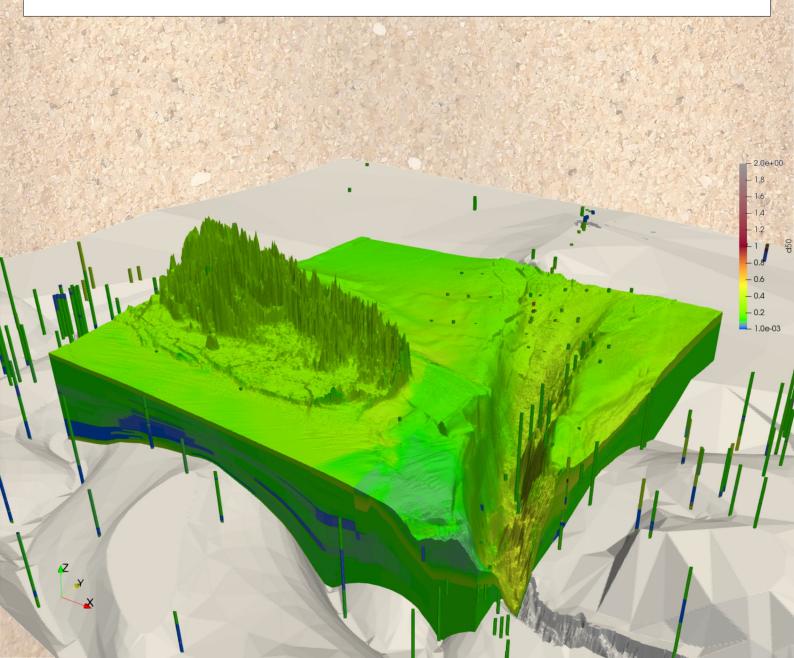
Stratigraphische Modellkomponenten zur Verbesserung von hochaufgelösten und regionalisierten morphodynamischen Simulationsmodellen - SMMS

Wissenschaftlicher Abschlussbericht

J. Sievers, P. Milbradt, A. Plüß, A. Wobbe, K. Müller-Navarra, M. Rubel, P. Kolb



Wissenschaftlicher Abschlussbericht zum KFKI-Projekt SMMS

Autoren

Julian Sievers, M. Sc. smile consult GmbH Tel.: E-Mail:

Schiffgraben 11 0511 / 54361749 sievers@smileconsult.de

30159 Hannover

apl. Prof. Dr.-Ing. habil. smile consult GmbH Tel.: E-Mail:

 Peter Milbradt
 Schiffgraben 11
 0511 / 54361742
 milbradt@smileconsult.de

 30159 Hannover

Dr.-Ing. Andreas Plüß BAW Tel.: E-Mail:

Wedeler Landstraße 157 040 / 81908417 andreas.pluess@baw.de

22559 Hamburg

Astrid Wobbe, M. Sc. BSH Tel.: E-Mail: Neptunalle 5 0381 / 4563981 E-Mail: astrid.wobbe@bsh.de

18057 Rostock

Dr. rer. nat. BAW Tel.: E-Mail:

Katharina Müller-Navarra Wedeler Landstraße 157 040 / 81908436 katharina.mueller-navarra@baw.de 22559 Hamburg

Dipl.-Geow. Malte Rubel smile consult GmbH Tel.: E-Mail:

Schiffgraben 11 0511 / 54361748 rubel@smileconsult.de

Pia Kolb, M. Sc. BAW Tel.: E-Mail:

Wedeler Landstraße 157 040 / 81908487 pia.kolb@baw.de

22559 Hamburg

30159 Hannover



Förderkennzeichen:

03KIS124

Projektlaufzeit:

01.01.2019 - 31.12.2021

Kostenneutr. Verlängerung: 01.01.2022 – 31.05.2022



Förderkennzeichen:

03KIS123

Projektlaufzeit:

01.01.2019 - 31.12.2021

Kostenneutr. Verlängerung: 01.01.2022 – 31.05.2022



Assoziierter Partner:

BSH

Jennifer Valerius Bernhard-Nocht-Str. 78 20359 Hamburg

Tel.:

040 / 31903295

F_Mail

jennifer.valerius@bsh.de

Gefördert vom



aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages



Hannover und Hamburg, den 04.10.2022

Abbildung Deckblatt: Sedimentmodell aus mikrosequenz- und basisstratigraphischen Komponenten im Umfeld von Baltrum

Inhaltsverzeichnis

1.	KURZFASSUNG	6
2.	EINLEITUNG	7
2.1.	Motivation	
2.2.	Ziele des Projekts	
2.3.	Projektgebiet	8
3.	DATENBASIS	. 10
3.1.	Bathymetrie	. 10
3.2.	Oberflächensedimentologie	. 11
	3.2.1. Gültigkeitsbereich einer Sedimentprobe in Raum und Zeit	
	3.2.1.1. Räumlicher Aussagebereich	
	3.2.1.3. Räumlich-zeitliche Gültigkeit	
	3.2.2. Korngrößenverteilung	
	3.2.3. Porosität	
3.3.	Bodenaufbau	
	3.3.1. Linguistische Beschreibung von Kornverteilungen und deren Transformation	21
3.4.	Hydrodynamische Kenngrößen	. 22
4.	BATHYMETRISCHE MODELLKOMPONENTE	. 23
5.	OBERFLÄCHENSEDIMENTOLOGISCHE MODELLKOMPONENTE	. 25
5.1.	Jährliche oberflächensedimentologische Modelle	. 27
5.2.	Abgeleitete oberflächensedimentologische Produkte	
6.	STRATIGRAPHISCHE MODELLKOMPONENTE	. 30
6.1.	Mikrosequenzstratigraphische Modellkomponente	
6.2.	Basisstratigraphische Modellkomponente	
6.3.	Stratigraphisches Gesamtmodell	
7.	TECHNISCHE REALISIERUNG DER STRATIGRAPHISCHEN	22
	MODELLKOMPONENTE	
7.1.	Datenbankbasierte Realisierung	. 33
7.2.	Erhaltungstreue Übertragung und Export für numerische Simulationsmodelle	. 33
8.	STRATIGRAPHISCHE MODELLKOMPONENTE IN HYDRO-MORPHODYNAMISCHEN SIMULATIONSMODELLEN	
8.1.	Stratigraphische Modellkomponente in Delft3D	. 35
8.2.	Stratigraphische Modellkomponente in SediMorph	. 36
8.3.	Stratigraphische Modellkomponente in Marina	. 37

	8.3.1. 8.3.2.	Entwicklung der Gewässersohle		
	8.3.3.	Prinzipstudie		
	8.3.3.1.	Ohne stratigraphische Anfangsbedingung	41	
	8.3.3.2.	Mit stratigraphischer Anfangsbedingung		
9.		EDER GEOMORPHOLOGISCHEN ENTWICKLUNG IN AUSGEWÄHLTEN EBIETEN	47	
0.4				
9.1.		Bucht		
	9.1.1. 9.1.2.	Entwicklung der Wattflächen		
9.2.	• · · · — ·	Transportpfadeuar		
9.2.	9.2.1.	Entwicklung der Wattflächen		
	9.2.1.	Veränderung der Oberflächensedimentologie		
	9.2.3.	Hydro- und morphodynamische Modelluntersuchungen		
	9.2.4.	Stratigraphische Analysen		
9.3.	Lister Tief	und Hörnum Tief		
	9.3.1.	Entwicklung der Wattflächen		
	9.3.2.	Veränderung der Oberflächensedimentologie	62	
10.	PRODUK	TE	63	
-				
10.1.		rische Produkte		
10.2.		ensedimentologische Produkte		
10.3.	Stratigrap	hische Produkte	64	
11.	ZUSAMMENFASSUNG			
12.	DANKSAGUNG			
13.	LITERATURVERZEICHNIS			
11	ANHANG ZUM REDICHT			

Abkürzungen

AufMod Verbundprojekt "Aufbau von integrierten Modellsystemen zur Analyse

der langfristigen Morphodynamik der Deutschen Bucht"

BAW Bundesanstalt für Wasserbau

BKG Bundesamt für Kartographie und Geodäsie

BMBF Bundesministerium für Bildung und Forschung

BSH Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie

BSS Brier-Skill-Score

d₅₀ Mediankorndurchmesser [mm]

DB Datenbank

EasyGSH-DB Verbundprojekt "Erstellung anwendungsorientierter synoptischer Referenzdaten

zur Geomorphologie, Sedimentologie und Hydrodynamik in der Deutschen Bucht"

FBM Funktionales Bodenmodell

GDGL Gewöhnliche Differentialgleichung

GIS Geoinformationssystem

GPDN Verbundprojekt "Geopotenzial Deutsche Nordsee"

KFKI Kuratorium für Forschung und Küsteningenieurwesen

LBEG Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie, Niedersachsen

LGLN Landesamt für Geoinformation und Landesvermessung Niedersachsen

LKN.SH Landesbetrieb für Küstenschutz, Nationalpark und Meeresschutz

Schleswig-Holstein

LLUR Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume, Schleswig-Holstein

Marina Modellsystem zur Simulation der Hydro- und Morphodynamik in Flüssen,

Seen, Ästuaren und Küstenbereichen

mFUND Forschungsinitiative Modernitätsfond

NHN Normalhöhennull

NLWKN Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft,

Küsten- und Naturschutz

NN Normalnull

SMMS Verbundprojekt "Stratigraphische Modellkomponenten zur Verbesserung von

hochaufgelösten und regionalisierten morphodynamischen Simulationsmodellen"

TNO The Netherlands Organization for Applied Scientific Research, Utrecht

UNESCO United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization

WSA BHV Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt Bremerhaven

1. Kurzfassung

Die deutsche Nordseeküste ist mit dem UNESCO-Weltnaturerbe Wattenmeer auf einer Länge von ca. 1.600 km eine bedeutende europäische Kulturlandschaft und unverzichtbarer Lebens- und Wirtschaftsraum. Dieser ist durch ständige Umlagerungen der Sedimente am Meeresboden geprägt und unterliegt einem stetigen Wandel in seinen Natur- und Nutzungseigenschaften. Das Projekt SMMS fokussierte zunächst auf eine datenbasierte geomorphologische Beschreibung der aktiven bzw. aktivierbaren "oberen Schichten" des küstennahen Meeresbodens der Deutschen Bucht, insbesondere im Bereich der morphodynamisch sehr aktiven Küsten, Watten und Ästuare. Hierzu wurden bathymetrische, oberflächensedimentologische und stratigraphische Basisdaten zusammengetragen, qualitätsgesichert und mit Metadaten beschrieben, so dass diese in einem dreidimensionalen Modell des Bodenaufbaus zusammengeführt werden konnten. Das umgesetzte Bodenmodell besteht aus einem zeitvarianten oberen mikrosequenzstratigraphischen Teilmodell und einem stratigraphischen Basismodell für den im Betrachtungszeitraum als zeitinvariant anzusehenden unteren, oft bis zur holozänen Basis reichenden Teil.

Mit der so geschaffenen Datenbasis wurden stratigraphische Modellansätze in prozessbasierten morphodynamischen Simulationsmodellen evaluiert sowie das Modellsystem Marina um eine stratigraphische Modellkomponente erweitert. Zusammen mit den Modellsystemen Delft3D-4 (klassische Variante) und UnTRIM²/SediMorph wurde an ausgewählten Fokusgebieten die Wirkung der stratigraphischen Modellerweiterungen untersucht und bewertet.

Zum Projektende konnten auf der Basis der zusammengetragenen Basisdaten für die abgeleiteten bathymetrischen, oberflächensedimentologischen sowie stratigraphischen Modelle umfangreiche Produkte erstellt und von der Bundesanstalt für Wasserbau, Hamburg (BAW) über das Datenportal https://datenrepository.baw.de der Allgemeinheit zur Verfügung gestellt werden.

Das Projekt wurde von der Firma smile consult GmbH (Projektleitung), der BAW und dem assoziierten Partner Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) durchgeführt.

Das um die stratigraphische Komponente erweiterte Funktionale Bodenmodell (FBM) wird genauso wie die geplanten weiteren Modellerweiterungen dazu beitragen, langfristige Auswirkungen hydrodynamischer und meteorologischer Prozesse auf den Meeresboden zu verstehen und zu analysieren. Damit kann die Prognose der morphologischen Entwicklung und Stabilität von Küstenabschnitten als Voraussetzung für Planungsvorgänge im Küstenschutz und der maritimen Wirtschaft wesentlich verbessert werden.

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) unter den Förderkennzeichen 03KIS124 und 03KIS123 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

2. Einleitung

2.1. Motivation

Neben Naturbeobachtungen stellen Simulationsmodelle ein wesentliches Werkzeug zum Verständnis mariner morphologischer Vorgänge und zur Planung von marinen Bauwerken im Küsteningenieurwesen dar.

Insbesondere für die Abschätzung zukünftiger Anpassungsprozesse des Küstengewässerbodens aufgrund anthropogener Nutzungen und natürlicher Veränderungen, wie der Variabilität des mittleren Meeresspiegels, haben sich prozessbasierte hydro- und morphodynamische Simulationsmodelle als geeignet erwiesen. Die Güte solcher Modelle hängt hierbei grundlegend von der verfügbaren Datengrundlage und deren Übertragbarkeit in die Simulationsmodelle ab.

Mit dem FBM, welches in dem vorangegangenen KFKI-Projekt AufMod [Heyer und Schrottke 2013] und dem mFUND-Projekt EasyGSH-DB [PLÜß et al. 2020] entworfen und weiterentwickelt wurde, ist in den letzten Jahren ein datenbasiertes Hindcast-Simulationsmodell des Bodens der Küstengewässer der Deutschen Bucht und der angrenzenden Ästuare mit den Komponenten Bathymetrie und Oberflächensedimentologie entstanden, welches qualitätsgesicherte und konsistente Basisdaten für hydro- und morphodynamische numerische Simulationsmodelle liefert.

In den letzten Jahren hat sich in der Modellentwicklung und dem Aufbau hydro- und morphodynamischer Simulationsmodelle die Erkenntnis verfestigt, dass auch der vertikal und lateral variable Bodenaufbau einen signifikanten Einfluss auf die Güte der Simulationsergebnisse haben kann. So wurden bei den großen Modellsystemen entsprechende stratigraphische Modellansätze umgesetzt (Delft3D [Storms et al. 2007], Telemac / Sisyphe [Merkel und Kopmann 2011] und SediMorph [Malcherek et al. 2005]). Diese Modellerweiterungen berechnen einen Bodenaufbau im Bereich der simulierten morphologischen Veränderungen. Sowohl für die Vorgabe des Bodenaufbaus als Anfangswert als auch für die Plausibilisierung des simulierten Bodenaufbaus fehlte in der Vergangenheit jedoch die notwendige konsistente Datenbasis.

Die in diesem Bericht dargestellten theoretischen Grundlagen, Bearbeitungsschritte und Modelluntersuchungen sowie abgeleiteten Produkte des KFKI-Forschungsprojektes SMMS fokussieren genau auf die Generierung konsistenter stratigraphischer Grundlagendaten und zeigen die Möglichkeiten und Grenzen der Nutzung in hydro- und morphodynamischen Simulationsmodellen auf.

Zur Beschreibung der morphodynamisch aktiven bzw. aktivierbaren oberen Schichten des Gewässerbodens wird die umfangreiche bathymetrische und oberflächensedimentologische Datenbasis des FBM mit den Daten aus prozessbasierten hydronumerischen Simulationsmodellen verknüpft.

Mit dem datenbasierten stratigraphischen Hindcast-Simulationsmodell wird eine Gesamtschau ermöglicht, die ein fundiertes Verständnis der Entwicklung der Geomorphologie des Meeresbodens der Deutschen Bucht ermöglicht.

2.2. Ziele des Projekts

Die wesentlichen Ziele dieses KFKI-Verbundvorhabens wurden im Rahmen der Antragstellung, beginnend bei den Naturbeobachtungen über numerische Modelluntersuchungen bis hin zur Aufbereitung und Verfügbarmachung von abgeleiteten Produkten wie folgt strukturiert:

1. Aufbau eines datenbasierten stratigraphischen Modells der morphologisch aktiven bzw. aktivierbaren oberen Schichten des Meeresbodens

Aufbauend auf den bathymetrischen und oberflächensedimentologischen Modellkomponenten müssen zunächst die verfügbaren stratigraphischen Daten zusammengetragen, qualitätsgesichert und homogenisiert werden. Die so entstehenden Basisdaten und zugehörigen Metadaten werden in einer Datenbankkomponente mit geeigneten, zu entwickelnden Interpolationsverfahren verknüpft. Das so entstehende virtuelle dreidimensionale Modell der morphologisch aktiven bzw. aktivierbaren Bodenschichten wird schrittweise von einem einfachen Modell durch Hinzunahme zusätzlicher Informationen kontinuierlich weiterentwickelt. Die Implementierung von geeigneten Kartendarstellungen und Datenexporten stellt den Teilprojekten sowie potenziellen Nutzern Produkte und Grundlagendaten zur Verfügung.

2. Evaluation stratigraphischer Komponenten in morphodynamischen Simulationsmodellen

Die Eignung stratigraphischer Modellkomponenten bzw. deren Exportprodukte zur Verbesserung morphodynamischer Simulationsmodelle soll an ausgewählten Modellsystemen evaluiert werden. Hierzu müssen neben den theoretischen Grundlagen vor allem Implementierungsaspekte zusammengetragen und dokumentiert sowie zugehörige Im- und Exportfilter angepasst werden. An ausgewählten Testfällen mit vereinfachter Geometrie, Tiefenstruktur und vereinfachten Randwertvorgaben werden die unterschiedlichen Modellkerne und -ansätze miteinander verglichen und bewertet.

- 3. Analyse der geomorphologischen Dynamik in ausgewählten Fokusgebieten Durch die Verknüpfung von Ergebnissen aus prozessbasierten hydro- und morphodynamischen sowie datenbasierten Simulationsmodellen kann ein wesentlicher Erkenntniszugewinn zur Morphodynamik der Deutschen Bucht erwartet werden. Neben großräumigen Betrachtungen der Deutschen Bucht wurden die Analysen der geomorphologischen Entwicklungen auf das Mündungsgebiet des Weserästuars und die Tidebecken Lister Tief und Hörnum Tief fokussiert. In diesen Fokusgebieten werden zum einen die entwickelten Interpolationsverfahren des datenbasierten stratigraphischen Modells geprüft und weiterentwickelt und zum anderen die morphodynamischen Simulationsmodelle auf ganz konkrete Fragestellungen des Küsteningenieurwesens angewendet.
- 4. Bereitstellung prototypischer Produkte aus dem Verbundprojekt
 Die Komplexität der aufgebauten und eingesetzten datenbasierten Modelle, hydrogeomorphologischen Simulationen sowie zum Teil wissensbasierten Analysen erfordern die
 Schaffung von nutzerorientierten Sichten und Produkten. Zum Projektende wird eine in sich
 konsistente Zusammenstellung über die IT-Infrastrukturkomponenten der BAW einer
 breiten interessierten Öffentlichkeit kostenlos zur Verfügung gestellt werden.

2.3. Projektgebiet

Die im Projekt entwickelten Methoden und Verfahren werden exemplarisch für den Küstenbereich der Deutschen Bucht, im Weiteren Projektgebiet genannt, angewendet. Das Projektgebiet (siehe Abbildung 1) umfasst den niedersächsischen und schleswig-holsteinischen Küstenbereich und reicht in etwa von der 20 m Wassertiefenlinie bis zur ersten Deichlinie bzw. bis in die Ästuarmündungen hinein (Ems: Emden, Weser: Nordenham, Elbe: Brunsbüttel, Eider: Olversum, Tönning).

Der zu betrachtende Bodenaufbau wird im Hangenden durch die zeitvariante Oberfläche des Meeresbodens und im Liegenden durch eine Approximation der Holozänbasis begrenzt. Die Holozänbasis setzt sich aus Datensätzen verschiedener Veröffentlichungen und Projekte zusammen. Diese wurde im Küstenbereich von Schleswig-Holstein anhand von Bohrungen, die die Holo-

zänbasis erreichten bzw. durchteuften, ermittelt (Ahrendt 2006; Ricklefs und Asp Neto 2005). Im niedersächsischen Küstenmeer wurde zur Bestimmung der Untergrenze u. a. die modellierte Holozänbasis, die im GPDN-Projekt entwickelt wurde (Griffel et al. 2013), verwendet.

Die so entstehende modellierte Holozänbasis wurde anhand von z_{min} -Wertberechnungen auf dem FBM plausibilisiert und, wenn notwendig, ergänzt.

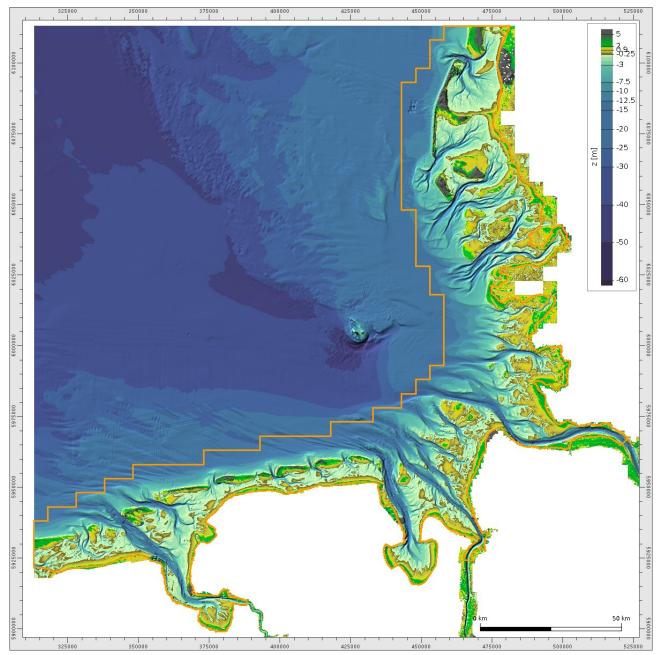


Abbildung 1: Projektgebietsausdehnung (orange) und Bathymetrie der Deutschen Bucht des Jahres 2020

3. Datenbasis

Beobachtungs- und Vermessungsdaten des Meeresbodens innerhalb der Deutschen Bucht und des zugehörigen Küstenstreifens bilden die Basis für die Analyse und Beschreibung morphologischer Veränderungen an der deutschen Nordseeküste sowie für Aufbau, Validierung und Betrieb prozessbasierter Simulationsmodelle.

In den vergangenen Dekaden wurden viele Naturdaten des Meeresbodens erhoben. Sowohl unterschiedliche, der Datenerfassung zugrunde liegende Fragestellungen als auch die stetige Veränderung bzw. Weiterentwicklung von Messverfahren führten zu einer sehr heterogenen Datenbasis. Nicht zuletzt wird beispielsweise durch die Digitalisierung von historischen Karten, Vermessungsdaten, Laborkennwerten usw. der Versuch unternommen, geomorphologische Rekonstruktionen über noch längere Zeiträume zu ermöglichen.

Ein Teil der Basisdaten, insbesondere bathymetrische Vermessungen und oberflächensedimentologische Kennwerte sind bereits in zurückliegenden Forschungs- und Förderprojekten (KoDiBa [Milbradt et al. 2005], ImTG [Milbradt et al. 2009], AufMod [Heyer und Schrottke 2013], EasyGSH-DB [Plüß et al. 2020]) sowie in Ingenieuraufträgen zusammengetragen, qualitätsgesichert und in das sogenannte FBM integriert worden (siehe bspw. [Milbradt et al. 2015]). Diese Daten dienen der Beschreibung der Gewässerbodeneigenschaften und wurden in diesem Projekt zusammen mit stratigraphischen Daten für die Entwicklung eines dreidimensionalen Bodenmodells verwendet.

Diese stratigraphischen Daten umfassen vor allem Bohrkerndaten. Sie wurden im Rahmen des Projektes zusammengetragen, homogenisiert und zum Teil auch digitalisiert. Die zusätzliche Nutzung flachseismischer Daten wurde im Projektverlauf an den verfügbaren Flachseismiken exemplarisch geprüft.

Die Beschaffung von Basisdaten für dieses vom Bund geförderte Forschungsprojekt war zum Teil von erheblichen Schwierigkeiten geprägt, was nicht zuletzt Auswirkungen auf die erzeugten Produkte hatte. Der föderale Charakter der Bundesrepublik verhindert z. B. die Weitergabe von Daten durch die Länderbehörden bzw. ermöglicht die Weitergabe nur gegen Erhebung sehr hoher Bereitstellungskosten. Niedersächsische Landesbetriebe, wie das Landesamt für Geoinformation und Landesvermessung Niedersachsen (LGLN), der Niedersächsische Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN) sowie das Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG), untersagten z. T. explizit die Nutzung ihrer Daten oder forderten fünfstellige Summen für die Bereitstellung. Universitäten und Forschungseinrichtungen hielten Daten zurück, deren Vorstellung und Analyse den Kern von Promotionsprojekten darstellten. Demgegenüber standen Bundesbehörden und -verwaltungen sowie schleswig-holsteinische Landesbetriebe, die das Projekt tatkräftig mit der Bereitstellung von Daten unterstützten, wie das ehemalige Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt Bremerhaven (WSA BHV), der Landesbetrieb für Küstenschutz, Nationalpark und Meeresschutz Schleswig-Holstein (LKN.SH) und das Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume (LLUR).

3.1. Bathymetrie

Die bathymetrischen und topographischen Basisdaten der Deutschen Bucht umfassen, Stand Mai 2022, ca. 64 Tsd. Datensätze mit 88 Mrd. Punkten, 4,5 Mrd. Elementen und 584 Tsd. Polygonen über einen Zeitraum von ca. 1945 bis Ende 2020. Die Konfidenzbereiche der bathymetrischen Vermessungen in der Deutschen Bucht, also die räumliche Gültigkeit als wesentliche Metadateninformation, sind in Abbildung 2 dargestellt.

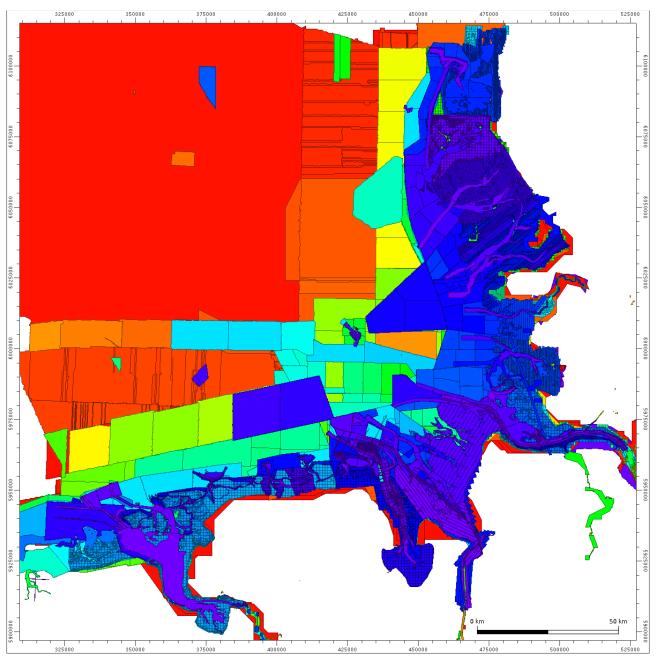


Abbildung 2: Konfidenzbereiche der bathymetrischen Vermessungsdaten

Weitere Vermessungsdaten wurden für die gesamte Nordsee zusammengetragen. Hierbei bestand und besteht eine besondere Herausforderung in der Homogenisierung der unterschiedlichen Höhenniveaus.

3.2. Oberflächensedimentologie

Die oberflächensedimentologische Modellkomponente des FBM basiert auf oberflächensedimentologischen Daten, die von unterschiedlichen Datenerhebern stammen und mit entsprechenden Zielstellungen im Gelände entnommen und analysiert wurden. Die im Rahmen des FBM herangezogenen Ansprachen der Sedimentproben müssen mindestens eine Korngrößenanalyse enthalten. Weitere Parameter, wie der organische Anteil oder der Porenwasseranteil, wurden mitarchiviert, sofern diese vorhanden waren. Die Beschreibung der Sedimenteigenschaften fokussiert

im Folgenden auf die Kornzusammensetzung und Porosität, die als wesentliche Parameter bei der prozessbasierten morphodynamischen Simulation dienen.

Eine der größten Herausforderungen bei der flächenhaften und zeitlichen Modellierung der Sedimentverteilung liegt in dem großen Zeitraum, in dem die Proben genommen wurden, und der hohen morphodynamischen Aktivität der deutschen Nordseeküste. Ein Probenahmeort auf einer Wattfläche kann bereits wenige Jahre später oder aber auch nach einer Sturmflut in einer Tiderinne liegen.

Die sedimentologische Modellkomponente besteht derzeit aus ca. 92 Tsd. Sedimentproben in verschiedenen Auflösungen und von verschiedenen Datenerhebern und -lieferanten aus dem Zeitraum 1941 bis 2020. Etwa 44 Tsd. dieser Proben liegen im Gebiet der Deutschen Bucht (siehe Abbildung 3).

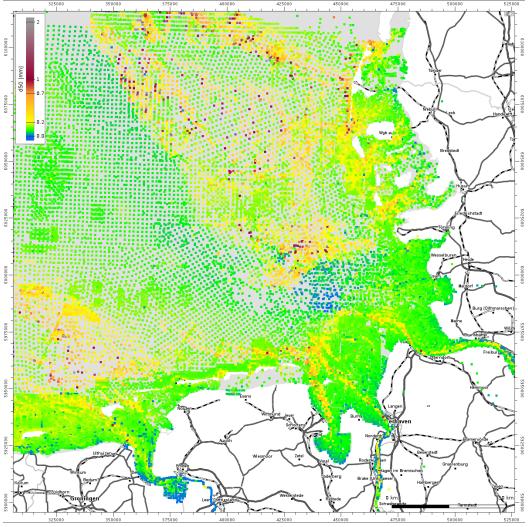


Abbildung 3: Lage der Sedimentproben in der Deutschen Bucht, eingefärbt nach dem Median der Korngrößenverteilung (d₅₀) [vor OpenStreetMap]

Besonders in Bereichen der hochdynamischen Watten, Ästuarmündungen und vorgelagerten Inseln ist mit einer hohen Variabilität innerhalb der Sedimentzusammensetzungen zu rechnen. Die Abbildung 4 gibt die Lage der Sedimentproben wieder, wobei diese nach dem Beprobungsjahr eingefärbt sind. Sedimentproben, bei denen das Aufnahmedatum nicht mehr rekonstruiert werden konnte, wurde das Datum 01.01.1945 zugeordnet.

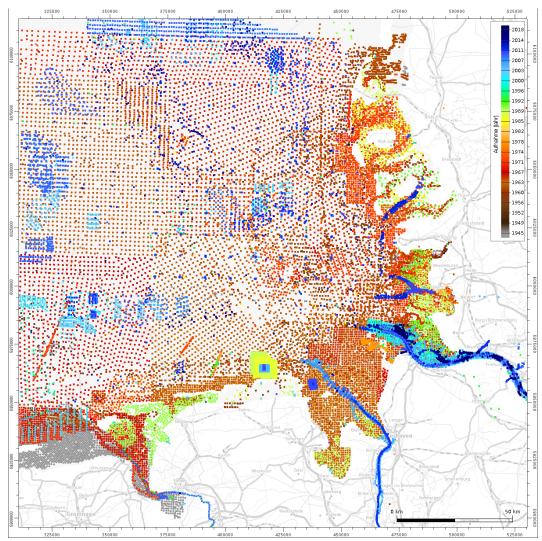


Abbildung 4: Lage der Sedimentproben in der Deutschen Bucht, eingefärbt nach dem Jahr der Probennahme [vor OpenStreetMap]

Die Aggregierung dieser über einen sehr langen Zeitraum aufgenommenen Proben zu konsistenten oberflächensedimentologischen Modellen ist in Kapitel 5. dargestellt.

