

Heft 83
Jahr 2015

Die Küste



AufMod

Die Küste

ARCHIV FÜR FORSCHUNG UND TECHNIK
AN DER NORD- UND OSTSEE

ARCHIVE FOR RESEARCH AND TECHNOLOGY
ON THE NORTH SEA AND BALTIC COAST

**Aufbau von integrierten Modellsystemen zur Analyse der
langfristigen Morphodynamik in der Deutschen Bucht**

AufMod

Die Küste

ARCHIV FÜR FORSCHUNG UND TECHNIK
AN DER NORD- UND OSTSEE

ARCHIVE FOR RESEARCH AND TECHNOLOGY
ON THE NORTH SEA AND BALTIC COAST

**Aufbau von integrierten Modellsystemen zur Analyse der
langfristigen Morphodynamik in der Deutschen Bucht**

AufMod

Heft 83 · Jahr 2015

Herausgeber: Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen

Verlag:
Bundesanstalt für Wasserbau (BAW)
Kußmaulstraße 17, 76187 Karlsruhe
Postfach 21 02 53, 76152 Karlsruhe
Telefon: 0721 9726-3380 Telefax: 0721 9726-5320
vzb@baw.de, www.baw.de
Druck: BSH Druckerei, Rostock

Gefördert durch:



**Bundesministerium
für Ernährung
und Landwirtschaft**

**aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages**

ISSN 0452-7739
ISBN 978-3-939230-40-3

Verfasser dieses Heftes:

Arp Daniela, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Forschungs- und Technologiezentrum Westküste, arp@ftz-west.uni-kiel.de; Bartholomä Alexander, Senckenberg Institut, Fachgebiet Marine Sedimentologie, abartholomae@senckenberg.de; Benninghoff Markus, Universität Bremen, Research Center Ocean Margins, s_j6t9xw@uni-bremen.de; Ernstsen Verner, Universität Bremen, Research Center Ocean Margins, ernstsen@uni-bremen.de; Heyer Harro, harro.heyer@gmx.net; Kösters Frank, Bundesanstalt für Wasserbau, frank.koesters@baw.de; Lefebvre Christiana, Deutscher Wetterdienst, christiana.lefebvre@dwd.de; Malcherek Andreas, Universität der Bundeswehr München, Institut für Wasserwesen andreas.malcherek@unibw-muenchen.de; Milbradt Peter, smileconsult GmbH, milbradt@smileconsult.de; Plüß Andreas, Bundesanstalt für Wasserbau, andreas.pluess@baw.de; Putzar Bert, Universität der Bundeswehr München, Institut für Wasserwesen, bert.putzar@unibw.de; Ricklefs Klaus, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Forschungs- und Technologiezentrum Westküste, ricklefs@ftz-west.uni-kiel.de; Schrottke Kerstin, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Institut für Geowissenschaften, ks@gpi.uni-kiel.de; Stage Maria, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Forschungs- und Technologiezentrum Westküste, stage@ftz-west.uni-kiel.de; Valerius Jennifer, Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie Hamburg, jennifer.valerius@bsh.de; Winter Christian, Universität Bremen, Research Center Ocean Margins, acwinter@uni-bremen.de; Wosniok Christoph, Bundesanstalt für Wasserbau, christoph.wosniok@baw.de; Zeiler Manfred, Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie Hamburg, manfred.zeiler@bsh.de

Die Verfasser sind für den Inhalt der Aufsätze allein verantwortlich. Nachdruck aus dem Inhalt nur mit Genehmigung des Herausgebers gestattet: Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen, Geschäftsstelle, Wedeler Landstraße 157, 22559 Hamburg.
Vorsitzender des Kuratoriums: TRDir STEFAN HAUSER, Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Robert-Schuman-Platz 1, 53175 Bonn
Geschäftsführer: Dr.-Ing. RAINER LEHFELDT, Wedeler Landstraße 157, 22559 Hamburg

Inhaltsverzeichnis

<i>Harro Heyer und Kerstin Schrottke</i> Einführung, Aufgabenstellung und Bearbeitungsstruktur im KFKI-Projekt AufMod	1
<i>Peter Milbradt, Jennifer Valerius und Manfred Zeiler</i> Das Funktionale Bodenmodell: Aufbereitung einer konsistenten Datenbasis für die Morphologie und Sedimentologie	19
<i>Jennifer Valerius, Frank Kösters und Manfred Zeiler</i> Erfassung von Sandverteilungsmustern zur großräumigen Analyse der Sedimentdynamik auf dem Schelf der Deutschen Bucht	39
<i>Christian Winter, Alice Lefebvre, Markus Benninghoff, Verner B. Ernstsén</i> Die Verteilung und Eigenschaften von Bodenformen in der Deutschen Bucht, eine Rekonstruktion der Karten von Ulrich (1973)	65
<i>Klaus Riekefs, Daniela Arp und Maria Stage</i> Zur zeitlichen Variabilität der Sedimentverteilung in den Gezeitenrinnen Piep und Hever	77
<i>Kerstin Schrottke und Alexander Bartholomä</i> Schließen von Datenlücken und Verbesserung der Messmethoden	103
<i>Bert Putzar und Andreas Malcherek</i> Entwicklung und Anwendung eines Langfrist-Morphodynamikmodells für die Deutsche Bucht	117
<i>Peter Milbradt, Frank Kösters, Bert Putzar und Andreas Pliß</i> Analyse des Sedimenttransports und der Morphodynamik in der Deutschen Bucht auf Basis des Multi-Modell-Ansatzes	147
<i>Christoph Wosniok und Jennifer Valerius</i> Datenmanagement in AufMod	167
<i>Harro Heyer, Kerstin Schrottke, Manfred Zeiler und Andreas Pliß</i> Synthese der interdisziplinären Forschung in AufMod	181
Glossar	193

Einführung, Aufgabenstellung und Bearbeitungsstruktur im KFKI-Projekt AufMod

Harro Heyer und Kerstin Schrottke

Zusammenfassung

Auslöser für das Vorhaben **Aufbau** von integrierten **Modellsystemen** zur Analyse der langfristigen Morphodynamik in der Deutschen Bucht (AufMod, 2009-2012) war eine im Jahr 2008 durchgeführte Ausschreibung des Kuratoriums für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI) mit einer detaillierten Anforderungsliste.

Es galt vor allem, die großräumigen und langfristig stattfindenden geomorphologischen Veränderungen in der Deutschen Bucht zu erfassen und die Prozesse, die diese Veränderungen bewirken, vor dem Hintergrund einer physikalisch plausiblen Wirkungskette zu analysieren. Hierzu war es notwendig, alle verfügbaren bathymetrischen (einschließlich lokal auftretender Bodenformen) wie sedimentrelevanten Daten zu akquirieren, durch neue Datenerhebungen zu vervollständigen und für die Zwecke des Projekts aufzubereiten.

Um diese umfangreiche Aufgabe sinnvoll umzusetzen, wurde im Projekt die Entscheidung getroffen, ein umfassendes softwaregestütztes Bodenmodell zu generieren. Damit sollten Daten zur Bathymetrie und Sedimentbeschaffenheit gemeinsam verwaltet und funktional, d. h. nach spezifischen Vorgaben, verarbeitet und dem Anwender bzw. den Simulationsmodellen anforderungsgerecht zur Verfügung gestellt werden. Dieses sogenannte Funktionale Bodenmodell wurde zudem mit Methoden für datenbasierte Analysen ausgestattet.

Die Erhebung konsistenter Felddaten zur morphologischen Ausprägung, zum geologisch-sedimentologischen Aufbau sowie zur sedimentphysikalischen Beschaffenheit und Dynamik der Gewässersohle auf verschiedenen Raum- und Zeitskalen erfolgte unter Verwendung eines multi-methodischen Ansatzes. Datenerhebung und -auswertung wurden, soweit möglich, nach einem zuvor festgelegten Standard durchgeführt. Die Messungen wurden insbesondere in ausgewählten Gebieten (Fokusegebieten) vorgenommen. Die Gebiete repräsentierten dabei vor allem die wesentlichen, in der Deutschen Bucht dominierenden Küstenelemente wie den Schelf, die Watten und die Ästuar.

Im Rahmen der Anwendung deterministischer Prozessmodelle wurde ein konsequenter Multi-Modell-Ansatz mit morphodynamischen Simulationsmodellen unterschiedlicher Prozessauflösung verwendet, um die Streubreite der Ergebnisse abschätzen zu können. Für die Modelle, welche auf unstrukturierten Modellverfahren basieren, wurden überwiegend identische Gitternetze und Randwerte verwendet. Soweit möglich, wurde auch ein einheitliches Post-Processing durchgeführt, um den Vergleich der Modellergebnisse mit einheitlichen Methoden zu gewährleisten. Mit diesen im Gesamtvorhaben getroffenen Vereinbarungen und Regelungen war gewährleistet, dass die Formulierung „integriertes Modellsystem“ nicht nur eine leere Worthülse blieb. Die Integration des Modellsystems stand auf verschiedenen Säulen:

1. Alle Simulationsmodelle wurden durch das Funktionale Bodenmodell mit Eingangsdaten versorgt.
2. Die Simulationsmodelle nutzten – soweit verfahrensbedingt möglich – einheitliche Eingangsdaten (Gitternetze, Randwerte).
3. Die Modelle wurden vergleichend validiert. An der Validierungsstrategie wird noch weitergearbeitet.
4. Die Modellergebnisdaten wurden, soweit derzeit möglich, mit einheitlichen Methoden prozessiert.
5. Ausgewählte Simulationsdaten wurden in das Funktionale Bodenmodell übernommen und konnten dort auch für datenorientierte Analysen herangezogen werden.

In einer abschließenden Synthese wurden alle relevanten Resultate der Teilprojekte einbezogen und eine übergreifende, gemeinsame Bewertung zur Beantwortung der in der KFKI-Ausschreibung formulierten Ziele erstellt.

Schlagwörter

Nordsee, Deutsche Bucht, Bathymetric, Sedimentverteilung, Sedimentzusammensetzung, Morphodynamik, Bodenmodell, numerisches Modell, Simulation

Summary

The main objective of the multidisciplinary research project AufMod (2009 – 2012) was the development of model-based tools for analyzing long-term sediment transport and morphodynamic (MD) processes in the German Bight. AufMod aimed at bringing together marine geoscientists and coastal engineers to build up consistent bathymetric and sedimentological databases and to compare different numerical models, using the same data input and model grid with respect to uncertainties of their results.

AufMod provides a suite of consistent annual bathymetries as well as initial sediment parameters, which can be used by numerical MD models for further analyses. Different patchy datasets from bathymetric survey campaigns since 1948 have been compiled and undergone a sophisticated post-processing procedure to overcome inconsistencies due to the use of different echosounding techniques, vessels, tidal correction and so on. For the first time, data on grain-size distribution have been composed for the entire North Sea / German Bight in order to analyze geomorphological processes and to calculate sediment input parameters for morphodynamic modelling. By establishing a so-called "Functional Seabed-Model" consistent annual bathymetries and initial sediment distribution and composition (grain-size distribution) have been made available together with their spatial and temporal uncertainties.

The morphodynamic numerical model simulations cover a time span from 1996 to 2008 and are based on the natural processes taking the whole variability of tides, external surge, river run-off, wind and waves into account. AufMod provides a suite of consistent annual bathymetries as well as initial sediment parameters, which can be used by numerical MD models for further analyses. By using the same model grids the strength and weakness of the different numeric models can be evaluated and their uncertainties can be assessed. The morphodynamic model results give a first comprehensive impression of the resulting sediment transport pathways in the German Bight.

Keywords

North Sea, German Bight, bathymetry, topography, sediment distribution, sediment mixture, sediment transport, morphodynamics, seabed model, numeric model, simulation

Inhalt

1	Einführung in die Problematik	3
2	Grundlagen der Ausschreibung des KFKI	4
3	Aufgabenstellung – Konkretisierung innerhalb des AufMod-Projektes	5
3.1	AufMod-A (Bodenmodell)	5
3.2	AufMod-B (Bodenformen)	6
3.3	AufMod-C (Prozessorientierte Modellierung)	6
3.4	AufMod-D (Morphodynamische Langzeitsimulation)	7
3.5	AufMod-E (Modellbasierte Analyse)	8
3.6	AufMod-F (Bodenmodell)	9
3.7	AufMod-G (Bodenmodell)	10
4	Struktur und Zusammenarbeit im Verbundprojekt	11
4.1	Konzeptioneller Aufbau des Bodenmodells und der Simulationsmodellierung	12
4.2	Zusammenwirken/Interaktion von Boden- und Simulationsmodellierung	15
4.3	Dokumentation der Daten und Analysen	16
5	Gemeinsame Darstellung der Untersuchungsergebnisse	17
5.1	Thematische Gliederung im Sonderband	17
5.2	Abschlussbericht	17
5.3	Internetpräsenz	17
6	Danksagung	18
7	Schriftenverzeichnis	18

1 Einführung in die Problematik

„Die langfristige Morphodynamik der Deutschen Bucht steht im Fokus vieler wissenschaftlicher und praktischer Fragestellungen. Das liegt nicht zuletzt daran, dass dieses Küstensystem ein unersetzlicher Naturraum für die wertvollsten Ökosysteme unseres Planeten sowie für die Stabilisierung des Wasserkreislaufes und des Klimas darstellt. Ferner ist es ein unverzichtbarer Lebens- und Wirtschaftsraum unter wachsendem Besiedlungs- und Nutzungsdruck“ (OUMERACI 2013).

Die Folgen der intensiven wirtschaftlichen Nutzung und des wahrscheinlichen Klimawandels müssen hierzulande, insbesondere im Gebiet der Deutschen Bucht und der Nordsee-Ästuare, analysiert und prognostiziert werden können. Hierzu bedarf es wissenschaftlicher wie ingenieurpraktischer Methoden und Werkzeuge, mit denen die Eingriffe in das Natursystem minimiert und die Schutzfunktionen für Mensch und Natur

weitergehend optimiert werden können. Dieses Ziel, das man allgemein auch als Daseinsvorsorge an der Küste bezeichnen kann, stellt insbesondere auch für das Küsteningenieurwesen eine weitreichende Herausforderung dar, weil der Sedimenttransport und die Morphodynamik der Gewässersysteme vielfältige Veränderungen bewirken. Hierzu gehören z. B. zu- oder abnehmende strömungs- und seegangsbedingte Belastungen auf die Gewässersohle sowie auf Bauwerke, Küsten- und Uferbereiche. Die Hydromorphologie, insbesondere der Sedimenttransport und die Morphodynamik prägen vor allem auch die Lebensbedingungen in den vielfältigen Habitaten in und an der Deutschen Bucht.

Die für das Küsteningenieurwesen definierten Sachthemen stellen die Erfassung der Naturvorgänge, die Transport- und Formänderungsprozesse sowie die Belastungen und Grundlagen zur Bemessung der Bauwerke in den Vordergrund. Hierfür ist das permanent fortgeführte Monitoring der klassischen Zustandsgrößen der Küstengewässer unverzichtbar. Die erhobenen Daten ermöglichen Langzeitstudien, mit denen das Veränderungs- bzw. Anpassungspotenzial der Küste im Hinblick auf natürliche und bauwerksbedingte Einflussgrößen eingeschätzt wird. Die in der Analyse angestrebte Trennung zwischen natürlichen und bauwerksinduzierten Wechsel- und Auswirkungen ist ein wesentliches und herausragendes Merkmal des Küsteningenieurwesens. Im Hinblick auf die Bauwerke werden dabei z. B. Aspekte des Küsten- und Hochwasserschutzes, des See- und Strombaus, des Verkehrswasserbaus, des Hafenausbaus oder auch der Bauwerke auf offener See unterschieden. Insofern ist die Küsteningenieurforschung als ein sehr wichtiger Bestandteil der Küstenforschung einzustufen, die sich weiter gefasst mit dem Lebensraum der Küste beschäftigt (HEYER 2012). Vor diesem Hintergrund hat das KFKI im Jahr 2008 eine Rahmenausschreibung für ein Forschungs-Verbundprojekt zur großräumigen und langfristigen Morphodynamik in der Deutschen Bucht durchgeführt.

2 Grundlagen der Ausschreibung des KFKI

Forschungsobjekt der KFKI-Rahmenausschreibung zur großräumigen und langfristigen Morphodynamik in der Deutschen Bucht war die Deutsche Nordseeküste mit Fokus auf das Küstenvorfeld, die Vorstrände und Strände, die Inseln und Wattgebiete sowie die Tideflüsse. Im konzeptionellen Projektansatz sollten insbesondere Computermodelle berücksichtigt werden. Im Einzelnen wurden folgende Forschungsziele bzw. maßgebliche Untersuchungsinhalte und -grundlagen formuliert:

- Erstellung und Verwendung plausibilisierter, konsistenter Daten zur Bathymetrie und Sedimentverteilung.
- Berücksichtigung der gezeiten- und winderzeugten Strömungen wie auch der seegangs- und brandungserzeugten Strömungen.
- Definition und Analyse von Sedimentverteilungsmustern und deren Stabilität sowie von Sedimenttransportwegen, -richtungen, -mengen und -bilanzen zum Verständnis der langfristigen und großräumigen Sedimentdynamik.
- Analyse und Prognostizierung großräumiger Transport- und Formänderungsprozesse über verschiedene Zeitskalen.
- Ergebnisbasierte Darstellung der Streubreite verschiedener deterministischer Modellverfahren, neuronaler Netze und empirischer Modellansätze.
- Einbindung der Ergebnisdaten in eine offene Datenbank zur Nutzung durch Dritte.

- Gewährleistung über die Verwendung der Modellsysteme für ausgewählte Szenarien (erwartetes Klima, Anstieg des Meeresspiegels und Änderung des Seegangsklimas).

3 Aufgabenstellung – Konkretisierung innerhalb des AufMod-Projektes

Der von der Rahmenausschreibung des KFKI formulierte Anforderungskatalog war sehr umfangreich und ließ sich nur im Zusammenschluss interdisziplinär verzahnter Teilprojekte unter dem Dach einer übergreifenden Projektkoordination bewältigen. Seitens der Antragsteller wurde dazu das multi-disziplinäre Projekt mit dem Titel „Aufbau von integrierten Modellsystemen zur Analyse der langfristigen Morphodynamik in der Deutschen Bucht (AufMod)“ mit insgesamt neun beteiligten Institutionen vorgeschlagen. Dabei wurde eine Gliederung in die Teilprojekte AufMod-A bis AufMod-G vorgenommen (an AufMod-F sind drei Einrichtungen einer Universität beteiligt). Sechs Institutionen beschäftigten sich mit den umfangreichen datenorientierten Aufgaben zum Bodenmodell. Zwei Institutionen nutzten auf Grundlage des Bodenmodells prozessbasierte bzw. prozessorientierte Simulationsverfahren. Eine Institution war sowohl am Bodenmodell als auch an der Modellierung beteiligt.

Es wurde eine Förderung durch das BMBF über das KFKI beantragt und bewilligt.

Aus den für die einzelnen Teilprojekte zusammengestellten Anforderungen galt es ein konzeptionelles Modell zu entwickeln, welches für das Gesamtvorhaben steht und zur ökonomischen Realisierung der Anforderungen beitragen sollte. Die im Projekt angestrebte Vorhabensökonomie musste durch intensive Zusammenarbeit, Mehrfachverwendbarkeit von Teilprodukten und gemeinsame Vorgehensweisen erreicht werden.

Die Hauptziele und Arbeitsschwerpunkte der einzelnen Teilprojekte entsprachen in der Summe im Wesentlichen dem Anforderungskatalog der Rahmenausschreibung des KFKI. Einzig die brandungserzeugten Strömungen sowie die Anwendung der Methode der Neuronalen Netze fanden keine Berücksichtigung. Die wichtigsten Arbeitsschwerpunkte der Teilbeiträge zum Gesamtprojekt sind nachfolgend zusammengefasst.

3.1 AufMod-A (Bodenmodell)

Institution: Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH)

Ziel: Aufbau und Plausibilisierung des Bodenmodells „Deutsche Bucht“ mit seiner Dynamik als Grundlage für die numerische Modellierung

Arbeitsschwerpunkte:

- Entwicklung eines plausibilisierten und möglichst konsistenten Bodenmodells unter Einbindung bathymetrischer und sedimentologischer Daten
- Aufarbeitung und Homogenisierung der bestehenden Sedimentdaten
- Weitere Probennahmen und Analysen bei Datenlücken
- Plausibilisierung der Dynamik des Bodenmodells
- Aufnahme und Analyse sedimentologischer Zeitreihen in ausgewählten Gebieten
- Grunddaten zur Validierung morphodynamischer Simulationsmodelle

Die Umsetzung erfolgte in Zusammenarbeit mit den Teilprojekten AufMod-B, AufMod-F und AufMod-G. Qualitätsgeprüfte Ergebnisse wurden in der GIS-Geodatenbank des Shelf Geo-Explorer des BSH, der in die Marine Dateninfrastruktur Deutschland (MDI-DE) eingebunden ist, abgelegt.

3.2 AufMod-B (Bodenformen)

Institution: Universität Bremen, Zentrum für marine Umweltwissenschaften (MARUM)

Ziel: Quantitative Evaluation bestehender empirischer Gleichungen zur Prognose sub-mariner Bodenformen und deren Wirkung auf die Hydro- und Sedimentdynamik in Küstengewässern.

Arbeitsschwerpunkte:

- Datengenerierung zur Entstehung, Gestalt und Wirkung von Bodenformen
- Mathematische Beschreibung bzw. Parametrisierung der verschiedenen Bodenformen
- Formulierung der hydraulischen Rauheit
- Evaluation bestehender empirischer Formeln
- Flächenhafte Verschneidung repräsentativer bathymetrischer, hydrodynamischer, sedimentologischer und geomorphologischer Kennwerte
- Vorhersagen und verbesserte Ansätze

Generell werden für Berechnungen zur Entstehung und Dynamik von Bodenformen empirische Beziehungen unterschiedlicher Komplexität und Datengrundlage verwendet. Dabei werden dimensionslose Parameter zur Beschreibung der relevanten Zustandsgrößen formuliert und deren beste Korrelationsfunktion angegeben. Die Verschneidung und Analyse flächendeckend hochaufgelöster bathymetrischer und sedimentologischer Daten, verschnitten mit zeitaufgelösten, repräsentativen hydrodynamischen Informationen, ermöglicht ein vertieftes Verständnis über das Auftreten und die Entwicklung von Bodenformen.

Die Ergebnisse der Untersuchungen aus AufMod-B flossen unmittelbar in das Bodenmodell ein.

3.3 AufMod-C (Prozessorientierte Modellierung)

Institution: Bundesanstalt für Wasserbau, Außenstelle Küste (BAW)

Ziel: Analyse langfristiger, großräumiger Prozesse durch prozessbasierte Simulation der Deutschen Bucht.

Die skalenübergreifende, prozessbasierte 3D- und 2D-Modellierung des Gesamtsystems Nordsee, Deutsche Bucht, Wattenmeer und Ästuar diente in hoher Modellauflösung der Validierung der Modellergebnisse für Zeitspannen von mehreren Jahren. Grundlage hierbei waren die konsistenten bathymetrischen Daten aus dem Bodenmodell. Eingesetzt wurden die Modellverfahren UnTRIM mit SediMorph und K-Modell (auf unstrukturierten Gitternetzen: UnK) sowie DELFT3D und SWAN. Generiert wurden Modellergebnisdaten und der Vergleich von Modellergebnissen mit den Projektpartnern.

Arbeitsschwerpunkte:

- Analyse von Messdaten
- Hydro- und sedimentdynamische Prozessanalyse (3D)
- Tide- und Seegangswirkung in der Nordsee und der Deutschen Bucht
- Simulation mit verschiedenen Modellverfahren – längerfristige Zeiträume
- Nutzung der durch die Projektpartner plausibilisierten Bathymetriedaten
- Verwendung des Bodenmodells für die Simulation (Korn- und Formrauheit – räumliche Sedimentverteilung)
- Simulation von Hydrodynamik, Salztransport und Seegangswirkung – Vergleich mit Messwerten (Kalibrierung und Validierung) für Jahreszeiträume
- Simulation des fraktionierten Sedimenttransportes – Analyse der Sedimentdynamik und morphologische Reaktion der Sohle in Rückwirkung auf die Hydro- und Sedimentdynamik
- Vergleich der berechneten Bodenumlagerungen mit bathymetrischen Vermessungsdaten
- Erste Prognosen großräumiger Transport- und Formänderungsprozesse
- Beschickung einer Datenbank mit den Simulations- und Analyseergebnissen
- Qualitätsmanagement der Rechenergebnisse und Datenbankanhalte
- Systemverständnis zu den langfristigen Sedimentbewegungen und morphologischen Veränderungen im Küstenvorfeld und den Ästuarmündungen
- Einfluss ausgewählter Klimaänderungsszenarien auf die sedimentologischen und morphodynamischen Verhältnisse
- Qualitätsgeprüfte Ergebnisse wurden über einen Server der BAW in die MDI-DE eingebunden

3.4 AufMod-D (Morphodynamische Langzeitsimulation)

Institution: Universität der Bundeswehr, München (Uni-Bw)

Ziel: Morphodynamische Langzeitsimulation durch Entkopplung von Hydro- und Morphodynamik.

Die Simulation der Morphodynamik bis zu einem über 100-jährigen Zeitraum sollte auf einem hoch aufgelösten, unstrukturierten Modellgitter durch Lösung der allgemeinen Sohlevolutionsgleichung im (hier eigenständigen) morphodynamischen Modul SediMorph erfolgen. Dabei galt es, sehr kurze Simulationszeiten auf Supercomputern zu realisieren, so dass verschiedene Szenarien simuliert und ausgewertet werden konnten. In den Seeschiffahrtsstraßen wurden Nassbaggerungen und Umlagerungen des Baggergutes im Gewässersystem als unverzichtbarer Faktor für Langfristuntersuchungen berücksichtigt (Einsatz des morphodynamischen Moduls DredgeSim).

Arbeitsschwerpunkte:

- Mittelfristige (10 Jahre) bis langfristige (100 Jahre) Simulation der Morphodynamik
- Lösen der Sohlevolutionsgleichung (deterministisches Verfahren)
- Berücksichtigung der Bestandteile des anstehenden Bodens, fraktioniert durch verschiedene Sedimentklassen

- Berücksichtigung treibender hydromechanischer, meteorologischer und anthropogener Prozesse durch parametrisierte Datenmodelle (von der Morphodynamik entkoppelt)
- Datenmodelle aus empirischen oder deterministischen Quellen
- Einsatz des Verfahrens SediMorph-UnS (simuliert Morphodynamik bei beliebig einsteuerbaren Belastungen)
- Übernahme morphologischer Anfangsbedingungen aus dem Bodenmodell
- Belastungen aus Gezeitenströmungen resultierend aus flächenhaften Partialtidenkennwerten
- Sohlschubspannungen oder Strömungsgeschwindigkeiten aus der Impulserhaltung
- Berücksichtigung des Seegangs durch das Entwickeln verschiedener Szenarien
- Berücksichtigung anthropogener Eingriffe wie Baggerungen und Verklappungen

Die Methode der Entkopplung (Hydrodynamik aus Partialtiden generiert) erwies sich als nicht zielführend. Aus diesem Grund wurde nach der Hälfte der Bearbeitungsdauer auf eine andere Methodik zurückgegriffen. Hierbei handelte es sich um das Modellsystem TELEMAC/SISYPHE. Dieses wurde dann durch Kopplung mit dem vorhandenen Modul DredgeSim und dem Einsatz massiver Parallelisierung erfolgreich für große Zeitspannen eingesetzt!

3.5 AufMod-E (Modellbasierte Analyse)

Institution: smile consult GmbH, Hannover (smile)

Ziel: Modellbasierte Analyse langfristiger Formänderungsprozesse an der deutschen Nordseeküste in enger Verknüpfung von daten- und prozessbasierten Simulationsmodellen.

Die datenbasierten Modelle sollten vertiefte Analysen der zurückliegenden morphodynamischen Entwicklungen in der Deutschen Bucht durch die Bestimmung von Erosions- und Sedimentationsraten, morphologischen Geschwindigkeiten und resultierenden Sedimenttransportraten zulassen. Die Verknüpfung mit hydrodynamischen und meteorologischen Daten sollte die Identifikation von Ursache-Wirkungsbeziehungen und die Entwicklung datenbasierter Prognosemodelle ermöglichen. Ergänzend galt es, prozessbasierte Simulationen für Zeitspannen von mehreren Wochen bis zu wenigen Jahren mit einem holistischen Modellverfahren durchzuführen. Morphologische Geschwindigkeiten und resultierende Transporte sollten sowohl aus den daten- als auch aus den prozessbasierten Modellen gewonnen werden. Sie bildeten die Grundlage für die Entwicklung morphodynamischer Langzeitsimulationen für ausgewählte Zeitspannen. Die Erzeugung generischer Identifikatoren für morphologische Kenngrößen (Tiefenänderungsraten, morphologische Geschwindigkeiten, ...) sollte nicht nur eine einheitliche Bewertung der unterschiedlichen Modellsysteme ermöglichen, sondern auch zu einem Ausgleich der modellspezifischen Unsicherheiten und Defizite führen.

Arbeitsschwerpunkte:

- Methode zur datenbasierten Beschreibung der morphodynamischen Entwicklungen auf Grundlage von Vermessungen
- Methode der prozessbasierten numerischen Simulation für die Morphodynamik
- Enge Verzahnung beider Herangehensweisen (Methoden)

- Quantifizierung von daten- und messspezifischen Unsicherheiten und Defiziten sowie Abschätzung von deren Fortpflanzung in den daten- und prozessgetriebenen Modellen
- Entwicklung integrativer Identifikations-, Analyse- und Vorhersageverfahren für Formänderungsprozesse
- Aufbau von daten- und prozessbasierten hierarchischen morphodynamischen Modellen
- Holistische Simulationsrechnungen von Hydrodynamik, Seegang und Morphodynamik für unterschiedliche charakteristische Zeiträume
- Erstellung und Evaluierung unterschiedlicher Strategien der langzeitmorphodynamischen Simulation
- Durchführung von langzeitmorphodynamischen Modelluntersuchungen in der Deutschen Bucht
- Entwicklung von Kopplungsstrategien zwischen datenbasierten und prozessbasierten Modellen
- Archivierung der Simulations- und Analyseergebnisse in einem offenen Informationssystem
- Qualitätsmanagement der Modellbeschreibungen und Simulationsergebnisse

3.6 AufMod-F (Bodenmodell)

Institutionen an der Christian-Albrechts-Universität Kiel:

- Exzellenzcluster „Future Ocean“ (ExC)
- Institut für Geowissenschaften (IFG)
- Forschungs- und Technologiezentrum (FTZ) Büsum

Ziel: Datenerhebungen und Analysen zur Stabilität von Sedimentverteilungsmustern in der Deutschen Bucht.

Es galt konsistente Felddaten zur morphologischen Ausprägung, zum geologisch-sedimentologischen Aufbau, zur sedimentphysikalischen Beschaffenheit und zur Dynamik der Gewässersohle auf verschiedenen Raum- und Zeitskalen zu erheben. Diese sind für die Weiterentwicklung und Anwendung von morphodynamischen Modellen zur großräumigen und Langzeit-Simulation zwingend erforderlich. Diese Daten dienen dabei auch der Erweiterung des Prozessverständnisses. Hochauflösende und gleichzeitig flächendeckende Datensätze sollten mittels moderner, vor allem hydroakustischer Messsysteme, einschließlich hochgenauer Positionierung und „Groundtruthing“, erhoben, analysiert, interpretiert und sowohl in das Bodenmodell einfließen als auch in Form konsistenter und plausibilisierter Modelleingangsparameter zur Verfügung stehen. Im Vergleich früherer Herangehensweisen mit punktueller Informationsermittlung galt es, so ein vollständigeres flächenhaftes Bild zu den Verhältnissen der Gewässersohle zu erzeugen und damit einen wesentlichen Beitrag zur Analyse und zum Verständnis der langfristigen Sediment- und Morphodynamik der Deutschen Bucht zu leisten. Alte Datensätze sollten, soweit möglich, mit neuen Daten verschnitten bzw. zu vergleichenden Analysen herangezogen werden.

Arbeitsschwerpunkte:

- Hochauflösende, flächendeckende Erfassung der Gewässersohle in ausgewählten Untersuchungsgebieten
- Erstellung eines detaillierten Abbildes der Gewässersohle hinsichtlich Sedimentzusammensetzung und -verteilung, Sedimentmächtigkeit und soweit möglich Sedimentmobilität
- Bereitstellung neuer Interpretationsansätze der die Morpho- und Sedimentdynamik steuernden Parameter und Prozesse auf verschiedenen Zeitskalen
- Erarbeitung flächendeckender Sedimentparameter zur Entwicklung des Funktionalen Bodenmodells „Deutsche Bucht“ mit abgestimmter Parametrisierung für Langzeitsimulation der Morphodynamik
- Erarbeitung plausibilisierter „Gitter-Datensätze“ zur Sedimentologie als flächenhafter Eingangsdatensatz für die numerische Modellierung
- Quantitative Erfassung der Dynamik der Modellparameter in repräsentativen Teilflächen von Schelf, Vorstrand, Watten und Ästuaren
- Erarbeitung hochaufgelöster Datensätze für die Verifikation der Modellergebnisse
- Beschreibung von großräumigen Sedimentumlagerungen, -transportwegen und -transportraten (Synthese numerischer Modellergebnisse und geologisch/sedimentologischer Analysen)

Die Datenerhebung erfolgte in repräsentativen Teilgebieten (Fokusgebiete) des Schelfs/ Vorstrandes, der Watten und der Ästuare in Zusammenarbeit mit AufMod-A, AufMod-B und AufMod-G. Eine qualitätsgesicherte Speicherung der relevanten Ergebnisse erfolgte im Shelf Geo-Explorer des BSH (vgl. Kap. 3.1).

3.7 AufMod-G (Bodenmodell)

Institution: Senckenberg am Meer (SaM), Wilhelmshafen

Ziel: Erhebung und Analyse bathymetrischer und sedimentologischer Daten in den verschiedenen Fazies-Räumen der deutschen Nordsee zum Aufbau und zur Plausibilisierung des Funktionalen Bodenmodells und seiner Dynamik im Hinblick auf fazielle Einheiten als Grundlage für die numerische Modellierung.

Die Datenerhebung sollte speziell im Küstenvorfeld der Insel Spiekeroog sowie im Bereich der nördlichen Jade durchgeführt werden. Die Bereitstellung konsistenter und plausibilisierter Eingangsdatensätze erfolgte in dokumentierter Qualität in Zusammenarbeit mit den Teilprojekten AufMod-A, AufMod-B und AufMod-F.

Relevante Ergebnisse wurden qualitätsgesichert in der Geodatenbank des Shelf Geo-Explorers abgelegt und recherchierbar gemacht.

Arbeitsschwerpunkte:

- Erstellung eines konzeptionellen Sedimenttransportmodells sowie Umsatz in die numerischen Modelle mittels eines kombinierten Methodenansatzes
- Beschreibung von Sedimentumlagerungen, Sedimenttransportwegen und Transportraten im Rahmen großräumiger Faziesräume
- Modellierung – Langfristige und großräumige Sedimentdynamik
- Prognosen zur Veränderung weiträumiger Transport- und Verteilungsprozesse

- Ausgewählte Szenarien in Rückkopplung mit numerischen Modellen
- Bodenmodell „Deutsche Bucht“ mit abgestimmter Parametrisierung für die großräumige und Langzeit-Simulation der Morphodynamik
- Plausibilisierte „Gitter-Datensätze“ zur Bathymetrie
- Dynamikbereich der Modelle/reale morphologische und sedimentologische Zeitreihen
- Hydroakustische Untersuchungen im Küstenvorfeld von Spiekeroog und in der nördlichen Jade
- Parametrisierung der Modelle über flächendeckende Datensätze

4 Struktur und Zusammenarbeit im Verbundprojekt

Bei der Bearbeitung des multidisziplinären Forschungsprojektes wurden einzelne Institutionen zu thematisch zusammenhängenden Teilprojekten (TP) kombiniert. Aus diesen fünf TP wurden die beiden Säulen der gemeinsamen Forschung gebildet: das Bodenmodell und die numerischen Simulationsmodelle.

Die Zusammenarbeit der Teilprojekte und Partner wurde in einem Kooperationsvertrag durch die Verbundkoordination über das Präsidium der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel geregelt. Der Verbund fügte sich der Gesamtleitung durch den Koordinator. Damit wurde eine funktionierende Projektorganisation ermöglicht. Eine Übersicht zur Projektorganisation zeigt Abb. 1. Die Bedeutung des Bodenmodells im Hinblick auf die Aufgabenstellung ist hieraus ersichtlich.

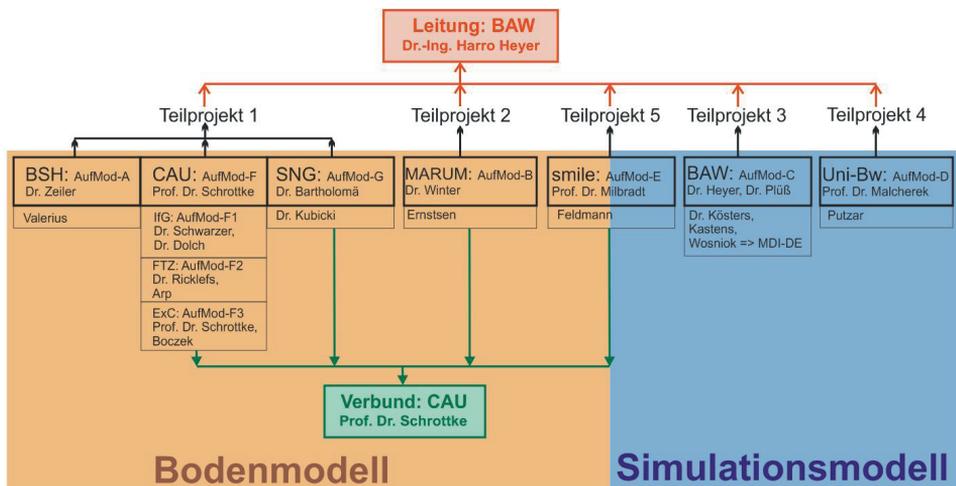


Abbildung 1: Struktur der Organisation des Projekts AufMod.

Die interdisziplinäre Zusammenarbeit wurde durch wiederholte Treffen auf unterschiedlichen Sachebenen und durch regen Datenaustausch realisiert. Über den gesamten Projektzeitraum hinweg fanden in regelmäßigem Turnus Sitzungen des ganzen Projektverbunds statt, innerhalb derer der Arbeitsstand der einzelnen Teilprojekte vorgestellt und fachübergreifende Sachthemen diskutiert sowie Organisatorisches abgestimmt wurden. Darüber hinaus wurden auch Treffen in kleineren Arbeitsgruppen initiiert, um Vorgehen

oder Antworten auf fachspezifische Fragestellungen zu erarbeiten. Die Zusammensetzung der Beteiligten richtete sich dabei nach den jeweiligen thematischen Anliegen. Auch bei diesen Treffen wurde darauf geachtet, fachfremde Kollegen aus anderen Teilprojekten mit einzubeziehen, um aus dem interdisziplinären Ansatz möglichst viel Nutzen zu ziehen. Zur Entwicklung eines gegenseitigen Verständnisses für andere Fachdisziplinen wurden darüber hinaus Workshops und Doktoranden-Seminare zur datenbasierten Modellierung, zum Simulationsverfahren TELEMAC, zu den Messverfahren für die Aktualisierung und Verfeinerung des Bodenmodells und zur gemeinsamen Synthese im Gesamtprojekt durchgeführt.

4.1 Konzeptioneller Aufbau des Bodenmodells und der Simulationsmodellierung

Wiederholte bathymetrische Vermessungen und Aufnahmen der Sedimentverteilung und -charakteristik über verschiedene Zeitepochen bilden die Grundlage für die Analyse der morphologischen Entwicklung des Meeresbodens in der Deutschen Bucht. Die Ursachen morphologischer Veränderungen bzw. der Sedimenttransporte, die in Raum und Zeit einer erheblichen Variabilität unterliegen können, lassen sich damit jedoch meist nicht abschließend erfassen. Ein vollständiges Systemverständnis kann vielmehr in einer übergreifenden Ergebnisauswertung datengetriebener Bodenmodelle und prozessbasierter Simulationsmodelle erlangt werden. Hierzu bedarf es eines integrierten Modellsystems, das die Möglichkeit eröffnet, Analysen aus datengetriebenen Modellen des Gewässerbodens und aus prozessbasierten Simulationen der Wechselwirkungen zwischen dem Gewässer und der Gewässersohle auf einheitlicher Datengrundlage und nach einheitlichen Kriterien, Methoden und Kennwerten durchführen zu können. Die Variabilität der Sedimenttransporte, die in komplexer Weise mit den Gezeiten des Meeres und dem stochastischen Wettergeschehen, aber auch in rückgekoppelter Weise mit der morphodynamischen Veränderung des Meeresbodens verknüpft ist, wird dabei berücksichtigt.

Das integrierte Modellsystem zur Analyse der langfristigen Morphodynamik basiert im Wesentlichen auf zwei Säulen (siehe Abb. 2):

- dem Modell für die Gewässersohle → konzeptionelles Bodenmodell und
- den hydromorphologischen Modellen → konzeptionelles Simulationsmodell

Bathymetrie und Bodenformen sowie der Aufbau und die Zusammensetzung der Gewässersohle sind auf der Basis von Beobachtungsdaten im Bodenmodell zusammengefasst (braune Säule). Die Daten des Bodenmodells lassen sich mit meteorologischen und hydrodynamischen Beobachtungsdaten zur Modellsteuerung und Modellvalidierung der verschiedenen Modellsysteme des konzeptionellen Simulationsmodells verwenden (blaue Säule mit gelben Kästen). Ergebnisse aus den morphodynamischen Simulationsmodellen fließen wiederum in das Funktionale Bodenmodell zur verbesserten Interpretation der Messdaten ein.

Die für das konzeptionelle Bodenmodell zusammengetragenen und um projektspezifische Metadaten erweiterten Messdaten stellen umfangreiche, jedoch oft räumlich fleckenhafte und zeitlich inkonsistente Geodatensätze dar, welche mittels geeigneter Interpolations- und Approximationsverfahren (MILBRADT et al. 2005; MILBRADT et al. 2009) zu flächenhaften Informationen für unterschiedliche Zeitmarken verarbeitet wurden. Mit

den hierfür entwickelten Methoden und Verfahren wurde das konzeptionelle Bodenmodell zu einem Funktionalen Bodenmodell (FBM) erweitert, womit die bereits zu Projektbeginn angestrebte Vorhabensökonomie maßgeblich unterstützt wurde. Das Funktionale Bodenmodell basiert allgemein ausgedrückt auf Mengen von Messdaten, zugehörigen Metadaten und Interpretationsvorschriften (Interpolations- und Approximationsmethoden). Räumlich umfasst es die gesamte Nordsee.

Das FBM ermöglicht prototypische Anwendungen der Methoden für den Export abgeleiteter Daten zur Analyse und Modellsteuerung. Durch die Kombination verschiedener Datenquellen stellt das Funktionale Bodenmodell erweiterte Sichten auf Daten und Modelle des konzeptionellen Bodenmodells zur Verfügung.

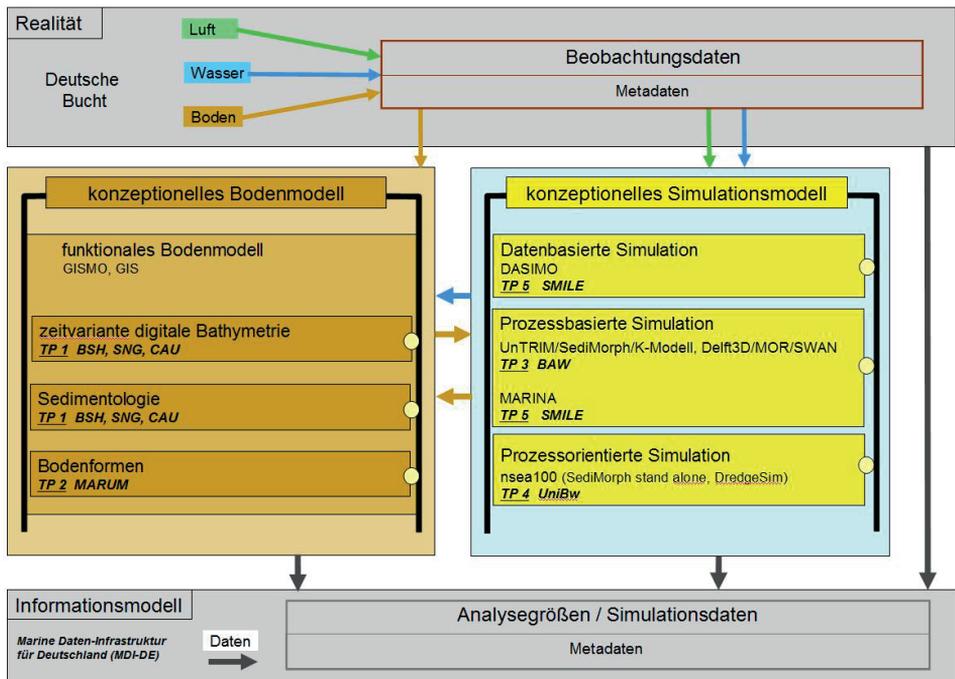


Abbildung 2: Konzeptioneller Ansatz des integrierten Modellsystems.

Der geologische Aufbau und die Zusammensetzung des Bodens sowie die unterschiedlichen Skalen der räumlichen Strukturen als auch der zeitlichen Veränderungen führen zu ganz unterschiedlichen Modellvorstellungen. Zur Beschreibung des morphologischen Zustandes und der zeitlichen Entwicklung der Gewässersohle in der Deutschen Bucht, der Küstengebiete und der Ästuarer wurde in AufMod ein Multi-Methodenansatz verwendet, um diesen unterschiedlichen räumlichen und zeitlichen Skalen gerecht zu werden.

- Für die Beschreibung der bathymetrischen Entwicklung in der gesamten Deutschen Bucht wurden die Vermessungsdaten des BSH und der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung (WSV) zusammengetragen und in einem zeitvarianten bathymetrischen Modell aggregiert.
- Für die Beurteilung der räumlichen Verteilung und Entwicklung kleinräumiger Strukturen wurden Modelle der Gewässersohle auf der Basis von hochauflösenden

hydroakustischen Messdaten unter Einbeziehung von Einzelmessungen und Bodenproben aufgebaut.

- Die Modellierung der Entstehung und Entwicklung von Bodenformen, wie beispielsweise von subaquatischen Dünen, erfolgte auf der Basis von Analysen hochauflösender bathymetrischer Vermessungsdaten. Die Bodenformen flossen in parametrisierter Form in das Modul „Bathymetrie“ des Funktionalen Bodenmodells ein.
- Für den sedimentologischen Aufbau wurden Modelle auf der Basis von alten und neuen Sedimentproben (z. B. Korngrößenverteilungen auch aus Datenbanken wie z. B. MUDAB, Sedimentkataster der WSV u. a.) mit Daten hochauflösender Messtechniken (Seitensichtsonar) verknüpft, um sowohl großräumig als auch insbesondere in den Fokusgebieten kleinräumig die Sedimentverteilung und Bodenbeschaffenheit zu verstehen und mit den gestaltenden hydrodynamischen Prozessen in Verbindung zu bringen.

Die Erhebung neuer Felddaten erfolgte nicht nur in enger Absprache mit Projektpartnern aus den „messenden“ Einrichtungen, sondern auch in aufeinander aufbauenden Abstimmungen mit der gesamten Projektgruppe. So wurde erreicht, dass die Datenerfassung, soweit möglich, einheitlich bzw. standardisiert erfolgte und die Belange der modellierenden Fraktion aufgenommen werden konnten. Besonderes Augenmerk wurde dabei auch bei der Auswahl der die Messdaten flankierenden Metadaten gelegt. Das in AufMod entwickelte Bodenmodell bildet den Rahmen für alle messtechnisch erhobenen Parameter, die den Meeresboden betreffen. Felddaten sind darin in Verbindung mit fachspezifischen geologischen Interpretationen gesetzt, um eine dreidimensionale Beschreibung des Gewässerbodens und insbesondere der oberen Sedimentschichten an der Gewässersohle zu erhalten. Für den Aufbau des Bodenmodells wurden Daten aus verschiedenen Quellen zusammengeführt sowie neue Daten erhoben. Folgende Parameter und Eigenschaften wurden betrachtet:

- Bathymetrie = Höhenlage der Gewässersohle
- Bodenformen (hier insbesondere subaquatische Dünen)
- Beschaffenheit des Oberflächensediments (anhand von Auswertungen der Seitensichtsonaraufnahmen und Kopplung mit Bodenproben)
- Korngrößenverteilung der Oberflächensedimente
- Porosität
- Prozentualer Anteil organischer Komponenten bei kohäsiven Feinsedimenten
- Mächtigkeit der mobilen Deckschicht = Sedimentmächtigkeit

Um das breite Spektrum der Phänomene und Fragestellungen aus dem Bereich der Morphodynamik der Deutschen Bucht abdecken zu können, wurde für das konzeptionelle Simulationsmodell ein Multi-Modellansatz genutzt (PLÜB and HEYER 2007). Die in AufMod eingesetzten Simulationsmodelle lassen sich sowohl nach systemtheoretischen (datenbasiert, prozessbasiert, prozessorientiert) als auch nach physikalischen Aspekten klassifizieren. Bezüglich der durch die Simulationsmodelle beschreibbaren Zeitspannen morphodynamischer Entwicklungen lassen sich die Modelle unterteilen in

- kurzfristige Zeitspannen (Tage bis zu einem Jahr),
- mittelfristige Zeitspannen (Jahre bis Jahrzehnte) und
- langfristige Zeitspannen (Jahrzehnte bis 100 Jahre).

Weitere Unterteilungen ergeben sich bezüglich der berücksichtigten physikalischen Phänomene sowie deren Granularität (Auflösung im Modell). Eine Übersicht des konzeptionellen Simulationsmodells gibt Abb. 3.

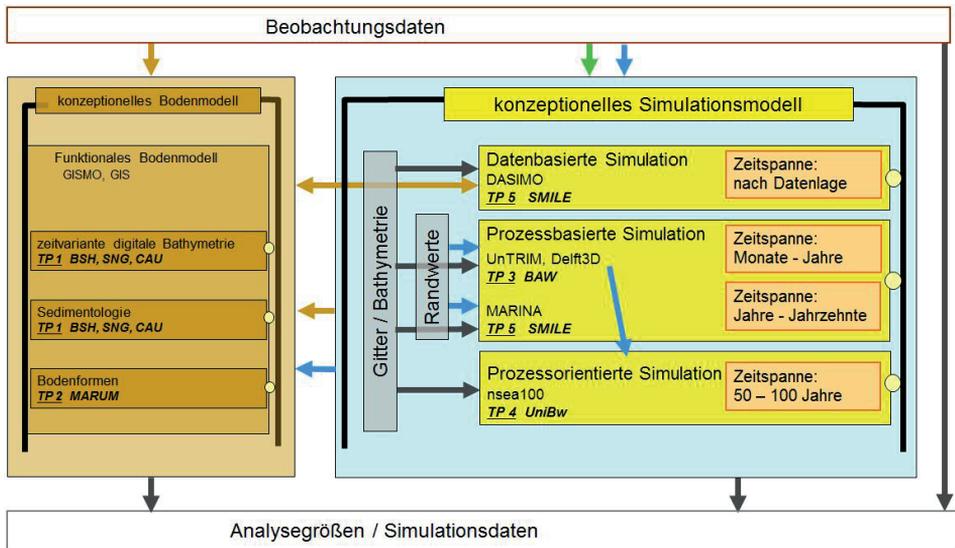


Abbildung 3: Übersicht des konzeptionellen Simulationsmodells.

4.2 Zusammenwirken/Interaktion von Boden- und Simulationsmodellierung

Im Gesamtprojekt AufMod wurde eine rückgekoppelte Verzahnung der Produkte aus Boden- und Simulationsmodell realisiert. Das Funktionale Bodenmodell liefert je nach Fragestellung und betrachteter Zeitspanne unterschiedliche Ergebnisse zur Beschreibung und Analyse des Meeresbodens. Hierzu gehören vor allem initiale

- Bathymetrien,
- Korngrößenverteilungen,
- Informationen über schwer erodierbare Bodenhorizonte,
- Porositäten usw.

Diese Produkte des Funktionalen Bodenmodells bilden gemeinsam mit den zeitlich zuordnenden hydrodynamischen und meteorologischen Daten die wesentliche Grundlage zur Steuerung der morphodynamischen Simulationsmodelle.

Zur Plausibilisierung und Validierung der morphodynamischen Simulationsmodelle wurden Hindcast-Rechnungen durchgeführt und mit Ergebnissen aus dem Bodenmodell verglichen. Hierzu gehörten die aus dem Bodenmodell abgeleiteten Analysen zu:

- Änderungen der Bathymetrie (morphologisch aktiver Raum),
- Änderungen der Korngrößenverteilung,
- Änderungen der Bodenformen sowie
- morphologische Geschwindigkeiten.

Mit den Informationen aus dem Bodenmodell konnten die Parametrisierungen der morphodynamischen Simulationsmodelle verbessert werden. Aus den im Projekt zusammengetragenen Bodenformverteilungen wurden in Verbindung mit hydrodynamischen Modellergebnissen Verbesserungen der Formulierungen für die Formrauheiten in den hydrodynamischen Modellen erreicht. Die Kornrauheit wurde direkt aus der Korngrößenverteilung des Bodenmodells ohne zusätzliche Parametrisierung übernommen.

Für eine umfassende morphodynamische Analyse der Vorgänge in der Deutschen Bucht ist die Datengrundlage hinsichtlich Abdeckung in Raum und Zeit immer noch lückenhaft. Die Übertragung der häufig nur punktuell vorliegenden Messdaten in die Fläche erforderte deshalb für die jeweilige Fragestellung geeignete Interpolations- und Approximationsmethoden. Eine Verbesserung der dafür einzusetzenden Interpretationsvorschriften konnte durch Hinzunahme weiterer physikalischer Parameter erfolgen. Hierzu gehören beispielsweise

- die Ausrichtung der netzfreien Interpolation der Bathymetrie nach den resultierenden Strömungen und
- die Berücksichtigung von mittleren Bodenschubspannungsverteilungen bei der Interpolation von Korngrößenverteilungen.

Mit diesem Vorgehen ließen sich Lücken in den Daten des Bodenmodells mit den Ergebnissen der morphodynamischen Modelle auffüllen. Die mit dem Bodenmodell gewonnenen Analysen und auch die im Funktionalen Bodenmodell implementierten Methoden konnten mit Ergebnissen der Simulationsmodelle ergänzt und verbessert werden. Insbesondere die datenbasierte Simulation profitierte so von Bodeninformationen und prozessbasierten Simulationsanalysen gleichermaßen.

4.3 Dokumentation der Daten und Analysen

Im zeitlich parallel zu AufMod durchgeführten F&E Projekt Marine Dateninfrastruktur Deutschland (MDI-DE) wurden die Grundlagen für eine webbasierte Veröffentlichung von Daten nach internationalen Standards geschaffen. Diese Standards wurden für einen „Infrastrukturknoten des BSH“ und den „Shelf Geo-Explorer“ in der Geodateninfrastruktur des BSH umgesetzt. Die Produkte aus AufMod konnten in der MDI-DE mit standardisierten Webdiensten und Metadaten aufbereitet und langfristig bereitgestellt werden.

In den Standardisierungsorganisationen befinden sich die Webdienste jedoch teilweise noch in Entwicklungs- und Veränderungsprozessen, was zu mitunter aufwendigen Anpassungen bei der Bereitstellung von Modellierungsdaten sowie zu weiterem Forschungsbedarf geführt hat. Die derzeit abgestimmten Dateninfrastrukturen der MDI-DE boten dennoch eine gute Grundlage für die erfolgreiche Durchführung des Projekts AufMod. Die umfangreichen Ergebnisse von AufMod werden auf dieser Grundlage langfristig bereitgestellt und einer breiten Öffentlichkeit verfügbar gemacht. Hierzu dient das zentrale Portal der MDI-DE (MDI-DE 2014).

5 Gemeinsame Darstellung der Untersuchungsergebnisse

Die gemeinsame Darstellung der umfangreichen Ergebnisse aus dem Verbundprojekt sind in Form von Zwischenberichten und einem Abschlussbericht als Datenprodukte über das Internet verfügbar. Die Veröffentlichung ausgewählter Ergebnisse ist in diesem Band, im Rahmen der Schriftenreihe „Die Küste“ (Heft 83, 2015), inhaltlich gegliedert und wird in 10 separaten Artikeln mit unterschiedlichen Verfassern dokumentiert.

5.1 Thematische Gliederung im Sonderband

Der AufMod-Sonderband ist thematisch in separate Artikel wie folgt gegliedert:

1. Einführung
2. Das Funktionale Bodenmodell: Aufbereitung einer konsistenten Datenbasis für die Morphologie und Sedimentologie
3. Erfassung von Sandverteilungsmustern zur großräumigen Analyse der Sedimentdynamik auf dem Schelf der Deutschen Bucht
4. Die Verteilung und Eigenschaften von Bodenformen in der Deutschen Bucht, eine Rekonstruktion der Karten von Ulrich (1973)
5. Zur zeitlichen Variabilität der Sedimentverteilung in den Gezeitenrinnen Piep und Hever
6. Schließen von Datenlücken und Verbesserung der Messmethoden
7. Entwicklung und Anwendung eines Langfrist-Morphodynamikmodells für die Deutsche Bucht
8. Analyse des Sedimenttransports und der Morphodynamik in der Deutschen Bucht auf Basis des Multi-Modell-Ansatzes
9. Datenmanagement in AufMod
10. Synthese der interdisziplinären Forschung in AufMod

5.2 Abschlussbericht

Der gemeinsame Abschlussbericht aller am Projekt beteiligten Institutionen ist zentral gespeichert und abrufbar bei:

Technische Information Bibliothek (TIB) Hannover
(DOI = 10.2314/GBV:780783271) und verlinkt unter:
<http://edok01.tib.uni-hannover.de/edoks/e01fb14/780783271.pdf>

5.3 Internetpräsenz

Informationen und Daten über und von AufMod können über das Internet recherchiert und heruntergeladen werden. Dazu einige URL-Adressen:

- KFKI: <http://www.kfki.de/prj-aufmod/en>
- MDI-DE: <https://www.mdi-de.org/>
- AufMod Projektseite unter MDI-DE:
<http://projekt.mdi-de.org/verwandte-projekte/40-aufbau-von-integriertenmodellsystemen.html>

- GeoSeaPortal, das Geodatenportal des BSH auch mit AufMod-Daten:
<https://www.geoseaportal.de/>

6 Danksagung

Unser Dank gebührt dem Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI), das dieses Projekt aus Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) unter der Leitung des Projektträgers Jülich (PTJ) finanziell über einen Zeitraum von drei Jahren gefördert hat. Weiterhin danken wir dem KFKI für die fachliche Unterstützung im Rahmen der projektbegleitenden Gruppe. Unser Dank gilt auch allen Behörden und Institutionen, die Daten für die Realisierung des Projektes bereitgestellt haben. Zuletzt bedanken wir uns bei allen Projektpartnern für die konstruktive Zusammenarbeit.

Die einzelnen Förderkennzeichen lauten:

- AufMod-A: 03KIS082 (Bodenmodell BSH)
- AufMod-B: 03KIS083 (Bodenformen)
- AufMod-C: 03KIS084 (Prozessorientierte Modellierung)
- AufMod-D: 03KIS085 (MD-Langzeitsimulation)
- AufMod-E: 03KIS086 (Modellbasierte Analyse)
- AufMod-F: 03KIS087 (Bodenmodell Uni Kiel)
- AufMod-G: 03KIS087 (Bodenmodell SaM)

7 Schriftenverzeichnis

- HEYER, H.: Forschung und Entwicklung im Küsteningenieurwesen – Ein Beitrag zum Themenhorizont aus aktueller Sicht. In: KFKI Aktuell, Jg. 12, 1, 1-2, 2012.
- HEYER, H. und SCHROTTKE, K.: Aufbau von integrierten Modellsystemen zur Analyse der langfristigen Morphodynamik in der Deutschen Bucht. AufMod – gemeinsamer Abschlussbericht für das Gesamtprojekt mit Beiträgen aus allen 7 Teilprojekten. doi: 10.2314/GBV:780783271, 2013, <http://edok01.tib.uni-hannover.de/edoks/e01fb14/780783271.pdf>, 2013.
- MDI-DE (Hrsg.): Webseite, Stand 23.06.2014: <http://www.mdi-de.org>.
- MILBRADT, P.; DOROW, C. und ASCHE, C.: Identifikation morphologischer Tendenzen und Geschwindigkeiten im Küstennahbereich (ImTG). Abschlussbericht KFKI-Projekt 03KIS059. Leibniz Universität Hannover: <http://edok01.tib.uni-hannover.de/edoks/e01fb10/620636149.pdf>, 2009.
- MILBRADT, P.; SELLERHOFF, F. und KRÖNERT, N.: Entwicklung und Implementierung von Methoden zur Aufbereitung konsistenter digitaler Bathymetriem KODIBA. Abschlussbericht KFKI-Projekt 03KIS042. Hannover, smile consult GmbH, 2005. <http://edok01.tib.uni-hannover.de/edoks/e01fb05/493564357.pdf>
- OUMERACI, H.: KFKI-Forschung im Küsteningenieurwesen. In: KFKI Aktuell, Jg. 13, 2, 1-2, 2013.
- PLÜB, A. and HEYER, H.: Morphodynamic Multi-model Approach for the Elbe estuary. In: DOHMEN-JANSSEN, C. and HUSCHLER, S. (Hrsg.): River, Coastal and Estuarine Morphodynamics: RCEM 2007, Two Volume Set. 113-117. doi: 10.1201/NOE0415453639-c15, 2007.

