Basis des RCP8.5 gezeigt. Es ergibt sich ein prognostizierter absoluter Meeresspiegelanstieg von tSLR = 107,6 cm. Der Eismassenverlust in der Westantarktis trägt mit WAIS = 19,6 cm und das Grönländische Eisschild mit GIS = 2,6 cm zum gesamten Anstieg bei. Im Vergleich dazu wird in dem im September 2019 veröffentlichten "Sonderbericht über den Ozean und die Kryosphäre in einem sich wandelnden Klima" (SROCC) des Weltklimarats IPCC der zukünftige mittlere Meeresspiegelanstieg bis zum Ende des Jahrhunderts im Vergleich zum Jahr 2000 auf Basis von RCP8.5 zwischen 61 bis 110 cm (Median: 84 cm) angegeben. Die Berücksichtigung der Eisverluste führt entsprechend zu einer weiteren Verschärfung an den oberen Rand der wahrscheinlichen Bandbreite aller Projektionen.



Abbildung 10: Regionalprojektion des Meeresspiegelanstiegs in Cuxhaven für das Jahr 2100 auf Basis des RCP8.5.

Neben der Verwendung der o. g. Ergebnisse und Projektionen, über die ein kausaler Zusammenhang zwischen RCPs und potentiell resultierender Entwicklung der Morphologie hergestellt werden kann, werden für die Modelle weitere sogenannte "Basisszenarien" benötigt. Hierüber können zwar keine kausalen Zusammenhänge zum IPCC hergestellt werden, jedoch beispielsweise die Reaktion des physikalischen Systems sowohl im Modell als auch anhand der beobachteten Daten auf den Anstieg des Meeresspiegels nachvollzogen werden. Das ist wichtig, um ein Prozessverständnis zu entwickeln und Aussagen über die potenzielle Morphodynamik über die kommenden Dekaden ableiten zu können und realistische Entwicklungsszenarien zu skizzieren. Projektintern und auf Basis bereits erzielter Ergebnisse in AP 2 werden als "Basisszenarien" Anstiege von 20/50/75/100 cm pro Jahrhundert gewählt und je nach Bedarf weiter geschärft.

- 4.1.4 Identifizierung potenzieller Veränderungen in den hydrodynamischen Belastungsgrößen (AP 1.4)
- 4.1.4.1 Allgemeines

Das Ziel von AP 1.4 liegt in der Identifizierung potenzieller Veränderungen in hydrodynamischen Belastungsgrößen für die vergangenen Dekaden sowie unter Berücksichtigung der in Abschnitt 4.1.3 vorgestellten Entwicklungen des MSL bis Ende des Jahrhunderts. Es soll beurteilt werden, wie sich Belastungen von Küstenschutzelementen durch Sturmfluten zukünftig verändern und welcher Anteil der Morphodynamik zugeschrieben werden kann. Konkret werden die simulierten Zeitreihen auf Basis der Projektionen aus dem Vorhaben MoMSie zur weiteren Analyse herangezogen. Übergeordnetes Ziel ist dabei die Identifizierung potenzieller Veränderungen in hydrodynamischen Belastungsgrößen mit sehr geringen Eintrittswahrscheinlichkeiten ($P_0 \le 0.01$ [1/a]) in Abhängigkeit der morphologischen Entwicklung sowie auf Basis der genannten MSL-Szenarien. In diesem Schritt werden ebenfalls Implikationen für den Küstenschutz abgeleitet und in Form von Empfehlungen für die relevanten Küstenschutzbehörden weitergegeben. Der Schwerpunkt liegt entsprechend auf der Entwicklung und Anwendung einer konsistenten Methodik zur statischen Ermittlung extremer Wasserstände im Hinblick auf den angedachten Anwendungsfall und unter Berücksichtigung der enthaltenen (Modell-)Unsicherheiten.

Wie bereits erwähnt, liegt durch die Erfüllung von Meilenstein M2 die Datenbasis für die Implementierung und Analyse der Auswirkungen von dynamischen Bathymetrien vor. Es wurden für dieses Vorhaben die Bathymetriedaten des sogenannten "Funktionalen Bodenmodells" angefragt (Milbradt et al. 2015), wodurch in der Deutschen Bucht flächendeckend Bathymetrien von 1950 bis 2018 für die Analysen vorliegen. Auch hier sind Abweichungen zwischen Natur und Modell zu erwarten, jedoch liefern diese Daten ausreichend Stützstellen zur Beschreibung der bathymetrischen Entwicklung über die letzten Dekaden. Die resultierenden Unsicherheiten müssen aber in Kauf genommen und an entsprechenden Stellen diskutiert werden. Im Rahmen von AP 1.4 wurden weitergehende Analysen auf Basis der Bathymetrien durchgeführt, um potenzielle Veränderungen in hydrodynamischen Belastungsgrößen zu identifizieren, von denen die Wichtigsten an dieser Stelle ebenfalls detaillierter erläutert werden.

4.1.4.2 Modellbasierte Veränderung von mittleren Tideparametern durch die Berücksichtigung veränderlicher Bathymetrien im numerischen Modell

Die o. g. Bathymetriedaten wurden als veränderliche Sohle in eine Modellkette der Nordsee/Deutschen Bucht eingebunden (Arns et al. 2015) und ermöglichen, unabhängig von der absoluten Genauigkeit, die Analyse und Bewertung zur Ursache-Wirkung Kette über Sensitivitätsstudien und zu Langzeitveränderungen der bathymetrischen Beschaffenheit auf die resultierenden Wasserstände sowie der Identifikation besonders auffälliger Bereiche. Letztere sind insbesondere notwendig, um die Interaktionen zwischen der Hydro- und Morphodynamik ableiten zu können. Im Kontext des Küstenschutzes ist es daher notwendig, die Auswirkungen morphologischer Änderungen auf die Wasserstände zu verstehen. Bisher werden in numerischen Simulationen üblicherweise statische, also unveränderliche Bathymetrien verwendet. Für dieses Verbundvorhaben stehen nun dynamische Bathymetrien zur Verfügung, die es ermöglichen, den morphologischen Veränderungen im Rahmen numerischer Modellierungen Rechnung zu tragen.

Im Rahmen der Untersuchungen wurden die jährlich wechselnden Bathymetrien über den Zeitraum 1950 bis 2018 verwendet, um anhand einer Reihe von Sturmflut- und Langzeitsimulationen den Einfluss der bathymetrischen Veränderungen auf die Wasserstände zu untersuchen. Die Analyse der verwendeten Bathymetriedaten zeigte, dass insbesondere die Ästuare, Ebbdeltas, Seegats und Prielsysteme von starken und kontinuierlichen Umlagerungsprozessen geprägt sind. Es wurden Wasserstände von insgesamt elf Pegeln der Deutschen Bucht auf langfristige Änderungen insbesondere hinsichtlich des mittleren Tidehochwassers (MThw) analysiert (vgl. Tabelle 3). Eine lineare Trendanalyse für den Zeitraum 1958 bis 2014 der MThw nach Bereinigung um den MSL-Anstieg zeigt an allen Pegeln signifikante Trends zwischen 0,6 und 2,5 mm/a. In der Literatur wird dieser verbleibende Trendanteil u. a. auf morphologische Veränderungen und nichtlineare Effekte zurückgeführt (z. B. Mudersbach et al. 2013). Daher wurde anhand numerischer Simulationen untersucht, inwiefern solche Trends auch aus bathymetrischen Veränderungen resultieren können. Es wurden zwei Langzeitsimulationen über den Zeitraum 1950 bis 2014 durchgeführt, wobei einer Simulation. die jährlich wechselnde und der anderen die statische Bathymetrie zugrunde gelegt wurde. Bei Verwendung veränderlicher Bathymetrien ergeben sich signifikante Trends im MThw an etwa der Hälfte der Pegelstandorte, die mit statischer Bathymetrie nicht gefunden werden (siehe Tabelle 3). Der durch bathymetrische Änderungen induzierte mittlere Trend über simulierten Pegelstandorte beträgt 0,6 mm/a. Werden nur die signifikanten Trends gemittelt, erhöht sich dieser Wert auf 1,0 mm/a.