3.2.1. Gültigkeitsbereich einer Sedimentprobe in Raum und Zeit

Sedimentbeprobungen werden zu einem bestimmten Zweck durchgeführt und sollten Repräsentant für eine gewisse örtliche Ausdehnung und einen Zeitraum sein. Leider werden diese Informationen nur sehr selten mitprotokolliert oder sie gehen während der Prozessierung verloren. Auf der Basis der bathymetrischen Daten und Metadateninformationen können jedoch zugehörige räumliche und zeitliche Aussagebereiche im Nachhinein geschätzt werden.

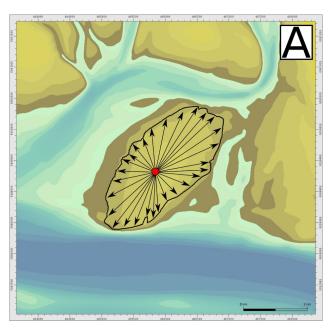
3.2.1.1. Räumlicher Aussagebereich

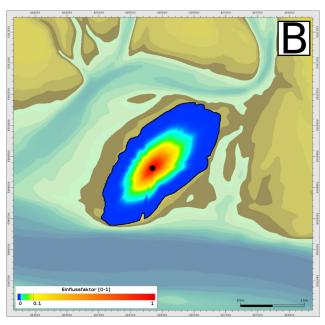
Die Sedimentzusammensetzung "korreliert" in der Regel gut mit den geometrischen Eigenschaften der Oberfläche des Gewässerbettes, so dass der Einflussbereich der Probe durch den Ähnlichkeitsbereich des Gewässerbettes in erster Näherung approximiert werden kann. Die Ähnlichkeit des Gewässerbettes wird im Folgenden über die Parameter

- Höhenlage
- Bodengradient
- Variabilität (Bodenformen)

beschrieben. Der hier genutzte Algorithmus zur Bestimmung des räumlichen Ähnlichkeitsbereiches beruht auf einer angepassten Schattenwurfanalyse, wie sie auch aus verschiedenen GIS-Systemen bekannt ist.

Die Bestimmung der Ähnlichkeitsfläche an einem Sedimentprobenort erfolgt durch das Aussenden von Strahlen in alle Richtungen (siehe Abbildung 5A). Entlang dieser Strahlen wird die Veränderung der oben genannten Parameter (interpoliert aus der bathymetrischen Komponente des FBM) beobachtet und der Strahl so lange verlängert, bis mindestens einer der vorgegebenen Grenzwerte der o. a. Parameter überschritten wird. Die gewählten Grenzwerte sind dabei tiefenabhängig, um der Messunsicherheit in den bathymetrischen Vermessungsdaten Rechnung zu tragen. Im Ergebnis wird jeder Sedimentprobe ein polygonales Sterngebiet zugeordnet.





maximale Ausdehnung

Zugehörigkeitsfunktion

Abbildung 5: Konstruktionsskizze der örtlichen Ähnlichkeitsbereiche einer Sedimentprobe

Dem sternförmigen räumlichen Aussagebereich wird zusätzlich eine entfernungsabhängige Zugehörigkeitsfunktion (GAUß-Kurve) zugeordnet (siehe Abbildung 5B), die bei der späteren Datenassimilation in das Gesamtmodell die räumliche Wirkung der Sedimentprobe parametrisiert.

3.2.1.2. Zeitliches Gültigkeitsintervall

Neben den morphologischen Eigenschaften des Gewässerbodens in der Umgebung des Probenahmeortes spielt auch dessen Entwicklung (Erosion oder Sedimentation) für die zeitliche Gültigkeit der Probe eine wesentliche Rolle. Hierbei werden die Lage und die zeitliche Entwicklung der Sohltiefe als Parameter verwendet. Ändern sich diese Parameter stärker als vorgegebene Grenzwerte, so endet das zeitliche Gültigkeitsintervall (siehe Abbildung 6). Der Algorithmus zur Ermittlung des zeitlichen Gültigkeitsintervalls erlaubt hierbei eine asymmetrische Ausdehnung, so dass, wie in der Abbildung dargestellt, die zeitliche Ähnlichkeit optimal ermittelt werden kann.

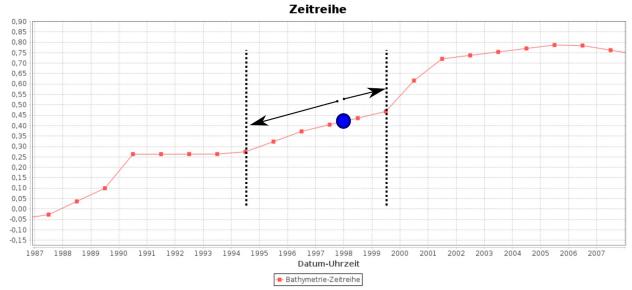


Abbildung 6: Prinzipskizze zur Festlegung des zeitlichen Gültigkeitsintervalls in einer Zeitreihe am Probenort

Die Analyse der Tiefenentwicklung über die Zeit am Ort der Probename erfolgt wiederum mit dem FBM und wird ebenfalls mit einer Gauß-Kurve in der Zeit verknüpft.

3.2.1.3. Räumlich-zeitliche Gültigkeit

Der räumlich-zeitliche Gültigkeitsbereich wird schließlich als geometrisches Mittel aus örtlichem und zeitlichem Wert modelliert (siehe Abbildung 7).

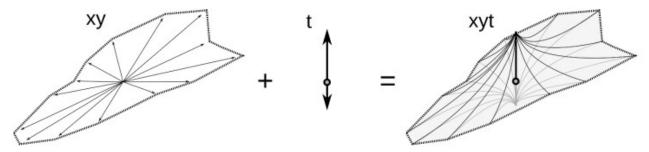


Abbildung 7: Kombination des räumlichen und zeitlichen Einflussbereichs

3.2.2. Korngrößenverteilung

Die Kornzusammensetzung ist eine zentrale Eigenschaft des Sedimentes auf dem Gewässerboden bzgl. der Interaktion mit dem darüber liegenden Wasserkörper. Die Sedimentzusammensetzung wird im Folgenden über die Summenkurve der Korngrößenverteilungen beschrieben.

Die Vorbereitungen für eine Korngrößenanalyse (das Trocknen der Bodenprobe) können genutzt werden, um den Wassergehalt der Bodenprobe als Approximation für die Porosität zu ermitteln (siehe auch Kapitel 3.2.3.). Hierzu wird die Bodenprobe gewogen und im Anschluss bei 105 °C bis zur Massenkonstanz getrocknet. Die Differenz der vor und nach dem Trocknen ermittelten Masse entspricht der in der Bodenprobe ursprünglich enthaltenen Wassermenge.

Nach dem Trocknen der Probe kann mit Hilfe des Glühverlustes nach DIN 18128 [Deutsches Institut für Normung 2002] die Masse der organischen Bestandteile ermittelt werden. Hierzu wird die Probe zerkleinert, gewogen und bei 550 °C bis zur Massenkonstanz geglüht. Die Differenz zwischen der Masse vor dem Versuch und dem Glührückstand nach dem Versuch ergibt die Masse der organischen Bestandteile.

Die Korngrößengewichtsverteilung beschreibt den Anteil der einzelnen Korngrößen der Gesamtprobe und kann durch Siebung, Sedimentations- oder Laseranalysen bestimmt werden.

Die Wahl des Verfahrens hängt hierbei maßgeblich vom Größt- und Kleinstkorn der Bodenprobe ab. Bei Korngrößen zwischen 0,063 mm und 63 mm kann die Korngrößenverteilung durch eine Siebung ermittelt werden. Wenn das Größtkorn der Probe 0,063 mm nicht überschreitet, lässt sich eine Siebung nicht mehr durchführen und es muss ein alternatives Verfahren, wie z. B. eine Sedimentationsanalyse, angewandt werden.

Wenn die Probe nennenswerte Mengen an Körnern über und unter 0,063 mm enthält, muss die Korngrößenverteilung für Körner mit einem Durchmesser größer als 0,125 mm per Siebung und für Körner mit einem Durchmesser kleiner als 0,125 mm mit Hilfe einer Sedimentationsanalyse ermittelt werden.

Bei der Siebanalyse wird das Sediment über eine Kaskade kleiner werdender Siebe in Korngrößenklassen separiert. Über das Wiegen dieser Anteile erhält man ein Histogramm der Massenanteile bzgl. der Korngrößen. In den akquirierten Sedimentproben waren häufig die Siebgrößen noch nachvollziehbar. Weitere typische Darstellungen der Korngrößenverteilungen erfolgen in der sogenannten ϕ -Skala.

Im Großteil der englischsprachigen Publikationen zu Korngrößenverteilungen wird nicht die im deutschen Sprachraum übliche metrische (mm)-Skala für Korngrößen, sondern die ϕ -Skala angewendet. Die ϕ -Skala wurde in den 30er-Jahren von Krumbein [1934, 1936, 1938] eingeführt, bei der die Korngrößen nach Gleichung (1)¹ transformiert werden.

$$\phi = -\log_2(\frac{d}{d_0}) \qquad mit \ d_0 = 1 \, mm \tag{1}$$

Die Transformation aus der ϕ -Skala in die metrische ist durch

$$d = 2^{-\phi} \cdot d_0 \tag{2}$$

gegeben. Durch die logarithmische Skala kann jeder Kornfraktion gleich viel Raum bei der Darstellung eingeräumt werden.

Durch die logarithmische Transformation entsprechen die ganzzahligen ϕ genau den Klassengrenzen nach der Definition der Udden-Wentworth-Skala [Udden 1914; Wentworth 1922], weshalb Krumbein das Symbol ϕ auch als Wentworth-Exponent bezeichnete.

Um eine für die sehr unterschiedlichen Diskretisierungen der Korngrößenverteilungen konsistente Darstellung zu erhalten, werden im Rahmen der Modellbildung und softwaretechnischen Umsetzung nur noch Korngrößen-Summenkurven [Milbradt 2012] betrachtet (siehe Abbildung 8).

¹ Der Bezug zu dem Referenzdurchmesser d $_0$ in der Gleichung war in der ursprünglichen Form nicht enthalten und wurde erst von McManus [1963] vorgeschlagen, um Missverständnissen im Umgang mit der ϕ -Skala vorzubeugen.

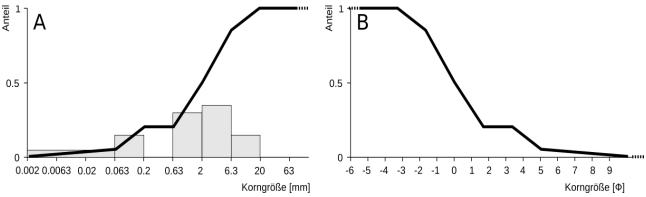


Abbildung 8: Prinzipskizze zur Erzeugung einer stückweise linearen Summenlinie aus einem Histogramm, (A) Metrische Skala mit zugrundeliegender Klassenverteilung und zugrundeliegenden -grenzen, (B) ϕ -Skala

3.2.3. Porosität

Das Verhältnis des Hohlraumvolumens zum Gesamtvolumen des Sedimentgemisches wird als Porosität n bzw. Porenanteil bezeichnet. Die Porosität des Sedimentgemisches ist ein wichtiger Parameter in der Bodenevolutionsgleichung (Exner-Gleichung) [Exner 1925]. Der Boden wächst in Modellen demzufolge schneller auf, bezogen auf das Sedimentvolumen, wenn die Porosität des abgelagerten Materials größer ist.

Der Wasseranteil der zur Verfügung stehenden Sedimentproben, welcher eine gute Abschätzung der Porosität darstellt, war jedoch nur in weniger als 15 % der Proben protokolliert.

Auf Grund der zentralen Bedeutung der Porosität für die morphodynamische Simulation wird für alle anderen Proben diese Größe durch eine Berechnungsvorschrift abgeschätzt.

Eine gute Beschreibung der Porosität bzgl. des d_{50} in mm basiert beispielsweise auf einem logistischen Fitting nach Wilson et al. [2018]:

$$n(d_{50}) = 10 1 + e^{\frac{-\log_{10}(d_{50}) + 1,227}{-0,270}}$$
(3)

Die Abhängigkeit der Porosität von der Sortierung σ kann durch den folgenden Multiplikand modelliert werden:

$$\eta(\sigma, d_{50}) = \frac{1}{1 + \sigma \cdot \sqrt{w_c(d_{50})}} \tag{4}$$

wobei σ die Kornsortierung (von 0 bis unendlich) und $w_c(d_{50})$ die Sinkgeschwindigkeit des Sediments ist.

In der Abbildung 9 ist die ursprüngliche Relation nach Wilson et al. [2018] und die mit unterschiedlichen Sortierungen angepasste Relation dargestellt.

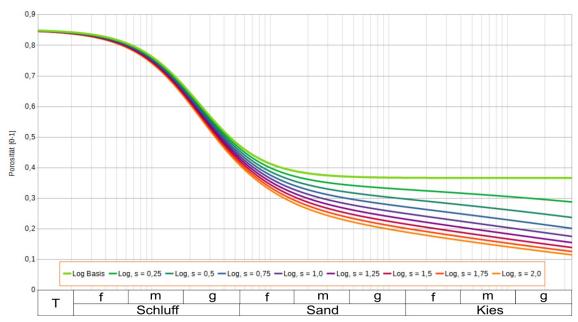


Abbildung 9: Verlauf der Porosität nach Wilson et al. [2018] bei verschiedenen Sortierungen

3.2.4. Weitere Naturdaten

Die Berücksichtigung von weiteren Daten im Rahmen der Modellbildung, wie z. B. Informationen aus Seitensichtsonaraufnahmen, wurden evaluiert. Seitensichtsonaraufnahmen wurden in der Vergangenheit in der Regel in den tieferen Bereichen (Schelf und Schelffuß sowie in Tiderinnen) durchgeführt. Die Interpretation der Daten ist sehr häufig bearbeiterabhängig und verfahrensbedingte, blickwinkelabhängige Intensitätsänderungen erschweren automatisierte Mengenverarbeitungsansätze. Deshalb konnten diese Daten im Rahmen von SMMS nicht weiter berücksichtigt werden.

3.3. Bodenaufbau

Die Beobachtung des Bodenaufbaus ist mit noch höherem Aufwand verbunden als die der Gewässerbodenoberfläche. Jedoch spiegelt der Bodenaufbau die historische Entwicklung der Gewässersohle wider.

Der oberflächennahe Meeresbodenaufbau kann basierend auf Informationen aus geologischen Bohrungen, Drucksondierungen und aus hydroakustischen bzw. flachseismischen Messungen abgeleitet bzw. charakterisiert werden. Direkte Informationen zum Bodenaufbau liefern die Beschreibungen von Bohrkernen. Die visuelle Beschreibung bzw. die Einteilung des Bohrkerns in Schichten richtet sich maßgeblich nach den sichtbaren Übergängen von Korngrößenwechseln, Farbänderungen und weiteren bodenmechanischen Eigenschaften. Aus den Beschreibungen der einzelnen Schichten ergibt sich eine vertikale Schichtabfolge, die in Form eines Bohrprofils dargestellt wird.

Die vertikalen Positionen der Schichtgrenzen werden mit einer oberen und einer unteren Tiefe relativ zum Bohransatzpunkt beschrieben. Nach der Aufteilung in einzelne Schichten werden diese bei einer Untersuchung vor Ort überwiegend durch linguistische Variablen charakterisiert. Bei der Entnahme eines Bohrkerns kann es vorkommen, dass Kernverluste auftreten, zumeist verursacht durch den Bohrvorgang selbst. Diese Schichten werden in der Beschreibung des Bohrkerns als nicht auswertbar gekennzeichnet.

Die im Projekt zusammengetragenen 31,8 Tsd. Bohrkerne stammen größtenteils von den geologischen Diensten der Länder Niedersachsen, Schleswig-Holstein, Bremen und Hamburg. Sie wurden über die zugehörigen Web-Dienste geladen. Zudem stellte das BSH Bohrkerndaten im Küstennahbereich bereit. Die zusammengetragenen Bohrkerne decken den Zeitraum von ca. 1950 bis 2020 ab.

Weitere Bohrkerne wurden aus dem Datenbestand der BAW und des ehemaligen WSA BHV im Projekt digitalisiert.

Die Bohrungen des ehemaligen WSA BHV, die vorrangig in der Fahrrinne im Bereich der Außenweser liegen, wurden als pdf-Dateien bereitgestellt und im Projekt digitalisiert. Außerdem wurden die Schichtbeschreibungen in das SEP 3-Format überführt.

Bohrungen aus dem Bohrgutachtenarchiv der BAW wurden ebenfalls digitalisiert und die Schichtbeschreibungen in das SEP 3-Format überführt. Die Daten erstrecken sich räumlich im Küstenbereich der Deutschen Bucht und decken einen Zeitraum von 1955 bis 2011 ab. Von den etwa 3000 Bohrungen weisen jedoch nur 192 Bohrungen verwertbare Positionsinformationen auf.

Nicht zuletzt konnten auch Bohrkerninformationen aus den Niederlanden über das Datenportal des Niederländischen Geologischen Dienstes TNO bezogen werden. Diese Daten decken den Bereich Dollart (von der Ems-Mündung bis zum Wattgebiet der niederländischen Barriereinsel Schiermonnikoog) ab.

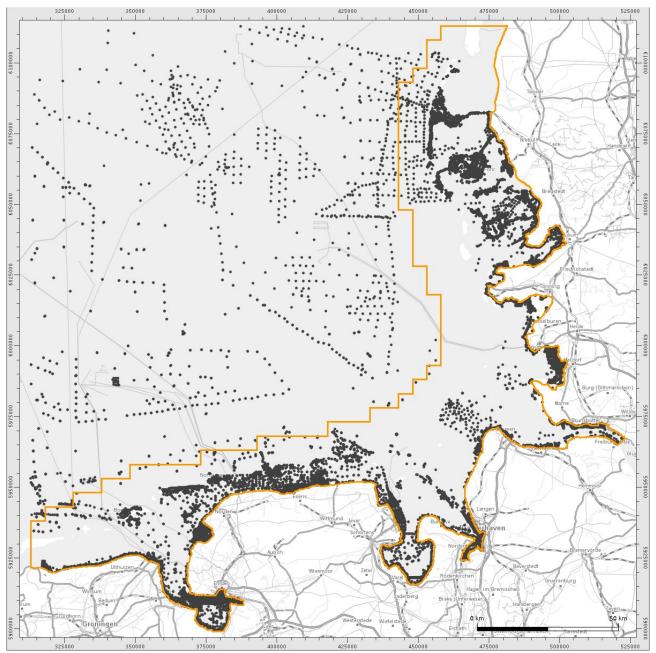


Abbildung 10: Abbildung der Lage der Bohrkerne und des Projektgebietes SMMS (orange) in der Deutschen Bucht [vor OpenStreetMap]

Eine besondere Herausforderung bei der weiteren Nutzung der zusammengetragenen Bohrkerne lag in den häufig unzureichenden bzw. fehlenden Metadaten, wie z. B. Aufnahmedatum, Lage (Position x, y), Bohransatzpunkt (Höhe z) oder verwendetem Georeferenzsystem. In den verschiedenen Datensätzen sind darüber hinaus doppelte Bohrungen enthalten, die nicht automatisch identifizierbar sind, da sich beispielsweise die Bezeichnungen (Bohrnamen), das Erhebungsdatum oder die Lage durch unterschiedliche Transformationen leicht unterscheiden.

Auch bei der Modellbildung für den Bodenaufbau wurde auf das Konzept der repräsentativen Kornsummendarstellung zurückgegriffen. Hierbei werden die linguistischen Beschreibungen in Summenkurven, wie durch Sievers [2022] beschrieben, überführt (siehe Kapitel 3.3.1).

3.3.1. Linguistische Beschreibung von Kornverteilungen und deren Transformation

Aktuelle Oberflächensedimentproben werden in der Regel durch Siebung und Laserdiffraktion so analysiert, dass ihre Korndurchmesserverteilungen in Histogrammen oder kumulativen Summenkurven beschrieben werden können. Im Gegensatz hierzu liegen historische Daten und vor allem Sedimentbeschreibungen von Bohrkernen in Form von sprachlichen Beschreibungen der Kornzusammensetzung vor (sowohl in digitaler als auch in analoger Form). Für die weitere Verarbeitung, die großräumige Interpretation und die anschließende Interpolation zur Umwandlung räumlich isolierter Informationen in kontinuierliche Modelle ist es erforderlich, diese linguistischen Beschreibungen in kumulative Korngrößenfunktionen umzuwandeln.

Eine solche linguistische Beschreibung wird, wie in Abbildung 11 dargestellt, jeder Schicht des Bohrkerns zugeordnet.

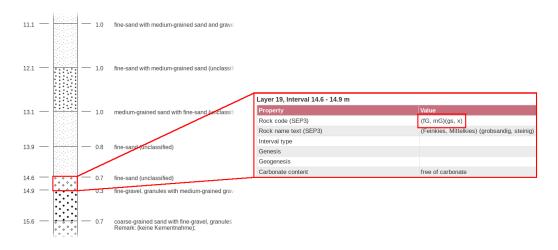


Abbildung 11: Geänderter Ausschnitt aus der Bohrpunktkarte Deutschland [https://boreholemap.bgr.de, letzter Aufruf 29.08.2022] zur Visualisierung eines typischen Sedimentkerns

Die drei gängigsten Formate linguistischer Beschreibungen für die Zusammensetzung von Sedimentproben sind Beschreibungen nach Figge [1981], Folk [1954 und 1974] und SEP 3 (siehe [Naumann et al. 2014]). Jeder Beschreibungsstil verwendet einen anderen Satz von Klassen mit definierten Korngrößengrenzen, die jeweils prozentuale Abstände aufweisen, die die sprachliche Charakterisierung der Ausgabe steuern. Die Generierung einer kumulativen Funktion aus Beschreibungen erfolgt in zwei Schritten. Zunächst müssen formatabhängig die Prozentwerte für jede in der Beschreibung vorhandene Klasse berechnet werden. Daraufhin müssen diese Prozentwerte, die nun formatunabhängig sind, mit den Korngrößenintervallen verbunden werden, um skalare Wertepaare zu bilden, die dann die Stützstellen der monoton kubischen Splinefunktion darstellen.

Im Rahmen des Projektes wurden für diese drei gängigsten Beschreibungen entsprechende Abbildungsvorschriften implementiert. Auch wurde die umgekehrte Transformation von einer Summenkurve hin zu den entsprechenden linguistischen Beschreibungen umgesetzt (siehe [Sievers 2022]), so dass beispielsweise petrographische Karten entsprechend dem linguistischen Schema erzeugt werden können.

3.4. Hydrodynamische Kenngrößen

Die hydrodynamischen Prozesse in der Deutschen Bucht generieren die gewässerbettgestaltenden Kräfte, wie z. B. die Bodenschubspannungen. Die Kenntnis dieser Einwirkungen erfordert somit eine Einbindung von prozessorientierten Informationen in die räumlich-zeitliche Interpolation der Gewässerbetteigenschaften. Die messtechnische Bestimmung von gewässerbodengestaltenden hydrodynamischen Kräften und Kennwerten ist sehr aufwändig und häufig nur unter Laborbedingungen realisierbar. Alternative Verfahren zur großräumigen Abschätzung von hydrodynamischen Kenngrößen bilden hydronumerische Simulationsmodelle.

Im mFUND-Verbundvorhaben EasyGSH-DB [PLÜß et al. 2020] wurden hydrodynamische Simulationen der Nordsee mit einem besonderen Fokus auf die Deutsche Bucht über einen Zeitraum von 20 Jahren (1996 bis 2015) durchgeführt, deren Ergebnisse analysiert und veröffentlicht. Für den Aufbau des zeitvarianten oberflächensedimentologischen Modells spielen vor allem die jährlich resultierenden Bodenschubspannungen (integriert über ein Jahr) bzw. die zugehörigen Quantile der betragsmäßigen Bodenschubspannungen eine zentrale Rolle. Diese EasyGSH-DB-Analyseergebnisse können als GeoTiff in einer 100 m-Auflösung unter https://mdi-de.baw.de/easygsh/index.html bezogen werden.

Der Betrachtungszeitraum der Simulationen in diesem Projekt wurde bis 2020 festgelegt. Um auch für die Jahre 2016 bis 2020 vertrauenswürdige hydrodynamische Basisdaten zur Verfügung zu haben, wurden durch die BAW entsprechende jährliche Simulationen durchgeführt und ausgewertet und im Rahmen der sedimentologischen Modellierung bis 2020 extrapoliert.

Für den Zeitraum von 1950 (dem Beginn der datenbasierten Hindcast-Simulation der Oberflächensedimentologie) bis 1995 konnten keine Bodenschubspannungen akquiriert werden. Um auch für diesen Zeitraum Abschätzungen der zur Bathymetrie passenden Bodenschubspannungen zu erhalten, wurden hydrodynamische Simulationsmodelle auf der Basis der Gittertopologie der EasyGSH-DB-Berechnungsnetze mit den bathymetrischen Gegebenheiten der Jahre 1950, 1960, 1970, 1980 und 1990 erstellt und mit den Randwerten eines mittleren Spring- / Nipp-Zyklus des Frühjahres 2012 (04.05. bis 18.05.2012) sowie dem Modellsystem Marina betrieben. Die jährlich resultierenden Bodenschubspannungen wurden aus diesen Simulationen geschätzt und im Rahmen der datenbasierten Hindcast-Simulation der Oberflächensedimentologie zusammen mit Daten aus EasyGSH-DB für den Zeitraum 1950 bis 1995 zeitlich interpoliert.

4. Bathymetrische Modellkomponente

Das zeitvariante bathymetrische Hindcast-Simulationsmodell basiert auf allen zur Verfügung stehenden bathymetrischen und topographischen Vermessungsdaten in Verbindung mit räumlichzeitlichen Interpolationen auf diesen [Milbradt et al. 2005; Milbradt et al. 2015].

Auf der Basis des zeitvarianten bathymetrischen Hindcast-Simulationsmodells wurden jährliche digitale bathymetrische Modelle der Deutschen Bucht zum 01.07. eines Jahres in einer 10 m-Rasterauflösung abgeleitet. Der Zeitraum erstreckte sich dabei von 1950 bis 2020. Aber erst die Modelle ab dem 01.07.1960 konnten als so vertrauensvoll angesehen werden, dass diese in Verbindung mit den beiden Datenquellenkarten veröffentlicht werden konnten (siehe Abbildung 12).

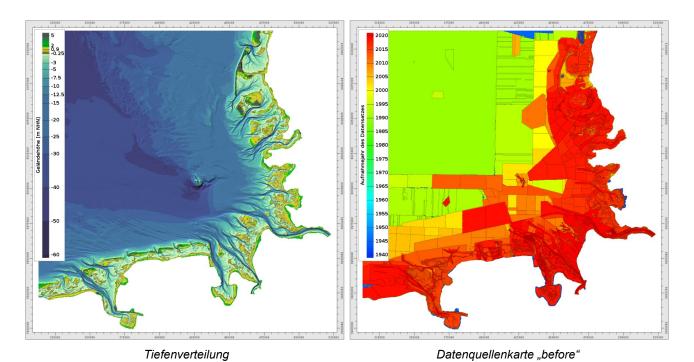


Abbildung 12: Tiefenverteilung der Deutschen Bucht zum 01.07.2020 und zugehörige Datenquellenkarte

Auf der Basis des zeitvarianten bathymetrischen Hindcast-Simulationsmodells lassen sich bereits erste einfache Analyseprodukte ableiten. Als Indikator für die Stabilität von Küstenbereichen kann beispielsweise ein kleiner morphologischer Raum und für die Dynamik der Änderungen der morphologische Drive [MILBRADT et al. 2009] herangezogen werden (siehe Abbildung 13).

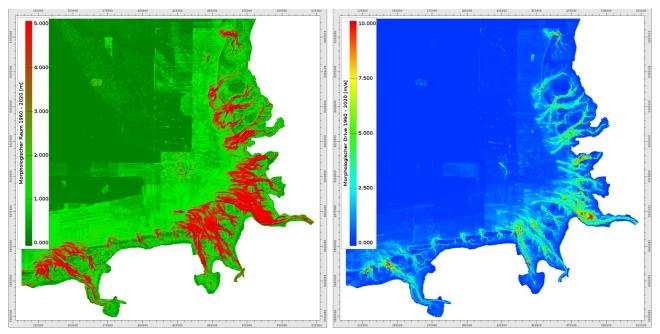


Abbildung 13: Morphologischer Raum (links) und morphologischer Drive (rechts) auf der Basis der bathymetrischen Vermessungsdaten von 1960 bis 2020

5. Oberflächensedimentologische Modellkomponente

Zur Beschreibung der Entwicklung der Oberflächensedimentologie im Küstennahbereich wurde ein datenbasiertes oberflächensedimentologisches Hindcast-Simulationsmodell aufgebaut. Die Simulation des zeitvarianten oberflächensedimentologischen Modells basiert auf

- dem zeitvarianten bathymetrischen Hindcast-Simulationsmodell (FBM) und wird durch gerasterte Bathymetrien von 1950 bis 2020 (jährlich jeweils zum 01.07.) repräsentiert
- den verfügbaren Oberflächensedimentproben
- wichtigen hydrodynamischen Kenngrößen, wie z. B. den resultierenden und maximalen Bodenschubspannungen

Die theoretischen Grundlagen der oberflächensedimentologischen Hindcast-Simulation sind ausführlich in Sievers et al. [2021] dargestellt. Im Rahmen dieses Berichtes wird nur der konzeptionelle Ansatz dargestellt. Die wesentliche Grundidee des entwickelten räumlich-zeitlichen-Interpolationsverfahrens (mit Datenassimilation) ist die parametrische Beschreibung der Kornsummenkurven, deren Hindcast-Simulation auf der Basis zugehöriger zeitlicher Entwicklungsgleichungen sowie die Kombination mit einer räumlich-zeitlichen Datenassimilation.

Die sich über die Zeit verändernden Kornsummenverteilungen werden mittels der zeitinvarianten Parameter d_{\max} , d_{\min} und der initialen Kornvariabilität σ_0 sowie der zeitvarianten Parameter d_{50} , Sortierung σ und Schiefe sk parametrisiert.