Das Funktionale Bodenmodell: Aufbereitung einer konsistenten Datenbasis für die Morphologie und Sedimentologie

Peter Milbradt, Jennifer Valerius und Manfred Zeiler

Zusammenfassung

Beobachtungs- bzw. Vermessungsdaten des Meeresbodens stellten über einen sehr langen Zeitraum die Methode zur Analyse und Beschreibung der morphodynamischen Veränderungen an der deutschen Nordseeküste dar. Alternative Verfahren bilden heute prozessbasierte numerische Simulationsmodelle für Hydrodynamik, Transportvorgänge und Morphodynamik. Die Güte auch dieser prozessbasierten morphodynamischen Simulationsmodelle hängt wesentlich von den für den Modellbetrieb und die Validierung zur Verfügung stehenden Naturdaten ab. Das Funktionale Bodenmodell stellt die softwaretechnische Grundlage für eine konsistente Datenbasis zur Beschreibung der Oberfläche des Meeresbodens dar.

Im Beitrag werden sowohl die Datenbasis und die softwaretechnische Realisierung als auch die ableitbaren Produkte vorgestellt.

Schlagwörter

Nordsee, Deutsche Bucht, Sedimentzusammensetzung, Sedimentverteilung, Porosität, Bathymetrie, Sedimenttransport, Morphodynamik, numerische Modellierung, mittlerer Meeresspiegelanstieg

Summary

Observation and measurement data of the sea floor were the method of analysis and description of the morphodynamischen changes on the German North Sea coast over a very long period of time. Alternative procedures are today process-based numerical simulation models for hydrodynamics, transport processes and morphodynamics. The quality of this process-based morphodynamic simulation models also depends on the natural data for the operation of the model and validation available. The functional sea floor model represents the software technical basis for a consistent data base to describe the surface of the seabed. The paper presents both the preparation of a database and the software engineering realization as well as the deriving products.

Keywords

North Sea, German Bight, sediment mixture, sediment distribution, porosity, bathymetry, sediment transport, morphodynamic, numerical modelling, mean sea level rise

Inhalt

1	Einleitung	20
2	Komponenten des Funktionalen Bodenmodells	21
3	Basisdaten.....	22
3.1	Bathymetrische und topographische Vermessungsdaten	22
3.2	Bodenformen.....	23
3.3	Sedimenteigenschaften	23
3.4	Konsolidierter Horizont.....	25
3.5	Wasserbauwerke und Ersatzmodelle.....	26
4	Methodische Grundlagen des Funktionalen Bodenmodells	26
4.1	Bathymetrische Modellkomponente.....	27
4.1.1	Raum-Zeit-Interpolation	28
4.2	Sedimentologische Modellkomponente.....	29
4.2.1	Anisotrope Interpolation.....	29
5	Produkte des Funktionalen Bodenmodells.....	31
5.1	Bathymetrische Zeitreihe Deutsche Bucht.....	31
5.2	Morphologische Parameter.....	32
5.3	Sedimentologische Parameter.....	32
5.4	Modelldaten und Gitter.....	34
6	Geomorphologische Analysen in der Deutschen Bucht	34
6.1	Bathymetrische Entwicklung der Deutschen Bucht	34
6.2	Entwicklung der Wattflächen	35
6.3	Entwicklung des Übergangs zum Schelf.....	35
6.4	Verknüpfung von Meteorologie und bathymetrischer Entwicklung	36
7	Zusammenfassung	37
8	Schriftenverzeichnis.....	37

1 Einleitung

Die deutsche Nordseeküste verfügt über einen ausgeprägten Formenreichtum und ist Teil des größten Wattenmeeres der Welt. Sowohl veränderte Umweltbedingungen, in Form des globalen Klimawandels und dem damit einhergehenden Anstieg des mittleren Meeresspiegels, als auch die unterschiedlichen anthropogenen Nutzungsanforderungen bedürfen eines vertieften Verständnisses der hydrologischen und morphodynamischen Entwicklung in der Deutschen Bucht.

Beobachtungs- bzw. Vermessungsdaten des Meeresbodens bilden auch heute noch die Basis zur Analyse und Beschreibung morphologischer Veränderungen an der deutschen Nordseeküste sowie zum Aufbau, zur Validierung und zum Betrieb prozessbasierter Simulationsmodelle.

In den vergangenen Jahrzehnten sind viele Naturdaten des Meeresbodens neu erhoben worden. Sowohl unterschiedliche Fragestellungen, die der Datenerfassung zugrunde

liegen, als auch die stetige Veränderung bzw. Weiterentwicklung von Messverfahren führten zu einer sehr heterogenen Datenbasis. In dem im KFKI-Projekt AufMod aufgebauten Funktionalen Bodenmodell werden die Beobachtungsdaten, die die Oberfläche des Meeresbodens beschreiben, in ihrem zeitlichen und örtlichen Kontext archiviert und mit räumlichen und zeitlichen Interpolationsverfahren verknüpft. Die Zusammenführung dieser unterschiedlichen Informationen in einem Funktionalen Bodenmodell eröffnet neue Möglichkeiten der Plausibilisierung, geomorphologischen Analyse und Verknüpfung mit hydrologischen und meteorologischen Daten.

2 Komponenten des Funktionalen Bodenmodells

Das Funktionale Bodenmodell beschreibt die Oberflächeneigenschaften des Meeresbodens der Nordsee, mit besonderem Schwerpunkt auf den Bereich der Deutschen Bucht, und besteht derzeit aus folgenden Komponenten:

- Bathymetrie
 - mittlere Höhenlage des Meeresbodens
 - Bodenformen in parametrisierter Form
- Sedimentologie
 - Kornverteilung der Oberflächensedimente
 - Porosität
 - organischer Anteil im Sediment
- konsolidierter Horizont
 - holozäne Basis/Basis nordseezeitlicher Sande
- Wasserbauwerke und Ersatzmodelle

Diese Funktionalität kann um weitere Eigenschaften des Gewässerbodens erweitert werden.

Die örtliche Ausdehnung des Funktionalen Bodenmodells umfasst die gesamte Nordsee und entspricht in der Ausdehnung dem im Forschungsvorhaben AufMod betriebenen Nordseemodell (siehe Abb. 1). Als Basiskoordinatensystem wurde DHDN92 und WGS84 UTM32 zu Projektbeginn festgelegt.

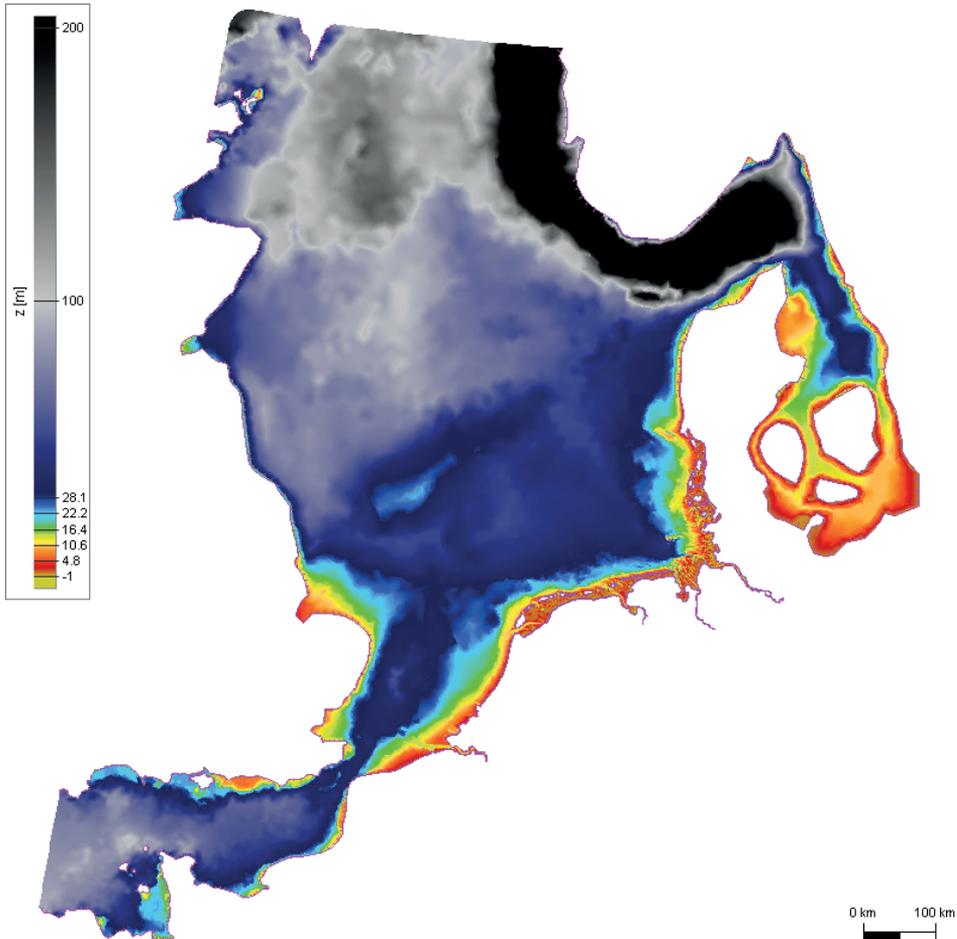


Abbildung 1: Ausdehnung des Funktionalen Bodenmodells.

3 Basisdaten

Die zusammengetragenen Basisdaten orientieren sich zunächst an den derzeit umgesetzten Komponenten des Funktionalen Bodenmodells. In den folgenden Abschnitten werden sowohl die Daten als auch die zu deren Interpretation herangezogenen Interpolationsverfahren beschrieben.

3.1 Bathymetrische und topographische Vermessungsdaten

Wesentliche Quellen der (See-)Vermessungsdaten bildeten die Datenbestände des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH), der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) und der Küstenschutzbehörden. Ergänzt wurde dieser Datenbestand durch Airborn Laserscanning-Daten aus den Projekten zur Erstellung

Digitaler Geländemodelle für den Wasserlauf (DGM-W) im Auftrag der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) und denen der Landesvermessung Schleswig-Holstein sowie digitalisierten historischen Arbeitskarten der Seevermessung des BSH. Die aus den unterschiedlichen Quellen bereitgestellten Vermessungsdaten, welche völlig unterschiedliche Charakteristika haben (Profilvermessungen, Linienpeilungen, Flächenpeilungen, Laserscandaten,...), wurden plausibilisiert, mit zugehörigen Metadaten verknüpft und in die digitale Bathymetrie-Komponente übernommen.

Insgesamt wurden mehr als 20.000 Vermessungen (~3 Mrd. Punkte) zusammengetragen. Der Erhebungszeitraum dieser Daten umfasst die Jahre von 1948 bis 2012. Neben den Vermessungsdaten von deutschen Verwaltungen und Institutionen wurden dem Projekt auch bathymetrische Daten vom Britischen Oceanographic Data Center (BODC) und der dänischen Küstendirektion zur Verfügung gestellt.

Die Übertragung der in der Regel punktuellen Information in die Fläche erfolgt durch strukturangepasste Interpolationsverfahren (MILBRADT 2011). Um zu einem Zeitpunkt eine Tiefe zu erhalten, wird eine Raum-Zeit-Interpolation verwendet (MILBRADT 2011). Auf diese Weise ist es möglich, auf frei wählbaren Modellgittern zu jedem gewünschten Zeitpunkt Tiefenwerte zu bestimmen.

3.2 Bodenformen

Im Rahmen des Projekts wurden sowohl historische Untersuchungen zur Verteilung von Bodenformen zusammengestellt als auch aktuelle Messdaten analysiert. Analoge Karten der Untersuchung von ULRICH (1973) wurden digitalisiert und dekodiert (ERNSTSEN et al. in review). Ergänzt wurden diese historischen Daten durch im Projekt erstellte Bodenformkarten für Weser, Jade und Elbe. Die Parametrisierung im Funktionalen Bodenmodell erfolgte, wie in der Abb. 2 skizziert, über eine skalare Größe, die Dünenhöhe und zwei Richtungsvektoren, die die Dünenlänge in beiden Richtungen des Dünenkamms parametrisieren.

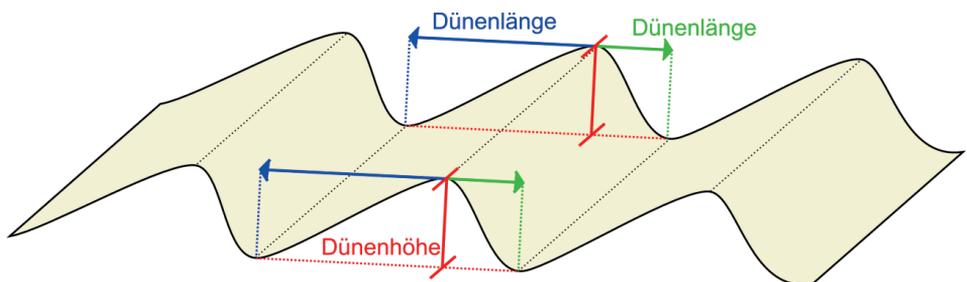


Abbildung 2: Definition der Bodenformparameter (Skizze).

3.3 Sedimenteigenschaften

Die Bestimmung der Sedimenteigenschaften ist wesentlich aufwändiger als die Vermessung der Tiefe. Anhand punktuell entnommener Bodenproben können Parameter, wie beispielsweise die Korngrößenverteilung, erfasst werden. Da für die großflächige Analyse der zeitlichen Entwicklung nicht genügend Wiederholungsmessungen vorhanden sind,

galt es für das Funktionale Bodenmodell, zunächst eine möglichst engmaschige Flächenabdeckung zu erreichen. Im Bereich der Deutschen Bucht besteht durch die räumlich hochauflösende Sedimentbeprobung des Deutschen Hydrographischen Instituts (DHI) eine sehr gute Datenbasis für die 1960er und -70er Jahre. Durch die Unterstützung der geologischen Dienste der Nordsee-Anrainerstaaten konnte eine recht gute Abdeckung für die gesamte Nordsee erreicht werden. Insgesamt wurden rd. 80.000 Korngrößenverteilungen mit unterschiedlichen Auflösungen zusammengetragen und mit Metadaten versehen. In Abb. 3 ist die Verteilung der Probenstationen grafisch dargestellt.

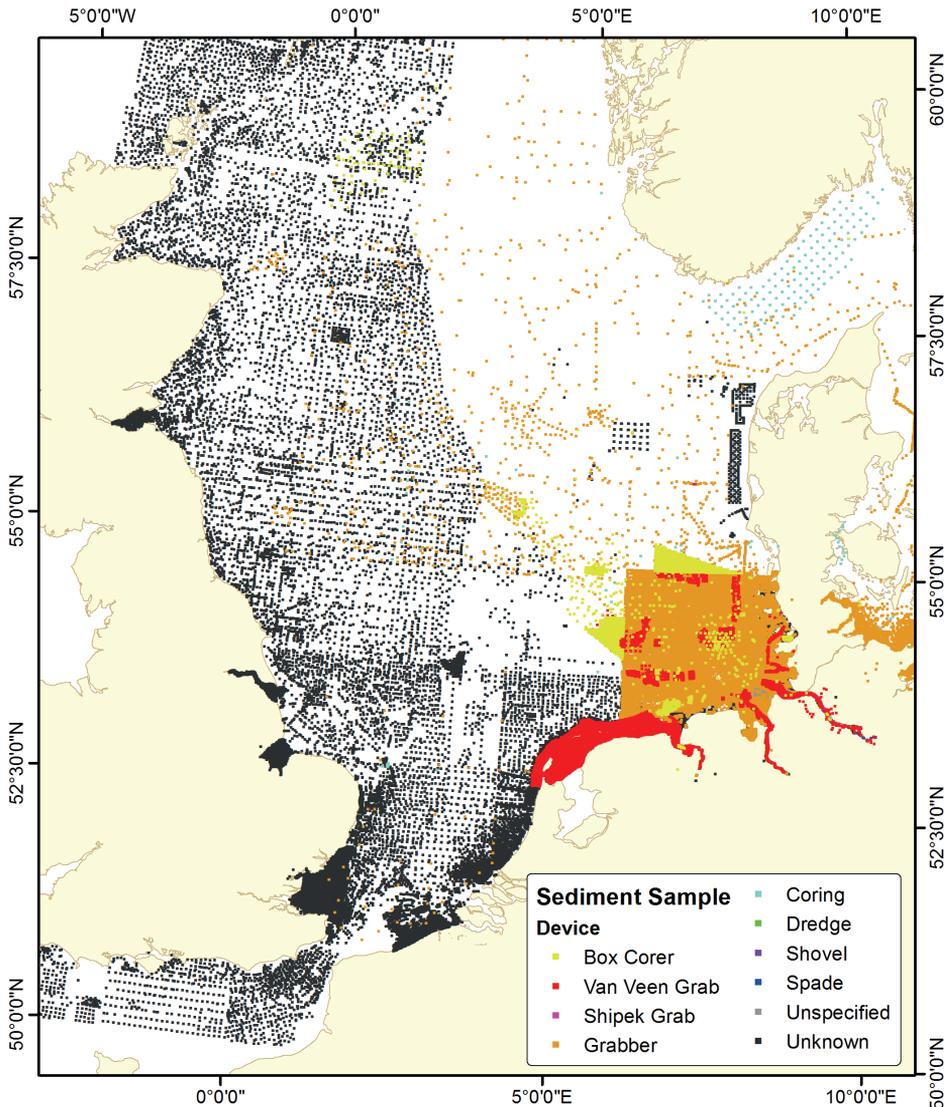


Abbildung 3: Lage und Entnahmeverfahren der zusammengetragenen Sedimentproben.

Informationen zum organischen Anteil oder der Porosität lagen nur für sehr wenige Proben vor, so dass diese Informationen in das Funktionale Bodenmodell aufgenommen wurden, jedoch für die im Weiteren dargestellten räumlichen und zeitlichen Interpolations- und Approximationsanalysen nicht nutzbar waren.

3.4 Konsolidierter Horizont

Sowohl für den Betrieb morphodynamischer Simulationsmodelle als auch geomorphologischer Analysen ist die Kenntnis des verfügbaren mobilisierbaren Sedimentes notwendig. Die Modellierung der Mächtigkeit der mobilen Deckschicht erfolgte indirekt durch den Aufbau eines Modells eines zunächst stationären konsolidierten Horizontes. Für das Modell des konsolidierten Horizontes wurde auf verfügbare Daten zurückgegriffen, die entweder die Lage der Holozänbasis oder die Basis der Nordsee-zeitlichen Sande abbilden. In Verbindung mit der zeitvarianten Bathymetrie des Funktionalen Bodenmodells ergibt sich ein zeitvariantes Modell der mobilen Deckschicht.

Quellen für den Aufbau des Modells des konsolidierten Horizontes waren die vorangegangenen KFKI-Forschungsprojekte für den Bereich der Nord- und Ostfriesischen Inseln (KFKI-Forschungsprojekt „Materialinventur an der deutschen Nordseeküste“ (ZEILER et al. 2000a) und „Wattenmeersedimente: Sedimentinventar Nordfriesisches Wattenmeer“ (EPPEL et al. 2006)). Außerdem wurden vorhandene Modelle der Holozänbasis herangezogen (RICKLEFS and ASP NETO 2005), digitalisierte Isolinien des Elberstromtals (FIGGE 1981) und aus der „Geologischen Küstenkarte von Niedersachsen – Relief der Holozänbasis (GHBK25)“ des Landesamtes für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG). Abb. 4 zeigt die räumliche Verbreitung der verwendeten Daten, markiert nach deren Urhebern.

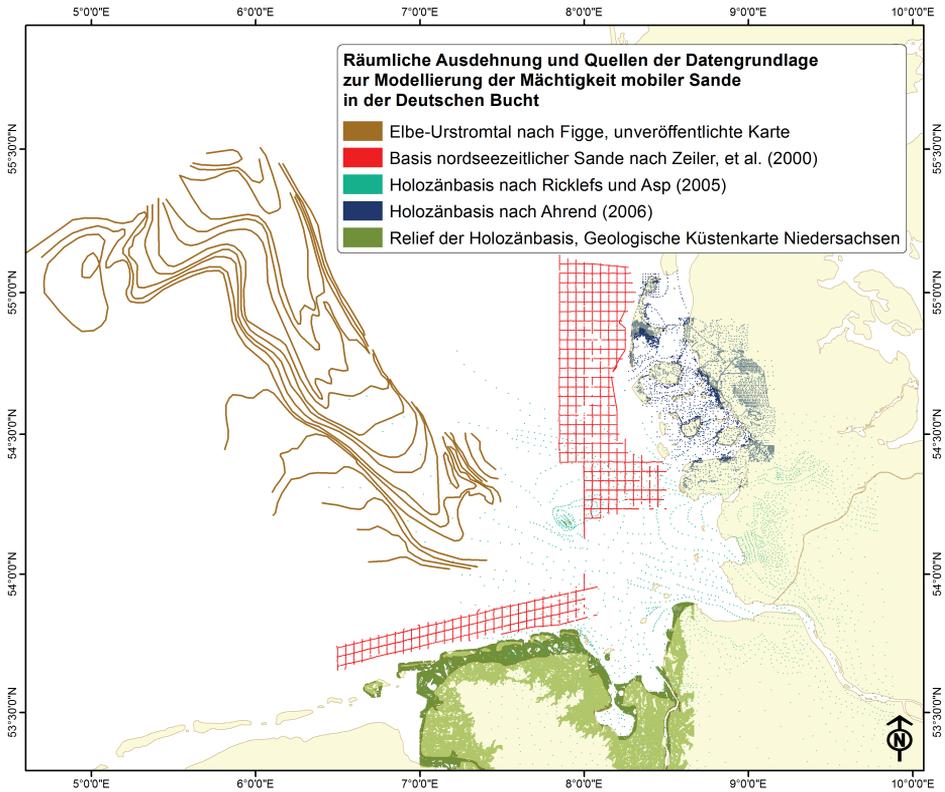


Abbildung 4: Verteilung der Datengrundlage zur Modellierung des konsolidierten Horizonts.

3.5 Wasserbauwerke und Ersatzmodelle

Große Bereiche des Küstenraumes sind geprägt durch anthropogene Eingriffe. Hierzu zählen

- starre Wasserbauwerke wie Buhnen, Leitwerke, Deckwerke, Häfen usw.
- flexible Wasserbauwerke wie Sandaufspülungen, Klappstellen usw.
- Fahrrinnen, die auf eine vorher festgelegte Tiefe zu unterhalten sind.

Starre Wasserbauwerke werden auf der Basis von Plänen, Karten und Luftbildern als entsprechende digitale Bauwerksmodelle im Funktionalen Bodenmodell berücksichtigt.

4 Methodische Grundlagen des Funktionalen Bodenmodells

Die im Funktionalen Bodenmodell integrierten Naturdaten haben sehr unterschiedliche Datendichten und -abdeckungen. Jede Komponente des Funktionalen Bodenmodells ist für zukünftige Nutzungen als zeitvariantes Modell entworfen worden. Die Möglichkeit, zeitvariable Modellergebnisse zu erhalten, hängt ganz wesentlich von den zugrundeliegenden Daten ab. Die derzeit verfügbare Datenbasis erlaubt noch nicht für alle

Komponenten zeitvariable Ergebnisse. Deshalb bestehen alle Modellkomponenten aus einem zeitinvarianten Basis-Modell und den eigentlichen Messdaten mit zugehörigen Metadaten, inklusive Angaben zu den empfohlenen Interpolationsmethoden.

Das **zeitinvariante Basismodell** stellt sicher, dass für alle Örtlichkeiten des Modellgebietes und jede Modellkomponente eine Information geliefert wird. Diese zeitinvarianten Basismodellkomponenten bekommen einen Zeitstempel, der vor allen verfügbaren gemessenen Datensätzen liegt (in der Regel 01.01.1900).

Als Modellgröße werden plausible Informationen gewählt:

- Für die örtliche *mittlere Höhenlage des Bodens* wird der Mittelwert aller gemessenen z -Werte an einem Ort verwendet und bekommt in der aktuellen bathymetrischen Modellkomponente das Datum 01.01.1900 (da die Höhenlage nicht bekannt ist, entspricht diese Vorgehensweise einer zeitlichen Extrapolation auf der Basis der Shepard-Interpolation). Für die Höhenunschärfe kann dann im Weiteren die Varianz der z -Werte am Ort verwendet werden.
- Für *Bodenformen* wird die Bodenformkarte von ULRICH (1973), mit dem Zeitstempel 01.01.1970, herangezogen. Die fehlende Richtungsinformation der Bodenformvektoren wurde auf der Basis resultierender Strömungen auf der Bathymetrie von 1970 abgeschätzt.
- Für die *Korngrößenverteilung* wird auf der Basis eines mittleren d_{50} eine lognormale Korngrößenverteilung verwendet, die den Zeitstempel 01.01.1900 bekommt.
- Die *Porosität* wird aus dem mittleren d_{50} nach WU und WANG (2006) bestimmt und bekommt den Zeitstempel 01.01.1900.
- Der *organische Anteil* wird als konstant 5 % gesetzt und bekommt den Zeitstempel 01.01.1900.
- Der *konsolidierte Horizont* entsteht aus der Verknüpfung der in Kap. 3.4 aufgeführten Datenquellen. Um die gesamte Fläche der Deutschen Bucht abzudecken, wurde in Bereichen ohne Informationen die größte Tiefe, die in allen bathymetrischen Vermessungsdaten zu beobachten war, herangezogen. Der konsolidierte Horizont bekommt den Zeitstempel 01.01.1900.

Liegen ausreichende Vermessungen über die Zeit vor, so lassen sich aus diesen Messdaten in Verbindung mit geeigneten räumlichen und zeitlichen Interpolationsverfahren **zeitvariante Modelle** ableiten. Die in AufMod zusammengetragenen Daten lassen im Prinzip nur bei den bathymetrischen Vermessungen den Aufbau einer zeitvarianten Modellkomponente zu (MILBRADT 2011). In Verbindung mit dem stationären Modell des konsolidierten Horizontes kann dann ein zeitvariantes Modell der Mächtigkeit der mobilen Sande bestimmt werden.

4.1 Bathymetrische Modellkomponente

Die digitale bathymetrische Modellkomponente basiert auf Vermessungen, zugehörigen Metadaten und Interpolationsverfahren in Raum und Zeit. Zur Beschreibung der Veränderungen des Gewässerbodens wird von der Modellvorstellung einer kontinuierlichen Funktion $z(x,y,t)$ in Raum und Zeit ausgegangen.

4.1.1 Raum-Zeit-Interpolation

Der Aufbau der bathymetrischen Modellkomponente ist in Abb. 5 schematisch dargestellt. In Bereichen, in denen Wiederholungsmessungen vorhanden sind, stellen die Zeitpunkte der frühesten und letzten Tiefenmessung die Grenzen einer kontinuierlichen Raum-Zeit-Bathymetrie dar. Innerhalb dieser kontinuierlichen Raum-Zeit-Bathymetrie können durch die im Funktionalen Bodenmodell implementierten raum-zeitlichen Interpolationsverfahren quasi-synoptische Tiefenverteilungen berechnet werden. Unter einer quasi-synoptischen Bathymetrie wird also der horizontale Schnitt durch die kontinuierliche Raum-Zeit-Bathymetrie verstanden.

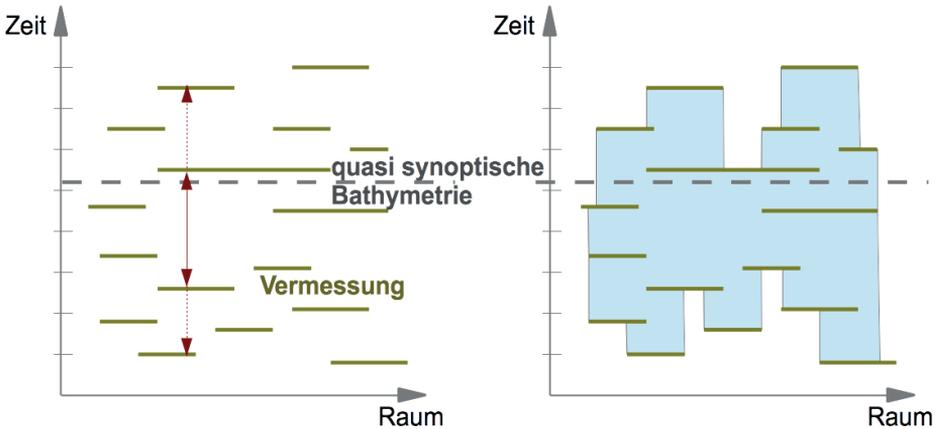


Abbildung 5: Schematische Darstellung einer Raum-Zeit-Interpolation (links) und des zeitlichen Aussagebereiches (rechts).

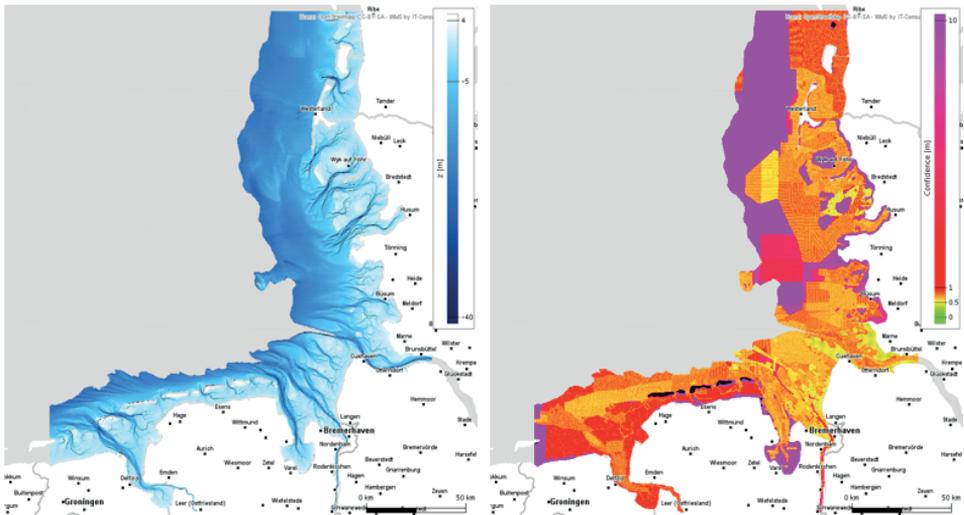


Abbildung 6: Räumlich und zeitlich interpolierte Tiefenverteilung zum 01.01.2006 (links) und zugehörige absolute Unschärfe (rechts).

Um die Lage des Gewässerbodens an einer Stelle und zu einem Zeitpunkt zu bestimmen, wird in allen betrachteten Orten aus den dort enthaltenden Vermessungen der z-Wert bestimmt und mit dem Aufnahmezeitpunkt verknüpft. Anschließend wird in der Zeit interpoliert. Abb. 6 (links) zeigt eine auf diese Weise generierte Tiefenverteilung in der Deutschen Bucht auf einem 50 m-Raster zum 01.01.2006. Die rechte Abbildung gibt die zugehörige absolute Unschärfe wieder.

Die absolute Unschärfe ergibt sich aus der Messunschärfe (in Lage und Höhe) und der durch die Interpolation in Raum und Zeit induzierten Unschärfe. In einem weiteren Schritt müssen diese induzierten Unschärfen mit den morphologischen Gegebenheiten verknüpft werden.

4.2 Sedimentologische Modellkomponente

Die Korngrößenverteilungen wurden in unterschiedlichen Auflösungen bereitgestellt. Die Bandbreite reichte von nur einem Parameter d_{50} über 3 Kornklassen bis hin zu in $\frac{1}{4}$ Phi-Graden aufgelösten Korngrößenverteilungen. Die Kornparameter wurden in Summenkurven überführt. Stand nur ein d_{50} zur Verfügung, so wurde eine Summenkurve einer Log-Normal-Verteilung herangezogen. Für alle anderen Auflösungen der Korngrößenverteilung wurde über eine monotone kubische Spline-Interpolation (KRUGER 2014) für jede Sedimentprobe eine Summenkurve generiert. Die so homogenisierten Summenkurven können nun im Rahmen von Interpolations- und Approximationsverfahren miteinander kombiniert werden.

4.2.1 Anisotrope Interpolation

Die räumliche Interpolation auf spärlich verteilten Daten erfordert speziell angepasste Interpolationsverfahren. Traditionelle Interpolationsverfahren können durch die Berücksichtigung von physikalischen Gegebenheiten deutlich verbessert werden. Zur räumlichen Interpolation der Sedimentsummenkurven wurde eine anisotrope Shepard-Interpolation herangezogen, die sich an resultierenden Sedimenttransportvektoren ausrichtete. Diese anisotrope inverse Abstandsinterpolation berücksichtigt jeweils zehn Messpunkte innerhalb einer Ellipse um den Gitternetzpunkt. Die Länge und Ausrichtung der Haupt- und Nebenachsen der Ellipse ergeben sich aus simulierten residualen Sedimenttransporten des Jahres 2006. Abb. 7 veranschaulicht die Verteilung von Messpunkten und Vektoren residualer Sedimenttransporte am Beispiel des Elbeästuars (rechte Abbildung) sowie die Ausrichtung einer Ellipse anhand von Vektoren im Gegensatz zu einem metrischen Suchradius (links).

Eine Gegenüberstellung des Mediankorndurchmessers, der durch eine anisotrope und durch eine isotrope Shepard-Interpolation modelliert wurde, ist in Abb. 8 für den Ausschnitt des Elbeästuars dargestellt. Es zeigt sich, dass das gröbere Sediment im Bereich der Hauptrinne der Elbe durch die anisotrope Interpolation weniger gesprenkelt wirkt (links) als im Falle einer isotropen Interpolation (rechts).

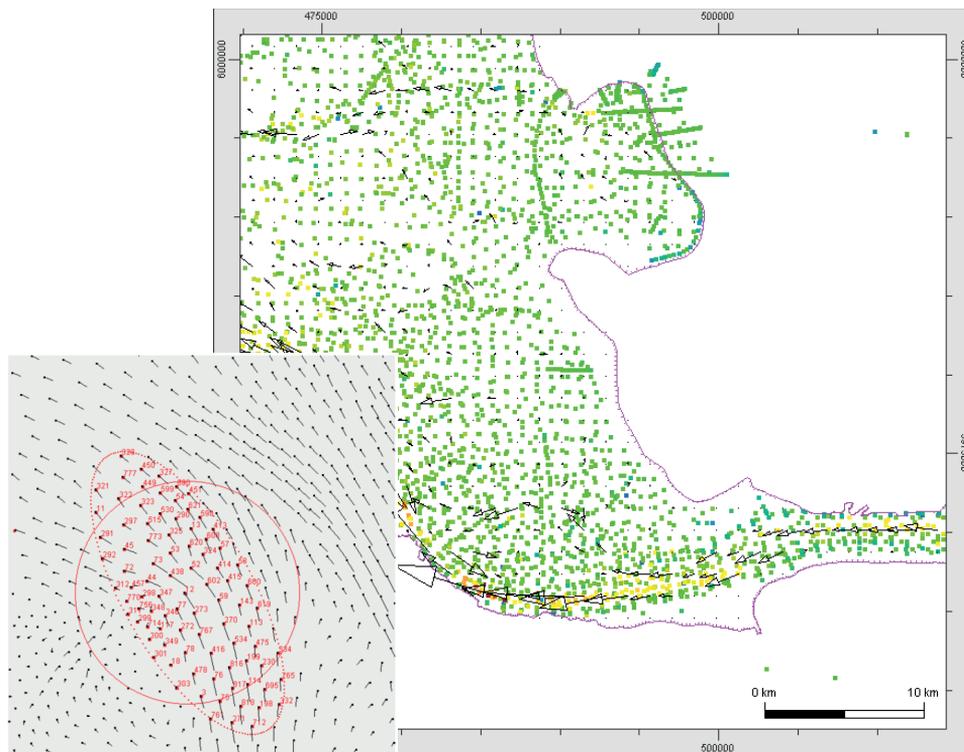


Abbildung 7: Median (d50) der Korngrößenverteilung (Punkte) und Vektoren resultierender Sedimenttransporte im Elbeästuar für das Jahr 2006. Ausrichtung einer Ellipse nach Vektoren residualer Sedimenttransporte (links).

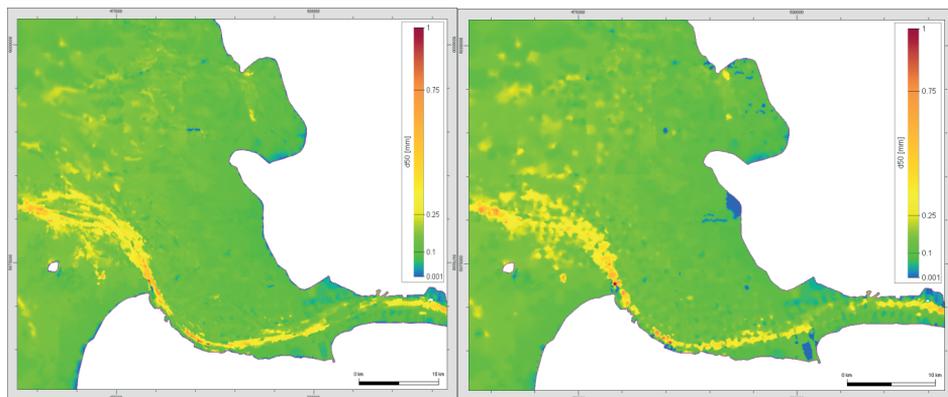


Abbildung 8: Gegenüberstellung einer anisotropen Interpolation des Medianwerts (links) und einer isotropen Interpolation (rechts) im Elbeästuar, auf Grundlage der in Abb. 7 dargestellten Messpunkte und Vektoren.

5 Produkte des Funktionalen Bodenmodells

Zu den wesentlichen Produkten des Funktionalen Bodenmodells gehören konsistente Tiefenverteilungen und daraus abgeleitete morphologische und sedimentologische Parameter.

Die Produkte stehen unter <ftp://ftp.bsh.de/outgoing/AufMod-Data> zur Nutzung zur Verfügung.

5.1 Bathymetrische Zeitreihe Deutsche Bucht

Die Tiefenverteilung der gesamten deutschen Nordsee wurde auf ein 250 m * 250 m-Raster interpoliert, zeitlich bezogen auf den 01.06.2012. Für den morphologisch hoch dynamischen Küstennahbereich war es aufgrund der umfangreichen Wiederholungsmessungen möglich, zeitvariante Bathymetrien zu berechnen.

Der Zeitraum dieser Datenreihe reicht von 1982 bis 2012, wobei jeweils zum 01.06. eines jeden Jahres eine Topographie raum-zeitlich interpoliert wurde. Die räumliche Auflösung des Modellgitters dieser umfangreichen Zeitreihe beträgt 50 m * 50 m, mit einer Ausdehnung von der Küstenlinie bis zur seewärtigen 20 m-Isobathe (vgl. Abb. 9). Zusätzlich werden für jeden Tiefendatensatz zwei Indikatoren zur Einschätzung der Güte der Tiefenapproximation aufgrund der Modellbildung und des zeitlichen und örtlichen Abstandes zu den Messpunkten angegeben. Die *Confidence* beschreibt hierbei eine absolute Unschärfe (vgl. Kap. 4.1.1), wohingegen *Minimum dt* die zeitliche Entfernung der nächsten Vermessung, die zur Interpolation herangezogen wurde, beschreibt.

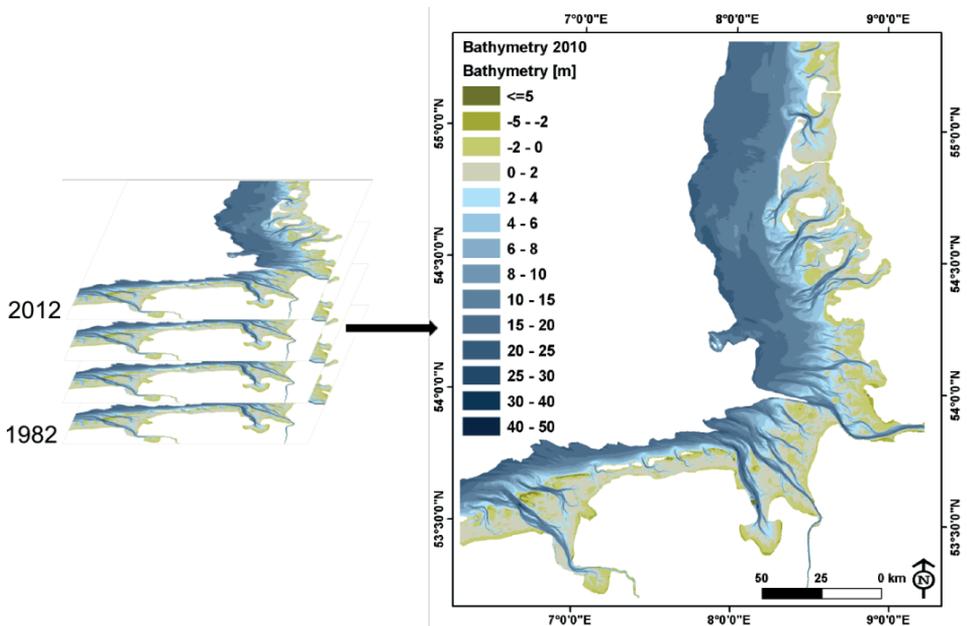


Abbildung 9: Bathymetrische Zeitreihe mit jährlichen Tiefenverteilungen über den Zeitraum 1982 - 2012, jeweils zum 01.06.2010. Rechts: Zeitscheibe vom 01.06.2010, nach der Klassifizierung im Fachinformationssystem „Shelf Geo-Explorer“ des BSH.

5.2 Morphologische Parameter

Durch analytische und statistische Auswertungen der bathymetrischen Zeitreihe können weitere Informationen über die Morphodynamik des Betrachtungsraums gewonnen werden.

Bathymetrische Änderungsraten (Erosions- und Sedimentationsraten) erhält man, indem Tiefendifferenzen zweier Jahrestopographien für unterschiedliche Zeiträume (1, 5, 10 und 30 Jahre) berechnet werden.

Der *Morphologische Raum* errechnet sich aus der Differenz der maximalen und minimalen Tiefe an jedem Gitterpunkt. Er gibt demnach Aufschluss über die Mächtigkeit der maximalen Sedimentverlagerung innerhalb des Betrachtungszeitraums ($(z_{\max}-z_{\min})$, vgl. Abb. 10 links). Dieser Wert eignet sich besonders zur Analyse der großräumigen Morphodynamik. Auf diese Weise lassen sich die hochdynamischen Rinnen von den weniger mobilen Wattflächen gut abgrenzen. Es ist jedoch nicht ersichtlich, ob im betrachteten Zeitraum Sedimentation oder Erosion stattgefunden hat. Auch das Zeitintervall, in dem die morphologische Aktivität stattgefunden hat, ist nicht erkennbar.

Ein weiterer Parameter zur Analyse der Morphodynamik ist der *Morphologische Drive* ($((dz/da)_{\max}-(dz/da)_{\min})$), die Differenz aus der größten beobachteten Sedimentation und Erosion (vgl. Abb. 11, rechts). Diese Kenngröße ermöglicht eine Aussage darüber, ob eine morphologische Änderung über den Betrachtungszeitraum stetig verlief oder ob Extremereignisse stattgefunden haben. Hiermit lässt sich auch die Verlagerung von Rinnen gut identifizieren.

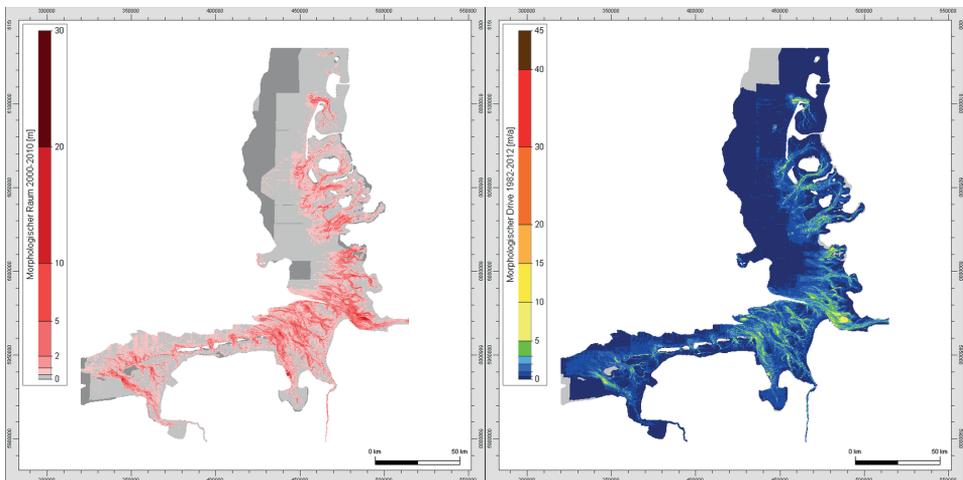


Abbildung 10: Bathymetrischer Raum und Drive für den Küstenstreifen der Deutschen Bucht.

5.3 Sedimentologische Parameter

Für den Bereich der Deutschen Bucht wurden Korngrößenverteilungen auf ein $250\text{ m} \times 250\text{ m}$ -Raster nach dem in Kap. 4.2.1 beschriebenen Verfahren interpoliert. Auf der Grundlage dieser Kornsummenkurven wurden folgende Parameter als Produkte für den Bereich der Deutschen Bucht aufbereitet:

- Median-Korndurchmesser der interpolierten Kornsummenkurve
- Mittelwert des Korndurchmessers
- Sortierung nach TRASK (1932)

$$\sqrt{\frac{D_{75}}{D_{25}}} \quad (1)$$

- Sortierung nach FOLK und WARD (1957)

$$\sigma_1 = \frac{\Phi_{84} - \Phi_{16}}{4} + \frac{\Phi_{95} - \Phi_5}{6,6} \quad (2)$$

- Schiefe nach FOLK und WARD (1957):

$$Sk_1 = \frac{\Phi_{16} + \Phi_{84} - 2 \cdot \Phi_{50}}{2 \cdot (\Phi_{84} - \Phi_{16})} + \frac{\Phi_5 + \Phi_{95} - 2 \cdot \Phi_{50}}{2 \cdot (\Phi_{95} - \Phi_5)} \quad (3)$$

- Kurtosis nach FOLK und WARD (1957):

$$K_G = \frac{\Phi_{95} - \Phi_5}{2,44 \cdot (\Phi_{75} - \Phi_{25})} \quad (4)$$

- Kornfraktionen in 1/2-Phi -Intervallen

Verfügbar sind diese zum einen zusammengeführt in einer CSV-Datei und zum anderen als klassifizierte Polygondatensätze für jeden einzelnen Parameter. Die Abb. 11 zeigt zwei der erzeugten Datensätze, den Median der interpolierten Kornsummenkurven und den prozentualen Anteil der Feinsandfraktion 125 – 177 µm. Durch die Analyse der Datensätze, wie etwa die Verschneidung unterschiedlicher sedimentologischer Kenngrößen, können weiterführende Erkenntnisse über sedimentdynamische Prozesse am Meeresboden gewonnen werden. Zudem dienen die Datensätze als Eingangsgrößen für fachübergreifende numerische Verfahren.

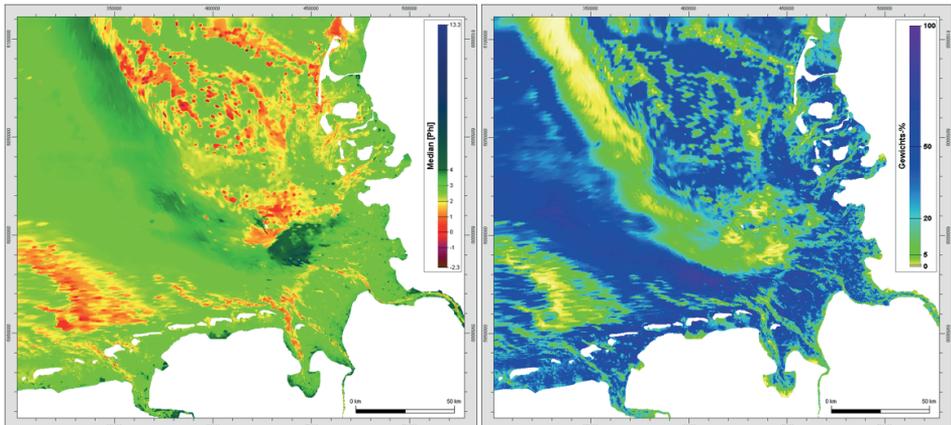


Abbildung 11: Median des Korndurchmessers und Anteil der Feinsandfraktion 125 – 177 µm in der Deutschen Bucht.

5.4 Modelldaten und Gitter

Für numerische Simulationsmodelle werden besondere Anforderungen an bathymetrische und sedimentologische Approximationen gestellt. Die Berechnungspunkte in den numerischen Simulationsmodellen sind in der Regel, entsprechend dem zugrundeliegenden numerischen Verfahren, Repräsentanten für einen Bereich und nicht die Tiefe bzw. der sedimentologische Parameter an der Stelle selbst. Diese Tatsache erfordert komplexe Integrationsprozesse auf den zugehörigen Voronoi-Regionen der Berechnungspunkte, die unter anderem auch hydrodynamisch wirksame Strukturinformationen erhalten.

6 Geomorphologische Analysen in der Deutschen Bucht

Die umfangreichen Vermessungsdaten und deren räumliche sowie zeitliche Einordnung in Verbindung mit den sedimentologischen Gegebenheiten ermöglichen Analysen der Entwicklung der Bathymetrie der Deutschen Bucht. Auf der Basis von Differenzen zwischen konsistenten Tiefenverteilungen lassen sich Erosions- und Sedimentationsbereiche identifizieren und volumetrische Veränderungen in der Deutschen Bucht analysieren. Ergänzt werden können diese Analysen durch funktionalanalytische Betrachtungen der Zeitreihen der Tiefenentwicklung an jedem Punkt des Untersuchungsraumes.

6.1 Bathymetrische Entwicklung der Deutschen Bucht

Auf Grund ihrer Lage ist die Deutsche Bucht eines der größten Sedimentationsgebiete in der Nordsee. Die Vermessungsdaten ermöglichen eine Abschätzung des Volumens an Sediment, welches in der Deutschen Bucht abgelagert wird. Die in der Abb. 12 dargestellten volumetrischen Veränderungen wurden auf der Basis von Differenzen jährlicher quasi-konsistenter Bathymetriem (Summe aus Sedimentations- und Erosionsvolumen) berechnet. Die so bestimmten Mengen schwanken erheblich.

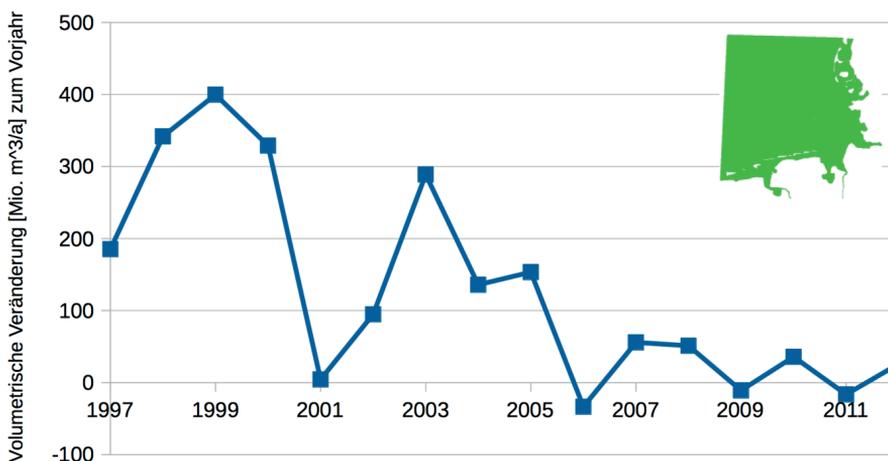


Abbildung 12: Volumetrische Entwicklung in der Deutschen Bucht (die Karte rechts oben zeigt die ausgewertete Fläche).

Die Abnahme der Änderungen zum Ende des betrachteten Zeitraums kann durch die Abnahme der Datenüberdeckung und -dichte erklärt werden.

6.2 Entwicklung der Wattflächen

Die Küstenzone ist durch das Wattenmeer geprägt, welches sich durch den Gezeiteinfluss und dem großen Sedimentangebot während des Holozäns entwickeln konnte und ständigen morphologischen Änderungen unterworfen ist. Auch heute lagert sich feines Sediment insbesondere auf den Wattflächen ab. Die zusammengetragenen Vermessungsdaten lassen auf ein Wattwachstum von im Schnitt 0,74 cm/a (auf der Basis der letzten 10 Jahre) schließen. Dieses Wattwachstum kompensiert im Durchschnitt den des Anstiegs der mittleren Meeresspiegellage in der Deutschen Bucht von ca. 0,21 cm/a (beobachtet über die letzten 60 Jahre am Pegel Helgoland). Das Anwachsen der Wattbereiche variiert dabei sowohl zeitlich als auch örtlich. Das Anwachsen ist in der Regel am größten in den Ästuaren und nimmt von Westen entgegen dem Uhrzeigersinn ab, so dass insbesondere die schleswig-holsteinische Nordseeküste am schlechtesten mit Sedimenten versorgt wird.

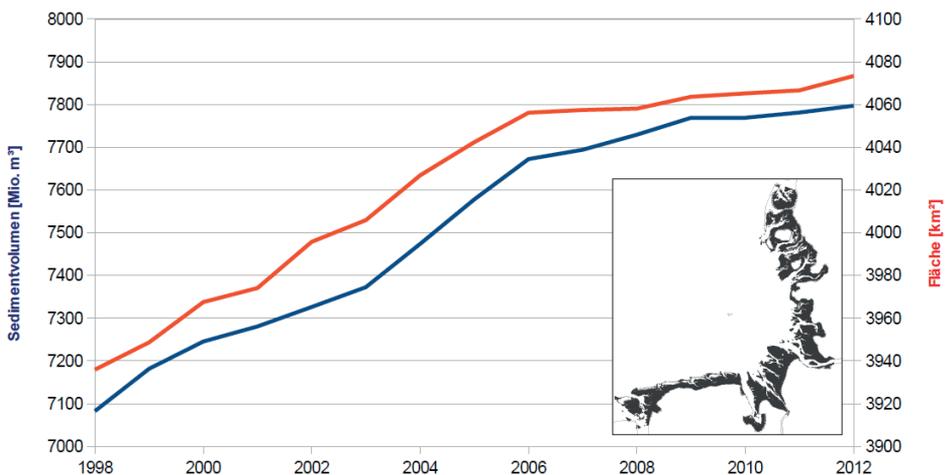


Abbildung 13: Entwicklung der Wattflächen und -volumen in der Deutschen Bucht (Bezugshorizont: -2 m bis 2 m [NHN]; die Karte rechts unten zeigt die Fläche, die als Wattfläche interpretiert wird).

6.3 Entwicklung des Übergangs zum Schelf

Obwohl die Deutsche Bucht ein großräumiges Sedimentationsgebiet in der Nordsee ist, führt das relativ schnelle Anwachsen der Wattflächen zu einem steiler werdenden Küstenvorfeld.

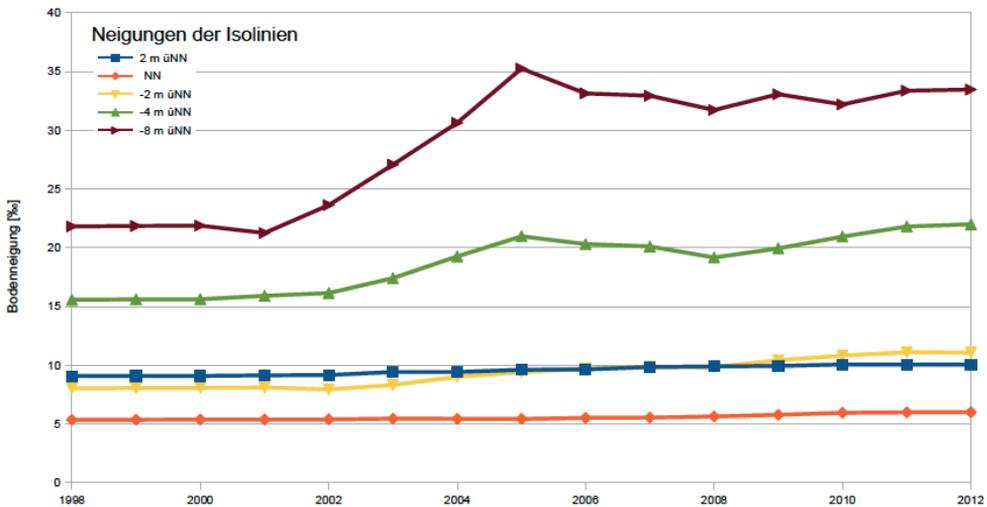


Abbildung 14: Entwicklung der Bodengradienten orthogonal zu den Isobathen in der Deutschen Bucht.

In der Abb. 14 ist gut zu erkennen, dass sich die Steigungen an den Isobathen 2 müNN und NN über die letzten 15 Jahre kaum verändert haben. In den Isobathen -2, -4 und -8 müNN ist ein kontinuierlicher Trend zu einem immer steiler werdenden Übergang zum Schelf zu beobachten. Die Ursache für den verstärkten Anstieg der Boden­neigung zwischen 2001 bis 2005 konnte im Rahmen des Projektes nicht geklärt werden.

6.4 Verknüpfung von Meteorologie und bathymetrischer Entwicklung

Die großräumigen morphodynamischen Prozesse in der Deutschen Bucht werden im Wesentlichen durch die Hydrodynamik und diese wesentlich beeinflussende Meteorologie bestimmt. Für das Küstenvorfeld der Deutschen Bucht ist die Verknüpfung der volumetrischen Änderungen zu den jährlichen Starkwindanteilen aus nordwestlichen Richtungen in der Abb. 14 dargestellt. Gut erkennbar ist die Tendenz zur erhöhten Sedimentation bei geringer Windeinwirkung aus nord-westlicher Richtung und umgekehrt.

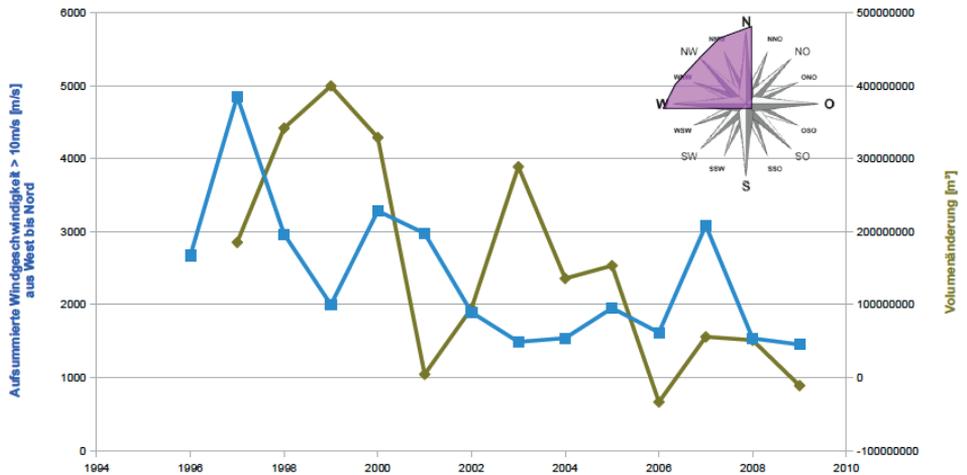


Abbildung 15: Volumetrische Veränderung im Küstensaum der Deutschen Bucht (Bereich bis zur 20 m-Tiefenlinie).

7 Zusammenfassung

Mit dem Funktionalen Bodenmodell steht ein Werkzeug zur Verfügung, das sowohl für das Küsteningenieurwesen als auch für die Forschung unterschiedlicher Fachbereiche, wie Marine Geologie und Biologie, eine umfassende Datengrundlage der Oberflächeneigenschaften küstennaher Meeresböden liefern kann. Durch die implementierten Interpolations- und Approximationsverfahren können Datensätze für den jeweiligen Einsatz individuell generiert werden. So sind die räumliche und zeitliche Auflösung frei wählbar. Die sedimentologische Modellkomponente ermöglicht zudem die Bereitstellung von interpolierten Kornverteilungen mit angepassten Fraktionierungen.

Das Funktionale Bodenmodell lässt sich in Verbindung mit vorgegebenen Berechnungsnetzen und der Vorgabe von Ergebniszeitschritten, als Hindcast-Simulationsmodell betreiben. Die Verknüpfung mit prozessbasierten hydro- und morphodynamischen Modellen ermöglicht auf diese Weise die Berücksichtigung der Variabilität des Gewässerbodens im Rahmen der Modellvalidierung.

Die Verknüpfung der unterschiedlichen Daten des Funktionalen Bodenmodells untereinander, aber auch mit Modellergebnissen aus prozessbasierten Simulationsmodellen, eröffnet in Zukunft ganz neuartige Analyse- und Interpretationsmöglichkeiten, die zu einem weiteren vertieften Systemverständnis der Morphodynamik und Sedimentologie in der Deutschen Bucht beitragen können.

8 Schriftenverzeichnis

EPPEL, D.; AHRENDT, K. und LUDWIG, S.: Wattenmeersedimente: Sedimentinventar Nordfriesisches Wattenmeer. Abschlussbericht KFKI-Projekt 03 KIS 037, GKSS-Bericht 1, 2006.

- ERNSTSEN V. B.; WINTER, C. and LEFEBVRE, A.: Reconstruction of quantitative bedform parameters in the German Bight: revisiting the Ulrich (1973) bedform classification charts. *Geo Marine Letters*, in review.
- FIGGE, K.: Karte und Begleitheft zur Karte der Sedimentverteilung in der Deutschen Bucht. Maßstab 1:250.000, Deutsches Hydrographisches Institut Hamburg, 1981.
- FOLK, R. L. and WARD, W. C.: Brazos River bar: a study in the significance of grain size parameters. *Journal of Sedimentary Petrology*, 27, 3-26, 1957.
- KRUGER, C. J. C.: Constrained Cubic Spline Interpolation for Chemical Engineering Applications.
Stand: 16.05.2014: <http://www.korf.co.uk/spline.pdf>
- LANDESAMT FÜR BERGBAU, ENERGIE UND GEOLOGIE: Geologische Küstenkarte von Niedersachsen - Relief der Holozänbasis (GHBK25). Maßstab 1:25 000, Hannover, 1998.
- MILBRADT, P.: Analyse morphodynamischer Veränderungen auf der Basis zeitvarianter digitaler Bathymetrien. *Die Küste*, 78, 33-58, 2011.
- RICKLEFS, K. and ASP NETO, N. E.: Geology and Morphodynamics of a Tidal Flat Area along the German North Sea Coast. *Die Küste*, 69, 93-127, 2005.
- TRASK, P. D.: Origin and Environment of Source Sediments of Petroleum. Gulf Publishing Company, Houston, 1932.
- ULRICH J.: Die Verbreitung submariner Riesen- und Großrippeln in der Deutschen Bucht. *Deutsche Hydrographische Zeitschrift / Ergänzungsheft, Reihe B*, 14, 1973.
- WU, W. and WANG, S.: Formulas for Sediment Porosity and Settling Velocity. In: *Journal of Hydraulic Engineering* © ASCE, 862, doi: 10.1061/(ASCE)0733-9429 (2006) 132:8 (858), 2006.
- ZEILER, M.; SCHULZ-OHLBERG, J. und FIGGE, K.: Materialinventur an der deutschen Nordseeküste, *Die Küste*, 62, 53-87, 2000a.