Tabelle 3: Zusammenfassende Auswertung der linearen Trendanalyse an elf Pegelstandorten in der Deutschen Bucht auf Basis des MThw und Beobachtungsdaten sowie verschiedenen Modellläufen. Um den Einfluss der Bathymetrie auf die Tidewasserstände zu untersuchen, werden vier Langzeitsimulationen (LR, engl.: longrun) durchgeführt. Sie unterscheiden sich in den jeweils genutzten Eingangsdaten und Randbedingungen: LR₂₀₁₄: Winddaten und Wasserstände des Jahres 2014, jeweils mit den Bathymetrien von 1950–2018; LRstat: Winddaten und Wasserstände der Jahre 1950–2014, immer mit der Bathymetrie von 2014; LRdyn: Winddaten und Wasserstände der Jahre 1950–2014, jeweils mit der zugehörigen Bathymetrie von 1950–2014; LRdyn+MSL: Winddaten und Wasserstände der Jahre 1950–2014, jeweils mit der zugehörigen Bathymetrie von 1950–2014; und daten und Wasserstände der Jahre 1950–2014, jeweils mit der zugehörigen Bathymetrie von 1950–2014;

	Pegeldaten							Simulationen											
Pegel	Pe	egel	N	1SL	Pe N	gel- ISL	LF	LR2014 LRstat		R _{stat}	LR _{dyn}		LR _{dyn+MSL}		LR _{dyn+MSL-} 2.3		nichtlineare Interaktion		
Cuxhaven*	2,7	± 0,6	2,0	± 0,5	0,8	± 0,6	0,7	± 0,7	0,3	± 0,4	0,9	± 0,6	3,8	± 0,6	1,5	± 0,6	0,5	± 0,2	
Dagebüll*	4,9	± 0,6	2,4	± 0,6	2,5	± 0,2	0,8	± 0,2	0,3	± 0,4	0,9	± 0,4	3,5	± 0,5	1,2	± 0,5	0,2	± 0,1	
Emden	3,6	± 0,5	1,1	± 0,4	2,5	± 0,2	0,2	± 0,2	0,2	± 0,3	0,3	± 0,4	3,0	± 0,4	0,7	± 0,4	0,4	± 0,2	
Helgoland	3,3	± 0,4	2,6	± 0,5	0,7	± 0,3	0,1	± 0,1	0,2	± 0,3	0,2	± 0,3	2,5	± 0,3	0,2	± 0,3	0,0	± 0,1	
Hörnum*	4,2	± 0,5	2,8	± 0,5	1,4	± 0,2	1,4	± 0,4	0,3	± 0,4	1,5	± 0,5	4,4	± 0,5	2,1	± 0,5	0,5	± 0,2	
Husum	4,4	± 0,6	2,9	± 0,6	1,4	± 0,3	0,8	± 0,1	0,3	± 0,4	0,8	± 0,5	3,3	± 0,5	1,0	± 0,5	0,2	± 0,1	
List*	3,7	± 0,5	2,6	± 0,5	1,0	± 0,2	0,7	± 0,1	0,3	± 0,3	0,8	± 0,4	3,1	± 0,4	0,8	± 0,4	0,0	± 0,1	
Leuchtturm Alte Weser	2,7	± 0,5	2,0	± 0,4	0,6	± 0,3	0,1	± 0,1	0,2	± 0,3	0,1	± 0,4	2,6	± 0,4	0,3	± 0,4	0,1	± 0,1	
Norderney	3,9	± 0,5	2,6	± 0,5	1,3	± 0,3	-0,1	± 0,1	0,2	± 0,3	-0,1	± 0,3	2,4	± 0,3	0,1	± 0,3	0,2	± 0,1	
Wilhelmshaven	3,8	± 0,5	2,2	± 0,4	1,6	± 0,3	0,2	± 0,1	0,2	± 0,3	0,2	± 0,4	3,0	± 0,4	0,7	± 0,4	0,5	± 0,2	
Wittdün*	3,9	± 0,5	2,3	± 0,6	1,6	± 0,3	0,8	± 0,1	0,2	± 0,3	0,9	± 0,4	3,3	± 0,4	1,0	± 0,4	0,1	± 0,1	

Um zusätzlich nichtlineare Interaktionen durch den MSL-Anstieg zu guantifizieren, wurde die Langzeitsimulationen sowohl mit statischen als auch mit veränderlichen Bathymetrien durch einen jährlichen Anstieg des MSL von 2,3 mm/a erweitert. Aus der Simulation unter Berücksichtigung der veränderlichen Bathymetrien und des MSL kann indirekt auf resultierende nichtlineare Interaktionen geschlossen werden (hier: mittlerer Trend von 0,3 mm/a). Um das zu erreichen, wird der Anteil aus morphologischen Veränderungen und nichtlinearen Effekten separiert. Da der Einfluss der morphologischen Änderungen bereits in LR_{dyn} ermittelt wurde, ergibt sich als Differenz von LR_{dvn+MSL-2.3} und LR_{dvn} der Trend des nichtlinearen Anteils. Über diese modelltechnischen Sensitivitätsstudien kann somit gezeigt werden, dass bathymetrische Änderungen zu langfristigen Wasserstandsänderungen in der Deutschen Bucht führen können. Durch nichtlineare Effekte kann dieser Anteil höher ausfallen als der MSL-Anstieg allein. Aus allen Untersuchungen geht zudem hervor, dass die Pegel der nordfriesischen Küste stärker durch bathymetrische Änderungen beeinflusst werden als die der ostfriesischen Küste. Zu den dafür verantwortlichen Gründen wurde neben dem Einlaufen der Welle aus Gebieten ohne veränderliche Bathymetrien auch die geringeren bathymetrischen Änderungen seeseitig der ostfriesischen Inseln diskutiert. Des Weiteren liegen die stärker beeinflussten Pegel innerhalb von Tidebecken, die wiederum deutlich durch morphodynamische Prozesse beeinflusst werden (z. B. Benninghoff & Winter 2019). Die Ergebnisse und Rückschlüsse im Allgemeinen müssen jedoch immer vor dem Hintergrund der thematisierten Modellunsicherheiten betrachtet und kritisch hinterfragt werden. Für weitere Details und Analyseergebnisse wird an dieser Stelle auf Edelmann (2021) verwiesen. Zudem werden die erzielten Erkenntnisse in die Modellentwicklung von AP 2 einfließen, um die Analysen lokal spezifisch fortzusetzen und um den Einfluss der Meeresspiegelprojektionen erweitert.

4.1.4.3 Detektion eines globalen Signals im Untersuchungsgebiet mittels Hauptkomponentenanalyse auf Basis der Bathymetrie

Als Grundlage für die im Folgenden erläuterten Untersuchungen dienen ebenfalls die o. a. Bathymetridaten der Deutschen Bucht. In vorangegangenen Analysen des Verbundvorhabens wurden bereits die beobachteten mittleren Tideparameter Tidehub (Thb), Tidehochwasser (Thw) und Tideniedrigwasser (Tnw) sowie der MSL auf Jahresbasis mit den individuellen Bathymetriezeitreihen korreliert. Zur Beurteilung der Langzeitveränderungen wurden die Daten so aufbereitet, dass diese auf die 20 m-Tiefenlinie begrenzt wurden. Im Wesentlichen konnten hierbei signifikante Korrelationen zwischen dem MThb und den individuellen Zeitreihen der Bathymetrie detektiert werden. Die Analysen schließen somit unmittelbar an abgeschlossene KFKI-geförderte Projekte (z. B. Analysing long-term changes of tidal dynamics in the German Bight (ALADYN)) bzw. DFG-geförderte Projekte (z. B. Analyzing long term changes in the tidal dynamics of the North Sea (TIDEDYN)) an. Der Schwerpunkt des Verbundvorhabens ALADYN lag auf der detaillierten Betrachtung der Änderungen im Thb seit den 1950er Jahren in der Deutschen Bucht, während in TIDEDYN das gesamte Nordseebecken betrachtet wurde. Eine Schlussfolgerung der Auswertungen ist, dass diese beobachteten Veränderungen der mittleren Tideparameter auf eine Reaktion des Tideregimes auf die morphologische Entwicklung hindeuten könnten. Entsprechend können die erzielten Ergebnisse für das Verbundvorhaben M-Lab verwendet und darauf aufgebaut werden.

Das elementare methodische Element in den o. a. Projekten stellt die sogenannte Hauptkomponentenanalyse dar. Im Allgemeinen ist die Hauptkomponentenanalyse eine Methode der multivariaten Statistik und wird häufig zur Strukturierung und Vereinfachung umfangreicher Datensätze verwendet, indem eine große Anzahl statistischer Variablen durch eine kleinere Anzahl signifikanter, nicht korrelierter (orthogonaler) linearer Kombinationen approximiert wird (Jolliffe, 2002). Die resultierenden Hauptkomponenten werden in der Regel nach der in ihnen enthaltenen Varianz nummeriert, wobei die 1. Hauptkomponente den größten Teil der Varianz der ursprünglichen Signale erklärt. Unter Verwendung dieser führenden Hauptkomponente kann dann beispielsweise eine Rekonstruktion erstellt werden, die nur das größte gemeinsame Muster aller beobachteten Zeitreihen enthält. Derartige Rekonstruktionen sind für jede Kombination der Hauptkomponenten möglich (z. B. für 1. und 2. Hauptkomponente). Werden letztlich alle Hauptkomponenten für die Rekonstruktion berücksichtigt, kann die ursprüngliche Zeitreihe wieder vollständig reproduziert werden.

Die Anwendung der Hauptkomponentenanalyse auf die Wasserstandsparameter Thb, Thw und Tnw ist in den Arbeiten von Ebener et al. (2021) für die Deutsche Bucht und von Jänicke et al. (2020) für das gesamte Nordseebecken zusammengefasst. Im Rahmen des Verbundvorhabens wird die Idee umgesetzt, identische Analysen auch auf die Bathymetrie anzuwenden und die übergeordneten Signale zu separieren und detailliert zu betrachten. Wie exemplarisch in Abbildung 11 ist eine signifikante Reduzierung der Varianz in den Bathymetriezeitreihen von Vorteil, um stark lokale Effekte und Artefakte zu eliminieren und den verbleibenden gemeinsamen Anteil hinsichtlich der bisherigen Erkenntnisse und Kausalität zu untersuchen. Dafür werden die Ergebnisse mit den Hauptkomponenten der Wasserstandsparameter verglichen und phänomenologisch analysiert. Zudem stellen die verschiedenen Rekonstruktionen der Bathymetriedatensätze mit Hilfe der Hauptkomponentenanalyse einen geeigneten Datensatz für die Validierung des morphodynamsichen Modells aus AP 2 dar.