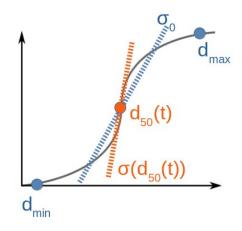


Abbildung 14: Schematische Darstellung der Parametrisierung einer Kornsummenkurve

Auf der Basis dieser zeitinvarianten und zeitvarianten Parameter lässt sich die zugehörige unimodale Kornsummenkurve als invers logistische Funktion in ϕ formulieren:

$$F(\phi) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{1.7 \cdot (\phi - \phi_{50})}{(\sigma - sk \cdot \tanh(\phi - \phi_{50}))}\right)}$$
(5)

Die Parametrisierung als unimodale Kornverteilungen stellt keine wesentliche Einschränkung dar, da 97 % der etwa 22.000 vorliegenden Oberflächensedimentproben im Küstennahbereich unimodal sind. Eine Quantifizierung der Güte der obigen Darstellung bzgl. der gemessenen Proben über einen generalisierten Brier-Skill-Score (BSS) [Severs 2022] zeigt eine sehr gute Reproduktion. Bereits die Verwendung lediglich des Mediankorndurchmessers mit einer Standard-

sortierung und -schiefe führt zu einem nahezu idealen BSS-Gütewert von 1. Das Hinzunehmen weiterer Skalare erhöht die Abbildungsgüte weiter:

• nur ϕ_{50} : BSS = 0,9835

• nur ϕ_{50} und σ : BSS = 0,9971

• ϕ_{50} , σ und sk: BSS = 0,9991

Die räumlich zeitliche Interpolation ergibt sich dann als Lösung der folgenden gewöhnlichen Differentialgleichung (GDGL):

$$\frac{\partial d_{50}(t)}{\partial t} = \sigma_{0} \cdot \left| \lambda(z_{b}(t)) \cdot (1 - n(t)) \cdot \frac{\partial z_{b}(t)}{\partial t} \cdot \frac{1}{1 + \|\nabla z_{b}(t)\|} \cdot d_{50}(t) \cdot \left| \left(1 - \frac{d_{\min}}{d_{50}(t)}\right) \cdot \left(\frac{1}{1 + \tau_{b}(t)}\right) \right| \right| : bei Sedimentation \frac{\partial z_{b}(t)}{\partial t} \leq 0 \\ \left(1 - \frac{d_{50}(t)}{d_{\max}}\right) \cdot min(1, \tau_{b}(t)) : bei Erosion \frac{\partial z_{b}(t)}{\partial t} \geq 0 \right| + Q(d_{50}(t), \tau_{b}(t))$$

$$(6)$$

unter Assimilation der Sedimentproben entsprechend ihrer örtlichen und zeitlichen Aussagebereiche (siehe Kapitel 3.2.1.3). Die GDGL (6) beschreibt die Entwicklung des $d_{50}(t)$ unter Berücksichtigung der Evolution des Bodens $\frac{\partial z_b(t)}{\partial t}$ skaliert mit der zeitvarianten Porosität n(t) und der zunehmenden Unschärfe $\lambda(z_b(t))$ der Vermessungsdaten bzgl. der Tiefe $z_b(t)$. Der Term $\frac{1}{1+||\nabla z_b(t)||}$ beschreibt die stärkere Durchmischung des Sedimentes bzw. die Über-

schätzung der Höhenänderung an steilen Gradienten. Die Fallunterscheidung am Ende der Formel beschreibt logistische Grenzbedingungen, die verhindern, dass der Mediankorndurchmesser größer bzw. kleiner als das größte bzw. kleinste in der Umgebung vorzufindende Korn wird. In der allgemeinen Tendenz führt eine Erosion des Gewässerbodens zu einer Vergröberung und eine Sedimentation zu einer Verfeinerung der Sedimentzusammensetzung nach GDGL (6). Bei einer relativ ausgeglichenen Sedimentbilanz kann nun aber auch in Gewässerabschnitten ein Auf-

wachsen des Bodens eintreten, obwohl erosionswirksame Bodenschubspannungen vorliegen. In diesem Fall darf es zu keiner Verfeinerung der Sedimentzusammensetzung kommen. Um auch dieses Phänomen modellieren zu können, wurde ein sogenannter Quell- und Senkterm in GDGL (6) hinzugenommen:

$$Q(d_{50}(t), \tau_b(t)) = \begin{cases} \tau_b(t) \cdot max(0, d_{50}^{\tau_b}(t) - d_{50}(t)) \cdot \left(1 - \frac{d_{50}(t)}{d_{max}}\right) & : \text{ bei Sedimentation } \frac{\partial z_B(t)}{\partial t} \leq 0 \\ 0. & : \text{ bei Erosion } \frac{\partial z_B(t)}{\partial t} > 0 \end{cases}$$

$$(7)$$

wobei $d_{50}^{ au_b}(t)$ ein zur mittleren Bodenschubspannung $au_b(t)$ passender erosionsstabiler Mediankorndurchmesser ist.

Zur Lösung dieser gewöhnlichen Differenzialgleichung sind Anfangswerte zum Startzeitpunkt, 01.07.1950, notwendig. Für jede Sedimentprobe, wann auch immer diese vom Meeresboden aufgenommen wurde, wird die GDGL (6) in der Regel rückwärts bis zum 01.07.1950 gelöst, so dass für diesen Zeitpunkt die in Abbildung 15 dargestellte Verteilung des d_{50} entsteht.

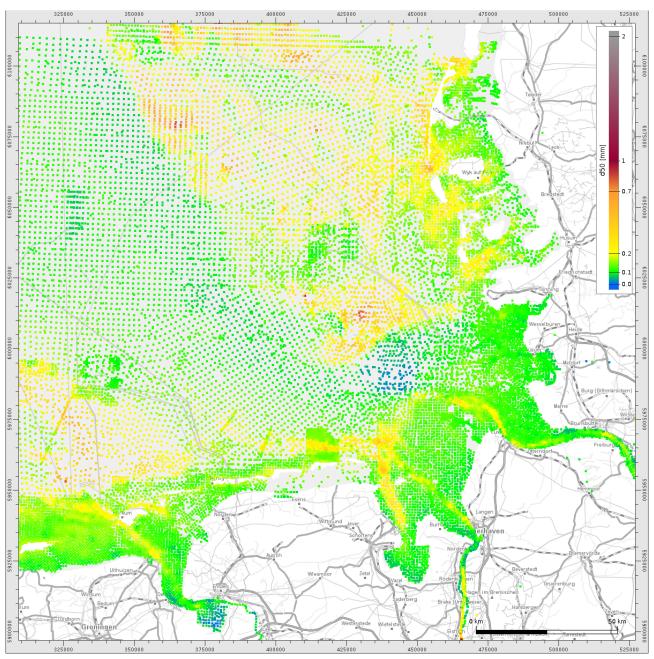


Abbildung 15: Prognostizierter d₅o der virtuellen Sedimentproben zum 01.07.1950 [vor OpenStreetMap]

Auf der Basis dieser d_{50} -Verteilung wird dann eine anisotrope räumliche Interpolation unter Einbeziehung hydrodynamischer Kenngrößen des Jahres 1950 berechnet, welche als flächenhafte Verteilung Anfangswerte für die Lösung der GDGL (6) liefert.

Bei der Lösung von (6) für jeden Rasterpunkt erfolgt die Assimilation der Summenkurven und Porositäten der Sedimentproben unter Berücksichtigung der räumlichen und zeitlichen Aussagebereiche aus Abschnitt 3.2.1.3. sowie zugehörigen Gauß-Funktionen.

5.1. Jährliche oberflächensedimentologische Modelle

Die so entstandenen jährlichen 10 m-Rastermodelle der Oberflächensedimentologie sind Interpolationen der Sedimentproben, da deren Eigenschaften exakt wiedergegeben werden, wenn

Rasterpunkt und Probe in Ort und Zeit identisch liegen. Die jährlichen oberflächensedimentologischen Rastermodelle decken den Zeitraum von 1960 bis 2020 ab. In Abbildung 16 ist die örtliche Ausdehnung der oberflächensedimentologischen Modelle für das Jahr 2019 dargestellt. An jedem Rasterknoten steht eine komplette Kornsummenkurve mit den zugehörigen Parametern zur Verfügung.

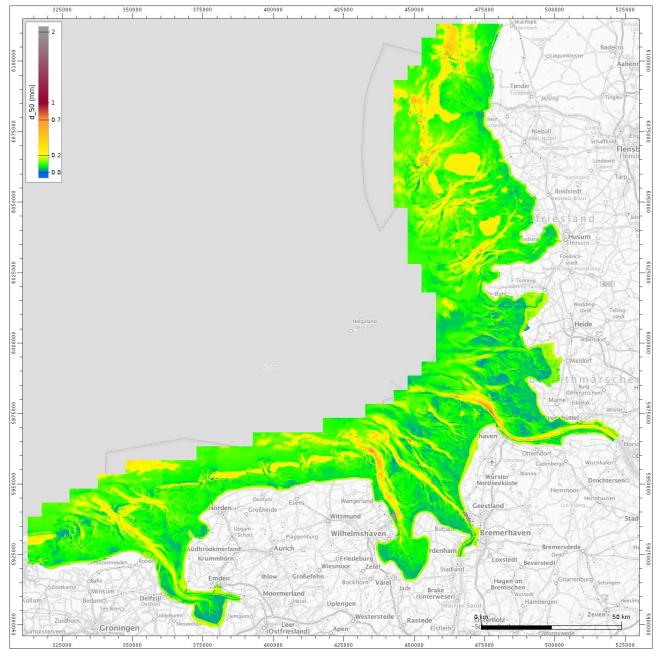


Abbildung 16: Darstellung des d₅o des konsistenten oberflächensedimentologischen Modells zum 01.07.2019 [vor BKG-Kartendienst]

Befindet sich kein Datenpunkt räumlich und zeitlich in der Nähe, ergibt sich die Kornsummenkurve nur aus den zeitinvarianten und zeitvarianten Parametern auf der Basis der invers logistischen Funktion nach (5). Da an jedem Rasterknoten eine komplette Kornsummenkurve bereitgestellt wird, lassen sich eine Vielzahl von konsistenten abgeleiteten Produkten und Auswertungen erzeugen (siehe Kapitel 5.2., 9. und 10.).

5.2. Abgeleitete oberflächensedimentologische Produkte

Anwendungszweckspezifisch werden oberflächensedimentologische Informationen in Kartenform verwendet. Hierbei können Klassenanteile dargestellt werden, wobei der Anteil einer vorgegebenen Kornfraktion aus den Funktionswerten der ortsvariablen Summenlinien des oberflächensedimentologischen Modells zum Zielzeitpunkt extrahiert wird. Außerdem werden flächige Verteilungen linguistischer Beschreibungen nach verschiedenen Klassifikationen in petrographischen Karten abgebildet. Ebenso wie bei einer Karte von Sedimentanteilen wird hierbei aus dem ortsvariablen Sedimentmodell zum Zielzeitpunkt die Summenlinie interpoliert und klassifiziert [Sievers 2022]. Die Klassifikation folgt hierbei Ansätzen von Figge [1981] oder Folk [1954 und 1974], die auf Verhältnisse von Sand zu Feinmaterial fokussieren, und dem SEP 3-Format mit Klassengrenzen nach DIN EN ISO 14688 [Deutsches Institut für Normung 2018], das eine gleichmäßige Darstellung aller Kornfraktionen ermöglicht. Benachbarte Rasterknoten gleicher Klassifikation werden dabei für die Erzeugung einer Gesamtkarte in eine polygonale Fläche zusammengefasst.

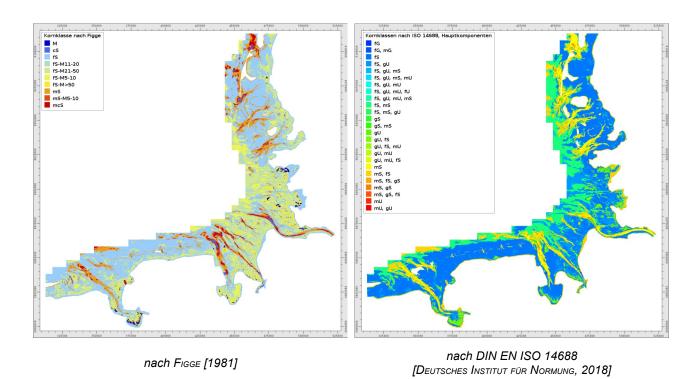


Abbildung 17: Petrographische Karten der Sedimentzusammensetzung zum 01.07.2020

6. Stratigraphische Modellkomponente

Das Bodenmodell der morphologisch aktiven Küstennahbereiche der Deutschen Bucht ist als Zweikomponentenmodell entworfen worden. Die obere Modellkomponente entsteht hierbei aus historischen Bathymetrien und oberflächensedimentologischen Daten. Sie wird im Weiteren als mikrosequenzstratigraphische² Modellkomponente bezeichnet. Die untere Modellkomponente basiert auf den zusammengetragenen Bohrkernen und wird als basisstratigraphische Modellkomponente bezeichnet.

6.1. Mikrosequenzstratigraphische Modellkomponente

Die aufzubauende mikrosequenzstratigraphische Modellkomponente basiert auf dem zeitvarianten oberflächensedimentologischen Modell [Sievers et al. 2021]. Für die Realisierung der mikrosequenzstratigraphischen Modellkomponente wurden jährliche oberflächensedimentologische Modelle in einer Rasterauflösung von 10 m für die Jahre bis 2020 abgeleitet. Werden zwei aufeinanderfolgende oberflächensedimentologische Modelle miteinander verglichen, so lassen sich Bereiche mit Sedimentation und Erosion identifizieren. Bei der Sedimentation wird auf die vorhandene Gewässerbodenoberfläche neues Sediment abgelagert. Es entsteht eine neue zeitliche Schicht, ein virtueller Bodenaufbau. Kommt es zu Erosionen, so schneidet sich die neue Gewässerbettoberfläche in die darunterliegenden zeitlichen Schichten ein (siehe Abbildung 18) und deren modellierte sedimentologische Zusammensetzung wird mit den darunterliegenden Schichten anteilig in Abhängigkeit der Mächtigkeitsverhältnisse gemischt. Soll der mikrosequenzstratigraphische Aufbau des Gewässerbodens zu einem Zeitpunkt ermittelt werden, so wird ausgehend vom ältesten oberflächensedimentologischen Modell schrittweise bis zum Auswertezeitpunkt der Boden aufgebaut. Im Ergebnis liegen verschnittene 10 m-Raster für jedes Jahr vor.

² Unter Stratigraphie wird in diesem Zusammenhang nicht die geologische Methode verstanden, sondern der Bodenaufbau im Kontext prozessbasierter morphodynamischer Simulationsmodelle.

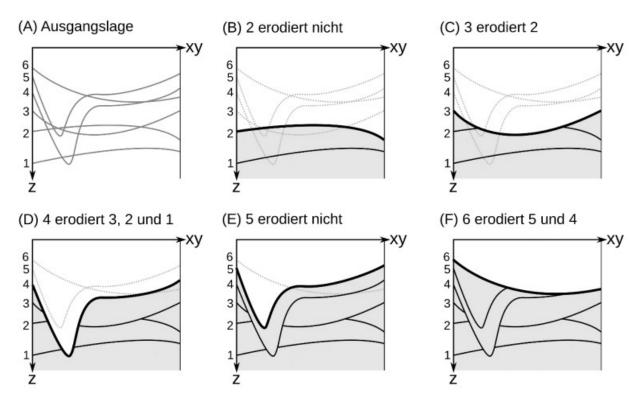


Abbildung 18: Schematische Darstellung der Erzeugung des strukturellen Aufbaus des Gewässergrundes in einer 2D-Prinzipskizze

Dieses Vorgehen kann jedoch nur einen Aufbau in einer räumlichen (zeitlichen) Ausdehnung zwischen dem höchsten und tiefsten gemessenen Höhenwert des Gewässerbodens am jeweiligen Ort liefern

6.2. Basisstratigraphische Modellkomponente

In manchen küstennahen Bereichen der Deutschen Bucht kann der morphologisch aktive bzw. aktivierbare Raum des oberflächennahen Gewässerbodens mächtiger sein als der durch die zusammengetragenen bathymetrischen Vermessungsdaten über eine bestimmte Zeitspanne abgedeckte Tiefenhorizont. Um auch diesen Bodenraum u. U. bis zur holozänen Basis mit Daten zu füllen, wird eine weitere basisstratigraphische Modellkomponente auf der Grundlage der zusammengetragenen Sedimentbohrkerne erstellt. Durch die oft nur sehr groben sedimentologischen Ansprachen der Schichten innerhalb der Bohrsäulen und zumeist fehlenden Korngrößenanalysen sowie mangelhafte zeitliche Einordnung im Vergleich zu den Oberflächensedimentproben werden die Bohrkerne nur sekundär und zeitinvariant verwendet.

Die basisstratigraphische Modellkomponente basiert auf einer räumlichen Interpolation der Bohrkerne entlang von geschwungenen Zwangsflächen. Diese Flächen entstehen durch Unterteilung des Raumes zwischen dem digitalen "oberflächensedimentologischen" Modell der holozänen Basis und einem geglätteten Mittelwert aller in der oberflächensedimentologischen Komponente verwendeten bathymetrischen Modelle in regelmäßigen relativen Abständen. Anhand dieser Zwangsflächen werden die Bohrkerne räumlich interpoliert. Sollte zwischen benachbarten Bohrkernen die Möglichkeit bestehen, explizite definierte Zwangsflächen aus beispielsweise flachseismischen Profilen bzw. Seismogrammen zu erhalten, so können diese ergänzt werden. Sollte eine Zwangsfläche eine wie in Kapitel 3.3. beschriebene Lücke im Bohrkern treffen, wird durch diese bis zum nächsten Bohrkern "hindurchinterpoliert".

6.3. Stratigraphisches Gesamtmodell

Das stratigraphische Gesamtmodell entsteht durch das Verschneiden der unteren mit der oberen Modellkomponente. Hierzu werden die auf Zwangsflächen interpolierten Bohrkerne wie auch die zeitvarianten oberflächensedimentologischen Modelle mit immer älter werdendem Datum betrachtet. Diese Überprägung führt zu einem Gesamtmodell mit dem Gültigkeitsdatum des Zielzeitpunktes wie in Abbildung 19 dargestellt.

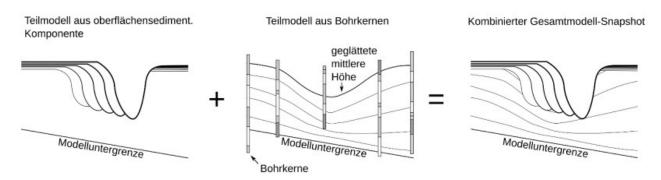


Abbildung 19: Kombination der oberflächensedimentologischen mit der zwangsflächengesteuerten Modellierung

Einen wesentlichen Einfluss auf die Erodierbarkeit der Sedimente am Gewässerboden hat deren Konsolidierung, d. h. das Erreichen einer möglichst kompakten hohlraumminimalen Konfiguration. Diese kann durch

$$con = \frac{\left(n_T \cdot \eta(\sigma, d_{50})\right)}{n} \tag{8}$$

beschrieben werden, wobei n die aktuelle Porosität und $n_{\scriptscriptstyle T}$ =0,26 der minimale Porenanteil bei einer sogenannten Trapezlagerung von ideal kugelförmigen Sedimenten gleicher Größe ist. Dieser minimale Porenanteil kann weiter abnehmen, wenn kleinere Kugeln sich zwischen den größeren platzieren. Dies bedeutet, je größer das Kornspektrum σ ist, desto kleiner kann der minimale Porenraum werden und wird durch den Multiplikand $\eta(\sigma,d_{\scriptscriptstyle 50})$ aus Gleichung (4) modelliert (siehe Kapitel 3.2.3.).

Das Verhältnis des Hohlraumvolumens zum Gesamtvolumen des Sedimentgemisches wird als Porosität bzw. Porenanteil n bezeichnet. Durch das Überlagern weiterer Sedimente kommt es zu einer Erhöhung des Drucks auf das Sediment und zu einem Zusammendrücken. Dieses Zusammendrücken lässt sich durch folgende Differentialgleichung beschreiben, die bei der Erzeugung eines zeitinvarianten Gesamtmodells gelöst wird:

$$\frac{\partial n(z_i)}{\partial t} = -\kappa (d_{50}(z_i), n(z_i)) \cdot w_c(d_{50}(z_i)) \cdot \int_{z_i}^{z_B} (1 - n(z)) \cdot \rho_s dz \cdot |1 - con(z_i)|$$
(9)

mit der spezifischen Permeabilität κ .

7. Technische Realisierung der stratigraphischen Modellkomponente

7.1. Datenbankbasierte Realisierung

Die Vielzahl der Daten und Produkte, welche die Basis des stratigraphischen Modells bilden, hat dazu geführt, verschiedene Datenbanken aufzubauen und in einem zugehörigen Workflow, wie in Abbildung 20 dargestellt, zu verknüpfen. Am Ende der Bearbeitung enthält die stratigraphische Produktdatenbank sowohl die Basismodelle des mikrosequenzstratigraphischen als auch die des basisstratigraphischen Teilmodells. Die Ableitung eines stratigraphischen Gesamtmodells und die erhaltungstreue Übertragung auf numerische Berechnungsnetze erfolgt auf der stratigraphischen Produktdatenbank unter Vorgabe eines Datums.

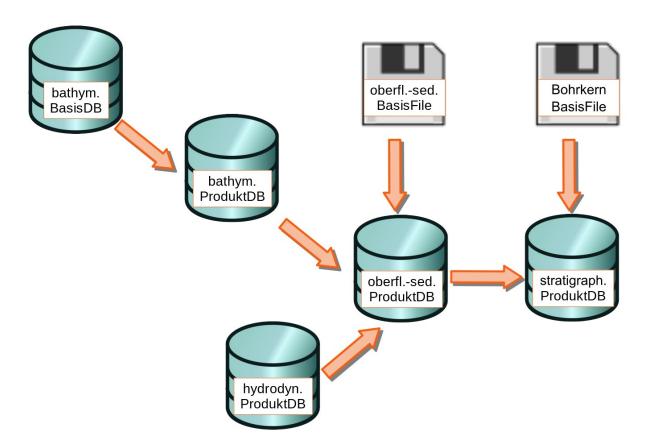


Abbildung 20: Datenbankkonzept zur informationstechnischen Realisierung des stratigraphischen Modells

7.2. Erhaltungstreue Übertragung und Export für numerische Simulationsmodelle

Für das datenbankbasierte stratigraphische Modell der morphologisch aktiven Küstennahbereiche wurden Exportfunktionalitäten in anwenderdefinierten *levels of detail* zur Verwendung als Basis-, Kalibrierungs- und Validierungsdaten für morphodynamisch-numerische Simulationsmodelle entworfen, mit den Modellentwicklern und -betreibern diskutiert und prototypisch für diese Modell-

systeme angewendet (siehe hierzu auch den Anhang "Systemstudien zur Wirkung von stratigraphischen Modellkomponenten in hydro- und morphodynamischen Simulationsmodellen").

Basis für die Ableitung von modellspezifischen stratigraphischen Daten sind Gebietszerlegungen bzw. Diskretisierungen für die unterschiedlichen numerischen Approximationsverfahren. Die wichtigsten Verfahrensklassen basieren auf Finiten Differenzen, Finiten Elementen und Finiten Volumen. Bei den Finiten Elementen und Differenzen werden die Simulationsgrößen, insbesondere auch die des Bodenaufbaus, an den Knoten abgelegt und repräsentieren eine diesen Knoten umgebende Fläche – die sogenannte Voronoi-Region. Bei der Finite-Volumen-Methode werden wesentliche Größen, so auch die sedimentologischen, dem Finiten Volumen direkt zugeordnet. In allen drei Fällen muss zur erhaltungstreuen Übertragung eine Integration der physikalischen Eigenschaften über ein Element oder eine (Voronoi-)Fläche bzw. dem zugehörigen dreidimensionalem Volumen durchgeführt werden. In der Abbildung 21 ist exemplarisch das Vorgehen für eine punktbasierte Zuordnung stratigraphischer Daten dargestellt.

Zunächst werden an den Knoten die Voronoi-Regionen bestimmt und mittels unendlicher Strahlen nach unten (siehe Abbildung 21A) und vorgegebenen Diskretisierungen in die Tiefe als dreidimensionale Voronoi-Regionen (siehe Abbildung 21B) gebildet. Über diese dreidimensionalen Voronoi-Regionen werden dann die Summenlinien und Porositäten integriert und dem Volumen zugeordnet. Zur Verringerung der Datenmenge ist es gegebenenfalls sinnvoll, die so erzeugten Volumenkörper in ihrer Tiefenabfolge nach weiteren Kriterien zusammenzufassen (siehe Abbildung 21C). Dies kann beispielsweise entweder auf Basis eines Ähnlichkeitsschwellwerts mittels der Distanz zwischen den Summenlinien [Sievers 2022] oder der Identität abgeleiteter textueller Beschreibungen verschiedenster *levels of detail* der vorliegenden Summenlinien geschehen.

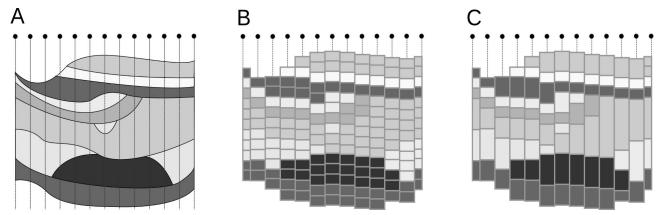


Abbildung 21: Vorgehen zur Ableitung von Basis- und Validierungsdaten für morphodynamisch-numerische Simulationsmodelle, (A) Modellergebnis, (B) Integrale Ableitung von Modellinformationen und Zuordnung in Voronoi-Regionen, (C) Zusammenfassung der Voronoi-Regionen nach vorgegebenem Kriterium zur Datenmengenreduktion

Im Ergebnis dieses Exportes sind jedem Knoten bzw. Element über die Tiefe diskretisiert Summenkurven und Porositäten sowie die Konsolidierung zugeordnet. In einem weiteren Schritt können diese Daten entsprechend der Modellfamilie in Korngrößenklassen und / oder andere Korngrößenparameter sowie in zugehörige Dateiformate exportiert werden, so dass diese anschließend in die Prozesskette der numerischen Simulation einfließen können.

8. Stratigraphische Modellkomponente in hydromorphodynamischen Simulationsmodellen

Seit einigen Jahrzehnten wird an stratigraphischen Modellansätzen in hydro- und morphodynamischen Simulationsmodellen intensiv geforscht. Ausgehend vom Einschichtenmodell nach HIRANO [1971] wurden schrittweise Mehrschichtenmodelle zur Beschreibung der Interaktion von Oberflächensedimenten mit den darunterliegenden Sedimentzusammensetzungen entwickelt.

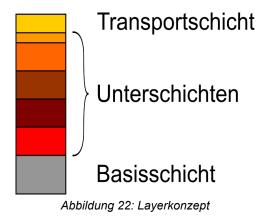
Zu den derzeit wichtigsten Modellsystemen, welche den Bodenaufbau im Rahmen der morphodynamischen Simulationen berücksichtigen, gehören Delft3D [Storms et al. 2007], Telemac / Sisyphe [Merkel und Kopmann 2011] und Untrim² / Sedimorph [Malcherek et al. 2005]. Im Rahmen dieses Forschungsprojektes wurden Delft3D und Untrim² / Sedimorph genauer betrachtet. Die genannten Modellsysteme beschreiben hierbei den Bodenaufbau als Finite Volumen, wobei die Grenzen sich variabel verändern können. Die Sedimentzusammensetzung in jeder Zelle wird wiederum auf der Basis von Korngrößenklassen beschrieben. Auf eine vertiefte Darstellung der Umsetzung in den Simulationsmodellen haben wir hier verzichtet und verweisen auf die einschlägige Literatur (siehe vorige Zitate).

Für das holistische Modellsystem Marina [Milbradt 2022] wurde zusätzlich eine stratigraphische Modellkomponente implementiert und getestet. Die Implementierung orientierte sich hierbei am datenbasierten Hindcast-mikrosequenzstratigraphischen-Ansatz und beschreibt den Bodenaufbau in Form einer Finiten-Element-Approximation und die Sedimentzusammensetzung an den zugehörigen Stützstellen als parametrisierte Kornsummenkurven.

8.1. Stratigraphische Modellkomponente in Delft3D

Delft3D-4 (klassische curvilineare Variante) ist eine Open-Source-Software (https://oss.deltares.nl/web/delft3d, letzter Aufruf 25.08.2022) und ermöglicht die hydrodynamische (Modul D-Flow), hydrologische (Modul D-Hydrology), morphodynamische (Modul D-Morphology), Wellen- (Modul D-Waves) und Wasserqualitätsmodellierung (Modul D-Water Quality einschließlich DELWAQ-Kernel) mit Echtzeitsteuerung (Modul D-Real Time Control) für Küsten-, Ästuar-, Fluss-, ländliche und städtische Anwendungen. Das morphodynamische Modul kann die siliziklastische Zusammensetzung des Meeresbodens und eine hydrodynamisch induzierte variable vertikale Sedimentzusammensetzung simulieren.

Der initiale Bodenaufbau kann dem Modellsystem Delft3D-4 mittels ASCII-Steuerdateien <*.inb>zur Verfügung gestellt werden und ist im Wesentlichen in 3 Schichtklassen unterteilt (siehe Abbildung 22). Den Schichten, als Finite Volumen, werden zugehörige Sedimentverteilungen <*.sed> in Form von Klassenbeschreibungen und Volumenanteilen zugeordnet.



Im Falle der Ablagerung importiert die Transportschicht Sediment in die Gitterzelle und exportiert Sediment im Falle der Erosion. Die Dicke der Schicht ist benutzerdefiniert und wird in den folgenden Anwendungsfällen zu Beginn "konstant" gehalten. Die Unterschichten können als Puffer für die Transportschicht angesehen werden. Im Falle von Erosion führen sie der Transportschicht Sediment zu und im Falle von Ablagerung speichern sie Sediment in der Transportschicht. Die Anzahl und Dicke der Unterschichten kann sich im Laufe der Simulation verändern. Die Basisschicht stellt die untere Begrenzung des mikrostratigraphischen Simulationsraumes dar.

Das Modellsystem Delft3D-4 und die zugehörige morphodynamische Komponente sind seit vielen Jahren zur Beantwortung von Fragestellungen des Küsteningenieurwesens im Einsatz. Auf eine weiterführende Darstellung von Prinzipstudien und Anwendungsfällen wird an dieser Stelle verzichtet und auf die Fachliteratur verwiesen [Lesser et al. 2004; Blom 2008; VIPARELLI et al. 2010; VAN DER WEGEN et al. 2011; JAGERS 2012; VILLARET et al. 2013; VIPARELLI et al. 2014].

8.2. Stratigraphische Modellkomponente in SediMorph

In Erweiterung des aktiven Layerkonzeptes wird auch in SediMorph der Bodenaufbau in Form von Finite Volumen und zugehörigen Sedimentzusammensetzungen genutzt. Hierbei ist SediMorph so konzipiert, dass es mit verschiedenen hydrodynamischen Simulationsmodellen und u. U. mit anderer Gittertopologie, wie in Abbildung 23 dargestellt, gekoppelt werden kann.

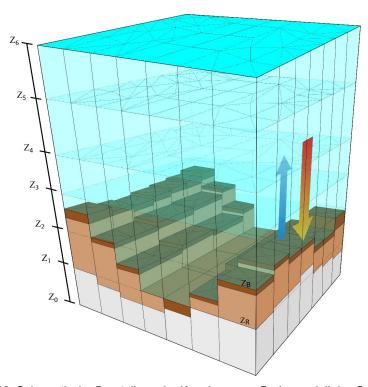


Abbildung 23: Schematische Darstellung der Kopplung zum Bodenmodell des SediMorph-Moduls nach Fricke und Malcherek [2014]

Der initiale Bodenaufbau wird SediMorph über eine netCDF-Datei zur Verfügung gestellt.