Erfassung von Sandverteilungsmustern zur großräumigen Analyse der Sedimentdynamik auf dem Schelf der Deutschen Bucht

Jennifer Valerius, Frank Kösters und Manfred Zeiler

Zusammenfassung

Um neue Erkenntnisse über großräumige sedimentdynamische Prozesse auf dem Schelf der Deutschen Bucht zu gewinnen, wurde ein umfangreicher Datensatz an Korngrößenverteilungen von Oberflächensedimentproben flächenhaft ausgewertet. Hierzu wurden die räumlichen Verteilungsmuster verschiedener Sandfraktionen untersucht und den Ergebnissen eines morphodynamischen Modells gegenübergestellt. Der verwendete Datensatz stammt aus dem „Funktionalen Bodenmodell“, welches im KFKI-Projekt AufMod aufgebaut wurde.

Es konnten drei großräumige sedimentdynamische Teilsysteme auf dem Schelf der Deutschen Bucht identifiziert werden, die charakteristische Sandverteilungsmuster auf dem Meeresboden aufweisen. Zum einen wurde ein Sedimenteintrag aus dem Westen, der über den südlichen Teil des Schelfbereichs in die innere Deutsch Bucht transportiert wird, ermittelt. Transportiert wird dort hauptsächlich Sand der Fraktion 125-177 μm . Weiter nördlich wurde ein Abknicken des Sedimenttransports aufgrund der Geländekante am östlichen Rand des ehemaligen Elbe-Urstromtals in Richtung Nordwesten lokalisiert, wobei mit zunehmender Tiefe immer feinere Sande akkumulieren. Kennzeichnend für diesen Bereich ist die großflächige Verbreitung sehr feinen Sandes (63-125 μm). Als Folge des Abknickens der Sedimenttransporte zeichnet sich unter anderem der schleswig-holsteinische Schelfbereich als Sedimentmangelgebiet aus. Aufgrund der Aufarbeitung und Umlagerung glazialer Sedimente zeigt hier die Sandverteilung durch den Wechsel von Fein-, Mittel- und Grobsanden ein sehr heterogenes Muster.

Schlagwörter

Nordsee, Deutsche Bucht, Sedimentverteilung, Sedimenttransport, Morphodynamik, Sedimentdynamik, numerische Modellierung, MD-Modelle

Summary

An extensive dataset of grain size distributions was analyzed to gain a better understanding of the large-scale sediment dynamics on the shelf of the German Bight (North Sea). The spatial distribution of different sand fractions was compared with results obtained from a morphodynamic model. The dataset used has been derived from the "Functional Seabed Model" generated in the AufMod project (Aufbau integrierter Modellsysteme zur Analyse der langfristigen Morphodynamik in der Deutschen Bucht, 2009-2012).

Three systems of different large-scale sediment dynamic regimes were identified on the shelf showing characteristic sand distributions on the sea floor. Firstly, sediment transport from the West to the inner

German Bight takes place along the southern part of the German Bight. Here, sand of the grain size range between 125 to 177 μm is transported. Further north, the transport direction changes to the Northwest along the former Urstrom valley of the Elbe river. This is accompanied by an accumulation of very fine sands (63 to 125 μm) revealing a strong correlation with increasing water depths. The shelf off North Frisia is characterized by sediment-starved regions. This can be attributed a lack of sediment input due to the northwestward change in sediment transport direction mentioned before. The heterogenous sediment distribution of this shelf area observed today results from the reworking of glacial sediments (till).

Keywords

North Sea, German Bight, sediment mixture, sediment distribution, sediment transport, sediment dynamic, morphodynamic, numerical modelling

Inhalt

1	Einleitung.....	41
2	Datengrundlage und Methodik.....	43
2.1	Datengrundlage zur Analyse des Oberflächensediments.....	43
2.2	Datenbasierte Analyse des Oberflächensediments.....	45
2.2.1	Interpolation der Oberflächensedimentproben.....	45
2.2.2	Erstellung eines sedimentologischen Schnittprofils.....	45
2.2.3	Erarbeitung einer Sedimentklassifizierung zur Analyse und Abgrenzung unterschiedlicher sedimentdynamischer Systeme.....	46
2.3	Prozessbasierter Ansatz.....	46
3	Ergebnisse.....	47
3.1	Analyse der Verteilung von Feinsandfraktionen in der Deutschen Bucht.....	47
3.2	Oberflächensedimentklassifikation zur Abgrenzung sedimentdynamischer Systeme.....	50
3.3	Hydrodynamische Belastung der Sohle.....	53
3.4	Residualer Sedimenttransport in der Deutschen Bucht.....	55
4	Diskussion.....	56
4.1	Charakterisierung großräumiger Oberflächensedimentverteilungsmuster.....	56
4.1.1	Hydrodynamisch beeinflusste Gebiete.....	56
4.1.2	Vom Untergrund geprägte Gebiete in der deutschen Bucht.....	56
4.2	Ableitung großräumiger sedimentdynamischer Systeme auf dem Schelf der Deutschen Bucht.....	57
4.2.1	Großräumige Sedimentdynamik der südlichen und inneren Deutschen Bucht.....	57
4.2.2	Großräumige Sedimentdynamik im Bereich des ehemaligen Elbe-Urstromtals.....	58
4.2.3	Großräumige Sedimentdynamik des nordfriesischen Schelfbereichs.....	58

4.3	Aussagekraft der Datengrundlage der Oberflächensedimentverteilung hinsichtlich ihrer zeitlichen und räumlichen Auflösung.....	59
5	Zusammenfassung und Ausblick.....	60
6	Schriftenverzeichnis	61

1 Einleitung

Die intensive wirtschaftliche Nutzung der Deutschen Bucht erfordert es, unser Verständnis der komplexen Systemzusammenhänge dieses Naturraums stetig zu verbessern. Der Meeresboden spielt hierbei als Schnittstelle zwischen Wassersäule und geologischem Untergrund eine zentrale Rolle. Durch das Lockersediment des Meeresbodens in Verbindung mit dem Gezeiteneinfluss und regelmäßigen Sturmfluten weist das Küstenmeer der Deutschen Bucht eine sehr hohe Morphodynamik auf. Dies ist für den Küstenschutz zur Planung von Baumaßnahmen oder Küstenschutzmaßnahmen wie Spülsande von großer Bedeutung. Aber auch in größeren Wassertiefen spielt die Beschaffenheit des Meeresbodens hinsichtlich seiner Reaktion auf hydrodynamische Einwirkungen eine Rolle. Bei der Errichtung von Offshore-Windenergieanlagen beeinflusst sein Oberflächensediment das Kolkverhalten an den Gründungen. Des Weiteren wirkt sich die Beschaffenheit der Gewässersohle auf die Lagestabilität von Seekabeln und Transitrohrleitungen aus.

Durch die räumliche Ausdehnung der Deutschen Bucht und die Komplexität der Wechselbeziehungen zwischen Atmosphäre, Wassersäule und Boden reichen geowissenschaftliche Feldstudien für einen umfassenden Erkenntnisgewinn sediment- und morphodynamischer Prozesse allein nicht aus; es müssen zusätzlich prozessbasierte numerische Modellverfahren herangezogen werden. Diese sind wiederum in hohem Maße abhängig von der Bereitstellung von Naturdaten und deren umfassender geowissenschaftlicher Analyse. Eine Voraussetzung für die naturähnliche Simulation morphodynamischer Vorgänge in numerischen Modellen ist eine repräsentative anfängliche Korngrößenverteilung der Sedimente im Untersuchungsgebiet („Anfangskorngrößenverteilung“). Durch die Abhängigkeit des Sedimenttransports von der Korngröße bestimmt die Anfangskorngrößenverteilung maßgeblich die morphologische Reaktion des Systems (z. B. HIRSCHHÄUSER et al. 1998; KWOLL and WINTER 2011).

Im Projekt AufMod wurde ein Funktionales Bodenmodell aufgebaut, um die morphologische Entwicklung der Deutschen Bucht zu untersuchen. Im Funktionalen Bodenmodell werden Beobachtungsdaten zur Beschreibung des Meeresbodens, wie Wassertiefen oder Korngrößenverteilungen mit räumlichen und zeitlichen Interpolationsverfahren, zu einem kontinuierlichen Modell verknüpft (siehe MILBRADT et al. 2015). Die Analyse der Bathymetriedaten ergab, dass auf dem Schelf in Wassertiefen über 15 m morphologische Änderungen innerhalb des Messfehlers von bis zu +/- 1 m liegen. Zudem sind für diese Bereiche kaum Wiederholungsmessungen für großräumige Untersuchungen vorhanden. Demnach müssen alternative messdatenbasierte Ansätze geprüft werden, um weiterführende Erkenntnisse über die großräumige Sediment- und Morphodynamik auf dem Schelf der Deutschen Bucht zu erlangen und prozessbasierte Modellverfahren validieren zu können.

Für längere Zeitskalen können geologische Ansätze genutzt werden, um auf Basis der Sedimentbeschaffenheit großräumige Transporte, zumindest qualitativ, abzuschätzen. Bei

der Untersuchung zur Mächtigkeit mobiler Sande in der Deutschen Bucht wurde so ein konzeptionelles Modell des großräumigen Geschiebetransports entwickelt (ZEILER et al. 2000). Das Oberflächensediment lässt sich ebenfalls heranziehen, um Informationen über sedimentdynamische Zusammenhänge abzuleiten. Dies findet beispielsweise in der Sediment- bzw. Grain Size Trend Analyse Verwendung (z. B. MCLAREN 1981; MCLAREN and BOWLES 1985; GAO and COLLINS 1994; POIZOT and MEAR 2010), bei der aus statistischen Parametern der Korngrößenverteilung auf Netto Sedimenttransportrichtungen zurückgeschlossen wird. Solche Untersuchungen beschränken sich jedoch auf hydrodynamische Teilsysteme, da sie unter anderem von einer synoptisch erfassten Datenbasis abhängen.

Durch das Funktionale Bodenmodell ist ein räumlich umfassender Datensatz an konsistenten Korngrößenverteilungen des Oberflächensediments für den Großbereich der Deutschen Bucht vorhanden (siehe MILBRADT et al. 2015). Dieser wurde in einem Zeitraum von über 60 Jahren erfasst, wobei die räumlich relativ hochauflösenden Bodenproben des ehemaligen Deutschen Hydrographischen Instituts (DHI) aus den Jahren 1950 bis 1980 einen Großteil der Daten umfassen.

Aufgrund der flächenhaften Auswertung der Korngrößenverteilungsdaten lassen sich Informationen über die Genese der Oberflächensedimente erfassen. Ein Beispiel hierfür ist die Karte der Sedimentverteilung in der Deutschen Bucht (FIGGE 1981). Die Sedimentklassifikation nach FIGGE (1981) bietet den Vorteil, dass das gesamte Kornspektrum relativ detailreich im Übersichtsmaßstab abgebildet wird. Für Fragen der Sedimentdynamik sind jedoch gerade die Feinsande (63-250 μm) von besonderem Interesse, die in der Klassifikation nach FIGGE (1981) in nur einer Gruppe zusammengefasst werden. Feinsande gelten in allen hydraulisch beeinflussten Georäumen als die am bestsortierten Kornfraktionen (MCMANUS 1988). JARKE (1955) erkannte bereits graduelle Verfeinerung des Feinsandes im Bereich des ehemaligen Elbe-Urstromtals.

Ein anderes Beispiel für den Stellenwert des Feinsandes hinsichtlich sedimentdynamischer Eigenschaften führte beispielsweise TABAT (1979) durch die Unterteilung von „Wanderfeinsand“, „Barrensand“ und „Restsand“ auf dem nordfriesischen Schelf an. In älterer Fachliteratur wird für den Bereich der Deutschen Bucht zudem zwischen Feinsand (125-250 μm) und Mehlsand (63-125 μm) unterschieden (z. B. DECHEND 1949; DECHEND 1950; JARKE 1955). Zur Analyse sedimentdynamischer Prozesse auf dem Schelf der Deutschen Bucht ist es daher interessant, die flächenhafte Verteilung einzelner Feinsandfraktionen näher zu beleuchten, da sie ein Abbild sedimentdynamischer Prozesse darstellen können.

Im hier vorgestellten Ansatz wurde daher eine Sedimentklassifikation erarbeitet, die die Deutsche Bucht nach der Zusammensetzung des Sandanteils flächenhaft unterteilt, wobei ein Schwerpunkt auf der Betrachtung der Feinsandfraktionen lag. Das Ergebnis dieser Einteilung wird herangezogen, um grundlegende Fragestellungen zur großräumigen Sedimentdynamik für den in Abb. 1 abgegrenzten Schelf-Bereich zu bearbeiten:

1. Lassen sich aus der Flächeneinteilung sedimentdynamische Systeme identifizieren und gegebenenfalls Rückschlüsse auf Sedimenttransportrichtungen treffen?
2. Inwieweit kann eine derartige Unterteilung zur Validierung prozessbasierter Modelle herangezogen werden?
3. Im Gegenzug stellt sich die Frage, ob prozessbasierte Modelle helfen können, die Genese der rezenten Oberflächensedimentverteilung zu erklären.

Für die Fragestellungen wurden Ergebnisse eines morphodynamischen Modellsystems hinzugezogen. Zur Analyse sedimentdynamischer Prozesse im numerischen Modell wurden zwei Parameter berechnet: der resultierende Sedimenttransport und die Dauer der kritischen Sohlschubspannung. Die Ergebnisse wurden der hier vorgestellten Sedimentklassifikation gegenübergestellt.

2 Datengrundlage und Methodik

2.1 Datengrundlage zur Analyse des Oberflächensediments

Die Analyse basiert auf dem von MILBRADT et al. (2015) aufgebauten Funktionalen Bodenmodell, für welches bestehende Korngrößenverteilungsdaten aus dem gesamten Nordseeraum zusammengetragen und plausibilisiert sowie zusätzliche Daten, die innerhalb des Projekts AufMod erhoben wurden. Für die vorliegenden Auswertungen wurden Datensätze aus dem Funktionalen Bodenmodell im Bereich der Deutschen Bucht verwendet, deren Korngrößen innerhalb der Sandfraktion mindestens in $\frac{1}{2}$ -, bzw. 1 Phi-Graden (nach KRUMBEIN 1936) vorliegen. So ergab sich eine Anzahl von rund 22.000 verwertbaren Datensätzen, deren Lage in Abb. 2 dargestellt ist. In der vorliegenden Arbeit beschränkt sich die Analyse auf den Schelfbereich (Abb. 1).

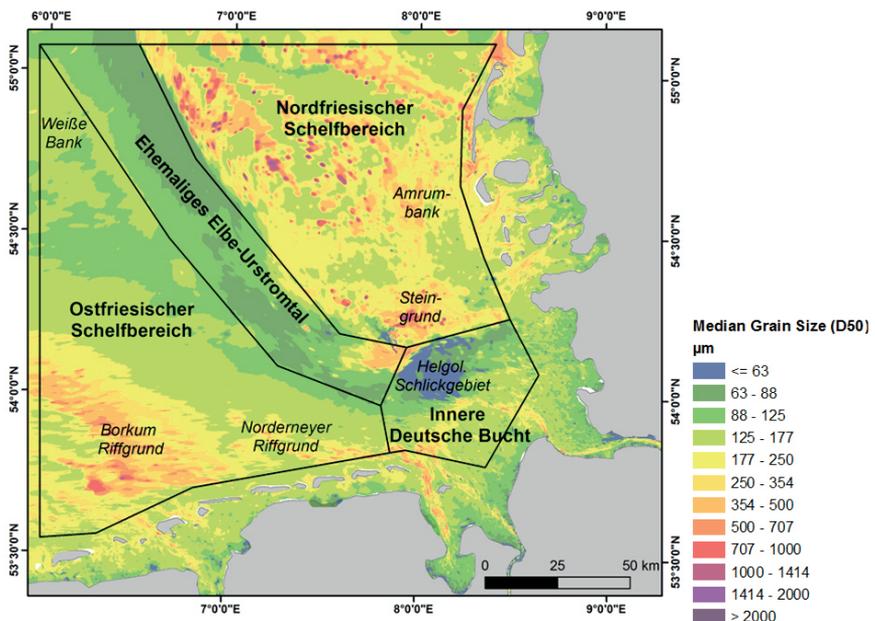


Abbildung 1: Das Untersuchungsgebiet in der Deutschen Bucht mit der Verteilung der Medianwerte der Korngrößenverteilungen des Oberflächensediments aus dem Funktionalen Bodenmodell (Milbradt et al. 2015).

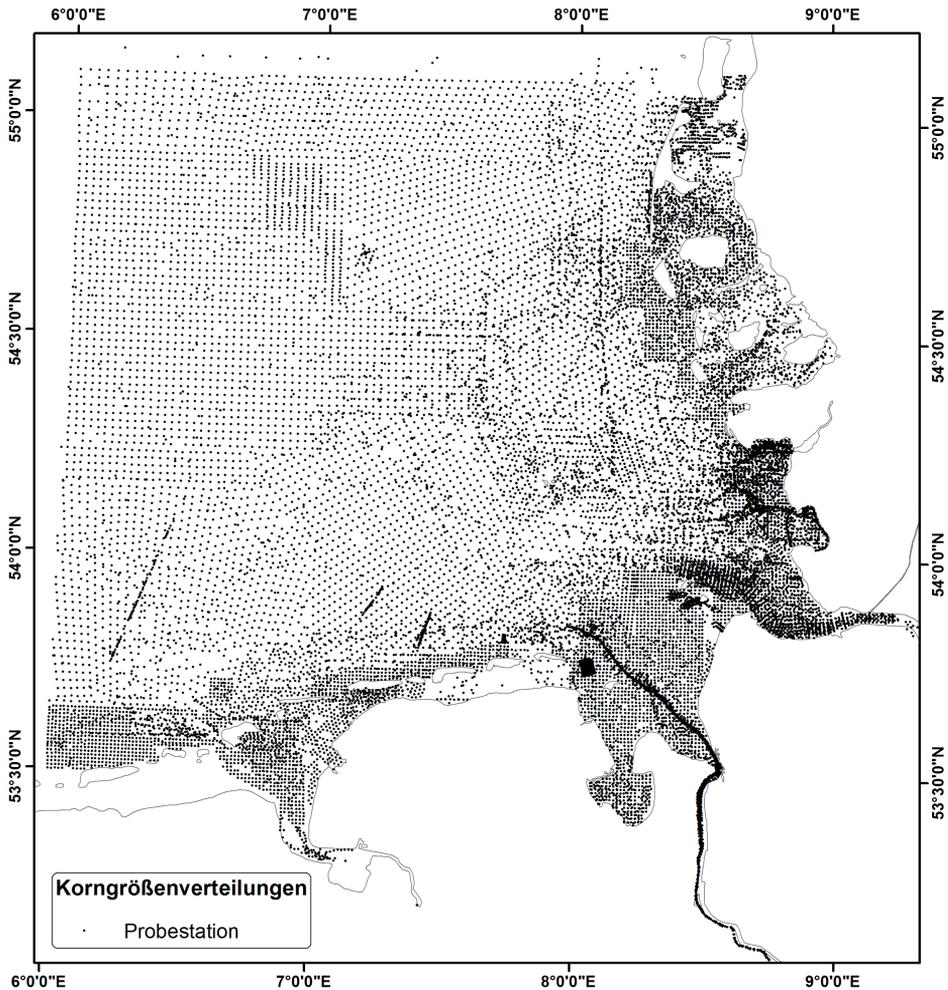


Abbildung 2: Räumliche Verteilung der Probestationen der rund 22.000 verwerteten Korngrößenverteilungen aus dem Funktionalen Bodenmodell. Auf dem Schelf liegt die räumliche Auflösung des Probenrasters bei etwa 1 Seemeile.

Die Entnahme der Proben erfolgte auf dem Schelf mit Bodengreifern, bis zu einer Tiefe von 20 cm. In Tab. 1 sind Angaben über die Datensätze zu den Korngrößenverteilungen zusammengestellt. Insgesamt bildet der Datensatz einen Zeitraum von ca. 90 Jahren ab. Ein Großteil von ca. 65 % dieser Daten wurde jedoch vom Deutschen Hydrographischen Institut (DHI) zwischen 1960 und 1970 erhoben. Die Analyse der Korngrößenverteilungen (Sandfraktion) erfolgte vorwiegend mittels Trockensiebung in $\frac{1}{4}$ Phi-Graden (Abstufung nach den Richtlinien der American Society of Testing and Materials (ASTM)).

Tabelle 1: Korngrößenverteilungen der Oberflächensedimentproben.

Herkunft*	Probenanzahl	Verfahren zur Bestimmung der Korngrößenverteilung (Sandfraktion)	Örtliche Lage der Proben	Erhebungszeitraum
BSH	~18.000	Trockensiebung	Deutsche Bucht	1924-2008
Projekt „AufMod“	~600	Trockensiebung, ab Feinkornanteil >30 Gew.-%: Laserbeugungsverfahren	Schelfbereich vor Sylt, Piep und Norderhever Elbe- und Weserästuar	2010-2012
		MacroGranometer Sinkgeschwindigkeitsröhre	Vorstrand Spiekeroog, östlich Minsener Oog	1986-1989, 2005, 2010-2012
HZG	~1.400	Siebung	Nord- und Ostfriesisches Wattenmeer	1987-1991
BfG	~2.000	Ultraschallsiebung	Elbe- und Weserästuar	1980-2012

2.2 Datenbasierte Analyse des Oberflächensediments

2.2.1 Interpolation der Oberflächensedimentproben

Aus den in 2.1 beschriebenen Korngrößenverteilungen wurden die Sande in Klassen unterschiedlicher Fraktionen zusammengefasst (Tab. 2). Insbesondere wurde die Feinsandfraktion im Schelfbereich in 1 und $\frac{1}{2}$ Phi-Intervallen klassifiziert. Mittelsand wurde in einer Klasse, die einer Phi-Klasse entspricht, zusammengefasst, Grobsand auf Grund seiner vergleichsweise geringen Verbreitung in eine Klasse über 2 Phi-Intervalle.

Tabelle 2: Einteilung der Sandfraktion in Klassen unterschiedlicher Auflösungen.

Sandfraktion	2 Phi Fraktionierung	1 Phi Fraktionierung	$\frac{1}{2}$ Phi Fraktionierung
Feinsand 63-250 μm		Sehr feiner Sand 63-125 μm	63-88 μm
			88-125 μm
		Feiner Sand 125-250 μm	125-177 μm
			177-250 μm
Mittelsand 250-500 μm		Mittelsand 250-500 μm	
Grobsand 500-2000 μm	Grobsand 500-2000 μm		

Im nächsten Schritt wurden die Probestationen der einzelnen Sandklassen mit der Software Gismo (SMILE CONSULT GMBH 2011) durch eine Delaunay-Triangulation zu einem Dreiecksnetz verbunden und die jeweiligen Gewichtsprozentage linear interpoliert.

2.2.2 Erstellung eines sedimentologischen Schnittprofils

Um die Verbreitung verschiedener Sandfraktionen in der Deutschen Bucht vergleichen zu können, wurde ein Transekt ausgehend vom Borkum Riffgrund in nordöstlicher Richtung zum schleswig-holsteinischen Schelf definiert. Dadurch werden die „ertrunke-

ne“ saalezeitliche Altmoränenlandschaft, die von pleistozänem Restsediment bestimmt wird, und das Akkumulationsgebiet über dem ehemaligen Elbe-Urstromtal erfasst. Zusätzlich wurden Wassertiefe und Sortierung in das Transekt eingebunden.

2.2.3 Erarbeitung einer Sedimentklassifizierung zur Analyse und Abgrenzung unterschiedlicher sedimentdynamischer Systeme

Die Verteilung der in Tab. 2 ausdifferenzierten Sandklassen und -fraktionen in Gewichtsprozent war Grundlage für die Erfassung der Sandverteilungsmuster zur Analyse der Sedimentdynamik in Abb. 6. Hierzu wurden für jede Fraktion der Sandklassen die Flächen mit einem Gewichtsanteil > 50 % (Layer 1) extrahiert und zusammengeführt. In einem weiteren Schritt wurden für die 1-Phi-Fraktionen (d. h. sehr feiner Sand, feiner Sand und Mittelsand) und 2-Phi-Fraktion (d. h. Grobsand) die Fläche mit einem Gewichtsanteil von 20 bis 50 % extrahiert und verschnitten (Union) (Layer 2). Im nächsten Schritt wurden die Layer 1 und 2 zu der Karte in Abb. 6 zusammengeführt, wobei die Restflächen als „Sandklasse < 20 %“ ausgewiesen wurden.

2.3 Prozessbasierter Ansatz

Zur Abschätzung der hydrodynamischen Belastung an der Sohle wurden Ergebnisse eines prozessbasierten hydrodynamischen Modells der Nordsee herangezogen. Der in KÖSTERS und WINTER (2014) beschriebene Modellaufbau basiert auf dem Verfahren UnTRIM (CASULLI and ZANOLLI 2005) zur Berechnung der Hydrodynamik, einer unstrukturierten Variante des spektralen Seegangmodells k-Modell (SCHNEGGENBURGER et al. 2000) gekoppelt mit dem Sedimenttransportmodul SediMorph (BUNDESANSTALT FÜR WASSERBAU (BAW) 2014a). Das unstrukturierte Gitternetz umfasst die gesamte Nordsee und hat eine räumliche Auflösung von 2.500 m auf dem Schelf der Deutschen Bucht, 1.000 m im Küstenvorfeld und 300 m in den Ästuaren. Zur Erfassung der Variabilität der Sohlbelastung bei unterschiedlichen meteorologischen Zuständen wurde eine mehrjährige Zeitspanne (1996-2007) unter realistischem Windantrieb berechnet. Der verwendete zeitlich und räumlich variable Windantrieb stammt aus Ergebnissen des Prognosemodells des Deutschen Wetterdienstes (DWD). Das Tidesignal des Wasserstandes an den offenen Modellrändern stammte aus dem globalen Gezeitenmodell FES2004 (LYARD et al. 2006). Die Lage des Mittelwassers an den offenen Rändern basierte auf Ergebnissen des operationellen Nordatlantik-Modells des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH). Detailliertere Angaben sowie eine Modellvalidierung sind in einem Validierungsbericht der BAW (BAW 2014b) dokumentiert.

Als Kenngröße für die hydrodynamische Belastung wurde die Dauer hoher Sohl-schubspannung, bed shear stress intensity (BSSI), mit einem Grenzwert von $0,17 \text{ N/m}^2$ genutzt. Dieser Grenzwert entspricht der kritischen Sohl-schubspannung nach Shields für die Bewegung von Feinsand (vgl. SOULSBY 1997). Zur Berechnung wurde an jedem Element des numerischen Modells die BSSI ermittelt und anschließend als dimensionsloser Anteil (0-1) am Gesamtzeitraum dargestellt.

Das Sedimenttransportmodul berechnete den fraktionierten Transport von 10 Korngrößenklassen, die den Bereich von sehr feinem Schluff (Korndurchmesser (D) von $6 \mu\text{m}$) bis zu Kies (D = 32 mm) gemäß der Udden-Wentworth-Skala abdecken. Die Transport-

form wurde als Suspensionstransport für Feinsand und feiner vorgegeben und als Geschiebetransport für Mittelsand und gröber. Die Transporte wurden jeweils jahresweise aufsummiert, sodass sich daraus der tiefenintegrierte residuale Transport pro Jahr ergab.

3 Ergebnisse

3.1 Analyse der Verteilung von Feinsandfraktionen in der Deutschen Bucht

In Abb. 3 werden die flächenhaften Verteilungen der Gewichtsanteile des Feinsandes in $\frac{1}{2}$ Phi-Intervallen dargestellt. Deutlich heben sich die flachen Schelfbereiche vor Schleswig-Holstein und Niedersachsen von den tieferen Bereichen über dem ehemaligen Elbe-Urstromtal und dem südwestlichen Anschlussgebiet hervor.

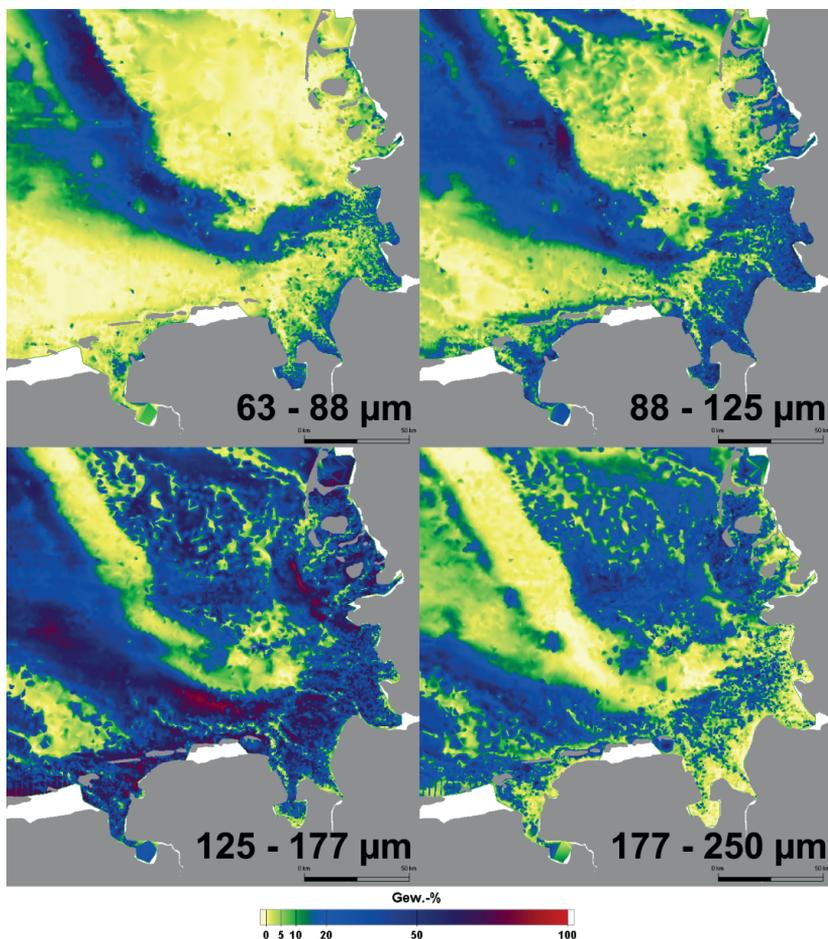


Abbildung 3: Verteilung der Gewichtsanteile einzelner Feinsandklassen in der Deutschen Bucht.

In den flacheren Bereichen ist kaum sehr feiner Sand (63-88 μm und 88-125 μm) vorhanden, während die Vorkommen von feinem Sand (125-177 μm und 177-250 μm) ein heterogenes Verteilungsmuster aufweisen. Im tieferen Bereich sind sehr feine bis feine Sande gleichförmig verbreitet. Über dem ehemaligen Elbe-Urstromtal ist eine graduelle Verfeinerung des Feinsandes in nordöstlicher Richtung, parallel zum Ostrand des Tals ersichtlich. Das Helgoländer Schlickgebiet südöstlich von Helgoland sticht heraus, da es kaum größeren Sand als den der feinsten betrachteten Feinsandklasse (63-88 μm) vorweist.

Die Fraktion 125-177 μm ist von allen vorgestellten Feinsandklassen am weitesten verbreitet. Sie erreicht in fast allen Gebieten über 20 % am Gewichtsanteil. Lediglich im Bereich des Borkum-Riffgrunds, über dem ehemaligen Elbe-Urstromtal und im Helgoländer Schlickgebiet ist diese Korngrößenklasse weiträumig nicht oder nur in geringem Maße vertreten. Im Bereich der nord- und ostfriesischen Inseln erreicht diese Feinsandfraktion sogar Gehalte deutlich über 50 %. Eine weitere Verbreitung mit sehr hohem Anteil befindet sich südöstlich der Amrumbank, vor Amrum und Eiderstedt. Am weitesten ist diese Sandfraktion nördlich des Borkum-Riffgrunds verbreitet, wo sie sich bandförmig bis in die innere Deutsche Bucht streckt.

Abb. 4 zeigt den Verlauf des Transekts vom Borkum-Riffgrund über das ehemalige Elbe-Urstromtal hinweg bis zum nordfriesischen Schelf. Das Tiefenprofil in Abb. 5 (oben) verdeutlicht, wie die Sohle vom Borkum Riffgrund allmählich abfällt und sich über dem ehemaligen Elbe-Urstromtal einebnet. An seinem östlichen Rand ist die Geländekante zur „ertrunkenen“ Altmoränenlandschaft zu erkennen.

Die tieferen Bereiche werden von jeweils einer Feinsandklasse dominiert und zeichnen sich durch eine gute Sortierung aus. Im Südwesten sind dies feine Sande (125-250 μm) und im Nordosten sehr feinen Sande (63-125 μm , sog. Mehlsand). Zwischen diesen beiden Regionen liegt eine Zone, in der nahezu beide Klassen den gleichen Anteil an der Korngrößenverteilung haben und die Sortierung abnimmt. Bis auf diesen Bereich ist entlang des Transekts eine sukzessive Abnahme des feinen und eine Zunahme des sehr feinen Sandes in Richtung Nordost festzustellen.

Auf den flachen Schelfbereichen ist das Oberflächensediment schlechter sortiert als im tiefen Bereich. Die Verteilung der dargestellten Sandfraktionen verdeutlicht, dass nur hier Vorkommen von Mittelsanden und Grobsanden über 10 Gew.-% am gesamten Kornspektrum zu finden sind. Die Anteile der verschiedenen Sandklassen weisen im Gegensatz zu den tieferen Bereichen eine starke Heterogenität auf. Im Bereich des Borkum-Riffgrunds liegen vorwiegend die Mittelsandfraktion über 50 % im Gewichtsanteil und der Anteil von Grobsanden über dem der Feinsande. Südwestlich des Borkum-Riffgrunds liegt die dominierende Fraktion wiederum im Feinsandbereich. Im Umfeld der ehemaligen Altmoränenlandschaft Schleswig-Holsteins verhält sich die Verteilung der Sandgehalte ähnlich dem Borkum-Riffgrund. Hier erreicht stellenweise sogar die Grobsandklasse Gehalte über 50 Gew.-% des gesamten Kornspektrums.

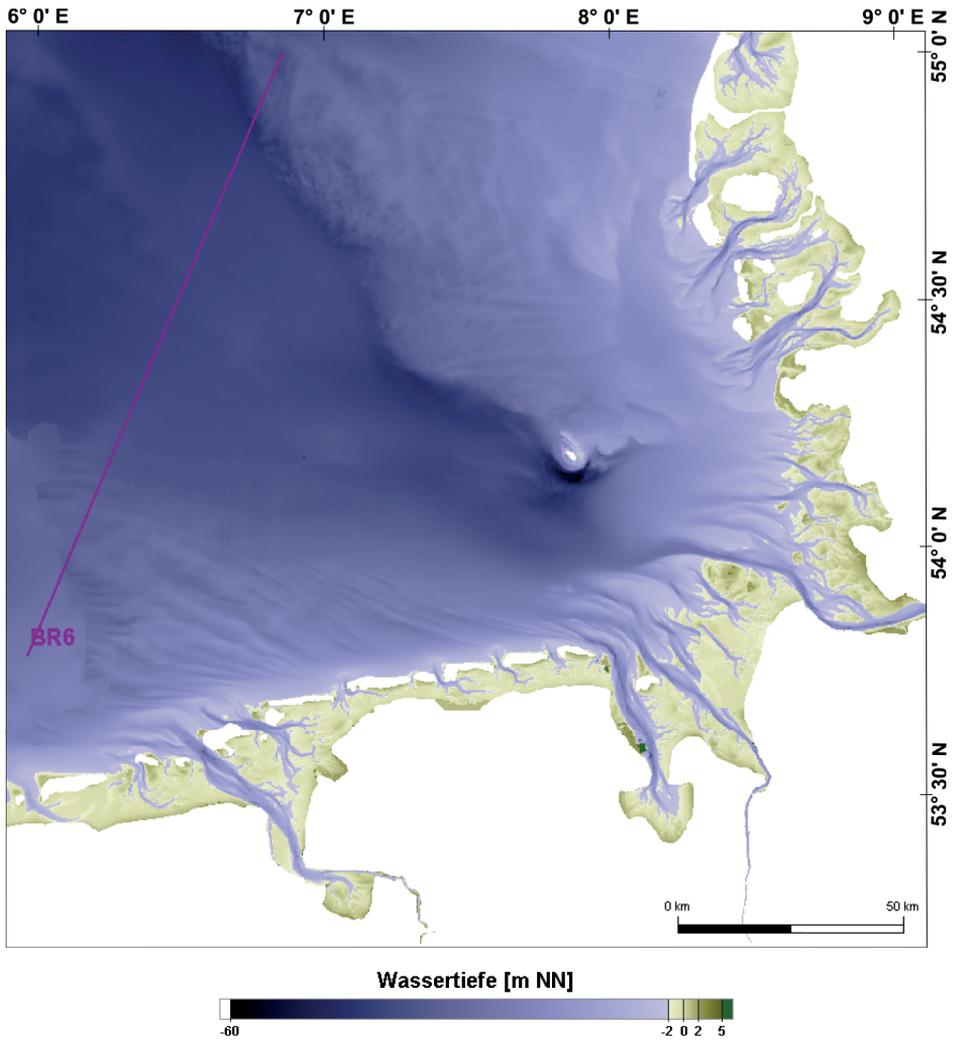


Abbildung 4: Lage des Querprofils BR6.

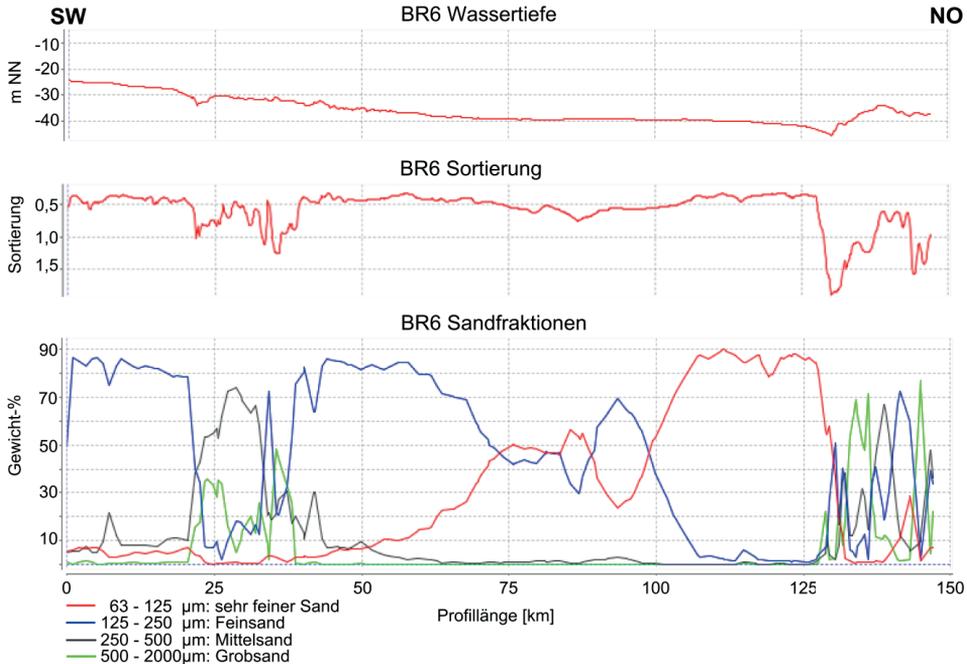


Abbildung 5: Wassertiefe, Sortierung und Gewichtsanteil verschiedener Sandklassen entlang des Schnittprofils BR6 (Abb. 4). Sortierung nach FOLK und WARD (1957): <0,5 = gut sortiert, 0,5-1 = mäßig gut sortiert, >1 = schlecht sortiert (Klassen modifiziert nach FOLK und WARD 1957).

3.2 Oberflächensedimentklassifikation zur Abgrenzung sedimentdynamischer Systeme

Die in Kap. 2.2.3 definierte Klassifikation zur Erfassung von Sandverteilungsmustern zur Analyse der Sedimentdynamik ist in Abb. 6 dargestellt. Auch hier ist der Unterschied zwischen dem Oberflächensediment der flachen Schelfbereiche und dem des tiefer liegenden Gebiets des ehemaligen Elbe-Urstromtals deutlich zu erkennen. Im Bereich der ehemaligen Altmoränenlandschaft ist die räumliche Verbreitung von Mittel- und Grobsanden erkennbar, die bereits im Transekt zu sehen ist. Hierbei fällt auf, dass der nordfriesische Schelfbereich eine heterogenere und kleinräumigere Verteilung des größeren Sediments aufweist, als es im Bereich des Borkum Riffgrunds der Fall ist.

Die in Abb. 3 sichtbare homogene Verteilung einzelner Feinsandklassen im Bereich des ehemaligen Elbe-Urstromtals und im südwestlichen Anschlussgebiet zeichnet sich in Abb. 6 sehr markant ab. Besonders auffällig ist die Abgrenzung der sehr feinen Sande im Bereich des ehemaligen Elbe-Urstromtals. Durch die Darstellung der $\frac{1}{2}$ Phi-Fractionen innerhalb des sehr feinen Sandes wird hier die Verfeinerung des Sediments in nordöstliche Richtung deutlich. Im südwestlich angrenzenden Gebiet ist die Verteilung der Sandklassen uneinheitlicher. Hier können größere Flächen ausgewiesen werden, in der keine Sandfraktion Gewichtsanteile über 50 % erreicht.

Weiter südlich erstreckt sich das bereits unter Kapitel 3.1 erwähnte breite Band feinen Sandes, der hauptsächlich durch die Fraktion 125-177 µm gekennzeichnet ist, und sich bis

zur inneren Deutschen Bucht nachverfolgen lässt. In diesem Zusammenhang fällt eine nordöstlich gerichtete Fraktionierung der Oberflächensedimente von den Grobsanden im Westen des Borkum-Riffgrund bis hin zu dem o.a. Feinsandband auf.

Durch die Klassifizierung in Abb. 6 ist deutlich zu erkennen, wie weit die Sandfraktion 125-177 μm in der Deutschen Bucht als Hauptkomponente des Korngrößenspektrums verbreitet ist. Das tiefste Vorkommen befindet sich auf der Weißen Bank. Die gröbere Komponente des feinen Sandes (177-250 μm) ist hingegen kaum als Hauptkomponente in der Deutschen Bucht vertreten.

Die Sandverteilungsmuster zur Analyse der Sedimentdynamik geben indirekt Auskunft über den Sortierungsgrad der Sedimente. Dort, wo keine der Sandklassen über 50 % des Gesamtanteils erreicht, ist das Sediment in der Regel auch weniger gut sortiert. Vergleicht man den zentralen Bereich, nordöstlich vom Borkum Riffgrund bis hin zum östlichen Rand des ehemaligen Elbe-Urstromtals, mit der im Transekt dargestellten Sortierung (Abb. 5) wird deutlich, dass in Bereichen mit einem jeweiligen Sandanteil unter 50 % des Gesamtanteils auch der Grad der Sortierung abnimmt. Zudem können die mittelsandigen Schelfbereiche als mäßig gut sortiert eingestuft werden. Die grobsandigen Schelfbereiche zeigen eine schlechte Sortierung an.

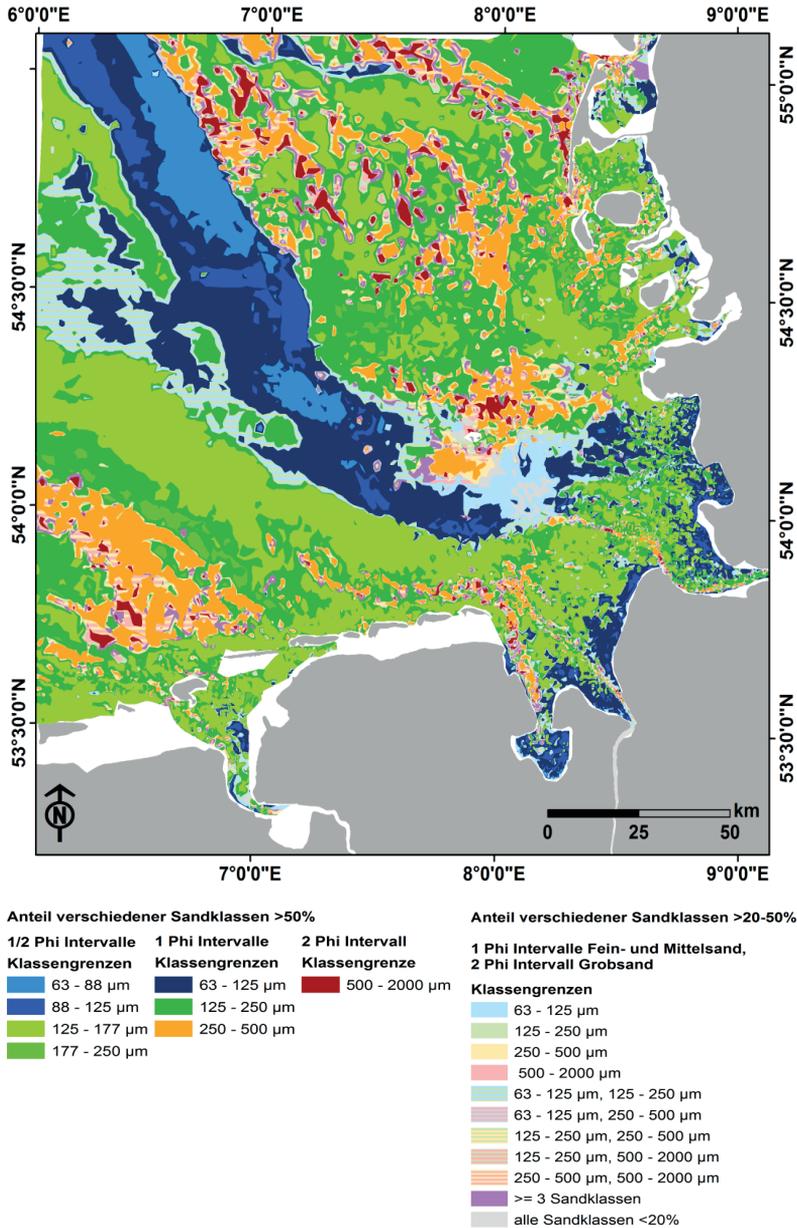


Abbildung 6: Sandverteilungsmuster zur Analyse der Sedimentdynamik. Dargestellt werden Sandfraktionen unterschiedlicher Intervallgrößen, die über 50% des Oberflächensediments einnehmen. Je kleiner das Intervall einer Fraktion, desto besser ist die hydrodynamische Sortierung des Oberflächensediments (überwiegend siltig-tonige Bereiche ausgenommen). Erreicht keine der dargestellten Sandfraktionen 50 %, so werden Sandfraktionen dargestellt, die einen Anteil von 20-50 % erreichen. Diese Bereiche kennzeichnen auf dem Borkum Riffgrund und nordfriesischen Schelf pleistozäne Restsedimente. Einteilung der Sandfraktionen nach Udden-Wentworth-Skala: Sehr feiner Sand: 63-125 µm, feiner Sand: 125-250 µm, Mittelsand: 250-500 µm, grober und sehr grober Sand: 500-2000 µm.

3.3 Hydrodynamische Belastung der Sohle

Die Abhängigkeit der räumlichen Verteilung der Sohlsedimente von der heutigen hydrodynamischen Belastung wird durch den Vergleich der gemessenen Korngrößenverteilung mit der berechneten Sohlschubspannung deutlich. Aus der berechneten Sohlschubspannung wurde die Dauer hoher Sohlschubspannung (*bed shear stress intensity*, BSSI) (KÖSTERS and WINTER 2014) als Anteil an der Gesamtzeit als normierte Größe (0-1) bestimmt. In Abb. 7 sind beide Größen überlagert dargestellt.

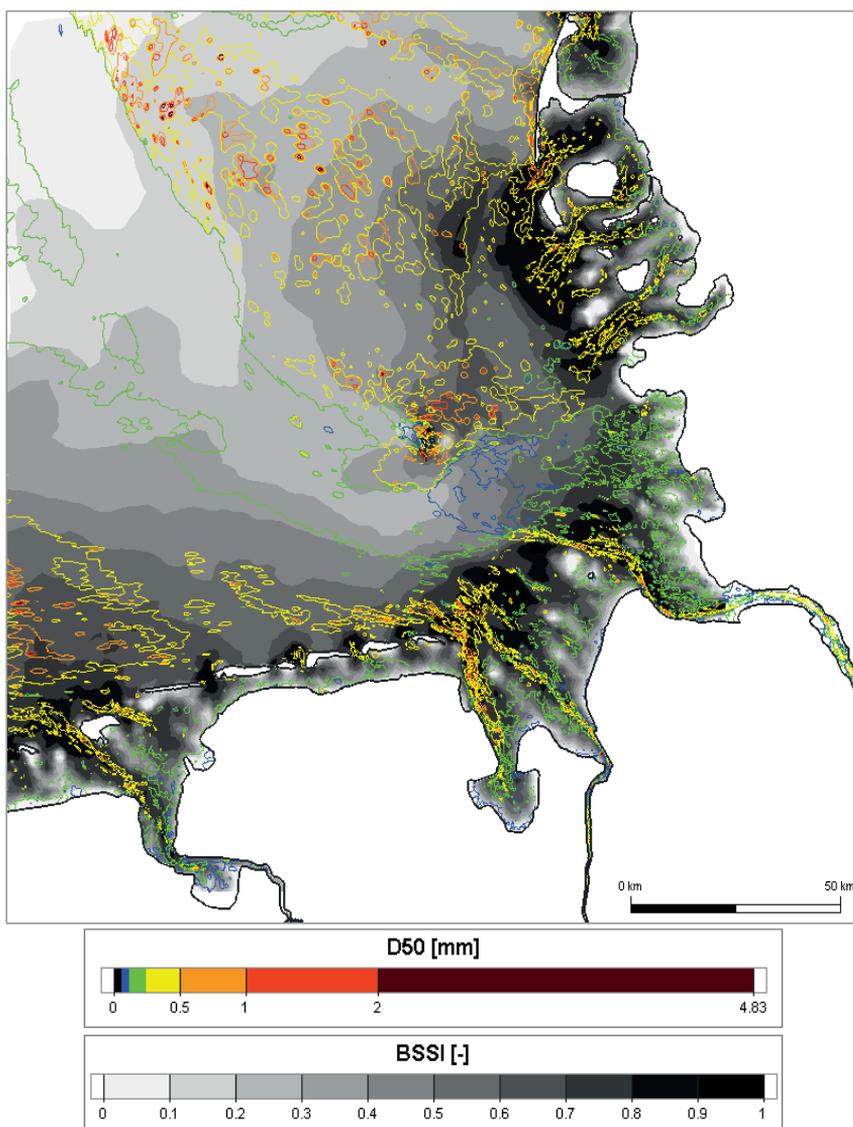


Abbildung 7: Gemessener Median der Korngrößenverteilung (farbige Isolinien, Export des Funktionalen Bodenmodells) und berechnete Dauer hoher Sohlschubspannung (Isoflächen).

Die Oberflächensedimentverteilung wird als Medianwert (D50) der Kornsummenkurve abgebildet. Der Vergleich des D50 mit der berechneten Dauer hoher Sohlbelastung zeigt, dass in Bereichen mit zunehmender Dauer hoher Sohlbelastung größer werdende Sedimente an der Sohle zu finden sind. Dies entspricht also einer hydraulischen Sortierung der Sedimente. So weist der Parameter BSSI auf dem flachen Schelf, vor allem im Bereich des Borkum Riffgrunds, des Steingrunds und der Amrumbank, hohe Beträge auf. Auffällig ist der Bereich westlich von Amrum und Eiderstedt, der durch eine größere zusammenhängende Fläche der gut sortierten Feinsandklasse 125-177 μm gekennzeichnet ist. Hier ist der BSSI geringer als in den umliegenden Bereichen.

Die Beziehung von Sohlbelastung und Oberflächensediment lässt sich als Korrelation von BSSI und D50 über die gesamte Deutschen Bucht darstellen (Abb. 8). Die Analyse zeigt die hohe Variabilität des Korngrößenspektrums, das einen deutlichen Zusammenhang mit der Sohlbelastung aufweist. Die gezeigten 50% Perzentile (entspricht dem Median der gemessenen D50-Werte) korrelieren signifikant mit der Sohlbelastung, trotz der hohen Variabilität der Einzelwerte, die sich in den 5 und 95 % Perzentilen widerspiegelt.

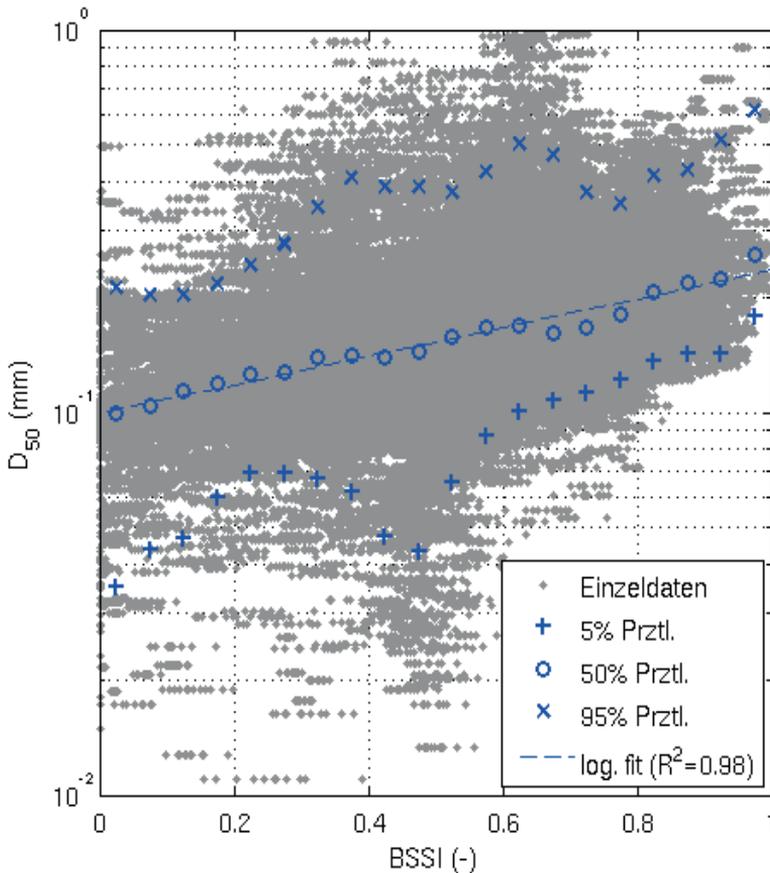


Abbildung 8: Korrelation der *bed shear stress intensity* und des gemessenen D50 im Bereich der Deutschen Bucht.

3.4 Residualer Sedimenttransport in der Deutschen Bucht

Der für das Jahr 2006 berechnete Suspensionstransport (Feinsand und feinere Fraktionen) ist im Bereich des Borkum-Riffgrunds und entlang der ostfriesischen Inseln in die innere Deutsche Bucht relativ hoch (Abb. 9b). Das transportierte Material verbleibt im Wesentlichen in diesen Bereichen. Nur in Wassertiefen über 30 m ändert der Sedimenttransport nordwestlich von Helgoland über dem ehemaligen Elbe-Urstromtal seine Richtung nach Nordwesten. Auf dem Schelf vor Schleswig-Holstein sind die Transportraten am geringsten und die Transporte weniger gerichtet als vor Niedersachsen. Westlich des ehemaligen Elbe-Urstromtals auf ungefähr $54^{\circ} 50'$ nördlicher Breite deutet sich eine Divergenzzone an. Im südlichen Teil wird Schwebstoff in Richtung Ost-Südost verlagert, weiter nördlich tendiert der Transport in nördliche Richtung.

Die räumliche Struktur des Geschiebetransportes (Abb. 9a) entspricht im Wesentlichen dem Suspensionstransport, ist aber fast flächendeckend um mehr als eine Größenordnung geringer. Es zeigt sich ein klarer Küstenlängstransport vor den ostfriesischen Inseln. Auffallend sind höhere Transportraten über dem Borkum-Riffgrund gegenüber den umliegenden Seegebieten. Im nordfriesischen Schelfbereich zeigen sich fast keine durchgehenden Sedimenttransportbänder. Die Richtungen sind jedoch ähnlich denen des suspendierten Transports. Erwartungsgemäß ist ein signifikanter Transport im Wesentlichen in den Tiderinnen festzustellen.

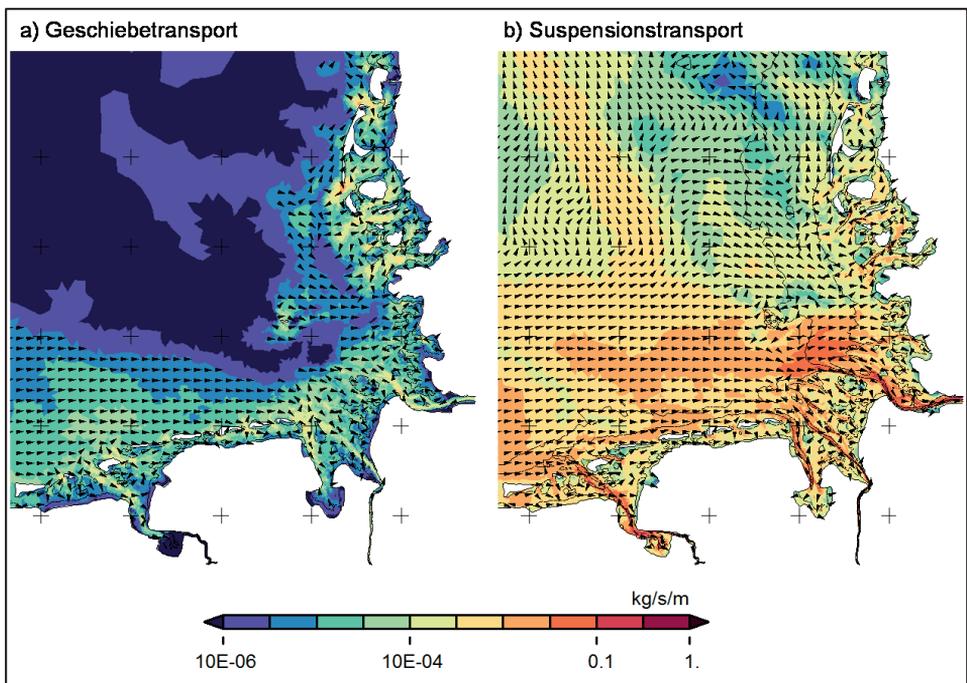


Abbildung 9: Residualer Sedimenttransport in der Deutschen Bucht aufgeteilt in a) Geschiebetransport und b) Suspensionstransport für das Jahr 2006 (logarithmische Skalierung).

4 Diskussion

4.1 Charakterisierung großräumiger Oberflächensedimentverteilungsmuster

Aus dem Sandverteilungsmuster zur Analyse der Sedimentdynamik (Abb. 6) lassen sich auf dem Schelf der Deutschen Bucht durch den Untergrund geprägte Bereiche und hydrodynamisch geprägte Bereiche ableiten.

4.1.1 Hydrodynamisch beeinflusste Gebiete

Die vorwiegend hydrodynamisch beeinflussten Gebiete weisen sich durch homogene Flächen charakteristischer mobiler Sandfraktionen aus. Ein Gebiet befindet sich über dem ehemaligen Elbe-Urstromtal und ist durch sehr feinen Sand (Mehlsand) gekennzeichnet (63-125 μm). Die weiträumige Fraktionierung des sehr feinen Sandes spricht für die hydrodynamische Prägung dieses Gebiets. Dieser Teil der Deutschen Bucht wurde bereits von JARKE (1955) als Teil eines Akkumulationsbereichs charakterisiert, der sich im Laufe des Holozäns über dem Elbe-Urstromtal und einer südwestlich davon gelegenen Ebene bildete und bis zur inneren Deutschen Bucht nachverfolgen lässt. Im Nordwesten ist das Elbe-Urstromtal von bis zu 16 m mächtigen holozänen Sanden verfüllt (FIGGE 1980). Unsere simulierten Sedimenttransporte weisen darauf hin, dass diese Verfüllung noch heute anhält.

Der südwestlich angrenzende Bereich, im Süden durch den Borkum-Riffgrund und weiter westlich von etwa der 20 m Tiefenlinie vor den ostfriesischen Inseln eingegrenzt, ist ebenfalls hydrodynamisch geprägt. Der Meeresboden wird hier durch die weite Verbreitung der gut sortierten Feinsandklasse 125-177 μm charakterisiert. Die hier vorgestellten Ergebnisse weisen eine flächenhafte nordöstlich gerichtete Fraktionierung der Sedimente auf, die ausgehend vom Bereich nördlich des Borkum-Riffgrunds in dem breiten Band der mobilen Klasse feinen Sandes mündet.

Die innere Deutsche Bucht, von Helgoland und den Ästuaren von Weser und Elbe umrandet, stellt einen Akkumulations- und Umlagerungsbereich dar. Die Lage der Holozänbasis erreicht hier Tiefen bis zu 35 Meter (RICKLEFS and ASP NETO 2005) und nordseezeitliche Sande, die also nach der holozänen Transgression abgelagert wurden, eine Mächtigkeit von über drei Metern (ZEILER et al. 2000). Hier wird das Oberflächensediment ebenfalls durch die mobile Fraktion 125-177 μm geprägt und steht in direkter Verbindung mit dem Feinsandband im Westen.