Abbildung 11: Exemplarische Darstellung einer Bathymetriezeitreihe über 69 Jahre (1950-2018) und die rekonstruierten Zeitreihen aus der 1. Hauptkomponente (HK1), der 2. Hauptkomponente (HK2) sowie der kombinierten Rekonstruktion aus 1. und 2. Hauptkomponente (HK1+2).

In Abbildung 12 ist die flächige Ausdehnung des Bathymetriedatensatzes gezeigt; aufgrund der Datenverfügbarkeit kann die Hauptkoponentenanalyse entsprechend auf das Gebiet der Deutschen Bucht und nicht auf die gesamte Nordsee angewendet werden. Die Hauptkomponentenanalyse liefert schließlich folgende in Tabelle 4 aufgeführte Hauptkomponenten und zugehörige prozentual erklärte Variabilität. Das bedeutet, dass etwa 56 % der im Gesamtdatensatz enthaltenen Variabilität allein mit der 1. Hauptkomponente beschrieben werden kann; mit der der 2. Hauptkomponente sind es noch 18 % und in Summe erklären die ersten sechs Hauptkomponenten über 90 % der Variabilität. Anhand von Abbildung 11 kann dieser Zusammenhang anhand rekonstruierter und unveränderter Zeitreihen visuell nachvollzogen werden.

Tabelle 4: Hauptkomponenten un	nd erklärte Variabilität.
--------------------------------	---------------------------

Hauptkomponente	Erklärte Variabilität
1	55,56 %
2	17,68 %
3	8,28 %
4	4,46 %
5	2,91 %
6	1,72 %
Σ	90,61 %



Abbildung 12: Datensatz der Bathymetrie für 1950-2018 als Basis für die Hauptkompenentenanlyse.

Für die Auswertungen können schließlich die Verläufe der Hauptkomponenten mit verschiedenen Wasserstandsparametern verglichen und deren linearer Zusammenhang beispielsweise über den Korrelationskoeffizienten beschrieben werden. Aufgrund der in den Zeitreihen enthaltenen Trends ist es wichtig, die Korrelationen jeweils mit und ohne Trend zu ermitteln, um auszuschließen, dass eine signifikante Korrelation lediglich aus einer identisch gerichteten Trendkomponente resultiert. Ähnlich kann mit weiteren stochastischen Komponenten oder Phänomenen verfahren werden. An dieser Stelle kann das anhand des Nodalzyklus verdeutlicht werden, der insbesondere in der Variabilität der mittleren Zeitreihen des Thb enthalten ist. Im Folgenden sind in Abbildung 13 und in Abbildung 14 exemplarisch für die durchgeführten Untersuchungen wesentliche Erkenntnisse dargestellt. Die ersten sechs Hauptkomponenten (PC1-6) des Bathymetriedatensatzes sind absteigend von schwarz bis hellgrau im Hintergrund dargestellt. Die jeweilige Vergleichsgröße wird als rote Zeitreihen dargestellt. Die individuellen ermittelten Korrelationskoeffizienten sind in der Legende aufgeführt und werden auf Basis einer 95 %-Konfidenz als (nicht) signifikant klassifiziert. Im oberen Teil der Grafik sind jeweils die Ausgangszeitzeitreihen, d. h. ohne Eliminierung eines linearen Trends dargestellt; im unteren Teil wurde jeweils der lineare Trend entfernt.

Für den Fall von Abbildung 13 bzw. den Vergleich des MSL mit den ersten sechs Hauptkomponenten des Bathymetriedatensatzes zeigt sich, dass lediglich eine signifikante Korrelation zwischen der 1. Hauptkomponente und dem MSL existiert, wenn der lineare Trend in den Zeitreihen enthalten ist. Wird der Trend eliminiert, wird auch die Korrelation nicht signifikant. Daraus kann der Schluss gezogen werden, dass zumindest die Veränderung über die Zeit zwischen dem MSL und der 1. Hauptkomponente der Bathymetrie eine identische Ursache hat, wenn auch der kausale Zusammenhang

noch erklärt werden muss. Ansonsten existieren keine weiteren signifikanten Korrelationen zum MSL.



Abbildung 13: Vergleich und Korrelation der Hauptkoponenten 1-6 (PC1-6) mit dem Verlauf des mittleren Meeresspiegels in Cuxhaven: oben: mit linearem Trend; unten: ohne linearen Trend.



Abbildung 14: Vergleich und Korrelation der Hauptkoponenten 1-6 (PC1-6) mit dem Verlauf der 2. Hauptkomponente des Thb aus Jänicke et al. (2020): oben: mit linearem Trend; unten: ohne linearen Trend.

In Abbildung 14 zeigt sich ein vergleichbares Bild, wenn die sechs Hauptkomponenten des Bathymetriedatensatzes der 2. Hauptkomponente des Thb aus Jänicke et al. (2020) gegenübergestellt werden. Die Korrelation mit Trend fällt mit -0,71 sogar noch deutlicher aus als zum MSL. Nach der Eliminierung des Trends reduziert sich der Korrelationskoeffizient auf 0,15 und wird nicht signifikant. In Jänicke et al. (2020) wurde der kausale Zusammenhang zwischen dem MSL und der Entwicklung des Thb nachgewiesen. An dieser Stelle kann nun auch ein Zusammenhang zur morphologischen Entwicklung gezeigt werden.

Es konnten zudem weiteren Hauptkomponenten des Bathymetriedatensatzes mögliche physikalische Zusammenhänge zugeordnet werden. Aus Abbildung 14 geht beispielsweise hervor, dass eine signifikante Korrelation von -0,34 (mit Trend) bzw. -0,46 (ohne Trend) zwischen der 2. Hauptkomponente des Thb aus Jänicke et al. (2020) und der 6. Hauptkomponente des Bathymetriedatensatzes existiert. Entfernt man die Variabilität hervorgerufen durch den 18,61-jährlichen Nodalzyklus aus der 2. Hauptkomponente des Thb, existiert kein statistisch signifikanter Zusammenhang mehr. Es liegt entsprechend der Schluss nahe, dass eine kausale Rückkopplung zwischen Morphodynamik und astronomisch bedingter Variabilität des Wasserstandes vorherrscht. In Tabelle 5 sind die bisherigen Erkenntnisse aus der durchgeführten Hauptkomponentenanalyse auf Basis des Bathymetriedatensatzes von 1950-2018 zusammenfassend aufgeführt.

Tabelle 5: Zusammenfassende Darstellung der Zuordnung von Hauptkomponenten aus dem Bathymetriedatensatz zu physikalischen Phänomenen.

Hauptkomponente	Zusammenhang	Signifikante Korrelation
1	Lineare Trendkomponente	Alle Wasserstandsparameter
2	Variabilität	Thb, Thw, Tnw, S2, M2
6	Nodalzyklus	Alle Wasserstandsparameter

Zusammenfassend kann an dieser Stelle festgehalten werden, dass die Erkenntnisse der Arbeiten von Ebener et al. (2021) für die Deutsche Bucht und von Jänicke et al. (2020) für das gesamte Nordseebecken durch die Anwendung der Hauptkomponentenanalyse auf den zur Verfügung stehenden Bathymetriedatensatz sinnvoll zusammengeführt und erweitert werden konnten. Es kann gezeigt werden, dass ein statistisch signifikanter Zusammenhang zwischen den wesentlichen Wasserstandsparametern und der Morphodynamik existiert. Zu erwähnen sind die Unsicherheiten in den Bathymetriedatensätzen insbesondere vor 1990. Allerdings bieten die durchgeführten Analysen eine Grundlage, um diese zukünftig weiterzuführen und durch geeignete Modellsimulationen zu untermauern. Darüber könnte ein analytischer Zusammenhang zwischen den Wasserstandsparametern und der Morphodynamik hergestellt werden, um beispielweise der Frage nachzugehen, wie sich räumlich differenziert die Bathymetrie ändert, wenn der MSL um vorgegebene Raten steigt. Insbesondere in der Deutschen Bucht, wo der Wasserstand sehr sensitiv auf Veränderungen der bathymetrischen Gegebenheiten reagiert, sind derartige Quantifizierungen für den Küstenschutz zukünftig elementar.

4.1.4.4 Extremwertstatistische Analysen zur Interaktion von Meeresspiegelanstieg, Sturmfluten und Morphologie im Nordfriesischen Wattenmeer

Die Inhalte dieses Kapitels wurden aufgrund ihrer hohen Projektrelevanz als eigenständiger Artikel zur Veröffentlichung in "Die Küste" eingereicht:

Niehüser, S.; Arns, A. (eingereicht): Analysen zur Interaktion von Meeresspiegelanstieg, Sturmfluten und Morphologie im nordfriesischen Wattenmeer. In: Die Küste.

4.1.5 Zusammenfassung

Deckwerke, See- und Ästuardeiche an der deutschen Küste werden entsprechend der geltenden Anforderungen für einen sicheren und nachhaltigen Sturmflutschutz geplant, bemessen und gebaut. Bislang schwierig ist dabei jedoch die Abschätzung der zukünftig erforderlichen Bemessungsgrößen, insbesondere durch den Einfluss von Meeresspiegeländerungen und die damit einhergehenden Veränderungen in hydro- und morphodynamischen Prozessen. Durch eine Kombination aus numerischen sowie statistischen Analysen konnten im vorliegenden Teilvorhaben StAMSie die wissenschaftlich-technischen Grundlagen für zukunftsfähige Küstenschutzstrukturen an Nord- und Ostseeküste gelegt werden.