Die Beschreibung der Sedimentverteilung erfolgt auf der Basis von Korngrößenklassen. Das sind Gruppen, in denen die Sedimentfraktionen nach ihrer Korngröße sortiert sind. Sie bestehen aus oberen und unteren Grenzen für die Korngröße, so dass jede Sedimentfraktion einer Bodenklasse

zugeordnet werden kann. Typische Bodenklassen sind Sand, Schluff und Ton. Für jede Bodenklasse werden alle Einzelmassen der zugehörigen Fraktionen summiert.

Das Modellsystem SediMorph ist seit vielen Jahren bei der BAW im Einsatz. Auf eine weiterführende Darstellung von Prinzipstudien und Anwendungsfällen wird an dieser Stelle verzichtet und auf die Fachliteratur verwiesen [Malcherek et al. 2005].

8.3. Stratigraphische Modellkomponente in Marina

Das holistische Modellsystem Marina [Milbradt 2022] wurde so entworfen, dass verschiedene physikalische Prozesse aus dem Bereich des Umweltingenieurwesens gekoppelt simuliert werden können. Im Bereich der Oberflächengewässer, insbesondere bei Anwendungen im Küsteningenieurwesen, werden in der Regel hydro- und morphodynamische Modellkomponenten direkt gekoppelt betrieben. Die morphodynamische Modellkomponente beschreibt derzeit die Entwicklung der Eigenschaften der Gewässersohle, wie bspw. deren Lage und die Sedimentzusammensetzung, wobei bisher von einem homogenen Bodenaufbau ausgegangen wurde. Im Rahmen dieses Forschungsprojektes wurde die morphodynamische Modellkomponente um einen stratigraphischen Anteil erweitert.

8.3.1. Entwicklung der Gewässersohle

Zur Beschreibung der Entwicklung der Gewässersohle wird die Exner-Gleichung [Exner 1925] herangezogen:

$$\frac{\partial z_B(t)}{\partial t} = -\frac{1}{1 - n(t)} \left(\frac{\partial q_x(t)}{\partial x} + \frac{\partial q_y(t)}{\partial y} \right) \tag{10}$$

wobei q_x und q_y die totalen Sedimenttransportraten in x- und y-Richtung, n der Porenanteil des Sedimentes und z_B die Sohllage ist. Neben der Veränderung der Lage der Gewässersohle kommt es in der Regel auch zu einer Veränderung der Oberflächenstruktur des Gewässerbodens, wie der Sedimentzusammensetzung im Rahmen des in der Umgebung verfügbaren Materials, sowie der Entwicklung von Dünen und Rippeln. Die Entwicklung von Dünen wird durch einen Satz eigenständige Differentialgleichungen und die Ausbildung von Rippeln wird parametrisiert beschrieben. Bei der Sedimentzusammensetzung ist in Erosionsgebieten häufig eine Vergröberung der Kornzusammensetzung bis hin zur sogenannten Abpflasterung zu beobachten. Im Gegensatz hierzu zeichnen sich Sedimentationsbereiche in der Regel durch eher feines Material aus.

In Marina wird die Kornzusammensetzung über die statistischen Kornparameter $d_{min} \le d_{50} \le d_{max}$, die Sortierung (σ) und Schiefe (sk(t)) parametrisch beschrieben. Die Veränderung und der Transport der parametrisierten Kornzusammensetzung wird mittels einer zusätzlichen Transportgleichung für d_{50} Rechnung getragen:

$$\frac{\partial d_{50(t)}}{\partial t} = q_x(t) \cdot \frac{\partial d_{50(t)}}{\partial x} + q_y(t) \cdot \frac{\partial d_{50(t)}}{\partial y} + S_{d_{50}}(t)$$
(11)

wobei q der totale Sedimenttransport ist und die erosions- bzw. sedimentationsbedingten Änderungen im Mediankorndurchmesser durch folgenden Quell- und Senkterm beschrieben werden:

$$S_{d_{50}}(t) = (1 - n(t)) \cdot \frac{\partial z_{B}(t)}{\partial t} \cdot \frac{\sigma_{0}}{1 + \|\nabla z_{B}(t)\|} \cdot d_{50}(t) \cdot \begin{cases} \min(1, \tau_{b}(t)) \cdot \left(1 - \frac{d_{50}(t)}{d_{max}}\right) & \text{für Erosion } \frac{\partial z_{B}}{\partial t} > 0 \\ \frac{1}{1 + \tau_{b}(t)} \cdot \left(1 - \frac{d_{min}}{d_{50}(t)}\right) & \text{für Sedimentation } \frac{\partial z_{B}}{\partial t} \leq 0 \end{cases}$$

$$(12)$$

mit der mittleren Sortierung (σ_0) und den Grenzen der verfügbaren Korndurchmesser (d_{max} und d_{min}) des Umgebungssedimentes. Die zeitvariante Sortierung kann dann wie folgt berechnet werden:

$$\sigma(t) = \sigma_0 \cdot \left(1 - \frac{d_{50}(t)}{d_{max}} \right) \cdot \left(1 - \frac{d_{min}}{d_{50}(t)} \right) \tag{13}$$

und die zeitvariante Schiefe auf folgende Weise:

$$sk(t) = \frac{(d_{max} + d_{min}) - 2 \cdot d_{50}(t)}{2 \cdot (d_{max} - d_{min})}$$
(14)

Die zeitliche Entwicklung der Porosität des Oberfächensedimentes wird auf der Basis des logistischen Fittings nach Wilson et al. [2018] und der multiplikativen Anpassung bzgl. der Sortierung nach Gleichung (3) und (4) bestimmt.

$$n(t, d_{50}(t), \sigma(t)) = \begin{pmatrix} 0.366 + \frac{0.366}{-\log_{10}(d_{2}(t)) + 1.227} \\ 10 & 1 + e^{\frac{1}{-0.270}} \end{pmatrix} \cdot \eta(\sigma(t), d_{50}(t))$$
(15)

8.3.2. Stratigraphische Erweiterung

Die morphodynamische Modellkomponente wurde um eine stratigraphische Modellkomponente erweitert. Hierbei kann der Bodenaufbau aus dem datenbankbasierten Modell als Anfangsbedingung vorgegeben sowie als gleichformatiertes Ergebnis zu Validierungszwecken als stratigraphisches Simulationsergebnis mitprotokolliert werden.

Hierzu wird an jedem Berechnungsknoten ein Stack mit Schichtstützstellen mitgeführt. Zu jeder Schichttiefe werden die zugehörigen Sedimentparameter (d_{max} , $d_{50}(t)$, d_{min} , initiale Sortierung σ_0 und aktuelle Porosität n(t)) sowie die zugehörige Zeit hinterlegt. Erfolgt ein Wechsel von Erosion zu Sedimentation, wird eine neue Schichtstützstelle auf den Stack gelegt, deren zeitvariante Parameter und die zugehörige Zeit sich während der Sedimentation kontinuierlich verändern. Analog verändert sich die "Schicht" bei Erosion kontinuierlich, solange keine schon vorhandene Schicht durchbrochen wird. In diesem Fall werden die Sedimentparameter der durchbrochenen Schichtstützstelle in die Oberfläche eingemischt.

Wird das Sediment durch weitere Schichten bedeckt, so kommt es über die Zeit zu einer Konsolidierung des im Boden befindlichen Sedimentes, wobei die Porosität abnimmt.

Die Konsolidierung *con* der gefundenen bzw. modellierten Sedimentzusammensetzung kann dann als Quotient aus minimal möglicher und beobachteter Porosität berechnet werden.

$$con(n,\sigma,d_{50}) = \frac{n_T \cdot \eta(\sigma,d_{50})}{n}$$
(16)

Die minimal mögliche Porosität n_T wird hier auf 0,26 gesetzt und entspricht dem minimalen Hohlraum der dichtesten dreidimensionalen Kugelpackung gleichgroßer Sphäroide. Diese theoretisch minimale Porosität verringert sich mit der Breite des Kornspektrums entsprechend Gleichung (15).

Die Geschwindigkeit der Abnahme hängt hierbei von der Auflast des darüberliegenden Materials, der Dauer der wirksamen Auflast und der Eigenschaften des zusammenzudrückenden Sedimentes ab. Die Veränderung der Porosität in einer Tiefe z_i kann durch die folgende Differentialgleichung beschrieben werden:

$$\frac{\partial n(\mathbf{z}_i)}{\partial t} = -\kappa \left(d_{50}(\mathbf{z}_i), n(\mathbf{z}_i) \right) \cdot w_c(d_{50}(\mathbf{z}_i)) \cdot \int_{\mathbf{z}_i}^{\mathbf{z}_B} \left(1 - n(\mathbf{z}) \right) \cdot \rho_s d\mathbf{z} \cdot \left(1 - con(\mathbf{z}_i, t, \sigma, d_{50}) \right)$$

$$(17)$$

Hierbei ist κ die spezifische Durchlässigkeit des zusammenzudrückenden Sedimentes.

Die spezifische Durchlässigkeit ergibt sich aus der Permeabilität k_f , der dynamischen Viskosität des Wassers v und der Erdbeschleunigung g:

$$\kappa = k_f \cdot \frac{v}{g} \tag{18}$$

Die Permeabilität k_f kann nach Bear [1972] berechnet werden:

$$k_f = \frac{n^3}{180 \cdot (1 - n)^2} \cdot d_{50}^2 \tag{19}$$

Im Ergebnis der Simulation kann an jedem Berechnungsknoten der repräsentative Bodenaufbau, linear interpoliert zwischen den Schichtstützstellen, beobachtet werden (siehe Abbildung 24).

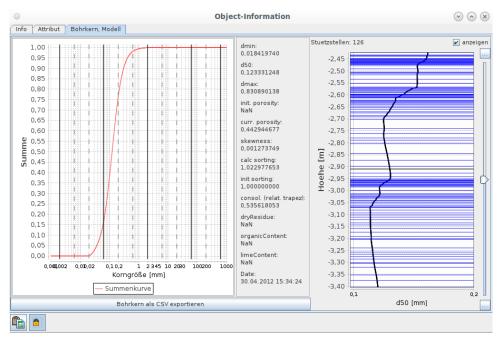


Abbildung 24: Approximation des Bodenaufbaus (Prinzipskizze und visualisiertes Simulationsergebnis)

An jeder Stützstelle des virtuellen Bohrkerns kann in der Visualisierung eine Kornsummenkurve rekonstruiert und die zugehörigen Parameter abgelesen werden. Die angegebenen Parameter und zugehörigen Summenkurven sind hierbei Repräsentanten für die Voronoi-Region des Berechnungsknotens.

Der so generierte stratigraphische Bodenaufbau kann wiederum als Anfangswertbelegung genutzt werden, beispielsweise wenn darauf aufsetzend weiter gerechnet werden soll.

Das Ergebnisformat ist zunächst sehr einfach gehalten. Es wird je gewähltem Zeitschritt eine csv-Datei geschrieben (siehe Abbildung 25).

```
nodenumber; x; y; z[m] in depth; dmax[mm]; d50 [mm]; dmin [mm]; meanInitialSorting; porosity; consolidation; time [s]
                     125881.4609375 ;
303
                                                                                       5705872.0 ; 8.963920365331843 ; 10.0 ; 0.06322332840502715 ;
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               0.02 ; 1.0 ; 0.5453492381752826 ;
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              0.02; 1.0; 0.5475190274882191
0.02; 1.0; 0.5492992187658364
0.02; 1.0; 0.5513129824956584
                                                                                      5705872.0; 8.9347880254824; 5705872.0; 8.90744149668275; 5705872.0; 8.879389161897196;
303
                      125881.4609375
                                                                                                                                                                                                                10.0
                                                                                                                                                                                                                                           0.06249560125058542
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                0.3468030365950325
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 6143121
                                                                                     5705872.0 ; 8.879389161897196 ; 10.0 ; 0.06195061612284851

5705872.0 ; 8.853897791696424 ; 10.0 ; 0.06069850180406303

5705872.0 ; 8.828243804365597 ; 10.0 ; 0.06008464535375003

5705872.0 ; 8.804071024715242 ; 10.0 ; 0.05950315446503235

5705872.0 ; 8.606113129756234
                                                                                                                                                                                                                                          0.06190715908938053 , 0.02 ; 1.0 ; 0.5513129824935050 . 0.06125061612284851 ; 0.02 ; 1.0 ; 0.5530292565878596 . 0.06069850180406303 ; 0.02 ; 1.0 ; 0.5530292565878596 . 0.060698501804635375003 ; 0.02 ; 1.0 ; 0.554962286690062 . 0.02 ; 1.0 ; 0.5568178423821302 . 0.02 ; 1.0 ; 0.5568178423821302 . 0.02 ; 1.0 ; 0.5568178423821302 . 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.02 ; 0.
303
                     125881.4609375
                                                                                                                                                                                                                                           0.06190715908938053 :
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 0.3460464635325901
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   6187821
                       125881.4609375
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 0.3452002615763307
                     125881.4609375
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                0.3444871272812789
303
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 6277221
303
              : 125881.4609375
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                0.3436927928270423
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 6321921
303 ; 125881.4609375 ; 5705872.0 ; 8.606113128756274 ; 10.0 ; 0.0552649490943233
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               0.02 ; 1.0 ; 0.5710913193207509 ;
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                0.3374295425980235;
```

Abbildung 25: Auszug aus einem csv-Export des Bodenaufbaus aus Marina

Der csv-Export des Bodenaufbaus kann anschließend wieder in Gestalt von virtuellen Bohrkernen in ParaView visualisiert werden (siehe Abbildung 26). Durch die Kombination aus csv-Export der Stratigraphie und dem Berechnungsnetz wurde ein AVS-UCD-Export [AVS 1992] in Form von Volumenelementen umgesetzt, um so auch eine volumetrische Sicht, wie in Abbildung 32 dargestellt, zu erhalten.

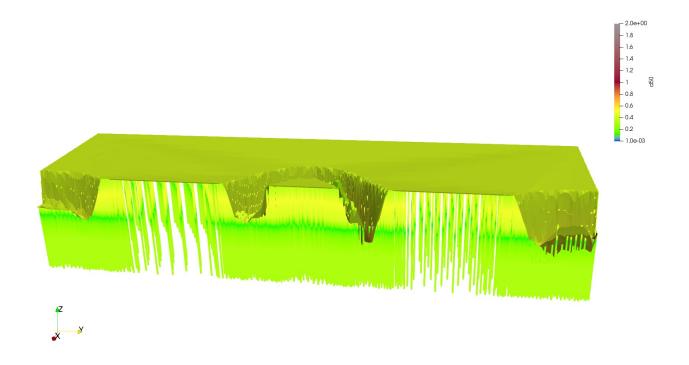


Abbildung 26: Visualisierung der virtuellen Bohrkerne mit ParaView mit farbcodiertem Mediankorndurchmesser

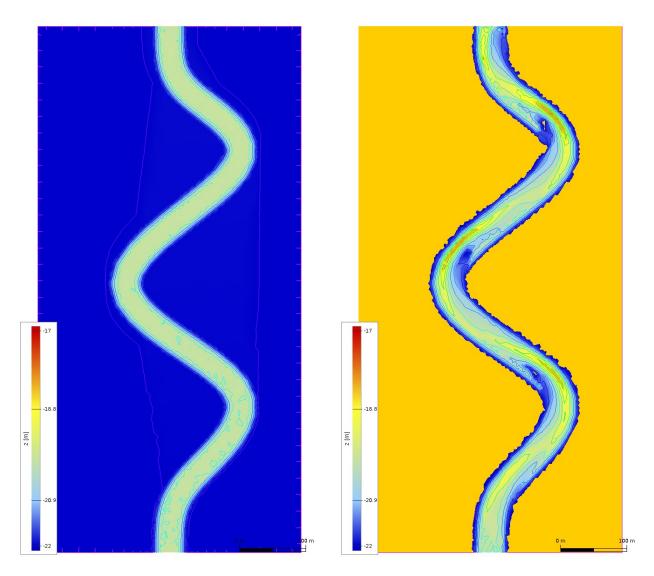
8.3.3. Prinzipstudie

Im Folgenden wird die Nutzung und Wirkungsweise der stratigraphischen Modellkomponente in Marina an einem akademischen, s-förmigen Gerinne dargestellt.

Das Gerinne ist ca. 800 m lang, mit einem Trapezprofil mit ca. 30 m Gewässerbettbreite und ca. 50 m Uferabstand sowie einem Höhenunterschied von 5 cm (am Einlauf 20 m und am Auslauf 19,95 m). Als hydrodynamische Randbedingungen werden ein stationärer Wasserstand von 21,95 m am Auslaufrand und ein konstanter Durchfluss von 29,3 m³/s am Einlaufrand gewählt. Dadurch beträgt die Wassertiefe am Auslaufrand 2 m. Die folgenden dargestellten Simulationsergebnisse sind nach einem Simulationszeitraum von 200 Tagen entstanden.

8.3.3.1. Ohne stratigraphische Anfangsbedingung

Die Referenzsimulation erfolgte mit einer räumlich homogenen Sedimentverteilung (d_{50} = 0,42 mm, d_{max} = 4,2 mm, d_{min} = 0,042 mm, σ_0 = 0,8). Der Startzustand und das Simulationsergebnis der Gewässerbettentwicklung nach 200 Tagen sind in der Abbildung 27 dargestellt. Gut erkennbar ist die zu erwartende Tendenz der Kolkbildung am Prallhang und Sedimentablagerungen im Gleithang.



Ausgangssituation, ohne Kennzeichnung der trockenen Flächen

nach 200 Tagen Simulation, dunkelgelb eingefärbt die trockenen Flächen

Abbildung 27: Entwicklung der Gewässerbettlage (z als Tiefe)

Die zugehörige Veränderung der Oberflächensedimenteigenschaften ist am Parameter d_{50} in der Abbildung 28 zu erkennen. Hier kann unter anderem gut die Entwicklung von Sandbänken mit eher feinerem Sediment in den Innenkurven beobachtet werden, wohingegen es am Prallhang zu Erosionen kommt und in den tieferen Kolken zu einer Vergröberung des Materials.

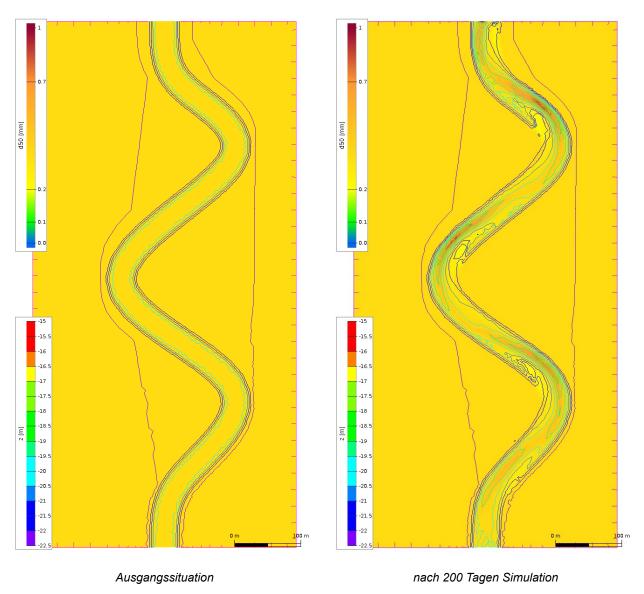


Abbildung 28: Entwicklung des Kornparameters d50

Während dieser Simulation wurde gleichzeitig eine Mikrosequenzstratigraphie mitsimuliert. Entlang eines Schnittes lässt sich der so simulierte Bodenaufbau visualisieren (siehe Abbildung 29).



Abbildung 29: Visualisierung des simulierten Bodenaufbaus ohne vorgegebenem Bodenaufbau nach 200 Tagen in ParaView

Die "Schichtung", gekennzeichnet durch die schwarzen Linien in der Abbildung 29, bedeuten, dass es während der Simulation in diesen Bereichen zu Erosionen gekommen ist. Die Implementierung des Protokollierens des Bodenaufbaus erzeugt immer dann einen neuen Eintrag im *Stack*, wenn es zu einem Wechsel der Erosions- / Sedimentationscharakteristik kommt.

8.3.3.2. Mit stratigraphischer Anfangsbedingung

Es ist auch möglich, den Bodenaufbau aus Naturbeobachtungen bzw. aus theoretischen Überlegungen als Anfangsbedingung im Rahmen der morphodynamischen Simulation vorzugeben. Um deren Effekt im Rahmen der Simulation erkennbar zu machen, werden 7 Schichten vorgegeben. Wobei die oberste Schicht am Gewässerboden wieder dem Sediment aus Abschnitt 8.3.3.1. entspricht (grau gekennzeichnete Zeile).

```
zl [m]; dmax [mm]; d50 [mm]; dmin [mm]; meanInitialSorting
-22; 3; 0.3; 0.03; 0.5
-21; 5; 0.5; 0.05; 1.2
-20; 4.2; 0.42; 0.042; 0.8
-19.5; 1; 0.1; 0.01; .4
-19; 2; 0.2; 0.02; .2
-18; 3; 0.3; 0.03; 0.6
-16; 3; 0.3; 0.03; 1.0
```

Einen halben Meter unter der aktuellen Gewässersohle wurde nun eine Schicht mit sehr feinem Sediment und besserer Sortierung angenommen (gelb markierte Zeile). Dies führt während der Simulation dazu, dass es im Bereich der entstehenden Kolke am Prallhang zu einer Erosion bis in die nächste darunterliegende Schicht kommt, die aus feinerem Sediment aufgebaut ist als die

darüberliegende. Die Erosion wird verstärkt (siehe Abbildung 30), der Kolk vertieft sich stärker als bei homogenem Sediment. Das dort erodierte Sediment wird weiter transportiert und sedimentiert im Gleithang des folgenden Mäanders.

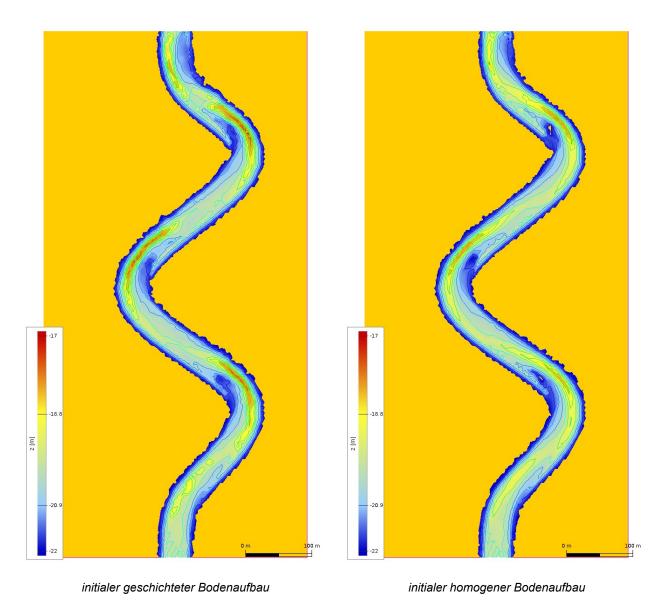


Abbildung 30: Entwicklung des Gewässerbettes nach 200 Tagen, dunkelgelb eingefärbt die trockenen Flächen

Die zugehörige Veränderung der Oberflächensedimenteigenschaften ist in der Abbildung 31 im Vergleich zwischen homogenem und geschichtetem Bodenaufbau dargestellt. In den Kolken lassen sich gut die feineren Sedimente an den Kolkrändern beobachten. Während der weiteren Erosion kommt es wieder zu einer Vergröberung, jedoch langsamer als im homogenen Bodenaufbau, da das Sediment als besser sortiert ($\sigma_0 = 0.4$) angenommen wurde.

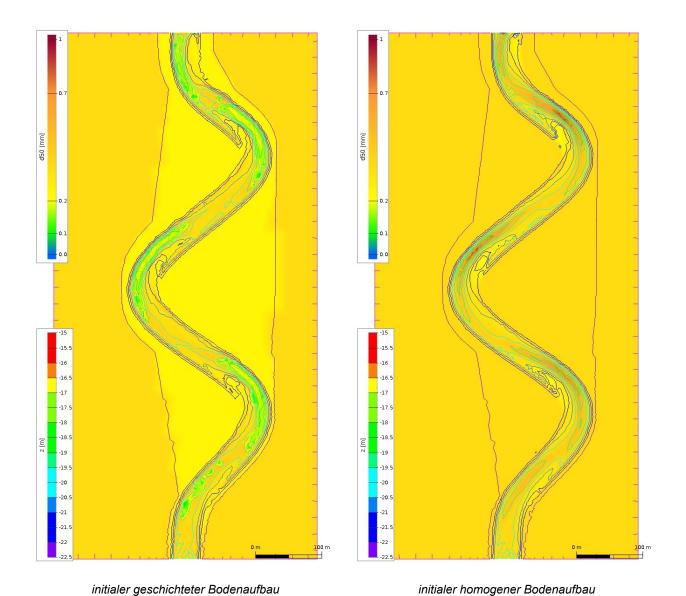


Abbildung 31: Entwicklung des Kornparameters d₅o nach 200 Tagen

Die hierbei entstehende Mikrosequenzstratigraphie ist in Abbildung 32 zu sehen. Gut erkennbar ist das Einschneiden in die feinkörnigere Sedimentschicht (dunkleres Grün) im Einlauf der Kurve und das Ablagern hinter der Kurve.

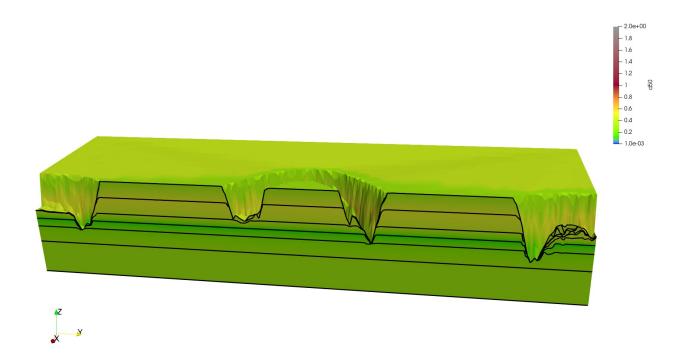


Abbildung 32: Visualisierung des simulierten Bodenaufbaus mit vorgegebenem Bodenaufbau nach 200 Tagen in ParaView

9. Analyse der geomorphologischen Entwicklung in ausgewählten Fokusgebieten

9.1. Deutsche Bucht

Die Deutsche Bucht liegt in der südöstlichen Nordsee und ist durch ein mesotidales Tideregime mit einem Tidehub von 2 bis 4 m geprägt. Der Küstensaum mit seinen vorgelagerten Barriereinseln und den dahinterliegenden ausgedehnten Wattflächen sowie den angeschlossenen Ästuaren gehört zu den morphologisch und hydrodynamisch aktivsten Zonen der Deutschen Bucht [WINTER 2011]. Die vor ca. 7.500 Jahren entstandene Küstenlandschaft [Streif 1990] besteht aus dem Wattenmeer mit den ostfriesischen Barriereinseln und den nordfriesischen Geestkern- und Marscheninseln, dem zentralen Wattbereich zwischen Weser- und Eidermündung sowie den Ästuaren von Ems, Jade-Weser, Elbe und Eider. Die Ausbildung morphologischer Strukturen an der Gewässersohle innerhalb dieses tidebeeinflussten Ablagerungssystems hängt im Wesentlichen von der Sedimentzusammensetzung, der Sedimentverfügbarkeit und dem Strömungsregime des Transportmediums ab. Weitere Einflussgrößen wie Seegang, Tide, Wind, Sturmereignisse, Uferabbrüche und nicht zuletzt menschliche Eingriffe können die Verlagerung und das Mäandrieren von Tiderinnen und Prielsystemen darüberhinausgehend verändern.

Die übergeordnete Geometrie der heutigen Küste ist primär durch das Paläorelief der pleistozänen Ablagerungen dominiert [Vos und VAN KESTEREN 2000; Oost et al. 2012]. Hierbei ist vor allem das Elbeurstromtal als zentrales Strukturelement für die glazigene Entwicklung der heutigen offenen Ästuare von Jade, Weser und Elbe zu sehen [Streif 2004]. Mit dem steigenden Meeresspiegel wurde das Elbeurstromtal überflutet und durch ein intensives Tidegeschehen wurden die Ästuare weiter vertieft und ausgeprägt [Oost et al. 2012]. Glazigene Ablagerungen entlang der heutigen Küstenlinie bilden den Kern der nordfriesischen Barriereinseln, welche erhöhten Erosionsintensitäten durch den Meeresspiegelanstieg besser widerstehen konnten (Flemming und Davis Jr. 1994; Oost et al. 2012; Fruergaard et al. 2018]. Im Schutz dieser Inseln konnten sich ausgedehnte Wattflächen bilden [Oost et al. 2012]. Die ostfriesischen Inseln bildeten sich zunächst einige Kilometer seewärts ihrer heutigen Position und erst die Kombination aus erosiven seeseitigen Prozessen und Transport des erodierten Materials in den landseitigen Bereich in die Durchbruchsfächer im Tidebecken zwischen Festland und Inseln führte zu einem Migrationsprozess Richtung Land [Oost et al. 2012].

Die Form der heutigen Nordseeküste wurde über das letzte Jahrtausend final von Sturmfluten geprägt, in denen beispielsweise die Halligen in Nordfriesland und der Jadebusen entstanden [Schenk 2009; Schwarzer et al. 2019]. In den letzten Jahrtausenden spielt in immer größerem Ausmaß der Mensch eine entscheidende Rolle in der Entwicklung der Küste sowie zuleitenden Flüsse und wird sogar zum treibenden Faktor noch vor klimatischen Einflüssen [Hoffmann et al. 2008].

Auf der Basis der erstellten Produkte des Projekts lassen sich morphologische Analysen über einen Zeitraum von mehreren Dekaden durchführen. Im Folgenden werden einige Auswertungen für die Deutsche Bucht exemplarisch dargestellt.

9.1.1. Entwicklung der Wattflächen

Im Küstennahbereich der Deutschen Bucht hat das Watt eine besondere Bedeutung. Das Wattenmeer konnte sich durch den Gezeiteneinfluss und dem großen Sedimentangebot während des Holozäns entwickeln und ist auch heute noch ständigen morphologischen Änderungen unterworfen. Die zusammengetragenen Vermessungsdaten ermöglichen eine Abschätzung des mittleren Wattwachstums (siehe Abbildung 33). Aufgrund der sehr unterschiedlichen Qualität und Abdeckung der zugrundeliegenden Vermessungsdaten, aber auch digitalisierter historischer Kar-

ten schwankt das mittlere Höhenwachstum erheblich, je nachdem welcher Zeitraum gewählt wird:

1950 – 2020: 2,74 mm/a
 1980 – 2020: 3,77 mm/a
 1990 – 2020: 4,69 mm/a

Unabhängig vom gewählten Zeitraum kompensiert das Wattwachstum im Durchschnitt den Anstieg der mittleren Meeresspiegellage in der Deutschen Bucht.