4.1.2 Vom Untergrund geprägte Gebiete in der deutschen Bucht

Die flachen Bereiche des nord- und ostfriesischen Schelfs werden als ehemalige saalezeitliche Altmoränenlandschaft gedeutet, die noch heute von groben Restsedimenten an der Meeresbodenoberfläche geprägt sind. Hier wurde der pleistozäne Untergrund im Zuge der holozänen Transgression aufgearbeitet und umgelagert (JARKE 1955; TABAT 1979; FIGGE, 1981; ZEILER et al. 2008). Kennzeichnend für diese Gebiete ist die Heterogenität

in den Oberflächensedimentverteilungsmustern, das Vorkommen von Mittel- und Grobsanden und eine schlechte Sortierung der groben Sedimente.

Die vorliegenden Ergebnisse zeigen, dass sich der vom Untergrund geprägte ostfriesische Schelfbereich auf den Borkum- und Norderneyer-Riffgrund beschränken lässt. Hier sind kaum mobile Feinsande verbreitet. Insbesondere der Borkum-Riffgrund ist flächendeckend von Mittel- und Grobsanden geprägt.

Der nordfriesische Bereich reicht von der Küste bis zum östlichen Rand des ehemaligen Elbe-Urstromtals. Hier ist die weite Verbreitung der gut sortierten Feinsandklasse 125-177 μm charakteristisch, die zwischen Regionen schlecht sortierter Mittel- und Grobsande anzutreffen ist.

4.2 Ableitung großräumiger sedimentdynamischer Systeme auf dem Schelf der Deutschen Bucht

Die Sandverteilungsmuster zur Analyse der Sedimentdynamik lassen den Schelf der Deutschen Bucht im Wesentlichen in drei großräumige sedimentdynamische Systeme unterteilen: die südliche und innere Deutsche Bucht, das ehemalige Elbe-Urstromtal und der nordfriesische Schelfbereich.

4.2.1 Großräumige Sedimentdynamik der südlichen und inneren Deutschen Bucht

In der südlichen Deutschen Bucht sind ostwärts gerichtete residuale Strömungen vorherrschend (z. B. OTTO et al. 1990; LOEWE et al. 2013), die zu einer Fraktionierung des pleistozänen Reliktsediments des Borkum Riffgrundes von West (Grobsand) nach Ost (Mittelsand) führten (Abb. 6). Zudem lässt sich durch die Ostströmung die Fraktionierung des Feinsandes weiter nordöstlich parallel zum Streichen des Borkum Riffgrundes erklären. Aufgrund der Untiefe des Borkum Riffgrundes erhöhen sich hier die Strömungsgeschwindigkeiten. Daher passieren die feinen Sedimente diesen Bereich, ohne sich abzulagern und gelangen weiter ostwärts in das Nordwest – Südost verlaufende Feinsandband. Hierbei handelt es sich um ein Transportband mobilen Feinsandes, innerhalb dessen sich das Sediment sukzessive weiter in Richtung innere Deutsche Bucht verlagert.

Sowohl simulierter Geschiebe- als auch Suspensionstransport verlaufen ebenfalls aus dem Westen in die innere Deutsche Bucht, und auch das konzeptionelle Modell des Geschiebetransports von ZEILER et al. (2000) bildet einen ostwärts gerichteter Transport in die innere Deutsche Bucht ab. Es kann demnach durch die Oberflächensedimentverteilung, den geologischen Untergrund und durch numerische Simulation des Sedimenttransports der gleiche, ostwärts in die innere Deutsche Bucht gerichtete Sedimenttransport abgeleitet werden. Das mobile Material besteht hierbei vorwiegend aus der Feinsandfraktion 125-177 μm , welches abhängig von der Strömungsgeschwindigkeit sowohl durch Suspension als auch als Geschiebe fortbewegt werden kann (VAN RIJN 1984).

Die Sandverteilungsmuster zur Analyse der Sedimentdynamik legen westlich des Borkum Riffgrundes und in den oben angesprochenen hydrodynamisch geprägten Akkumulationsbereichen den Schluss nahe, dass die ostwärts gerichteten Strömungen kaum Material mit einem Korndurchmesser $> 177 \mu\text{m}$ transportieren.

4.2.2 Großräumige Sedimentdynamik im Bereich des ehemaligen Elbe-Urstromtals

Die Verbreitung des sehr feinen Sandes im Bereich des ehemaligen Elbe-Urstromtals kann durch ein Zusammenspiel aus Morphologie und Hydrodynamik erklärt werden. Der schlagartige Übergang von sehr feinen Sanden in diesem Bereich zu den feinen bis groben Sanden im schleswig-holsteinischen Schelfbereich entlang der Geländekante der „ertrunkenen“ Altmoränenlandschaft liefert einen deutlichen Hinweis darauf, dass es sich hierbei um eine Grenze zweier sedimentdynamischer Systeme handelt. Durch die Geländekante werden vorherrschende bodennahe Ostströmungen nach Nordwesten abgelenkt, wodurch in der Folge das Abknicken der residualen Suspensionstransporte aus östlicher in nordwestliche Richtung bewirkt wird. Der in Suspension transportierte sehr feine Sand wird hier sukzessive abgesetzt und wird aufgrund erhöhter Wassertiefen unter durchschnittlichen hydrodynamischen Bedingungen nicht wieder resuspendiert. Das in Abb. 5 dargestellte Profil BR6 belegt, dass die Wassertiefe in nordöstliche Richtung ansteigt und folglich die hydrodynamischen Kräfte abnehmen. Hierdurch kann die Verfeinerung des Sediments hin zum feinsten Sand am nordöstlichen Rand des ehemaligen Elbe-Urstromtals erklärt werden. Es sind weitere Analysen notwendig, um zu klären welche hydrodynamischen Effekte, wie beispielsweise der JEBAR Effekt (z. B. SÜNDERMANN and POHLMANN 2011), an der Akkumulation des feinsten Sandes beteiligt sind.

Noch unklar bleibt die Genese der weniger gut sortierten Sande westlich des Elbe-Urstromtals. Möglicherweise treten in diesem Bereich, relativ am Ende des Transportbandes von Westen nach Nordosten, unterschiedliche Depositionsbedingungen deutlicher zutage. Während bei Normaltiden nur sehr feine Sande abgesetzt werden, kann es zu Zeiten mit höherer Strömungsbelastung, z. B. durch Stürme, auch zur Umlagerung größerer Sedimente kommen.

4.2.3 Großräumige Sedimentdynamik des nordfriesischen Schelfbereichs

Trotz der vorherrschenden zyklonalen Strömungen in der Nordsee (LOEWE et al. 2013) wird durch das Zusammenspiel von Strömung und Meeresbodenrelief weitestgehend unterbunden, dass Sediment aus dem Westen auf den nordfriesischen Schelfbereich gelangt. Durch die größere Wassertiefe über dem ehemaligen Elbe-Urstromtal akkumulieren hier die noch in der Wassersäule befindlichen Feinpartikel der Ostströmungen oder werden weiter nach Nordwesten transportiert. Die modellierten Sedimenttransportraten fallen östlich der Geländekante großflächig gering aus und es zeichnet sich aufgrund der abfallenden Transportraten kein signifikanter Sedimenteintrag in dieses Gebiet ab (Abb. 9). Zusätzlich weisen die modellierten Sedimenttransporte sogar einen Austrag von Sediment nach Norden aus. Ein Nordtransport wird auch im konzeptionellen Modell des Geschiebetransports im Küstenvorfeld von Sylt abgebildet (ZEILER et al. 2000).

Die Folge ist ein Mangel an mobilen Sedimenten auf dem nordfriesischen Schelf. Demnach findet hier vorwiegend eine Umlagerung des vorhandenen, von Restsedimenten geprägten Materials statt. Kennzeichnend für Sedimentmangelgebiete sind „Sorted Bed-forms“ (MURRAY and THIELER 2004), welche in diesem Gebiet weit verbreitet sind (DIESING et al. 2006). Dies sind Flächen größerer Sediments, welches häufig Ripeln aufweist, die von ebenen Feinsanden umgeben sind (CACCHIONE et al. 1984). Die

Sandverteilungsmuster zur Analyse der Sedimentdynamik zeigen, dass diese Feinsande maßgeblich durch die Sandfraktion 125-177 μm geprägt sind. DIESING et al. (2006) haben gezeigt, dass die Sorted Bedforms auf dem nordfriesischen Schelf bereits über mehrere Dekaden lagestabil sind. Die geringe Verfüllung von Sandentnahmetrichtern westlich von Sylt (ZEILER et al. 2004), spricht ebenfalls für einen Mangel mobiler Sedimente und schwache Transportraten.

Das entlang der nordfriesischen Küste am großflächigsten ausgeprägte Vorkommen der mobilen Feinsandklasse 125-177 μm , westlich von Amrum und Eiderstedt, liegt dem konzeptionellen Modell des Geschiebetransports (ZEILER et al. 2000) nach in der Zone, die durch einen Nettotransport nach Südwesten gekennzeichnet ist. Die Mächtigkeit mobiler nordseezeitlicher Sande ist hier geringer als in den westlich und östlich angrenzenden Regionen. Damit kann die rezente Oberflächensedimentverteilung in diesem Bereich nicht erklärt werden, weil ihre Kornzusammensetzung auf einen Ablagerungsraum hinweist. Unsere residualen Sedimenttransporte zeigen, dass aus dem Nordwesten kommende Sedimente hier auf die durch die Gezeitenrinnen geprägten Transporte treffen und es ist dadurch keine genaue Richtung erkennbar, jedoch eine leichte Abnahme der Transportrate, die zu einer Netto-Deposition führt. Auch die Sohlbelastung ist in diesem Bereich geringer als in den umliegenden Regionen (Abb. 7). Dadurch sind in diesem Bereich die Oberflächensedimente im Gleichgewicht mit der hydrodynamischen Sohlbelastung.

4.3 Aussagekraft der Datengrundlage der Oberflächensedimentverteilung hinsichtlich ihrer zeitlichen und räumlichen Auflösung

Der verfügbare umfangreiche Datensatz an Kornverteilungen wurde über einen Zeitraum von über sechzig Jahren erhoben. Bei dieser zeitlichen Auflösung muss der Datenumfang auf Konsistenz hinsichtlich der Stabilität der Verteilungsmuster geprüft werden. Die verschiedenen Kartenwerke, die in Abständen von etwa dreißig Jahren für die Verteilung des Oberflächensediments erarbeitet wurden (JARKE 1955; FIGGE 1981; LAURER et al. 2013), stimmen bezüglich ihrer Verteilungsmuster überein, obwohl das betrachtete Probeninventar über die Zeit hinweg kontinuierlich erweitert wurde. Ein Großteil von über 65% der betrachteten Daten wurde zwischen 1960 und 1970 erfasst und floss demnach nicht in die Kartierung von JARKE (1955) ein. Die überarbeitete Karte zur Sedimentverteilung auf dem Meeresboden in der deutschen Nordsee nach der Klassifikation von FIGGE (1981) (LAURER et al. 2013) enthält erweiterte Bereiche, die an das alte Kartenblatt von FIGGE (1981) angefügt sind und auf Bodenproben der Jahre 2009-2012 basieren. Bereiche mit Korngrößenverteilungen der 1960er und 1970er Jahre und neue Bodenproben fließen im Kartenblatt ungestört ineinander über. Die Verteilungsmuster auf dem Schelf der Deutschen Bucht können somit über einen Zeitraum von etwa sechzig Jahren im kleinen Maßstab als stabil angesehen werden, was ein Gleichgewicht großräumiger sedimentdynamischer Prozesse vermuten lässt. Hierzu sind noch detaillierte Untersuchungen durchzuführen, um belastbare Aussagen hinsichtlich der Langzeitstabilität der Oberflächensedimentverteilung in großen Maßstäben machen zu können.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Durch die differenzierte Betrachtung des Feinsandes konnten drei großräumige sedimentdynamische Teilsysteme auf dem Schelf der Deutschen Bucht identifiziert werden:

- ein Sedimenttransport aus Südwesten, über den Borkum-Riffgrund hinweg, in die innere Deutsche Bucht hinein,
- ein weiträumiges Akkumulationsgebiet über dem ehemaligen Elbe-Urstromtal, welches durch einen vorwiegend suspensiven Sedimenttransport in Richtung Nordwesten, parallel zum Verlauf des ehemaligen Flusstals, gekennzeichnet ist und
- ein Sedimentmangelgebiet auf dem nordfriesischen Schelfbereich. Hier wird durch das Abknicken der Hauptströmung nach Nordwesten über dem ehemaligen Elbe-Urstromtal ein nennenswerter Sedimenttransport nach Osten verhindert.

Das mobile Sediment der Deutschen Bucht lässt sich in zwei charakteristische Feinsandfraktionen differenzieren. Zum einen die Fraktion gut sortierten feinen Sandes mit einem Korndurchmesser von 125-177 μm . Diese wurde als Hauptkomponente des mobilen Oberflächensediments auf den flachen Schelfbereichen identifiziert. Die andere hochmobile Komponente ist der sehr feine Sand mit einem Korndurchmesser von 63-88 μm . Dieser lässt sich vorwiegend im Bereich des ehemaligen Elbe-Urstromtals antreffen. Die vorliegenden Untersuchungen deuten demnach darauf hin, dass das aus dem Südwesten in die Deutsche Bucht eintreffende Sediment vorwiegend Sande dieser beiden Fraktionen beinhaltet (63-177 μm). Der gröbere Anteil hiervon stellt das Material für das in die innere Deutsche Bucht laufende Transportband dar, welches durch Suspensions- und Geschiebetransport bewegt wird. Der Anteil des sehr feinen Sandes wird vorwiegend als Suspensionsfracht in die tieferen Bereiche der Deutschen Bucht transportiert, wo er mit ansteigender Wassertiefe abgelagert wird.

Die Morphologie spielt eine große Rolle für die auf dem Schelf der Deutschen Bucht ablaufenden sedimentdynamischen Prozesse. Die Geländekante am östlichen Rand des ehemaligen Elbe-Urstromtals trennt den großräumigen Akkumulationsbereich im Westen von dem Sedimentmangelgebiet auf dem nordfriesischen Schelfbereich. Auch die Fraktionierungen im Bereich des Borkum-Riffgrunds und dem nordöstlich angrenzenden Gebiet und im Bereich des ehemaligen Elbe-Urstromtals korrelieren mit der Tiefe.

Es konnte gezeigt werden, dass es Bereiche gibt, in denen die berechneten resultierenden Sedimenttransporte herangezogen werden können um die Genese des Oberflächensediments zu erklären. In allen drei abgegrenzten sedimentdynamischen Systemen lassen sich die Ergebnisse des numerischen Verfahrens mit denen der datenbasierten Analyse vereinbaren. Andersherum bietet die Oberflächensedimentverteilung Möglichkeiten, numerische Modelle zumindest qualitativ zu verifizieren. So kann beispielsweise in weiteren Modellsimulationen untersucht werden, ob die gemessene schrittweise Verfeinerung der Sedimente Richtung Osten in morphodynamischen Simulationen reproduzierbar ist.

Die hier vorgestellten Analysen liefern eine konsistente Erklärung der räumlichen Verteilungsmuster von Oberflächensediment, Wassertiefe und Sohlbelastung, bzw. resultierenden Sedimenttransporten. Zur Fortsetzung der Analysen, insbesondere im Hinblick auf ein besseres Verständnis der Ursachen der hier identifizierten Teilsysteme, können in einem nächsten Schritt morphologische Parameter wie Wassertiefe oder Topographiegefälle mit sedimentologischen Parametern korreliert werden. Entsprechendes gilt für die Untersuchung der hydrodynamischen Parameter. Hier ist eine detailliertere Studie der

Interaktion von Morphologie und barokliner Strömung notwendig, um die beobachteten Strömungsmuster besser interpretieren zu können.

6 Schriftenverzeichnis

- BUNDESANSTALT FÜR WASSERBAU (BAW): Technical Report Mathematical Module SedMorph Validation Document. Version 1.1., 2014a.
Stand 02.04.2014: http://www.baw.de/downloads/wasserbau/mathematische_verfahren/pdf/vd-sedimorph.pdf.
- BUNDESANSTALT FÜR WASSERBAU (BAW): Validierungsstudien Nordsee, 2014b.
Stand 02.04.2014: http://www.baw.de/methoden/index.php5/Validierungsstudien_Nordsee
- CACCHIONE, D. A.; DRAKE, D. E.; GRANT, W. D. and TATE, G. B: Rippled scour depressions on the inner continental shelf off central California. *Journal of Sedimentary Petrology*, Vol. 54, 1280-1291, 1984.
- CASULLI, V. and ZANOLLI, P.: High resolution methods for multidimensional advection-diffusion problems in free-surface hydrodynamics. *Ocean Modell* 10(1/2), 137-151, doi:10.1016/j.ocemod.2004.06.007, 2005.
- DECHEND, W.: Zur Frage der Sandwanderung vor der ostfriesischen Inselküste. In: *Die Bautechnik, Beton- u. Stahlbau. Der Stahlbau*, Heft 7, 201-204, 1949.
- DECHEND, W.: Sedimentpetrographische Untersuchungen zur Frage der Sandumlagerungen im Watt Nordfrieslands. In: *Deutsche Hydrographische Zeitschrift*, Band 3, Heft 5/6, 294-303, 1950.
- DIESING, D.; KUBICKI, A.; WINTER, C. and SCHWARZER, K.: Decadal scale stability of sorted bedforms, German Bight, southeastern North Sea. In: *Continental Shelf Research* 26, 902-916, 2006.
- FIGGE, K.: Das Elbe-Urstromtal im Bereich der Deutschen Bucht (Nordsee). In: *Eiszeitalter u. Gegenwart*, 30, 203-211, 1980.
- FIGGE, K.: Karte und Begleitheft zur Karte der Sedimentverteilung in der Deutschen Bucht, Maßstab 1:250.000. Deutsches Hydrographisches Institut, 1981.
- FOLK, R. L. and WARD, W. C.: Brazos River bar: a study in the significance of grain size parameters. In: *Journal of Sedimentary Petrology*, Bd. 27, 3-26, 1957.
- GAO, S. and COLLINS, M.: Analysis of grain-size trend for defining sediment transport pathways in marine environments. In: *Journal of Coastal Research* 10 (1), 70-78, 1994.
- HEYER, H. und SCHROTTKE, K.: Aufbau von integrierten Modellsystemen zur Analyse der langfristigen Morphodynamik in der Deutschen Bucht – AufMod.
<http://edok01.tib.uni-hannover.de/edoks/e01fb14/780783271.pdf>,
doi: 10.2314/GBV:780783271, 2013.
- HIRSCHHÄUSER, T., MEWIS, P. and ZANKE, U: Determination of the Initial Distribution of Particle Size in Morphodynamic Modelling in Tidal Areas. 3rd International Conference on Hydro-Science and -Engineering, Cottbus, Germany, 1998.
- JARKE, J.: Neue Ergebnisse zur Bodenbedeckung der Deutschen Bucht. In: *Tagungsbericht und wissenschaftliche Abhandlungen. Deutscher Geographentag (Hamburg)*, Franz Steiner Verlag GmbH, Wiesbaden, 369-375, 1955.

- KÖSTERS, F. and WINTER, C.: Exploring German Bight coastal morphodynamics based on modelled bed shear stress. In: *Geo-Marine Letters*, 34, 21-36, doi: 10.1007/s00367-013-0346-y, 2014.
- KRUMBEIN, W. C.: Application of logarithmic moments to size frequency distribution of sediments. In: *Journal of Sedimentary Petrology*, 6 (1), 35-47, 1936.
- KWOLL, E. and WINTER, C.: Determination of the initial grain size distribution in a tidal inlet by means of numerical modelling. In: *Journal of Coastal Research*, SI 64 (Proceedings of the 11th International Coastal Symposium), 1081-1085. Szczecin, Poland, ISSN 0749-0208, 2011.
- LAURER, W-U.; NAUMANN, M. und ZEILER, M.: Sedimentverteilung in der deutschen Nordsee nach der Klassifikation von Figge (1981), www.gpdn.de, Stand: 02.04.2014, 2013.
- LOEWE, P.; KLEIN, H. und WEIGELT-KRENZ, S.: System Nordsee, 2006 & 2007: Zustand und Entwicklungen. *Berichte des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie* Nr. 49, 2013.
- LYARD, F.; LEFEVRE, F.; LETELLIER, T. and FRANCIS, O.: Modelling the global ocean tides: modern insights from FES2004. In: *Ocean Dynamics* 56, 394-415, 2006.
- MCLAREN, P.: An interpretation of trends in grain size measure. In: *Journal of Sedimentary Petrology* 51 (2), 611-624, 1981.
- MCLAREN, P. and BOWLES, D.: The effects of sediment transport on grain-size distribution. In: *Journal of Sedimentary Petrology* 55 (4), 457-470, 1985.
- MCMANUS, J.: Grain size determination and interpretation. In: TUCKER, M.: *Techniques in Sedimentology*, Blackwell Scientific Publications, 63-85, 1988.
- MILBRADT, P.; VALERIUS, J. und ZEILER, M.: Das Funktionale Bodenmodell: Aufbereitung einer konsistenten Datenbasis für die Morphologie und Sedimentologie, *Die Küste*, 83, 2015.
- MURRAY, A. B. and THIELER E. R.: A new hypothesis and exploratory model for the formation of large-scale inner-shelf sediment sorting and “rippled scour depressions”. In: *Continental Shelf Research* 24, 295-315, 2004.
- OTTO, L.; ZIMMERMANN, J. T. F.; FURNES, G. K.; MORK, M.; SAETRE, R. and BECKER, G.: Review of the physical oceanography of the North Sea, In: *Neth. J. Sea Res.*, 26, 2-4, 161-238, doi: 10.1016/0077-7579(90)90091-T, 1990.
- POIZOT, E. and MEAR, Y.: Using a GIS to enhance grain size trend analysis. In: *Environmental Modelling & Software* 25, 513-525, 2010.
- RICKLEFS, K. and ASP NETO, N. E.: Geology und Morphodynamics of a Tidal Flat Area along the German North Sea Coast, *Die Küste*, 69, 93-127, 2005.
- SCHNEGGENBURGER, C.; GÜNTHER, H. and ROSENTHAL, W.: Spectral wave modelling with non-linear dissipation: validation and applications in a coastal tidal environment. *Coastal Engineering* 41(1/3), 201-235. doi:10.1016/S0378-3839(00)00033-8, 2000.
- SMILE CONSULT GmbH: Erste Schritte - Einführung in Gismo. http://www.smileconsult.de/files/gismo_erstesritte_v28.pdf, Stand: 10.01.2014, 2011.
- SOULSBY, R.: *Dynamics of marine sands. A manual for practical applications*, Telford, 1997.

- SÜNDERMANN, J and POHLMANN, T.: A brief analysis of North Sea physics. In: OCEANOLOGIA 53(3), 663–689, doi:10.5697/OC.53-3.663, 2011.
- TABAT, W.: Sedimentologische Verteilungsmuster in der Nordsee. In: Meyniana, 31, 83-124, 1979.
- VAN RIJN, L. C.: Sediment transport: part I: bed load transport; part II: suspended load transport; part III: bed forms and alluvial roughness. Journal of Hydraulic Division, Proc. ASCE, 110 (HY10), 1431-1456; (HY11), 1613-1641; (HY12), 1733-1754, 1984.
- ZEILER, M.; SCHULZ-OHLBERG, J. and FIGGE, K.: Mobile sand deposits and shoreface sediment dynamics in the inner German Bight (North Sea). In: Marine Geology, 170, 363-380, 2000.
- ZEILER, M.; FIGGE, K.; GRIEWATSCH, K.; DIESING, M. und SCHWARZER, K.: Regenerierung von Materialentnahmestellen in Nord- und Ostsee. Die Küste, 68, 67-98, 2004.
- ZEILER, M.; SCHWARZER, K and RICKLEFS, K.: Seabed Morphology and Sediment Dynamics, Die Küste, 74, 31-44, 2008.

Die Verteilung und Eigenschaften von Bodenformen in der Deutschen Bucht, eine Rekonstruktion der Karten von Ulrich (1973)

Christian Winter, Alice Lefebvre, Markus Benninghoff, Verner B. Ernstsén

Zusammenfassung

Bodenformen an der Sohle von Flüssen, Küstenzonen und flachen Schelfen sind wichtige skalenübergreifende Elemente der Küstendynamik in ihren Eigenschaften als Transportkörper von Sedimenten und ihrer Wirkung auf die Strömungsdynamik als Rauheitselemente. Neben vielen neueren Studien über die Entstehung, Gestalt und Dynamik von Bodenformen in vergleichsweise kleinen Untersuchungsgebieten ist die Arbeit von ULRICH (1973) über die Verteilung von Bodenformen in der Deutschen Bucht bis heute die einzige verfügbare zusammenhängende Darstellung für die deutsche Nordseeküste. Die analogen Karten und die Darstellung der Klassifizierung in Buchstabenkürzeln macht sie für heutige quantitative Analysen schwer zugänglich. Hier wurden diese Karten digitalisiert und Eigenschaften der Bodenformen rekonstruiert und interpretiert. Das Ergebnis ist eine Zusammenstellung digitaler Karten eines vollständigen - und eines auf steile, hydrodynamisch wirksame Bodenformen reduzierten Datensatzes der Minimal, Maximal- und Mittelwerte von Höhen, Längen und Steilheiten von Bodenformen in der Deutschen Bucht. Die Datensätze stehen der Allgemeinheit in der Datenbank Pangaea zur Verfügung.

Schlagwörter

Bodenformen, Pangaea, Hydraulische Rauheit, Steilheit, Sedimenttransport

Summary

Bedforms in rivers, coastal zones and shallow shelf seas are important cross-scale elements of coastal dynamics in their function as sediment transport agent and in their effect on the flow dynamics as roughness elements. In addition to many recent studies on the origin, shape and dynamics of bedforms in relatively small study areas the work of ULRICH (1973) on the classification of bedform types in the German Bight is until today the only available coherent representation of the spatial distribution of bedforms for the whole German coastal sea. The analogue maps and the coded classification makes them difficult to access for quantitative analyses. Here these maps were digitized and properties of the bedforms were reconstructed and interpreted. Resulting digital maps of the whole and a reduced dataset on steep bedforms contain minimum, maximum and average values of heights, lengths and steepness of bedform types in the German Bight. The data sets are available to the public in the database Pangaea.

Keywords

Bedforms, Pangaea, hydraulic roughness, steepness, sediment transport

Inhalt

1	Einleitung.....	66
2	Materialien und Methoden.....	68
2.1	Karten in ULRICH (1973).....	68
2.2	Bestimmung quantitativer Größen.....	68
3	Ergebnisse.....	69
4	Diskussion.....	72
5	Schlussfolgerungen.....	73
6	Schriftenverzeichnis.....	73

1 Einleitung

In steter Wechselwirkung von Wellen, Strömungen und Transportprozessen an der beweglichen Sohle von Flüssen und Küstenzonen entstehen Bodenformen wie Dünen und Rippel in einer großen Vielfalt von Form und Größe. Bodenformen wirken dabei gleichermaßen als Transportkörper bodennaher Sedimente wie auch als Rauheitselemente, die Reibung auf die Strömung ausüben.

Aus der Anwesenheit und der Form von Bodenformen an der Gewässersohle von Küstensystemen lassen sich wichtige Eigenschaften der Hydrodynamik, Sedimentologie und Dynamik des Meeresbodens und der Meeresumwelt abschätzen (FLEMMING 2000). Das vertiefte Verständnis räumlicher und zeitlicher Skalen morphodynamischer Prozesse gewinnt im Rahmen der zunehmenden Nutzung der Küsten- und Meeresumwelt besondere Bedeutung; zum Beispiel in Bezug auf den Bau von Offshore-Windparks (z. B. VAN DER VEEN and HULSCHER 2008), Offshore-Öl- und Gasleitungen und Stromkabel (z. B. MORELISSEN et al. 2003; BRANSBY et al. 2010a,b), Piers und Häfen (z. B. VAN LANCKER et al. 2004), Schifffahrtswege (z. B. KNAAPEN and HULSCHER 2002), Energiegewinnung (ALVAREZ et al. 2014), gesetzliche Regelungen (WINTER et al. 2014), der Interaktion morphologischer und biologischer Prozesse (AHMERKAMP et al. 2015) oder andere Nutzungen.

Neben der Notwendigkeit, lokale Eigenschaften von Küstensystemen zu verstehen, sind grundsätzliche Fragestellungen zur Entstehung, Entwicklung und Wirkung von Bodenformen Grundlage aktueller Forschung (z. B. LEFEBVRE et al. 2011, KWOLL et al. 2013; KWOLL et al. 2014). Hauptziele der genannten Untersuchungen sind ein grundlegendes Verständnis der Wirkungsbeziehungen an der Gewässersohle und die Möglichkeit der Prognose des Verhaltens von Küstensystemen. Dabei werden für die Vorhersage natürlicher und menschlich beeinflusster Entwicklungen verschiedene Modellsysteme verwendet (CHU et al. 2013; WINTER et al. 2014; WINTER 2012; HERRLING and WINTER 2014; MALCHEREK and PUTZAR 2004). Diese prozessbasierten Modelle werden durch Vorgabe von Randbedingungen gesteuert. An der Gewässersohle müssen Bodenrauheiten

vorgegeben werden, die gegebenenfalls Bodenformen als Formrauheit berücksichtigen (LEFEBVRE et al. 2011).

Die geometrischen Eigenschaften von Bodenformen werden durch Auswertung schiffsgestützter Vermessungen mit Echoloten bestimmt. Diese bathymetrischen Daten werden hinsichtlich der Größe, Form und Bewegung von Bodenformen analysiert (ERNSTSEN et al. 2005; ERNSTSEN et al. 2006). Vermessungen werden durch die zuständigen Behörden im Rahmen ihrer hoheitlichen Aufgaben für alle deutschen Gewässer, und zusätzlich durch Forschungsinstitutionen für unterschiedliche kleinere Untersuchungsgebiete, durchgeführt. Heute sind durch durchgängig digital verfügbare bathymetrische Daten quasi automatisierte Analysen möglich, etwa die Darstellung der dekadischen morphologischen Aktivität der Deutschen Bucht (WINTER 2011 oder andere (siehe dieses Heft)). Ungleich aufwendiger war die Zusammenstellung und Auswertung der damals verfügbaren behördlichen Vermessungen durch ULRICH (1973) für die deutsche Nordseeküste. Auf den analogen Echolotschrieben diverser Vermessungsfahrten wurden individuelle Bodenformen identifiziert, nach Höhe und Steilheit klassifiziert und kodiert flächenhaft dargestellt (Abb. 1).

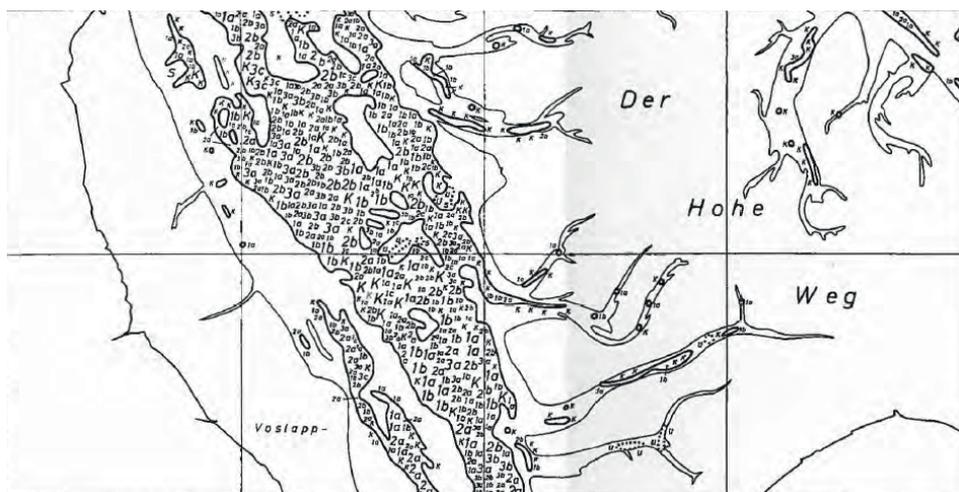


Abbildung 1: Beispiel für Kartenausschnitt, Detail Außenjade, Karte 15, (ULRICH 1973).

Bis heute sind die Karten von ULRICH die einzige großskalige Kartierung von Bodenformen dieser Region auf der Basis von Vermessungen. Allerdings standen diese Klassifikationen bisher nur als analoge (Papier-) karten zur Verfügung und lassen sich so schwer analysieren oder mit anderen Datensätzen kombinieren oder vergleichen.

In dieser Arbeit wurden die Karten der Deutschen Bucht von ULRICH (1973) digitalisiert und die geometrischen Eigenschaften der Bodenformen aus den kodierten Deskriptoren rekonstruiert und interpretiert. Die georeferenzierten Daten sind in der Datenbank des WDC-MARE (www.wdc-mare.org) über das Informationssystem Pangaea (www.pangaea.de) verfügbar.

2 Materialien und Methoden

2.1 Karten in ULRICH (1973)

Die analogen Karten der räumlichen Verteilung von Bodenformen (dort „Riesen und Großrippel“) in der Deutschen Bucht waren ein Ergebnis des Programms „Sandbewegung im Deutschen Küstenraum“ der Deutschen Forschungsgemeinschaft in der Zeit von 1967 bis 1971. ULRICH hatte Echogramme aus dem Zeitraum 1964-1971 analysiert. Es ist daher zu beachten, dass diese Zusammenstellung (wie auch heutige Vermessungen) keinen streng synoptischen Zustand darstellt.

Die Vermessungen selbst wurden von 11 Institutionen mit mehr als zwanzig verschiedenen Schiffen und jeweils unterschiedlichen Datenerfassungssystemen durchgeführt. Es wurden Echolote von drei verschiedenen Herstellern und verschiedene Navigations- und Positionierungssysteme verwendet. Flächenhafte Vermessungen waren mit den damaligen Einstrahlecholoten nicht möglich. Stattdessen wurden Vermessungslinien in Küstennähe in 50 bis 250 m Abstand, und auf offener See in 250-1.000 m Abständen abgefahren. Insgesamt wurden Echogramme von Vermessungen von etwa 29.500 Seemeilen (54.600 km) auf insgesamt 600 Papierrollen auf die Anwesenheit von Bodenformen überprüft und diese klassifiziert (vgl. ULRICH 1973, Abb. 2, S. 14). Basierend auf Höhe und dem Verhältnis Länge/Höhe wurden zehn Typen durch unterschiedliche Kennungen unterschieden. Aufgrund der relativ eindeutigen Bestimmung wurde die Höhe H als primäres Klassifizierungskriterium verwendet, mit Kennung K ($H < 0.5$ m) als „Kleinform mit Rippelcharakter“ Typ 1 (0.5-1 m) als „Großrippel“, Typ 2 (1-2 m) als „Groß bis Riesenrippel“ und Typ 3 (> 2 m) als „Riesenrippel“ bezeichnet. ULRICH (1973) folgte damit der Nomenklatur von REINECK et al. (1971). Als sekundäres Klassifikationskriterium wurde die reziproke Steilheit L/H verwendet. Dabei bezeichnet a (12-75) steile, b (75-150) mittelmäßig geneigte und c (200-250) wenig geneigte Formen. Die identifizierten Bodenformtypen wurden auf geografische Arbeitsblätter überführt und Feldgrenzen des Vorkommens von Bodenformen bestimmt. Anschließend wurden die Arbeitsblätter in 22 Karten im Maßstab 1:50000 übertragen und für die Veröffentlichung als Anhänge in ULRICH (1973) auf den Maßstab 1:100.000 reduziert. Neben den strömungsnormalen Bodenformen sind in ähnlicher Weise andere Formen wie S Sandrücken/Sandzungen; U unregelmäßiger Grund, V Vertiefungen, W Bodenwellen aufgeführt. Allerdings ist letztere Nomenklatur rein beschreibend und enthält keine quantitativen Informationen. Das Ziel der vorliegenden Arbeit war es, die räumliche Verteilung der quantitativ erfassten Bodenformen zu rekonstruieren. Folglich wurden letztere Formen nicht berücksichtigt.

2.2 Bestimmung quantitativer Größen

Für das Untersuchungsgebiet sind zehn verschiedene Typen von Bodenformen kartiert, deren Größenordnungen der Höhe und reziproken Steilheit L/H angegeben sind. Minimalwerte der Höhe können damit direkt angegeben werden (Tab. 1). Für den Bodenformtyp K sind keine Angaben gemacht worden. Basierend auf einer Grafik (in ULRICH 1973, Abb. 4, S. 16) wurde eine Minimalhöhe von 0,25 m abgeschätzt. Auch die Maximalhöhen für die meisten Formen sind angegeben, außer im Falle der Typen $3a$, $3b$ und $3c$, die ebenfalls aus der Grafik zu 8 m, 6 m und 4 m abgeschätzt wurden. Mittlere Höhen

der Bodenformtypen wurden als einfache arithmetische Mittel berechnet. Werte der minimalen und maximalen Steilheit (H/L) der Bodenformen konnten direkt aus den Tafelwerten (dort ist die reziproke Steilheit angegeben) berechnet werden. Werte für die minimale und maximale Länge der Bodenformen wurden von den minimalen und maximalen Werten der Höhen und Steilheiten abgeleitet. Mittlere Längen wurden durch Mittelung der minimalen und maximalen Längen, mittlere Steilheiten dann durch den Quotienten der mittleren Höhen und Längen berechnet. Schließlich wurden die Bodenformen nach dem Klassifikationsschema von ASHLEY (1990) in große und sehr große Dünen eingestuft.

Die einzelnen Verarbeitungsschritte für die Umwandlung der analogen Karten von ULRICH (1973) in eine digitale Form sind:

1. 22 Papierkarten (Maßstab 1:100.000) wurden als hochauflösende (600 dpi) Grafiken gescannt und gespeichert.
2. Grafiken wurden in ESRI ArcGIS importiert und georeferenziert.
3. Feldgrenzen von Bodenformfeldern wurden als Polygone digitalisiert. In dem Maßstab der Karten (1:100000) entspricht die Linienbreite der Feldgrenzen etwa 50 m. Entsprechend wird die Genauigkeit der Digitalisierung hier bewertet.
4. Die Kennungen von Ulrich wurden digitalisiert und in zehn Lagen abgelegt (K, 1a, 1b, 1c, 2a, 2b, 2c, 3a, 3b, 3c). Insgesamt wurden 10.755 Kennungen digitalisiert.
5. Jeder Lage wurden zugehörige geometrische Größen (minimale, mittlere und maximale Höhe, Länge und Steilheit) zugeordnet.
6. Die räumliche Verteilung der geometrischen Größen wurde durch Interpolation (Kriging mit sphärischem Semivariogramm Modell) innerhalb der geschlossenen Feldgrenzen erzeugt. Jeweils wurden zwei verschiedene Datensätze abgelegt: Sowohl Dateien mit allen Daten als auch ein reduzierter Datensatz, in dem nur steile Bodenformen aufgenommen sind (1a, 2a, 3a, 3b). Erläuterung siehe unten.

3 Ergebnisse

Die Gesamtzahl der Bereiche, in denen Bodenformen auftreten, ist 1.435. Die Felder sind 0,008 km² bis 92 km² groß, mit einer durchschnittlichen Größe von 0,6 km². Insgesamt bedecken diese Felder eine Fläche von 927 km² (Abb. 2). Bodenformen treten in allen größeren Tidekanälen, Seegatten, Flussmündungen auf. Auch andere Bereiche sind identifiziert, etwa das große Gebiet nördlich der ostfriesischen Inseln. Insgesamt wurden 10.755 Kennungen digitalisiert. Etwa ein Drittel (29%) von ihnen gehören zu den kleinsten (H < 0,5 m) Typ K Bodenformen. Am häufigsten treten die mittelhohen (0,5 m < H < 2 m) Bodenformtypen 1a (14%), 1b (19%), 2a (10) und 2b (11%) auf. Weniger häufig sind die hohen (H > 2 m) Bodenformtypen 3a (6%) und 3b (3%) und die flachen Typen 1c (6%), 2c (1%) und 3c (<1%).

Durch die Interpolation stehen digitale Daten der räumlichen Verteilung der Höhen, Längen und Steigungen im Höhenbereich von 0,375 m - 5 m mit einem Mittelwert von 1,18 m (und eine Standardabweichung von 0,85 m), die Längenbereich ist 41 m - 475 m mit einem mittleren Wert von 125 m (und einer Standardabweichung von 75 m) und der Steilheit von 0,003 bis 0,031 mit einem Mittelwert von 0,011 (und einer Standardabweichung von 0,006) zur Verfügung.

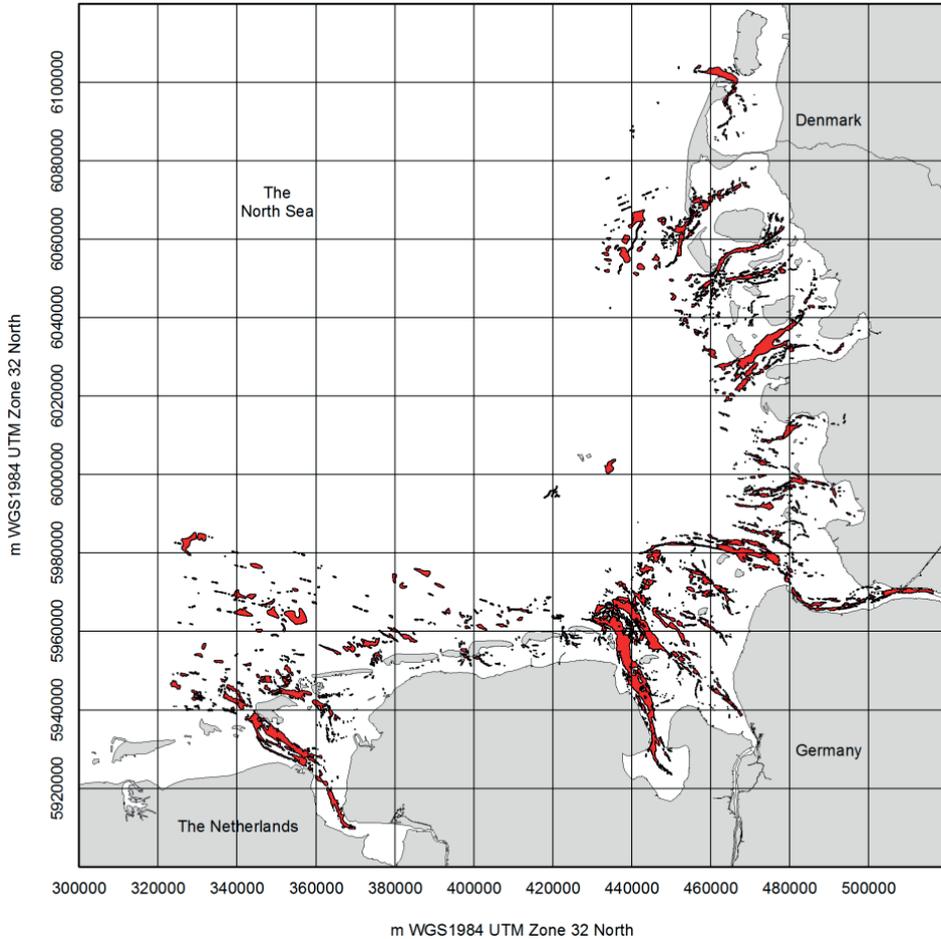


Abbildung 2: Bereiche mit Bodenformen in der Deutschen Bucht.

Die hydraulische Wirksamkeit von Bodenformen wird oft durch ihre Höhe H oder/und Steilheit H/L parametrisiert (VAN RIJN 1984; BARTHOLDY et al. 2010). Ein Vergleich der hier digitalisierten Typen mit der empirischen Beziehung zwischen Höhen und Längen einer Vielzahl von Bodenformen (FLEMMING 1988) zeigt, dass deren Mittelwerte (mit Ausnahme des Typs 3a) unterhalb dieser Beziehung liegen (Abb. 3). Im Mittel sind die hier rekonstruierten Bodenformen also weniger steil als die meisten Bodenformen der großen Datenbank, die Grundlage für die Beziehung von FLEMMING (1988) war. Das gilt besonders für die Typen K, 1b, 1c, 2b, 2c und 3c, die alle unterhalb der globalen HL-Beziehung liegen. Die Einbeziehung der gesamten (geometrischen) Gültigkeitsbereiche (schraffierte Flächen) für die verschiedenen Typen zeigt, dass die Formen 1a, 2a, 3a und 3b die globale HL-Beziehung überlappen, teilweise sogar die Beziehung für maximale Steilheiten überschreiten. Im Rahmen dieser Studie wurde eine Untergruppe der steilen Bodenformen (1b, 1c, 2b, 2c und 3c) gebildet, für die eine deutliche hydraulische Wirksamkeit vermutet wird.

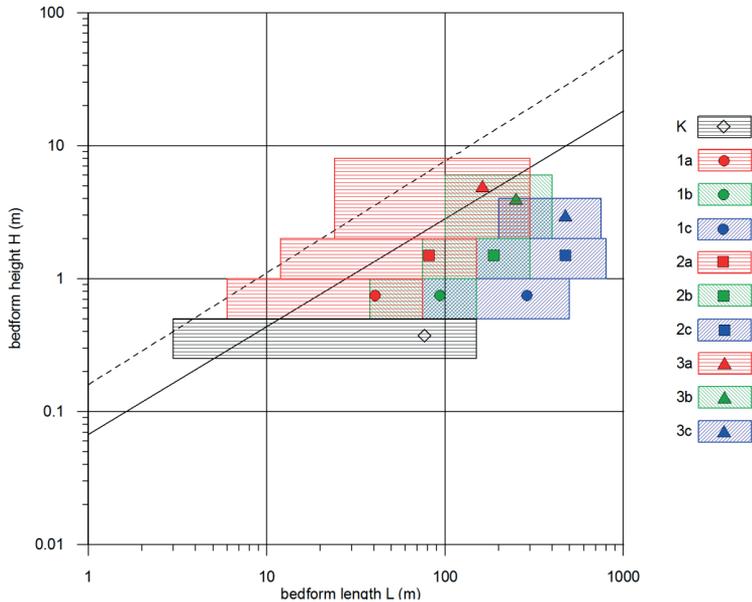


Abbildung 3: Diagramm der mittleren (Symbole) Bodenform Höhen und Längen und deren Gültigkeitsbereiche (Flächen). Die durchgezogene Linie bezeichnet die Beziehung $H = 0.0677L^{0.80998}$ für mittlere, und die gestrichelte Linie die Beziehung $H = 0.16L^{0.84}$ für maximale Steilheiten nach FLEMMING (1988).

Die räumliche Verteilung der Mittelwerte der Höhen und Längen sind in Abb. 5 dargestellt. Karten und Daten der Bereiche und Bodenformkennwerte sind in Pangaea zugänglich.

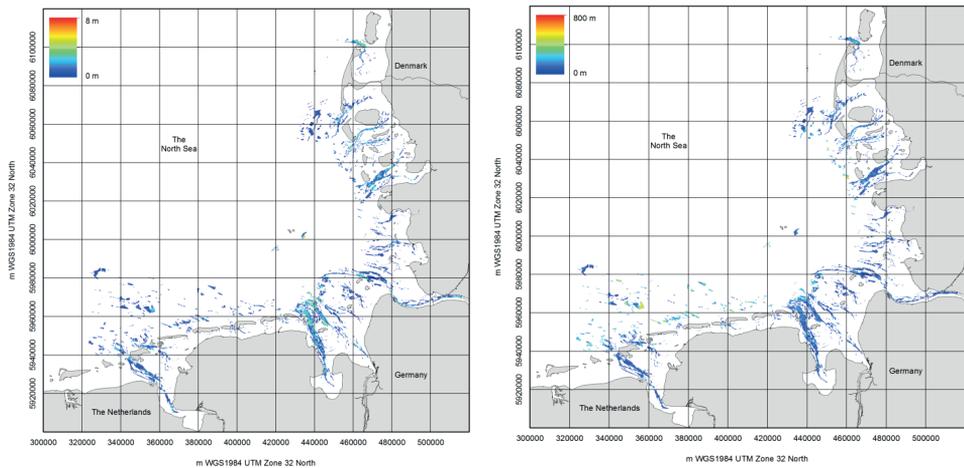


Abbildung 4: Rekonstruierte mittlere Höhen (links) und Längen (rechts) von Bodenformen in der Deutschen Bucht.

4 Diskussion

Die hier rekonstruierten Daten ermöglichen den Zugang zu einer bisher einmaligen Zusammenstellung der Verteilung von Bodenformen in der Deutschen Bucht. Die technischen Voraussetzungen bei der Vermessung, die Bearbeitung der meist analogen Echogramme und deren teilweise subjektive Interpretation erlauben sicher nur eingeschränkt gültige quantitative Analysen absoluter Werte. Für eine Darstellung relativer Größen, einem Verständnis der flächenhaften Verteilung von Bodenformen, der Abschätzung von Größenordnungen und dem Vergleich mit heutigen Verteilungen aber sind diese Daten von hoher Bedeutung.

Leider hatten die Daten und Auswertungen von ULRICH (1973) zu keinen Aussagen über die Richtung/Orientierung oder die Form der Bodenformen geführt. Solche Parameter könnten bei der Abschätzung von Sedimenttransportrichtungen verwendet werden, so wie es in mehreren Studien von großen (KUBICKI 2008) und kleineren Bodenformen (ERNSTSEN et al. 2005, ERNSTSEN et al. 2006; KUBICKI and BARTHOLOMÄ 2011) bereits gezeigt wurde. Eine Bewertung von Sedimenttransportrichtungen und Transportpfaden in der Deutschen Bucht auf der Basis der identifizierten Bodenformen ist so aber nicht möglich.

Die hier analysierten Bodenformen könnten theoretisch vollständig inaktive Relikte (z. B. BUI et al. 2009) oder relativ inaktive Strukturen darstellen, die möglicherweise nur bei Extremereignissen aktiv sind (z. B. WERNER et al. 1974; DIESING et al. 2006). Jüngere Untersuchungen zeigen aber meist die hohe Dynamik von Bodenformen, die sich in Tiderinnen in Zeitskalen von Minuten bis Tiden bewegen können (z. B. WILLIAMS et al. 2003; WINTER and ERNSTSEN 2007). Diese Dynamik von Bodenformen kann durch wiederholte Vermessungen mit heutigen hochgenauen Mess- und Positionierungsverfahren quantifiziert werden (ERNSTSEN et al. 2006). Dabei wird die hohe Dynamik individueller Bodenformen deutlich. Die Bereiche des Auftretens von Bodenformen dagegen sind vergleichsweise stabil (FRACCASCIA et al. 2011). Eine Bewertung der Dynamik individueller Bodenformen in der Deutschen Bucht ist auf Grundlage der ULRICH (1973) Karten zwar nicht möglich, deren Auftreten kann aber als Indikator für eine hohe Aktivität des Meeresbodens dienen. Diese Bereiche des Auftretens großer Bodenformen in den äußeren Ästuaren und Tiderinnen (Abb. 4) sind räumlich ähnlich der Gebiete hoher großskaliger Morphodynamik in der der Deutschen Bucht (WINTER 2011) und der Bereiche hoher mittlerer Schubspannungen (KÖSTERS and WINTER, 2014).

Die Quantifizierung der Reibungswirkung durch Bodenformen auf die Strömung ist von grundlegender Bedeutung für das Verständnis und die Simulation von Hydro- und Sedimentdynamik in den Küstengebieten (z. B. MALCHEREK and PUTZAR 2004; LEFEBVRE et al. 2011). Diese Formrauheit wird in der Literatur durch empirische Beziehungen quantifiziert, die Höhe und Steilheit von Bodenformen parametrisieren (VANONI and HWANG 1967; YALIN 1972; VAN RIJN 1984; SOULSBY 1997; BARTHOLDY et al. 2010). Für eine Abschätzung der großskaligen hydraulischen Rauheit sind reduzierte Datensätze vergleichsweise steiler Bodenformen erstellt worden. Diese können direkt als Grundlage für die Berechnung der Bodenrauheit verwendet werden oder als Referenzgröße für den Vergleich mit Prädiktoren dienen.

5 Schlussfolgerungen

Bodenformen an der Sohle von Flüssen, Küstenzonen und flachen Schelfen sind wichtige skalenübergreifende Elemente der Küstendynamik in ihren Eigenschaften als Transportkörper von Sedimenten und ihrer Wirkung auf die Strömungsdynamik als Rauheitselemente. Hier wurden Karten der Verteilung von Bodenformen in der Deutschen Bucht digitalisiert sowie die Eigenschaften der Bodenformen rekonstruiert und interpretiert. Ein reduzierter Datensatz wurde generiert, in dem ausschließlich die steilen hydraulisch wirksamen Bodenformen enthalten sind. Das Ergebnis sind digitale Karten der beiden Datensätze der Minimal-, Maximal- und Mittelwerte von Höhen, Längen und Steilheit von Bodenformen in der Deutschen Bucht.

Diese Daten bilden eine einzigartige quantitative Grundlage für die Modellierung von Strömungen und Sedimenttransport im Gebiet der Deutschen Bucht. Die angegebenen Parameter können direkt als Grundlage für die Berechnung der Bodenrauheit verwendet werden, oder als Referenzgröße für den Vergleich mit bisherigen und neuen Prädiktoren dienen. Modellstudien und Untersuchungen von Messergebnissen können in eine großskalige Betrachtung der Dynamik der Deutschen Bucht einbezogen werden. Es wurde betont, dass Bereiche des Auftretens großer Bodenformen in den äußeren Ästuaren und Tiderinnen ähnlich der Gebiete hoher großskaliger Morphodynamik in der Deutschen Bucht (WINTER 2011) und der Bereiche hoher mittlerer Schubspannungen (KÖSTERS and WINTER, 2014) sind. Die skalenübergreifende Bedeutung von Bodenformen als Indikator hoher Dynamik wird deutlich.

Alle Daten sind als Karten und Datensätze frei in der Datenbank Pangaea zugänglich (<http://www.pangaea.de/>).

Die Autoren danken dem Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) für die Genehmigung der Verwendung und Veröffentlichung der Daten von Ulrich (1973).

6 Schriftenverzeichnis

- AHMERKAMP, S., WINTER, C., JANSSEN, F., KUYPERS, M. M. M. and HOLTAPPELS, M.: The impact of bedform migration on benthic oxygen fluxes. *Journal of Geophysical Research – Biogeosciences*, 120, doi:10.1002/2015JG003106, 2015.
- ALVAREZ-SILA, O.; WINTER, C. and OSORIO, A. F.: Salinity Gradient Energy at River Mouths. *Environ. Sci. Technol. Lett.*, Article ASAP, doi: 10.1021/ez500239n, 2014.
- ASHLEY, G. M.: Classification of large-scale subaqueous bedforms: a new look at an old problem. *J Sediment Petrol* 60, 160-172, 1990.
- BARTHOLDY, J.; FLEMMING, B.; ERNSTSEN, V. B.; WINTER, C. and BARTHOLOMÄ, A.: Hydraulic roughness over simple subaqueous dunes. *Geo-Mar Lett* 30, 63-76, 2010.
- BRANSBY, M. F.; BROWN, M.; HATHERLEY, A. and LAUDER, K.: Pipeline plough performance in sand waves. Part 1: model testing. *Can Geotech J* 47, 49-64, 2010a.
- BRANSBY, M. F.; BROWN, M. J.; LAUDER, K. and HATHERLEY, A.: Pipeline plough performance in sand waves. Part 2: Kinematic calculation method. *Can Geotech J* 47, 65-77, 2010b.
- BUI, V. D.; SCHIMANSKI, A.; STATTEGGER, K.; PHUNG, V. P.; NGUYEN, T. T.; NGUYEN, T. H.; NGUYEN, T. T. and PHI, T. T.: Sand waves on the Southeast

- Vietnam Shelf recorded by high resolution seismic profiles: formation and mechanism. *Front Earth Science China* 3, 9-20, 2009.
- CHU, K.; WINTER, C.; HEBBELN, D. AND SCHULZ, M.: Improvement of morphodynamic modeling of tidal channel migration by nudging. *Coastal Engineering*, 77, 1-13, doi: 10.1016/j.coastaleng.2013.02.004, 2013.
- CHURCH, J. A.; WHITE, N. J.; COLEMAN, R.; LAMBECK, K. and MITROVICA, J. X.: Estimates of the Regional Distribution of Sea Level Rise over the 1950-2000 Period. *Journal of Climate*, Vol. 17, 2609-2625, 2004.
- DIESING, M.; WINTER, C.; KUBICKI, A. and SCHWARZER, K.: Decadal scale stability of sorted bedforms, German Bight, south-eastern North Sea. *Continental Shelf Research* 26, 902-916, 2006.
- DUFFY, G. P. and HUGHES-CLARKE, J. E.: Application of spatial cross correlation to detection of migration of submarine sand dunes. *J Geophys Res-Earth* 110, F04S12, 11 pp, 2005.
- DYER, K. R.: *Coastal and estuarine sediment dynamics*. Wiley, Chichester, 1986.
- ENGELUND, F. and FREDSSØE, J.: Hydraulic theory of alluvial rivers. *Advances in Hydroscience* 13, 187-215, 1982.
- ERNSTSEN, V. B.; NOORMETS, R.; WINTER, C.; HEBBELN, D.; BARTHOLOMÄ, A.; FLEMMING, B. W. and BARTHOLDY, J.: Development of subaqueous barchanoid-shaped dunes due to lateral grain size variability in a tidal inlet channel of the Danish Wadden Sea. *J Geophys Res-Earth* 110, F04S08, 13, 2005.
- ERNSTSEN, V. B.; NOORMETS, R.; WINTER, C.; HEBBELN, D.; BARTHOLOMÄ, A.; FLEMMING, B. W. and BARTHOLDY, J.: Quantification of dune dynamics during a tidal cycle in an inlet channel of the Danish Wadden Sea. *Geo-Mar Lett* 26, 151-163, 2006.
- FLEMMING, B. W.: Zur Klassifikation subaquatischer, strömungstransversaler Transportkörper. *Bochumer Geologische und Geotechnische Arbeiten* 29, 44-47, 1988.
- FLEMMING, B. W.: The role of grain size, water depth and flow velocity as scaling factors controlling the size of subaqueous dunes. In: Trentesaux, A. and Garlan, T. (eds.): *Proceedings of the International Workshop on Marine Sandwave Dynamics*, 23-24 March 2000, University of Lille 1, Lille, France, 55-60, 2000.
- FRACCASCIA, S., HEBBELN, D. und WINTER, C.: Bedform evolution in a tidal inlet inferred from wavelet analysis. *Journal Coastal Research*, SI 64, 2011.
- HERRLING, G. and WINTER, C.: Morphological and sedimentological response of a mixed-energy barrier island tidal inlet to storm and fair-weather conditions. *Earth Surface Dynamics*, 2(1), 363-382, doi:10.5194/esurf-2-363-2014, 2014.
- KNAAPEN, M. A. F. and HULSCHER, S. J. M. H.: Regeneration of sand waves after dredging. *Coast Eng* 46, 277-289, 2002.
- KÖSTERS, F. and WINTER, C.: Exploring German Bight coastal morphodynamics based on modelled bed shear stress. *Geo-Marine Letters* 34, 21-36, 2014.
- KUBICKI, A.: Large and very large subaqueous dunes on the continental shelf off southern Vietnam, South china Sea. *Geo-Mar Lett* 28, 229-238, 2008.
- KUBICKI, A. and BARTHOLOMÄ, A.: Sediment dynamics in the Jade tidal channel prior to port construction, southeastern North Sea. *J Coastal Res SI64*, 771-775, 2011.
- KWOLL E., WINTER C. and BECKER M.: Intermittent suspension and transport of fine sediment over natural tidal bedforms. In: Venditti, J. G.; Best, J.; Church, M. and R.

- J. Hardy (eds.): Coherent Structures in Flows at the Earth's Surface. Wiley-Blackwell, London, 2013.
- KWOLL, E.; BECKER, M.; WINTER, C.: With or against the tide: the influence of bedform asymmetry on the formation of macroturbulence and suspended sediment patterns. *Water Resources Research* 50, 1-16, doi: 10.1002/2013WR014292, 2014.
- LEFEBVRE, A.; ERNSTSEN, V. B. and WINTER, C.: Influence of compound bedforms on hydraulic roughness in a tidal environment. *Ocean Dynam* 61, 2201-2210, 2011.
- MALCHEREK, A. and PUTZAR, B.: The prediction of dunes and their related roughness in estuarine morphological models. Proceedings of the 8th International Conference on Estuarine and coastal Modelling, Monterey, California, 839-851, 2004.
- MORELISSSEN, R.; HULSCHER, S. J. M. H.; KNAAPEN, M. A. F.; NÉMETH, A. A. and BIJKER, R.: Mathematical modelling of sand wave migration and the interaction with pipelines. *Coast Eng* 48, 197-209, 2003.
- PAARLBERG, A. J.; DOHMEN-JANSSEN, C. M.; HULSCHER, S. J. M. H. and TERMES, P.: Modelling river dune evolution using a parameterization of flow separation. *J Geophys Res-Earth* 114, F01014, 17, 2009.
- REINECK, H. E.; SINGH, I. B. und WUNDERLICH, F.: Einteilung der Rippeln und anderer mariner Sandkörper. *Senck Marit* 3, 93-101, 1971.
- SEISS, G. und PLÜB, A.: Tideverhältnisse in der Deutschen Bucht. *Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau* 86, 61-64, 2003.
- SOULSBY, R. L.: Dynamics of marine sands: a manual for practical applications. Thomas Telford, London, 1997.
- ULRICH, J.: Die Verbreitung submariner Riesen- und Großrippeln in der Deutschen Bucht. *Ergänzungsheft zur Deutschen Hydrographischen Zeitschrift., Reihe B (4⁰). Nr. 14, 31, 1973.*
- VAN DER VEEN, H. H. and HULSCHER, S. J. M. H.: Effects of large-scale human activities on the North Sea bed. In: Parsons, D.; Garlan, T. and Best, J. (eds): *Marine and River Dune Dynamics III*, International Workshop, April 1-3 2008, Leeds, United Kingdom, 307-314, ISBN: 978-2-11-097208-8, 2008.
- VAN LANCKER, V.; LANCKNEUS, J.; HEARN, S.; HOEKSTRA, P.; LEVOY, F.; MILES, J.; MOERKERKE, G.; MONFORT, O. and WHITEHOUSE, R.: Coastal and nearshore morphology, bedforms and sediment transport pathways at Teignmouth (UK). *Cont Shelf Res* 24, 1171-1202, 2004.
- VANONI, V. A. and HWANG, L. S.: Relation between bed forms and friction in streams. *J Hydr Div-ASCE* 93, 121-144, 1967.
- VAN RIJN, L. C.: Sediment transport, part III: bed forms and alluvial roughness. *J Hydraul Eng-ASCE* 110, 1733-1754, 1984.
- WERNER, F. und ARNTZ, W. E.: Tauchgruppe Kiel: Sedimentologie und Ökologie eines ruhenden Riesenrippelfeldes. *Meyniana* 26, 39-62, 1974.
- WILLIAMS, J. J.; BELL, P. S.; HUMPHERY, J. D.; HARDCASTLE, P. J. and THORNE, P. D.: New approach to measurement of sediment processes in a tidal inlet. *Cont Shelf Res* 23, 1239-1254, 2003.
- WINTER, C. and ERNSTSEN, V. B.: Spectral Analysis of Bedforms, In: C. Dohmen-Janssen and SJMH Hulscher (Ed) *River, Coastal and Estuarine Morphodynamics*, 907-912, 2007.