Den Stand der Technik zur Abschätzung von zukünftigen Bemessungswerten und Auswirkungen des Meeresspiegelanstiegs auf Wasserstände bilden hydrodynamisch-numerische Modelle. Die modelltechnische Berücksichtigung der Morphodynamik wird allerdings häufig aus Gründen fehlender Datengrundlagen und limitierter Rechenkapazitäten vernachlässigt. Für die vorliegenden Analysen wurde ein hydro-morphodynamisches Modell des nordfriesischen Wattenmeeres ausgewertet. Es wurde zum einen der Einfluss der Bathymetrie (statisch, jährlich-variiert und morphodynamisch) auf die resultierenden Wasserstandssimulationen quantifiziert und zum anderen der Frage nachgegangen, ob der Anstieg des mittleren Meeresspiegels auf Extremwasserstände durch die Berücksichtigung der Morphodynamik kompensiert werden kann.

Anhand der durchgeführten Modellkonfigurationen konnte gezeigt werden, dass die Berücksichtigung bathymetrischer Änderungen innerhalb eines hydrodynamisch-numerischen Modells einen signifikanten Einfluss auf die Trends und die Variabilität von Wasserständen im nordfriesischen Wattenmeer hat. Darüber hinaus lassen die an-schließenden extremwertstatistischen Analysen der Szenarienläufe zum Anstieg des mittleren Meeresspiegels teilweise den Schluss zu, dass in einzelnen Tidebecken bzw. in den sub- und intertidalen Bereichen die Morphodynamik, sprich das Anwachsen oder Abnehmen von Wattflächen in der Lage ist, den Einfluss des Meeresspiegelanstiegs auf Extremwasserstände (Wiederkehrintervalle > 100 Jahre) abzumildern. Es zeigen sich jedoch sowohl zusätzliche Zu- als auch Abnahmen der Extremwasserstände gegenüber dem Meeresspiegelanstieg. Eine weitere Erkenntnis ist, dass mit höheren Meeresspiegelanstiegsszenarien, der Einfluss auf die Extremwasserstände abnimmt. Die Schlussfolgerung lautet entsprechend, dass die Morphodynamik in hydrodynamisch-numerischen Modellen zukünftig berücksichtigt werden sollte. Insbesondere in hochdynamischen Systemen wie dem nordfriesischen Wattenmeer resultiert hieraus ein signifikanter Mehrwert für zukünftige Planungsaufgaben des Küstenhochwasserschutzes.

4.1.6 Ausblick

Im Zuge der Projektbearbeitung wurden potenzielle Untersuchungen und Ideen identifiziert, die aufgrund der zeitlichen Limitation nicht während der Projektlaufzeit bearbeitet werden konnten. Es sei an dieser Stelle auf den fortgeschriebenen Verwertungsplan im Anhang A.3 verwiesen. Dementsprechend ist davon auszugehen, dass sich weitergehende Fragestellungen bezüglich der lokal/regional/global wirkenden Prozesse ergeben, die Grundlage für weitergehende wissenschaftliche Arbeiten sein werden.

- 4.2 Modelluntersuchungen zur Interaktion von Meeresspiegelanstieg, Sturmfluten und Morphologie im Wattenmeer (MoMSie)
- 4.2.1 Implementierung des Modellsystems (AP2.1)

Das in diesem Projekt verwendete numerische Modell ist das General Estuarine Transport Model (GETM, Klingbeil et al., 2019) das speziell für die Simulation des Küstenozeans mit Trockenfallen und Überflutung der Gezeitenzonen entwickelt wurde. GETM ist ein dreidimensionales baroklines Open-Source-Modell mit hydrostatischen und Boussinesq-Annahmen. In GETM werden die dreidimensionalen hydrostatischen Impulsgleichungen auf einem gestaffelten C-Gitter gelöst. Zur Berechnung der vertikalen turbulenten Flüsse verwendet GETM Turbulenzabschlussmodelle aus dem General Ocean Turbulence Model (GOTM) (Umlauf und Burchard, 2005), wobei in dieser Studie ein keps-Modell mit algebraischem Sekundenabschluss verwendet wird. Für die vertikale Diskretisierung verwendet GETM die folgenden verallgemeinerten vertikal-adaptive Koordinaten.

Eine Zwei-Wege-Kopplung zwischen dem hydrodynamischen Modell und dem spektralen Wellenmodell WaveWatchIII (Tolman 1991) wurde implementiert, indem die tiefenintegrierten Wellenkräfte (Radiationstress) in die Impulsgleichung des hydrodynamischen Moduls aufgenommen wurden. Die Wechselwirkung von Wellenkräften (Radiationstress), Gezeitenströmungen und sich ändernden Sohlschubspannungen und Wasserständen wird daher durch eine vollständig gekoppelte Welle-Strömung-Simulation realisiert. Die Sohlschubspannung unter kombinierter Einwirkung von Strömung und Wellen wird über die lineare Addition der einzelnen Schubspannungen von Wellen und Strömung hinaus erhöht (Soulsby et al., 1993). Da der Rechenaufwand für das Wellenmodell der limitierende Faktor war, wurde WaveWatchIII auf jeweils einem 3-fach gröberen Gitter gerechnet.

Die Sedimenttransportraten von fünf unabhängigen Sandklassen (50, 100, 150, 250 und 375 µm, Herrling und Winter 2017) werden über die Formulierungen von Van Rijn et al. (2004) berechnet, die zwischen Schwebe- und Geschiebetransportregimen unterscheiden. Direkte physikalische Interferenzen zwischen Korngrößenklassen, z. B. durch Verdeckung und Freilegung am Boden, sind nicht Gegenstand der Betrachtung.

Um ein konsistentes Modellsystem aufzubauen, haben wir mehrere Modellstufen genestet. Dazu haben wir die folgenden Modellstufen gewählt:

Nordatlantik

Büchmann et al. (2011) haben gezeigt, dass ein Sturmflutmodell des Nordatlantik für eine realistische Simulation des Wasserstandes in Nord- und Ostsee erforderlich ist. Der Nordatlantik (NA) wurde mit einem Gitterabstand von $d\lambda = 1/10^{\circ}$ und $d\phi = 1/15^{\circ}$ abgedeckt, was etwa 4 Seemeilen entspricht. Da NA nur als Sturmflutmodell dient, wurde es im tiefengemittelten Modus (2D) ausgeführt. Um das Modell entlang der offenen Grenzen und an der Luft-See-Grenzfläche zanzutreiben, wurden Daten aus den globalen Simulationen von Dullaart et al. 2019 des ERA5 Datensatzes verwendet, die den Zeitraum von 1961 bis 2018 abdecken. Diese globalen Simulationen bestehen aus $1/2^{\circ}$ Ozean und $1/3^{\circ}$ Atmosphäre. Die zeitliche Auflösung beträgt 1 Stunde. An den offenen Grenzen werden die Meeresoberflächenhöhen und die tiefengemittelten Strömungen aus dem globalen Ozeanmodell vorgegeben. Zusätzlich fügen wir explizit die Änderungen der Meeresoberflächenhöhe aufgrund des inversen barometrischen Effekts hinzu (Büchmann et al., 2011).

Nordsee

Für die horizontale Diskretisierung der Nordsee wurde eine Bathymetrie mit einem Gitter d λ =1/30° und d ϕ =1/60° verwendet. Dies entspricht einer Auflösung von ca. einer Seemeile. Das Modellgebiet hat eine Gittergröße von 1051 × 1274 Punkten, was nur 25% aktive Wasserpunkte ergibt. Um die Simulationen durchführbar zu machen und eine effiziente Parallelisierung zu erzwingen, wurde eine Teilgebietszerlegung durchgeführt, bei der alle Teilgebiete weggelassen wurden, die ausschließlich Landpunkte enthielten. Dadurch wurde das Verhältnis von Wasserpunkten zu Landpunkten auf ca. 80 % erhöht. Eine nahezu identische Struktur wurde in der Studie von Büchmann et al. (2011) verwendet. Um das Nordseesetup anzutreiben, wurden die Wasserspiegelhöhen entlang der offenen Grenzen mit einer zeitlichen Auflösung von 20 Minuten aus NA extrahiert. Da NA keine Gezeiteninformationen enthält, wurden Gezeitenhöhen und tiefengemittelte Gezeitenströme mit dem OSU Gezeiteninversionsmodell (Egbert et al., 2010) vorhergesagt und zu den aus NA extrahierten Daten hinzugefügt. Die Temperatur- und Salzgehaltsprofile an den offenen Grenzen wurden den globalen Modellsimulationen von Dullaart et al. 2019 entnommen. Hier wurden 6-Stunden-Werte verwendet. Um den Druckunterschied zwischen der Einfahrt in den Ärmelkanal und Lerwick zu berücksichtigen, wurden auch die großskalige baroklinen Wasserstände aus dem globalen Modell extrahiert.

Um die Süßwasserflüsse der Flüsse zu berücksichtigen, wurden die täglichen Abflüsse von 105 Flüssen aus der Flussdatenbank des Centre for Environmental Prediction (CEFAS, Großbritannien) verwendet.

Deutsche Bucht

Anschließend wurde ein dreidimensionales Modell der südlichen Nordsee mit einer Auflösung von 600 m und 42 vertikalen Schichten verwendet. Für die Randbedingungen wurden Salinitäts- und Temperaturdaten mit einer zeitlichen Auflösung von 2 Stunden sowie Oberflächenauslenkungen mit einer zeitlichen Auflösung von 20 Minuten extrahiert.