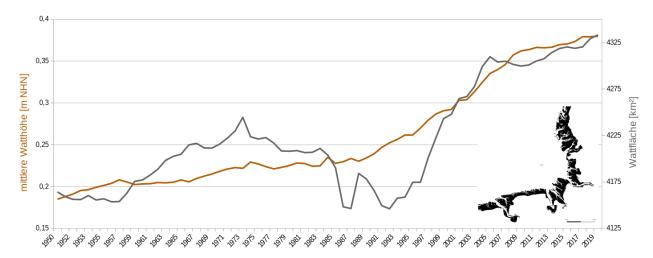


Abbildung 33: Entwicklung der Wattflächen und der mittleren Watthöhe in der Deutschen Bucht

Global stieg der Wasserstand im 20. Jahrhundert um durchschnittlich 1,7 mm pro Jahr (https://www.ipcc.ch/, letzter Aufruf 30.08.2022). Dieser Anstieg differiert regional, so dass für die Deutsche Bucht und im Zeitraum von 1950 bis 2020 auf www.psmsl.org (letzter Aufruf 19.07.2022) folgende Werte für den Anstieg des relativen mittleren Meeresspiegels angegeben wurden (siehe Abbildung 34):

•	Amrum	2,19+-0,55 mm/a
•	Cuxhaven	1,88+-0,33 mm/a
•	Borkum	2,32+-0,41 mm/a
•	Delfzijl	2,59+-0,38 mm/a

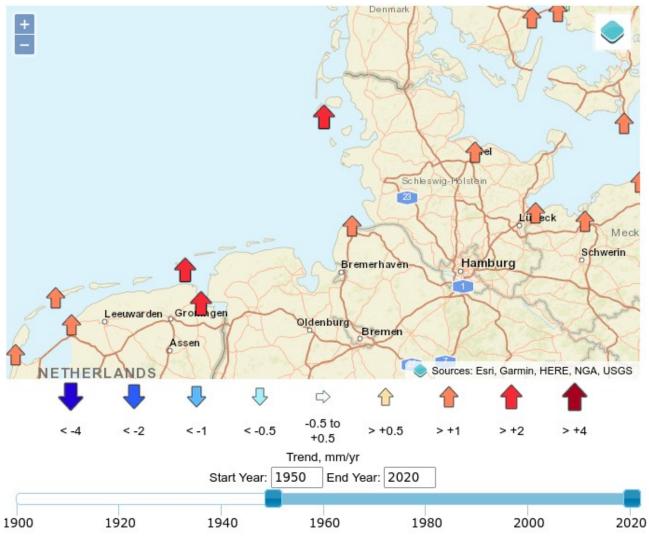


Abbildung 34: Relativer Trend des mittleren Meeresspiegels in der Deutschen Bucht für den Zeitraum von 1950 bis 2020 nach www.psmsl.org/products/trends [letzter Aufruf 19.07.2022]

Das Anwachsen der Wattbereiche variiert dabei sowohl zeitlich als auch örtlich (siehe Abbildung 35). Erwartungsgemäß weisen die Ästuare von Weser und Elbe höhere Wachstumsraten auf als die von Ems und Jade. Besonders beeindruckend ist die "Buhnenwirkung" der Insel Sylt bezüglich der gegen den Uhrzeigersinn laufenden Tidewelle in der Deutschen Bucht. Das Hörnumbecken weist ein 10-mal größeres Aufwachsen der Wattflächen auf als das nördlicher gelegene Lister Becken (siehe Abbildung 35).

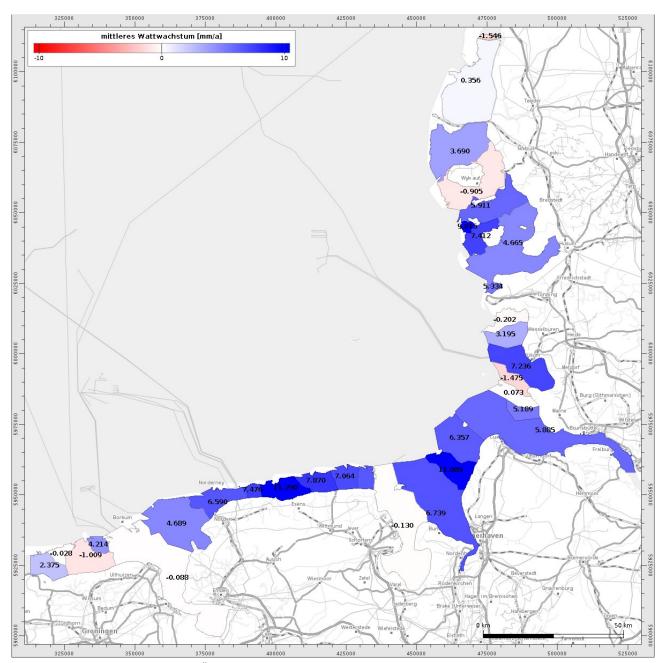


Abbildung 35: Mittlere jährliche Änderung der Watthöhe für den Zeitraum von 2000 bis 2019 [vor OpenStreetMap]

9.1.2. Transportpfade

Aus den rein datenbasierten Analysen lassen sich keine Abschätzungen ableiten, woher das Sediment kommt und wohin es transportiert wird. Für diese Fragestellungen können hydro- und morphodynamische numerische Simulationen Abschätzungen liefern.

Für das Jahr 2012 wurde eine voll gekoppelte Simulation der Prozesse Tide-Seegang-Sediment-transport und Bodenevolution durchgeführt. Als Initialbelegung für den Gewässerboden wurde die Bathymetrie und Oberflächensedimentologie zum 01.01.2012 interpoliert. Die hydrodynamischen und meteorologischen Randbedingungen wurden durch das Projekt EasyGSH-DB zur Verfügung gestellt [Hagen et al. 2021]. Auf der Basis dieser Simulationen lassen sich Vektorfelder resultierender Strömungen, Bodenschubspannungen und Sedimenttransporte berechnen, welche gute

Indikatoren für die großräumigen und langfristigen Gestaltungsvorgänge in der Deutschen Bucht liefern. In der Abbildung 36 ist das Vektorfeld des resultierenden totalen Sedimenttransportes über das Jahr 2012 dargestellt. Erkennbar sind die relativ großen resultierenden seewärtigen Transporte in den Ästuarmündungen. Eine Größenordnung kleiner sind die von Westen nach Osten gerichteten Transporte vor den ostfriesischen und noch viel kleiner die vor den nordfriesischen Inseln.

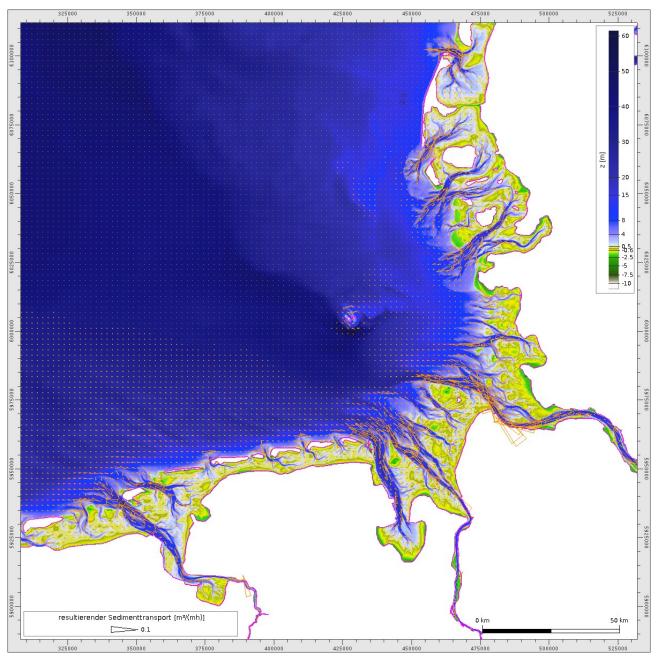


Abbildung 36: Vektorfeld der resultierenden (mittleren) Sedimenttransportmengen über das Jahr 2012 [vor Isoflächen der Bathymetrie zum 01.07.2012]

Die Bestimmung von Stromlinien auf diesem Vektorfeld verschafft eine Vorstellung über den Weg des in Bewegung befindlichen Sedimentes. Die Abbildung 37 zeigt, dass die innere Deutsche Bucht eine Sedimentsenke für das aus Westen herangetragene Material ist und dass es in Richtung des alten Elbeurstromtales zu einem seewärtigen Ablenken der Transportpfade kommt.

Auch ist eine Unterversorgung der schleswig-holsteinischen Küstenregionen durch Sediment zu erkennen.

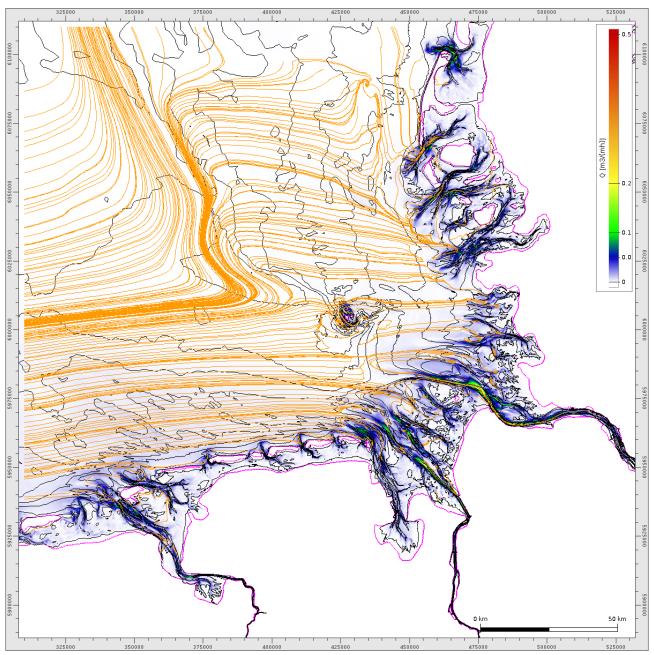


Abbildung 37: Stromlinien auf dem Vektorfeld des resultierenden (mittleren) Sedimenttransportes (Betrag als Isoflächen dargestellt) über das Jahr 2012 [vor Isolinien der Bathymetrie zum 01.07.2012]

9.2. Weserästuar

Das Weserästuar unterliegt einer Vielzahl unterschiedlicher Nutzungsansprüche. Insbesondere durch die Weserhäfen und Industrieansiedlungen stellt das Gebiet für Norddeutschland einen Wirtschaftsraum von herausragender Bedeutung dar. Nicht zuletzt sind die Landwirtschaft, die Fischerei und der Tourismus von erheblicher wirtschaftlicher Bedeutung.

Die hydro- und morphodynamischen Verhältnisse führen zu ständigen Veränderungen in der bathymetrischen und oberflächensedimentologischen Ausprägung des Meeresbodens im Weserästuar. Die sich ausbildenden wertvollen Lebensraumtypen sind besonders schützenswert.

Die Gewährleistung der Leichtigkeit und Sicherheit der Schifffahrt sowie des Hochwasser- und Küstenschutzes erfordern ständige anthropogene Eingriffe in das System, welche unter ökologischen Gesichtspunkten möglichst schonend umgesetzt werden müssen.

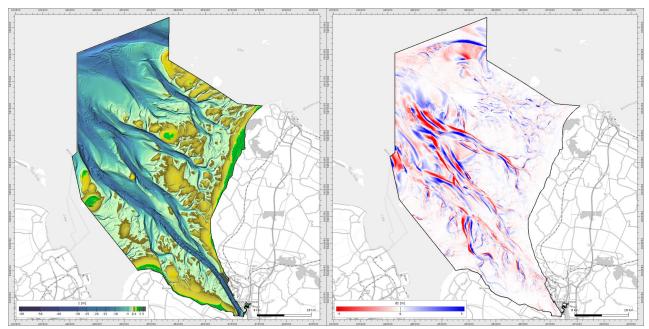


Abbildung 38: Digitale Bathymetrie zum 01.07.2019 und Bilanzhöhe 2019 minus 2009 der Außenweser [vor OpenStreetMap]

Eine der einfachsten morphodynamischen Analysen ist die Bestimmung von Differenzmodellen (siehe Abbildung 38 rechts). In diesen Differenzmodellen ist auch erkennbar, in welchen Bereichen über den Zeitraum von 10 Jahren nur eine Vermessung vorgelegen hat (weiße Bereiche). Weiterhin ist eine leichte Blaufärbung der größeren Wattflächen zu erkennen, was ein Wattwachstum anzeigen könnte. Die Bereiche mit stark wechselnden roten und blauen Farbbereichen sind Indikatoren für wandernde Watt- und Tiderinnenstrukturen.

9.2.1. Entwicklung der Wattflächen

mittlere Watthöhe: -26,48 cm NHN

2009

In der Abbildung 35 wurden für verschiedene Einzugsgebiete, u. a. auch für die Außenweser, Abschätzungen der Entwicklung der Watten gegeben. Wesentlich detailliertere Aussagen werden im Folgenden in den projektbezogenen Fokusgebieten dargestellt. Die Veränderung der sogenannten Intertidalfläche (hier definiert als -2 m bis +2 m NHN) im Bereich der Außenweser zwischen 2009 und 2019 lässt sich in der Abbildung 39 ablesen.

mittlere Watthöhe: -27,52 cm NHN Wattfläche: 566,696 km²

2019

Wattfläche: 566,696 km²

Wattfl

Abbildung 39: Intertidalflächen (-2 m bis +2 m NHN) der Bathymetrien 2009 und 2019 [vor BKG-Kartendienst]

Über den Zeitraum von 10 Jahren vergrößert sich im Bereich der Außenweser die Intertidalfläche um 3,08 %, während sich die mittlere Höhe um 3,92 % verringert. Relative Betrachtungen bzgl. des Basisjahres 2009 lassen Aussagen zu, welcher Anteil der Fläche von Erosion bzw. von Sedimentation betroffen ist (siehe Abbildung 40).

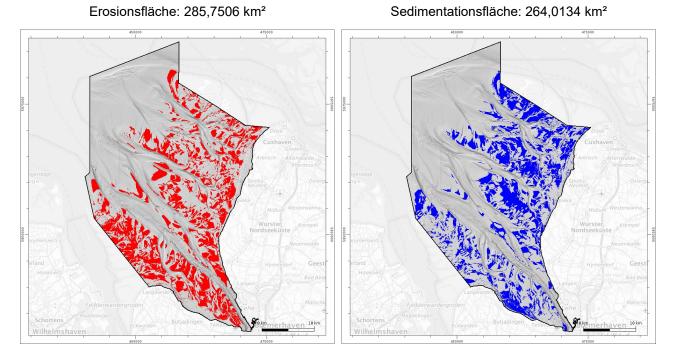
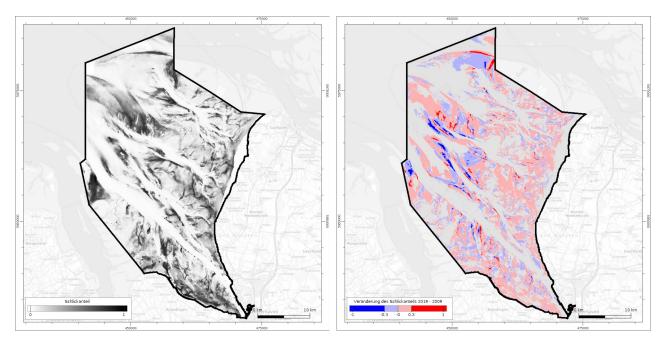


Abbildung 40: Intertidalflächen (-2 m bis +2 m NHN) der Bathymetrien 2009 und 2019 [vor BKG-Kartendienst]

9.2.2. Veränderung der Oberflächensedimentologie

Das Wattwachstum lässt sich auch in der in SMMS modellierten Sedimentzusammensetzung bzw. deren Änderung ablesen. So ist im Weserästuar auf den Wattflächen ein Anstieg des Feinsedimentanteils über die letzten 10 Jahre zu beobachten (siehe Abbildung 41).



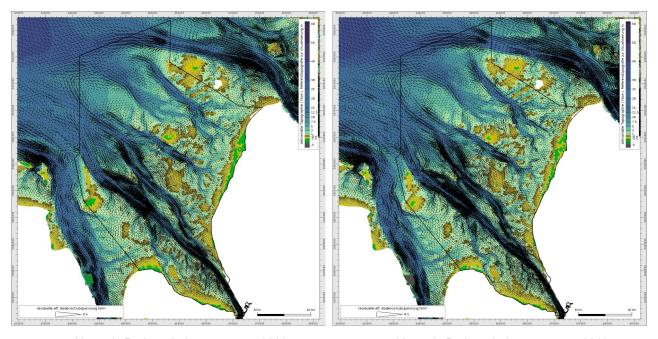
Feinsedimentanteil (< 63 μm) Außenweser 2019

Veränderung des Feinsedimentanteils Außenweser von 2009 bis 2019

Abbildung 41: Feinsedimentanteil in der Weser und dessen Entwicklung über 10 Jahre [vor OpenStreetMap]

9.2.3. Hydro- und morphodynamische Modelluntersuchungen

Aussagen über die lokalen Umlagerungstendenzen lassen sich zusätzlich auf der Basis prozessbasierter Simulationsmodelle abschätzen. In der Abbildung 42 sind die Vektorfelder der über das Jahr integrierten Bodenschubspannungen (resultierende Bodenschubspannungen) dargestellt, welche beispielsweise in die gleichen Richtungen wie die in der Außenweser befindlichen Unterwasserdünen weisen.



resultierende Bodenschubspannungen 2009

resultierende Bodenschubspannungen 2019

Abbildung 42: Veränderungen in den resultierenden Bodenschubspannungen in der Außenweser

Nicht zuletzt berechnen hydro- und morphodynamische Simulationsmodelle über einen vorgegebenen Zeitraum auch die Bodenevolution. In der Abbildung 43 ist die aus den Digitalen Geländemodellen und hydro-morphodynamischen Simulationen bestimmte Bilanzhöhe zwischen den Jahren 2012 und 2017 dargestellt. Hierbei wurden die hydro- und morphodynamischen Simulationen auf der Basis der meteorologischen Gegebenheiten des Jahres 2012 mit einem morphologischen Faktor von 10 simuliert. Parallel berechnen morphodynamische Modelle auch die Veränderung der Oberflächensedimentzusammensetzung und des Bodenaufbaus. Weitere Ergebnisse hydro- und morphodynamischer Modelluntersuchungen unter Berücksichtigung der stratigraphischen Modellansätze finden sich im Anhang.

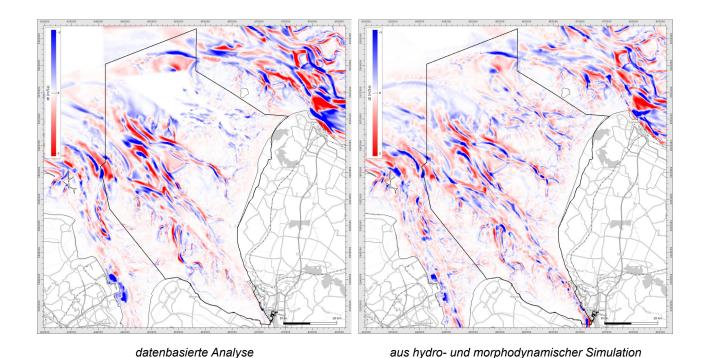


Abbildung 43: Bilanzhöhe 2017 minus 2012 in der Außenweser [vor OpenStreetMap]

Die historische geomorphologische Entwicklung im Bereich der Außenweser lässt sich auf der Basis des erstellten stratigraphischen Modells beschreiben. So lässt sich beispielsweise das Ablagerungsalter der in einer gewissen Tiefe befindlichen Sedimente abschätzen (siehe Abbildung 44).

9.2.4. Stratigraphische Analysen

Das tiefenabhängige Ablagerungsalter ist im mikrosequenzstratigraphischen Teilmodell in der Form enthalten, dass für jeden Punkt in der Tiefe der nächstältere und nächstjüngere Zeitpunkt aus den zeitlichen Schichten abgelesen werden kann. Wird die nächstältere mikrosequenzstratigraphische Schicht herangezogen, so kann dieses Sediment nicht vor dem Datum der Schicht abgelagert worden sein. Bezogen auf eine Referenzoberfläche lässt sich so flächenhaft eine tiefenabhängige Darstellung des Ablagerungsalters bzgl. eines Betrachtungsjahres ableiten.

In der Darstellung des Ablagerungsalters 4 m unter der Gewässerbodenoberfläche von 2020 sind noch Sedimente zu finden, die keine 10 Jahre dort lagern. Die großen grauen Flächen bedeuten, dass die Sedimentablagerungen älter als 75 Jahre sind.

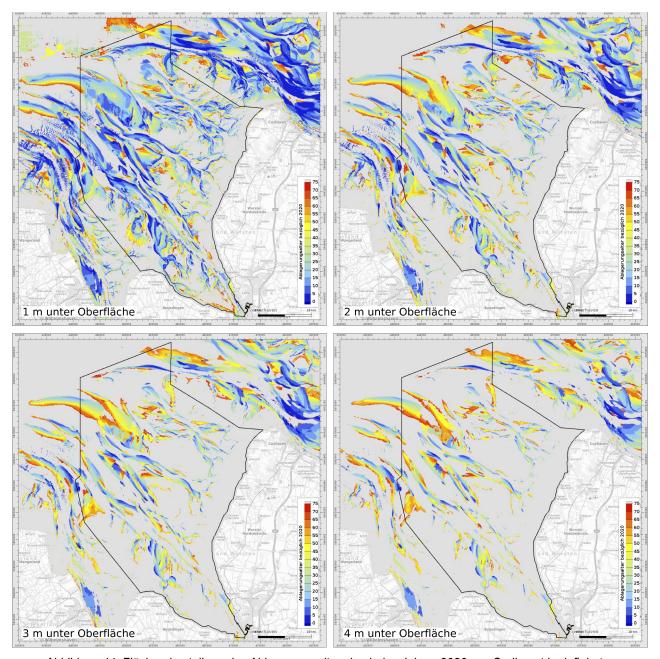


Abbildung 44: Flächendarstellung des Ablagerungsalters bzgl. des Jahres 2020 von Sediment in definierten Tiefenhorizonten [vor BKG-Kartendienst]

9.3. Lister Tief und Hörnum Tief

Die Deutsche Bucht als Senke für Sedimente, die aus westlicher Richtung eingetragen werden, kann in einen gut mit Sediment versorgten ostfriesischen Teil bis zur Mündung von Weser und Elbe und einen eher unterversorgten nordfriesischen Bereich unterteilt werden (siehe hierzu auch Abbildung 37).

Die Insel Sylt mit ihren dahinter liegenden Tidebecken Lister Tief und Hörnum Tief bilden die nördlichsten Wattflächen des Deutschen Wattenmeeres. Die Dynamik beider Tidebecken wird wesentlich durch die Insel Sylt selbst und den diese mit dem Festland verbindenden Hindenburgdamm geprägt, wobei im Hörnum Tief die Umströmung der Insel Föhr (Föhrer Schulter) zu keinem geschlossenen Tidebecken mit einer seewärtigen Öffnung führt. Im Weiteren werden die in Abbildung 45 dargestellten Auswertepolygone verwendet.

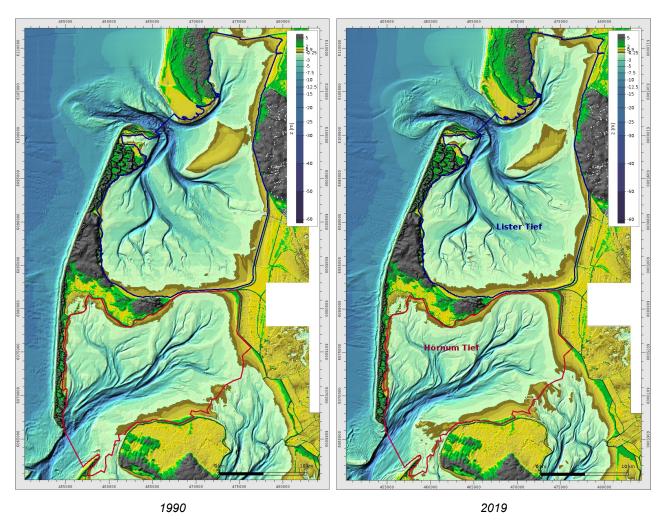


Abbildung 45: Digitale Geländemodelle im Bereich der Insel Sylt mit den Auswertepolygonen Lister Tief (blau) und Hörnum Tief (rot)

9.3.1. Entwicklung der Wattflächen

Die auf der Basis der Vermessungsdaten zu beobachtenden Entwicklung der Watten in den beiden Tidebecken kann je nach Betrachtungszeitraum differieren. Die Zeitreihen der mittleren Watthöhen und -flächen sind in Abbildung 46 aufgetragen.

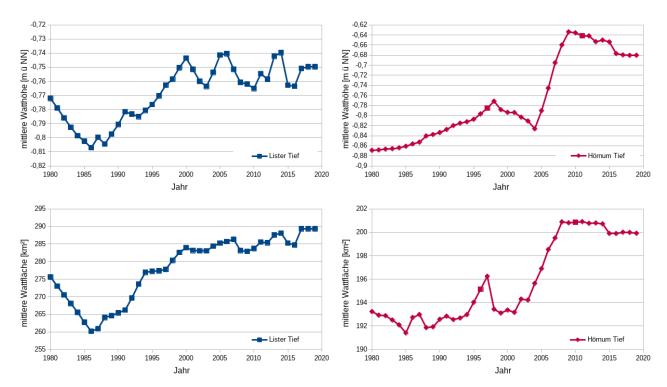


Abbildung 46: Entwicklung der Watten (-2 m NHN, +2 m NHN)

9.3.2. Veränderung der Oberflächensedimentologie

Die sich in der Lage und Ausdehnung der Watten ergebenden bathymetrischen Änderungen lassen sich auch, wenn auch in viel kleinerem Maße, in den Sedimentzusammensetzungen ablesen. Exemplarisch ist in Abbildung 47 der Median der Kornverteilung farblich dargestellt. Die Sedimente der Inseln wurden mit Mittelsand (d_{50} = 0,2 mm) initialisiert.

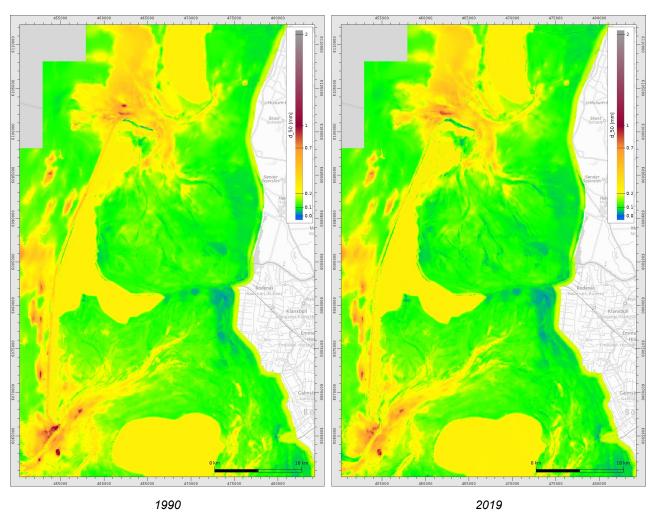


Abbildung 47: Digitale oberflächensedimentologische Modelle im Bereich der Insel Sylt [vor BKG-Kartendienst]

Auf die hydro- und morphodynamischen Modelluntersuchungen unter Berücksichtigung der stratigraphischen Modellansätze wird im Anhang vertieft eingegangen.

10. Produkte

Im Rahmen der Projektbearbeitung wurden eine umfangreiche Datenbasis von Vermessungsdaten, Sedimentproben und Bohrkernen zusammengetragen und gepflegt. Die für die Erstellung der Stratigraphie herangezogenen konsistenten Bathymetrien wie auch Sedimentologien sowie die dekadischen Stratigraphien wurden unter https://datenrepository.baw.de, Stichpunkt SMMS, veröffentlicht.

10.1. Bathymetrische Produkte

Unter Bathymetrie wird im Weiteren die mittlere Lage des Gewässerbodens verstanden.

Die Grundlage der bathymetrischen Produkte bildet die bathymetrische Komponente des FBM mit seinen integrierten Vermessungsdaten und zugehörigen Interpolationsvorschriften.

Folgende Produkte werden veröffentlicht:

- 10 m-Raster der Höhenwerte für die Jahre 1960 bis 2020; die Produkte werden als GeoTiff bereitgestellt.
- Zu jeder digitalen Bathymetrie jeweils 2 Datenquellenkarten (before und after);
 die Produkte werden als shp-Dateien bereitgestellt.
- 10 m-Raster des morphologischen Raums und morphologischen Drives; die Produkte werden als GeoTiff bereitgestellt.

10.2. Oberflächensedimentologische Produkte

Oberflächensedimentologie bezeichnet die sedimentologischen Eigenschaften der obersten 10 bis 20 cm der Sohle eines Gewässers, die durch die Korngröße, -verteilung und -lagerung beschrieben werden kann. Gewässer in diesem Zusammenhang sind Meere, Flüsse oder geschlossene Binnengewässer. Im Rahmen des Projektes SMMS handelt es sich bei oberflächensedimentologischen Datensätzen um solche, die die Oberflächensedimentologie in der Deutschen Bucht inklusive der Mündungsbereiche der Ästuare Ems, Weser, Elbe und Eider darstellen. Durch morphologische Aktivitäten des Gewässerbodens ist ein solches oberflächensedimentologisches Modell stets nur für einen gewissen Zeitraum oder Zeitpunkt gültig.

Die Grundlage für oberflächensedimentologische Produkte bilden gerasterte zeitvariante oberflächensedimentologische Modelle, die mithilfe des FBM über räumlich-zeitliche Interpolations- und speziell entwickelte sedimentologische Extrapolationsverfahren auf Basis von See- und Landvermessungen verschiedenster Datentypen sowie oberflächensedimentologischer Beprobungen erstellt werden.

Folgende Produkte werden für die Jahre 1960 bis 2020 veröffentlicht:

- Gekachelte 10 m-Raster der Deutschen Küste jeweils gültig zum 01.07. für das Jahr, wobei an jedem Rasterknoten die φ -Viertel diskretisierte modellierte Summenlinie der Oberfläche sowie die Höhenverteilung abgelegt ist; die Produkte werden im csv-Format bereitgestellt.
- Für jedes Jahr Quellenkarten, die die Positionen und räumlichen Einflussbereiche der in dem Jahr gemessenen Oberflächensedimentproben abbilden; die Quellenkarten werden als shp-Dateien bereitgestellt.
- Die Analyse-Produkte umfassen 10 m-Raster der Anteile einzelner Kornfraktionen nach DIN EN ISO 14688 [Deutsches Institut für Normung 2018], den Mediankorndurchmesser

- $d_{\rm 50}$, Sortierung, Schiefe und Porosität; die Produkte werden als GeoTiff bereitgestellt.
- Petrographische Karten für die Jahre 1990, 2000, 2010 und 2020, die die Kornverteilung in linguistische Beschreibungen nach Figge, Folk und dem SEP 3/ISO-Format (getrennt in Haupt- und Nebenkomponenten) klassifiziert darstellen; die Produkte werden als shp-Dateien bereitgestellt.

10.3. Stratigraphische Produkte

Stratigraphie bezeichnet im Rahmen dieses Projektes die Eigenschaften des Gewässergrunds über die Tiefe, die durch die Korngröße, -verteilung und -lagerung vorliegen. Im Rahmen des Projektes SMMS handelt es sich bei stratigraphischen Datensätzen um solche, die den sedimentologischen Gewässergrundaufbau in der Deutschen Bucht inklusive der Mündungsbereiche der Ästuare Ems, Jade-Weser und Elbe darstellen. Durch morphologische Aktivitäten des Gewässerbodens ist ein solches stratigraphisches Modell stets nur für einen gewissen Zeitraum oder Zeitpunkt gültig.