- WINTER, C., 2011. Macro scale morphodynamics of the German North Sea coast. *Journal of Coastal Research*, SI 64 (Proceedings of the 11th International Coastal Symposium), 706 – 710. Szczecin, Poland, ISBN 0749-0208
- WINTER, C.: Observation- and Modelling of Morphodynamics in Sandy Coastal Environments. Habilitationsschrift Universität Bremen, Fachbereich Geowissenschaften, 2012.
- WINTER, C.; HERRLING, G.; BARTHOLOMÄ, A.; CAPPERUCCI, R.; CALLIES, U.; HEIPKE, C.; SCHMIDT, A.; HILLEBRAND, H.; REIMERS, C.; BREMER, P. und WEILER, R.: Wissenschaftliche Konzepte für ein Monitoring des ökologischen Zustands des deutschen Küstenmeeres. *Wasser und Abfall*, 07-08/2014; 21-26, 2014.
- YALIN, M. S.: *Mechanics of sediment transport*. Pergamon Press, New York, 1972.

Zur zeitlichen Variabilität der Sedimentverteilung in den Gezeitenrinnen Piep und Hever

Klaus Ricklefs, Daniela Arp und Maria Stage

Zusammenfassung

Als Teil des interdisziplinären Forschungsprojekts AufMod wurden die subtidalen Abschnitte der Gezeitenrinnen Piep (Dithmarscher Wattenmeer) und Hever (Nordfriesisches Wattenmeer) im Hinblick auf die Verbreitung und Zusammensetzung der oberflächennahen Sedimente untersucht. Hierzu kamen in erster Linie hochauflösende Sonartechniken zum Einsatz. Diese Messergebnisse wurden durch granulometrische Daten von an ausgesuchten Lokationen entnommener Sedimentproben ergänzt. Die erarbeiteten Sedimentverteilungsmuster wurden im Hinblick auf raum-zeitliche Veränderungen mit den älteren Kartenwerken oder den Ergebnissen älterer, weniger umfangreicher Sedimentuntersuchungen verglichen. Dabei zeigte sich, dass ein derartiger Vergleich möglich ist, aber wegen der sehr unterschiedlichen Datendichten der verschiedenen Untersuchungen auf einem relativ groben, generalisierenden Maßstab erfolgen muss. Unter dieser Voraussetzung wird die Sedimentverteilung in den betrachteten Gezeitenrinnen als relativ stabil über die letzten acht Dekaden hinweg angesehen. Zwar sind Veränderungen sichtbar, diese beziehen sich aber in erster Linie auf die Sedimenttypen, die bei allen Untersuchungen in einem bestimmten Teilbetrachtungsraum vorgekommen sind. Merbliche Verlagerungen typischer, großräumiger Sedimentprovinzen treten dagegen nicht auf.

Schlagwörter

Nordsee, Wattenmeer, Gezeitenrinne, Piep, Hever, Sedimentverteilung, Sedimentzusammensetzung

Summary

As part of the interdisciplinary research project AufMod the subtidal areas of the tidal channels Piep (Wadden Sea of Dithmarschen) and Hever (Wadden Sea of North Frisia) were investigated in terms of composition and distribution of near surface sediments. This was mainly done by using high resolution sonar techniques. The outcomes of these measurements were complemented by granulometric data from samples taken at selected sites. To detect spatio-temporal variations the developed sediment distribution patterns were compared with older cartographies and the results of older, less comprehensive sedimentological investigations. It turned out that such a comparison is possible but due to the very different data densities of the considered investigations has to be carried out on a coarse and generalising scale. On this understanding the sediment distributions in the investigated tidal channels are considered to be relatively stable over the last eight decades. Although variations of the sediment distribution patterns are visible these predominantly refer to those sediment types that have been present at all considered periods in the specific observation area. In contrast distinct displacements of typical, spacious sediment provinces cannot be detected.

Keywords

North Sea, Wadden Sea, tidal channel, Piep, Hever, sediment distribution, sediment composition

Inhalt

1	Einleitung.....	78
2	Material und Methoden.....	81
3	Ergebnisse.....	84
3.1	Piep-Rinnen.....	84
3.2	Hever-Rinnen.....	90
4	Diskussion.....	96
5	Schlussbetrachtung.....	100
6	Schriftenverzeichnis.....	100

1 Einleitung

Innerhalb des Sedimentationsraumes der Deutschen Bucht stellt das Wattenmeer als Übergangsbereich zwischen der offenen Nordsee und dem Festland den Bereich mit den ausgeprägtesten morphologischen Umgestaltungsvorgängen dar. Weitgehend aus geologisch jungen Lockersedimenten aufgebaut, reagiert der durch Platen und Rinnen topografisch strukturierte Sedimentkörper der Watten zum einen auf natürliche Prozesse wie dem langfristigen Anstieg des Meeresspiegels, dekadischen Variationen der hydrodynamischen Verhältnisse (OOST et al. 1993) oder auch auf singuläre Ereignisse wie Stürme oder Sturmfluten (RUNTE 1994; HERRLING and WINTER 2013). Zum anderen tragen auch anthropogene Einflussnahmen wie Modifikationen der Abflussverhältnisse oder Eindeichungsmaßnahmen zur Veränderung der Wattmorphologie bei. Bei den drei für morphologische Umgestaltungsvorgänge im Wattenmeer essentiellen Abläufen Mobilisierung, Transport und Ablagerung von klastischem Material kann es zu einer Fraktionierung der bewegten Korngemische kommen. Die sich daraus ergebenden räumlichen Verteilungsmuster der Ablagerungen zeichnen in vielen Fällen anschaulich ein Bild der Energieniveaus innerhalb des Sedimentationsraumes nach. Der Vergleich zu unterschiedlichen Zeiten im gleichen Gebiet erfasster Sedimentverteilungsmuster erlaubt somit Rückschlüsse auf sedimentologische, hydrologische und in Grenzen auch morphologische Entwicklungstendenzen innerhalb des betrachteten Raumes.

Unter anderem vor diesem Hintergrund, aber auch zur Entwicklung einer detaillierten Zustandsbeschreibung als Datenbasis für hoch aufgelöste numerische Simulationsmodelle, sind im Rahmen des durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (Förderkennzeichen 03KIS087) geförderten Verbundforschungsprojektes AufMod die sublitoralen Sedimentverteilungsmuster in den Gezeitenrinnen Norderhever (Nordfriesisches Wattenmeer) und Piep (Dithmarscher Wattenmeer) untersucht worden. Ergänzt werden die in AufMod gesammelten Daten durch die Ergebnisse einer sedimentologischen Kartierung der Gebiete Süderhever/Heverstrom, die im Rahmen eines vom Landesbetrieb für Küstenschutz, Nationalpark und Meeresschutz Schleswig-Holstein (LKN)

finanzierten Vorhabens erarbeitet wurden. Die drei Wattströme werden, wie nachfolgend näher erläutert, als in verschiedenen Aspekten vergleichbar und als charakteristisch für die jeweiligen Wattgebiete angesehen.

Grob umrissen (Abb. 1) nimmt das Subtidal des Rinnensystems der Piep (Norder- und Süderpiep, zentrale Piep sowie die Priele der inneren Meldorfer Bucht wie Kronenloch und Sommerkoogsteertloch) unterhalb der Bezugsebene LAT (lowest astronomical tide) eine Fläche von rund 60 km² ein. Die maximalen Wassertiefen unter LAT liegen bei 18 m. So wie es in Abb. 1 abgegrenzt ist, hat das Subtidal in der Norderhever eine Fläche von 80,3 km². Die größten Wassertiefen betragen etwa 25 m. Wie in Abb. 1 umrissen, weist der Heverstrom eine Subtidalfläche von 44,8 km² auf. Die größten vorgefundenen Wassertiefen betragen rund 28 m. In allen drei Wattströmen liegt der mittlere Tidenhub bei etwa 3,2 m.

Sowohl das Dithmarscher als auch das Nordfriesische Wattenmeer unterliegen verschiedenen morphologischen Umgestaltungsvorgängen (ZEILER et al. 2008). Zu nennen sind in diesem Zusammenhang z. B. die beobachtete landwärts gerichtete Migration der seewärtigsten morphologischen Elemente wie Außensände (WIELAND 1972; TAUBERT 1986; HOFSTEDE 1999) oder exponierter Sandbänke (RICKLEFS et al. 2005), die als Reaktion auf einen steigenden Meeresspiegel gewertet werden. Darüber hinaus kommt es in den Tidebecken der Wattströme zu signifikanten Verlagerungen von Rinnen und Platen (WIELAND 1984; HIGELKE 1988, RICKLEFS and ASP NETO 2005; VAN RIESEN und WINSKOWSKY 2007). Diese laufen auf unterschiedlichsten Zeitskalen ab und können daher verschiedenste Ursachen haben.

Neben natürlichen Prozessen spielen in diesem Zusammenhang auch menschliche Eingriffe in den Naturraum eine bedeutende Rolle. So verringerte sich beispielsweise durch die Eindeichung der inneren Meldorfer Bucht (Dithmarschen) in den 1970er Jahren die Größe der vom Meer beeinflussten Flächen um etwa 30 km². Durch die 1987 erfolgte Vordeichung der Hattstedter Marsch (Nordstrander Bucht) verlor das Tidebecken der Norderhever 33,5 km² an Fläche (Sub-, Inter- und Supratidal). Die zuletzt genannte Maßnahme bewirkte eine Verkleinerung des mit jeder Flut bzw. Ebbe auf Höhe Pellworms durch die Norderhever bewegten Wasservolumens um etwa 30 Mio. m³ (VAN RIESEN und WINSKOWSKY 2007). Durch die Eindeichung der inneren Meldorfer Bucht verkleinerte sich das Tideprisma des Watteinzugsgebietes der Piep um rund 20 Mio. m³ (WITEZ 2002).

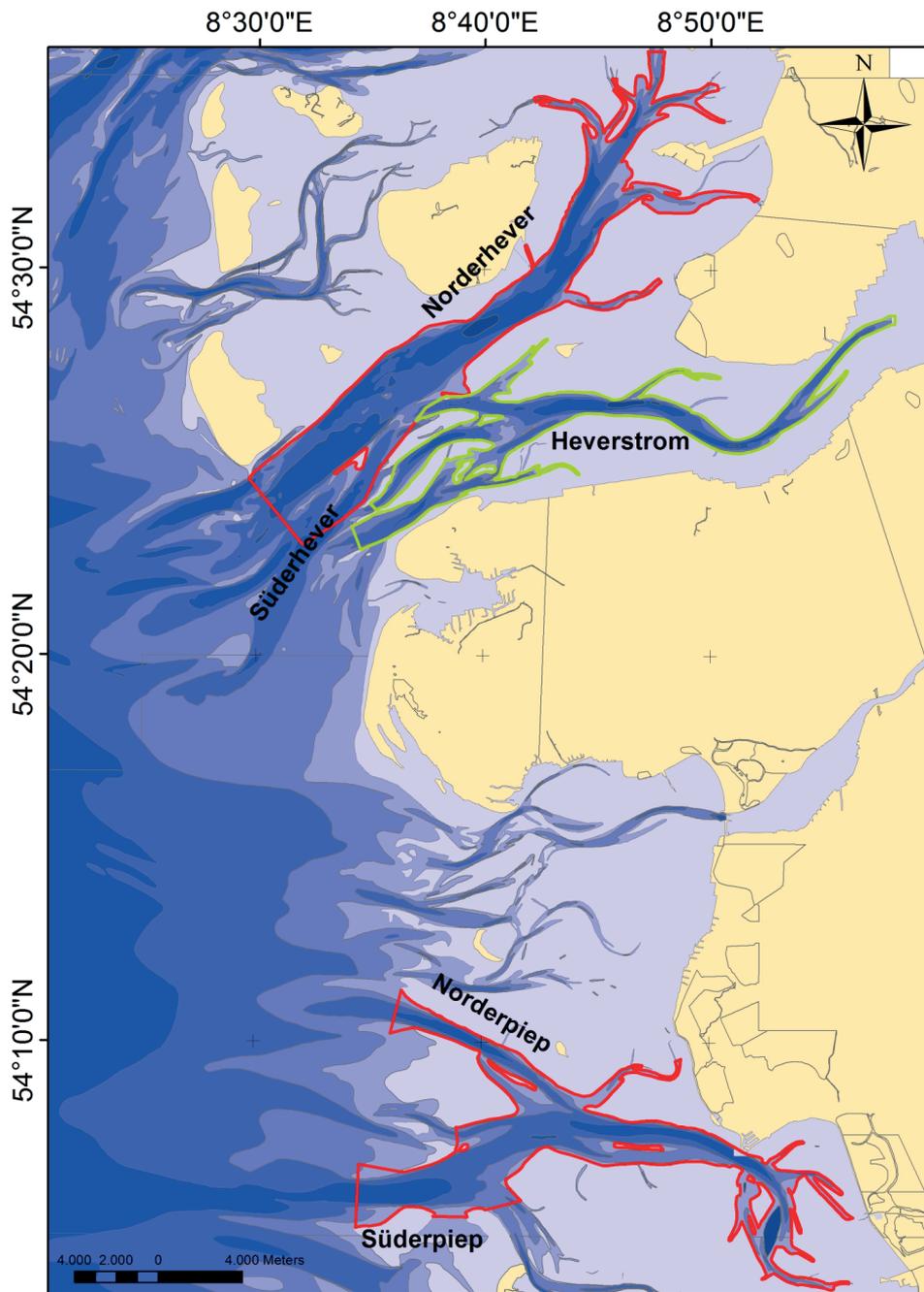


Abbildung 1: Lage der Untersuchungsgebiete. Rot umrandet die 2010-2012 in AufMod bearbeiteten Areale, grün 2013 das für das LKN S.-H. bearbeitete Gebiet.

Die obigen Ausführungen zeigen, dass die betrachteten Wattströme in einer Reihe von Aspekten vergleichbar sind. Deutliche Unterschiede ergeben sich allerdings in Bezug auf die geologische Entwicklungsgeschichte der Gebiete. So liegt im Dithmarscher Wattenmeer die Basis holozäner Sedimente so tief, dass das gesamte morphodynamische Geschehen ausschließlich in diesem durchweg weniger als 6000 Jahre alten Sedimentkörper stattfindet. Dabei gliedert sich die Schichtenfolge im Watt Dithmarschens in zwei übergeordnete, charakteristische Einheiten (DITTMER 1938; HOFFMAN 2004). Die tieferen, älteren Schichten sind aus kohäsiven schluffig-tonigen Sedimenten aufgebaut. Je nach Region findet man sie in Tiefen von etwa 15 bis 20 m unter mittlerem Meeresspiegelniveau. Darüber baut sich ein Komplex aus „modernen“ feinsandigen Watablagerungen mit unterschiedlichen Anteilen an Feinmaterial kleiner 0,063 mm (Schlick/Klei) auf. Im Vergleich zu Dithmarschen ist der geologische Aufbau des südlichen Nordfriesischen Wattenmeers deutlich komplexer. Hier liegt z. B. die Oberfläche der eiszeitlichen Ablagerungen so hoch, dass Teile der Wattstromrinnen darin eingeschnitten sind (AHRENDT 2006 bzw. nach HOFFMANN 2004) und die Norderhever eine bereits in den pleistozänen Ablagerungen vorgezeichnete Rinne zumindest partiell einnimmt. Der holozäne Schichtaufbau mit im Wechsel aufeinander folgenden feinkörnig marinen bis brackischen Sedimenten, Torfen und meist feinsandigen Watablagerungen ist zudem deutlich differenzierter ausgebildet als der der Watten südlich Eiderstedts.

Ziel der vorliegenden Untersuchung ist es, anhand von Vergleichen zwischen älteren Datenbeständen und den Ergebnissen eigener in den Jahren 2010 bis 2013 durchgeführter Sedimentkartierungen zu klären, ob sich in den vergangenen Jahrzehnten Veränderungen der sublitoralen Sedimentverteilung in den Gezeitenrinnen Piep, Norderhever und Heverstrom eingestellt haben.

2 Material und Methoden

Zur Erfassung der rezenten Sedimentverteilungsmuster wurden in der Piep und in den Gebieten von Norderhever und Heverstrom detaillierte und flächendeckende Kartierungen der Meeresbodenoberfläche mit Hilfe von Seitensichtsonaren (side scan sonar) durchgeführt (SCHROTTKE und BARTHOLOMÄ 2015). Diese ursprünglich zur Detektion von Objekten auf dem Meeresboden entwickelten Geräte liefern in erster Linie ein Abbild der Textur und in Teilen Struktur der Meeresbodenoberfläche. Aus der Intensität des zurück gestreuten akustischen Signals, die wiederum hauptsächlich von der Rauigkeit des Seegrundes abhängt, kann jedoch auch auf die Zusammensetzung der vorkommenden Sedimente geschlossen werden. Die diesbezüglich zugrundeliegenden physikalischen Zusammenhänge ebenso wie ausführliche Informationen zur Funktionsweise von Seitensichtsonaren und zum weiteren Umgang mit Sonardaten werden ausführlich in LURTON (2002), WILLE (2005) oder BLONDEL (2009) dargelegt und sollen daher an dieser Stelle nicht weiter ausgeführt werden. Vereinfachend kann aber zusammengefasst werden, dass raue Meeresböden wie z. B. Steinfelder ein ausgesandtes akustische Signal intensiv zurückstreuen, während z. B. von einem glatten, weichen Schlicksediment wenig Schallenergie wieder an den Empfänger des Sonars zurückkommt.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde die Ausbildung des Gewässergrundes entlang von 100 m breiten Profilstreifen mit dem Seitensichtsonar erfasst. Aus der Aneinanderreihung solcher sich zu etwa 10 % überlappender Profile entsteht nach entsprechender

Prozessierung ein flächendeckendes Abbild des Meeresbodens, das als sogenanntes Seitensichtsonar-Mosaik (Rückstreu-Mosaik) die Basis für die weiteren Arbeitsschritte darstellt. Die Analyse und Bewertung der Sonaraufzeichnungen im Hinblick auf eine sedimentologische Differenzierung der oberflächennahen Ablagerungen ist auf der Grundlage von Expertenwissen durchgeführt worden. Hierbei gehen neben der eigentlichen Intensitätsverteilung der Rückstreuensignale eine Vielzahl weiterer Informationen wie geologische Gegebenheiten, Verbreitung von Sohlformen, Vorkommen von Schichtausbissen, Wassertiefe, Ergebnisse zusätzlicher hydroakustischer Messungen, Videoaufnahmen, Fotos der Sedimente etc. in die Interpretation der Mosaik ein. Ebenfalls durchgeführte rechnerische Auswertungen der reflektierten oder rückgestreuten Signale von Einstrahl-echoloten (Qester Tangent Impact Software) oder Seitensichtsonare (Chesapeake Technology SonarWiz Software) erbrachten nur partiell nachvollziehbare und damit verwertbare Ergebnisse. Die eher geringe Aussagekraft rechnerisch generierter Klassifikationsergebnisse dürfte in erster Linie auf die in Gezeitenrinnen hohe Variabilität der Oberflächenrauigkeit (BARTHOLOMÄ et al. 2011) bei gleichzeitig wenig unterschiedlicher Korngrößenzusammensetzung der Sedimente zurückzuführen sein.

Die Verifizierung der mit dem beschriebenen Multimethodenansatz erarbeiteten Sedimentklassifikation sowie eine Zuordnung von Informationen hinsichtlich der Korngrößen der unterschiedenen Klassen basiert auf granulometrischen Kenngrößen gezielt entnommener Sedimentproben. Die Auswahl der Probenlokationen geschieht mit Hilfe der Sonaraufzeichnungen, wobei sowohl große zusammenhängende Einheiten als auch kleinräumige, Besonderheiten aufweisende Bereiche beprobt werden. Insgesamt wurden auf diese Weise in der Piep 278, in der Norderhever 188 und im Heverstrom 75 Proben entnommen. Diese wurden noch an Bord geologisch angesprochen und fotografisch dokumentiert sowie nachfolgend im Labor granulometrisch analysiert (Abtrennung des Anteils < 63 µm, Trockensiebung der Sandfraktion in 1/4 Phi° Stufen).

Auf diese Weise werden Daten generiert, die detaillierte, bis in den Maßstab von z. B. einzelnen größeren Steinen hineinreichende Einblicke in die Textur des Meeresbodens und in die Sedimentbeschaffenheit erlauben. Um mit älteren Daten vergleichbar zu sein, mussten diese hochauflösenden Kartierergebnisse allerdings in einen deutlich kleineren Maßstab überführt werden, was ohne, teilweise etwas grobe Generalisierungen nicht möglich war. Nachfolgend wird die so erstellte flächenhafte Darstellung der Sedimentverteilung als AufMod-Karte bezeichnet.

Als erster und vielleicht wichtigster Vergleichsdatensatz ist das im Maßstab 1:250.000 erstellte Kartenblatt 2900 – Sedimentverteilung in der Deutschen Bucht (Deutsches Hydrographisches Institut, FIGGE 1981) zu nennen. Betrachtet wird allerdings nicht die Erstausgabe aus dem Jahre 1981, sondern die im Rahmen des Verbundprojekts „Geopotenzial Deutsche Nordsee“ (2007-2011) der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), des niedersächsischen Landesamts für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG) und des Bundesamts für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) aktualisierte und für den Bereich der deutschen Nordsee erweiterte Ausgabe. Die Datengrundlage dieses Kartenwerks bilden neben den Daten der Karte von 1981 auch neuere Korngrößeninformationen von Bodengreiferproben sowie abgeleitete Korngrößenverteilungen aus Schichtbeschreibungen von Bohrungen nach dem Ansatz von VOSS (1982), der im Zuge des Verbundprojekts von NAUMANN et al. (2014) weiterentwickelt wurde. Für die betrachteten subtidalen Abschnitte der Piep-Rinnen, der Norderhever und des

Heverstroms basiert das Modell der Sedimentverteilung auf etwa 135, 125 bzw. 100 Probeninformationen. Eine ausführliche Beschreibung zur Erstellung der Karte der „Sedimentverteilung in der deutschen Nordsee“ findet sich in der Dokumentation von LAURER et al. (2013) auf dem Portal „Geopotenzial Deutsche Nordsee“. Nachfolgend wird das Kartenwerk dem Sprachgebrauch folgend als „neue FIGGE-KARTE“ bezeichnet.

Für einen Vergleich der Sedimentverteilung in den Piep-Rinnen werden weiterhin die Ergebnisse von RHODE (1963) und LÜNEBURG (1969) herangezogen. Beide Autoren haben entlang von Transsekten durch Süderpiep und Piep (RHODE, Probenentnahme 1960) bzw. Norderpiep und Piep (LÜNEBURG, Probenentnahme 1966/67) eine Reihe von Backengreiferproben entnommen und diese hinsichtlich der vorkommenden Korngrößen analysiert. Bei RHODE (1963) wird dabei ein Gewässerabschnitt durch die Korngrößeninformationen von entweder einer oder aber durch den Mittelwert von bis zu drei über den entsprechenden Rinnenquerschnitt entnommener Proben beschrieben (insgesamt 31 Proben im betrachteten Raum). Die Angaben von LÜNEBURG (1969) basieren auf den Daten von insgesamt 11 jeweils etwa in der Mitte der Rinne entnommener Proben.

Für die betrachteten sublitoralen Abschnitte der Norderhever und des Heverstroms kann schließlich vergleichend auf das Kartenwerk von DECHEND (1950) zurückgegriffen werden. Seine flächenhafte Darstellung der Sedimentverteilung beruht in der Norderhever auf etwa 30 und im Heverstrom auf etwa 35 Probeninformationen. Die Entnahme der Proben sowie die labortechnische Analyse erfolgten um das Jahr 1938.

Um einen Vergleich von Sedimentverteilungsmustern der verschiedenen Kartierungen zu ermöglichen, wurden die eigenen Kartiererergebnisse sowie die von DECHEND (1950) entsprechend des Klassifikationsschemas von FIGGE (1981), wie es in der „neuen FIGGE-Karte“ benutzt wird, dargestellt. Bei diesem Klassifikationsansatz wird die Sandfraktion entsprechend der prozentualen Anteile an Feinsand (63-250 μm), Mittelsand (250-500 μm) und Grobsand (500-2000 μm) in einer Dreiecksdarstellung vier Sandklassen zugeordnet (Abb. 2). Zusätzlich wird die Fraktion < 63 μm (Silt und Ton) in fünf „Schlickklassen“ unterteilt. Kiese und Steine werden wegen der geringen Verbreitung des zur Verfügung stehenden Abbildungsmaßstabes nicht gesondert ausgewiesen.

Da sich bei DECHEND (1950) die damals genutzten Fraktionsgrenzen und -bezeichnungen von den heute in den sedimentologischen Wissenschaften üblichen unterscheiden, ist die Einteilung von DECHEND (1950) der von FIGGE (1981) angenähert worden (Tab. 1). Dadurch ergeben sich zwangsläufig einige Unschärfen. Diese sind aber nach unserer Auffassung in Anbetracht des Maßstabes der Kartendarstellung und unter Berücksichtigung des relativ groben Rasters der bei DECHEND (1950) zugrunde liegenden Korngrößeninformationen vertretbar. Generell bedingt die Tatsache, dass allen betrachteten Sedimentkartierungen eine sehr unterschiedliche Datendichte zu Grunde liegt, dass ein Vergleich der Kartiererergebnisse generell nur auf der Basis des „kleinsten gemeinsamen Nenners“, also in einem eher groben Maßstab, erfolgen kann.

Obwohl mit dem in AufMod entwickelten Funktionalen Bodenmodell (MILBRADT et al. 2015) ein sehr leistungsfähiges Werkzeug für raumzeitliche Vergleiche zur Verfügung steht, wurde für den hier beschriebenen Vergleich von Sedimentverteilungsmustern ein rein kognitiver Ansatz gewählt. Wegen der bereits durch unterschiedliche Maßstäbe bedingten Unschärfen und ausgehend von der Annahme, dass ältere Sedimentverteilungs-

karten ebenfalls rein manuell entwickelt wurden, halten wir diesen Ansatz auch in heutiger Zeit noch für angemessen und zielführend.

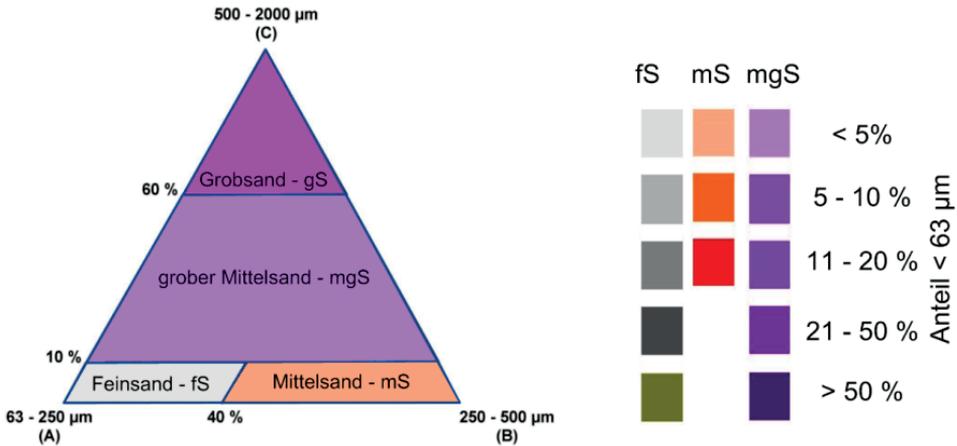


Abbildung 2: Einteilung der Sedimente nach FIGGE (1981). Die Farbeinteilung weicht ebenso vom Original wie von in den Geowissenschaften gebräuchlichen Farbgebungen ab. Sie wurde gewählt, um im Maßstab der gezeigten Verteilungskarten einen möglichst hohen Kontrast zu erreichen.

Tabelle 1: Zuordnung der Sedimentklassen nach DECHEND (1950) zu den Klassen gemäß FIGGE (1981). Bei den mittelgrau unterlegten Feldern handelt es sich um Korngrößenintervalle in mm. Die hellgrauen Felder sind Prozentangaben der jeweiligen Kornfraktion.

Sedimentklasse nach DECHEND	< 0,02	0,02 – 0,05	0,05 – 0,1	0,1 – 0,2	0,2 – 0,25	0,25 – 0,5	0,5 – 1,0	1,0 – 2,0	Sedimentklasse nach FIGGE (1981)
Schluff	> 40	10 – 30							U/T > 80%
Mehlsand, schluffig	< 40	> 30	< 40						fS, > 50 % U/T
Mehlsand	< 20	< 20	> 40	< 20					fS, 21 – 50 % U/T
fS, mehlsandig			> 10	50–80	< 10				fS, 11 – 20 % U/T
fS, mehlsandig			< 10	> 80	10–20				fS, 5 – 10 % U/T
fS, gröber				< 50	> 20	< 10			fS, < 5 % U/T
mS, feinsandig				< 30	> 45	> 10			fS, < 5 % U/T
mS					< 30	> 40	~ 10		mS, < 5 % U/T
mS, gröber						< 30	> 40	< 10	mgS, < 5 % U/T
U/T - Schluff & Ton, fS – Feinsand, mS – Mittelsand, mgS – Mittel- bis Grobsand									

3 Ergebnisse

3.1 Piep-Rinnen

Die im Rahmen des AufMod Projektes erstellten Aufnahmen mit dem Seitensichtsonar zeigen im Bereich der Piep-Rinnen recht gleichförmige Signaturen ohne auffällige Meeresbodeneigenschaften. Die Rückstreustärken sind meistens gering, was auf eine Verbreitung von Feinsanden oder schluffigen Feinsanden hinweist. Unterbrochen werden diese

gleichförmigen Flächen nur durch Bereiche, in denen sich in älteren, konsolidierten Ablagerungen (Klei) Kanten und andere Erosionsformen herausgebildet haben, an Orten, an denen Schill, also leere Molluskenschalen, in größeren Mengen akkumuliert worden sind oder durch Abschnitte, an denen der Meeresboden durch ausgeprägtere Sohltransportkörper strukturiert ist. Die Analyse der Sonaraufnahmen sowie Probandaten zeigt, dass sich rezent die sublitoralen Oberflächensedimente überwiegend aus Feinsanden mit unterschiedlichen Schlickgehalten (Anteil $< 63 \mu\text{m}$) zusammensetzen (Abb. 3). Die Gesamtheit der entnommenen Sedimentproben deckt dabei ein Spektrum mittlerer Korngrößen (D_{50}) ab, das von 330 bis etwa $16 \mu\text{m}$ reicht. Dabei ist die reine Sandfraktion bei 88 % der analysierten Proben den Mittelwertklassen sehr feiner Sand (D_{50} 63-125 μm , 4-3 Phi) bzw. Feinsand (D_{50} 125-250 μm , 3-2 Phi) zuzuordnen. Da das benutzte Klassifikationsschema nach FIGGE (1981) diese weitergehende Differenzierung der Feinsandfraktion nicht enthält (siehe auch VALERIUS et al. 2015), soll an dieser Stelle erwähnt werden, dass sehr feine Sande mit mittleren Korngrößen zwischen 63-125 μm bevorzugt in der eigentlichen Piep-Rinne sowie in den landwärtigeren Rinnen in der Meldorfer Bucht zu finden sind. Die sandigen Areale in Norder- und Süderpiep werden dagegen aus Feinsanden mit mittleren Korngrößen zwischen 125 und 250 μm aufgebaut. Noch grobkörnigere Sande kommen im Arbeitsgebiet so gut wie nicht vor. Insgesamt enthielten nur drei Proben (zwei im seewärtigen Bereich der Süderpiep, eine am Hang des Tertiussandes) Sande, die bezogen auf ihre mittlere Korngröße als feine Mittelsande anzusprechen sind. Allerdings sind die Fundareale so klein, dass sie im zur Verfügung stehenden Abbildungsmaßstab nicht sinnvoll dargestellt werden können.

Stellt sich die Sandfraktion als durch Feinsande dominiert und als relativ gleichförmig in den Piep-Rinnen verteilt dar, so zeigt die Feinfraktion $< 63 \mu\text{m}$ ein differenzierteres räumliches Verteilungsmuster. Zwar werden wiederum weite Abschnitte des Gewässergrundes aus Feinsanden mit Feinkornanteilen von bis zu 20 % aufgebaut, die Verbreitungsgebiete dieser typischen Ablagerungen werden aber immer wieder durch Areale unterbrochen, in denen der Anteil an Feinmaterial in den Oberflächensedimenten merklich über 20 % bis hin zu 80 % beträgt. Obwohl wiederum eine gewisse Tendenz zur Abnahme der mittleren Korngröße, in diesem Fall gleichbedeutend mit einer Zunahme der schluffig-tonigen Komponenten, in Richtung der buchtinneren Teile des Rinnensystems festzustellen ist, sind jedoch auch in den seewärtigsten Abschnitten Sedimente verbreitet, die einen sehr hohen Feinanteil aufweisen. Hierbei handelt es sich meist um ältere kohäsiv verfestigte Ablagerungen, die entweder direkt anstehen oder aus denen, wenn sie erosiven Prozessen ausgesetzt sind, Feinmaterial in benachbarte Ablagerungsräume eingetragen wird.

Auch in der Sedimentverteilungskarte des BSH („neue FIGGE-Karte“, Abb. 4) zeichnen sich derartige Flächen ab. Die sie umrandenden Polygone sind aber deutlich weniger differenziert ausgebildet, was darauf zurückzuführen sein dürfte, dass die Grenzlinien basierend auf einer limitierten Anzahl von Punktinformationen konstruiert worden sind. Legt man jedoch einen eher groben Vergleichsmaßstab an, so stellt sich die Lage der Flächen mit hohem Feingehalten in beiden Karten oft als recht ähnlich dar. Insgesamt weist allerdings die „neue FIGGE-Karte“ in fast allen anderen Gebieten Ablagerungen mit im Vergleich zur AufMod-Karte geringeren Schlickanteilen aus. So sind reine Feinsande in der „neuen FIGGE-Karte“ weit verbreitet, während in der AufMod-Karte die Feinsande meist 5 bis 20 % Feinanteil aufweisen. Auffälligstes Unterscheidungsmerkmal

beider Karten dürfte aber die in der „neuen FIGGE-Karte“ ausgewiesenen Vorkommen von Mittelsand sein. Diese Areale traten in den Jahren 2010/11 nicht mehr in Erscheinung. Zwar liegen zwei der insgesamt nur drei im Zuge der AufMod Untersuchungen als Mittelsand eingestuft Sedimentproben im Bereich des in der „neuen FIGGE-Karte“ in der Süderpiep ausgewiesenen Mittelsandvorkommens, die Einbindung der Probeninformation in die flächendeckende Sonarabbildung der Meeresbodenoberfläche schloss aber bei der Analyse der AufMod Daten die Ausweisung einer größeren, zusammenhängenden Mittelsandfläche aus.

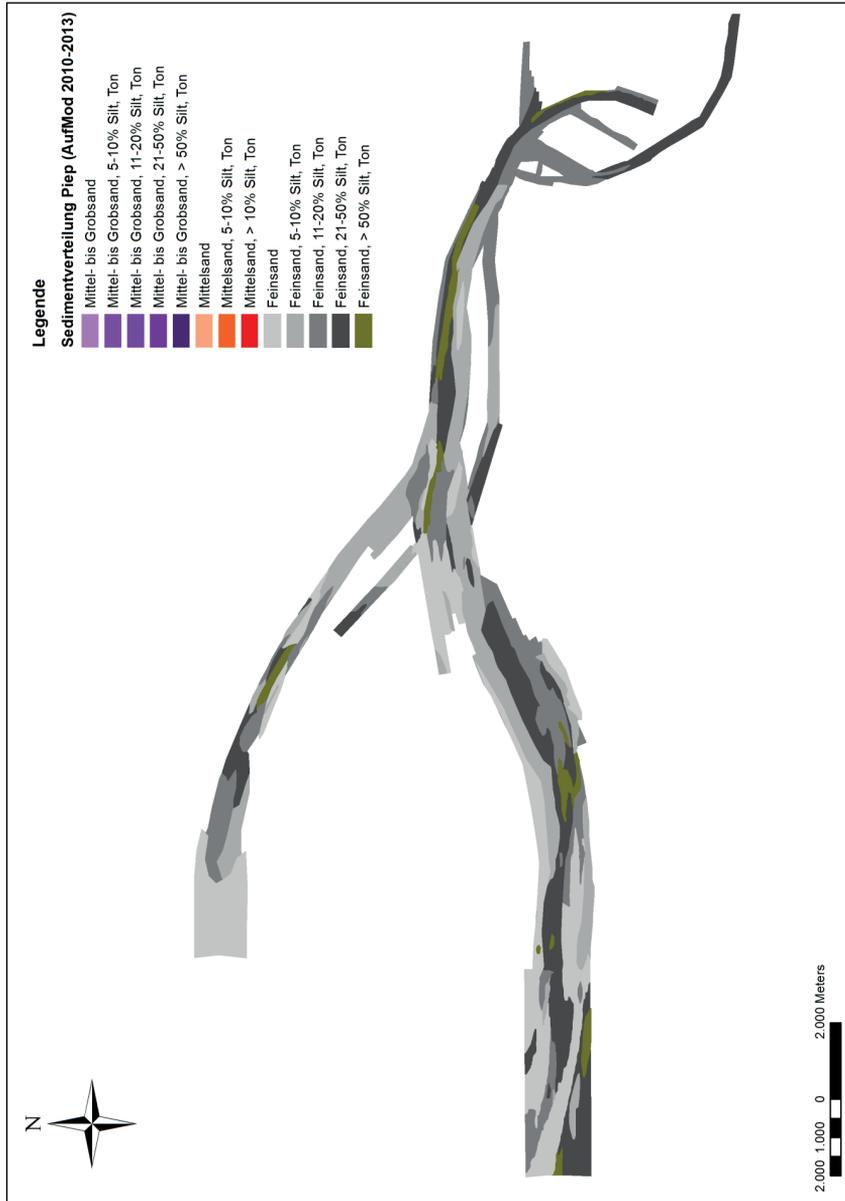


Abbildung 3: Karte der Sedimentverteilung in den Piep-Rinnen nach AufMod Daten (2010-2012).

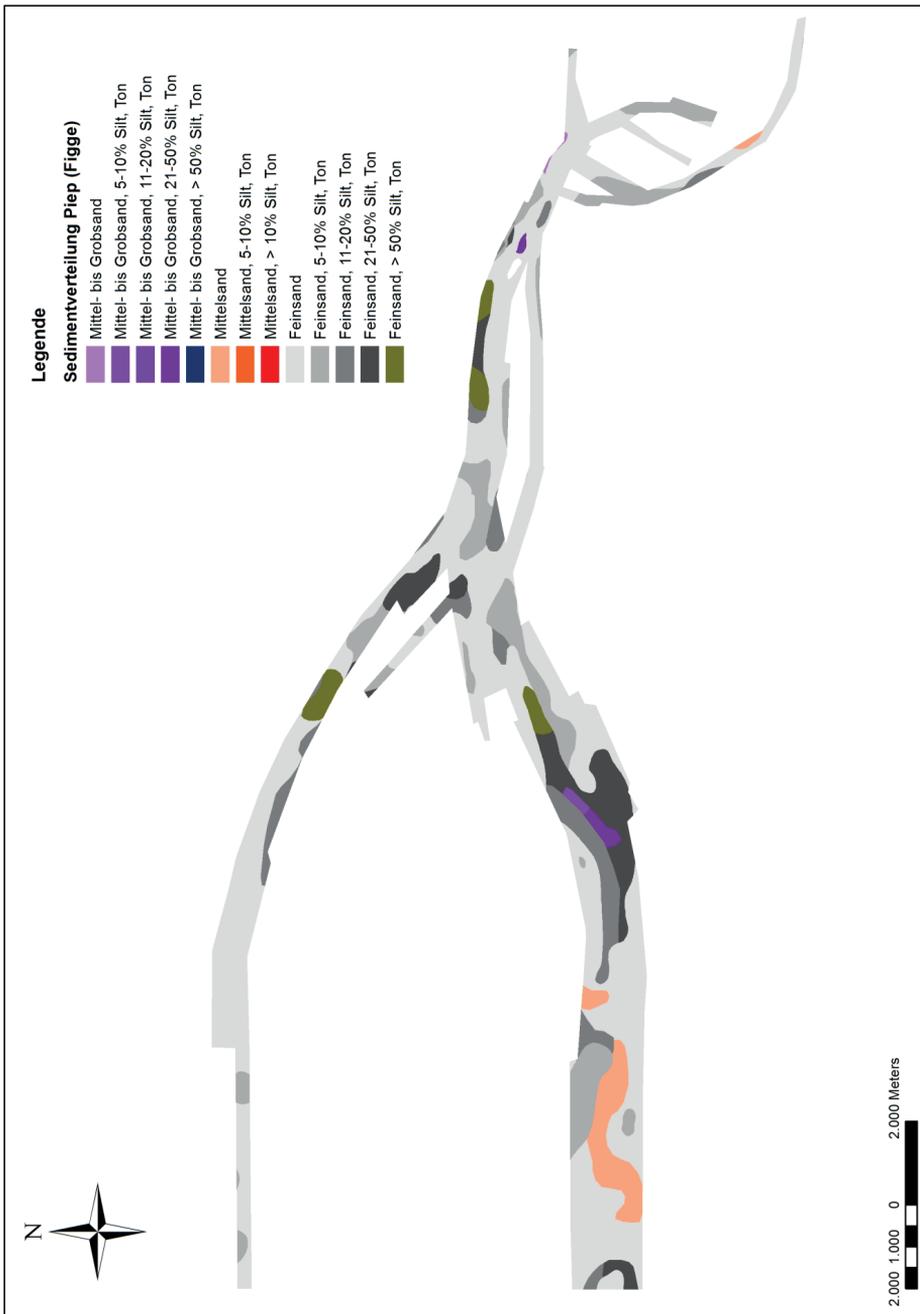


Abbildung 4: Karte der Sedimentverteilung in den Piep-Rinnen nach FIGGE (1981) bzw. der Kartenversion 2 nach LAURER et al. (2013).

Dass in diesem Abschnitt der Süderpiep Mittelsande vorkamen oder bei u. U. etwas anderen Umgebungsbedingungen vorkommen können, wird durch die Ergebnisse von RHODE (1963) allerdings bestätigt, kommt doch auf dem von ihm untersuchten Transsekt durch Süderpiep und Piep (Abb. 5) in der Süderpiep an ähnlicher Lokation Mittelsand vor. Alle übrigen Probenstationen sind dagegen wiederum durch Feinsande geprägt. Der durch Norderpiep und Piep führende Transsekt von LÜNEBURG (1969) zeigt ebenfalls eine Dominanz von Feinsanden. Nur am westlichsten Punkt des untersuchten Gewässerlängsschnittes ist das Rinnensediment deutlich feinkörniger. LÜNEBURG (1969) beschreibt das Probenmaterial als stark bindig-konsolidiert und stuft es als ältere Kleiablagerung ein. Der Ort der Probenentnahme liegt nahe an den auch in der AufMod bzw. in der „neuen FIGGE-Karte“ ausgewiesenen Vorkommen von sehr feinkörnigen, konsolidierten Sedimenten. Eine weitere Besonderheit auf dem Transsekt von LÜNEBURG (1969) stellt der vergleichsweise hohe Mittelsandanteil in der 1,5 km westlich von der Büsumer Hafeneinfahrt (km 0) entnommenen Probe dar. Es wird dazu von LÜNEBURG (1969) ausgeführt, dass zur Zeit der Beprobung an dieser Stelle die Rinne eine Tiefe von mehr als 30 m aufwies. In diesem als Kolk bezeichneten Bereich wurden nach LÜNEBURGS (1969) mineralogischen Befunden pleistozäne Schmelzwassersande erodiert. Einzelne Körner dieser Sande ließen sich damals zudem einige Kilometer landwärts und seewärts des Erosionsgebietes in den jüngeren Rinnenablagerungen nachweisen.

Wie schon beim Vergleich zwischen AufMod und „neuer FIGGE-Karte“ zeigen auch die Ergebnisse von RHODE (1963) und LÜNEBURG (1969) merkbare Unterschiede bei den Feingehalten < 63 µm. Liegen bei RHODE die Schlickanteile durchweg bei nur wenigen Prozent, so wird von LÜNEBURG (1969) in vergleichbaren Gewässerabschnitten der Feinanteil mit 5 bis 10 % angegeben. Diese Differenz liegt damit in etwa im Bereich der Abweichungen zwischen der AufMod und der „neuen FIGGE-Karte“.

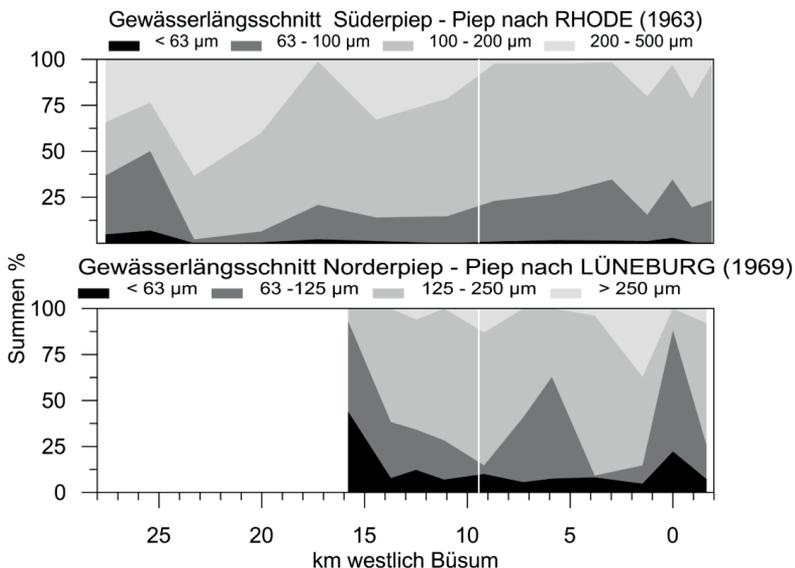


Abbildung 5: Sedimentzusammensetzung entlang von Gewässerlängsschnitten durch Süderpiep – Piep nach RHODE (1963) bzw. Norderpiep – Piep nach LÜNEBURG (1969). Kilometer 0 Hafeneinfahrt Büsum, weiße Linie km 9,5 Region der Aufspaltung von Norder- und Süderpiep.

3.2 Hever-Rinnen

Im Vergleich zur Sedimentverteilung in den Piep-Rinnen stellen sich die Verteilungsmuster in den Hever-Rinnen (Abb. 6-8) als räumlich deutlich differenzierter und als weitere Korngrößenbereiche umfassend dar. Das Spektrum der mittleren Korngrößen reicht im Hever Gebiet von Grobsanden (Abb. 2) bis hin zu besonders feinkörnigen Ablagerungen mit mehr als 50 % Anteil an Schluff und Ton. Betrachtet man die räumliche Verteilung dieser verschiedenen Sedimente, so ergibt sich, bedingt durch die Kartiermethodik, in der AufMod-Karte das differenzierteste Bild. Der südwestliche Abschnitt (I in Abb. 6-8) der Norderhever wird dabei durch sich in Längsrichtung der Rinne verzahnende Felder von reinen Mittelsanden oder Gemischen aus Grob- und Mittelsanden charakterisiert. Mit zunehmender Annäherung an die inneren Abschnitte des Watteinzugsgebietes treten in den in Abb. 6 als Abschnitt II und III bezeichneten Bereichen der Norderhever keine Grobsande mehr auf. Stattdessen verzahnen sich hier wiederum langgestreckte Mittelsand- und Feinsandflächen. Außerdem kommen Sedimente vor, die einen hohen Feinanteil > 63 µm aufweisen. Hierbei handelt es sich fast ausschließlich um ältere, verfestigte Ablagerungen (Klei und u. U. Eemton), die im Gewässer Härtlingsstrukturen ausbilden, deren flächenhafte Ausdehnung gut mit dem Seitensichtsonar zu erfassen ist. Derartige Areale, wie sie auch in Abschnitt I vorkommen, stellen eine Quelle für feinkörnige Sedimente dar. Diese gelangen zwar meist nicht als einzelne, feine Partikel zur neuerlichen Ablagerung, sondern werden als Kleibrocken bzw. „Schlickgerölle“ in benachbarte, zum Teil deutlich gröbere Ablagerungen eingetragen. Da die Feinmaterialklasten bei der Korngrößenanalyse vollständig dispergiert werden, entstehen im Zuge der Laboraufbereitung artifizielle Korngemische (z. B. grobkörnige Sande mit 50 % „Schlickanteil“), die so in der Natur nicht vorliegen (SCHROTTKE und BARTHOLOMÄ 2015).

Dies gilt jedoch nicht für die deutlich mit Feinmaterial durchsetzten Feinsande, die den inneren Teil (Abschnitt VI in Abb. 6) des Heverstroms charakterisieren. Hierbei handelt es sich um primäre Korngemische, also solche, bei denen die Ablagerung von feinen Partikeln und gröberen Sandkörnern annähernd zeitgleich bzw. in feinsten aufeinander folgenden Lagen erfolgt ist. Es handelt sich somit um typische „Schlicksande“ eines tidalen Ablagerungsraumes im Sinne von FIGGE et al. (1980). Diese Sande nehmen weite Teile des buchtinneren Teils der Rinne ein. In besonders tiefen und/oder strömungsexponierten Abschnitten (z. B. ausgeprägter Prallhang) stehen jedoch wiederum Mittelsande bzw. mit Feinmaterialklasten durchsetzte Mittelsande an. Vergleichbare Mittelsande bzw. nahezu feinmaterialfreie, gröbere Feinsande prägen als Anzeiger eines insgesamt höheren Energieniveaus auch das Sedimentverteilungsmuster des westlichen Heverstroms und seiner Teilrinnen am Übergang zur Norder- bzw. Süderhever.

Wie schon die AufMod-Karte zeigt auch die „neue FIGGE-Karte“ (Abb. 7), dass Abschnitt I der Norderhever-Rinne ebenfalls weitflächig von Mittelsanden und Mittel- bis Grobsanden eingenommen wird. Zudem ist eine Zonierung mit bevorzugt gröberen Sanden im südlichen Bereich und in Richtung auf das Nordufer abnehmender mittlerer Korngrößen der Sande zu erkennen. Die AufMod-Karte zeigt diese Zonierung dagegen nicht. Vielmehr ist eine in Längsrichtung erfolgende Verzahnung von Mittelsand und Mittel- bis Grobsandflächen zu erkennen und das Feinsandvorkommen, das die „neue FIGGE-Karte“ am Nordufer des Abschnitts I der Norderhever ausweist, fehlt gänzlich. Dieses setzt erst in Abschnitt II ein. In der „neuen FIGGE-Karte“ werden hier sowohl

das nördliche als auch das südliche Rinnenufer durch Feinsande beschrieben. Feinsande und Feinsande mit erhöhten Feinanteilen kommen zudem umrahmt von Mittelsanden im zentralen Bereich von Abschnitt II vor. Die Übergangsbereiche zum seewärtigen Abschnitt I und zum landwärtigen Abschnitt III werden darüber hinaus durch Mittel- bis Grobsandvorkommen geprägt.

War das Sedimentinventar in den Gewässerabschnitten I und II in beiden Kartenwerken trotz gewisser Unterschiede der Verteilungsmuster noch recht vergleichbar, so trifft dies für den innersten Bereich der Norderhever nicht zu. Die „neue FIGGE-Karte“ weist hier durchweg Mittel- bis Grobsande aus, während die AufMod-Karte in weiter Verbreitung Feinsande zeigt, die ein aus reinen Mittelsanden aufgebautes Gebiet umschließen.

Ein ähnlicher Unterschied in den in beiden Kartenwerken ausgewiesenen Sedimentzusammensetzungen zeigt sich auch bei der Betrachtung des innersten Bereichs des östlichen Heverstroms (Abschnitt VI). Auch hier weist die „neue FIGGE-Karte“ durchweg Mittel- bis Grobsande aus, während in der AufMod-Karte solche Ablagerungen nur in der Mitte und am südlichen Prallhang der Rinne zu finden sind. Im Bereich des Prallhangs zeigt die ältere Kartierung großflächig besonders feinkörnige Sedimente. Hierbei handelte es sich vermutlich um ältere konsolidierte Ablagerungen, konnten solche doch auch im Zuge der neuen Sonarkartierung, allerdings in deutlich kleinerer Verbreitung, detektiert werden. Weiter nach Westen bis hin zur Aufspaltung des Heverstroms in die drei großen Teilrinnen am Übergang zu Norder- bzw. Süderhever sieht das Verteilungsmuster in beiden Kartenwerken ähnlich aus, wobei die Sedimentzusammensetzung in der neueren Karte allerdings als durchweg feinkörniger angegeben wird.

Eine Beschreibung vorhandener bzw. möglicher zeitlicher Unterschiede der Zusammensetzung der Oberflächensedimente in den drei Mündungsrinnen des Heverstroms fällt ausgesprochen schwer, kommen doch gerade in diesem Bereich die deutlich unterschiedlichen Maßstäbe der räumlichen Auflösung beider Kartenwerke zum Tragen. Legt man einen groben Betrachtungsmaßstab an, so lässt sich sagen, dass in beiden Karten an vielen Stellen vergleichbare Sedimente ausgewiesen werden. Ausdehnung und exakte Lage der Felder können allerdings doch merklich voneinander abweichen. Einzig für den Bereich der südlichsten Rinne scheint sich abzuzeichnen, dass rezent hier verbreitet gröbere Sedimente zu finden sind, als es zur Zeit der Entnahme der Proben, die die Basis für die „neue FIGGE-Karte“ bilden, der Fall war.

In der Karte von DECHEND (1950) stellt sich diese südliche Teilrinne im Mündungsgebiet des Heverstroms als insgesamt noch feinkörniger dar. Es kommen nur Feinsande, nicht aber Mittelsande bzw. Mittel- bis Grobsande vor. Auch die weiter buchtinneren Bereiche des Heverstroms (Abschnitt V und VI) stellt die Karte nach DECHEND (1950), ebenso wie die AufMod-Karte, als eher durch Feinsande denn durch Mittelsande charakterisiert dar. Allerdings sind beim AufMod Verteilungsmodell in exponierten Bereichen schmale, langgestreckte Mittelsandfelder in die Feinsande eingeschaltet, die in der Karte nach DECHEND (1950) fehlen. Ob diese zur damaligen Zeit wirklich nicht existiert haben, lässt sich schwer abschätzen, war doch die Anzahl der Ende der 1930er Jahre von DECHEND (1950) entnommenen Proben eher gering, wodurch zwangsläufig der räumliche Differenzierungsgrad seiner Karte vergleichsweise grob bleiben muss. Eine weitere Unschärfe ergibt sich zudem aus der für einen Vergleich notwendigen Überführung der von DECHEND (1950) gewählten Sedimentklassen in die von FIGGE (1981) vorgeschlagenen. Gleichwohl erklären diese Faktoren nicht den Unterschied im innersten Abschnitt

der Rinne, der sowohl in der AufMod-Karte als auch in der von DECHEND (1950) als durch Feinsande dominiert dargestellt wird, während er in der „neuen FIGGE-Karte“ als durch Mittelsande bestimmt angegeben wird. Eine ähnliche Abweichung zwischen den Kartenwerken ergibt sich ebenfalls für den inneren Bereich der Norderhever (Abschnitt III). Sowohl in der AufMod als auch in der Karte von DECHEND (1950) wird der Seegrund beginnend etwa bei der Einmündung der Holmer Fähre Rinne in Richtung Nordosten in einen von Feinsand dominierten Bereich, ein sich anschließendes Feld von Mittelsanden und im innersten Abschnitt erneut durch weit verbreitete Feinsande gegliedert. Die „neue FIGGE-Karte“ ordnet dem gleichen Abschnitt (III) dagegen überwiegend Mittel- bis Grobsande zu.

Zu erwähnen ist schließlich, dass die seewärtigen Abschnitte I und II der Norderhever in der Darstellung von DECHEND (1950) nur durch sehr wenige Probenlokationen abgedeckt sind (Abb. 8). Trotz der dadurch eher groben räumlichen Auflösung weist das erstellte Sedimentverteilungsmuster viele Ähnlichkeiten mit den später entwickelten auf. So kommen die größten Sedimente wiederum eher am Südufer des Abschnitts I vor, während das Nordufer feinkörniger aufgebaut ist. Der Mittelabschnitt II zeigt wiederum ein Nebeneinander von Fein- und Mittelsanden und wenig größeren Ablagerungen.

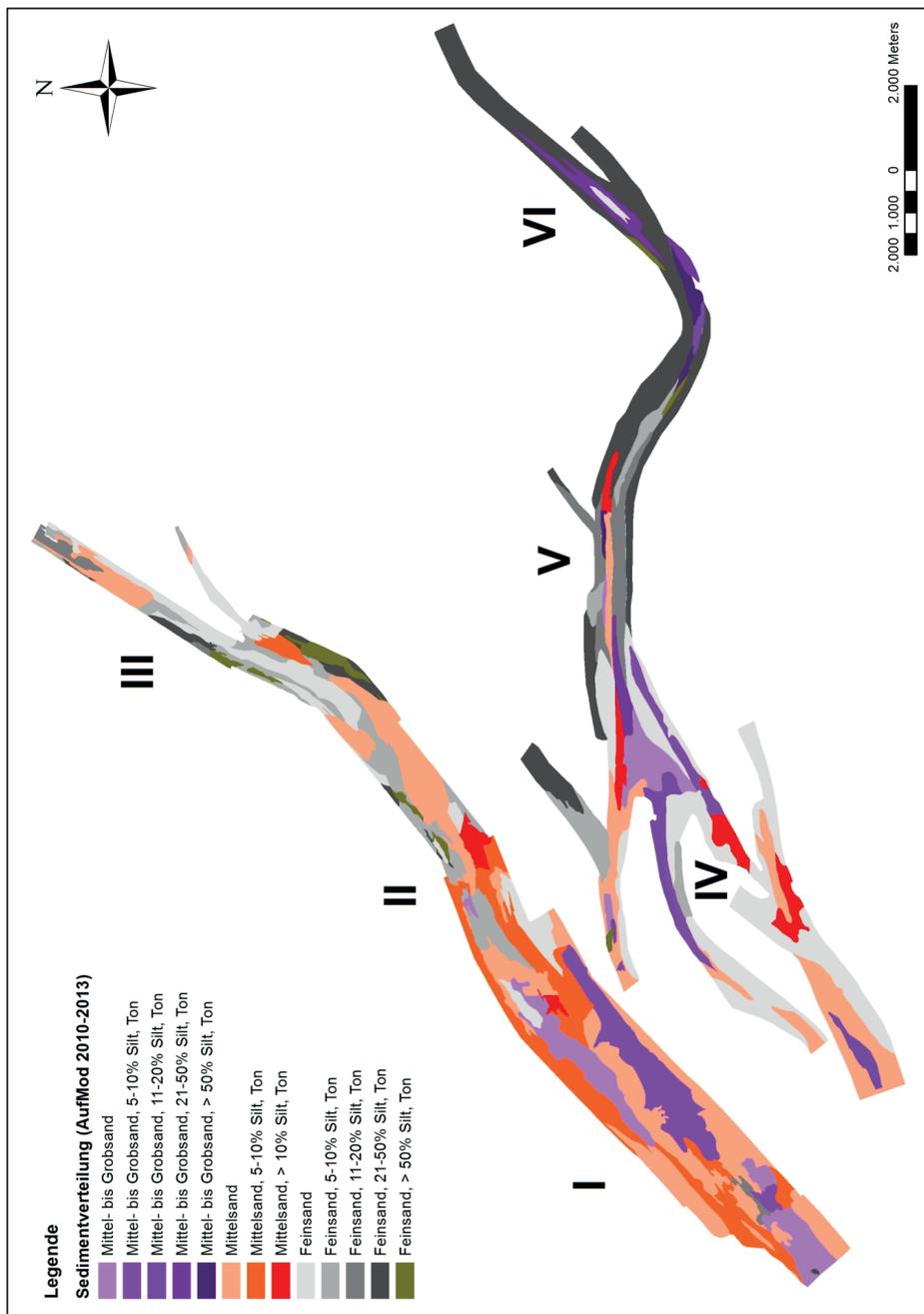


Abbildung 6: Karte der Sedimentverteilung in den Haver-Rinnen nach AufMod Daten (2010-2013). Die römischen Zahlen I bis VI markieren diskutierte Abschnitte der Gewässer.