Wattenmeer

Das Wattenmeermodell ist das Modell mit der höchsten Auflösung in dieser Modellhierarchie. Die Bathymetrie des Wattenmeermodells basiert auf Daten des Projekt AufMod (Auflösung 50-200 m) und der dänischen Maritime Safety Administration (Auflösung 200 m) zur Verfügung gestellt wurden. Auf der Grundlage dieser Daten wurde eine Bathymetrie für das gesamte Wattenmeer mit einer Auflösung von 200 m für das nordfriesische Watt und 100 m für das ostfriesische Watt (siehe Abbildung 15)



Abbildung 15: Nestingstufen des Modellsystems. Grün markiert das 1 nm Setup der Nordsee, blau das 600 m Setup der Deutschen Bucht, rot das 200 m Setup des Nordfriesischen Watts und magenta das 100 m Setup des Ostfriesischen Watts. Die beiden Karten zeigen jeweils die Wassertiefen der finalen Nestingstufen.

4.2.2 Kleinskalige Rekonstruktion des Jetzt-Zustandes des Wattenmeeres (AP2.2)

Um die Modelldaten zu analysieren und die Komplexität der Analysen zu vereinfachen, haben wir die Analysemethode von Benninghof & Winter (2019). Dazu wird das Modellgebiet in die einzelnen Gezeitenbecken zerlegt. Im nächsten Schritt werden für jedes Becken die subtidale Fläche (Wassertiefe kleiner als die Tidenniedrigwasser) und die intertidale Fläche (Wassertiefe größer als die Tidenniedrigwasser, trockenfallen) bestimmt. In den intertidalen Flächen sind auch die supratidalen Flächen enthalten, also Gebiete die oberhalb des Tidenhochwassers liegen. Da diese Flachen aber meist kleiner als 1-2% der Gesamtfläche sind, wurden sie mit den intertidalen Flächen zusammengefasst. Dies wird für jedes Kalenderjahr berechnet. Somit können wir uns den zeitlichen Verlauf dieser Kurven analysieren.

4.2.2.1 Das nordfriesische Wattenmeer

In Abbildung 16 ist die zeitliche Entwicklung verschiedener morphologischer Parameter für das Lister Gezeitenbecken dargestellt. Zum Vergleich wurden die Datensätze aus dem Aufmod Projekt und dem EasyGSH Projekt genutzt. Der Vergleich der Tidenhochwasser (THW) zeigt, dass das Model die jährliche Varibilität wiedergeben kann, aber auch den Trend reproduziert. Der Vergleich der subtidalen Fläche (in Prozent der Beckenfläche) lässt gut die Verringerung der prozentualen Fläche erkennen. Gleichzeitig kann das Modellsystem auch die Ausweitung der Wattflächen (intertidal areas) reproduzieren, vor allen den Zuwachs seit 2000. Auch die hohe Variabilität der Flächenverteilung im Zeitraum 1995-2000 wird gut wiedergegeben. Die Ausweitung der Wattflächen wird vor allem durch das Anwachsen der Wattflächen hervorgerufen. Im Zeitraum 1980-2018 sind es für das Lister Becken ca. 20 cm, was schneller ist als der Meerespiegelanstieg im selben Zeitraum. Gleichzeitig sehen wir aber auch ein vertiefen der Gezeitenkanäle (subtidal depth), wie auch schon in Benninghof & Winter (2019) beschrieben. Im Gleichen Zeitraum fällt die subtidale Tiefe um knapp 40 cm. Erkennbar ist auch die Unsicherheit in den Beobachtungsdaten. Hier weisen EasyGSH und Aufmod einen Bias auf. Außerdem sind auch Unterschiede im zeitlichen Verlauf erkennbar.



Abbildung 16: Entwicklung verschiedener Parameter für das Lister Gezeitenbecken. Die schwarze Linie stellte die Realisierung des UERRA Datensatzes dar. Zum Vergleich wurden die Datensätze aus dem Aufmod Projekt (blau) und dem EasyGSH Projekt (rot) genutzt.

Wenn wir die Analyse für das Eider Sperrwerk Gezeitenbecken wiederholen (Abbildung 17), sehen wir ähnliche Trends: eine Abhnahme der subtidalen Flächen, ein Ausweiten der Wattflächen und ein Anwachsen der Wattflächen. Es ist aber auch ersichtlich, dass das Modell den starten Anstieg der intertidalen Flächen seit 2000 nicht vollständig reproduzieren kann.

Im direkten Vergleich von Lister Becken und dem Eider Becker werden Unterschiede deutlich. Während die intertidale Tiefe im Lister Becken nahezu stagniert, sehen wir ein deutliches Aufwachsen der Flächen für das Eider Becken. Die Unterschiede sind teilweise in der Geometrie begründet. Das Lister Becken ist nahezu geschlossen. Ein Wasseraustausch und Eintrag von Schwebstoff ist nur über den Gezeitenkanal möglich. Außerdem ist das Lister Becken deutlich gegen Wellen geschützt. Das Eider Becken ist dagegen sehr exponiert und ungeschützt den Wellen ausgesetzt. Außerdem kann sehr effektive Material in das Becken transportiert werden.



Abbildung 17: Entwicklung verschiedener Parameter für das Eider Sperrwerk Gezeitenbecken. Die schwarze Linie stellte die Realisierung des UERRA Datensatzes dar. Zum Vergleich wurden die Datensätze aus dem Aufmod Projekt (blau) und dem EasyGSH Projekt (rot) genutzt.

4.2.2.2 Das ostfriesische Wattenmeer

Wenn wir die Analyse für das ostfriesische Watt wiederholen (Wangerooger Becken, Abbildung 18), sehen wir umgekehrte Trends: eine Zunahme der subtidalen Flächen, eine Verringerung der Wattflächen und ein Aufwachsen der Wattflächen. Es ist aber auch ersichtlich, dass das die Beobachtungsdatensätze deutlich divergieren.



Abbildung 18: Entwicklung verschiedener Parameter für das Wangerooger Gezeitenbecken. Die schwarze Linie stellte die Realisierung des UERRA Datensatzes dar. Zum Vergleich wurden die Datensätze aus dem Aufmod Projekt (blau) und dem EasyGSH Projekt (rot) genutzt.

4.2.3 Vorhersagbarkeit und Variabilität des Jetzt-Zustandes (AP2.3)

In einem weiteren Set von numerischen Experimenten haben wir untersucht wie sensitiv die numerische Lösung im Modellsystem ist, wenn die atmosphärischen Antriebe leicht variabel sind.

Dazu haben wir das Modellsystem mit 7 "state of the art" atmosphärischen Rekonstruktionen angetrieben. Eine Zusammenfassung der verschiedenen Modelle ist in Tabelle 6 gegeben. In dem Ensemble sind 4 regionalisierte Rekonstruktionen enthalten (UERRA, CostDat Familie) sowie globale Modelle (ERA5, CFSR und JRA55). Ziel dieser Experimente war es nicht zu untersuchen welches das beste atmosphärische Modell ist, sondern die Variabilität zu verstehen, sowie deren Auswirkungen.

Tabelle 6: Auflistung der genutzten atmosphärischen Datensätze.

Datensatz	Räumliche Auflösung	Referenz
UERRA	11 km	Ridal et al 2017
CoastDat1.0 (CLM1)	11 km	Geyer & Rockel 2013
CoastDat2.0 (CLM2)	11 km	Geyer 2014
CoastDat3.0 (CLM3)	11 km	Meyer et al. 2018
ERA5	35 km	Dullaart et al. 2019
CFSR	35 km	Saha et al. 2014
JRA55	55 km	Tsujino et al. 2018

In Abbildung 19 ist ein bivariates Histogramm der Windfelder dargestellt, einmal für das Ensemble Mittel und einmal für die einzelnen Ensemble Member. Dabei zeigt sich z. B. das schon die wahrscheinlichsten Größen (Geschwindigkeit und Richtung) relativ stark variieren. So zeigt CLM3 eine Richtung von 270°, UERRA dagegen nur 235°. Wenn man nur die mittleren Größen betrachtet, ist die Variation relativ klein, CLM3 201° und ERA5 208°. Bei den Windgeschwindigkeiten zeigt ERA5 den kleinsten Wert (7.3 m/s) und CFSR den größten Wert (8.1 m/s).



Abbildung 19: Bivariates Histogramm der Windfelder der südlichen Nordsee. Links, Histogramm über alle Ensemble Member. Die gestrichelte Linie grenzt die 10 % und 99.5 % Wahrscheinlichkeit ein. Die Kreuze stellen die wahrscheinlichste Richtung und Windgeschwindigkeit der Ensemble Member dar. Rechts, Isolinien der 10 % und 99.5 % Wahrscheinlichkeit der individuellen Ensemble Member.



Abbildung 20: Entwicklung verschiedener Parameter für das Lister Gezeitenbecken. Zum Vergleich wurden die Datensätze aus dem Aufmod Projekt (blau) und dem EasyGSH Projekt (rot) genutzt. Die dicke schwarze Linie stellt den Ensemble-Mean dar. Die dünnen schwarzen Linien sind das Ensemble-Minimum und Maximum.