Die Grundlage für stratigraphische Produkte bilden gerasterte zeitvariante oberflächensedimentologische Modelle, die mithilfe des FBM, einem datenbasierten Hindcast-Simulationsmodell, über räumlich-zeitliche Interpolations- und speziell entwickelte sedimentologische Extrapolationsverfahren auf der Basis von See- und Landvermessungen verschiedenster Datentypen sowie oberflächensedimentologischer Beprobungen erstellt werden. Innerhalb dieser werden für einen Zielzeitpunkt über die zeitvariante Betrachtung Erosionsprozesse simuliert, die so einen Endzustand zu einem gewünschten Zeitpunkt darstellen. In den Bereichen, in denen die auf diese Weise simulierte Stratigraphie aufgrund der Datenbasis die Modelluntergrenze (etwa die holozäne Basis) nicht erreicht, wird der Freiraum mit interpolierten Sedimentbohrkernen gefüllt.

Folgende Produkte werden für die Jahre 1990, 2000, 2010 und 2020 veröffentlicht:

- Gekachelte 10 m-Raster der Deutschen Bucht jeweils gültig zum 01.07. für das Jahr, wobei an jedem Rasterknoten die φ -Viertel diskretisierten modellierten Summenlinien in 50 cm tiefenintegrierten aufeinanderfolgenden Intervallen von der Oberfläche des betreffenden Jahres bis hinab zur Modelluntergrenze abgelegt sind; die Produkte werden im csv-Format bereitgestellt.
- Sedimentologische Varianz an jedem Knoten im 10 m-Raster der Deutschen Bucht jeweils gültig zum 01.07. für das Jahr über die Tiefe; die Produkte werden als GeoTiff bereitgestellt.

11. Zusammenfassung

Ausgehend von einer sehr guten bathymetrischen und sedimentologischen Datenbasis aus Naturdaten in Verbindung mit neu zusammengetragenen Bohrkernen und aufbereiteten hydrodynamischen Kenngrößen ist es gelungen, ein dreidimensionales Bodenmodell der aktiven bzw. aktivierbaren "oberen Schichten" des Meeresbodens der Deutschen Bucht, insbesondere im Bereich der morphologisch sehr aktiven sandigen Küsten, Watten und Ästuare, aufzubauen.

Das so erweiterte FBM eröffnete die Möglichkeit, ein umfangreiches Portfolio an konsistenten Produkten und Zwischenprodukten zu erstellen und über die Datenplattform der BAW (https://datenrepository.baw.de) der Allgemeinheit zur Verfügung zu stellen. Hierzu zählen insbesondere hoch aufgelöste (10 m-Rastermodell) jährliche Bathymetrien und Oberflächensedimentologien von 1960 bis 2020 sowie zugehörige stratigraphische Modelle über alle 10 Jahre von 1990 bis 2020.

Das erweiterte FBM in Verbindung mit den im Rahmen des Projektes durchgeführten hydro- und morphodynamischen Simulationen unter Berücksichtigung stratigraphischer Modellkomponenten konnte zur Analyse der geomorphologischen Eigenschaften und Entwicklungen in der Deutschen Bucht und ausgewählten Fokusgebieten herangezogen werden. Neben diesen Analysen zur Verbesserung des hydro- und geomorphologischen Systemverständnisses in der Deutschen Bucht, speziell im Weserästuar und den Tidebecken der Insel Sylt, konnte in umfangreichen Sensitivitätsstudien die Signifikanz der Berücksichtigung stratigraphischer Modellkomponenten in prozessbasierten hydro- und morphodynamischen Simulationssystemen des Küsteningenieurwesens herausgearbeitet werden (siehe auch Anhang).

Die im Rahmen dieses Forschungsprojektes zusammengetragenen Basisdaten, implementierten Algorithmen zur Interpolation und datenbasierten Hindcast-Simulationen sowie die durchgeführten prozessbasierten hydro- und morphodynamischen Simulationen werden zukünftig in Forschungsprojekte (z. B. mFUND-Verbundprojekt TrilaWatt (19F2206) oder KFKI-Forschungsprojekt BIVA-WATT (03KIS130)) einfließen. Nicht zuletzt werden diese die Erstellung wissenschaftlicher Gutachten und Planungsunterlagen verbessern.

12. Danksagung

Das Projekt "Stratigraphische Modellkomponenten zur Verbesserung von hochaufgelösten und regionalisierten morphodynamischen Simulationsmodellen" wurde vom 01.01.2019 bis zum 31.12.2021 mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert (BMBF-Förderkennzeichen: 03KIS124 und 03KIS123). Es wurde darüber hinaus eine kostenneutrale Verlängerung um 5 Monate bis zum 31.05.2022 bewilligt. Der Projektleiter und die Mitarbeitenden bedanken sich für die administrative Unterstützung durch den Projektträger Jülich, bei der KFKI-Beratergruppe für die Empfehlung das Projekt zu fördern, bei Frank Kösters (BAW) und Jennifer Valerius (BSH) für die fachliche Unterstützung und bei allen nationalen und internationalen Datenerhebern, die ihre Daten kostenfrei bereitgestellt haben. Nicht zuletzt gilt der Dank Romina Ihde (BAW), die alle im Projekt erstellten Zwischenprodukte und Forschungsergebnisse so aufbereitete und mit Metadaten sowie DOI versah, dass diese über das Web-Portal https://datenrepository.baw.de, Stichpunkt SMMS, veröffentlicht werden konnten.

13. Literaturverzeichnis

Ahrendt, K.: Ein Beitrag zur holozänen Entwicklung Nordfrieslands. In: Die Küste, 71, 1 - 32, 2006.

- AVS: Advanced Visual Systems Incorporation: AVS Developers Guide. Waltham, 1992.
- Bear, J.: Dynamics of Fluid in Porous Media. Elsevier, New York, USA, 1972.
- BLOM, A.: Different approaches to handling vertical and streamwise sorting in modeling river morphodynamics. Water Resources Research, 44, 2008.
- Deltares, https://www.deltares.nl/en/projects/stratigraphic-modeling-with-the-delft3d-geotool/, letzter Aufruf: 03/2018.
- Deußfeld, N.; Promny, M. & Malcherek, A.: Weiterentwicklung eines Modellbausteins für eine örtliche und zeitlich variable Austauschschicht im morphodynamischen Verfahren SediMorph. Bericht, 2004.
- Deutsches Institut für Normung: DIN 18128:2002-12, Baugrund Untersuchung von Bodenproben Bestimmung des Glühverlustes. 2002.
- Deutsches Institut für Normung: DIN EN ISO 14688-1:2018-05, Geotechnische Erkundung und Untersuchung Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Boden Teil 1: Benennung und Beschreibung. 2018.
- Exner, F. M.: Über die Wechselwirkung zwischen Wasser und Geschiebe in Flüssen. Sitzungsberichte der Akademie der Wissenschaften, mathematisch-naturwissenschaftliche Klasse, Band 134, 2a, 165 204, 1925.
- Figge, K.: Sedimentverteilung in der Deutschen Bucht (Blatt: 2900, Maßstab: 1:250.000). Deutsches Hydrographisches Institut, 1981.
- FLEMMING, B. W. & DAVIS JR, R. A.: Holocene evolution, morphodynamics and sedimentology of the Spiekeroog barrier island system (southern North Sea). Senckenbergiana maritima, Frankfurt/Main, 24(1), 117 155, 1994.
- Folk, R. L.: The distinction between grain size and mineral composition in sedimentary-rock nomenclature. J. Geol., (62), 344 359, 1954.
- Folk, R. L.: Petrology of sedimentary rocks. Hemphill Publ., Austin, 1974.
- Franz, G.: Numerical modelling of hydrodynamics and sediment transport in coastal systems. PhD-Thesis, University of Lisbon, doi: 10.13140/RG.2.2.11485.82403, 2017.
- FRICKE, B. & MALCHEREK, A.: A Stratigraphic Soil Model for Coastal Morphodynamics. In: ICHE, Proceedings of the 11th International Conference on Hydroscience & Engineering, 553 560, 2014.
- FRUERGAARD, M.; JOHANNESSEN, P. N.; NIELSEN, L. H.; NIELSEN, L.; MØLLER, I.; ANDERSEN, T. J.; PIASECKI, S. & PEJRUP, M.: Sedimentary architecture and depositional controls of a Holocene wave-dominated barrier-island system. Sedimentology, 65(4),1170 1212, 2018.
- GPDN: GPDN Geopotenzial Deutsche Nordsee. https://www.gpdn.de, letzter Aufruf: 03/2018.
- Griffel, G.; Asprion, U. & Elbracht, E.: Die neue Holozänbasis der niedersächsischen Nordseeküste. Projektbericht des GPDN-Projekts, 2013.
- HEYER, H. & SCHROTTKE, K.: Gemeinsamer Abschlussbericht für das Gesamtprojekt AufMod (03KIS082-03KIS088) mit Beiträgen aus allen 7 Teilprojekten. Hg. v. Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie, 314 Seiten, https://doi.org/10.2314/GBV:780783271, 2013.
- HIRANO, M.: River bed degradation with armouring. Transaction Japanese Society of Civil Engineering, 3, 194 195, 1971.
- HOFFMANN, T.; LANG, A. & DIKAU, R.: Holocene river activity: analysing 14C-dated fluvial and colluvial sediments from Germany. Quaternary Science Reviews, 27(21-22), 2031 2040, 2008.
- JAGERS, B.: Sediment mixtures and bed stratigraphy. PPT-lecture, Deltares, 2012.
- Krumbein, W. C.: Size frequency distributions of sediments. Journal of Sedimentary Research, 4(2), 65 77, 1934.
- Krumbein, W. C.: Application of logarithmic moments to size-frequency distributions of sediments. Journal of Sedimentary Research, 6(1), 35 47, 1936.
- Krumbein, W. C.: Size frequency distributions of sediments and the normal phi curve. Journal of Sediment Petrology, 8, 84 90, 1938.

Lesser, G. R.; Roelvink, J. V.; van Kester, J. T. M. & Stelling, G. S.: Development and validation of a three-dimensional morphological model. Coastal engineering, 51(8-9), 883 - 915, 2004.

- Malcherek, A.; Рієснотта, F. & Knoch, D.: Technical Report: Mathematical Modul SediMorph. Validation Dokument, Version 1.1, 2005.
- McManus, D. A.: A criticism of certain usage of the phi-notation. Journal of Sedimentary Research, 33(3), 670 674, 1963.
- Merkel, U. & Kopmann, R.: A continuous sediment layer concept for Sisyphe. In: Violeau, D.; Hervouet, J. M.; Razafindrakoto, E.; Denis, C. (Hrsg.): XVIIIth TELEMAC & MASCARET User Club 2011, Chatou: Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), 111 116, 2011.
- MILBRADT, P.: Analysis of the Morphodynamics of the German North Sea Coast on the Basis of a Functional Seabed Model. Proceedings of the 10th International Conference on Hydroscience & Engineering (ICHE 2012), Orlando, Florida, 2012.
- MILBRADT, P.: Simulationsmodell Marina Handbuch Version 3.15.6. Hannover, smile consult GmbH, 2022.
- MILBRADT, P. & DOROW, C.: Identification of Morphological Tendencies and Velocities in Coastal Zones in Science and Information Technologies for Sustainable Management of Aquatic Ecosystems. Proceedings of HEIC, Conception, ISBN 978-981-08-2099-2, 2009.
- MILBRADT, P.; DOROW, C. & ASCHE, CH.: Abschlussbericht ImTG (03KIS059) Identifikation morphologischer Tendenzen und Geschwindigkeiten im Küstennahbereich, Berichtszeitraum: 01.10.2006 31.09.2009, https://doi.org/10.2314/GBV:620636149, 2009.
- MILBRADT, P.; Sellerhoff, F. & Krönert, N.: Abschlussbericht KoDiBa (03KIS042) Entwicklung und Implementierung von Methoden zur Aufbereitung konsistenter digitaler Bathymetrien. Hg. v. smile consult GmbH, 90 Seiten, https://doi.org/10.2314/GBV:493564357, 2005.
- MILBRADT, P.; VALERIUS, J. & ZEILER, M.: Das Funktionale Bodenmodell: Aufbereitung einer konsistenten Datenbasis für die Morphologie und Sedimentologie. In: Die Küste, 80, 39 65, 2015.
- Naumann, M.; Waldeck, A.; Poßin, W.; Schwarz, C. & Fritz, J.: Ableitung von Korngrößenverteilungen aus textbasierten petrographischen Bohrgutbeschreibungen. Z. Dt. Ges. Geowiss. (German J. Geosci.), 165 (2), 275 286, 8 figs., 4 tables, Published online February 2014.
- Oost, A. P.; Hoekstra, P.; Wiersma, A.; Flemming, B.; Lammerts, E. J.; Pejrup, M.; Hofstede, J.; van der Valk, B.; Kiden, P.; Bartholdy, J.; van der Berg, M. W.; Vos, P. C.; de Vries, S. & Wang, Z. B.: Barrier island management: Lessons from the past and directions for the future. Ocean & coastal management, 68, 18 38, 2012.
- ParaView: https://www.paraview.org, letzter Aufruf: 20.05.2022.
- PLÜß, A.; Hagen, R.; Ihde, R.; Freund, J.; Kösters, F.; Milbradt, P.; Sievers, J.; Nehlsen, E.; Schrage, N.; Dreier, N.; Fröhle, P.; Ahlhorn, F. & Meyerdirks, J.: Wissenschaftlicher Abschlussbericht zum mFUND-Projekt: EasyGSH-DB, https://doi.org/10.2314/KXP:1744505187, 2020.
- RICKLEFS, K. & ASP NETO, N. E.: Geology and Morphodynamics of a Tidal Flat Area along the German North Sea Coast. In: Die Küste, 69, 93 127, 2005.
- Santoro, P.; Fossati, M. & Piedra-Cueva, I.: Study of the meteorological tide in the Río de la Plata. Continental Shelf Research, 60, 51 63, 2013.
- Schenk, G. J.: Meeresmacht und Menschenwerk. Die Marcellusflut an der Nordseeküste im Januar 1219. In: G. J. Schenk, Katastrophen. Vom Untergang Pompejis bis zum Klimawandel. edited, 52 66, Ostfildern, Thorbecke, 2009.
- Schwarzer, K.; Ricklefs, K.; Lohrberg, A. & Valerius, J. : Die geologische Entwicklung von Nord- und Ostsee. In: Die Küste, 87, S. 343 376, 2019.
- SEP 3: Die Schnittstelle zur Bohrdatenbank Niedersachsens [WWW Document]. URL https://www.lbeg.niedersachsen.de/karten_daten_publikationen/bohrdatenbank/sep_3/sep-3---die-schnittstelle-zur-neuen-bohrdatenbank-niedersachsens-724.html, letzter Aufruf: 20.05.2022.
- Sievers, J.: Entwicklung und Anwendung eines datenbasierten Multikomponenten-Küstenevolutionsmodells am Beispiel der deutschen Nordseeküste. An der Naturwissenschaftlichen Fakultät der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover eingereichte Promotionsschrift, August 2022.

Sievers, J.; Milbradt, P.; Ihde, R.; Valerius, J.; Hagen, R. & Plüß, A.: An interdisciplinary marine data collection for the German Bight – Part I: Subaqueous Geomorphology & Surface Sedimentology. Earth System Science Data, 13, 4053 - 4063, https://doi.org/10.5194/essd-13-4053-2021, 2021.

- STORMS, J. E. A.; STIVE, M. J. F.; ROELVINK, D. (J.) A. & WALSTRA, D. J.: Initial Morphologic and Stratigraphic Delta Evolution Related to Buoyant River Plumes. Conference: Sixth International Symposium on Coastal Engineering and Science of Coastal Sediment Process, doi: 10.1061/40926(239)56, 2007.
- Streif, H.: Das ostfriesische Küstengebiet Nordsee, Inseln, Watten und Marschen. 2. Aufl., Sammlung geologischer Führer, 57, Gebrüder Borntraeger, Berlin-Stuttgart, ISBN: 978-3-443-15051-8, 1990.
- Streif, H.: Sedimentary record of Pleistocene and Holocene marine inundations along the North Sea coast of Lower Saxony, Germany. Quaternary International, 112(1), 3 28, 2004.
- Syvitski, J. P. M.; Slingerland, R. L.; Burgess, P.; Meiburg, E.; Murray, A. B. & Wiberg, P.: Morphodynamic models: An overview. In: Vionnet, C. A. (Hrsg.): River, coastal, and estuarine morphodynamics, RCEM 2009, Boca Raton, London, New York [etc]: Taylor & Francis, 3 20, 2010.
- UDDEN, J. A.: Mechanical composition of clastic sediments. Bulletin of the Geological Society of America, 25(1), 655 744, 1914.
- VAN DER WEGEN, M.; DASTGHEIB, A.; JAFFE, B. E. & ROELVINK, D.: Bed composition generation for morphodynamic modeling: case study of San Pablo Bay in California, USA. Ocean Dynamics, 61, 73 186, doi: 10.1007/s10236-010-0314-2, 2011.
- VILLARET, C.; HERVOUET, J. M.; KOPMANN, R.; MERKEL, U. & DAVIES, A. G.: Morphodynamic modeling using the Telemac finite-element system. Computers & Geosciences, 53, 105 113, 2013.
- VIPARELLI, E.; BLOM, A.; FERRER-BOIX, C. & KUPRENAS, R.: Comparison between experimental and numerical stratigraphy emplaced by a prograding delta. Earth Surface Dynamics, 2(1), 323 338, 2014.
- VIPARELLI, E.; SEQUEIROS, O. E.; CANTELLI, A.; WILCOCK, P. R. & PARKER, G.: River morphodynamics with creation/consumption of grain size stratigraphy 2: numerical model. Journal of Hydraulic Research, 48(6), 727 741, 2010.
- Vos, P. C. & VAN Kesteren, W. P.: The long-term evolution of intertidal mudflats in the northern Netherlands during the Holocene; natural and anthropogenic processes. Continental Shelf Research, 20(12-13), 1687 1710, 2000.
- Voss, H.-H.: Unterlagen über Material und Methoden zur Vereinheitlichung der Korngrößenansprache bei der geologischen und bodenkundlichen Landesaufnahme. Archivber. Nr. 010930 Niedersächs. Landesamt Bodenforschung, 1982.
- Wentworth, C. K.: A scale of grade and class terms for clastic sediments. The Journal of Geology, 30(5), 377 392, 1922.
- WILSON R. J.; Speirs D. C.; Sabatino A. & Heath M. R.: A synthetic map of the north-west European Shelf sedimentary environment for applications in marine science. Earth System Science Data, 10, 109 130, 2018, https://doi.org/10.5194/essd-10-109-2018, 2018.
- WINTER, C.: Macro scale morphodynamics of the German North Sea coast. In: Journal of Coastal Research, 64, Proceedings of the 11th International Coastal Symposium, 706 710, Szczecin, Poland, ISSN 0749-0208, 2011.
- Zeiler, M.; Schulz-Ohlberg, J. & Figge, K.: Materialinventur an der deutschen Nordseeküste. In: Die Küste, 62, 53 86, 2000.

14. Anhang zum Bericht

Der von den Autoren Andreas Plüß (BAW), Peter Milbradt (smile consult GmbH) und Pia Kolb (BAW) erstellte Anhang "Systemstudien zur Wirkung von stratigraphischen Modellkomponenten in hydro- und morphodynamischen Simulationsmodellen" liegt diesem Bericht als gesondertes Dokument bei.



Autoren

Dr.-Ing. Andreas Plüß

BAW

Wedeler Landstraße 157

22559 Hamburg

Tel.: 040 / 81908417 E-Mail:

andreas.pluess@baw.de

apl. Prof. Dr.-Ing. habil.

Peter Milbradt

smile consult GmbH Schiffgraben 11 30159 Hannover

Tel.:

0511 / 54361742

E-Mail:

milbradt@smileconsult.de

Pia Kolb, M. Sc.

BAW

Wedeler Landstraße 157 22559 Hamburg

Tel.:

040 / 81908487

E-Mail:

pia.kolb@baw.de



Förderkennzeichen:

03KIS123

Projektlaufzeit: 01.01.2019 - 31.12.2021

Kostenneutr. Verlängerung: 01.01.2022 - 31.05.2022



Förderkennzeichen:

03KIS124

Projektlaufzeit:

01.01.2019 - 31.12.2021

Kostenneutr. Verlängerung: 01.01.2022 - 31.05.2022

Gefördert vom



aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages



Hannover und Hamburg, den 04.10.2022

Inhaltsverzeichnis

1.	MOTIVATION UND EINLEITUNG					
•						
2.		RISCHE MODELLUNTERSUCHUNGEN IN FOKUSGEBIETEN				
2.1.	Deutsche Bucht					
	2.1.1.	Delft3D-4 klassisch	6			
	2.1.1.1.	Modellausdehnung und Gebietsdiskretisierung	6			
	2.1.1.2.	Randbedingungen und Simulationszeitraum	7			
	2.1.1.3.	Oberflächensedimentologischer Ansatz / homogener Bodenaufbau	10			
	2.1.1.4.	Stratigraphischer Bodenaufbau	11			
	2.1.2.	Marina	14			
	2.1.2.1.	Modellausdehnung und Berechnungsnetz	14			
	2.1.2.2.	Randbedingungen und Simulationszeitraum	16			
	2.1.2.3.	Analyse der Simulationsläufe	18			
2.2.	Jade-Weser-Ästuar					
	2.2.1.	Delft3D-4 klassisch	21			
	2.2.1.1.	Oberflächensedimentologischer Ansatz / homogener Bodenaufbau	21			
	2.2.1.2.	Stratigraphischer Bodenaufbau	24			
	2.2.2.	UnTRIM ² und SediMorph	26			
	2.2.3.	Marina	33			
	2.2.3.1.	Oberflächensedimentologischer Ansatz	33			
	2.2.3.2.	Stratigraphischer Bodenaufbau	37			
3.	ZUSAMMENFASSUNG					
1	I ITERAT	TURVERZEICHNIS	40			

Abkürzungen

BAW Bundesanstalt für Wasserbau

BAW-HH Bundesanstalt für Wasserbau, Dienststelle Hamburg

BGR Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe

d₅₀ Mediankorndurchmesser [mm]

EasyGSH-DB Verbundprojekt "Erstellung anwendungsorientierter synoptischer Referenzdaten

zur Geomorphologie, Sedimentologie und Hydrodynamik in der Deutschen Bucht"

FBM Funktionales Bodenmodell

MARINA Modellsystem zur Simulation der Hydro- und Morphodynamik in Flüssen,

Seen, Ästuaren und Küstenbereichen

MD-Simulation Morphodynamische Simulation

MF Morphologischer Beschleunigungsfaktor

mFUND Forschungsinitiative Modernitätsfond

SMMS Verbundprojekt "Stratigraphische Modellkomponenten zur Verbesserung von

hochaufgelösten und regionalisierten morphodynamischen Simulationsmodellen"

1. Motivation und Einleitung

Bereits 1971 erstellte HIRANO [1971] das grundlegende Konzept zweier unterschiedlicher vertikaler Schichten, der oberen bodennahen Schicht im Gewässer (*bed load layer*) und der darunter im Boden vorhandenen Schicht (*exchange layer*), wie in Abbildung 1 dargestellt. Konsequent auf die tieferen Bodenschichten angewendet, entstand damit der erste stratigraphische Ansatz hin zu einem inhomogenen vertikalen Bodenaufbau.

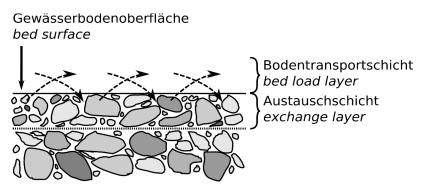


Abbildung 1: Vertikale Bodenschichten nach HIRANO 1971

Ende der 1990er Jahre wurde mit der Entwicklung, Erprobung und Anwendung morphodynamischnumerischer Modellsimulationen begonnen [DE VRIEND et al. 1993; ROELVINK et al. 1994; ZANKE und PLÜß 1996]. Diese Modelle beruhten zunächst auf einfachen Annahmen (2D-Hydrodynamik, vereinfachte Oberflächensedimentbelegung, keine morphologischen Beschleunigungsfaktoren, vergleichsweise einfache Exner-Gleichungen [Exner 1925], wenige Sedimenttransportformeln (feste Grenze für den Beginn der Sedimentbewegung) und simplen Sedimenteigenschaften (z. B. Einkornsediment).

Seitdem wurden in jedem der o. g. Teilbereiche der morphodynamischen Modellansätze große Fortschritte in Richtung naturähnlicher Nachbildung der morphologischen Entwicklungen und der dazu notwendigen Techniken gemacht, so z. B. fraktionierter Sedimenttransport, Ansätze zur Flockenbildung, Einfluss von Rippeln und Dünen (als Transportkörper für Sediment), unterschiedliche Porositäten, u. v. m. Hierzu gehört auch die Berücksichtigung der unterschiedlichen Eigenschaften von Sedimentformationen unterhalb der zu Beginn angesetzten Gewässersohle, beispielsweise der Zusammensetzung, Dicke, Lage und physikalischen Eigenschaften. Der Begriff "Stratigraphie" (aus dem Englischen stratigraphy) wurde geprägt (im Gegensatz zur Terminologie in der Geologie).

So wurden bei den großen Modellsystemen entsprechende stratigraphische Modellansätze umgesetzt (Delft3D [Storms et al. 2007], Telemac/Sisyphe [Merkel und Kopmann 2011] und SediMorph [Malcherek et al. 2005]). Im Rahmen des Verbundprojektes SMMS wurde auch das Modellsystem Marina um eine stratigraphische Modellkomponente erweitert. Alle diese Modellerweiterungen berechnen einen orts- und zeitvariablen Bodenaufbau im Bereich der simulierten morphologischen Veränderungen.

Mit der im Verbundprojekt SMMS geschaffenen stratigraphischen Datenbasis können diese stratigraphischen Modellansätze an naturnahen Szenarien evaluiert werden. Die wesentlichen Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in dem hier vorliegenden Dokument zusammengestellt.

2. Numerische Modelluntersuchungen in Fokusgebieten

2.1. Deutsche Bucht

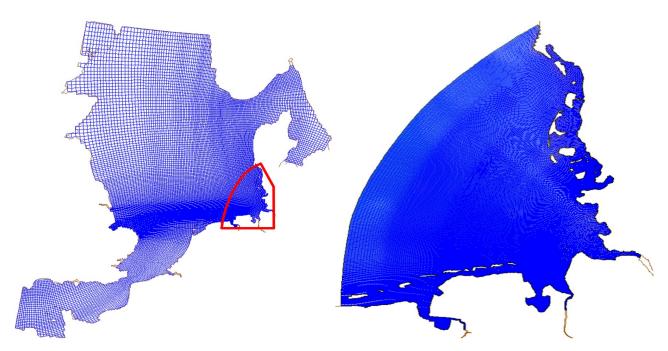
Entsprechend der aufgebauten hydro- und morphodynamischen Simulationsmodelle der Deutschen Bucht konnte die Sensitivität der Modellläufe bzgl. der sedimentologischen Parameter und verwendeten Modellapproximationen abgeschätzt werden. In den folgenden Unterkapiteln werden modellspezifische Untersuchungen vorgestellt.

2.1.1. Delft3D-4 klassisch

Das Open-Source-Modellsystem Delft3D-4 klassisch (https://oss.deltares.nl/web/delft3d, letzter Aufruf 25.08.2022) wird im Rahmen dieser Studie mit den gekoppelten Modulen D-Flow und D-Morphology genutzt.

2.1.1.1. Modellausdehnung und Gebietsdiskretisierung

Das Delft3D-4-Modell (klassisch) ist als genestetes Modell aufgebaut und besteht somit aus einem Nordsee-Modell und einem Deutsche-Bucht-Modell (siehe Abbildung 2). Das Gitternetz des Delft3D-4-Deutsche-Bucht-Modells besteht aus M = 762 / N = 1046 curvilinearen Elementen und umfasst die erweiterte Deutsche Bucht inklusive der Ästuare (volumentreu) von Elbe, Weser und Ems (siehe Abbildung 3).



Randkanten des Berechnungsgitters der Deutschen Bucht, Nesting der Randwerte des Berechnungsgitters aus dem rot umrandet Nordsee-Modell

Abbildung 2: Delft3p-4-Nordsee-Modell

Die Lage des Gewässerbodens wurde sowohl im Deutsche-Bucht- als auch im Nordsee-Modell aus dem Funktionalen Bodenmodell (FBM) erhaltungstreu zum 01.07.2006 übernommen.

Die Randwerte am offenen, seeseitigen Modellrand der Deutschen Bucht stammen aus vorherigen Simulationen eines Nordsee-Modells (Delft3D-4) und werden über ein Nesting auf die offenen Randkanten des Deutsche-Bucht-Modells (siehe Abbildung 3) übertragen.

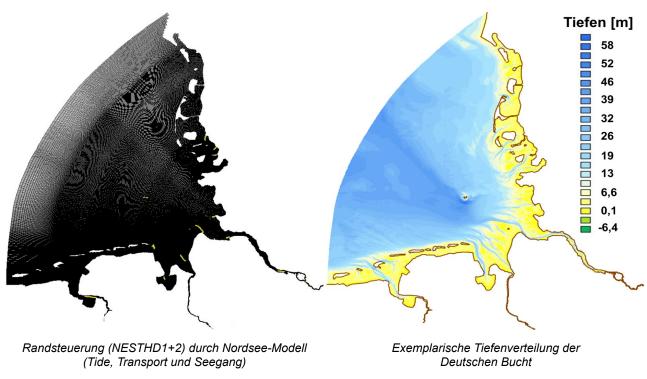


Abbildung 3: Berechnungsnetz Nordsee

2.1.1.2. Randbedingungen und Simulationszeitraum

Als Simulationszeitraum für die hydro- und morphodynamischen Modelluntersuchungen wird der Zeitraum vom 01.01. bis 31.03.2006 gewählt. Die morphodynamische Modellkomponente wurde mittels eines morphologischen Beschleunigungsfaktors (MF) von 4 betrieben, sodass der hydro- (und morpho-)dynamische Simulationszeitraum etwa einem morphodynamischen Zeitraum von einem Jahr entspricht.

Hydro- und meteorologische Randbedingungen

Die hydrodynamischen Randbedingungen, Zuflüsse und Meteorologie entstammen dem validierten und gut dokumentierten Simulationsmodell aus dem Projekt EasyGSH-DB [HAGEN et. al. 2019].