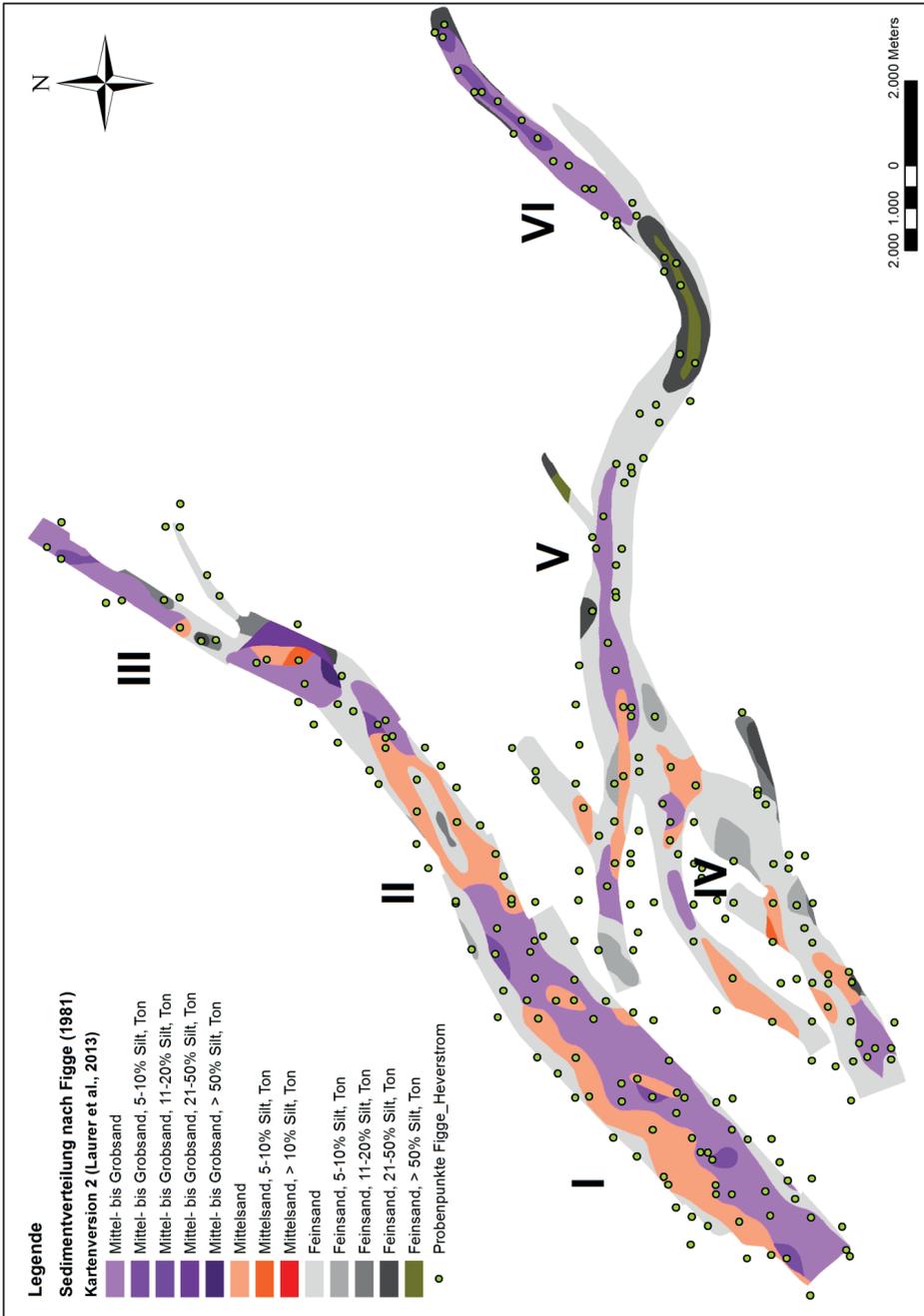


Abbildung 7: Karte der Sedimentverteilung in den Hever-Rinnen nach FIGGE (1981) bzw. der Kartenversion 2 nach LAURER et al. (2013). Die grünen Punkte markieren die Lokationen der Proben, auf denen das Verteilungsmuster basiert.

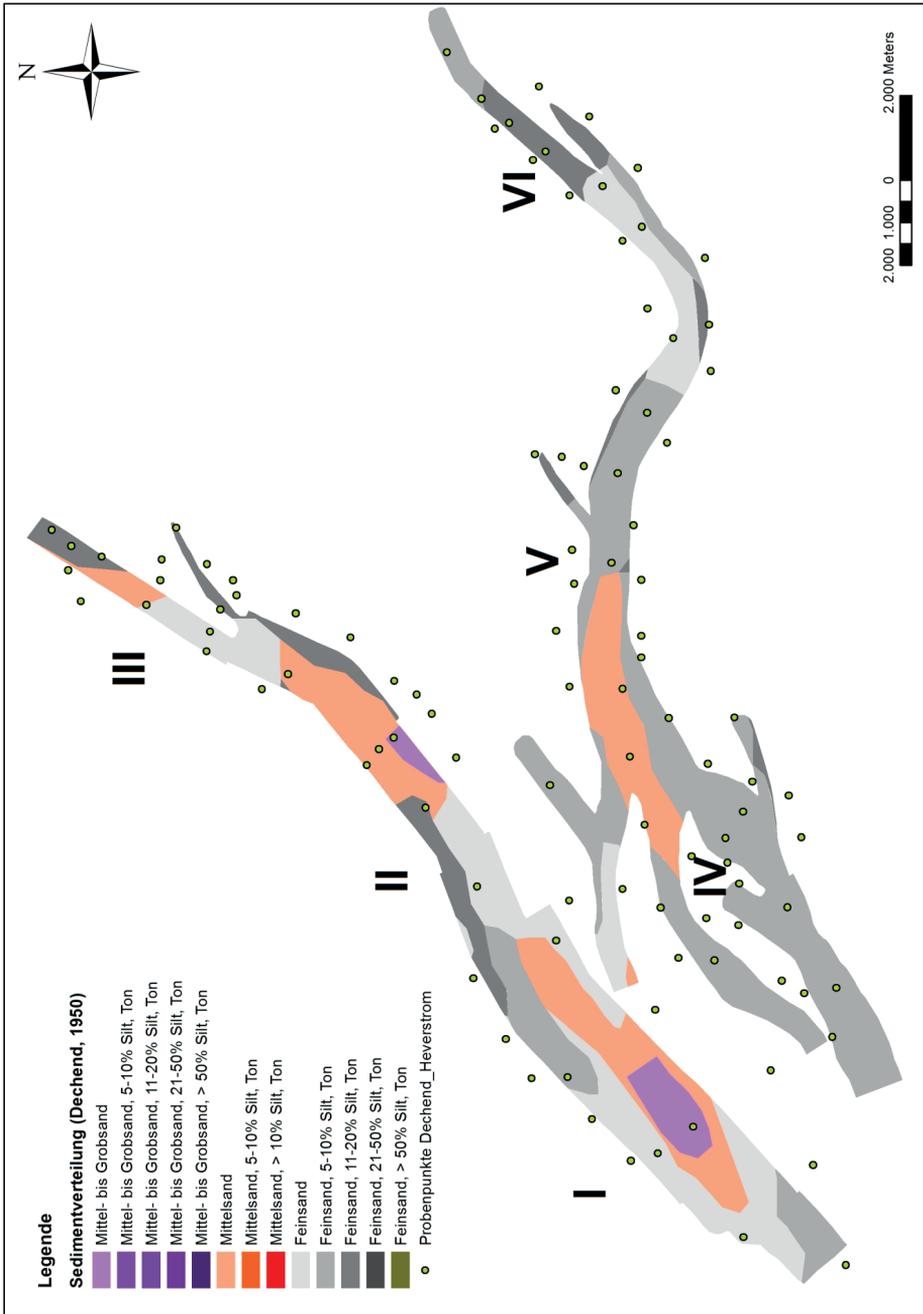


Abbildung 8: Karte der Sedimentverteilung in den Hever-Rinnen nach DECHEND (1950). Die grünen Punkte markieren die Lokationen der um 1938 entnommenen Proben, auf denen das Verteilungsmuster basiert.

4 Diskussion

Die Darstellung der Ergebnisse hat gezeigt, dass ein Vergleich der sublitoralen Sedimentverteilungsmuster in den Gezeitenrinnen Piep und Hever sowie in der im Rahmen des AufMod Projekts (2010-2012) erstellten Karte, dem Kartenwerk von FIGGE (1981) in der Neubearbeitung von LAURER et al. (2013), der Karte von DECHEND (1950) bzw. in den sedimentologischen Transsekten von RHODE (1963) sowie LÜNEBURG (1969) dargestellt sind, möglich ist. Ein Vergleich, mit dem Ziel raumzeitliche Unterschiede herauszuarbeiten und zu bewerten, wird jedoch entscheidend dadurch erschwert, dass allen betrachteten Verteilungsmodellen unterschiedlichste Datendichten bzw. Kartiermaßstäbe zu Grunde liegen. So basiert die AufMod-Karte auf der sehr detailreichen Ausweisung von Grenzlinien zwischen verschiedenen Ablagerungsräumen mit Hilfe von Sonaraufzeichnungen sowie auf 541 Probeninformationen. In den betrachteten Bereichen wurde die „neue FIGGE-Karte“ dagegen allein aus dem Informationsgehalt von etwa 360 Proben heraus entwickelt. Die Basis für das Verteilungsmodell von DECHEND (1950) bilden nur etwa 65 Proben, die im Sublitoral der Hever-Rinnen entnommen wurden. Auf noch weniger Probeninformationen, nämlich lediglich 31 bzw. 11, beruhen schließlich die sedimentologischen Transsekte, wie sie von RHODE (1963) für Süderpiep und Piep und von LÜNEBURG (1969) für Norderpiep und Piep entwickelt wurden. Diese Auflistung verdeutlicht, dass Vergleiche der zu verschiedenen Zeiten entwickelten Sedimentverteilungsmuster nur in einem relativ groben, generalisierenden Maßstab erfolgen können. Gleichwohl ergibt sich aber das sehr eindeutige Bild, dass das Sedimentinventar in den Piep-Rinnen im Dithmarscher Wattenmeer zumindest in den letzten fünf Jahrzehnten bis heute ganz überwiegend durch Feinsande mit variierenden Anteilen an Schluff und Ton geprägt gewesen ist.

Unterschiedliche Schlickgehalte (Gehalte an Schluff und Ton) unterscheiden auch die Sedimentverteilungsmuster der „neuen FIGGE-Karte“ und der AufMod-Karte. Werden in der „neuen FIGGE-Karte“ weitflächig fast reine Feinsande ausgewiesen, so kommen in der AufMod-Karte in vergleichbaren Gebieten Feinsande vor, deren Schlickanteil um etwa 10 % höher liegt. So offensichtlich sich dieser Unterschied auch in den Kartenabbildungen darstellt, so schwer fällt jedoch eine zweifelsfreie Erklärung. Tatsache ist, dass die meisten Proben, die der „neuen FIGGE-Karte“ zu Grunde liegen, zu Zeiten entnommen wurden, als die innere Meldorfer Bucht noch nicht oder gerade erst eingedeicht war. Entsprechend größer waren damals das Tideprisma des Beckens und das Volumen der durch die Piep-Rinnen strömenden Wassermassen. Bekannt ist ebenfalls, dass es durch die Verkleinerung des Tidevolumens in der Meldorfer Bucht zu morphologischen Anpassungsreaktionen in Form einer Volumenabnahme subtidaler Bereiche gekommen ist (WITEZ 2002; RICKLEFS and ASP NETO 2005). Eine derartige Volumenabnahme von Prielen geht gerade in inneren Wattbereichen meist mit der Ablagerung von eher feinkörnigen Sedimenten einher.

Zur Frage ob und ggf. in welchem Ausmaß eine in den inneren Buchtbereichen feststellbare „Verschlickung“ von Prielen auch in weiter seewärts gelegenen Bereichen der großen Wattinnen zu einer Veränderung der Sedimentzusammensetzung führt oder führen kann, liegen allerdings keine Erkenntnisse vor. Für einen Trend zur Kornverfeinerung in den Oberflächensedimenten könnte sprechen, dass im Zuge der 2010-2012 durchgeführten AufMod Untersuchungen so gut wie keine Mittelsande in den Piep-Rinnen

detektiert wurden, während in der älteren Karte nach FIGGE (1981) größere Mittelsandflächen ausgewiesen werden. Vergleicht man in diesem Zusammenhang weiterhin die Befunde von RHODE (1963) und LÜNEBURG (1969) miteinander, so zeigt sich, dass für vergleichbare Abschnitte der Piep-Rinne ebenfalls ein genereller Unterschied in den Feingehalten ermittelt wurde. Während RHODE (1963) nur sehr niedrige Prozentwerte angibt, liegen die Feingehalte bei LÜNEBURG (1969) durchweg um 6-8 % höher. Diese in der zentralen Piep durchgängig feststellbare Differenz aus den 1960er Jahren, die von der Größenordnung her vergleichbar mit den typischen Unterschieden zwischen AufMod und „neuer FIGGE-Karte“ ist, steht somit im Widerspruch zu der weiter oben angedeuteten Hypothese, dass die in den 1970er Jahren erfolgte Eindeichung der Meldorfer Bucht nachfolgend zu einer verstärkten Ablagerung von Schluff und Ton in den Piep-Rinnen geführt hat. Da wegen der einfachen Vorgehensweise bei der Bestimmung des Anteils $< 63 \mu\text{m}$ methodisch bedingte Unterschiede eigentlich ausgeschlossen werden können und diesbezügliche Recherchen auch keine entsprechenden Hinweise erkennen ließen, wurden eigene ergänzende Wiederholungsbeprobungen mit dem Ziel durchgeführt, die zeitliche Variabilität des Schlickanteils an ausgesuchten Lokationen zu bewerten. Dazu wurden an insgesamt 27 Positionen, die erstmalig in den Sommermonaten der Jahre 2010 bzw. 2011 beprobt wurden, im Juni 2012 erneut Proben entnommen. Zwar konnten wegen der starken Gezeitenströmungen nur in Ausnahmefällen die exakt gleichen Lokationen beprobt werden, alle für die Analyse entnommenen Proben liegen aber weniger als 30 m vom Ort der Vergleichsprobe entfernt und stets im Bereich einer vergleichbaren Sonarsignatur. Die nachfolgende Tabelle 2 fasst die Ergebnisse der Gegenüberstellung in einfacher Weise zusammen. Es ist zu erkennen, dass beim Vergleich der Proben aus den Jahren 2010 und 2012 keine Unterschiede hinsichtlich der Schlickgehalte zu erkennen sind. Das Verhältnis von 10 : 2 beim Vergleich von 2011 zu 2012 mag etwas aussagekräftiger erscheinen, die Stichprobenanzahl ist aber deutlich zu gering, um daraus den Schluss abzuleiten, dass Sedimente 2011 schlickiger ausgebildet waren als 2012. Es bleibt also nur festzustellen, dass im Verlauf der verschiedenen Untersuchungen großräumig unterschiedliche Feingehalte festgestellt wurden, diese Unterschiede aber bislang nicht erklärbar sind.

Tabelle 2: Übersicht über die Anzahl an Proben, deren Feinanteil $< 63 \mu\text{m}$ (Schlick) bei einer Wiederholungsbeprobung am annähernd gleichen Ort höher oder niedriger lag.

Jahre der Beprobung	2010	2012
Anzahl der Proben mit mehr Schlick	9	6
Jahre der Beprobung	2011	2012
Anzahl der Proben mit mehr Schlick	10	2

Deutlich abgesicherter sind hingegen die Ergebnisse hinsichtlich der Verbreitung älterer, besonders feinkörniger und bereits konsolidierter Sedimente (Klei) in den Piep-Rinnen. Die bodenmechanischen Eigenschaften dieser Sedimente werden zwar in den Kartenwerken nicht extra ausgewiesen, die typischen Kornverteilungen der Ablagerungen mit Feingehalten von oft mehr als 50 % erlauben aber den Schluss, dass sich ihr Verbreitungsgebiet in den zentralen Rinnen von Norder- und Süderpiep sowie an den nördlichen Rinnenränder der Piep in den letzten Jahrzehnten nicht signifikant verändert hat. Erkennbare Unterschiede dürften sich einerseits durch unterschiedliche Kartiermaßstäbe

ergeben. Andererseits ist aber auch die Tatsache von Bedeutung, dass Ausbisse von Klei nicht selten von geringmächtigen Sandschichten überwandert werden, die den Klei für mehr oder minder lange Zeit vollständig überdecken können. Sind die Sandschleier nachfolgend durchgewandert, stehen die konsolidierten bindigen Ablagerungen erneut direkt an der Gewässersohle an. Dieses Durchwandern von Sandschleiern führt dazu, dass am selben Ort mal Sand und bei anderer Gelegenheit Klei gefunden werden kann. Die morphologische Ausprägung des Fundareals wird dabei aber im Wesentlichen durch den anstehenden Klei bestimmt. Diese Lagestabilität der Kleivorkommen ergibt sich aus der vergleichsweise hohen Erosionsstabilität der kohäsiven Ablagerungen. Die Widerstandskraft gegen den Angriff des fließenden Wassers manifestiert sich in den Sonaraufnahmen an gut erkennbaren Plateaus, Kanten und ähnlich aufragenden „Härtlingsstrukturen“. Dort, wo Klei jedoch erodiert wird, stellt er wiederum eine Quelle für feine Materialien dar. Dabei wird das Sediment jedoch nur untergeordnet in Form von singulären feinen Partikeln verfrachtet. Das Material wird vielmehr durch die erosiven Prozesse in größeren Einheiten aus dem Schichtverband herausgearbeitet und durch Strömungen und dem Gefälle der Rinnenränder folgend auch gravitativ als Klei- oder Schlickgerölle in die tieferen Bereiche der Rinnen eingetragen. Dort können die Gerölle zusammen mit Schillen und anderen detritischen Materialien oder auch Torfgeröllen Sohlenpflaster (REINECK 1984) ausbilden, die sedimentologisch als „Restsedimente“ (lag deposits), also als grobe Reste von Ablagerungen angesprochen werden, aus denen erosiv leichter transportierbare Komponenten ausgewaschen wurden. Nicht untypisch für diese Restsedimente ist, dass die oft plattigen Kleigerölle sowie leeren Muschelklappen dachziegelartig übereinander gelagert sein können und auf diese Weise eine spezielle und unter Umständen vor weiterer Tiefenerosion schützende Grenzschicht zwischen dem fließenden Wasser und dem anstehenden Sediment ausbilden können. Sedimentologisch werden solche Ablagerungen auch aus diesem Grunde als Anzeiger einer Erosionsbasis angesehen (REINECK 1984; FLEMMING 2012). TERWINDT (1975) ordnet derartige Restsedimente einem „Lithofaziestyp I – strong currents“ zu. Die Strömungsgeschwindigkeiten betragen hier typischerweise mehr als 90 cm/s und neben Schill und den verschiedenen Geröllen sind Mittel- bis Grobsande charakteristisch.

Auch in den Hever-Rinnen stellen sich Gebiete mit anstehenden kohäsiv-konsolidierten Ablagerungen, die in den Verteilungskarten durch besonders feinkörnige Sedimente gekennzeichnet sind, als ebenfalls recht lagestabil dar (z. B. die Bereiche des großen Rinnenbogens im Heverstrom oder der Prallhang der Norderhever am Übergang zur Nebenrinne Holmer Fähre). Darüber hinaus sind wir der Auffassung, dass sich ebenfalls das übergeordnete Sedimentverteilungsmuster von den 1930er Jahren bis heute nicht signifikant verändert hat. Zwar sehen die Sedimentverteilungsmuster der verschiedenen Untersuchungsperioden in erster Näherung sehr unterschiedlich aus, viele der Differenzen werden aber, wie bereits verschiedentlich dargelegt, als Folge der deutlich unterschiedlichen Kartiermaßstäbe interpretiert. Für eine Stabilität des Systems der Hever-Rinnen sprechen zudem die morphologischen Befunde von VAN RIESEN und WINSKOWSKY (2007), die zeigen, dass sich seit 1936 in vielen Bereichen der Hever-Rinnen das Rinnenvolumen bzw. die mittlere Tiefe unterhalb des mittleren Tideniedrigwassers kaum verändert haben. Eine Ausnahme bildet ein Bereich östlich von Pellworm, der sich räumlich ungefähr mit Abschnitt II in den Abb. 6-8 deckt. Hier sind besonders im Zeitraum von 1936 bis 1960 bzw. 1960 bis 1990 deutliche Materialverluste aufgetre-

ten. Diese sich hierin abzeichnende Tendenz zur Ausräumung der Rinne hat sich zwischen 1990 und 2000, also nach der Eindeichung des Beltringharder Kooges, abgeschwächt bzw. leicht ins Gegenteil verkehrt. VAN RIESEN und WINSKOWSKY (2007) zeigen weiterhin, dass in anderen Abschnitten der Norderhever durch laterale Verlagerungen der Rinne deutlich nachweisbare Veränderungen der Querschnittsgeometrie auftreten können, ohne dass sich das Volumen der entsprechenden Rinnenbereiche dadurch dauerhaft verändert. Ohne Zweifel können solche Änderungen nur durch die Verlagerung von Sedimenten erfolgen. Es scheint sich dabei aber meist nur um eine interne Umlagerung innerhalb eines räumlich begrenzten Bereiches zu handeln. So sind Areale, die in den 1930er Jahren durch Grob-, Mittel- oder Feinsande geprägt waren, es im Wesentlichen auch heute noch. Somit ließe sich die Hypothese formulieren, dass in den Hever-Rinnen, bei gröbermaßstäblicher Betrachtung, das Verteilungsmuster der Ablagerungen eine ähnliche zeitliche Stabilität aufweist wie die der morphologischen Kenngrößen „mittleres Rinnenvolumen“ und/oder „mittlere Rinnentiefe“. In einem gewissen Widerspruch dazu steht allerdings, dass die inneren Abschnitte sowohl der Norderhever als auch des Heverstroms in der „neuen FIGGE-Karte“ deutlich grobkörniger dargestellt werden als in den beiden anderen Kartenwerken. Dies könnte als Hinweis darauf angesehen werden, dass es zwischen der ältesten und der jüngsten Untersuchung eine Phase gegeben haben könnte, in der die Sedimente in den inneren Abschnitten der Rinnen grobkörniger ausgebildet waren. Dagegen spricht aber wiederum, dass in der Erstaussführung der Karte von 1981 (FIGGE 1981) die angesprochenen Bereiche durch ähnlich feinkörnige Ablagerungen wie in der Karte von DECHEND (1950) oder in der AufMod-Karte beschrieben werden. In der Dokumentation (LAURER et al. 2013) zur überarbeiteten Karte nach FIGGE (1981) („neue FIGGE-Karte“) findet sich zudem folgender Erläuterungstext: *„In den Gezeitenrinnen zwischen Sylt und dem Jadebusen wurden, aus Gründen der hohen Sedimentdynamik, die Probenpositionen der vorherrschenden gröberen Sedimente großflächig auskartiert. Feinkörnigere Sedimente wurden an ihren jeweiligen Probenpositionen ebenfalls berücksichtigt, allerdings nur als relativ kleine Polygone. Eine Ausnahme bildet hier die Piep westlich von Büsum...“*. Da jedoch die „neue FIGGE-Karte“ zu nicht unwesentlichen Teilen auf den Daten der Erstaussgabe (FIGGE 1981) basiert, sind die beschriebenen Unterschiede in den Sedimentverteilungsmustern nach unserer Einschätzung somit eher auf die vorstehend zitierte methodische Vorgehensweise (LAURER et al. 2013), denn auf tatsächlich unterschiedliche Sedimentzusammensetzungen zurückzuführen. Folgt man dieser Einschätzung bzw. zieht für einen Vergleich die Erstaussgabe der Karte nach FIGGE (1981) heran, so werden die im Abstand von Dekaden erstellten Sedimentverteilungsmuster deutlich ähnlicher, was für die Hypothese der Stabilität der generellen Sedimentverteilung sprechen würde.

Insgesamt gelangen wir somit zu der Auffassung, dass sich die generelle Sedimentverteilung in den Piep-Rinnen des Dithmarscher Wattenmeers und den Hever-Rinnen im Nordfriesischen Wattenmeer in den vergangenen Dekaden nicht maßgeblich verändert hat. Zwar sind in den vergleichend betrachteten Kartenwerken Unterschiede auszumachen, diese sind aber entweder auf methodische Unterschiede (z. B. Kartiermaßstab, Datendichte) oder auf eher kleinräumige Sedimentverschiebungen innerhalb von im Wesentlichen stabilen Sedimentprovinzen zurückzuführen.

5 Schlussbetrachtung

Im Rahmen des AufMod Projektes sind die in der „neuen FIGGE-Karte“ zusammengefassten Daten in vielfältiger Weise als Eingangsgrößen in numerische Modelle eingegangen. Die Betrachtungsgebiete umfassten zum Teil auch die Einzugsgebiete der untersuchten Gezeitenrinnen. Da hier einerseits, wie oben ausgeführt, die Sedimentverteilung als recht stabil angesehen werden kann und andererseits die Modelle mit relativ großen Gitterweiten betrieben wurden, gehen wir davon aus, dass die Sedimentinformationen in hinreichender Güte in die Modelle eingegangen sind. Bei höher aufgelösten Modellen sollte aber besser auf die neueren, räumlich deutlich detaillierteren AufMod-Karten zurückgegriffen werden, da bei diesen Karten Grenzen zwischen einzelnen Sedimenttypen sehr viel präziser auskartiert worden sind als in den älteren Kartenwerken. Die AufMod-Karten sind in der MDI-DE oder auch auf dem Geo Sea Portal zu finden.

6 Schriftenverzeichnis

- AHRENDT, K.: Ein Beitrag zur holozänen Entwicklung Nordfrieslands. *Die Küste*, 71, 1-32, 2006.
- BARTHOLOMÄ, A.; HOLLER, P.; SCHROTTKE, K. and KUBICKI, A.: Acoustic habitat mapping in the German Wadden Sea – Comparison of hydro-acoustic devices. *Journal of Coastal Research*, 64, 2011.
- BLONDEL, P.: *Handbook of Sidescan Sonar*. Berlin: Springer, 2009.
- DECHEND, W.: Sedimentpetrologische Untersuchungen zur Frage der Sedimentumlagerungen im Watt Nordfrieslands. *Deutsche Hydrographische Zeitschrift*, Bd. 3, H. 5/6. 1950.
- DITTMER, E.: Schichtenaufbau und Entwicklungsgeschichte des Dithmarscher Alluviums, Westküste, 1, 1938.
- FIGGE, K.: Begleitheft zur Karte der Sedimentkartierung in der Deutschen Bucht 1:250 000 Nr. 2900. Hamburg, BSH, 1981.
- FIGGE, K.; KÖSTER, R.; THIEL, H. und WIELAND, P.: Schlickuntersuchungen im Wattenmeer der Deutschen Bucht, *Die Küste*, 35, 187-204, 1980.
- FLEMMING, B. W.: Siliciclastic Back-Barrier Tidal Flats. In: DAVIS, R. A. und DALRYMPLE, R. W. (eds.): *Principles of Tidal Sedimentology*. Springer Science+Business Media B. V., 2012.
- HERRLING, G. and WINTER, C.: Morphological and sedimentological response of a mixed-energy barrier island tidal inlet to storm and fair-weather conditions, *Earth Surf. Dynam. Discuss.*, 1, 2013.
- HIGELKE, B.: Topographie, Morphodynamik und Hydrographie der südlichen nordfriesischen Watten. In: MÜLLER-WILLE et al. (Hrsg.): *Offa-Bücher*, Bd. 66: Landschaftsentwicklung und Siedlungsgeschichte im Einzugsgebiet der Norderhever (Nordfriesland), (Wachholtz) Neumünster, 1988.
- HOFFMANN, D.: Holocene landscape development in the marshes of the west coast of Schleswig-Holstein, Germany. *Quaternary International*, 112, 2004.
- HOFSTEDTE, J.: Regional differences in the morphological behavior of four German wadden sea barriers. *Journal of Quaternary International*, 56, 1999.

- LAURER, W.-U.; NAUMAN, M. und ZEILER, M.: Sedimentverteilung in der deutschen Nordsee nach der Klassifikation von Figge (1981), <http://www.gpdn.de>, 2013.
- LÜNEBURG, H.: Sedimenthabitus und Sedimentdynamik in den Pieprinnen vor Büsum und im Hörnum-Tief vor Sylt (Deutsche Bucht). Inst. Meeresforsch. Bremerhaven, 11, 1969.
- LURTON, X.: An introduction to underwater acoustics. Berlin, Heidelberg, New York, Springer, 2002.
- MILBRADT, P.; VALERIUS, J. und ZEILER, M.: Das Funktionale Bodenmodell: Aufbereitung einer konsistenten Datenbasis für die Morphologie und Sedimentologie, Die Küste, 83, 2015.
- NAUMANN, M.; WALDECK, A.; POBIN, W.; SCHWARZ, C. und FRITZ, J.: Ableitung von Korngrößenverteilungen aus textbasierten petrographischen Bohrgutbeschreibungen. Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften (German J. Geosci.) 165, 2, 275-286, 2014.
- OOST, A. P.; DE HAAS, H.; IJNSEN, F.; VAN DEN BOOGERT, J. M. and DE BOER, P. L.: The 18.6 yr nodal cycle and its impact on tidal sedimentation. Sedimentary Geology, 87, 1993.
- REINECK, H. E.: Aktuo-Geologie klastischer Sedimente. Seckenberg-Buch, 61, 1984.
- RHODE, H.: Die Kornzusammensetzung der Wattsande zwischen Elbe und Eider. Die Wassertwirtschaft, 1, 1963.
- RICKLEFS, K. and ASP NETO, N. E.: Geology and Morphodynamics of a Tidal Flat Area along the German North Sea Coast, Die Küste, 69, 2005.
- RICKLEFS, K.; LEHNER, S. and RAUSCH, J.: Morphological Changes in a Tidal Flat Area: A Comparison of Radar, Optical and In-Situ Data, Die Küste, 69, 2005.
- RUNTE, K.-H. : Sedimenttransport unter Sturmflutbedingungen in einem Watrückensystem des Blauortsands. Meyniana, 46, 1994.
- SCHROTTKE, K. und BARTHOLOMÄ, A: Schließen von Datenlücken und Verbesserung der Messmethoden, Die Küste, 83, 2015.
- TAUBERT, A.: Morphodynamik und Morphogenese des Nordfriesischen Wattenmeeres (Deutsche Bucht, Nordsee). Durch Untersuchungsstrategie zu neuen Sachaussagen. Hamburger Geogr. Studien, 42, 1986.
- TERWINDT, J. H. J.: Sequences of inshore subtidal deposits. In: GINSBURG, R. N. (ed.): Tidal deposits. Springer, 1975.
- VALERIUS, J.; KÖSTERS, F. und ZEILER M.: Erfassung von Sedimentverteilungsmustern zur großräumigen Analyse der Sedimentdynamik auf dem Schelf der Deutschen Bucht, Die Küste, 83, 2015.
- VAN RIESEN, D. und WINSKOWSKY, L.: Untersuchungen zu den morphologischen Veränderungen im südlichen NF-Wattenmeer im Zeitraum 1035-2003, Bericht aus dem Amt für ländliche Räume Husum (unveröffentlicht), 2007.
- VOSS, H.-H.: Unterlagen über Material und Methoden zur Vereinheitlichung der Korngrößenansprache bei der geologischen und bodenkundlichen Landesaufnahme. Archivbericht Nr. 010930 des ehem. NLFb (heute LBEG), Hannover, (unveröffentlicht), 1982.
- WIELAND, P.: Untersuchungen zur geomorphologischen Entwicklungstendenz des Außensandes Blauort, Die Küste, 23, 122-149, 1972.

- WIELAND, P.: Untersuchungen über geomorphologische Veränderungen in der Dithmarscher Bucht, *Die Küste*, 40, 1984.
- WILLE, P. C.: *Sound images of the ocean in research and monitoring*. Springer, 2005.
- WITEZ, P: Programme zur langfristigen Erhaltung des Wattenmeeres. PROWATT. Abschlussbericht zum KFKI Forschungsvorhaben MTK 0608 (03KIS3160), 2002.
- ZEILER, M.; SCHWARZER, K. and RICKLEFS, K.: Seabed morphology and sediment dynamics, *Die Küste*, 74, 31-44, 2008.

Schließen von Datenlücken und Verbesserung der Messmethoden

Kerstin Schrottke und Alexander Bartholomä

Zusammenfassung

In AufMod galt es, mess- wie modellbasierte Daten zur morphologischen und sedimentologischen Ausprägung und Dynamik der Deutschen Bucht möglichst vollständig zusammenzutragen. Darauf basierend sollte der Kenntnisstand zur langfristigen morphodynamischen Gebietsentwicklung erweitert, sowie daraus ableitbare Ergebnisse und zugehörige Produkte (z. B. dokumentierte Datensätze, Karten) in ein für alle offenes Datenportal überführt werden. Hierzu wurden vorhandene Datensätze durch neue, einheitliche und über Raum und Zeit hoch aufgelöste Messungen ergänzt. In welchem Maße alte und neue Daten auch durch Anpassung und Optimierungen der Aufnahme- und Datenauswertestrategien und -verfahren vergleichbar sind, wird hier aufgezeigt. Anhand von Beispielen zur Charakteristik der Sohl-sedimente (räumlich-zeitliche Verteilung, Zusammensetzung, Porosität) soll verdeutlicht werden, inwieweit gebietsspezifische Erkenntnisse auf den Gesamtbereich Deutsche Bucht übertragbar sind.

Schlagwörter

Hydroakustik, Vermessung, Seitensichtsonar, Korngrößenanalysen, Schlickgerölle, Porosität

Summary

The task in AufMod was to collect, as complete as possible, field- and model-based data on morphological and sedimentological characteristics and dynamics of the German Bight. This was to serve a further extension of the state of knowledge on the long-term morphodynamic development of the area. The results and associated products (e.g. documented records, maps) were to be transferred into a freely accessible open-source data platform. For this purpose, existing data sets were complemented by newly acquired, standardized, and spatially and temporally highly resolved measurements. It is outlined to what extent the old and new data from different sources are comparable and can be optimized and adapted by assimilation and evaluation strategies and techniques. It is also demonstrated by selected examples to what degree area-specific seabed characteristics (spatial-temporal distribution, composition, porosity) can be generalized for the whole German Bight.

Keywords

hydroacoustics, survey, sidescan sonar, grain-size analyses, mud pebbles, porosity

Inhalt

1	Einleitung.....	104
2	Messverfahren und ihre Vergleichbarkeit.....	105
3	Fokusgebiete.....	109
4	Beispiele der Vergleichbarkeit bzw. Übertragbarkeit spezifischer Erkenntnisse..	110
5	Schriftenverzeichnis.....	115

1 Einleitung

Voraussetzung für die Erfassung der Morpho- und Sedimentdynamik in der Deutschen Bucht ist eine entsprechend umfangreiche Datenbasis, die morphologische und sedimentologische Messdaten flächendeckend und in hoher zeitlicher wie räumlicher Auflösung beinhaltet. In Hinblick auf die Größe des Untersuchungsraumes stellt die Generierung einer solchen Datenbasis eine große Herausforderung dar, die in dem Verbundprogramm AufMod angenommen und mit der Entwicklung des sogenannten „Funktionalen Bodenmodells“ umgesetzt wurde (MILBRADT et al. 2015). Hierzu wurden alle verfügbaren Datensätze unterschiedlicher Bezugsquellen aus dem Untersuchungsraum zusammengetragen, neue Daten generiert und ein Werkzeug geschaffen, mit dem eine möglichst lückenlose Datenvergleichbarkeit über Raum und Zeit möglich ist. Eine Prüfung und Visualisierung der Datengüte war hierfür elementar, wissend das Auflösung, Genauigkeit und Vertrauenswürdigkeit von Daten je nach Alter und Herkunft großen Schwankungen unterliegen können. Bestes Beispiel hierfür ist die in den letzten Jahrzehnten deutlich gesteigerte Qualität der Georeferenzierung und Höhenbestimmung von Messpositionen im Seebereich mit einer entscheidenden Verbesserung im Jahr 2000. Die bis dahin künstlich aufgesetzte Signalverschlechterung des bereits eingesetzten amerikanischen satellitengestützten globalen Positionsordnungssystems (GPS) wurde abgeschaltet. Damit reduzierte sich die Positionsungenauigkeit vom drei- auf den einstelligen Meterbereich. Funknavigation wurde somit weitestgehend abgelöst, die sogenannte Decca-Navigation in 2000 abgeschaltet. Mit modernen GPS-Mehrfrequenzsystemen wie dem Differential-GPS (DGPS) mit Echtzeit-Kinematik (RTK) und Langstrecken-Kinematik (LRK) können heute laterale und vertikale Genauigkeiten im Zentimeterbereich erreicht werden.

Für eine größtmögliche Vergleichbarkeit von Messdaten galt es im Vorfeld der Datenerhebungen Kriterien und Standards festzulegen, nach denen neue Messdaten mit möglichst einheitlicher Methodik und Aufnahmestrategie erhoben werden konnten, um eine größtmögliche Datenvergleichbarkeit zu gewährleisten. Dabei galt es auch, gebietsspezifische morphologische wie geologisch-sedimentologische Gegebenheiten in den einzelnen Bereichen der Deutschen Bucht zu berücksichtigen. So wurde ein sogenannter „Multi-Methodenansatz“ verwendet, mit dem Messungen möglich waren, die unterschiedliche räumliche wie zeitliche Skalen abdeckten. Gleichzeitig wurde versucht, die genutzten Messverfahren zu optimieren bzw. Methoden zu entwickeln, mit denen sich Kennwerte wie beispielsweise die Porosität der Sedimente oder die Formrauheit von Bodenformen, abbilden lassen (WINTER et al. 2015).

Die Auswertung der aus diesen Messreihen entwickelten Datenbasis erlaubt die Ableitung von sowohl großräumigen und langfristig stattfindenden Veränderungen als auch

kleinräumigen und kurzweiligen Phänomenen und Ereignissen in Modell-Szenarien. Dabei wurde vorausgesetzt, dass die Gewässersohle der Deutschen Bucht, insbesondere im Küstennahbereich ein dynamisches und zugleich komplexes System darstellt, welches in enger Wechselwirkung mit der sie gestaltenden Hydrodynamik steht. So wurden nicht nur Informationen zu morphologischen Änderungen über Raum und Zeit, sondern auch jene zum geologischen Aufbau, zur Zusammensetzung sowie zu den damit verbundenen physikalischen Eigenschaften des Bodens gesammelt und ausgewertet.

Schließlich sei erwähnt, dass in den Fällen, in denen sich Datenlücken nicht allein durch das Verschneiden alter und neuer Messdaten schließen ließen, auf die im Verbundprojekt AufMod generierten, modellbasierten Ergebnisse zurückgegriffen wurde (MILBRADT et al. 2015).

2 Messverfahren und ihre Vergleichbarkeit

Im Folgenden sollen die Messverfahren näher beleuchtet werden, die im Rahmen von AufMod schwerpunktmäßig eingesetzt wurden, um neue Messdaten zu generieren. Darüber hinaus wird eine vergleichende Gegenüberstellung auch zu jenen Messverfahren gegeben, auf denen ältere Datensätze basieren. Auf die detaillierte Abhandlung all jener Messverfahren, die nur in einzelnen Teilprojekten zum Einsatz kamen, um gebietsspezifische Bedingungen besser erfassen zu können, wird nicht weiter eingegangen (HEYER und SCHROTTKE 2013).

Sedimentumlagerungen führen häufig zu morphologischen Änderungen der Gewässersohle. Dort, wo diese Prozesse schnelle und große Tiefenänderungen der Gewässersohle mit massiven Einschränkungen in der Nutzbarkeit des Küstengebietes zur Folge haben, werden regelmäßig Tiefenlotungen zur Kontrolle durchgeführt. Dies erfolgt seit nunmehr vielen Jahren über den Einsatz von Einstrahl- (SBES) bzw. Mehrstrahlecholoten (MBES). Auflösung und Genauigkeit der Tiefenangaben sind dabei von verschiedenen Faktoren abhängig. So kommt es bei den eingesetzten Gerätetypen auf die u. a. gerätespezifische Abstrahlgeometrie und die genutzte Frequenz an. Mit herkömmlichen SBES werden Tiefendaten nur entlang des abgefahrenen Messprofils erhoben. Die maximale Datendichte entlang dieser Profillinie ergibt sich aus der höchstmöglichen Pulsrate, der Wassertiefe und der Fahrtgeschwindigkeit. Bei MBES, wie den Fächerecholoten, werden zeitgleich nicht nur Tiefendaten entlang des abgefahrenen Messprofils, sondern auch auf parallel dazu liegenden Profillinien erhoben. Auf diese Weise lassen sich ganze Flächen mit wesentlich höheren Datendichten pro Zeiteinheit erzeugen.

Die räumliche Datengüte beider Systemfamilien hängt maßgeblich von der Positionsgenauigkeit der einzelnen Messpunkte ab. Bei den Fächerecholoten mit komplexer Rohdatenstruktur ist eine Lagegenauigkeit als Kombination systemspezifischer physikalischer Auflösung und Georeferenzierung über Lage-Sensorik (Bewegungssensor, Kreiselkompass) und satellitengestützter Positionierung im Zentimeterbereich möglich (z. B. ERNSTSEN et al. 2006). Bei Nutzung hoch aufgelöster GPS-Georeferenzierung sind bathymetrische Daten entsprechend tidenentkoppelt, d. h. Beschickungen, die weitere Fehlerquellen hervorrufen können, fallen weg.

Nicht zuletzt hängt die Datenqualität, wie bei fast allen Messsystemen, auch von den Messbedingungen ab. Hierzu zählt die Lagestabilität des genutzten Fahrzeuges, die Bewegung des Wasserkörpers durch Wellen, (Tide-) Strömung, schiffsgenerierte Turbulenzen,

die Charakteristik des Wasserkörpers, darunter Schwebstoffdichte und Schichtungsphänomene, aber auch die Beschaffenheit der Sohle selbst. Insbesondere bei Präsenz hoch mobiler, fluider Schlicke ist eine exakte Tiefenbestimmung nicht immer möglich (SCHROTTKE et al. 2006). Oft werden deshalb zwei unterschiedliche Frequenzen gleichzeitig genutzt, wissend dass höhere Frequenzen zwar eine höhere Auflösung mit sich bringen, aber auch eine geringere Reichweite bzw. Eindringung, während Schallwellen tieferer Frequenzen prinzipiell auch noch schwach konsolidierte Sohlsedimente durchdringen können und damit die darunter befindliche „feste“ Sohle erfassbar bleibt.

Die Art und Weise der Datenaufbereitung (z. B. Interpolationsverfahren) spielt ebenfalls eine Rolle. Jede Tiefenangabe müsste demnach in eine Umhüllende eingebettet sein, dessen Ausmaß sich jedoch, insbesondere bei älteren Daten, oft nur grob abschätzen lässt. Eine umfassende Datendokumentation, die oftmals fehlt, ist zur Einordnung der Datengüte dabei essentiell. Folglich lassen sich Aussagen zu morphologischen Änderungen bzw. zur Stabilität der Gewässersohle oft nicht sicher treffen. Diese Kenntnisse müssen insbesondere bei vergleichenden Gegenüberstellungen von Daten unterschiedlicher Herkunft berücksichtigt werden.

Sind, wie in AufMod, nicht nur Aussagen zu morphologischen Änderungen der Gewässersohle, sondern auch zur Mächtigkeit der mobilen Deckschicht gefordert, so bedarf es in den meisten Fällen Zusatzinformationen zum geologischen Aufbau des Untergrundes. Hier können ebenfalls hydroakustische Messverfahren zum Einsatz kommen, wie beispielsweise Sedimentecholote, deren Schallimpulse mit niedrigen Frequenzen, aber hohen Sendeleistungen in den Untergrund eindringen. Schichtwechsel bzw. Änderungen der physikalischen Sedimenteigenschaften werden durch Änderungen der akustischen Impedanz angezeigt. Das parametrische Sedimentecholot (SES-2000®) der Firma Innomar Technology GmbH, das in AufMod eingesetzt wurde, um insbesondere oberflächennahe Sedimentstrukturen und deren Lagerungsverhältnisse hochauflösend zu erfassen, bietet hierfür eine vertikale Auflösung von ≥ 6 cm, bei wassertiefen- und frequenzabhängigen Genauigkeiten von z. B. 100/10 kHz: $2/4$ cm + 0,02 % der Wassertiefe (WUNDERLICH and MÜLLER 2003). Vorteil bei dieser Technik ist u. a. der vergleichsweise schmale Abtastbereich, der sowohl bei der Primärfrequenz von 100 kHz, als auch bei den wählbaren Sekundärfrequenzen (4-15 kHz) identisch ist.

Die gewünschten Informationen lassen sich jedoch nicht immer direkt und ausschließlich an den Messdaten ablesen. Je nach genutzter Auswertetechnik (programmgestützt oder manuell) können sich voneinander abweichende Dateninterpretationen ergeben. Meist ist ein Datenabgleich (ground-thruthing) mit Kernbohrungen notwendig, insbesondere in Gebieten, in denen Angaben zum vertikalen Aufbau der Gewässersohle fehlen oder die großen Änderungen unterliegen.

Hydroakustisch basierte Messdaten werden heutzutage immer häufiger auch bei der Erhebung flächendeckender Daten zur Oberflächensedimentverteilung und -charakteristik genutzt. An erster Stelle stehen dabei die Seitensichtsonare (SSS), die es mittlerweile in den unterschiedlichsten Ausführungen gibt. Wie bei allen anderen hydroakustischen Messsystemen erfolgt auch bei den Seitensichtsonaren die Datenerhebung über die Aussendung von Schallwellen und die anschließende Erfassung des an Grenzflächen reflektierten oder rückgestreuten Messsignals, hier vorrangig der Sohloberfläche (BLONDEL and MURTON 1997; BLONDEL 2009; LURTON 2002). Die Rückstreuintensitäten stehen dabei in direktem Zusammenhang mit der mikro- (Korngröße) bis makroskaligen (Mor-

phologie) Sohlrauheit sowie den physikalischen Sedimenteigenschaften (u. a. Zusammensetzung, Lagerungsdichte). Ein wesentlicher Fortschritt bei der Nutzung moderner hydroakustischer Messsysteme, insbesondere aber bei Seitensichtsonaren, ist die Umstellung auf die digitale Datenerfassung. Damit sind umfassende, nachträglich durchführbare Korrekturverfahren möglich, die nicht zuletzt auch die Vergleichbarkeit von SSS-Daten erhöhen. Zudem werden immer mehr automatisierte Verfahren zur Sedimentklassifizierung eingesetzt (z. B. BARTHOLOMÄ 2006, 2011). Eine Kalibrierung von SSS-Aufzeichnungen mit Sedimentinformationen aus Bodenproben ist dennoch stets erforderlich.

In AufMod wurden hierzu Sedimentproben entweder mit einem van Veen-Backengreifer oder einem Shipek-Greifer genommen und aus dem daraus verfügbaren Sedimentmaterial repräsentative Teilproben, möglichst der oberen 4 cm entnommen. Unter Verwendung einer speziell für das Projekt entwickelten Eingabemaske konnte eine zur Sedimentbeprobung zugehörige, standardisierte Datendokumentation erfolgen. Diese ist den heute abrufbaren Daten als Metadaten hinterlegt (WOSNIOK et al. 2015). So ist jeder Probe eine einheitliche Grobansprache mit klar definierten Werteskalen zugeordnet und wesentliche Zusatzinformationen beigelegt, wie z. B. Angaben zum Lagerungsgefüge oder zum prozentualen Schlick-Anteil. Diese Maßnahme zeigte sich als gewinnbringend, da hiermit die ansonsten nur marginal beachteten Metadaten nun einen ganz neuen Stellenwert erhalten und weiterführende Interpretationen zulassen.

Dieser Sachverhalt lässt sich am Beispiel der Sedimentproben verdeutlichen, die sich durch eine nicht-kohäsive Matrix, beispielsweise Sand, auszeichnen, jedoch von kohäsiven Feinsedimenten in Form sogenannter Schlickgerölle durchsetzt sind. Eine derartige Oberflächensedimentbeschaffenheit wurde vor allem in den Ästuaren und Wattgebieten immer wieder angetroffen. Diese warf insbesondere bei der laborgestützten Auswertung zunächst die Frage auf, wie mit solchen Mischproben zu verfahren sei, da der Anteil $< 63 \mu\text{m}$ nicht ohne weiteres dem Matrixsediment zugeordnet werden kann. Streng genommen handelt es sich um Proben, die Sedimente unterschiedlichster Genese beinhalten. Dieser Sachverhalt wird über die „klassische“ Analytik nicht automatisch dargestellt. Neue Zusatzinformationen zur Menge (Anzahl), räumlichen Verteilung (Bedeckungsgrad der Sedimentoberfläche im Greifer bzw. Raumbeanspruchung in der Matrix) und Beschaffenheit (u. a. Größe, Wassergehalt) der Schlickgerölle geben hier nun nicht nur den Hinweis auf ein Mischsediment der besonderen Art, was es bei der Nutzung der Kornverteilungsdaten zu berücksichtigen gilt, sondern lassen auch Interpretationen zur Verteilung von Schlickgeröllen über Raum und Zeit zu (siehe Kap. 4).

Insgesamt wurden die Korngrößenverteilungen in AufMod hauptsächlich mittels Trockensiebung nach ASTM in $\frac{1}{4}$ Phi-Stufung von 63-2000 μm ermittelt. Bei Schlickanteilen (Fraktionen $< 63 \mu\text{m}$) von mehr als 30 Gewichtsprozent am Gesamtsediment wurden die Proben, die im Rahmen von Ausfahrten der Universität Kiel genommen wurden, zusätzlich mittels Laserbeugung (0,04-2000 μm) analysiert. Am Institut Senckenberg am Meer wurden die Sedimentproben fraktioniert untersucht, d. h. die Kiesfraktion wurde mechanisch gesiebt, die Sandfraktion mit der MacroGranometer Sinkgeschwindigkeitsröhre und die Schlickfraktion mit dem Sedigraphen analysiert. Die Darstellung der Ergebnisse erfolgte in gleicher Weise. Zur Klassifikation der Sedimente gemäß ihrer Korngrößenverteilung wurde die Skala von „Udden-Wentworth“ (ursprünglich WENDWORTH 1922) verwandt. Die Zuordnung und Benennung der Klassen erfolgte über die berechneten Zentralmaße Haupt- bzw. ersten Modus und Medianwert d_{50} . Bei Sedimentproben mit

hohem organischem Anteil erfolgten zudem Glühverlustbestimmungen in Anlehnung an die DIN 18128. Dies diente zur Abschätzung des partikulären Anteils an organischem Kohlenstoff in den Sedimentproben.

Die Porosität stellt einen wichtigen Sedimentparameter dar und wurde somit in AufMod nach Möglichkeit messtechnisch erfasst, um errechnete Werte aus dem mittleren d50 zu flankieren. In marinen Lockersedimenten wird die Porosität von verschiedenen Faktoren wie der Korngröße, -Form und Mineralogie, aber auch von der Sortierung und Packungsdichte sowie von der Sedimentauflast beeinflusst (WHEATCROFT 2002). Die Erhebung von Porositätsdaten kann je nach Sedimenttyp mit hohen Ungenauigkeiten belegt sein, eine standardisierte Analytik gibt es noch nicht. Mit Kenntnisnahme dieses Sachverhaltes wurden in AufMod insgesamt 467 Sedimentproben zur Bestimmung der Porosität entnommen. Kohäsive Feinsedimente wurden dabei mit einer Spritze beprobt, bei sandigem Material kam ein dünnwandiger 100 ml Nunc-Becher zum Einsatz. Der Becherboden war zum besseren Entweichen der Luft angebohrt. Die Proben wurden getrocknet und bei Bedarf gemörsert. Aus dem bekannten Probenvolumen und -wassergehalt wurde die Porosität errechnet, Wassersättigung des Probenmaterials vorausgesetzt. Die Salinität des Porenwassers wurde, wenn vorhanden, nicht berücksichtigt. Dank der Verknüpfung der Porositätswerte mit den bereits erwähnten, detaillierten Metadaten konnten weitergehende Interpretationen zu den Ursachen der Werteschwankungen gegeben werden (siehe Kap. 4).

Ein wesentliches Ziel in AufMod war es, alle verfügbaren Messdaten in für alle nutzbare, zahlencodierte Datensätze mit einer nachvollziehbaren Vergleichbarkeit bereitzustellen (siehe Datenprodukte – Shelf Geo-Explorer). Das galt vor allem für die Daten aus den SSS-basierten Seegrundkartierungen. Hierzu wurden Areale mit gleichen oder sehr ähnlichen Rückstrommustern als Bereiche mit hinreichend ähnlichen Sedimenteigenschaften gewertet und in Polygone überführt (siehe Abb. 1). Dort, wo sich selbst bei optimalen Aufnahmebedingungen Sedimentgrenzen nicht klar in SSS-Aufzeichnungen darstellen ließen, insbesondere bei Präsenz von „fließenden“ Sedimentänderungen, wurden Polygongrenzen geradlinig durch die Übergangsbereiche gelegt. Den Polygonen wurden dann, anhand der zugehörigen, sedimentbezogenen Informationen Sedimentklassen mit entsprechenden Sedimentparametern (u. a. prozentualer Anteil der Hauptfraktionen; Gewichtsanteile der sandigen Fraktionen mit Zentralmaßen; wenn vorhanden: Schill- und POC-Gehalt, Porosität) zugeordnet. Bei Polygonen, innerhalb derer mehr als eine Sedimentprobe genommen wurde, basieren die probenbezogenen Sedimentinformationen entsprechend auf dem arithmetischen Mittel. Polygonen ohne direkten Probenbezug wurden jeweils Werte gleichartiger Polygone zugeordnet. In Fällen, in denen Proben Daten das Oberflächensediment im zugehörigen Polygon nicht repräsentativ abbilden z. B., wenn großflächig anstehende Kleiablagerungen partiell von „mobilen“ Sandschleiern bedeckt waren, die Sedimentprobe jedoch nur Sand enthielt, wurden Sedimentparameter benachbarter Polygone mit gleicher Sedimentbeschaffenheit oder aber Mittelwerte genutzt. Oft ließen sich hoch konsolidierte Feinsedimente mittels Greifer nicht in ausreichender Menge erfassen. Wenn nicht eindeutig feststellbar war, ob es sich um Geschiebemergel/-lehm, Klei oder stark verfestigten Schlick handelte, wurde es als „konsolidierte Sohloberfläche“ ausgewiesen. Schließlich wurden allen Polygonen Angaben zur potentiellen Mobilität und zur Präsenz von Sohlformen zugeteilt.

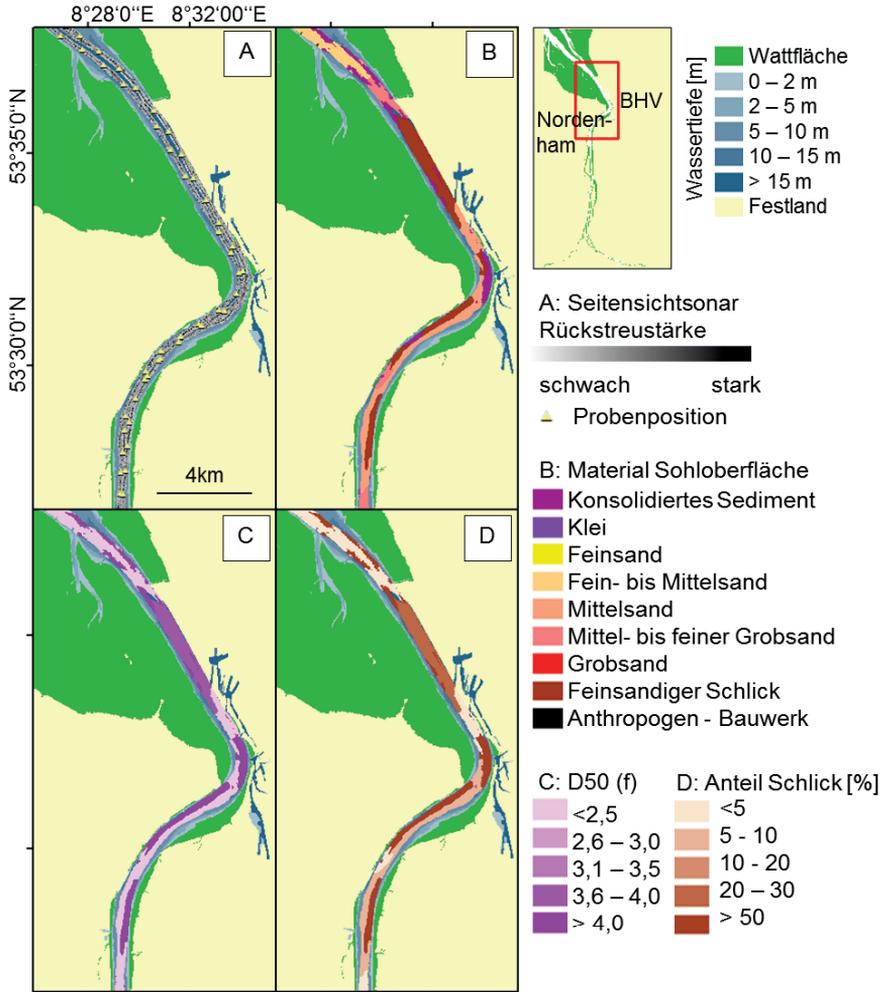


Abbildung 1: Beispielhafte Darstellung einer SSS-Daten (A) basierten Oberflächensedimentkartierung vom Februar 2011, hier eines Abschnittes der Hauptstromrinne im Weser Ästuar mit den Parametern: Sedimentklasse nach Folk 1954 (B), Medianwert der Korngrößenverteilung in Phi (C) und Feinkorngehalt in Gewichtsprozent (D).

3 Fokusegebiete

Die Deutsche Bucht stellt einen riesigen Untersuchungsraum dar, in dem Sedimentverlagerungen auf unterschiedlichen Raum- wie Zeitskalen stattfinden. Im weltweiten Vergleich kann die Deutsche Bucht als ein bereits messtechnisch gut erfasstes Meeresgebiet eingestuft werden. Zumindest liegen bathymetrische und sedimentologische Daten aus vielen Teilbereichen vor, wenn auch auf räumlich und zeitlich unterschiedlichsten Aufnahmen basierend. Die Karte der Sedimentverteilung in der Deutschen Bucht (Nr. 2900) nach FIGGE (1981), die sogenannte „FIGGE-Karte“, gibt beispielsweise einen sehr

umfassenden Überblick über die großräumige Verteilung der Oberflächensedimente, wissend, dass darin enthaltene Daten meist auf Korngrößeninformationen (Medianwert, Sortierung, Schiefe) diskreter Proben mit unterschiedlichsten Bezugszeiten basieren. Die Belastbarkeit der Informationen auf interpolierten Flächen hinsichtlich des unterschiedlich dichten Datenrasters schwankt somit teils stark. Zudem sind, anders als in AufMod, die obersten 10 cm Sedimentsäule einbezogen worden. Eine Differenzierung der Proben hinsichtlich der auf Kornverteilungen einflussnehmenden Gemengteile wie Schill oder Schlickgerölle erfolgte nicht.

Da es mit derzeitig verfügbaren Methoden nicht möglich ist, den gesamten Untersuchungsraum zeitgleich und mehrfach flächendeckend messtechnisch zu erfassen, wurden sogenannte „Fokusgebiete“ ausgewählt, innerhalb derer im Wesentlichen neue Felddaten erhoben und diese auch für Prozessstudien genutzt wurden. Diese wurden so ausgewählt, dass die Systeme Schelf/Vorstrand, Wattenmeer und Ästuar repräsentativ vertreten waren. Ferner wurde bei der Auswahl darauf geachtet, dass auch verwertbare Daten älterer Untersuchungen vorlagen, um diese mit in die Zeitreihenuntersuchungen einbeziehen zu können. Die Fokusgebiete umfassten das Küstenvorfeld der Inseln Spiekeroog und Sylt, die nördliche Jade, die Ästuar von Weser und Elbe sowie die Gezeitenrinnen Piep (Dithmarscher Wattenmeer) und Norderhever (Nordfriesisches Wattenmeer). Die Gebiete unterscheiden sich bekanntermaßen in mehreren wesentlichen Aspekten, darunter in der Entfernung zur Küste mit entsprechenden Wassertiefen und zugehöriger Energieeinwirkung durch Wind und Tide, in der Beeinflussung durch den Abfluss von Oberwasser sowie in ihrem geologischen Aufbau und damit letztlich in der resultierenden Morpho- und Sedimentdynamik. Bei der Auswahl der Gebiete stand dennoch vor allem die Übertragbarkeit der dort erzielten Ergebnisse im Vordergrund, die im Folgenden beispielhaft aufgezeigt werden.

4 Beispiele der Vergleichbarkeit bzw. Übertragbarkeit spezifischer Erkenntnisse

Der in AufMod gewählte Ansatz, Messungen hauptsächlich in den Fokusgebieten durchzuführen, wirft die Frage auf, in wieweit die daraus ableitbaren Erkenntnisse auf andere Gebiete übertragbar sind. Auch wenn viele Ergebnisse auf den ersten Blick betrachtet, überwiegend gebietsspezifischer Natur sind, lassen sich doch viele Aspekte verallgemeinern. Ein Beispiel findet sich in der oft engen Zuordnung zwischen räumlicher Verteilung von Oberflächensedimenten und geologisch-sedimentologischem Aufbau des darunter befindlichen Untergrundes. Bekanntermaßen wird die Seegrundoberfläche in den Gebieten der Deutschen Bucht, in denen das Pleistozän in Form von Geschiebemergel oder anderen glaziogenen Ablagerungen entweder direkt am Seegrund oder nahe der Seegrundoberfläche ansteht, oft von heterogenen Grobsedimenten eingenommen. Diese sogenannten Relikt- bzw. Restsedimentflächen sind weit verbreitet, vor allem auf dem Nordseeschelf, wo oft eine mächtigere Auflage holozäner Sedimente fehlt (ZEILER et al. 2000a, 2000b). Änderungen in der räumlichen Verteilung der Oberflächensedimente auf dem Schelf sind vor allem auf Sturmereignisse zurückzuführen. Dabei ändert sich unter welleninduzierter Energieeinwirkung aber meist nur die räumliche Ausdehnung der einzelnen Faziesbereiche, nicht aber die grundsätzliche Verteilungscharakteristik ihrer Oberflächensedimente. Die Situation fand sich in verschiedenen Bereichen des Nordsee-

schelfs, die im Rahmen von AufMod untersucht wurden und deckt sich mit den bisher bekannten Informationen.