Um die Auswirkungen der atmosphärischen Ensemble Variabilität zu untersuchen, haben wir wieder die Veränderungen der Flächen in den einzelnen Realisierungen analysiert. In Abbildung 20 stellen wir die Veränderungen der verschiedenen Parameter im Vergleich zu Aufmod und EasyGSH dar. Die schwarzen Linien sind diesmal aber der Ensemble Mean und die dünnen schwarzen Linien stellen den minimal und maximal Werte des Ensembles dar. Klar erkennbar,kann der Ensemble Mean die Trends aus Aufmod und EasyGSH reproduzieren. Es ist aber auch die hohe Variabilität zu erkennen. So kann die subtidale Fläche zwischen 35% und 65% schwanken, abhängig vom atmosphärischen Antrieb. Genauso kann die intertidale Tiefe zwischen 30 cm und 70 cm schwanken.



Abbildung 21: Entwicklung verschiedener Parameter für das Eider Sperrwerk Gezeitenbecken. Zum Vergleich wurden die Datensätze aus dem Aufmod Projekt (blau) und dem EasyGSH Projekt (rot) genutzt. Die dicke schwarze Linie stellt den Ensemble-Mean dar. Die dünnen schwarzen Linien sind das Ensemble-Minimum und Maximum.

Im Vergleich zum Lister Becker (Abbildung 20) ist die Ensemblevariabilität im Eider Becken deutlich geringer (Abbildung 21). Durch seine exponierte Lage scheint dieses Becken deutlich robuster zu Variationen in den Antrieben zu sein. So scheint das Lister Becken deutlich sensitiver zu Variationen in der Windrichtung zu sein und somit die Stärke das küstenparallelen Schwebstofftransport der das Becken mit Material füttert. Hier sind aber noch tiefer gehende Analysen notwendig. Die wir bisher noch nicht abschließen konnten.

Diese hohe Schwankungsbreite hatten wir nicht erwartet. Somit ist die Wahl des atmosphärischen Antriebes vergleichbar mit einem "Glücksspiel", und damit auch die Modellgüte. Diese hohe Variabilität zeigt auch, dass es zwar möglich ist das Modellsystem zu kalibrieren um Trends zu reproduzieren, aber bei einem Wechsel des Antriebes diese Kalibrierung hinfällig ist. Somit sind die Parametereinstellungen nicht robust.

4.2.4 Meeresspiegelprojektionen (AP2.4)

Um zu untersuchen wie das Wattenmeer auf verschiedene Meeresspiegelszenarien reagiert haben wir folgenden Ansatz gewählt.

Wir haben das kalibrierte Setup mit dem UERRA Antrieb für den Zeitraum 1979-2018 modifiziert. Als Veränderung haben wir einen zusätzlichen linearen Meeresspiegelanstieg auf die Ränder des Nordseemodels addiert und die gesamte Modellkette gerechnet. Dabei haben wir als zusätzlichen Meeresspiegelanstieg 20 cm, 40 cm, 60 cm, 80 cm, 100 cm, 125 cm und 150 cm pro Jahrhundert gewählt. Da außer dem zusätzlichen Meeresspiegelanstieg alles andere identisch zum ursprünglichen UERRA Lauf war, konnten wir über Differenzenbildung die Veränderungen quantifizieren.

In Abbildung 22 stellen wir die Sensitivität verschiedener Parameter in Abhängigkeit vom Meeresspiegelanstieg dar. Für den Zeitraum 1979-2018 sehen wir ein Schrumpfen der subtidalen Flächen (siehe auch Abbildung 20. Dies entspricht dem Wert für einen SLR von 0 cm /Jahrhundert. Mit steigendem Meeresspiegel sehen wir eine Vergrößerung der subtidalen Flächen und dementsprechend einer Abnahme der intertidalen Flächen. Der Umkehrpunkt liegt bei etwa 75 cm zusätzlichem Meeresspiegelanstieg. Wenn wir nur das Aufwachsen der Wattflächen betrachten (intertidale Flächen) sehen wir, dass ab einem zusätzlichem Meeresspiegelanstieg von 40 cm das Aufwachsen nicht mehr mit dem Meeresspiegelanstieg mithalten kann. Somit wird das Lister Becker ab diesem Zeitpunkt langsam "versinken".



Abbildung 22: Entwicklung verschiedener Parameter für das Lister Gezeitenbecken unter verschiedenen Meeresspiegelszenarien. Die dicke Linie stellt jeweils den mittleren Fit dar, die dünnen Linien die 95% Konfidenzintervalle.

Wenn wir die gleiche Analyse für das Eider Becken machen (Abbildung 23), sehen wir die gleichen Trends: Abnahme der intertidalen Flächen mit steigendem Meeresspiegel und Zunahme der subtidalen Flächen. Im Gegensatz zum Lister Becken sehen wir jedoch, dass das Aufwachsen der Wattflächen mit dem zusätzlichen Meeresspiegelanstieg mithalten kann und dies sogar für Werte von über 150 cm / Jahrhundert. Die Analysen legen wieder nahe, dass das Eider Becken nicht limitiert im Schwebstoffeintrag ist und somit das Aufwachsen erfolgen kann.



Abbildung 23: Entwicklung verschiedener Parameter für das Eider Sperrwerk Gezeitenbecken unter verschiedenen Meeresspiegelszenarien. Die dicke Linie stellt jeweils den mittleren Fit dar, die dünnen Linien die 95% Konfidenzintervalle.

Die Muster und Trends die wir im nordfriesischen Watt sehen, sind auch im ostfriesischem Watt zu erwarten. In Abbildung 24 stellen wir wieder die Entwicklung verschiedener Parameter für das Wangerooger Gezeitenbecken unter verschiedenen Meeresspiegelszenarien dar. Wieder sehen wir das Schrumpfen der intertidalen Flächen und das Anwachsen der subtidalen Flächen.



Abbildung 24: Entwicklung verschiedener Parameter für das Wangerooger Gezeitenbecken unter verschiedenen Meeresspiegelszenarien. Die dicke Linie stellt jeweils den mittleren Fit dar, die dünnen Linien die 95% Konfidenzintervalle.

Um eine bessere Darstellung des Aufwachsens der Wattflächen im Verhältnis zum externen Meeresspiegel zu ermöglichen haben wir in Abbildung 25 dieses Verhältnis für jeden Gitterpunkt berechnet. Hierbei würde ein Werte von 1 oder größer als 1 auf ein synchrones Anwachsen der Wattflächen hinweisen und wir würden keine Veränderung erwarten. Abbildung 25 zeigt aber, dass dies nicht der Fall ist und wir nur stellenweise einen identischen Aufwachs sehen. Das Lister Becken weißt großflächig Werte von 0.2 auf. Somit kann dieses Becken nicht dem zusätzlichen Meeresspiegelanstieg standhalte (siehe auch Abbildung 22). Deutlich ist aber auch, dass das generelle Muster sehr inhomogen ist. So gibt es lokale Gebiete die ein Verhältnis von nahezu 1 haben und somit deutlich resilienter sind. Wir sehen aber auch das fortschreiben der Trends der letzten Dekaden: eine Vertiefung der Rinnen (Benninghof & Winter (2019)).



Abbildung 25: Verhältnis des externen Meeresspiegelanstiegs und des Aufwachsen der Flächen für das nordfriesische Watt. Die dünne schwarze Linie stellt die 10 m Wassertiefe dar.

Ein ähnliches Muster sehen wir auch für das ostfriesische Watt (Abbildung 26). Auch dort kann ein Großteil der Wattflächen nicht mit dem externen Meeresspiegelanstieg mithalten. Eine mögliche Erklärung ist, dass das ostfriesische Watt in seine Transportkapazität begrenzt ist. Die Gezeitenkanäle, die Öffnungen zwischen den Inseln, als auch die Breite des Rückseitenwatts limitieren den notwendigen Transport von Schwebstoff in das ostfriesische Watt. Daher steht nicht genug Material zur Verfügung um ein ausreichend schnelles Aufwachsen der Wattflächen zu ermöglichen.

Unsere Ergebnisse deuten also darauf hin, dass das Watt als Ganze nicht die Kapazität besitzt mit dem externen Meeresspiegelanstieg mitzuhalten.



Abbildung 26: Verhältnis des externen Meeresspiegelanstiegs und des Aufwachsen der Flächen für das ostfriesische Watt. Die dünne schwarze Linie stellt die 10 m Wassertiefe dar.

4.3 Gemeinsame Zusammenfassung zu Zielen, Ergebnissen und Relevanz des Projektes

Deckwerke, See- und Ästuardeiche an der deutschen Küste werden entsprechend der geltenden Anforderungen für einen sicheren und nachhaltigen Sturmflutschutz geplant, bemessen und gebaut. Bislang schwierig ist dabei jedoch die Abschätzung der zukünftig erforderlichen Bemessungsgrößen, insbesondere durch den Einfluss von Meeresspiegeländerungen und die damit einhergehenden Veränderungen in hydro- und morphodynamischen Prozessen. Durch eine Kombination aus numerischen sowie statistischen Analysen wurden im Verbundvorhaben "Modelluntersuchungen zum Einfluss eines MSL-Anstiegs auf die Bemessung von Küstenschutzbauwerken (M-Lab)" die wissenschaftlich-technischen Grundlagen für zukunftsfähige Küstenschutzstrukturen an Nord- und Ostseeküste gelegt werden.