Sedimentologische Randbedingungen

Das morphodynamische Modul D-Morphology berechnet auf der Basis der hydrodynamischen Einwirkung auf den Gewässerboden den Transport der Sedimente und über die Bodenevolutionsgleichung [Exner 1925] die Lage des Gewässerbodens. Für die Modellierung des Sedimenttrans-

portes wird die sedimentologische Zusammensetzung des Gewässerbodens durch 5 Fraktionen diskretisiert:

- 1. Grobsand: \emptyset = 750 μ m / Geschiebetransportberechnung mit der Formel: [VAN RIJN 1993] / Porengehalt n = 0,5 / Trockenrohdichte = (1-n) * 2650 = 1325 kg/m³
- 2. Mittelsand: \emptyset = 375 μ m / Geschiebetransportberechnung mit der Formel: [VAN RIJN 1993] / Porengehalt n = 0,5 / Trockenrohdichte = (1-n) * 2650 = 1325 kg/m³
- 3. Feinsand: \emptyset = 200 μ m / Geschiebetransportberechnung mit der Formel: [VAN RIJN 1993] / Porengehalt n = 0,5 / Trockenrohdichte = (1-n) * 2650 = 1325 kg/m³
- 4. Grobschluff: als Suspensionstransport nach [Partheniades 1965] / ws = 0,0146 m/s / Porengehalt n = 0,8 / Trockenrohdichte = (1-n) * 2650 ≈ 530 kg/m³
- Feinschluff: als Suspensionstransport nach [Partheniades 1965] / ws = 0,0001 m/s / Porengehalt n = 0,8 / Trockenrohdichte = (1-n) * 2650 ≈ 530 kg/m³

Dieselbe Klassenaufteilung wird auch genutzt, wenn der stratigraphische Aufbau des Bodens vorgegeben und simuliert wird. Sowohl die Oberflächensedimentverteilung als auch der vertikale Bodenaufbau wird aus dem FBM erhaltungstreu abgeleitet.

Die **Oberflächensedimentologie** wurde zum 01.07.2006 abgeleitet und wird bei Simulationen ohne geschichteten vertikale Bodenaufbau für den gesamten Bodenkörper verwendet. Um einen Überblick über die Oberflächensedimentverteilung zu erhalten, ist in der Abbildung 4 der Mediankorndurchmesser $d_{\rm 50}$ dargestellt.

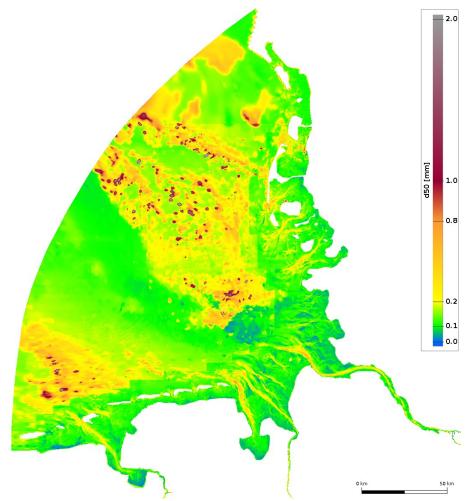


Abbildung 4: Oberflächensedimentbelegung des Deutsche-Bucht-Modells des Jahres 2006, eingefärbt nach dem Mediankorndurchmesser d₅₀

Der **stratigraphische Bodenaufbau** ermöglicht eine wesentlich differenziertere Simulation der morphodynamischen Entwicklungen in Delft3D-4. Die Modellierung des initialen Bodenaufbaus erfolgt durch die Festlegung von Schichten, ausgehend von der Lage des Gewässerbodens (siehe Abbildung 5).

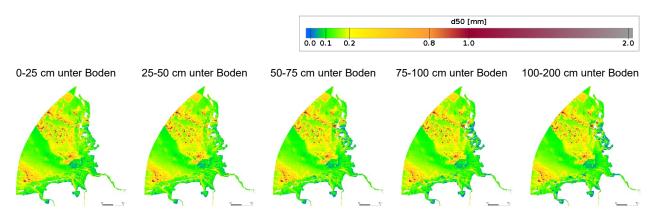


Abbildung 5: Schichten des stratigraphischen Modellansatzes, eingefärbt nach dem Mediankorndurchmesser d₅o

2.1.1.3. Oberflächensedimentologischer Ansatz / homogener Bodenaufbau

Die morphodynamische Modellkomponente von Delett3D-4 kann sowohl mit homogenem als auch geschichtetem Bodenaufbau betrieben werden. Die sedimentologische Bodenzusammensetzung wird im Rahmen dieser Studie durch die in Abschnitt 2.1.1.2. beschriebenen 5 Klassen modelliert. Damit das morphologische Einschwingen nicht als dominantes Signal die Plausibilität der Auswertungen beeinträchtigt, wird im Weiteren der (hydrodynamische) Zeitraum vom 31.03. bis 30.05.2006 ausgewertet, was durch den MF von 4 zu einem morphologischen Zeitraum von 8 Monaten führt.

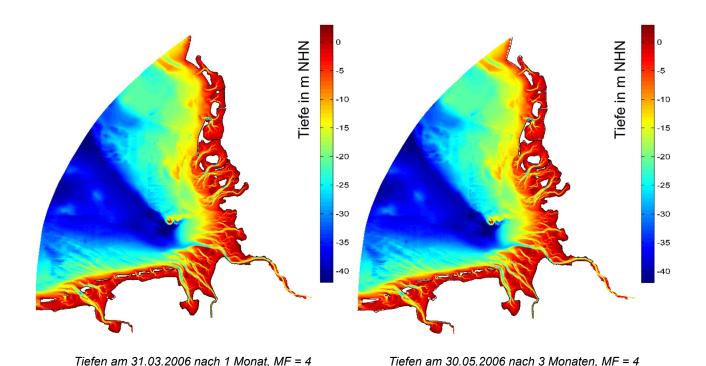


Abbildung 6: Simulation mit Oberflächensedimentbelegung und homogenem, vertikalen Bodenaufbau

Die aus den beiden Tiefenverteilungen aus Abbildung 6 bestimmbare 8-monatige Bilanzhöhe kann in Abbildung 7 abgelesen werden. Gut erkennbar sind die hochdynamischen Ästuare und Seegatten zwischen den Inseln.

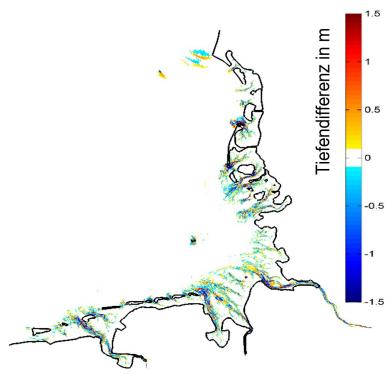
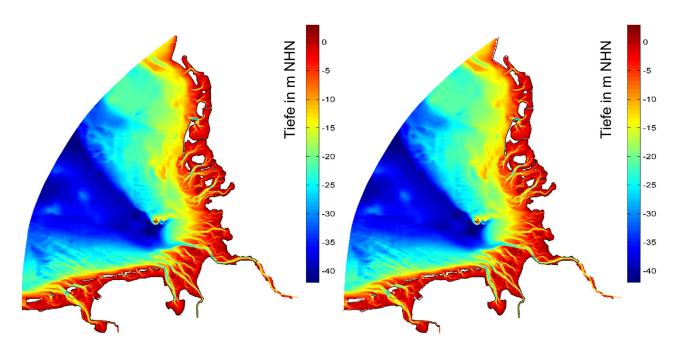


Abbildung 7: Differenz der Tiefen (MD-Simulation) 30.05. minus 31.03.

2.1.1.4. Stratigraphischer Bodenaufbau

Beim stratigraphischen Modellansatz wird eine vorgegebene Anzahl von vertikalen Sedimentschichten als initiale Sedimentbelegung vorgegeben. Für diese Systemstudie wurden 5 vertikale Sedimentschichten mit den Grenzen 0 - 25 cm, 25 - 50 cm, 50 - 75 cm, 75 - 100 cm und 100 - 200 cm unterhalb der Oberkante des Gewässerbodens (siehe Abbildung 5) vorgegeben.

Die durch die morphodynamische Simulation bei stratigraphischer Sedimentvorgabe berechneten Tiefenverteilungen jeweils zum 31.03. und 30.05.2006 sind für die gesamte Deutsche Bucht in Abbildung 8 dargestellt.



Tiefen am 31.03.2006 nach 1 Monat, MF = 4

Tiefen am 30.05.2006 nach 3 Monaten, MF = 4

Abbildung 8: Simulation mit stratigraphischer Sedimentvorgabe

Aus der Differenz der berechneten Bathymetrie zwischen dem 31.03. und dem 30.05. wird die morphologische Entwicklung mit stratigraphischem Bodenaufbau deutlich (siehe Abbildung 9). Insbesondere in den Bereichen starker Strömungen (z. B. Wattströme, Tiderinnen und Seegatten) sind deutliche Vertiefungen (blau) erkennbar. Seitlich davon werden Auflandungstendenzen (gelb bis rot) sichtbar.

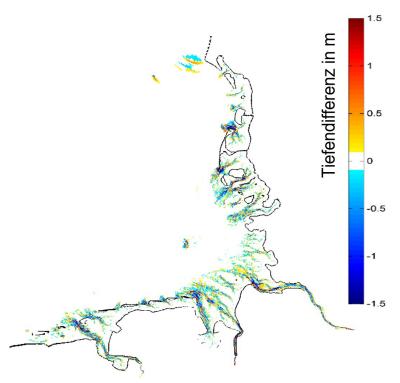


Abbildung 9: Differenz der mit stratigraphischer Vorgabe simulierten Tiefen 30.05. minus 31.03.2006

Der Vergleich der sedimentologischen Ansätze erfolgt jeweils über die berechneten morphologischen Änderungen zwischen dem 31.03. und dem 30.05. (siehe Abbildung 7 und Abbildung 9). Als direkter flächenhafter Effekt der unterschiedlichen Sedimentvorgaben auf die Tiefenentwicklung wird die Differenz zwischen der 2-monatigen Tiefenänderung (stratigraphischer minus homogener Bodenaufbau) berechnet (siehe Abbildung 10). Erkennbar sind die größeren Unterschiede in den Rinnen beim Ansatz mit homogenem Bodenaufbau im Vergleich zum Ansatz mit stratigraphischer Komponente. Die Farben bedeuten hierbei:

- blau: verringerte Sedimentation oder erhöhte Erosion
- rot: verringerte Erosion oder erhöhte Sedimentation

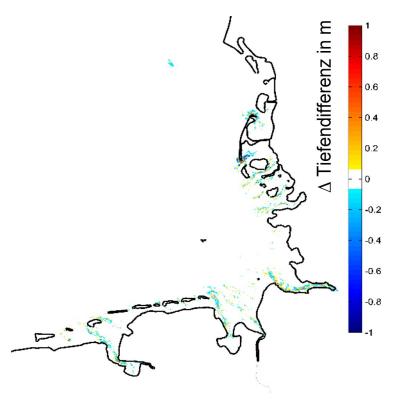


Abbildung 10: Differenz der 2-monatigen Tiefenentwicklung mit und ohne vorgegebener Stratigraphie

2.1.2. MARINA

Das holistische Modellsystem Marina [Milbradt 2022] ist eine Entwicklung der smile consult GmbH und wurde so entworfen, dass verschiedene physikalische Prozesse aus dem Bereich des Umweltingenieurwesens gekoppelt simuliert werden können.

2.1.2.1. Modellausdehnung und Berechnungsnetz

Die Modelluntersuchungen für Marina wurden mit dem Nordsee-Modell durchgeführt. In den projektspezifischen Fokusgebieten erfolgten die Analysen auf demselben Modell. Die numerische Approximation der zugrundeliegenden Transport- und Erhaltungsgleichungen wird mit stabilisierten Finiten Elementen auf Dreieckszerlegungen durchgeführt.

In der Abbildung 11 ist die Ausdehnung des genutzten Nordsee-Modells dargestellt. Die Modelldiskretisierung besteht aus ca. 583 Tsd. Knoten und ca. 300 Tsd. Dreieckselementen. Hierbei reicht die Auflösung von ca. 12 km in den tiefen Regionen der Nordsee bis hin zu 12 m in den Küstennahbereichen und Ästuaren. Aus dem FBM wurde zum 01.01.2012 die Topographie des Meeresbodens auf die Knoten des Berechnungsnetzes volumentreu übertragen.

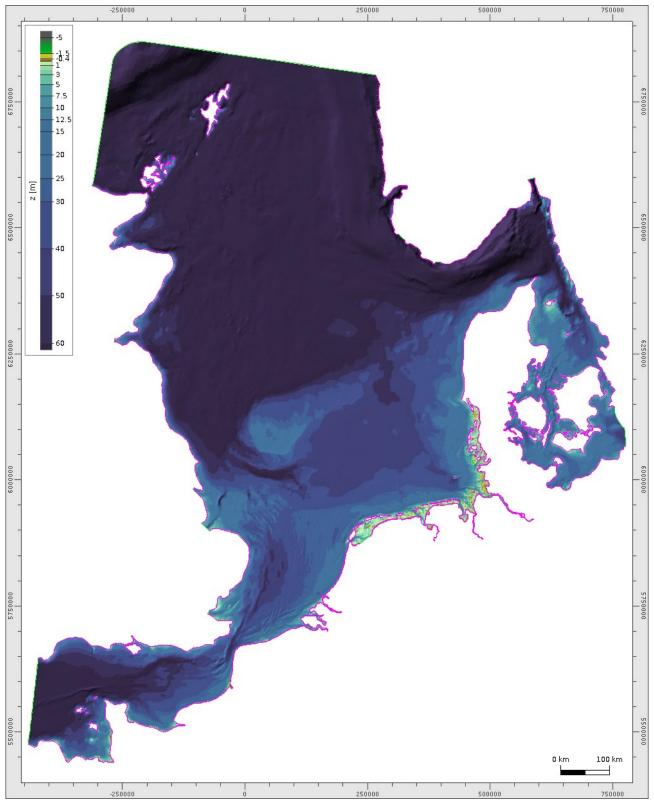


Abbildung 11: Ausdehnung des Nordsee-Modells mit integrierter Modelltiefe zum 01.01.2012

2.1.2.2. Randbedingungen und Simulationszeitraum

Als Simulationszeitraum für die hydro- und morphodynamischen Simulationen wird der Zeitraum vom 01.01. bis 01.07.2012 gewählt. Die morphodynamische Modellkomponente wurde mittels eines morphologischen Faktors von 10 beschleunigt, sodass der hydro- (und morpho-) dynamische Simulationszeitraum 01.01. bis 01.07.2012 etwa einem morphodynamischen Zeitraum von 5 Jahren entspricht.

Hydro- und meteorologische Randbedingungen

Die hydrodynamischen Randbedingungen, die fluviatilen Zuflüsse und die Meteorologie entstammen dem validierten und dokumentierten Simulationsmodell aus dem *mFUND*-Projekt EasyGSH-DB [Hagen et. al. 2019].

Sedimentologische Randbedingungen

Die morphodynamische Modellkomponente von Marina berücksichtigt die sedimentologischen Eigenschaften in Form von parametrisierten Kornsummenkurven und verändert diese während der Simulation. Hierbei werden die Kornsummenkurven mittels der statistischen Kornparameter $d_{min} \leq d_{50} \leq d_{max}$, der Sortierung (σ) und Schiefe (sk(t)) parametrisiert.

Die **Oberflächensedimentologie** wurde zum 01.01.2012 aus dem FBM abgeleitet (siehe Abbildung 12).

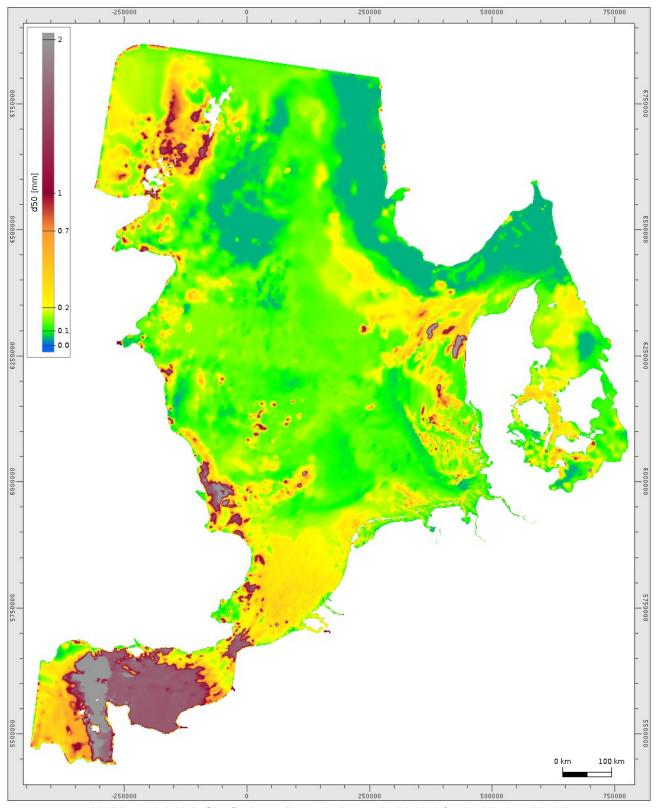


Abbildung 12: Initiale Oberflächensedimentologie zum 01.01.2012 für das Nordsee-Modell, eingefärbt nach dem Mediankorndurchmesser d_{50}

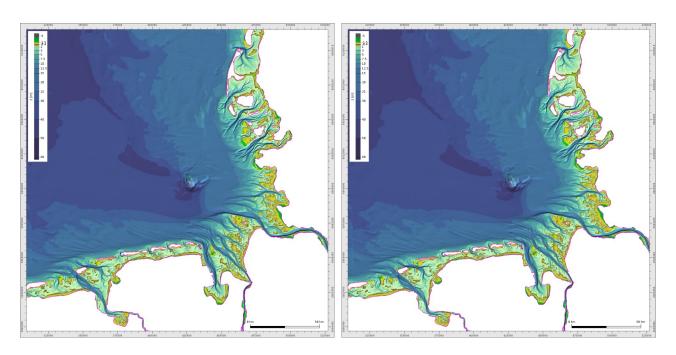
Die Vorgabe des **stratigraphischen Bodenaufbaus** erfolgt in Marina auf der Basis eines direkten Exports aus dem FBM (siehe Abschlussbericht SMMS). Hierdurch kann an jedem Berechnungsknoten eine unterschiedliche Anzahl an *Stack*-Einträgen auftreten. Eine visuelle Darstellung für die gesamte Nordsee ist hierdurch nicht möglich.

2.1.2.3. Analyse der Simulationsläufe

Für das gesamte Nordsee-Modell wurde eine voll gekoppelte Wellen-Tide-Morphodynamik-Simulation mit vorgegebener Oberflächensedimentologie über ein halbes Jahr durchgeführt. Hierbei wurde beim rein oberflächensedimentologischen Ansatz nur die initiale Oberflächensedimentologie vorgegeben und während der Simulation ein Bodenaufbau mitprotokolliert.

Oberflächensedimentologischer Ansatz

Beim oberflächensedimentologischen Ansatz hat sich die Sedimentzusammensetzung und die Lage des Gewässerbodens über den morphodynamischen Simulationszeitraum von ca. 5 Jahren erheblich verändert (siehe Abbildung 13). Im Zoom der Deutschen Bucht lassen sich die Änderungen nur schwer erkennen. Aus diesem Grunde werden die simulierten Bilanzhöhen (zende minus zetart) betrachtet.



Startbathymetrie 2012

simulierte Endbathymetrie 2017

Abbildung 13: Gewässerbettlage in der Deutschen Bucht

Ein erster visueller Vergleich kann auf der Basis der gemessenen und der simulierten Bilanzhöhe, in den Abbildungen 14 und 15 dargestellt, vorgenommen werden.

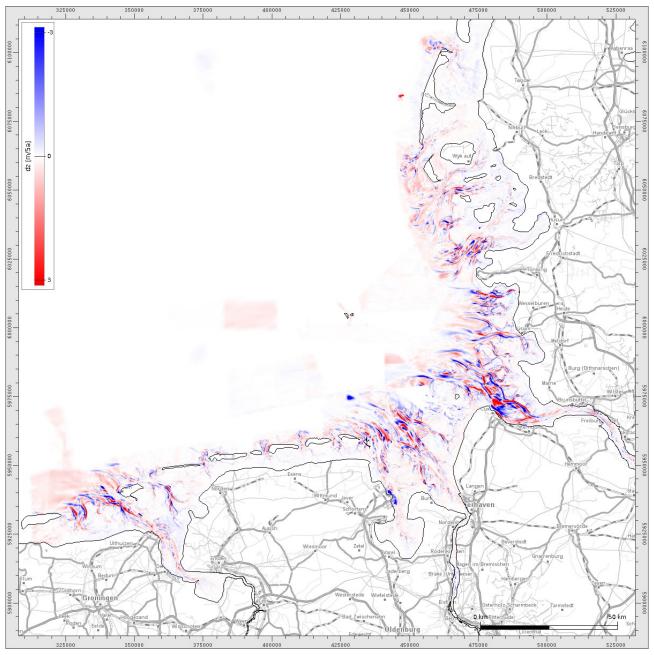


Abbildung 14: Datenbasierte Bilanzhöhe 2012 bis 2017 (z₂₀₁₇ minus z₂₀₁₂) [vor OpenStreetMap]

Sowohl die Bilanzhöhen aus den Vermessungsdaten als auch die aus der morphodynamischen Simulation weisen Gebiete hoher Aktivitäten im Bereich der Ästuare und Seegatten auf.

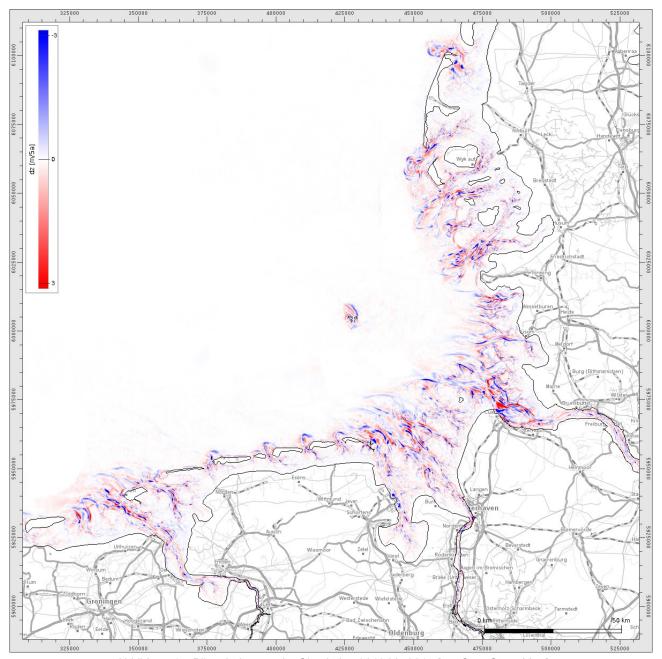


Abbildung 15: Bilanzhöhe aus der Simulation 2012 bis 2017 [vor OpenStreetMap]

Stratigraphischer Ansatz

Das Modellsystem Marina berechnet schon beim rein oberflächensedimentologischen Ansatz die Veränderung der Kornzusammensetzung in Abhängigkeit der Sedimentparameter, bathymetrischen Entwicklung und hydrodynamischen Größen. Die erheblichen Rechenzeiten der Seegang-Tide-Morphodynamik-gekoppelten Simulationen des Nordsee-Modells haben es verhindert, das gesamte Modell auch noch mit vorgegebener Stratigraphie zu simulieren.

Modelluntersuchungen für ein Detailmodell des Jade-Weser-Ästuars werden in Kapitel 2.2.3. dargestellt.

2.2. Jade-Weser-Ästuar

Die deutschen Ästuare gehören zu den morphologisch aktivsten Bereichen der Deutschen Bucht. Als Fokusgebiet für ein Ästuarsystem wurde im Rahmen von SMMS das Jade-Weser-Ästuar gewählt, wobei die Außenästuare näher betrachtet wurden.

2.2.1. Delet 3D-4 klassisch

Die im Folgenden dargestellten Auswertungen basieren auf den Simulationen mit dem Deutsche-Bucht-Modell wie es in Abschnitt 2.1.1.1. beschrieben wird.

2.2.1.1. Oberflächensedimentologischer Ansatz / homogener Bodenaufbau

Beim homogenen Bodenaufbau wird die oberste vertikale Sedimentschicht (die obersten 0 - 25 cm bis zur Geländeoberkante, siehe Abbildung 16) als initiale Sedimentbelegung bezüglich der Zusammensetzung und der horizontalen Verteilung angesetzt.

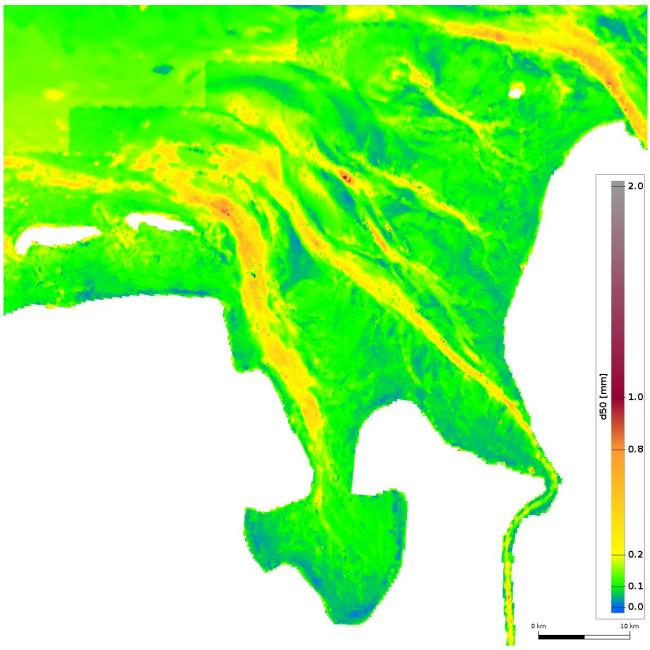


Abbildung 16: d₅₀-Darstellung der Oberflächensedimentologie in der Jade- / Wesermündung

Die berechneten Tiefenverteilungen zum 31.03. und 30.05.2006 für den Bereich der Jade- / Wesermündung bei homogenem Bodenaufbau sind in Abbildung 17 und die zugehörigen Erosions- und Sedimentionsbereiche (Bilanzhöhen) in Abbildung 18 dargestellt.

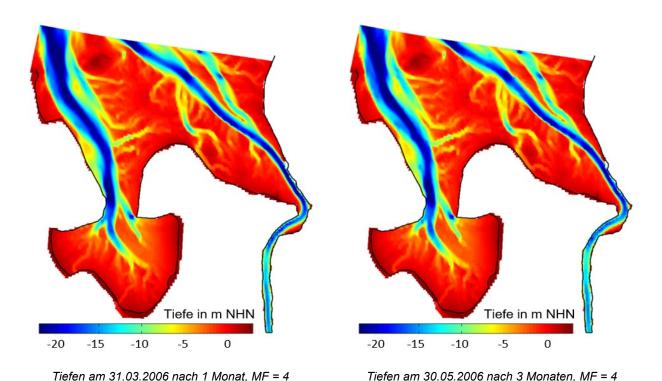


Abbildung 17: Simulation mit Oberflächensedimentbelegung

Veränderungen in der Lage des Gewässerbodens lassen sich in den Bereichen starker Strömungen (Jade-Fahrwasser, Weser: Blexer Bogen / Container Terminal Bremerhaven) mit deutlichen Vertiefungen (blau) erkennen. Seitlich davon werden Auflandungstendenzen (gelb - rot) sichtbar, was durch eine laterale Verlagerung der Rinnen zu erklären ist. Auf den Wattflächen sind keine wesentlichen Veränderungen ersichtlich (siehe Abbildung 18).

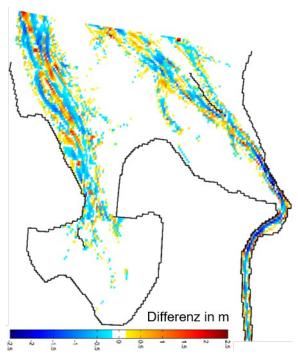


Abbildung 18: Differenz der Tiefen (bei homogenem Bodenaufbau) 30.05. minus 31.03.2006 für die Jade- / Wesermündung

2.2.1.2. Stratigraphischer Bodenaufbau

Der Bodenaufbau wurde bei den folgenden Simulationen in Form von 5 Schichten initialisiert (siehe Abbildung 19). Insbesondere in der untersten Schicht sind bereits die Interpolationen zwischen den Bohrkernen der Basisstratigraphie zu erkennen.

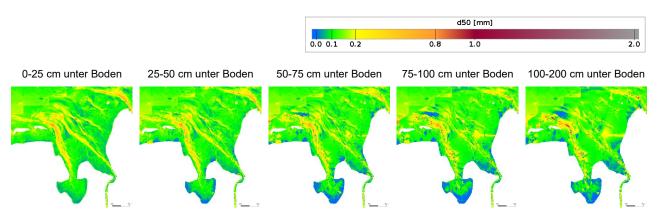
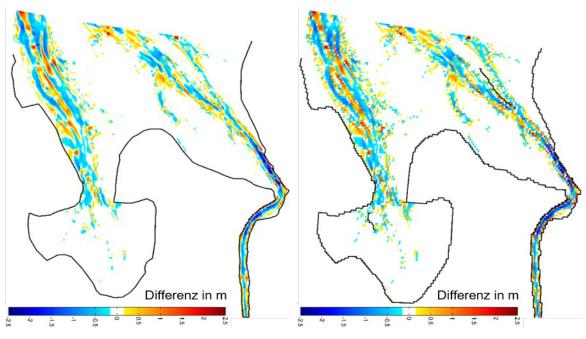


Abbildung 19: d50-Verteilung der obersten 5 Schichten aus dem 3D-Bodenmodell (Jade- / Wesermündung)

Die durch die morphodynamische Simulation bei stratigraphischer Sedimentvorgabe berechneten Tiefenverteilungen jeweils zum 31.03. und 30.05.2006 unterscheiden sich in der bildlichen Darstellung nicht wesentlich von denen in Abbildung 17. Der Unterschied von Erosion und Sedimentation mit und ohne Vorgabe der Stratigraphie ist in Abbildung 20 dargestellt.



MD-Simulation mit vorgegebener Stratigraphie

MD-Simulation mit homogenem Bodenaufbau

Abbildung 20: Differenz der Tiefen: 30.05. minus 31.03.2006 für die Jade- / Wesermündung

Erst aus der Differenz der Differenzen (siehe Abbildung 21) lassen sich die Unterschiede zwischen den Simulationen mit homogenem oder geschichtetem Bodenaufbau aufzeigen. Eine Interpretation der veränderten Bodenevolution bei Berücksichtigung der stratigraphischen Modellkomponente ist extrem schwierig. In der Abbildung 21 ist die Differenz der Differenzen (Bodenevolution mit Stratigraphie minus Bodenevolution ohne Stratigraphie) im Bereich des Jade-Weser-Ästuars dargestellt. Die Farben bedeuten hierbei:

- · blau: verringerte Sedimentation oder erhöhte Erosion
- rot: verringerte Erosion oder erh
 öhte Sedimentation

Dass die Berücksichtigung einer stratigraphischen Modellkomponente einen relevanten Einfluss auf die Bodenevolution hat, wird jedoch schon nach diesem recht kurzen Simulationszeitraum sehr deutlich.