Vergleichbare Abhängigkeiten zwischen geologisch-sedimentologischem Aufbau des oberflächennahen Untergrundes und Oberflächensedimentverteilung finden sich auch in den Bereichen der Deutschen Bucht, die sich jedoch durch eine höhere Morphodynamik und einer meist wesentlich mächtigeren holozänen Sedimentauflage auszeichnen. Das sind vor allem die Vorstrände, Watten und Ästuar. Hierzu sei ein Blick auf die Ergebnisse aus dem Fokusegebiet Spiekeroog geworfen. Einzig dort in der Deutschen Bucht finden sich küstengebundene Zungenriffe, wie es sie ansonsten weltweit an vielen Küsten gibt (u. a. SWIFT 1987; VAN DE MEENE and VAN RIJN 2000). Im Küstenvorfeld von Spiekeroog sind die Zungenriffe in Wassertiefen von 9 bis 20 m anzutreffen. Anhand neuer Daten wird deutlich, wie sehr sich dort die Sedimente des anstehenden pleistozänen Untergrundes an der Sohloberfläche abbilden, obwohl sie von einer bis zu 3 m mächtigen, mobilten, holozänen Sandauflage bedeckt sind (siehe Abb. 2). Das der dortige Geschiebemergel als Materiallieferant fungiert, spiegelt sich vor allem in den grobkörnigen Anteilen der Korngrößenverteilungen wider, die überwiegend die Bereiche der landwärtigen Flanken der äußeren Zungenriffe repräsentieren. Mehrere Momentaufnahmen über einen Zeitraum von zwei Jahren (März 2010 bis April 2012) zeigen insgesamt nur geringfügige Veränderungen in der generellen Verteilung der Oberflächensedimente und das, obwohl sich die Zungenriffe nachweislich bis zu 20 m pro Jahr verlagert haben. Der Verlagerungsprozess ist hier, im Vergleich zum tieferen Schelfbereich, allerdings nicht primär ereignisgesteuert, sondern unterliegt maßgeblich dem Tideeinfluss.

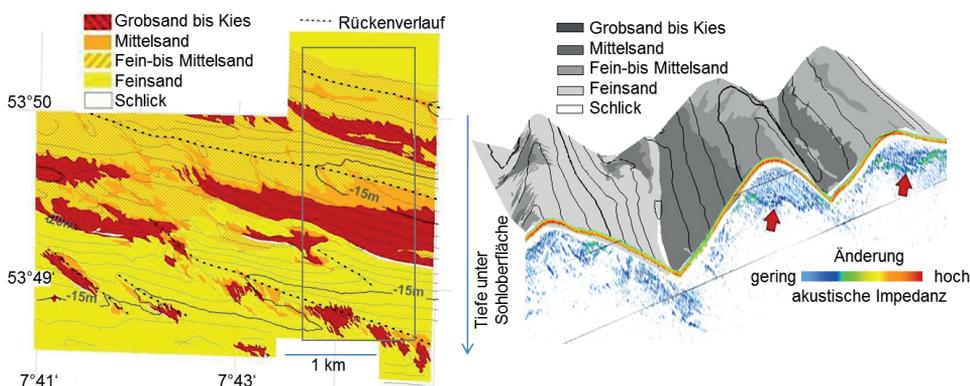


Abbildung 2 (links): Sedimentverteilung auf den Zungenriffen seewärts der Insel Spiekeroog auf der Basis von SSS-Daten aus dem Jahr 2010 und (rechts): 3D-Rekonstruktion der bis zu 3 m mächtigen Lockersedimentauflage auf Basis von SSS- und SES-Daten; Lokalität siehe Rechteck linke Abb. (mod. nach MARKERT et al. 2015).

Auch in den Watten und Ästuaren spiegelt sich vielerorts der „feste“ Untergrund an der überliegenden Oberflächensedimentzusammensetzung wider. Auch dort verschiebt sich die Oberflächensedimentverteilung zu größeren Kornspektrten, wenn die holozäne Sedimentauflage ausdünn oder auskeilt und pleistozäne Ablagerungen anstehen. Insbesondere in den Watten und Ästuaren, wo die Gezeitenrinnen oft ihren Verlauf ändern, können auch Ablagerungen, die ansonsten als erosionsstabil gelten, durch laterale Erosionspro-

zesse im Zuge von Kolkbildungen auf Flächen oder aber durch Baggerungen innerhalb von Fahrrinnen abgetragen werden (REINECK 1984). So finden sich dort immer wieder Abbruchkanten, an denen pleistozäne aber auch konsolidierte Feinsedimente des Holozäns zeitweilig unbedeckt anstehen, erodiert und schließlich in Form von zunächst kantigen Bruchstücken abtransportiert werden (siehe Abb. 3 und RICKLEFS et al. 2015). Ferner spiegelt sich die Präsenz solcher Erosionsbereiche auch in weiter entfernt liegenden Gewässerabschnitten durch charakteristische Mischsedimente wider.



Abbildung 3: Aufnahme aus dem Gebiet der Medemrinne (Elbmündung) mit einer unter Erosion befindlichen Wattkante, bestehend aus konsolidierten Feinsedimenten.

Gemeint sind jene Bereiche, in denen die meist siltig-sandige Gewässersohle von sogenannten Schlickgeröllen, d. h. von durch Sohltransport kantengerundeten Bruchstücken, durchzogen ist bzw. sogar überdeckt wird (vgl. Kap. 2). Je nach Konsolidierungsgrad und Materialherkunft können die in den Untersuchungsgebieten angetroffenen Schlickgerölle in zwei Typklassen eingeteilt werden. Typ 1 umfasst jene aus stark verfestigtem Material (konsolidierter Schlick, Klei, Geschiebemergel, Torf, Mudde), während schwach konsolidierte Feinsedimente, die aus der Aufarbeitung kürzlich gebildeter Schlickablagerungen stammen (vgl. Kap. 2), dem Typ 2 zugeordnet werden (siehe Abb. 4).

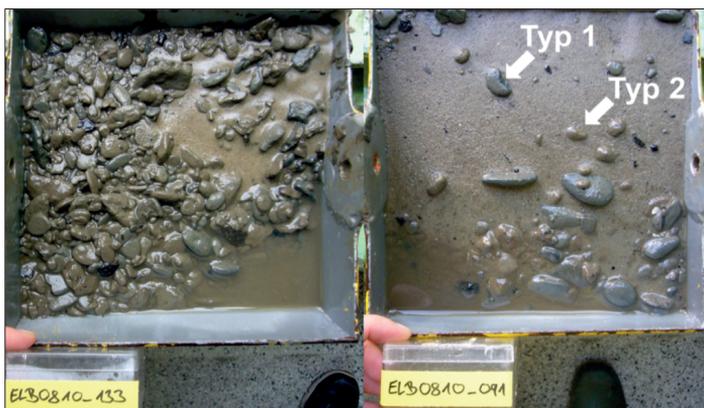


Abbildung 4: Fotos von Greiferproben exemplarisch aus dem Elbe Ästuar. Die feinsandige Matrix ist unterschiedlich dicht von Schlickgeröllen überlagert bzw. durchsetzt. Auf dem Foto rechts wird zudem auf Schlickgerölle hingewiesen, die sich insbesondere durch ihre Konsistenz (Typ 1: hart, Typ 2: weich) bzw. Materialherkunft unterscheiden.

Schlickgerölle des Typs 2 können dabei derart weich sein, dass diese bei einer Greifer gestützten Beprobung nach dem Hieven des Greifers und dem Abfließen des überstehenden Wassers auf der Sedimentoberfläche zerfließen. Es ist somit davon auszugehen, dass jene des Typs 2 aufgrund ihrer Konstitution nur über kurze Strecken transportierbar sind; ihr regionales Vorkommen demnach eng an die zugehörige Materialquelle gekoppelt ist (siehe Abb. 5, obere Grafik). Hochfluide Schlicke werden bekanntlich vornehmlich in den ästuarinen Trübungszone gebildet, was den prozentualen Anstieg von Schlickgeröllen des Typs 2 im Bereich der Flusskilometer 695 bis 715 im Elbe Ästuar zur Aufnahme im August 2010 verdeutlicht (siehe Abb. 5, obere Grafik).

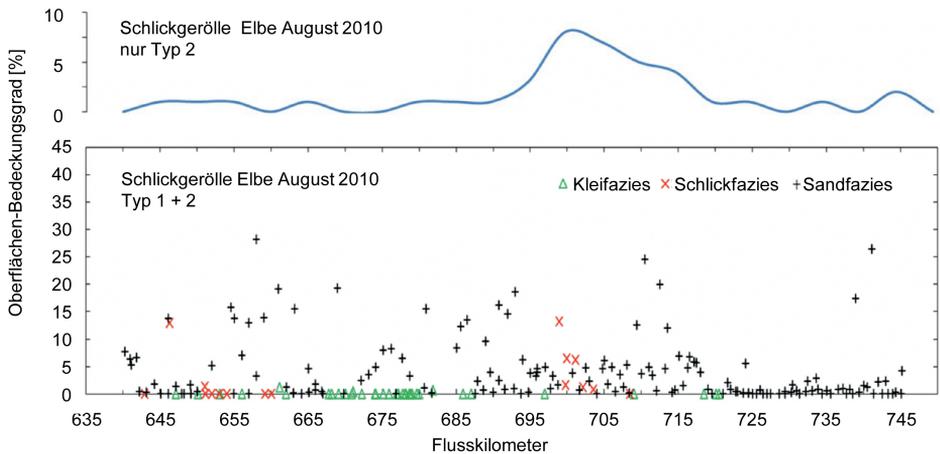


Abbildung 5: Prozentuale Bedeckung der Gewässersohle mit Schlickgeröllen entlang des Elbe Ästuars im August 2010, exemplarisch mit Ausweisung der Typklasse 2 (obere Grafik) sowie in Kopplung mit dem zugehörigen Matrixtyp (untere Grafik).

Schlickgerölle vom Typ 1 traten zu den Aufnahmen in den untersuchten Gewässerabschnitten zum Teil großflächig auf (siehe Abb. 5, untere Grafik). Oft wurden sie in Mengen angetroffen, so dass das Oberflächensediment in den Greiferproben streng genommen als Konglomerat mit sandiger Matrix hätte angesprochen werden müssen. Sie bildeten teils eine nahezu geschlossene Deckschicht, so dass davon auszugehen ist, dass mit großer Wahrscheinlichkeit unter dieser Begebenheit die Mobilität des darunter befindlichen, meist sandigen Sediments deutlich beeinträchtigt wurde. Werden einzelne Faziesräume betrachtet, so zeigt sich beispielsweise für die Kleifazies, für die der Bedeckungsgrad der Sohloberflächen mit Schlickgeröllen zur Aufnahme im August 2010 als gering eingestuft werden kann, dass das anstehende Sediment zwar als Materialquelle fungiert, nicht aber gleichzeitig auch Depositionsraum für daraus hervorgehende Schlickgerölle ist (siehe Abb. 5, untere Grafik). Dieses Beispiel verdeutlicht zudem die mögliche Nutzbarkeit von Schlickgeröllen als eine Art Tracer zur Analyse von Sedimenttransportwegen bzw. -entfernungen.

Insgesamt hat sich gezeigt, dass das Vorkommen von Schlickgeröllen nicht nur in den Ästuaren, sondern auch in den Watten der Deutschen Bucht und letztlich auch überall dort, wo Entstehungsbedingungen gegeben sind, als weitreichender zu betrachten ist, als bisher veröffentlicht; ihre Präsenz, je nach Menge als sedimentcharakterisierendes Element einbezogen werden muss.

Ein anderer wichtiger sedimentcharakterisierender Parameter, der in AufMod vor allem in den ästuarinen Untersuchungsräumen besondere Betrachtung fand, insgesamt aber einen hohen Stellenwert für alle Sedimente im gesamten Untersuchungsraum hat, ist die Porosität. Dieser sedimentphysikalische Parameter war vor allem für die im Projekt durchgeführte Modellierung im Hinblick auf die Konsolidierung von Sedimenten und deren Mobilisierungspotential von Interesse. Im Durchschnitt lagen die Porositätswerte bei 67 % (Weser; $\sigma:9,7$) bzw. 73 % (Elbe; $\sigma:10,4$) in Bereichen mit tonig-siltiger und bei 38 % (Weser; $\sigma:5,5$) bzw. 42 % (Elbe; $\sigma:9,7$) in jenen mit sandiger Matrix. Damit entsprechen die Durchschnittswerte durchaus denen, die aus der Literatur bekannt sind, was eine gewisse Übertragbarkeit der Erkenntnisse auf andere Bereiche der Deutschen Bucht unterstreicht: Bei FÜCHTBAUER und REINECK (1963) finden sich für Sedimente des Schlick- bzw. Mischwattes sowie für jene aus Hafengebieten Porositäten zwischen 50 bis über 80 %. Für Sande der südlichen Nordsee liegt sie im Mittel zwischen 37 und 42 %. HAMILTON und MENARD (1956) geben für tonige bis siltige Ablagerungen aus 30 m Wassertiefe mittlere Porositätswerte von 51 bis über 70 %, für Sande von 38 (gS) bis 48 % (sfS) an. Auch WHEATCROFT (2002) gibt für Sande aus Wassertiefen von 19 m Porositätswerte an, die mit 36 bis 49 % denen aus dem Weser und Elbe Ästuar vergleichbar sind. Inwieweit die Porosität räumlichen wie zeitlichen Schwankungen unterworfen ist, wird exemplarisch aus Abb. 6 deutlich. Die weiter oben aufgeführten Standardabweichungen (σ) sowie die in Abb. 6 aufgetragenen Porositätswerte weisen ferner darauf hin, dass die Porosität feinkörniger Sedimente im Vergleich zu sandigen Ablagerungen stärker variieren. Hierfür können die unterschiedlich hohen Konsolidierungsgrade der feinkörnigen Ablagerungen heran gezogen werden. Insgesamt weichen die Porositätswerte, die die Sedimente aus dem Weser Ästuar repräsentieren weniger vom Mittel ab, als jene aus dem Elbe Ästuar. Inwieweit Werteschwankungen über Raum und Zeit mit Änderungen einflussnehmender Rahmenbedingungen (z. B. jahreszeitlich bedingte Oberwasserabflussraten, Sturmereignisse, Lage der Trübungszone) in Zusammenhang stehen, kann derzeit noch nicht umfassend beantwortet werden.

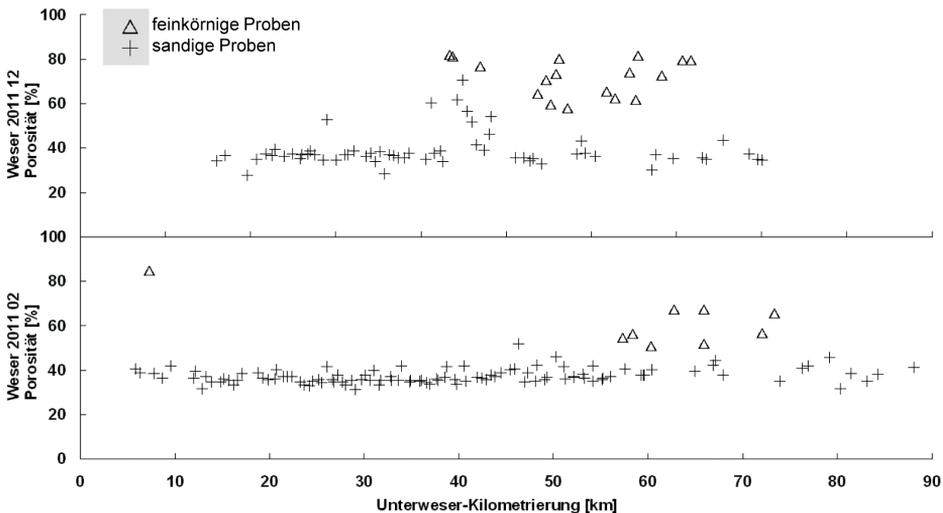


Abbildung 6: Porositätswerte der im Weser Ästuar zu den Untersuchungen im Februar und Dezember 2011 entnommenen Sedimentproben; aufgetragen gegen die Flusskilometrierung.

Abschließend sei noch auf eine zentrale Erkenntnis zur generellen Oberflächensedimentverteilung in den einzelnen Fokusgebieten und deren Änderung über Raum und Zeit durch die Kopplung von aktuellen mit älteren Daten eingegangen. Wie schon weiter oben aufgeführt, ergeben sich nicht zuletzt durch die geologische Vorprägung und die über Raum und Zeit unterschiedlich einwirkenden Energien teils wesentliche Unterschiede in der Ausprägung der Oberflächensedimente in den einzelnen Untersuchungsräumen der Deutschen Bucht. Und doch ist ihnen gemein, dass die bereits in älteren Datensätzen aufgeführten, großräumigen Faziesbereiche, die sich mit moderner Aufnahmetechniken zwar heute noch wesentlich differenzierter darstellen lassen, langfristig erhalten bleiben. Änderungen über Raum und Zeit lassen sich hauptsächlich an den Faziesgrenzen feststellen.

5 Schriftenverzeichnis

- BARTHOLOMÄ, A.: Acoustic bottom detection and seabed classification in the German Bight, southern North Sea. In: *Geo-Marine Letters*, 26, 177-184, 2006.
- BARTHOLOMÄ, A., HOLLER, P., SCHROTTKE, K. and KUBICKI, A.: Acoustic habitat mapping in the German Wadden Sea – Comparison of hydro-acoustic devices. In: *Journal of Coastal Research*, Special Issue 64, ICS 2011 Proc., 1-5, 2011.
- BLONDEL, P.: *Handbook of Sidescan Sonar*. Berlin, Springer, 2009.
- BLONDEL, P. and MURTON, B.J.: *Handbook of seafloor sonar imagery*. John Wiley & sons, Chichester, 1997.
- ERNSTSEN, V.B., NOORMETS, R., HEBBELN, D., BARTHOLOMÄ, A. and FLEMMING, B. W.: Precision of high resolution multibeam echo sounding coupled with high-accuracy positioning in a shallow water coastal environment. In: *Geo-Marine Letters*, 26 (3), 141-149, doi: 10.1007/s00367-006-0025-3, 2006.
- FIGGE, K.: Begleitheft zur Karte der Sedimentkartierung in der Deutschen Bucht, Nr. 2900, Hamburg, BSH, 1981.
- FÜCHTBAUER, H. und REINECK, H. R.: Porosität und Verdichtung rezenter, mariner Sedimente. *Sedimentology* 2. 1963, 294-306, 1963.
- HAMILTON, L. H. and MENARD, H. W.: Density and Porosity of Seafloor Surface Sediments off San Diego, California. *AAPG Bulletin*, 40, 1956, 754-761, 1956.
- HEYER, H. und SCHROTTKE, K.: Aufbau von integrierten Modellsystemen zur Analyse der langfristigen Morphodynamik in der Deutschen Bucht – *AufMod*. doi: 10.2314/GBV:780783271, 2013.
- LURTON, X.: *An introduction to underwater acoustics*. Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 2002.
- MARKERT, E.; KRÖNCKE, J. and KUBICKI, A.: Small scale morphodynamics of shoreface – connected ridges and their impact on benthic macrofauna. In: *Journal of Sea Research*, 99, 47-55, 2015.
- MILBRADT, P.; VALERIUS, J. and ZEILER, M.: Das funktionale Bodenmodell: Aufbereitung einer konsistenten Datenbasis für die Morphologie und Sedimentologie. *Die Küste*, 83, 2015.
- REINECK, H.-E.: *Aktuogeologie klastischer Sedimente*. Frankfurt am Main, Verlag W. Kramer. 348, 1984.

- RICKLEFS, K.; ARP, D. und STAGE, M.: Zur zeitlichen Variabilität der Sedimentverteilungen in den Gezeitenrinnen Piep und Hever. *Die Küste*,83, 2015.
- SCHROTTKE, K.; BECKER, M.; BARTHOLOMÄ, A.; FLEMMING, B. W. and HEBBELN, D.: Fluid Mud dynamics in the Weser estuary turbidity zone tracked by high-resolution side-scan sonar and parametric sub-bottom profiler. In: *Geo-Marine Letters* 26 (3), 185-198, 2006.
- SWIFT, D. J. P.: Shoreface-connected sand ridges on American and European shelves, a comparison. *Estuarine and Coastal Marine Sciences*, 7, 1987, 257-273, 1987.
- VAN DE MEENE, J. W. H. and VAN RIJN, L. C.: The shoreface-connected ridges along the central Dutch coast - part 1: field observations. *Continental Shelf Research*, 20, 2000, 2295-2323, 2000.
- WENDWORTH, C. K.: A scale of Grade and Class terms for Clastic sediments. *Journal of Geology*, Vol. 30, 377-392, 1922.
- WHEATCROFT, R. A.: In Situ Measurements of Near-Surface Porosity in Shallow-Water Marine Sands. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, Vol. 27, No. 3. 2002.
- WINTER, C.; LEFEBVRE, A.; BENNINGHOFF, M. und ERNSTSEN, V. B.: Die Verteilung und Eigenschaften von Bodenformen in der Deutschen Bucht, eine Rekonstruktion der Karten von Ulrich (1973). *Die Küste*,83, 2015.
- WOSNIOK, C. und VALERIUS, J.: Datenmanagement in AufMod. *Die Küste*,83, 2015.
- WUNDERLICH, J. and MÜLLER, S.: High-resolution sub-bottom profiling using parametric acoustics. *International Ocean Systems* 7, (4):6–11, 2003.
- ZEILER, M.; SCHULZ-OHLBERG, J. and FIGGE, K.: Mobile Sand Deposits and Shoreface Dynamics in the Inner German Bight (North Sea). *Marine Geology*, 170, 2002a.
- ZEILER, M.; SCHULZ-OHLBERG, J. und FIGGE, K.: Materialinventur an der deutschen Nordseeküste, *Die Küste*, 62, 2000b.

Entwicklung und Anwendung eines Langfrist-Morphodynamikmodells für die Deutsche Bucht

Bert Putzar und Andreas Malcherek

Zusammenfassung

In diesem Artikel wird ein morphodynamisch-numerisches Modell der Deutschen Bucht für Simulationen von einem Zeitraum von bis zu 100 Jahren beschrieben. Es kann den Einfluss von Tide, Wind und Seegang sowie Fernwellen berücksichtigen und Unterhaltungsmaßnahmen simulieren. Morphodynamische Beschleunigungsverfahren werden nicht verwendet. Die Validierung der Modellkomponenten hat eine gute Übereinstimmung zwischen Messung und Rechnung gezeigt. Insbesondere bei der Sedimentbilanz wurde jedoch deutlich, dass anthropogene Einflüsse, wie großräumige Baumaßnahmen, die Ergebnisse erheblich verfälschen können.

Mit dem Langfristmodell wurden verschiedene Szenarien zu natürlicher Sedimentdynamik gerechnet. Wesentliches Resultat ist, dass es sich bei der Deutschen Bucht um ein Depositionsgebiet handelt. Der Hauptanteil wird als Schwebstofffracht aus westlichen Richtungen eingetragen, während nach Norden nur ein geringer Teil das Gebiet verlässt. Der Vergleich zwischen einem windarmen und einem windreichen Szenario hat zudem gezeigt, dass sich die Sedimentfrachten durch stärkere Wind- und Seegangswirkung erhöhen. Bei alleiniger Tidebelastung führt ein Meeresspiegelanstieg zu einer Abnahme der positiven Sedimentbilanz.

Die Wirkung von anthropogenen Einflüssen wurde am Beispiel von Unterhaltungsmaßnahmen in der Außenelbe demonstriert. Man sieht, dass gerade bei mittel- bis langfristigen Prognosen der Morphodynamik Baggern und Verklappen berücksichtigt werden sollten. Andernfalls wird eine Sohllage prognostiziert, die erheblich von einer durch Menschen beeinflussten abweicht.

Schlagwörter

Langfristmodellierung, Morphodynamik, Sedimenttransport, Deutsche Bucht, TELEMAC-2D, SISYPHE, TOMAWAC, DredgeSim

Summary

In this article a morphodynamic-numerical model for the German Bight is presented. It was developed to simulate long-term morphodynamic processes and can take into account the influence of tide, wind and waves separately. Additionally, dredging and dumping operations are simulated. The simulation model runs without any morphodynamic acceleration techniques. The validation of the model components shows a good agreement between measurements and simulation results. An important aspect concerns the sediment balance. It could be pointed out that anthropogenic impacts can have a significant influence on the validation results.

The long-term model was used to simulate natural sediment transport under the influence of different scenarios over a period of 100 years. The results indicate that the German Bight can be seen as a sedimentation area. The main amount is transported as suspended sediment and enters the domain from western directions. Only a small fraction leaves the German Bight through the northern boundary. The results of two scenarios indicate that strong wind impact increases sediment transport significantly. Furthermore, the influence of sea level rise was analyzed for tide driven simulations only. It can be shown that a rise in sea level decreases the positive sediment balance.

As an example of anthropogenic impacts, the influence of dredging operations in the Elbe River was described. The results show that dredging and dumping operations should be considered especially for medium and long-term morphodynamic predictions. Neglecting such anthropogenic impacts might lead to significant differences between simulated and real bed evolutions.

Keywords

long-term modelling, morphodynamics, sediment transport, German Bight, TELEMAC-2D, SISYPHE, TOMAWAC, DredgeSim

Inhalt

1	Einleitung.....	119
1.1	Beschreibung der verwendeten numerischen Modelle	120
1.1.1	Hydrodynamikmodell.....	120
1.1.2	Seegangmodell.....	120
1.1.3	Morphodynamikmodell	121
1.1.4	Modellierung von Unterhaltungsmaßnahmen	121
1.2	Modellkopplung	122
1.3	Gitternetz, Rand- und Anfangsbedingungen	122
1.4	Modellierung von langfristigen Szenarien.....	124
2	Validierung des Langfristmodells.....	124
2.1	Hydrodynamik.....	125
2.2	Seegang.....	127
2.3	Sedimentdynamik.....	128
3	Szenarien zur ungestörten Sedimentdynamik	131
3.1	Szenario Meteorologie 2006	131
3.1.1	Sohlentwicklung.....	131
3.1.2	Kumulierter Sedimenttransport.....	133
3.1.3	Residualer Sedimenttransport	133
3.2	Szenario Meteorologie 1996	135
3.2.1	Sohlentwicklung.....	135
3.2.2	Residualer Sedimenttransport	137
3.2.3	Änderung der Volumenbilanzen	138
3.3	Szenario Meeresspiegelanstieg.....	139

3.3.1	Sohlentwicklung.....	139
3.3.2	Residualer Sedimenttransport.....	140
3.3.3	Langfristige Volumenbilanzen.....	140
4	Einfluss von Unterhaltungsmaßnahmen auf den Sedimenthaushalt.....	141
4.1	Sohlentwicklung im Mündungsbereich der Elbe.....	142
4.2	Längsprofil der Fahrrinne.....	142
4.3	Zeitreihen der Sohlentwicklung.....	143
5	Ausblick.....	144
6	Danksagung.....	144
7	Schriftenverzeichnis	144

1 Einleitung

Die Deutsche Bucht stellt ein Seegebiet mit einem komplexen Küstenraum dar, der stark anthropogen überprägt ist. Die Wirkung von periodischen Gezeiten, stochastischen Wind- und Seegangereignissen führt zu einem natürlichen Sedimenttransportprozess auf unterschiedlichen Raum- und Zeitskalen. Sie können von Stunden und Metern bis hin zu Jahrhunderten und hunderten von Kilometern reichen. Zum anderen nimmt der Mensch die Deutsche Bucht massiv in Anspruch und greift teilweise gravierend in das System ein. Die Auswirkungen, z. B. auf den Sedimenthaushalt oder auf das sensible Ökosystem, lassen sich möglicherweise erst nach Jahrzehnten nachweisen. Es ist daher grundsätzlich von Interesse, das System Deutsche Bucht noch tiefgreifender zu verstehen und zukünftige Entwicklung prognostizieren zu können.

Langfristige morphodynamisch-numerische Simulationen komplexer Naturräume sind selbst auf heutigen Hochleistungsrechnern rechenintensiv und langwierig. Dieses Teilprojekt hatte sich deshalb zum Ziel gesetzt, im Rahmen von AufMod (HEYER und SCHROTTKE 2013) ein Simulationssystem zu entwickeln, mit dem morphodynamische Simulationen über einen Zeitraum von 100 Jahren mit überschaubaren Computerressourcen möglich sind (PUTZAR und MALCHEREK 2012). Es sollte einerseits für Parameterstudien dienen, mit denen Aussagen zum Systemverhalten getroffen werden können. Andererseits und nicht weniger wichtig, sollte damit für eine Verbesserung der Prognosefähigkeit aufgezeigt werden, welche Erweiterungen in der morphodynamischen Modellierung notwendig sind.

Grundlage des Langfrist-Morphodynamikmodells - im Weiteren als Langfristmodell bezeichnet - bildet das TELEMAC-System (HERVOUET and BATES 2000). Die seit 2010 frei erhältliche Finite-Element-Software wurde erfolgreich in das in AufMod verfolgte Simulationskonzept integriert und zudem im Rahmen des Multi-Modell-Ansatzes angewendet. Die verwendeten Modelle des TELEMAC-Systems wurden den Erfordernissen für Langfristsimulationen durch umfangreiche Programmiererweiterungen angepasst. Als anthropogener Einfluss werden Unterhaltungsmaßnahmen mit dem Modell DredgeSim simuliert. Diese Modelle bilden zusammen mit den aufbereiteten Rand- und Anfangsbedingungen das Langfristmodell.

Auf die für das Langfristmodell verwendeten Modelle wird in den folgenden Abschnitten des Kap. 1 eingegangen. Ihre wesentlichen Funktionsweisen werden lediglich

skizziert, für detaillierte Beschreibungen wird auf die zitierte Literatur verwiesen. Weiterhin wird auf die Modellkopplung und die Anfangs- und Randbedingungen eingegangen. Anschließend wird ein Ansatz vorgestellt, mit dem Langfristszenarien im Rahmen dieses Projekts modelliert wurden. Kap. 3 widmet sich der Validierung des Langfristmodells. Bei der Analyse von Volumenbilanzen wird am Beispiel des Jade-Weser-Ports der Einfluss von Baumaßnahmen skizziert. Anschließend werden in Kap. 4 eine Reihe von Szenarien zu natürlicher Morphodynamik der Deutschen Bucht über einen Zeitraum von 100 Jahren präsentiert. Im Gegensatz dazu wird in Kap. 5 gezeigt, welchen Einfluss Unterhaltungsmaßnahmen auf langfristige Sohländerungen haben können. Kap. 6 gibt einen Ausblick auf die zukünftige Langfristmodellierung.

1.1 Beschreibung der verwendeten numerischen Modelle

Zum Aufbau des prozessbasierten Langfristmodells wurden aus dem TELEMAC-System folgende Modelle ausgewählt:

- das 2D-Strömungsmodell TELEMAC-2D (HERVOUET 2007; EDF 2010b),
- das spektrale Seegangmodell TOMAWAC (EDF 2011) und
- das morphodynamische Modell SISYPHE (EDF 2010a; VILLARET et al. 2013).

Die Modellierung von Unterhaltungsmaßnahmen erfolgte mit dem Modell DredgeSim (MAERKER und MALCHEREK 2010).

1.1.1 Hydrodynamikmodell

Das TELEMAC-2D-Modell löst die tiefengemittelten Flachwassergleichungen für Strömungen mit freier Wasseroberfläche. Die wesentlichen Ergebnisse an jedem Knoten des Rechengitters sind die Wassertiefe und die tiefengemittelten Strömungsgeschwindigkeiten.

Für die Simulationen wurde das Elder-Turbulenzmodell gewählt und ein konstanter Coriolisparameter für das gesamte Modellgebiet vorgegeben. Besondere Beachtung wurde der Modellierung der Wattflächen gewidmet. Hierfür wurde das neu in TELEMAC-2D implementierte kantenbasierte Advektionsschema gewählt, welches besonders für Modellgebiete mit trockenfallenden Gitterknoten geeignet ist. Die Wattstrategie vermeidet negative Wassertiefen und ist gleichzeitig massenerhaltend. Die Sohlrauheit wird durch SISYPHE bereitgestellt und ist somit zeitlich und räumlich während einer Langfristsimulation variabel.

1.1.2 Seegangsmodell

Die Seegangsmodellierung wurde mit TOMAWAC durchgeführt. Es ist ein Seegangsmodell der dritten Generation und dient zur Simulation der Seegangsausbreitung in Küstengebieten auf Basis der Wave-Action-Gleichung. Wesentliche Ergebnisse sind die signifikante Wellenhöhe, die Peakfrequenz und die Wellenrichtung. Diese werden für morphodynamische Simulationen mit SISYPHE unter Seegangseinfluss benötigt.

Das Frequenz-Richtungs-Spektrum wurde mit 8 Frequenzen und 8 Richtungen diskretisiert. Die Simulationen für den Zeitraum 1996 bis 2006, die für die Generierung von Langfristszenarien verwendet wurden, sind ohne Gezeiteneinfluss durchgeführt worden.

1.1.3 Morphodynamikmodell

Das morphodynamische Model SISYPHE wurde zur Simulation von Sedimenttransport und der daraus resultierenden Sohlevolution verwendet.

Zur vertikalen Diskretisierung wurde das in SISYPHE implementierte Active-Layer-Konzept verwendet und der initiale Bodenaufbau durch 2 Schichten repräsentiert. Die oberste transportaktive Schicht, als Active-Layer bezeichnet, steht in direktem Kontakt mit dem angrenzenden Wasserkörper. Ihre Dicke wird als das Dreifache des mittleren Korndurchmessers definiert oder mindestens die noch vorhandene Sedimentschichtdicke. Darunter wurde eine Schicht vorgegeben, die sich bis an den nicht-erodierbaren Horizont anschließt. Beide Schichten zusammen bilden die Mächtigkeit der potentiell zum Transport verfügbaren Sedimentschicht.

Der Sedimenttransport, bestehend aus Schwebstoff- und Geschiebetransport, wird aus den von TELEMAC-2D bereitgestellten tiefengemittelten Strömungsgeschwindigkeiten und den Wassertiefen berechnet. Diese Berechnungen werden in SISYPHE für jede Sedimentfraktion einzeln durchgeführt. Die Schwebstofffracht wird durch Lösen der tiefengemittelten Transportgleichung ermittelt. Im Fall von nicht-kohäsiven Sedimenten mit $d > 64 \mu\text{m}$ wird außerdem die Geschiebefracht nach BIJKER (1971) berechnet. Sie bietet die Möglichkeit, sowohl die Tide- als auch die Seegangswirkung zu berücksichtigen.

Auf Grundlage des fraktionierten Sedimenttransportes wird wiederum die Sohlevolutionsgleichung für jede Sedimentfraktion einzeln gelöst und die Zusammensetzung der Sedimentbelegung aktualisiert. Die Summe der Sohlevolutionen jeder Fraktion ergibt letztendlich die gesamte Sohländerung an einem Berechnungsknoten nach einem Zeitschritt.

1.1.4 Modellierung von Unterhaltungsmaßnahmen

Anthropogene Effekte, insbesondere die Unterhaltungsmaßnahmen von Seeschiffahrtsstraßen, können einen entscheidenden Einfluss auf den Sedimenthaushalt nehmen. Mit dem Modul DredgeSim, entwickelt von der Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe, in Kooperation mit dem Institut für Wasserwesen der Universität der Bundeswehr, München, können Bagger- und Verklappstrategien realitätsnah modelliert werden. In Verbindung mit TELEMAC-2D und SISYPHE bietet DredgeSim die Möglichkeit, Sedimentmanagement zu optimieren und effizienter zu planen.

In AufMod wurden für das Langfristmodell für die drei großen deutschen Ästuare Elbe, Weser und Ems Baggerkriterien definiert, die jeweils aktuelle Unterhaltungsstrategie enthalten. Im Wesentlichen wird eine Solltiefe entlang der Fahrrinne vorgeben, die bei Überschreiten zur Entnahme von Sediment führt. Abb. 19 zeigt dies am Beispiel der Elbe.

In einem Intervall von einem Jahr werden die Baggerkriterien geprüft. Das entnommene Sediment kann wieder in fest definierte Gebiete verklappt oder gänzlich aus dem Simulationsmodell entnommen werden. Damit steht für morphodynamische Langfrist-

simulationen eine Vielzahl an Modellierungsmöglichkeiten von Unterhaltungsmaßnahmen zur Verfügung. Für eine genaue Beschreibung wird auf HEYER und SCHROTTKE (2013) verwiesen.

1.2 Modellkopplung

Das Langfristmodell wird durch TELEMAC-2D gesteuert, das mit SISYPHE direkt gekoppelt ist. Für die direkte Kopplung hat sich als Zeitschritt 200 s bewährt und wurde für alle in diesem Artikel beschriebenen Simulationsergebnisse verwendet.

Zu jedem Zeitschritt werden die von TELEMAC-2D berechneten Wassertiefen und Strömungsgeschwindigkeiten an SISYPHE übermittelt. Damit wird der Sedimenttransport als Geschiebe und als Schwebstoff berechnet. Anschließend wird die Exnergleichung für jede Sedimentfraktion gelöst. Das Ergebnis des morphodynamischen Schrittes ist die Sohlevolution an jedem Gitterknoten und die Fraktionierung des Sediments. Im Fall einer Simulation mit DredgeSim, welches intern mit SISYPHE gekoppelt ist, wird nachfolgend die Wirkung von Baggern und Verklappen simuliert. Am Ende eines Zeitschrittes werden die Sohlagen und die Sohrrauheiten von SISYPHE an TELEMAC-2D gesendet. Anschließend wird die Simulation mit aktualisierter Bathymetrie einen weiteren Zeitschritt fortgeführt oder bei Erreichen der Simulationsdauer beendet.

Für Simulationen mit Seegangseinfluss wurde ein entkoppelter Ansatz entwickelt. Der Seegang wurde a priori mit dem spektralen Seegangsmodell TOMAWAC gerechnet und die Seegangparameter in Dateien abgelegt. Bei Simulationen mit Welleneinfluss können diese in Abhängigkeit vom gewählten Szenario vom Langfristmodell eingelesen werden. Daraus werden in SISYPHE die seegangsinduzierten Sohlschubspannungen für den aktuellen Zeitschritt bestimmt und für die Sedimenttransportberechnungen verwendet.

Zur Beschleunigung der Simulationen greift das Langfristmodell auf die MPI-Fähigkeiten der TELEMAC-Suite zurück (AUDOUIN et al. 2011). Für eine Modellzeit von 100 Jahren mit Tide-, Wind-, und Seegangsbelastung sowie Fernwellen beträgt die Simulationsdauer bei einem Zeitschritt von 200 s und mit 60 Prozessoren etwa 12 Tage. Morphodynamische Beschleunigungsverfahren werden nicht angewendet.

1.3 Gitternetz, Rand- und Anfangsbedingungen

Das Gitternetz besteht aus ca. 80.000 Dreieckselementen und wurde im Rahmen von AufMod zur Verfügung gestellt. Das Modellgebiet umfasst somit die Nordsee, den Englischen Kanal und den westlichen Teil der Ostsee. Das Gitternetz wurde einheitlich für Simulationen mit TELEMAC-2D, TOMAWAC und SISYPHE verwendet.

Daneben wurde ein hochaufgelöstes Gitternetz entworfen (Feinmodell), das im Küstenbereich eine Auflösung von 100 m aufweist und dasselbe Gebiet wie das Basismodell umfasst. Dieses Feinmodell mit einer Elementanzahl von 2×10^6 wurde in Zusammenarbeit mit Projektpartnern zur Analyse von detaillierten Sedimenttransportprozessen verwendet.

Die Anfangs- und Randbedingungen entsprechen den im Gesamtprojekt verwendeten Daten. Abweichend von diesen Vorgaben wurde hier jeweils ein konstanter Oberwasserzufluss berücksichtigt für:

- die Elbe mit 870 m³/s,
- die Ems mit 80,1 m³/s,
- die Weser mit 324,0 m³/s,
- den Rhein mit 2330 m³/s und
- die Themse mit 65,8 m³/s.

Die initiale Bathymetrie wurde durch das Funktionale Bodenmodell (FBM, siehe MILBRADT et al. 2015) generiert und für verschiedene Jahre bereitgestellt. Abb. 1 zeigt die initiale Bathymetrie für das Jahr 2006 für das Grob- und Feinmodell. Die initiale Sedimentmächtigkeit wurde – wo vorhanden – auf Grundlage der holozänen Basis ermittelt oder als konstant mit 20 m im gesamten Modellgebiet angenommen.

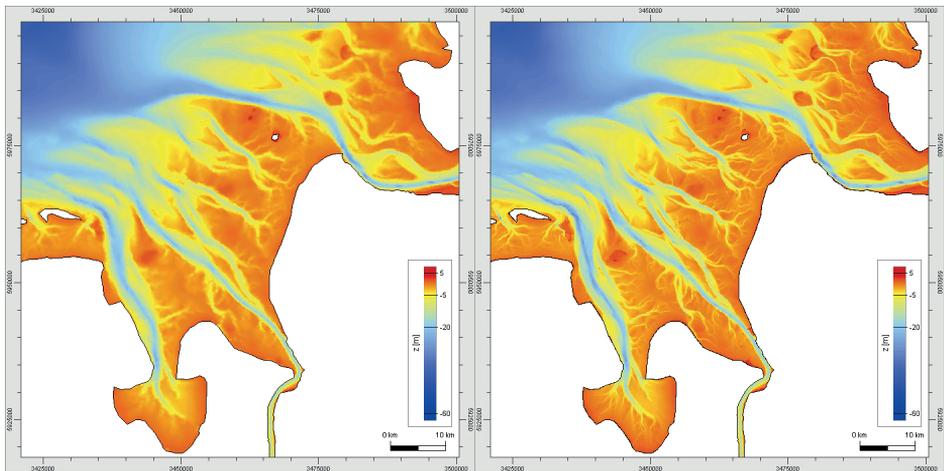


Abbildung 1: Initiale Bathymetrie von 2006 im Bereich der Elbe-Weser-Mündung: (links) Grobmodell mit 80.000 Elementen; (rechts) Feinmodell mit 2×10^6 Elementen.

Die initiale Sedimentbelegung basiert auf den anisotropen Sedimentdaten des FBM. Die Zusammensetzung des Gewässerbodens wurde durch 8 Sedimentfraktionen diskretisiert:

- Very coarse sand mit $d = 1.4 \times 10^{-3}$ m
- Coarse sand mit $d = 7 \times 10^{-4}$ m
- Medium sand mit $d = 3.5 \times 10^{-4}$ m
- Fine sand mit $d = 1.7 \times 10^{-4}$ m
- Very fine sand mit $d = 8.8 \times 10^{-5}$ m
- Coarse silt mit $d = 4.4 \times 10^{-5}$ m
- Fine silt mit $d = 1.1 \times 10^{-5}$ m
- Clay mit $d = 1.9 \times 10^{-6}$ m

Der daraus berechnete mittlere Korndurchmesser wird in Abb. 2 jeweils für das Grob- und das Feinmodell dargestellt. Der in das Modellgebiet eintretende Sedimentfluss wurde anhand von Gleichgewichtsbeziehungen vorgegeben.

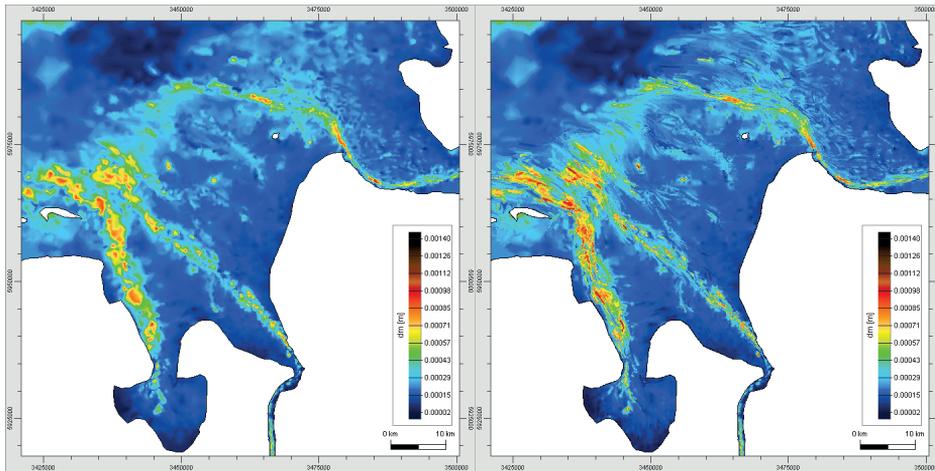


Abbildung 2: Mittlerer Korndurchmesser der initialen Sedimentbelegung im Bereich der Elbe-Weser-Mündung auf Basis anisotrop interpolierter Sedimentdaten: (links) Grobmodell mit 80.000 Elementen; (rechts) Feinmodell mit 2×10^6 Elementen.

1.4 Modellierung von langfristigen Szenarien

Ein Aspekt dieses Teilprojekts war die Entwicklung von Szenarien für langfristige Simulationen. Das Langfristmodell wurde so konzipiert, dass Simulationen mit den Belastungen aus Gezeiten, Wind, Seegang, Fernwellen und Unterhaltungsmaßnahmen für Systemstudien separat oder in beliebiger Kombination durchgeführt werden können.

Während die periodische Wasserspiegelauslenkung der Gezeiten an den offenen Seerändern durch Partialtidensynthese in die Zukunft fortgeführt werden kann, musste für die anderen natürlichen Belastungen ein alternativer Weg gewählt werden, um realistische Szenarien zu entwickeln.

Grundlage bildeten die Windfelder der Jahre 1996 bis 2006 und die daraus mit **TOMAWAC** a priori berechneten Seegangsfelder sowie die einlaufenden Fernwellen an den offenen Seerändern. Aus diesem Datenpool wurden Teildatensätze für bestimmte Perioden, z. B. für das windarme Jahr 2006 oder das windreiche Jahr 1998, generiert. Die **TELEMAC**-Programme wurden für 100-jährige Simulationen so modifiziert, dass ein Teildatensatz synchron wiederholt wird. Im Falle einer Kopplung mit **DredgeSim** wurden die implementierten Unterhaltungsmaßnahmen auf den Simulationszeitraum ausgedehnt. Auf diese Weise konnten mit realistischen Belastungen aus dem Zeitraum 1996 bis 2006 langfristige Simulationen über einen Modellzeitraum von 100 Jahren für verschiedene Szenarien durchgeführt werden.

2 Validierung des Langfristmodells

Die Validierung des Langfristmodells wurde für einen Zeitraum von einem Jahr für die Hydrodynamik und den Seegang durchgeführt. Für die Sedimentdynamik wurde eine längere Periode gewählt. Auf Basis von Daten des FBMs wurde der Zeitraum 2006 bis 2012 zur Analyse herangezogen.

2.1 Hydrodynamik

Das Simulationsmodell wurde für das Jahr 2006 kalibriert und am Beispiel des Jahres 2001 validiert. Die Simulationen wurden mit Tide, Wind, Fernwellen und Oberwassereinfluss sowie mit fester Sohle durchgeführt.

Die Sohlrauheit wurde aus dem mittleren Korndurchmesser auf Basis der aus dem FBM generierten Sedimentbelegung und einem globalen Rauheitsparameter von 0,0125 m, der durch die Kalibrierung ermittelt wurde, berechnet. Um den Eintrittszeitpunkt der Tide zu optimieren, wurde die Sohlage außerhalb der Deutschen Bucht modifiziert. In diesem Gebiet wurde die Sohlage mit einem Faktor von 1,1 multipliziert.

Für einen Vergleich der Simulationsergebnisse mit Messungen wurden 27 Datensätze von den im Projekt AufMod bereitgestellten Pegeldata ausgewählt. Der Schwerpunkt wurde hierbei auf die Pegel der Deutschen Bucht gelegt. Bei der Ergebnisanalyse muss beachtet werden, dass für die Pegel Hooksielplate, Mellumplate und Wangerooge-Nord keine Daten für den Zeitraum 2001 vorlagen.

Die Ergebnisse der Partialtidenanalyse wurden mit dem Matlab-Paket T_Tide (PAWLOWICZ et al. 2002) bearbeitet und sind für die Amplitude der M2-Gezeit in Abb. 3 dargestellt. Für 2006 beträgt die mittlere absolute Abweichung (MAE) über alle Pegel 0,0412 m. Der geringste Fehler tritt am Pegel Bake A mit $3,9 \times 10^{-4}$ m auf. Die größte Differenz liegt am Pegel Cromer mit 0,18 m vor.

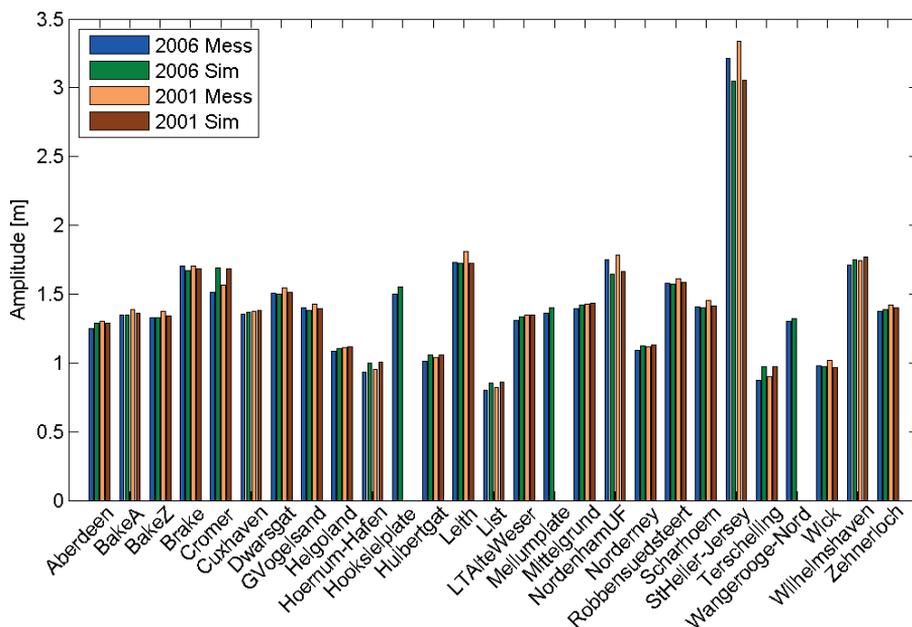


Abbildung 3: M2-Amplitude ausgewählter Pegel für die Nordsee und Vergleich mit TELEMAC-2D Simulation.

Ein ähnliches Bild ergibt sich für das Simulationsjahr 2001. Der MAE der M2-Amplitude liegt in derselben Größenordnung und beträgt 0,0479 m. Ebenso ist die minimale Abweichung mit $7,7 \times 10^{-4}$ m am Pegel Helgoland sehr gering. Der maximale Fehler tritt am

Pegel St. Heller-Jersey auf, ist aber mit 0,29 m größer als im Vergleich zum Simulationsjahr 2006.

Die statistischen Kennwerte zur Analyse der Wasserspiegellage sind in Tab. 1 zusammengefasst und als Mittelwerte über alle Pegel sowie als Minimal- und Maximalwerte aufgeführt. Abb. 4 zeigt stellvertretend den RMSE für die ausgewählten Pegel. Für das Jahr 2006 beträgt der RMSE 0,23 m mit einer Bandbreite von 0,17 m für den Pegel Huibertgat bis 0,46 m, der am Pegel St. Heller-Jersey zu verzeichnen ist. Der MAE liegt naturgemäß darunter und beträgt als Mittelwert aller Pegel 0,18 m. Die simulierte Wasserspiegellage liegt im Mittel um 0,05 m über der gemessenen; die Korrelation ist nahezu 1.

Tabelle 1: Zusammenfassung statistischer Kennwerte der Wasserspiegellage für die Jahre 2006 und 2001.

Jahr	RMSE			MAE			Bias			Korrelation		
	Ø	min	max	Ø	min	max	Ø	min	max	Ø	Min	max
2006	0.23	0.17	0.46	0.18	0.13	0.36	0.05	-0.17	0.17	0.983	0.969	0.989
2001	0.25	0.18	0.59	0.20	0.14	0.47	0.08	0.02	0.17	0.979	0.959	0.986

Der RMSE für das Jahr 2001 ist um 0,02 m geringfügig höher als 2001. Dagegen ist bei der größten Abweichung eine deutliche Zunahme auf 0,59 m zu verzeichnen. Auch der gemittelte MAE hat zugenommen und beträgt 0,20 m. Die Extremwerte unterscheiden sich aber nur wenig von denen des Jahres 2006. Dagegen liegt die simulierte Wasserspiegellage im Mittel systematisch über den Messungen und die Korrelation ist etwas geringer.

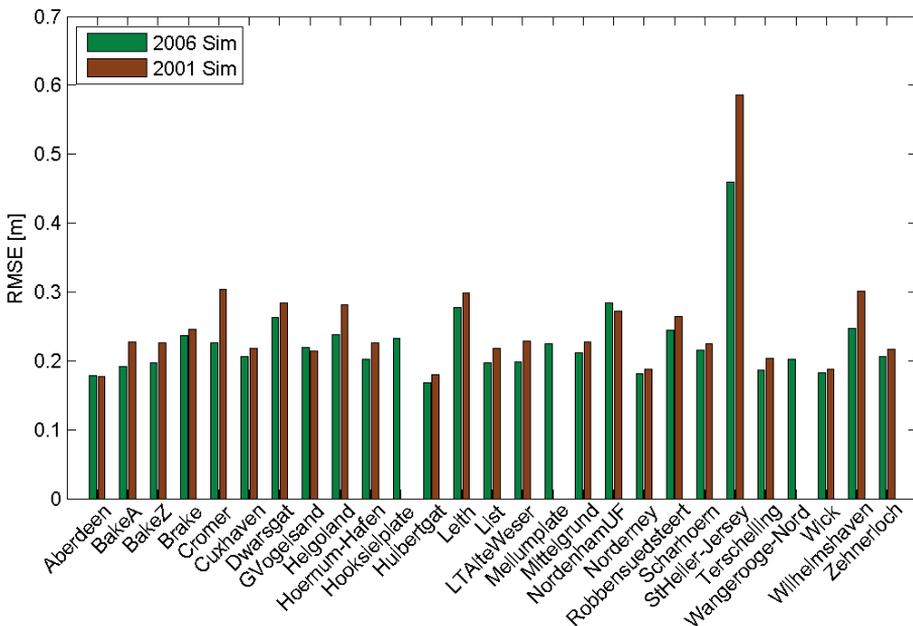


Abbildung 4: RMSE ausgewählter Pegel für die Nordsee für die Kalibrierung (2006) und die Validierung (2001).

2.2 Seegang

Für die Validierung des spektralen Seegangmodells TOMAWAC standen Daten der Pegel Elbe, FINO und Helgoland aus dem Jahr 2006 zur Verfügung. Sie wiesen allerdings teils beträchtliche Datenlücken auf.

In den Abb. 5 bis 7 sind die Messungen und Simulationsergebnisse dargestellt. Der Verlauf der signifikanten Wellenhöhe H_s wird bei allen 3 Pegeln gut wiedergegeben. Der RMSE ist maximal 0,38 m am Pegel FINO, ebenso der MAE mit 0,29 m (vgl. Tab. 2). Dieser Pegel weist allerdings die größten Datenlücken auf und ist damit weniger repräsentativ für das Jahr 2006 als die anderen beiden Pegel. Der Bias zeigt, dass die Wellenhöhe grundsätzlich unterschätzt wird, wobei aber die Korrelation nicht unter 0,89 fällt.

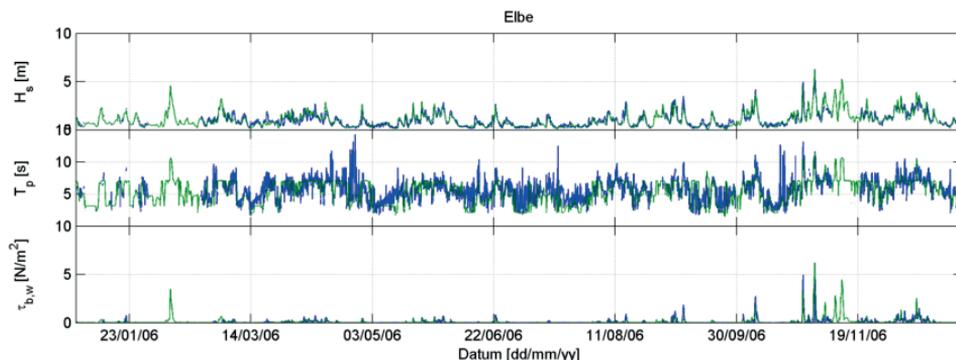


Abbildung 5: Vergleich gemessener (blau) zu simulierter (grün) signifikanter Wellenhöhe H_s [m], Peakperiode T_p [s] und der daraus berechneten Sohlschubspannung $\tau_{b,w}$ [N/m²] für den Pegel Elbe.

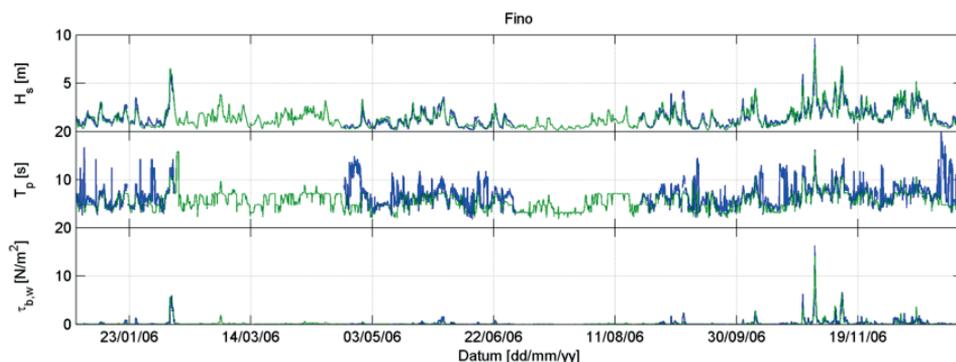


Abbildung 6: Vergleich gemessener (blau) zu simulierter (grün) signifikanter Wellenhöhe H_s [m], Peakperiode T_p [s] und der daraus berechneten Sohlschubspannung $\tau_{b,w}$ [N/m²] für den Pegel FINO.

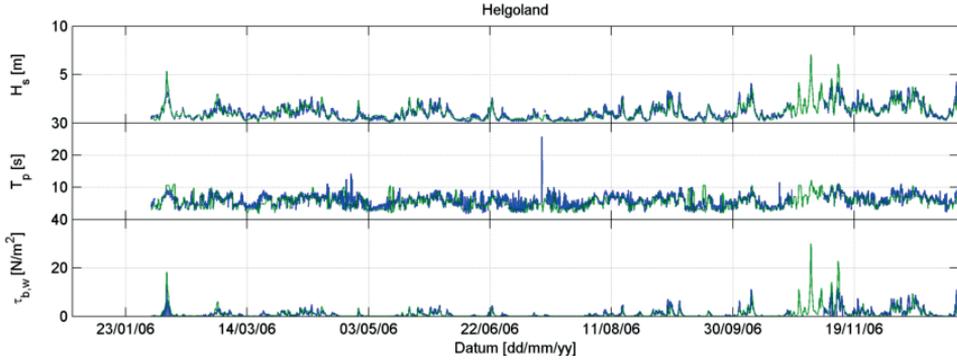


Abbildung 7: Vergleich gemessener (blau) zu simulierter (grün) signifikanter Wellenhöhe H_s [m], Peakperiode T_p [s] und der daraus berechneten Sohlschubspannung $\tau_{b,w}$ [N/m²] für den Pegel Helgoland.

Die Übereinstimmung zwischen gemessener und simulierter Peakperiode fällt dagegen geringer aus. Der RMSE beträgt bis zu 2,65 s und die Wellenperiode wird deutlich unterschätzt. Das zeigt sich auch an der Korrelation. Sie fällt bis auf 0,39 am Pegel FINO und auf ca. 0,6 bei den anderen beiden Pegeln ab.

Tabelle 2: Statistische Kennwerte von Seegangparameter und der daraus berechneten Sohlschubspannung für das Jahr 2006 (Hel. = Helgoland).

Parameter	RMSE			MAE			Bias			Korrelation		
	Elbe	FINO	Hel.	Elbe	FINO	Hel.	Elbe	FINO	Hel.	Elbe	FINO	Hel.
H_s	0.32	0.38	0.35	0.21	0.29	0.24	-0.03	-0.05	-0.08	0.90	0.94	0.89
T_p	1.51	2.65	1.62	1.10	1.58	1.13	-0.34	-1.23	-0.45	0.63	0.39	0.61
$\tau_{b,w}$	0.18	0.31	0.97	0.06	0.13	0.44	-0.01	-0.06	-0.16	0.81	0.92	0.81

Für die morphodynamische Simulation ist besonders die durch Wellen erzeugte Sohlschubspannung von Bedeutung. Die Abb. 5 bis 7 zeigen diese für die drei Pegel zusammen mit den gemessenen Seegangparametern und mit den durch TOMAWAC berechneten Seeganggrößen. Obwohl die Peakperiode deutlich unterschätzt wird, kann die Sohlschubspannung gut simuliert werden. Das unterstützen auch die statistischen Kennwerte in Tab. 2. Auffällig sind allerdings die vergleichsweise hohen Werte für RMSE von 0,97 m und MAE von 0,44 m des Pegels Helgoland. Dies liegt an der größeren Bandbreite der Sohlschubspannung, die für diesen Pegel berechnet wurde. Da die Eingangsparameter bereits unterschätzt wurden, zeigt auch die simulierte Sohlschubspannung im Mittel diesen Trend.

2.3 Sedimentdynamik

Die Validierung des Langfristmodells wurde in Anlehnung des im Rahmen des Multimodell-Ansatzes angewendeten Konzeptes vorgenommen. Die Grundlage für die nachfolgenden Ergebnisse bilden somit auf das grobe Gitternetz volumentreu interpolierte Sohllagen. Die Daten wurden projektintern durch das FBM generiert und umfassen den Zeitraum 1996 bis 2012. Aufgrund ständiger Ergänzungen der Datenbank des FBMs können

nicht unerhebliche Abweichungen mit anderen Auswertungen im AufMod auftreten. Als Maske wurde im Hinblick auf die Analyse großräumiger und mittel- bis langfristiger Prozesse ein Gebiet bis zur 20 m-Tiefenlinie gewählt, das den küstennahen Bereich abdeckt sowie die Mündungsbereiche der Ästuare Elbe, Ems und Weser umfasst (Abb. 13).