Den Stand der Technik zur Abschätzung von zukünftigen Bemessungswerten und Auswirkungen des Meeresspiegelanstiegs auf Wasserstände bilden hydrodynamisch-numerische Modelle. Die modelltechnische Berücksichtigung der Morphodynamik wird allerdings häufig aus Gründen fehlender Datengrundlagen und limitierter Rechenkapazitäten vernachlässigt. Für die projektspezifischen Analysen wurde ein hydro-morphodynamisches Modell des ost- und nordfriesischen Wattenmeeres aufgebaut und ausgewertet. Es wurde zum einen der Einfluss der Bathymetrie (statisch, jährlich-variiert und morphodynamisch) auf die resultierenden Wasserstandssimulationen quantifiziert und zum anderen der Frage nachgegangen, ob der Anstieg des mittleren Meeresspiegels auf Extremwasserstände durch die Berücksichtigung der Morphodynamik kompensiert werden kann.

Es wurde ein Modellsystem entwickelt, um die morphologischen Veränderungen im deutschen Wattenmeer zu untersuchen. Mit räumlichen Auflösungen von 100 m im ostfriesischen und 200 m im nordfriesischen Wattenmeer wurden Berechnungen auf dekadischen Zeitskalen durchgeführt. In einem ersten Schritt wurde das Modellsystem mit morphologischen Rekonstruktionen validiert. Die Sensitivität einzelner Tidebecken auf Variationen der atmosphärischen Antriebe wurde mit Hilfe von Ensemblesimulationen untersucht. Mit diesen Experimenten konnten wir zeigen, dass die atmosphärische Variabilität einen direkten Einfluss auf die morphologische Entwicklung hat und sogar Trends in der Entwicklung von Wattflächen und Gezeitenkanälen umkehren kann. Darüber hinaus deuten die Ergebnisse darauf hin, dass einige Tidebecken widerstandsfähiger gegenüber Schwankungen der mittleren Windrichtung sind, während andere Becken Schwankungen der Windgeschwindigkeit nicht abfedern können.

Die Untersuchung des Einflusses des Meeresspiegelanstiegs auf die Morphodynamik war Gegenstand einer Reihe von Sensitivitätsexperimenten. Für den Zeitraum 1980-2018 wurde dazu der Meeresspiegelanstieg im kalibrierten und validierten Modellsystem variiert. Mit Hilfe der Modellergebnisse konnten wir die Reaktion der Wattflächen und Gezeitenkanäle auf zukünftige Änderungen des mittleren Wasserstandes abschätzen. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass das Wachstum der Wattflächen mit dem Anstieg des Meeresspiegels nur in begrenztem Maße Schritt halten kann, so dass bei einem Anstieg des Meeresspiegels mit einer Schrumpfung der Wattflächen zu rechnen ist. Unsere Analysen zeigen jedoch auch, dass die Zeitskalen, in denen diese Veränderungen ablaufen, in den einzelnen Tidebecken sehr unterschiedlich sind.

Anhand der durchgeführten Modellkonfigurationen konnte zudem gezeigt werden, dass die Berücksichtigung bathymetrischer Änderungen innerhalb des hydrodynamisch-numerischen Modells einen signifikanten Einfluss auf die Trends und die Variabilität von höheren Wasserstandsperzentilen im nordfriesischen Wattenmeer hat. Darüber hinaus lassen die anschließenden extremwertstatistischen Analysen der Szenarienläufe zum Anstieg des mittleren Meeresspiegels teilweise den Schluss zu, dass in einzelnen Tidebecken bzw. in den sub- und intertidalen Bereichen die Morphodynamik, sprich das Anwachsen oder Abnehmen von Wattflächen in der Lage ist, den Einfluss des Meeresspiegelanstiegs auf Extremwasserstände (Wiederkehrintervalle > 100 Jahre) abzumildern. Es zeigen sich jedoch sowohl zusätzliche Zu- als auch Abnahmen der Extremwasserstände gegenüber dem Meeresspiegelanstieg. Eine weitere Erkenntnis ist, dass mit höheren Meeresspiegelanstiegsszenarien, der Einfluss auf die Extremwasserstände abnimmt.

Die Schlussfolgerung im Verbundvorhaben "Modelluntersuchungen zum Einfluss eines MSL-Anstiegs auf die Bemessung von Küstenschutzbauwerken (M-Lab)" lautet entsprechend, dass die Morphodynamik in hydrodynamisch-numerischen Modellen zukünftig berücksichtigt werden sollte. Insbesondere in hochdynamischen Systemen wie dem ost- und nordfriesischen Wattenmeer resultiert hieraus ein signifikanter Mehrwert für zukünftige Planungsaufgaben des Küstenhochwasserschutzes. Die gewonnenen Erkenntnisse liefern ebenso direkte Aussagen für Planungsaufgaben (z. B. Sedimentdynamik und zukünftig erforderliche Deichhöhen im Nordfriesischen Wattenmeer) und erweitern den aktuellen Kenntnisstand der Sturmflutdynamik in der Deutschen Bucht. Darüber hinaus können durch die flächige Ausprägung der Ergebnisse auch lokale Unterschiede berücksichtigt werden. Rostock, im März 2023

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

Dr.-Ing. Ulf Gräwe

5. Referenzen

- Arns, A., Dangendorf, S., Jensen, J., Talke, S., Bender, J. & Pattiaratchi, C. (2017): Sea-level rise induced amplification of coastal protection design heights, Scientific Reports, 7, 40171.
- Arns, A., Wahl, T., Dangendorf, S., & Jensen, J. (2015): The impact of sea level rise on storm surge water levels in the northern part of the German Bight, Coastal Engineering, 96, 118-131.
- Arns, A., Wahl, T., Wolff, C., Vafeidis, A.T., Haigh, I.D., Woodworth, P., Niehüser, S., Jensen, J. (2020): Non-linear interaction modulates global extreme sea levels, coastal flood exposure, and impacts. In: Nature Communications 11 (1), S. 1918. DOI: 10.1038/s41467-020-15752-5.
- Arns, A.; Wahl, T.; Haigh, I. D.; Jensen, J.; Pattiaratchi, Ch. B. (2013): Estimating extreme water level probabilities: A comparison of the direct methods and recommendations for best practise. Coastal Engineering (81), S. 51–66. DOI: https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2013.07.003.
- Bamber, J. L., Oppenheimer, M., Kopp, R. E., Aspinall, W. P. & Cooke, R. M. (2019): Ice sheet contributions to future sea-level rise from structured expert judgment. Proceedings of the National Academy of Sciences, 116, 23, 11195--11200, doi: 10.1073/pnas.1817205116.
- Becherer, J., Hofstede, J., Gräwe, U., Purkiani, K., Schulz, E., Burchard, H. (2017): The Wadden Sea in transition - consequences of sea level rise, Ocean Dynamics, in press, doi:10.1007/s10236-017-1117-5.
- Benninghoff, M.; Winter, C. (2019): Recent morphologic evolution of the German Wadden Sea. In: Scientific reports 9 (1), S. 9293. DOI: 10.1038/s41598-019-45683-1.

- Butler et al. (2007): Trend estimation in extremes of synthetic North Sea surges. J. R. Stat. Soc. Ser. C Appl. Stat., 56, doi: 10.1111/j.1467-9876.2007.00583.x.
- Church, J. A., Clark, P. U., Cazenave, A., Gregory, J. M., Jevrejeva, S., Levermann, A., Merrifield, M. A., Milne, G. A., Nerem, R. S., Nunn, P. D., Payne, A. J., Pfeffer, W. T., Stammer, D., Unnikrishnan, A. S. (2013): Sea Level Change. Climate Change 2013. The Physical Science Basis. In: Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Codiga, D. L. (2011): Unified Tidal Analysis and Prediction Using the UTide Matlab Functions. Technical Report 2011-01. Hg. v. Graduate School of Oceanography. University of Rhode Island, Narragansett, RI.
- Dangendorf, S., Müller-Navarra, S., Jensen, J., Schenk, F., Wahl, T. & Weisse, R. (2014): North Sea storminess from a novel storm surge record since AD 1843, Journal of Climate, 27, 3582-3595.
- Dullaart, J. C. M., Muis, S., Bloemendaal, N., & Aerts, J. C. J. H. (2019). Advancing global storm surge modelling using the new ERA5 climate reanalysis. Climate Dynamics, 0123456789.
- Ebener, A; Jänicke, L.; Arns, A.; Jensen, J. (2021): Untersuchungen zur Entwicklung der Tidedynamik an der deutschen Nordseeküste – Ein Ansatz zur Identifizierung und Quantifizierung von Tideveränderungen durch lokale Systemänderungen. In: Die Küste 89, https://hdl.handle.net/20.500.11970/107562, https://doi.org/10.18171/1.089106.
- Edelmann, L.-S. (2021): Untersuchungen zum Einfluss bathymetrischer Änderungen auf die Wasserstände in der Deutschen Bucht. Masterarbeit, Forschungsinstitut Wasser und Umwelt, Universität Siegen, unveröffentlicht.
- Frederikse, T., Jevrejeva, S., Riva, R. E. M., & Dangendorf, S. (2018): A Consistent Sea-Level Reconstruction and Its Budget on Basin and Global Scales over 1958–2014, Journal of Climate, 31(3), 1267-1280, doi: https://doi.org/10.1175/JCLI-D-17-0502.1.
- Gaslikova et al. (2013): Changes in North Sea storm surge conditions for four transient future climate realizations. Nat. Hazards, 66, doi:10.1007/s11069-012-0279-1Woodworth et al. 2007.
- Geyer, B. (2014). High-resolution atmospheric reconstruction for Europe 1948-2012: coastDat2. Earth System Science Data, 6(1), 147–164. <u>https://doi.org/10.5194/essd-6-147-2014</u>
- Gräwe, U., Holtermann, P., Klingbeil, K., & Burchard, H. (2015). Advantages of vertically adaptive coordinates in numerical models of stratified shelf seas. Ocean Modelling, 92, 56–68.
- Hagen, R., Plüß, A., Jänicke, L., Freund, J., Jensen, J., & Kösters, F. (2021). A combined modelling and measurement approach to assess the nodal tide modulation in the North Sea. Journal of Geophysical Research: Oceans, 126(3), https://doi.org/10.1029/2020JC016364.
- Haigh, I. D., Nicholls, R. J., & Wells, N. (2010): A comparison of the main methods for estimating probabilities of extreme still water levels, Coastal Engineering, 57, 838-849.
- Haigh, I. D., Pickering, M. D., Green, J. M., Arbic, B. K., Arns, A., Dangendorf, S., Hill, D., Horsburgh, K., Howard, T., Idier, D., Jay, D. A., Jänicke, L., Lee, S. B., Müller, M., Schindelegger, M., Talke, S. A., Wilmes, S. B., Woodworth, P. L. (2019): The Tides They Are a Changin': A comprehensive review of past and future non astronomical changes in tides, their

driving mechanisms and future implications. In: Rev. Geophys. DOI: 10.1029/2018RG000636.