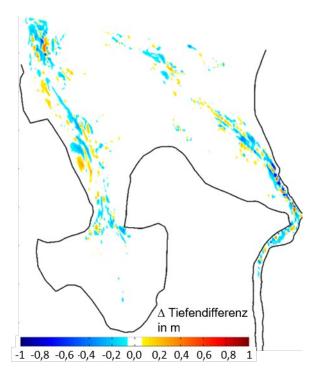


Abbildung 21: Differenz der 2-monatigen Tiefenentwicklung mit und ohne vorgegebener Stratigraphie für die Jade- / Wesermündung

2.2.2. UnTRIM2 und SediMorph

Die Modellsysteme UnTRIM² [Casulli 2009; Casulli and Stelling 2011; Sehili et al. 2014] und SediMorph [Malcherek et al. 2005] gehören zu den Standardwerkzeugen der BAW zur Beantwortung wasserbaulicher Fragestellungen im Küsteningenieurwesen.

Die Modelluntersuchungen mit dem Simulationssystem UnTRIM² und SediMorph erfolgten auf einem Detailmodell des Jade-Weser-Ästuars. Das Modellgebiet umfasst Unterweser, Außenweser sowie Jadebusen und wird durch Dreiecks- und Viereckselemente im Berechnungsgitter diskretisiert (siehe Abbildung 22). Der stratigraphische Bodenaufbau wurde aus dem FBM (siehe Abschlussbericht SMMS) zum 01.09.2015 übertragen.

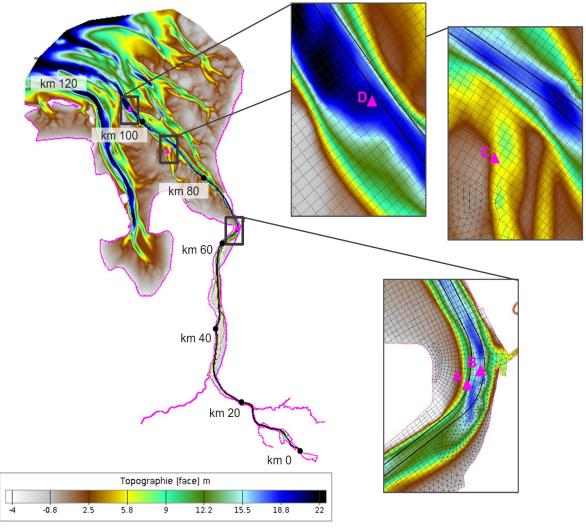


Abbildung 22: Modellgebiet Jade-Weser-Ästuar und Position der Punkte A bis D für die Darstellung der Entwicklung der Bodenschichten

Als Simulationszeitraum wurde ein Zeitraum von 6 Monaten (September 2015 bis Februar 2016) gewählt.

Für die morphodynamischen Simulationen wurde die Sedimentzusammensetzung in 7 Kornklassen diskretisiert:

1	sehr grober Grobsand	Ø	=	1500,0 µm / Geschiebetransport
2	Grobsand	Ø	=	750,0 µm / Geschiebetransport
3	Mittelsand	Ø	=	375,0 µm / Geschiebetransport
4	Feinsand	Ø	=	187,5 µm / Geschiebetransport
5	sehr feiner Sand	Ø	=	94,0 µm / Geschiebetransport
6	Schluff	Ø	=	23,5 µm / Suspensionstransport
7	Washload	Ø	=	12,0 µm / Suspensionstransport

Neben den Modelluntersuchungen mit homogenem Bodenaufbau (im Weiteren als 2D Boden bezeichnet) wurde auch eine hydro- und morphodynamische Simulation mit vorgegebenem stratigraphischen Bodenaufbau (3D Boden) durchgeführt.

Der stratigraphische Bodenaufbau bestand aus maximal 20 Schichten, wobei die Sedimentzusammensetzung in jeder Schicht durch 7 Kornklassen diskretisiert wurde.

Nachfolgend werden Ergebnisse der beiden Rechenläufe (2D Boden vs. 3D Boden) verglichen. Betrachtet wurden zunächst der d_{50} der Austauschschicht (= oben liegendes, für den Transport zur Verfügung stehendes Sediment) zu Beginn und am Ende des Simulationszeittraumes (siehe Abbildung 24) sowie die simulierten Änderungen in der Lage des Gewässerbodens (siehe Abbildung 25).

In Bezug auf den Korndurchmesser in der Austauschschicht lassen sich keine großen Unterschiede zwischen den Rechnungen mit 2D Boden vs. 3D Boden feststellen. Bei der Rechnung mit 2D Boden ist der simulierte d_{50} dem Ausgangszustand etwas ähnlicher als bei der Rechnung mit 3D Boden. Das könnte daran liegen, dass sich die Sedimentbelegung mit 2D Boden nur sehr langsam durch sich einmischende Sedimente ändern kann.

Morphologische Trends sind bei Berechnung mit 3D statt 2D Boden deutlich weniger stark ausgeprägt. Insbesondere tritt mit 2D Boden teilweise stärkere Erosion auf. An den betroffenen Stellen liegen feine Sedimente an der Oberfläche. Mit 2D Boden werden diese auf den gesamten Boden übertragen, sodass keine Bremsung der Erosion durch tiefer liegende, gröbere Sedimente auftreten kann.

In der Abbildung 26 kann die Veränderung des Bodenaufbaus an den in Abbildung 22 dargestellten ausgewählten Punkten A bis D abgelesen werden. Hier werden die Unterschiede zwischen den Rechnungen mit 2D Boden und 3D Boden noch deutlicher. Die obere Zeile zeigt jeweils den Aufbau des Bodens zu Beginn der Rechnungen (0 Tage). Die obersten 20 cm unter der Gewässersohle sind jedes Mal mit derselben Oberflächensedimentverteilung belegt. Darunter gibt es teilweise große Unterschiede. An Punkt B liegen beispielsweise an der Oberfläche schluffige Fraktionen (Us) und darunter sandige Fraktionen mit Schluffanteil (Su2 und Su3). Hier ermöglicht die Vorgabe des 3D Bodens mit stratigraphischen Informationen eine detailliertere und korrektere Repräsentation des Bodens.

In der Abbildung 26 wurden die Sedimente der Bodenschichten gemäß der Geologischen Kartieranleitung der BGR [Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe 2002] klassifiziert. Hierbei wurde eine Unterteilung in Ton "T" (Korndurchmesser < 0,002 mm), Schluff "U" (Korndurchmesser 0,002 - 0,063 mm) und Sand "S" (Korndurchmesser 0,063 - 2 mm) vorgenommen (siehe Abbildung 23).

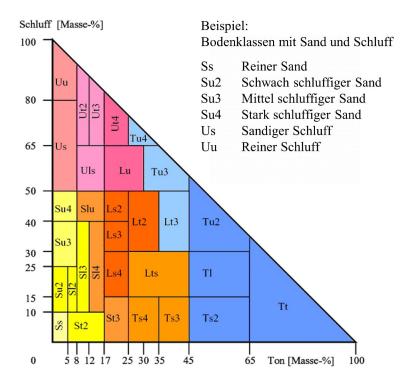


Abbildung 23: Bodenklassen mit Schluff, Ton und Sand nach Geologischer Kartieranleitung [Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe 2002]

Die unterschiedliche Vorgabe der Bodensedimente bewirkt deutliche Unterschiede in der morphologischen Entwicklung. An Punkt B beispielsweise tritt im Fall eines 2D Bodens starke Erosion auf, weil der gesamte Boden mit Schluff aufgefüllt ist und dieser immer wieder in die Austauschschicht eingemischt wird. Im Fall eines 3D Bodens wird die Erosion verlangsamt, wenn Schichten mit gröberen Sedimenten erreicht werden.

An Punkt A wird Sedimentation beobachtet. Das Sediment, welches sich am Boden absetzt, ist gröber (Ss, Su2) als das Sediment aus der Oberflächensedimentverteilung (Su3). Bei der Rechnung mit 2D-Boden "vermischt" sich dieses Sediment mit dem gesamten Boden. Bei der Rechnung mit 3D-Boden werden die Informationen in neuen Bodenschichten gespeichert, sodass die Entstehungsgeschichte des Bodens nachvollzogen werden kann und der Aufbau des Bodens detaillierter beschrieben wird. Wenn sich die stratigraphischen Bodenschichten nur in tiefen Lagen (Punkt C) oder gar nicht (Punkt D) vom Oberflächensediment unterscheiden und sich auch nur Sediment mit denselben Eigenschaften absetzt, sind an den entsprechenden Punkten nur geringe Unterschiede beobachtbar (siehe Abbildung 26).

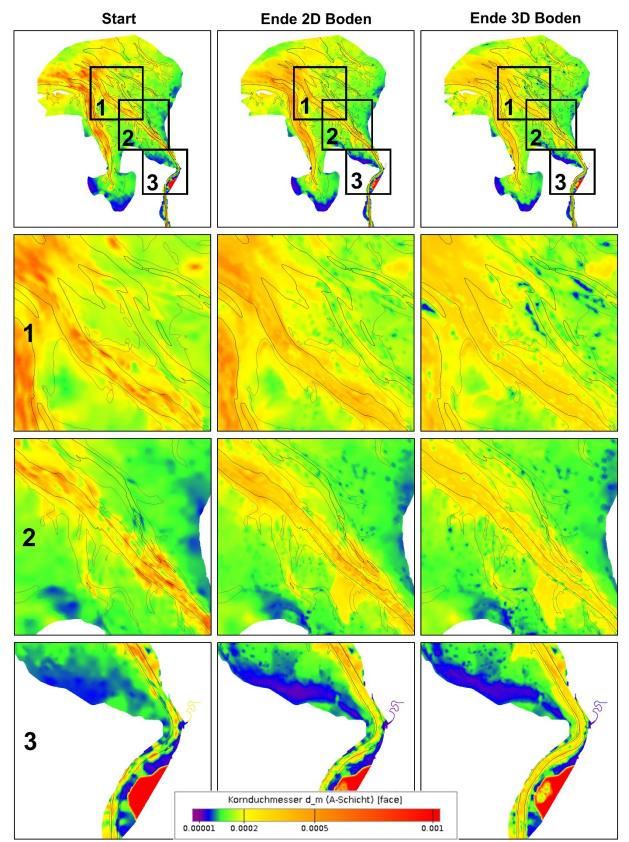


Abbildung 24: Mittlerer Korndurchmesser [m] in der Austauschschicht zu Beginn der Rechnung (links) und am Ende mit 2D Boden (Mitte) vs. 3D Boden (rechts) in der Weser für die Abschnitte Tegeler Plate (1), Wurster Arm und Fedderwarder Priel (2) sowie Blexer Bogen (3)

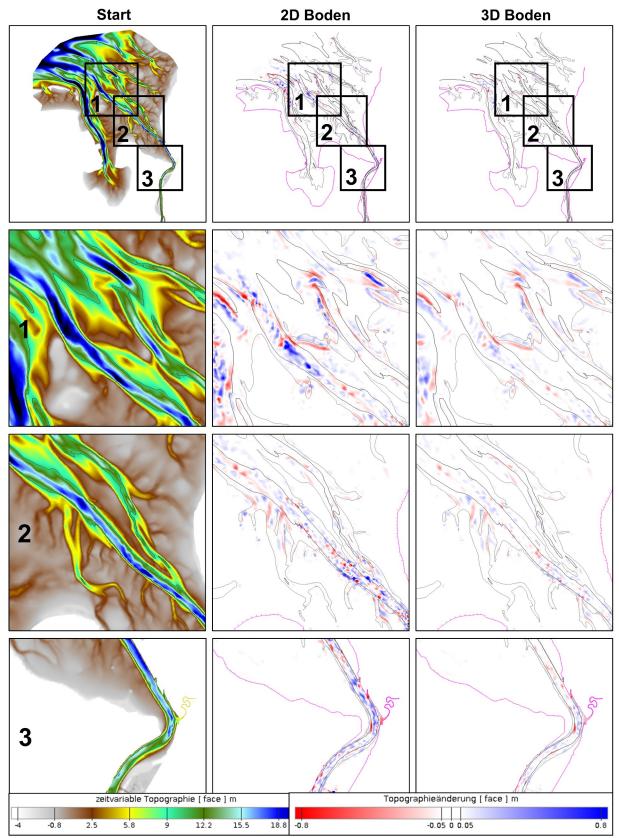


Abbildung 25: Ausgangsbathymetrie (links) und morphodynamische Entwicklung mit 2D Boden (Mitte) vs. 3D Boden (rechts) in der Weser für die Abschnitte Tegeler Plate (1), Wurster Arm und Fedderwarder Priel (2) sowie Blexer Bogen (3)

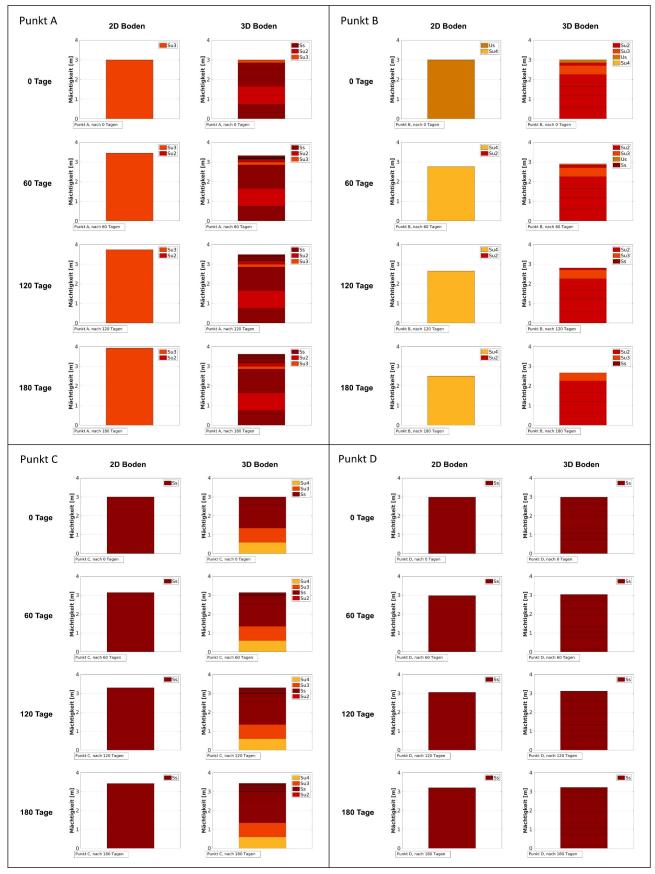


Abbildung 26: Veränderung des Bodenaufbaus an ausgewählten Punkten

2.2.3. MARINA

Auch die Auswertungen für das Jade-Weser-Ästuar basieren im Wesentlichen auf den Modellrechnungen des Nordsee-Modells. Zunächst werden die simulierten und datenbasierten Ergebnisse miteinander verglichen.

2.2.3.1. Oberflächensedimentologischer Ansatz

Das Simulationsmodell berechnet bereits auf der Basis einer initialen Oberflächensedimentologie deren Veränderung über die Zeit. Nach Ende der hydro- und morphodynamischen Simulation (mit einem MF von 10 spiegelt dies eine morphologische Entwicklung über 5 Jahre wider) ergibt sich die Sedimentverteilung wie auf der rechten Seite der Abbildung 27 dargestellt.

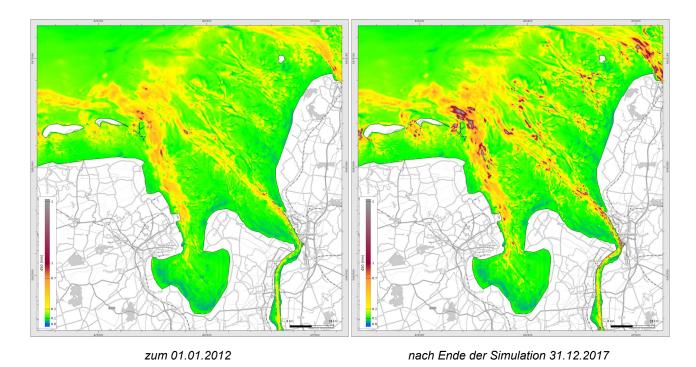
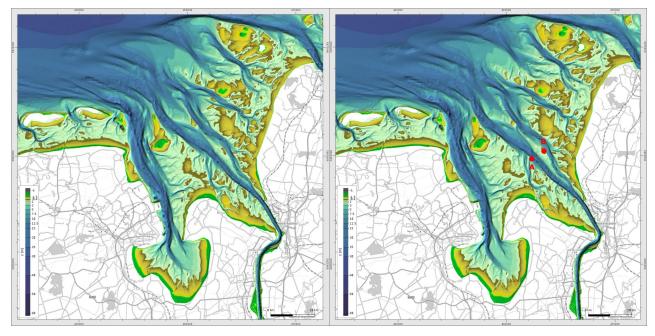


Abbildung 27: Darstellung des Mediankorndurchmessers d50 der Oberflächensedimentologie [vor OpenStreetMap]

Die leichte Überschätzung der morphologischen Reaktion (siehe Abbildung 27 und Abbildung 29 jeweils rechte Seite) ist sicher auch dem gewählten recht großen MF von 10 zu schulden. Nicht zuletzt wurden die Simulationen ohne Berücksichtigung von Unterhaltungsbaggerungen durchgeführt.



zum 01.01.2012

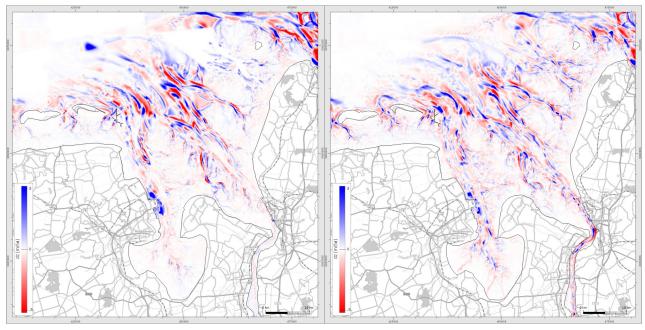
nach Ende der Simulation 31.12.2017

Abbildung 28: Bathymetrie (MF 10) [vor OpenStreetMap]

Das Auffüllen der Baggerlöcher in unmittelbarer Nähe des Jade-Weser-Ports ist in beiden Bilanzdarstellungen gut zu erkennen. In den Abbildung 29 und Abbildung 32 zeigen die Farben

rot: Erosion undblau: Sedimentation

an.



Vermessungen

Simulation

Abbildung 29: Bathymetrische Entwicklung über 5 Jahre [vor OpenStreetMap]

Schon bei der morphodynamischen Simulation ohne stratigraphische Modellkomponente mit initialer Oberflächensedimentologie kann bereits der aktive Bodenraum mitprotokolliert werden. Exemplarisch ist für die in Abbildung 28 gekennzeichneten Punkte A und B im Folgenden der mitprotokollierte Bodenaufbau dargestellt. Hierbei liegt der Punkt A in einem morphologisch sehr aktiven Bereich, welcher zu Sedimentation tendiert (siehe Abbildung 30). Der virtuelle Bohrkern am Punkt B zeigt kaum Veränderungen in der Höhe und Bodenzusammensetzung, da dieser auf einer relativ stabilen Wattfläche liegt (siehe Abbildung 31).

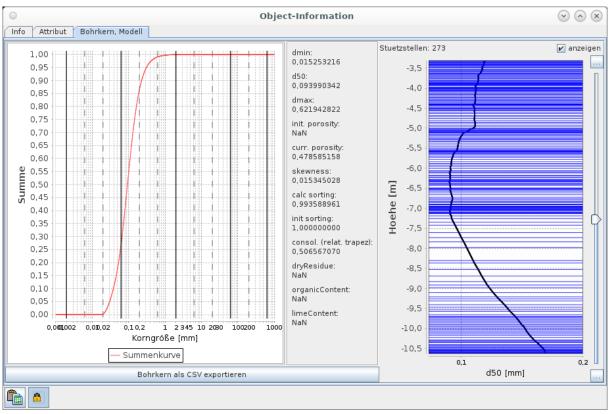


Abbildung 30: Protokollierter Bodenaufbau aus dem Simulationslauf ohne vorgegebenen Bodenaufbau am Punkt A

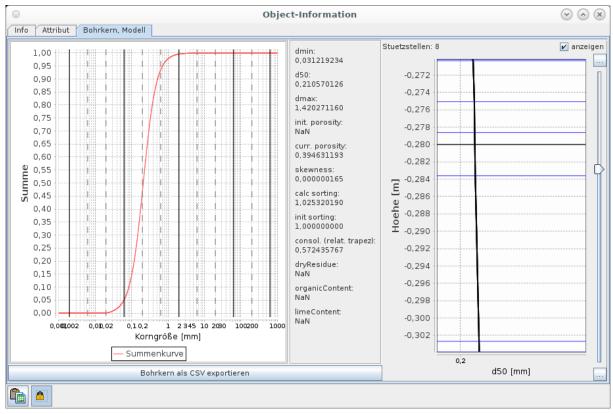
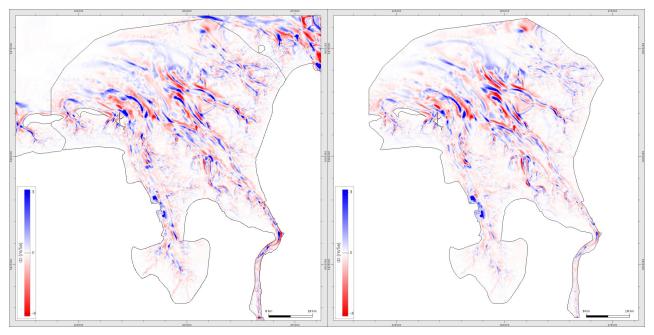


Abbildung 31: Protokollierter Bodenaufbau aus dem Simulationslauf ohne vorgegebenen Bodenaufbau am Punkt B

2.2.3.2. Stratigraphischer Bodenaufbau

Durch die in SMMS in Marina implementierte stratigraphische Modellkomponente kann nun auch ein Bodenaufbau initialisiert werden. Hierzu wurde für ein Jade-Weser-Ausschnittsmodell eine analoge morhodynamische Simulation mit stratigraphischer Modellkomponente durchgeführt. Die morphologischen Veränderungen über den gesamten Simulationszeitraum sind sehr ähnlich und als Differenzen in der Abbildung 32 dargestellt. Die Änderungen mit stratigraphischer Komponente könnten als nicht so kontrastreich interpretiert werden.



ohne stratigraphische Komponente

mit stratigraphischer Komponente

Abbildung 32: Bathymetrische Entwicklung über 5 Jahre

Eine Interpretation der veränderten Bodenevolution bei Berücksichtigung der stratigraphischen Modellkomponente im Modellsystem Marina ist extrem schwierig. In der Abbildung 33 ist die Differenz der Differenzen (Bodenevolution mit Stratigraphie minus Bodenevolution ohne Stratigraphie) dargestellt. Die Farben bedeuten hierbei:

- rot: verringerte Sedimentation oder erhöhte Erosion
- blau: verringerte Erosion oder erhöhte Sedimentation

Dass die Berücksichtigung einer stratigraphischen Modellkomponente einen relevanten Einfluss hat, wird jedoch deutlich.

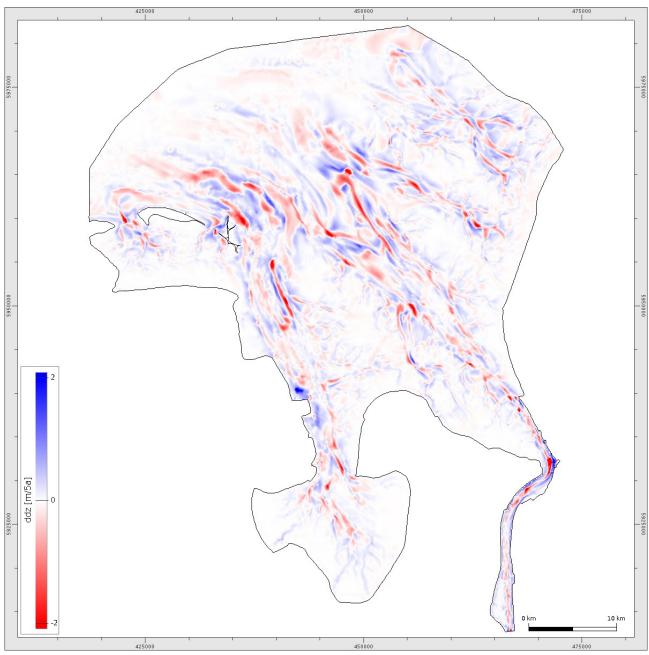


Abbildung 33: Veränderung der Bodenevolution bzgl. der Berücksichtigung der stratigraphischen Modellkomponente im Modellsystem Marina

3. Zusammenfassung

Die Berücksichtigung stratigraphischer Modellkomponenten in den 3 eingesetzten hydro- und morphodynamischen Simulationsmodellen hat einen signifikanten Einfluss auf die simulierte Bodenevolution und zugehörigen sedimentologischen Eigenschaften. Dieses konnte an sehr unterschiedlichen Anwendungsszenarien:

- ohne morphologische Beschleunigung über einen Zeitraum von 6 Monaten
- mit moderater morphologischer Beschleunigung (MF 4) und einem daraus resultierenden morphologischen Zeitraum von 8 Monaten
- mit hoher morphologischer Beschleunigung (MF 10) und einem daraus resultierenden morphologischen Zeitraum von 5 Jahren

und Modellausdehnungen:

- · gesamte Nordsee
- Deutsche Bucht
- Jade-Weser-Ästuar

dargestellt werden.

Mit der Verfügbarkeit zeitvarianter Oberflächensedimentologien, ergänzend zu den bathymetrischen Modellen und Bodenformen, ergeben sich neue Herausforderungen bzgl. der Plausibilisierung prozessbasierter morphodynamischer Simulationsmodelle.

Inwieweit auch der Bodenaufbau und dessen Veränderung zur Ergebnisplausibilisierung herangezogen werden kann, muss im Weiteren noch untersucht werden.

Die prozessbasierten hydro- und morphodynamischen Modelluntersuchungen haben das große Potential der stratigraphischen Modellkomponenten bei geeigneter Datenlage aufgezeigt. Mithilfe der stratigraphischen Modellkomponenten können in Zukunft die hydro- und morphodynamischen Simulationsmodelle im Rahmen der Planung und Umsetzung von Küstenschutz- und Unterhaltungsmaßnahmen sowie in Forschungsprojekten noch besser eingesetzt werden.

4. Literaturverzeichnis

- AVS: Advanced Visual Systems Incorporation: AVS Developers Guide. Waltham, 1992.
- Casulli, V.: A high-resolution wetting and drying algorithm for free-surface hydrodynamics. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 60(4), 391 408, 2009.
- Casulli, V. & Stelling, G. S.: Semi-implicit subgrid modelling of three-dimensional free-surface flows. In: International Journal for Numerical Methods in Fluids 67.4, 441 449, ISSN: 0271-2091, doi: 10.1002/fld.2361, 2011.
- Casulli, V. & Walters, R. A.: An unstructured grid, three-dimensional model based on the shallow water equations. In: International Journal for Numerical Methods in Fluids 32.3, 331 348, ISSN: 0271-2091, doi: 10.1002/(SICI)1097-0363(20000215)32:3<331::AID-FLD941>3.0.CO; 2-C, 2000.
- Delft3D-FLOW: Simulation of multi-dimensional hydrodynamic flows and transport phenomena, including sediments. User Manual Hydro-Morphodynamics, Version: 4.05, https://content.oss.deltares.nl/delft3d/manuals/Delft3D-FLOW_User_Manual.pdf, 2022.
- Deltares, https://www.deltares.nl/en/projects/stratigraphic-modeling-with-the-delft3d-geotool/, letzter Aufruf: 03/2018.
- DE VRIEND, H. J.; CAPOBIANCO, M.; CHESHER, T.; DE SWART, H. D.; LATTEUX, B. & STIVE, M. J. F.: Approaches to long-term modelling of coastal morphology: a review. Coastal engineering, 21(1-3), 225 269, 1993.
- Exner, F. M.: Über die Wechselwirkung zwischen Wasser und Geschiebe in Flüssen. Sitzungsberichte der Akademie der Wissenschaften, mathematisch-naturwissenschaftliche Klasse, Band 134, 2a, 165 204, 1925.
- Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe: Geologische Kartieranleitung, Allgemeine Grundlagen. Geologisches Jahrbuch, Reihe G, Informationen aus den Bund/Länder-Arbeitsgruppen der Staatlichen Geologischen Dienste in der Bundesrepublik Deutschland. Heft 9, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe und den Staatlichen Geologischen Diensten, in Kommission E. Schweizerbart, Hannover, ISBN 978-3-510-95889-4, Stuttgart, 2002.
- HAGEN, R.; FREUND, J.; PLÜß, A. & IHDE, R.: EasyGSH-DB-Jahreskennblatt: Kurzfassung der Validierung UnTRIM2 SediMorph Unk, easygsh kennblatt 2012.pdf, 2019.
- HAGEN, R.; FREUND, J.; PLÜß, A. & IHDE, R.: Validierungsdokument EasyGSH-DB Teil: UnTRIM2 SediMorph Unk, doi: https://doi.org/10.18451/k2 easygsh 1, 2019.
- HIRANO, M.: River bed degradation with armouring. Transaction Japanese Society of Civil Engineering, Vol. 3, 194 195, 1971.
- JAGERS, B.: Sediment mixtures and bed stratigraphy. PPT-lecture, Deltares, 2012.
- Krumbein, W. C.: Size frequency distributions of sediments. Journal of Sedimentary Research, 4(2), 65 77, 1934.
- Malcherek, A.; Piechotta, F. & Knoch, D.: Technical Report: Mathematical Modul SediMorph. Validation Dokument, Version 1.1, 2005.

- Merkel, U. & Kopmann, R.: A continuous sediment layer concept for Sisyphe. In: Violeau, D.; Hervouet, J. M.; Razafindrakoto, E.; Denis, C. (Hrsg.): XVIIIth TELEMAC & MASCARET User Club 2011, Chatou: Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), 111 116, 2011.
- MILBRADT, P.: Simulationsmodell Marina Handbuch Version 3.15.6. Hannover: smile consult GmbH, 2022.
- ParaView: https://www.paraview.org, letzter Aufruf: 20.05.2022.
- Partheniades, E.: Erosion and deposition of cohesive soils. Journal of the Hydraulics Division, 91(1), 105 139, 1965.
- ROELVINK, J. A.; WALSTRA, D. J. R. & CHEN, Z.: Morphological modelling of Keta lagoon case. In: ASCE (Hg.) Proc. Coastal Engineering, 1994.
- Sehili, A.; Lang, G. & Lippert, C.: High-resolution subgrid models: Background, grid generation and implementation. In: Ocean Dynamics 64.4, 519 535, doi: 10.1007/s10236-014-0693-x, 2014.
- Storms, J. E.; Stive, M. J.; Roelvink, D. J. A. & Walstra, D. J.: Initial morphologic and stratigraphic delta evolution related to buoyant river plumes. In: Coastal Sediments' 07, 736 748, 2007.
- VAN DER WEGEN, M.; DASTGHEIB, A.; JAFFE, B. E. & ROELVINK, D.: Bed composition generation for morphodynamic modeling: case study of San Pablo Bay in California, USA. Ocean Dynamics, Vol. 61, 73 186, doi: 10.1007/s10236-010-0314-2, 2011.
- VAN RIJN, L. C.: Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas. Aqua Publications: Amsterdam, ISBN 90-800356-2-9. vi, 715, 1993.
- Zanke, U. & Plüß, A.: A hydrodynamic-model to estimate morphological changes in rivers and estuaries. In: A. Müller (ed) Hydroinformatics 1996, Proc. 2nd Intl. Conf., Zurich, AA Balkema, Rotterdam, The Netherlands, 659 665, 1996.