- Herrling, G., & Winter, C. (2017). Spatiotemporal variability of sedimentology and morphology in the East Frisian barrier island system. Geo-Marine Letters, 37(2), 137–149. https://doi.org/10.1007/s00367-016-0462-6
- Hofstede, J. L. A., Becherer, J., Burchard, H. (2016): Are Wadden Sea tidal systems with a higher tidal range more resilient against sea level rise? Journal of Coastal Conservation. doi:10.1007/s11852-016-0469-1.
- Huettemeyer, P., Koopmann, A., Kunz, H., Puschmann, M., Niedersaechsisches Landesamt für Ökologie, Norderney, Forschungsstelle Küste (1999): Morphologische Gestaltungsvorgänge im Küstenvorfeld der Deutschen Bucht. Abschlussbericht.
- Jänicke, L.; Ebener, A.; Dangendorf, S.; Arns, A.; Schindelegger, M.; Niehüser, S. et al. (2020): Assessment of Tidal Range Changes in the North Sea From 1958 to 2014. In: J. Geophys. Res. Oceans 126 (1). DOI: 10.1029/2020JC016456.
- Jensen, J. (1984): Änderungen der mittleren Tidewasserstände an der Nordseeküste, Mitteilungen des Leichtweiß-Instituts der TU Braunschweig, Heft 88.
- Jensen, J., Frank, T., Wahl, T. (2011): Analyse von hochaufgelösten Tidewasserständen und Ermittlung des MSL an der deutschen Nordseeküste (AMSeL). In: Die Küste, 78.
- Jensen, J., Mudersbach, C. (2006): Untersuchungen zu extremen Sturmflutereignissen an der Deutschen Nordseeküste. In: Markus Disse (Hg.): Risikomanagement extremer hydrologischer Ereignisse. Beiträge zum Tag der Hydrologie 2006, 22./23. März 2006 an der Universität der Bundeswehr München, Bd. 1. Munich, Germany. Hennef: DWA, Dt. Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, 15.06).
- Jensen, J., Mügge, H.-E., Schönfeld, W., & Visscher, G. (1991). Final report oft the KFKI-project Wasserstandsentwicklung in der Deutschen Bucht, 1991, Hamburg, Germany.
- Jolliffe, I. T. (2002): Principal Component Analysis, Springer Series in Statistics, Springer, New York. <u>https://doi.org/10.1007/b98835</u>.
- Klingbeil, K., Lemarié, F., Debreu, L., & Burchard, H. (2018). The numerics of hydrostatic structured-grid coastal ocean models: State of the art and future perspectives. Ocean Modelling, 125, 80–105.
- Lassen, H.: Örtliche und zeitliche Variationen des Meeresspiegels in der südöstlichen Nordsee (1989). In: Die Küste, 50.
- Menendez, M. & Woodworth, P. L. (2010): Changes in extreme high water levels based on a quasi-global tide-gauge dataset, Journal of Geophysical Research, 115, C10011.
- Milbradt, P. (2011): KoDiBa, ImTG Analyse morphodynamischer Veränderungen auf der Basis zeitvarianter digitaler Bathymetrien. In: Die Küste, 78 (78), 33UR <u>https://henry.baw.de/handle/20.500.11970/101659-57</u>.

- Milbradt, P., Sellerhoff, F., Krönert, N. (2005): KoDiBa Entwicklung und Implementierung von Methoden zur Aufbereitung konsistenter digitaler Bathymetrien. Hg. v. smile consult GmbH. Online verfügbar unter https://www.smileconsult.de/web/files/bmbf03kis0421.pdf, zuletzt geprüft am 01.02.2021.
- Milbradt, P., Valerius, J., Zeiler, M. (2015): Das Funktionale Bodenmodell: Aufbereitung einer konsistenten Datenbasis für die Morphologie und Sedimentologie. In: Die Küste, 83 AufMod (83), 19UR - <u>https://henry.baw.de/handle/20.500.11970/101736?show=full-38</u>.
- Meyer, M., Pätsch, J., Geyer, B., & Thomas, H. (2018). Revisiting the Estimate of the North Sea Air-Sea Flux of CO2 in 2001/2002: The Dominant Role of Different Wind Data Products. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 123(5), 1511–1525.
- Mudersbach, C., Wahl, T., Haigh, I. D. & Jensen, J. (2013): Trends in extreme high sea levels along the German North Sea coastline compared to regional MSL changes, Continental Shelf Research, 65, 111-120.
- Müller-Navarra, S. H. (2013): Gezeitenvorausberechnungen mit der Harmonischen Darstellung der Ungleichheiten/On Tidal Predictions by Means of Harmonic Representation of Inequalities. In: BSH Bericht (50), zuletzt geprüft am 25.01.2019.
- Pugh, D. & Woodworth, P. L. (2014): Sea-Level Science. Understanding Tides, Surges, Tsunamis and Mean Sea Level Changes. Cambridge: Cambridge University Press.
- Ridal, M., Olsson, E., Unden, P., Zimmermann, K., & Ohlsson, A. (2017). Deliverable D2.7 : HAR-MONIE reanalysis report of results and dataset. <u>http://www.uerra.eu/</u>
- Saha, S., Moorthi, S., Wu, X., Wang, J., Nadiga, S., Tripp, P., Behringer, D., Hou, Y. T., Chuang, H. Y., Iredell, M., Ek, M., Meng, J., Yang, R., Mendez, M. P., Van Den Dool, H., Zhang, Q., Wang, W., Chen, M., & Becker, E. (2014). The NCEP climate forecast system version 2. Journal of Climate, 27(6), 2185–2208.
- Sievers, J., Milbradt, P., Ihde, R., Valerius, J., Hagen, R., & Plüß, A. (2021). An integrated marine data collection for the German Bight – Part 1: Subaqueous geomorphology and surface sedimentology (1996–2016). Earth System Science Data, 13(8), 4053–4065.
- Smith, J. M., Cialone, M. A., Wamsley, T. V., McAlpin, T. O. (2010): Potential impact of sea level rise on coastal surges in southeast Lousiana, Ocean Engineering, 37, 37-47.
- Tolman, H. L. (1991). A Third-Generation Model for Wind Waves on Slowly Varying, Unsteady, and Inhomogeneous Depths and Currents. Journal of Physical Oceanography, 21(6), 782–797.
- Tsujino, H., Urakawa, S., Nakano, H., Small, R. J., Kim, W. M., Yeager, S. G., Danabasoglu, G., Suzuki, T., Bamber, J. L., Bentsen, M., Böning, C. W., Bozec, A., Chassignet, E. P., Curchitser, E., Boeira Dias, F., Durack, P. J., Griffies, S. M., Harada, Y., Ilicak, M., ... Yamazaki, D. (2018). JRA-55 based surface dataset for driving ocean–sea-ice models (JRA55-do). Ocean Modelling, 130(July), 79–139.
- WEB 1: Messverfahren. Online verfügbar unter https://www.bsh.de/DE/THEMEN/Vermessung_und_Kartographie/Seevermessung/Messverfahren/messverfahren_node.html;jsessionid=D5721525A9CEABD4DC6B001DCF33E06D.live11294, zuletzt geprüft am 01.02.2021.

- Weisse and Pluess (2006): Storm-related sea level variations along the North Sea coast as simulated by a high-resolution model 1958-2002. Ocean Dyn., 57, doi:10.1007/s10236-005-0037y.
- Weisse et al. (2012): Changing North Sea storm surge climate: An increasing hazard? Ocean Coast. Manage., 68, doi:10.1016/j.ocecoaman.2011.09.005.
- Woodworth, P. L. & Blackman, D. L. (2004): Evidence for systematic changes in extreme high waters since the mid-1970s, Journal of Climate, 17(6), 1190-1197.
- Woodworth, P. L., Menendez, M. & Gehrels, R. (2011): Evidence for century-timescale acceleration in mean sea levels and for recent changes in extreme sea levels, Surveys in Geophysics, 32, 603-618.
- Woth et al. (2006): Climate change and North Sea storm surge extremes: an ensemble study of storm surge extremes expected in a changed climate projected by four different regional climate models. Ocean Dyn., 56, doi: 10.1007/s10236-005-0024-3.