Für den Zeitraum von 2006 bis 2012 verzeichnet das FBM eine Volumenzunahme von $82,3 \times 10^6 \text{ m}^3$ (Tab. 3). Das sedimentierte Volumen beträgt $1.148,8 \times 10^6 \text{ m}^3$ und erodiert werden demnach $1.066,5 \times 10^6 \text{ m}^3$. Die mit dem Langfristmodell simulierten Volumina folgen diesem Trend, fallen aber geringer aus. In der Bilanz ergibt sich eine Volumenzunahme von $21,1 \times 10^6 \text{ m}^3$. Das entspricht einem mittleren jährlichen Sedimenteintrag von ca. 9,3 Mio. t/a bei einer Sedimentdichte von 2650 kg/m^3 . Die simulierten Volumina betragen für die Deposition $384,0 \times 10^6 \text{ m}^3$ und Erosion $362,9 \times 10^6 \text{ m}^3$. Sie sind somit etwa ein Drittel so hoch wie die des FBMs.

Tabelle 3: Kennwerte zur Sedimentdynamik für den Zeitraum von 2006 bis 2012 (Grenzwert Sohländerung von 0,0 cm). Die in Klammern stehenden Werte wurden ohne den Bereich um den Jade-Weser-Port ermittelt.

Modell	Volumen in Mio. m^3			Sohländerung		
	Σ	Deposition	Erosion	\emptyset	min	max
FBM	82,3	1.148,8	-1.066,5	0,0062	-24,3	14,2
	(72,9)	(1.118,1)	(-1.045,2)	(0,0055)	(-10,8)	(10,4)
Langfristmodell	21,1	384,0	-362,9	0,0016	-9,4	9,5
	(21,5)	(383,8)	(-362,3)	(0,0016)	(-9,4)	(9,5)

Die mittlere Sohländerung beträgt simuliert 0,0016 m und ist somit geringer als die des FBM mit 0,0062 m. Die Maximalwerte stimmen in der Größenordnung tendenziell überein, während eine weitaus größere Erosion aus den Daten des FBMs abgeleitet werden kann.

Eine Analyse dieser Diskrepanz zeigte, dass die Extremwerte der Sohlage im Bereich des Jade-Weser-Ports auftreten. Der Bau dieses Großprojekts ist deutlich in den Sohlagen des FBMs zu erkennen, im Simulationsmodell ist eine Modellierung jedoch nicht ohne weiteres möglich. Um trotzdem den Einfluss abschätzen zu können, wurde das Gebiet um den Jade-Weser-Port aus der Analyse ausgeschlossen. Tab. 3 stellt die Ergebnisse einander gegenüber. Hierbei soll aufgrund der Unsicherheiten des FBMs angemerkt werden, dass diese Werte als Richtwerte angesehen werden müssen. Aus ihr geht hervor, dass sich die Volumina und die Sohländerungen des FBMs deutlich ändern, während die Simulationsergebnisse nahezu gleich bleiben. Insbesondere beträgt die maximale Sohländerung nur noch etwa 10,4 m und die minimale Sohländerung ca. -10,8 m. Simulation und FBM stimmen somit wesentlich besser überein und zeigen, dass bauliche Maßnahmen die Validierung erheblich verfälschen können.

Interessant für eine Prädiktion sind nicht nur quantitative Aussagen zu den Sedimentvolumina, sondern auch ihr zeitlicher Verlauf. Dazu wurden für den Zeitraum 2006 bis 2012 jährliche Volumenanalysen durchgeführt und die Ergebnisse des FBMs und der Simulation verglichen. Die Volumina enthalten auch das Gebiet des Jade-Weser-Ports.

Abb. 8 zeigt das Ergebnis dieser Auswertung. Die Verläufe sind im Prinzip ähnlich. Beim FBM könnte man annehmen, dass die Deposition ähnlich einer Wurzelfunktion verläuft und einem Grenzwert entgegenstrebt. Gleiches, nur an der x-Achse gespiegelt,

lässt sich für den Erosionsverlauf feststellen. Die Simulationsergebnisse zeigen im Zeitraum von 2006 bis 2012 nicht diese Tendenz, sondern verlaufen nahezu linear. Die Bilanz des FBMs ergibt ab 2009 eine Abnahme des Sedimentvolumens. Die Simulationsergebnisse prädikieren dagegen eine generelle gleichmäßige Zunahme auf Grundlage der errechneten Sedimentbilanzen.

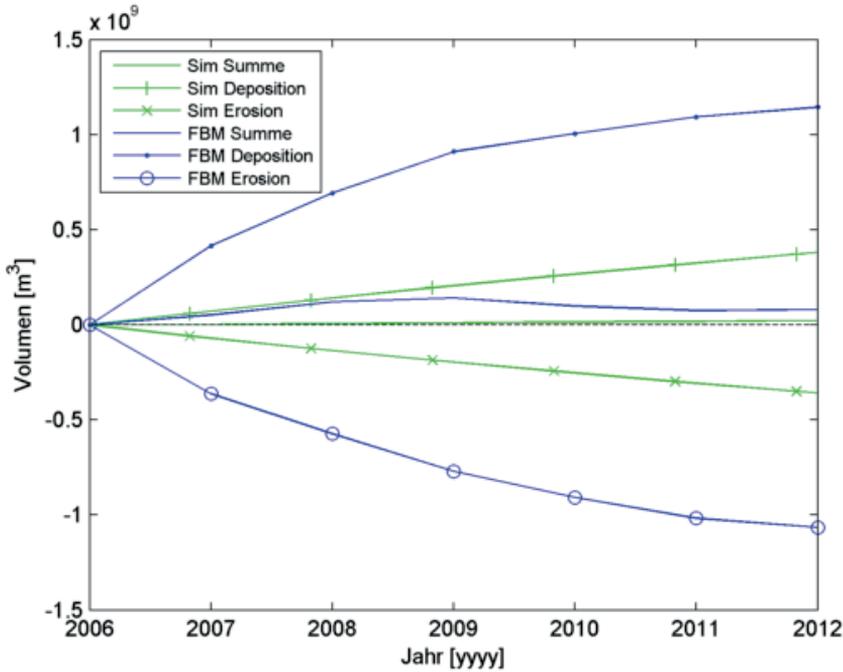


Abbildung 8: Vergleich der Sedimentvolumina des Langfristmodells (Sim) mit denen des Funktionalen Bodenmodells (FBM).

Da die Aussagekraft der Daten des FBMs von den zugrunde liegenden Datensätzen abhängt und sie mit räumlich und zeitlich veränderlichen Unsicherheiten behaftet sind, kann die Analyse nur einen Anhaltspunkt geben und die prinzipielle Vorgehensweise einer Validierung skizzieren. Es lässt sich aber festhalten, dass von 2006 bis 2012 eine Volumenzunahme vorliegt und diese auch vom Simulationsmodell wiedergegeben wird. Ebenso wird eine befriedigende Übereinstimmung zwischen großräumig erodiertem und deponiertem Sediment für den küstennahen Bereich erzielt.

Für zukünftige Untersuchungen sollte die quantitative Prognosefähigkeit des Langfristmodells, z. B. auf Grundlage von Parameterstudien, genauer abgeschätzt und ggf. verbessert werden. Anthropogene Einflüsse wie Baumaßnahmen oder auch Unterhaltungsmaßnahmen sind dabei zwingend zu berücksichtigen.

3 Szenarien zur ungestörten Sedimentdynamik

Um die Anwendbarkeit des Langfristmodells für Analysen der langfristigen und großräumigen Sedimenttransportprozesse zu demonstrieren, wurden folgende Szenarien untersucht:

- Meteorologie 2006: Belastung mit Wind und Seegang des Jahres 2006
- Meteorologie 1998: Belastung mit Wind und Seegang des Jahres 1998
- Meeresspiegelanstieg: tidegetriebene Simulationen ohne und mit einem Meeresspiegelanstieg von 80 cm/100 a

Bei allen Simulationen wird die Tide eingesteuert und die Bathymetrie von 2006 verwendet. Unterhaltungsmaßnahmen werden nicht simuliert, so dass eine rein natürliche Morphodynamik gerechnet wird. Der Simulationszeitraum beträgt 100 Jahre.

3.1 Szenario Meteorologie 2006

Das Szenario der Meteorologie 2006 wurde in AufMod im Rahmen des Multi-Modell-Ansatzes als Validierungszeitraum verwendet. Es ist ein relativ windarmes Jahr und bietet sich somit als Vergleich zu dem windreichen Jahr 1998 an. Entsprechend dem Konzept des Langfristmodells werden für die 100-jährigen Simulationen die Wind- und Seegangsfelder des Kalenderjahrs synchron bis zum Simulationende wiederholt.

3.1.1 Sohlentwicklung

Die Sohlentwicklung nach 100 Jahren Simulationszeit ist in Abb. 9 rechts dargestellt. Im Vergleich zur Ausgangsbathymetrie (Abb. 9 links) lassen sich nur geringe großräumige Änderungen der Morphologie feststellen. Hervorzuheben ist das Gebiet südöstlich von Helgoland, in dem sich langfristig rinnenartige Vertiefungen gebildet haben.

Betrachtet man die Sohlevolution (Abb. 10 links), lassen sich Gebiete hoher Morphodynamik von denen geringer unterscheiden. Unterhalb der 20 m-Isobathe ist sie gering bis nicht vorhanden. Das führt im Bereich des ehemaligen Elbe-Urstromtals sogar zur Bildung einer ausgedehnten Depositionsfläche. Sie reicht von südlich Helgoland bis zum nordwestlichen Bereich der Deutschen Bucht, wobei die Breite fächerförmig zunimmt. In diesem Gebiet erreichen die Ablagerungen bis zu 0,5 m.

Morphodynamisch am aktivsten sind die küstennahen Bereiche mit den Seegaten und Rinnen sowie die Ästuare. Im Bereich der Ostfriesischen Inseln sind Sohländerungen von -1,5 m bis 3 m insbesondere bei den Ebbdeltas zu verzeichnen, während auf den rückwärtigen Wattgebieten überwiegend Sediment deponiert wird.

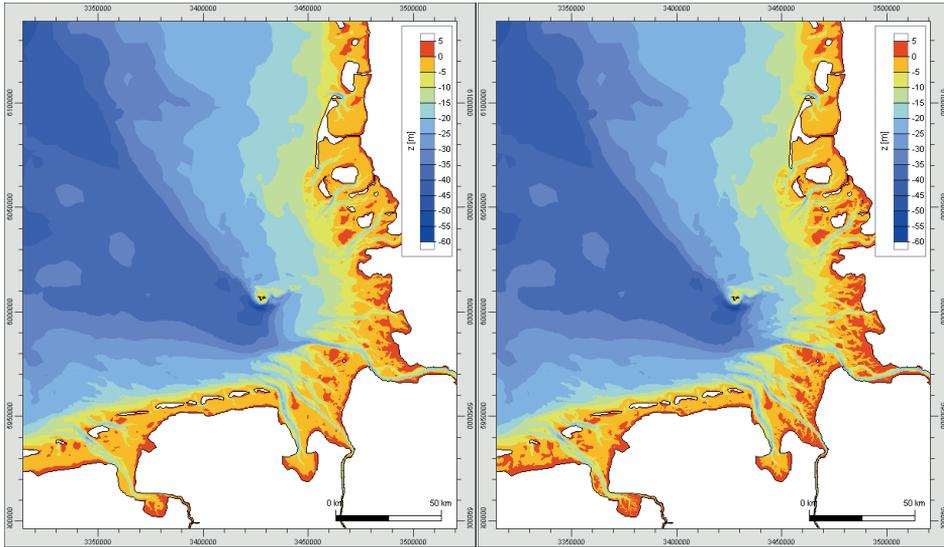


Abbildung 9: Szenario 2006: (links) initiale Sohlage; (rechts) Sohlage nach 100 Jahren.

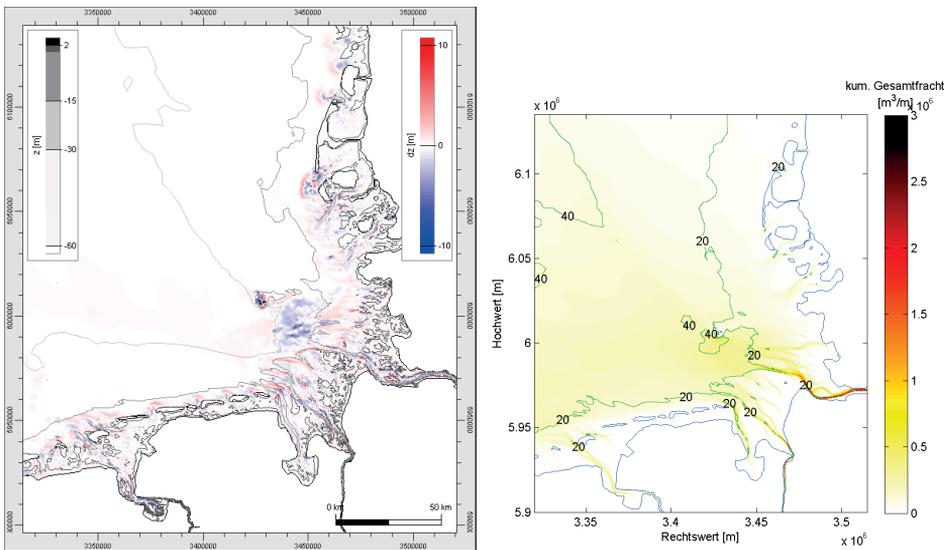


Abbildung 10: Szenario 2006: (links) simulierte Sohlevolution nach 100 Jahren; (rechts) kumulierte Geschiebefracht nach 100 Jahren. Dargestellt sind auch die 40 m- und die 20 m-Isobathen bezogen auf NHN.

Eine hohe Dynamik zeigen das Elbe-Weser-Mündungsgebiet und die Dithmarscher Bucht (Abb. 10 links). Im Bereich der Außenjade lässt sich eine Sohlevolution (Rot) von 9,3 m bis -6,0 m bei gleichzeitiger Verlagerung in Richtung Osten verzeichnen. Ebenso lässt sich diese Tendenz auf die den Watten vorgelagerten und besonders dem Seegang

ausgesetzten Gebieten, z. B. Scharhörnriff und Nordergründe, beobachten. Die Sohländerungen sind geringer, liegen aber noch zwischen 3,6 m bis -2,5 m. Insgesamt findet eine Südwest-Nordost-Verlagerung des Sedimentvorkommens im Bereich der Elbe-Weser-Mündung statt. Auf den angrenzenden Wattgebieten wird Sediment mit einer Mächtigkeit von 0,05 m bis 0,4 m abgelagert, stellenweise auch bis 1 m. In der Dithmarscher Bucht sind es vor allem Norder- und Süderpiep, Tertiussand und Blauortsand, die morphodynamisch aktiv sind.

Weiter nördlich im Gebiet der Nordfriesischen Inseln sind die Sohländerungen weit aus geringer. Sie betragen durchschnittlich etwa 2 m und erreichen nur vereinzelt größere Werte, wie z. B. in der Norderhever (2,9 m) oder in der Süderau (8,6 m bis -3,9 m). Das ausgedehnteste Erosions- und Depositionsgebiet befindet sich südlich von Sylt. Hier finden großflächigere Sedimentumlagerungen statt, die zu Sohländerungen von 12,5 m bis -11,4 m führen. Hierzu sollten weitere numerische Analysen durchgeführt werden, um die Naturähnlichkeit dieser Maximalwerte abzusichern.

3.1.2 Kumulierter Sedimenttransport

Die örtlich sehr unterschiedliche Sedimentdynamik spiegelt Abb. 10 rechts wieder, in der die kumulierte absolute Sedimenttransportrate der Gesamtfracht dargestellt ist.

Großräumig betrachtet liegt ein signifikanter Transport im westlichen und südlichen Teil der Deutschen Bucht vor (ca. 1000 m²/s bis 2000 m²/s). Die Depositionszone im ehemaligen Elbe-Urstromtal lässt sich anhand des Musters wiedererkennen. Im Bereich der Nordfriesischen Inseln und dem vorgelagerten Küstenabschnitt sind die Beträge weitaus geringer; Werte von 1000 m²/s werden nicht überschritten.

Die höchsten Werte treten im Bereich der Rinnen und Ästuar auf. Hervorzuheben sind die Mündungsbereiche von Elbe (ca. 15 000 m²/s), Ems (ca. 4000 m²/s) und Weser (ca. 12 000 m²/s) sowie der Jade (ca. 3500 m²/s).

3.1.3 Residualer Sedimenttransport

Für die Analyse von ein- und ausgetragenem Sediment wurden residuale Ergebnisgrößen generiert und daraus Transportpfade beginnend auf einem gleichmäßigen Raster abgeleitet.

In Abb. 11 links ist zunächst die residuale Strömungsgeschwindigkeit des Wasserkörpers dargestellt. Man erkennt, dass die generelle Richtung der Trajektorien nach Norden führt. Von Westen kommend knicken die Pfade vor Helgoland ab. Die Pfade aus dem Inneren der Deutschen Bucht verlaufen zunächst in nordwestliche Richtung um dann Richtung Norden und Nordosten das Untersuchungsgebiet zu verlassen. Nördlich von Helgoland bildet sich nahezu ein Wirbel aus.

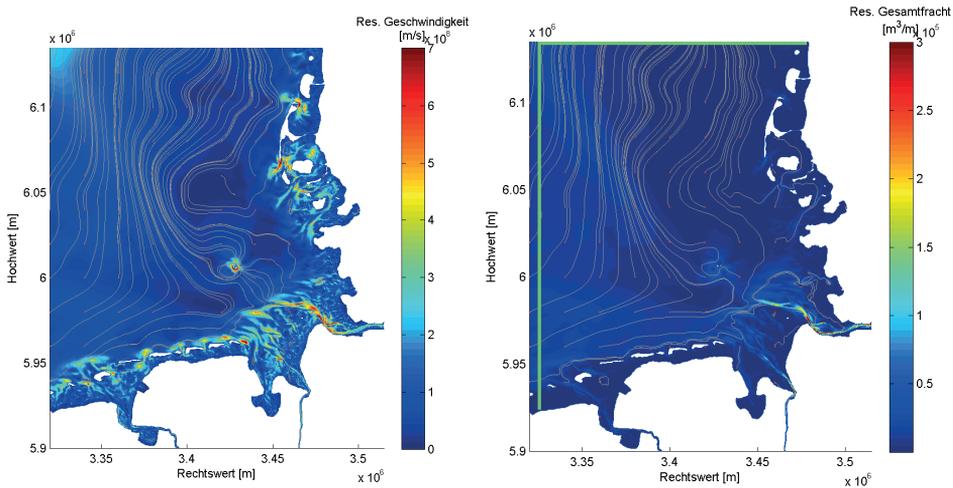


Abbildung 11: Szenario 2006: (links) residuale Strömungsgeschwindigkeit; (rechts) Gesamtfracht sowie Lage der Profile West und Nord (grüne Linien).

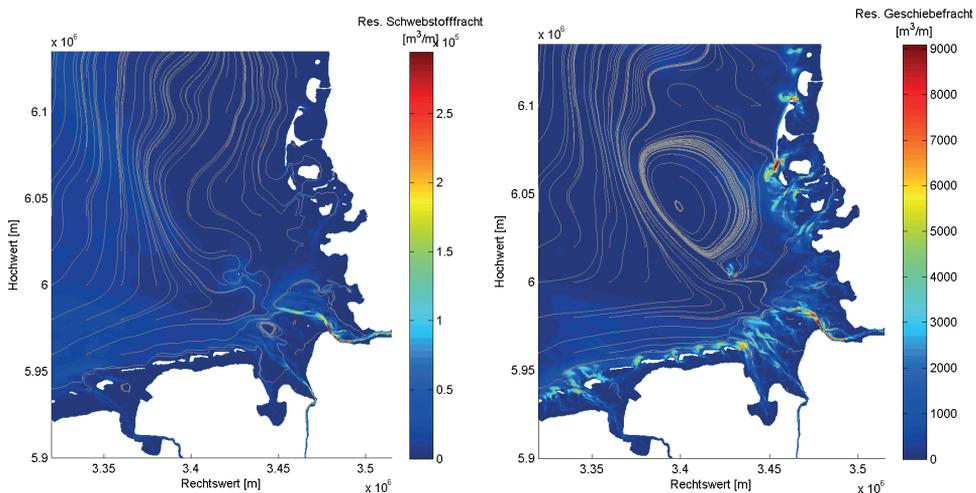


Abbildung 12: Szenario 2006: residuale Sedimenttransport aufgeschlüsselt nach Transportmodus; (links) Schwebstoff- und (rechts) Geschiebefracht.

Diesem Bild entspricht größtenteils auch die residuale Gesamtfracht (Abb. 11 rechts) als Summe aus Schwebstoff- und Geschiebefracht. Auch hier knicken die Trajektorien vor Helgoland nach Norden ab. Vor den Ostfriesischen Inseln existiert ein schmales residuales Transportband, über das Sediment bis in das Innere der Deutschen Bucht gelangt. Die Pfade hier lassen vermuten, dass Sediment nur umgelagert, aber nicht großräumig weiter transportiert wird. Ganz offensichtlich abgeschnitten von den in das Untersuchungsgebiet eintretenden Transportpfaden ist der Küstenbereich vor den Nordfriesischen Inseln. Bilanziert man die residualen Transporte nach 100 Jahren über die Ränder der Deutschen

Bucht, dann lässt sich zeigen, dass über den Westrand $1.706,32 \times 10^6 \text{ m}^3$ Sediment eingetragen und über den Nordrand $283,78 \times 10^6 \text{ m}^3$ ausgetragen werden (Tab. 4). Die Differenz von $1.422,54 \times 10^6 \text{ m}^3$ verbleibt als Eintrag in das Untersuchungsgebiet.

Tabelle 4: Volumenbilanzen in Mio. m^3 nach Transportmodus und Profil. Ein negatives Vorzeichen bedeutet Austrag aus der Deutschen Bucht.

Profil	Transportmodus		
	Gesamtfracht	Schwebstoff	Geschiebe
West	1.706,32	1.674,31	31,85
Nord	-283,78	-274,72	-8,68
gesamt	1.422,54	1.399,59	23,16

Abb. 12 links zeigt die residualen Pfade des Schwebstofftransportes. Die Größenordnung belegt, dass dieser Transportmodus den größten Anteil an der Gesamtfracht darstellt. Somit entsprechen auch die Transportpfade im Wesentlichen denen der Gesamtfracht.

Als Schwebstoff wird über den Westrand $1.674,31 \times 10^6 \text{ m}^3$ ein- und über den Nordrand $-274,72 \times 10^6 \text{ m}^3$ ausgetragen, so dass $1.399,59 \times 10^6 \text{ m}^3$ im Untersuchungsgebiet verbleiben (Tab. 4). Auch beim Geschiebetransport (Abb. 12 rechts) knicken die von Westen kommenden Pfade vor Helgoland ab und verlassen das Untersuchungsgebiet nach Norden. Das Transportband vor den Ostfriesischen Inseln ist sehr viel schmaler, nur ein Bruchteil erreicht in der Bilanz den inneren Teil der Deutschen Bucht.

Im Gegensatz zum Schwebstofftransport weist der residuale Geschiebetransport ein wesentlich komplexeres Transportmuster aus. Nördlich von Helgoland existiert eine residuale Zirkulationszelle mit einem Durchmesser von etwa 50 km. Wie beim Schwebstofftransport ist die Sedimentbilanz positiv: über den Westrand dringen $31,85 \times 10^6 \text{ m}^3$ ein, während über den Nordrand $8,68 \times 10^6 \text{ m}^3$ das Gebiet verlassen und ein Gewinn von $23,16 \times 10^6 \text{ m}^3$ zum Sedimenthaushalt in der Deutschen Bucht beiträgt.

3.2 Szenario Meteorologie 1996

Das Jahr 1998 weist im Gegensatz zum Jahr 2006 eine dreimal so große Anzahl an Tagen mit Windgeschwindigkeiten zwischen 12,5 m/s und 18,0 m/s auf (1998 über 60 Tage, 2006 nahezu 20 Tage). Daher wurde für eine Analyse des Wind- und Seegangseinflusses auf die Sedimentdynamik eine langfristige Simulation mit den Wind- und Seegangsfeldern von 1998 durchgeführt und die Ergebnisse mit denen des Szenarios 2006 verglichen.

3.2.1 Sohlentwicklung

Grundsätzlich lassen sich zwischen beiden Szenarien keine prinzipiellen Unterschiede in den großräumigen morphologischen Strukturen nach 100 Jahren feststellen, weshalb auf eine Darstellung an dieser Stelle verzichtet wird. Aussagekräftiger ist die Differenz zwischen beiden Sohlagen nach einem Zeitraum von 100 Jahren. Sie ist in Abb. 13 dargestellt. Hierbei wurde die Sohlage des Szenarios 2006 von der des Szenarios 1998 subtrahiert.

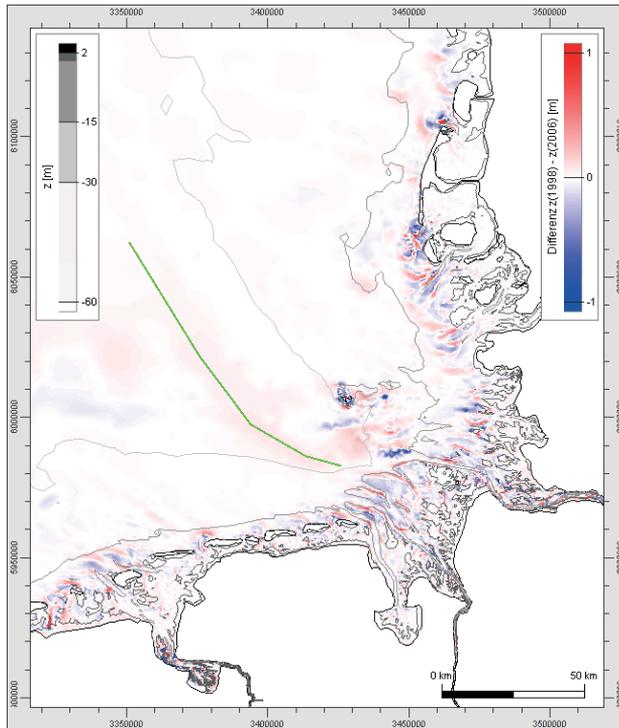


Abbildung 13: Szenario Meteorologie 1998: Sohldifferenz zwischen den Simulationen mit der Meteorologie von 1998 und von 2006.

Die Erosions- und Depositionstendenzen werden durch die Meteorologie 1998 verstärkt, was sich in einer erhöhten Sedimentumlagerung niederschlägt. Vor den Ostfriesischen Inseln liegen die Differenzen zwischen ca. 0,3 m und ca. -0,5 m, wie sie beispielsweise beim Norderneyer Seegatt ersichtlich sind. Im Gebiet der Elbe-Weser-Mündung sind größere Unterschiede erkennbar, die von ca. -0,7 m bis ca. 0,7 m reichen. Als Beispiel seien die Gebiete der Außenjade und der Alten Weser genannt. Es lässt sich feststellen, dass vor den Ostfriesischen Inseln und im Gebiet der Weser-Elbe-Mündung vermehrt Sediment Richtung Osten verlagert wird.

Auch bei den Nordfriesischen Inseln führt die Simulation mit der Meteorologie von 1998 zu erhöhten Sedimentumlagerungen. Im Bereich der Ebbdeltas sind die Differenzen in einer Größenordnung, wie sie im Gebiet der Elbe-Weser-Mündung auftreten. Besonders ausgeprägt sind sie südlich von Sylt; hier sind es die Theeknobsände, die Maximalwerte zwischen ca. -1 m und ca. 1 m aufweisen.

Zwar sind die Sohllagen beider Szenarien relativ ähnlich, jedoch lässt sich im Bereich des Elbe_Urstromtals eine deutliche ausgedehnte Sohldifferenz nach 100 Jahren feststellen. Sie ist in Abb. 14 entlang eines Polygonzugs, beginnend nördlich vor Wangerooge auf Höhe der 30 m-Isobathe (Abb. 13), dargestellt. Demnach führt die Meteorologie von 1998 zunächst zu einer exponentiellen Zunahme bis zum Maximalwert von 0,1 m bei km 10,87. Anschließend nimmt die Sohldifferenz linear ab. Die Sohllage liegt somit ausnahmslos höher als beim Szenario 2006.

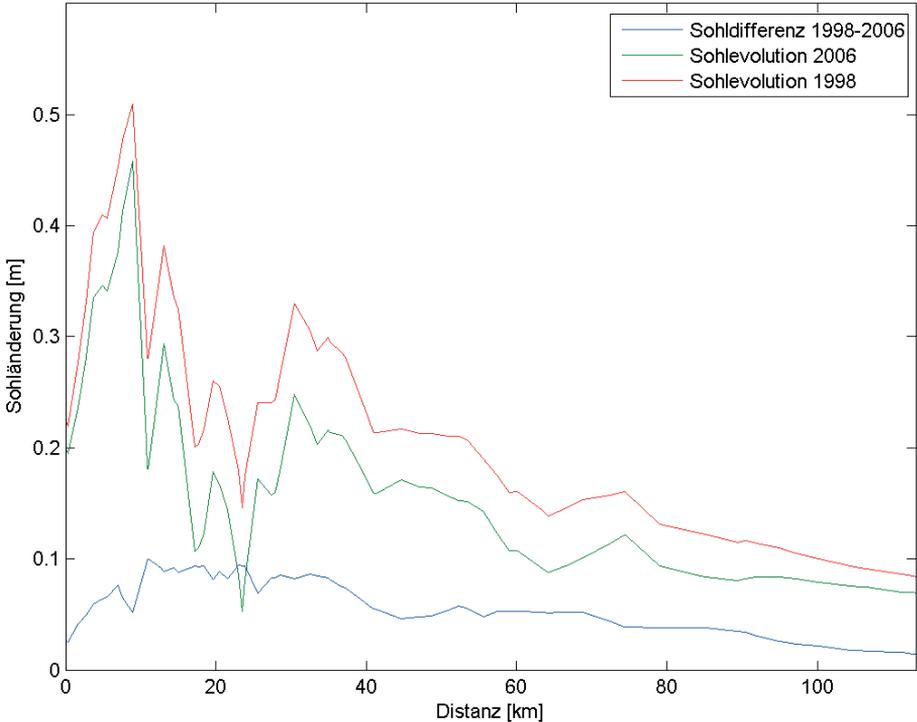


Abbildung 14: Szenario Meteorologie 1998: Sohlenentwicklungen nach 100 Jahren entlang des Profils in Abb. 13 mit der Meteorologie von 1998 und 2006 sowie ihrer Differenz. Das Profil verläuft von der Küste ($x = 0$ km) bis in den tiefen Bereich der Deutschen Bucht ($x = 113$ km).

Zusätzlich sind in Abb. 14 die Sohlevolutionen beider Szenarien abgebildet. Beide Profile sind wie erwartet ähnlich und zeigen nach einem Anstieg auf den Maximalwert eine exponentielle Abnahme mit zunehmender Distanz, die nur bei km 20 durch eine geringere Sohlevolution gestört wird. Es handelt sich demnach in beiden Szenarien um ein Depositionsgebiet.

3.2.2 Residualer Sedimenttransport

Die residualen Transporttrajektorien beider Szenarien unterscheiden sich vor allem im Westteil des in Abb. 15 dargestellten Gebiets. Durch erhöhte Wind- und Seegangswirkung verschieben sich die Transportpfade des Szenarios 1998 Richtung Osten. Bei beiden Szenarien kann ein Abknicken vor Helgoland und die anschließende Bündelung entlang des Elbe-Urstromtals festgestellt werden. Weiterhin ist ebenfalls beim Szenario 1998 erkennbar, dass vor den Ostfriesischen Inseln ein residuales Transportband Richtung Osten existiert und vor den Nordfriesischen Inseln die Transportpfade das Gebiet nördlich verlassen.

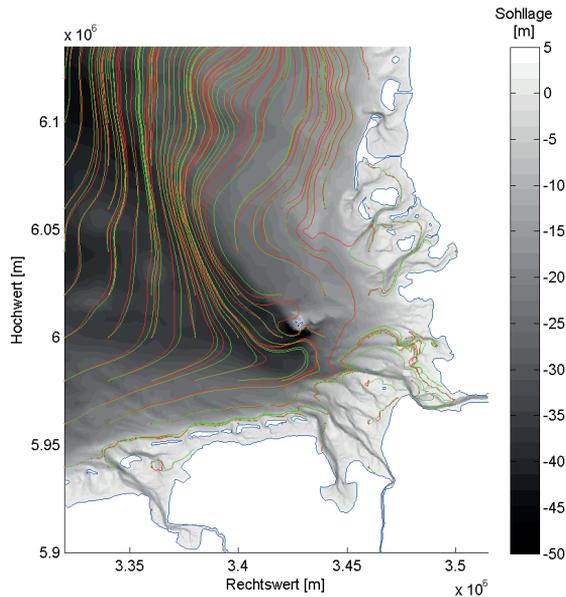


Abbildung 15: Szenario Meteorologie 1998: Vektoren der residualen Gesamtfracht mit Meteorologie 2006 (rot) und mit Meteorologie 1998 (grün).

3.2.3 Änderung der Volumenbilanzen

Die vorangegangenen Abschnitte haben gezeigt, dass das Szenario 1998 eine höhere Sedimentdynamik aufweist. Das ist ebenfalls aus den Volumenbilanzen für das Gebiet der Deutschen Bucht ersichtlich. In Tab. 5 sind die Volumendifferenzen zwischen Szenario 1998 und 2006 zusammengefasst.

Tabelle 5: Änderungen der Volumenbilanzen in Mio. m^3 und Prozentanteil je nach Transportmodus und Profil. Berechnet wurden die Differenzen zwischen Szenario 1998 und Szenario 2006.

Profil	Gesamtfracht	Transportmodus	
		Schwebstoff	Geschiebe
West	345,18 (20,23 %)	326,79 (19,52 %)	18,20 (57,14 %)
Nord	-13,25 (4,67 %)	-12,01 (4,37 %)	-1,22 (14,02 %)
gesamt	331,93 (23,33 %)	314,78 (22,49 %)	16,98 (73,30 %)

Demnach erhöht sich die über das Westprofil eintretende Gesamtfracht um $345,18 \times 10^6 m^3$, was einer prozentualen Zunahme um 20,23 % entspricht. Das aus der Deutschen Bucht über das Nordprofil transportierte Sediment nimmt ebenfalls zu. Über dieses Profil verlassen das Untersuchungsgebiet $13,25 \times 10^6 m^3$ mehr als beim Szenario 2006. Die prozentuale Zunahme ist wesentlich geringer als über das Westprofil und beträgt 4,67 %. In der Bilanz verbleiben somit $331,93 \times 10^6 m^3$ und führen zu einer Zunahme des Sediments in der Deutschen Bucht um 23,33 %.

Der Schwebstofftransport nimmt über das westlich gelegene Profil um 19,52 % zu. Der Sedimenteintrag in Höhe von $326,79 \times 10^6 \text{ m}^3$ macht auch im Szenario 1998 deutlich, dass dieser Transportmodus maßgeblich zum Sedimenthaushalt beiträgt. Somit ist auch der Austrag über das Nordprofil mit $12,01 \times 10^6 \text{ m}^3$ bzw. 4,37 % in der Größenordnung wie bei der Gesamtfracht. Das als Schwebstoff eingetragene und verbleibende Sediment nimmt somit um $314,78 \times 10^6 \text{ m}^3$ zu.

Deutlich höhere prozentuale Werte werden für den Geschiebetransport berechnet. Die Meteorologie von 1998 führt zu einer Zunahme über das Westprofil von 57,14 %, was einem Volumen von $18,20 \times 10^6 \text{ m}^3$ entspricht. Über das Nordprofil wird 14,02 % mehr Sediment als Geschiebe ausgetragen. In der Summe verbleiben in der Deutschen Bucht $16,98 \times 10^6 \text{ m}^3$ mehr Sediment als beim Szenario 2006.

3.3 Szenario Meeresspiegelanstieg

Zur Bewertung des Meeresspiegelanstiegs (MSA) auf den Sedimenthaushalt der Deutschen Bucht wurden zwei tidegetriebene Simulationen miteinander verglichen. Eine Simulation wurde ohne Meeresspiegelanstieg durchgeführt. Bei dem anderen Szenario wurde an den offenen Seerändern ein linearer Meeresspiegelanstieg von 80 cm/100a eingesteuert und dadurch die Wasserspiegellage in jedem Simulationszeitschritt um einen konstanten Wert erhöht.

3.3.1 Sohllentwicklung

Die Sohllage der Simulation mit Meeresspiegelanstieg (MSA) ist in Abb. 16 links dargestellt. Es lassen sich durch Tide und Meeresspiegelanstieg keine signifikanten großräumigen

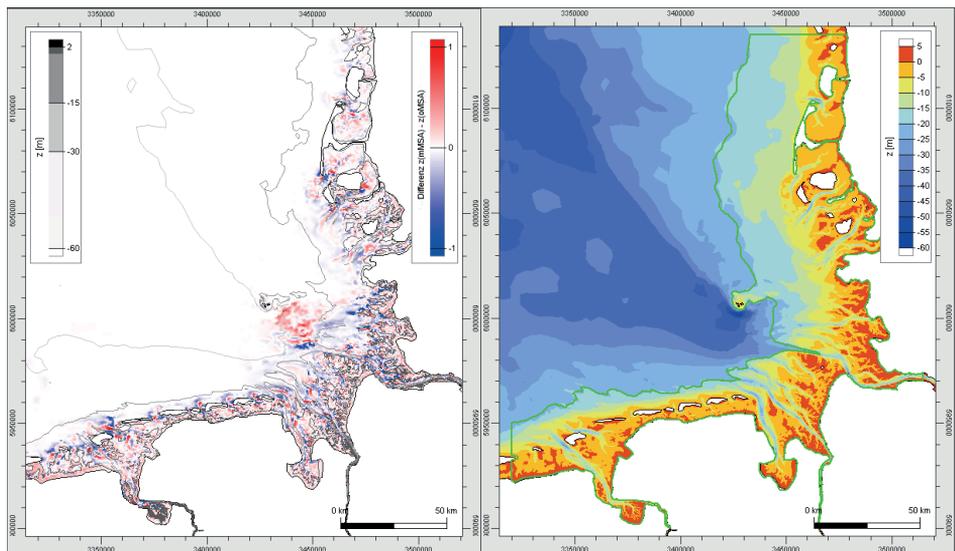


Abbildung 16: Szenario Meeresspiegelanstieg (MSA): (links) Sohllage nach 100 Jahren mit MSA und die für die Volumenbilanzen verwendete Maske (grünes Polygon); (rechts) Differenz der Sohllage zwischen der Simulation mit und ohne MSA.

Änderungen der morphologischen Struktur verzeichnen. Allerdings rücken diese durch den MSA näher an die Küstenlinie heran. Die Differenz zwischen der Simulation mit MSA und ohne MSA zeigt Abb. 16 rechts. Die Differenzen treten in den Wattgebieten und im Küstennahfeld auf und überschreiten kaum einen Wert von 1 m.

3.3.2 Residualer Sedimenttransport

Die residuellen Sedimenttransportpfade der Gesamtfracht beider Simulationen sind im Westteil der Deutschen Bucht identisch (Abb. 17). Im inneren Bereich lassen sich vereinzelt Unterschiede feststellen. Im Nordostteil sind die Transportpfade mit MSA nach Osten verschoben.

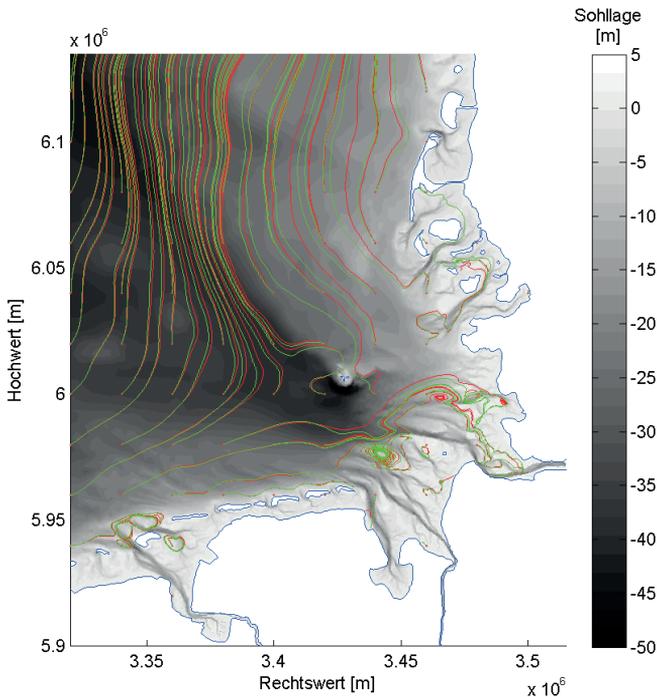


Abbildung 17: Szenario Meeresspiegelanstieg: Vektoren der residualen Gesamtfracht: grün ohne MSA; rot mit MSA.

3.3.3 Langfristige Volumenbilanzen

Die Auswirkung des MSA auf den Sedimenthaushalt zeigt Abb. 18. Der Funktionsverlauf ist bei beiden Simulationen wie erwartet ähnlich, aber die Kurve mit MSA verläuft flacher. Nach 100 Jahren Simulationszeit werden so ohne Meeresspiegelanstieg $3,7 \times 10^8 \text{ m}^3$ und mit MSA $3,3 \times 10^8 \text{ m}^3$ abgelagert. Ein säkularer Meeresspiegelanstieg von 80 cm führt also zu einer Reduktion des abgelagerten Sedimentvolumens um 11 %.

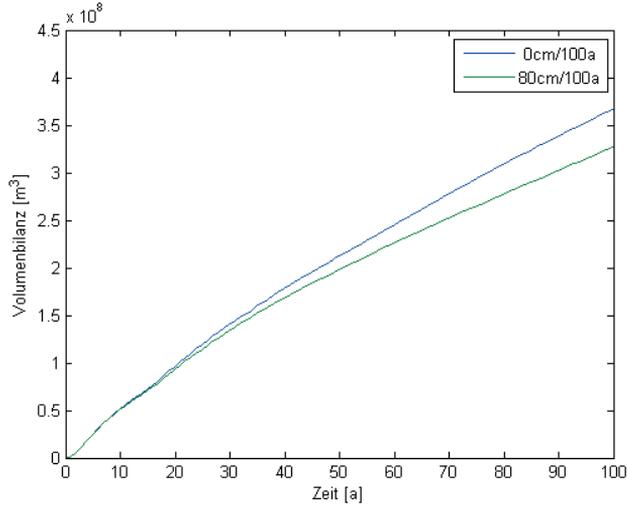


Abbildung 18: Szenario Meeresspiegelanstieg: Volumenbilanzen für den küstennahen residualen Sedimenttransport.

4 Einfluss von Unterhaltungsmaßnahmen auf den Sedimenthaushalt

Um die Wirkung von Baggerstrategien isoliert zu betrachten, wurde eine Simulation mit einem Korndurchmesser von 0,375 mm durchgeführt und als Belastung nur die Tide eingesteuert. In einer weiteren Simulation wurden Unterhaltungsmaßnahmen in der Tideelbe berücksichtigt. Auf eine Verklappung des entnommenen Sediments wurde verzichtet. Als initiale Sohllage wurde wie bei den anderen Langfristsimulationen die von 2006 verwendet. Einen Eindruck der in DredgeSim modellierten Solltiefe gibt Abb. 19.

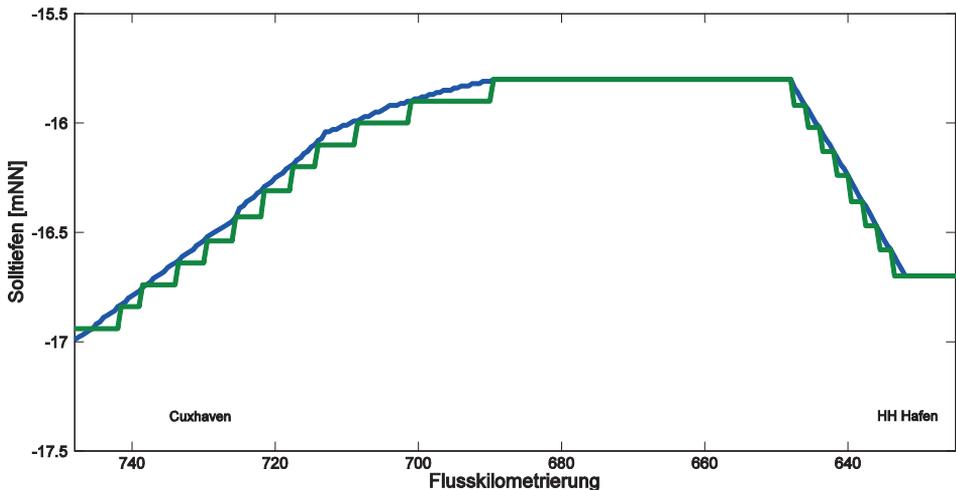


Abbildung 19: Modellierte Solltiefe der Tideelbe mit abschnittsweise konstanten Verlauf für DredgeSim (grün) und tatsächliche, im Rahmen des Projektes bereitgestellte Solltiefe (blau).

4.1 Sohlentwicklung im Mündungsbereich der Elbe

Besonders deutlich lässt sich der Einfluss der Unterhaltungsmaßnahmen auf die simulierte Morphodynamik am Mündungsbereich der Elbe skizzieren. Ohne Unterhaltungsmaßnahmen verlagert sich das Fahrwasser der Außenelbe zwischen dem Großen Vogelsand und dem Gelbsand in Richtung Nordosten, wie Abb. 20 links zeigt. Zur Orientierung sind die Baggergebiete als gelbe Polygone dargestellt. Werden aber die Baggermaßnahmen berücksichtigt (Abb. 20 rechts), sind die Erosionen und Depositionen in der Fahrrinne geringer und die im Modell simulierte natürliche Tendenz der Fahrwasserverlagerung nach Nordosten wird vermindert.

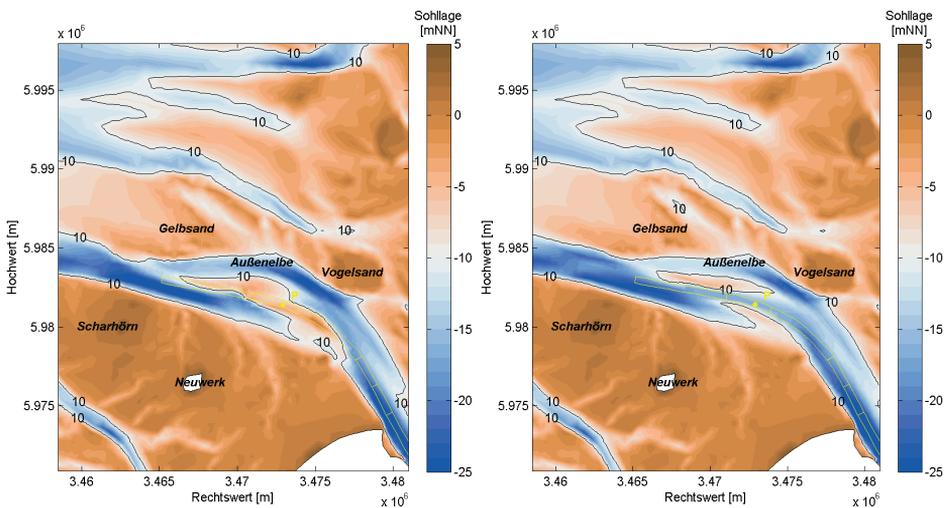


Abbildung 20: Sohlage nach einem Simulationszeitraum von 100 Jahren: (links) ohne Baggern; (rechts) mit Baggern. Die Baggergebiete sind als gelbe Polygone gekennzeichnet sowie der Punkt P für die Zeitreihenanalyse.

4.2 Längsprofil der Fahrrinne

Das Längsprofil der Sohlage entlang der Baggerpolygone (Abb. 21, Zunahme der Distanz in Flutrichtung) zeigt, dass die Fahrrinne ohne Unterhaltungsmaßnahmen über ca. 14 km signifikant verfüllt wird und die Schiffbarkeit nicht mehr gewährleistet ist. Wird Sediment entnommen, dann wird die Sohlage entsprechend der Solltiefe korrigiert und die morphodynamische Entwicklung massiv beeinflusst. Die daraus resultierenden Sohlendifferenzen zwischen beiden Simulationen betragen bis zu 17 m.

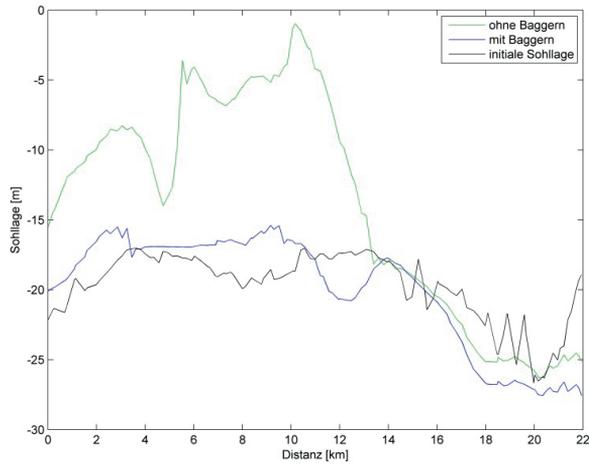


Abbildung 21: Profil der Sohlage entlang der Baggerpolygone (Zunahme Distanz in Flutrichtung).

4.3 Zeitreihen der Sohlentwicklung

Die Sohlenentwicklung für beide Szenarien ist in Abb. 22 für den Punkt P (Position siehe Abb. 20) dargestellt. Ohne Baggern ist nahezu ein kontinuierlicher Anstieg der Sohlenlage um 15 m zu verzeichnen. Nach etwa 80 Jahren ist ein Rückgang um ca. 1 m in den verbleibenden 20 Jahren ersichtlich. Mit der Entnahme von Sediment steigt die Sohlenlage zwar zunächst auch kontinuierlich über einen Zeitraum von 19 Jahren an, wird jedoch bei Erreichen der Solltiefe durch die Baggerstrategie begrenzt.

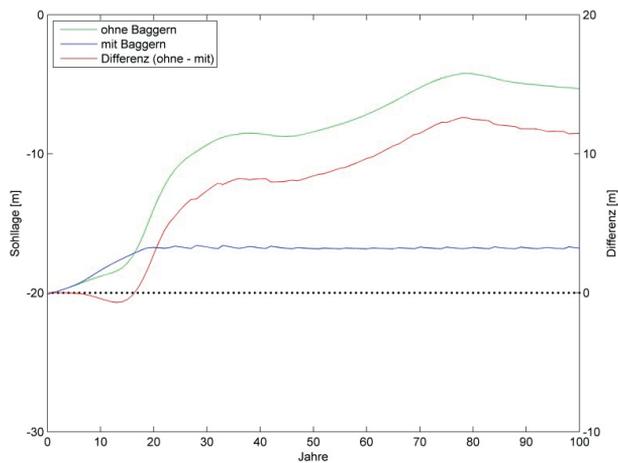


Abbildung 22: Sohlenentwicklung mit/ohne Baggerungen für den Punkt P.

Interessant ist zudem, dass in den ersten fünf Jahren die Sohlenentwicklung an der ausgewerteten Position bei beiden Szenarien nahezu identisch ist, wie die Sohlenlagendifferenz zwischen der Simulation ohne und mit Baggern zeigt. Das lässt vermuten, dass erst durch mittel- bis längerfristige Simulationszeiträume signifikante Auswirkungen analysiert werden können.

5 Ausblick

Die Ergebnisse haben gezeigt, dass langfristige Simulationen mit einem direkt gekoppelten Modell ohne morphodynamische Beschleunigungsverfahren in einem überschaubaren Zeitrahmen möglich sind. Sie leisten einen wertvollen Beitrag zum Systemverständnis eines komplexen Systems wie das der Deutschen Bucht.

Das Langfristmodell bietet eine gute Ausgangsbasis für eine weitergehende Analyse der Sedimentdynamik. Beispielsweise können langfristige Simulationen mit einem dreidimensionalen Strömungsmodell oder mit einer höheren Gitternetzauflösung wie z. B. dem Feinmodell durchgeführt werden. Ein anderer Ansatz ist die SubGrid-Modellierung der morphodynamischen Prozesse auf einem groben Gitternetz, um bei geringen Computerressourcen die Simulationsergebnisse zu verbessern. Weiterhin sollte der Einfluss kohäsiver Sedimente auf die Morphodynamik durch geeignete Modellierungsansätze besser berücksichtigt werden. Ein weiterer Aspekt sind anthropogene Einflüsse, deren Wirkung am Beispiel von Unterhaltungsmaßnahmen gezeigt wurde. Diese zu erfassen und zu modellieren ist für eine Verbesserung der Prognosefähigkeit sicherlich von hoher Bedeutung. Nicht zuletzt sind biologische und chemische Prozesse Faktoren, die in zukünftigen Langfristmodellen Beachtung finden sollten.

6 Danksagung

Die dargestellten Ergebnisse wurden im Rahmen des Teilprojektes AufMod-D/TP 4 generiert, ein Projekt des Kuratoriums für Forschung im Küsteningenieurwesen (03KIS085), finanziert durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF). Weiterhin gilt der Dank der Bundesanstalt für Wasserbau in Karlsruhe für die Unterstützung bei der Simulation mit dem TELEMAC-System auf ihren Hochleistungsrechnern.

7 Schriftenverzeichnis

- AUDOUIN, Y.; MOULINEC, C.; BARBER, R. W.; SUNDERLAND, A. G.; GU, X.-J. and EMERSON, D. R.: Preparing TELEMAC-2D for extremely large simulations. In: VIOLEAU, D.; HERVOUET, J.-M.; RAZAFINDRAKOTO, E. and DENIS, C. (eds.): XVIIIth TELEMAC-MASCARET Users Conference, 2011.
- BIJKER, E. W.: Longshore transport computations. Journal of Waterways, Harbours and Coastal Engineering Division, ASCE, No WW4, 687-701, 1971.
- EDF: SISYPHE-2D User Manual Version 6.0. Note technique, Electricité de France (EDF), Direction des Etudes et Recherches, Chatou, 2010a.

- EDF: TELEMAC-2D User Manual Version 6.0. Note technique, Electricité de France (EDF), Direction des Etudes et Recherches, Chatou, 2010b.
- EDF: TOMAWAC User Manual Version 6.1. Note technique, Electricité de France (EDF), Direction des Etudes et Recherches, Chatou, 2011.
- HERVOUET, J. M. and BATES, P. (eds.): The TELEMAC Modelling System. Hydrological Processes, Special Issue, Vol. 14, 2000.
- HERVOUET, J.-M.: Hydrodynamics of free surface flows: modeling with the finite element method. John Wiley & Sons, 2007.
- HEYER, H. und SCHROTTKE, K.: Aufbau von integrierten Modellsystemen zur Analyse der langfristigen Morphodynamik in der Deutschen Bucht – AufMod, Gemeinsamer Abschlussbericht für das Gesamtprojekt mit Beiträgen aus allen 7 Teilprojekten, doi: 10.2314/GBV:780783271, 2013.
<http://edok01.tib.uni-hannover.de/edoks/e01fb14/780783271.pdf>
- MAERKER, C. und MALCHEREK, A.: Die Analyse von Baggern und Verklappen. Teil 1: Das Softwarepaket DredgeSim, Korrespondenz Wasserwirtschaft, 3 (10), 550-555, 2010.
- MILBRADT, P.; KÖSTERS, F.; PUTZAR, B. und PLÜB, A.: Analyse des Sedimenttransports und der Morphodynamik in der Deutschen Bucht auf Basis des Multi-Modell-Ansatzes, Die Küste, 83, 2015.
- PAWLOWICZ, R.; BEARDSLEY, B. and LENTZ, S.: Classical tidal harmonic analysis including error estimates in matlab using t_tide. Computers and Geosciences, 28, 929-937, 2002.
- PUTZAR, B. and MALCHEREK, A.: Development of a Long Term Morphodynamic Model of the German Bight. In: BOURBAN, S.; DURAND, N. and HERVOUET, J.-M. (eds.): XIXth TELEMAC-MASCARET Users Conference, 2012.
- VILLARET, C.; HERVOUET, J.-M.; KOPMANN, R.; MERKEL, U. and DAVIES, A. G.: Morphodynamic modeling using the TELEMAC finite-element system. Computers & Geosciences, 53, 105-113, 2013.

Analyse des Sedimenttransports und der Morphodynamik in der Deutschen Bucht auf Basis des Multi-Modell-Ansatzes

Peter Milbradt, Frank Kösters, Bert Putzar und Andreas Plüß

Zusammenfassung

Prozessbasierte morphodynamische Simulationsmodelle haben sich in den letzten Jahren zu wichtigen Ingenieurwerkzeugen für die Beurteilung von wasserbaulichen Maßnahmen entwickelt. Sie werden nicht nur zur Analyse zurückliegender Zeiträume eingesetzt, sie sollen auch die Analyse von zukünftigen Veränderungen ermöglichen. Prozessbasierte Simulationsmodelle erlauben insbesondere die systematische Untersuchung von Zusammenhängen, die sich in der Natur der Beobachtung entziehen oder nur mit großem Aufwand zu erfassen sind.

In diesem Artikel werden Ergebnisse basierend auf großräumigen morphodynamischen Simulationen mit unterschiedlichen Modellsystemen präsentiert. Der Zeitraum umfasst die Jahre von 1996 bis 2008 und berücksichtigt die treibenden Kräfte von Gezeiten, von Fernwellen, von Oberwasserzuflüssen sowie von Windfeldern und dem daraus generierten Seegang. AufMod stellt jährliche konsistente Bathymetrien und initiale Sedimentdaten bereit, die von den morphodynamischen Modellen für weitere Analysen genutzt werden können. Durch Verwendung möglichst einheitlicher Gitternetze können die Stärken, aber auch die Defizite der unterschiedlichen angewendeten numerischen Modelle herausgearbeitet und bewertet werden. Auf diese Weise ist es möglich, im Rahmen des Multi-Modell-Ansatzes Unsicherheiten der numerischen Modellierung abzuschätzen. Die in diesem Artikel vorgestellten Ergebnisse geben einen ersten skalenübergreifenden Einblick in die Sedimentdynamik und die daraus resultierenden Sedimenttransportpfade in der Deutschen Bucht.

Schlagwörter

Prozessbasierte Modelle, UnTRIM, MARINA, TELEMAC, DELFT3D, Seegang, Morphodynamik, Sedimenttransport, Sedimenttransportpfade, Bathymetrie, Deutsche Bucht, Analyse, Multi-Modell-Ansatz, Volumenbilanzen

Summary

The morphodynamic numerical model simulations cover a time span from 1996 to 2008 and are based on the natural processes taking the whole variability of tides, external surge, river run-off, wind and waves into account. AufMod provides a suite of consistent annual bathymetries as well as initial sediment parameters which can be used by numerical morphodynamic models for further analyses. By using the same model grids the strength and weakness of the different numeric models can be evaluated and their uncertainties can be assessed. This leads to a Morphodynamic Multi-Model-Approach. The morphodynamic

model results give a first comprehensive impression of the resulting sediment transport pathways in the German Bight.

Keywords

North Sea, German Bight, sediment mixture, sediment distribution, bathymetry, sediment transport, morphodynamic, waves, numerical modeling, Multi-Modell approach

Inhalt

1	Einleitung.....	2
2	Multi-Modell-Ansatz	3
3	Modellaufbau.....	5
3.1	Modellausdehnung und -auflösung	5
3.2	Randbedingungen und Anfangswerte	6
3.3	Modellvalidierung.....	7
3.3.1	Hydrodynamik.....	8
3.3.1.1	Tide	8
3.3.1.2	Seegang.....	10
3.3.2	Morphodynamik.....	11
4	Sedimenttransport in der Deutschen Bucht.....	11
4.1	Sedimenttransportpfade	12
4.2	Variation der Transportpfade.....	14
4.3	Volumenbilanzen.....	15
5	Zusammenfassung.....	16
6	Schriftenverzeichnis	17

1 Einleitung

Die Deutsche Bucht, im südöstlichen Teil der Nordsee gelegen, verfügt über einen ausgeprägten morphologischen Formenreichtum (z. B. EHLERS 1988). Insbesondere im Bereich des amphibischen Küstensaums und in den Ästuaren besteht eine große räumliche Variabilität der Wassertiefen. Vorländer, Wattflächen, Flachwassergebiete, weit verzweigte Prielsysteme, Wattströme und tiefe Rinnen bilden die Grundelemente der überwiegend mit Wasser bedeckten Landschaft. So hat sich auch das Wattenmeer in diesem Bereich ausgebildet, heute das größte Wattenmeer der Welt und als UNESCO Weltnaturerbe anerkannt. Dieser ökologisch einzigartige Naturraum ist sich ständig ändernden Umweltbedingungen z. B. in Form des globalen Klimawandels und dem damit einhergehenden Anstieg des mittleren Meeresspiegels ausgesetzt. Diese natürlichen Änderungen aber auch die unterschiedlichen anthropogenen Nutzungsanforderungen bedürfen eines vertieften Verständnisses der hydrologischen und morphologischen Entwicklung in der Deutschen Bucht. Neben der stetigen Weiterentwicklung der Messtechnik und der damit verbundenen wesentlichen Verbesserung der Datengrundlage haben sich seit vielen Jahren hydro-

dynamisch-numerische Simulationsmodelle in den Ingenieur- und Umweltwissenschaften als geeignete Werkzeuge zur Analyse des Verhaltens komplexer Systeme etabliert. Aber auch datenbasierte Modelle helfen, das Systemverständnis durch zurückblickende Simulationen zu verbessern.

Die großräumige Hydrodynamik der Nordsee und der Deutschen Bucht wurde in der Vergangenheit intensiv untersucht (vgl. z. B. Übersichtsartikel von OTTO et al. 1990 sowie SÜNDERMANN und POHLMANN 2011), steht aber auch heute noch im Interesse der Wissenschaft, z. B. im Hinblick auf die Umformung der Tidewelle in der Deutschen Bucht (STANEV et al. 2014). Die sich ändernde Morphologie der Deutschen Bucht ist von WINTER (2011) großräumig auf Basis von verfügbaren Peilungen untersucht worden. Numerische Berechnungen haben bisher im Wesentlichen einen deutlich kleinräumigeren Fokus gehabt, wie zum Beispiel die Eider (JUNGE et al. 2006) oder die Elbe (CHU et al. 2013). Großräumigere Untersuchungen gibt es nur für den Transport von suspendierten Sedimenten (z. B. GERRITSEN et al. 2000, STANEVA et al. 2009). Sowohl die geographische Lage als auch die großräumigen Sedimenttransportprozesse in der Nordsee machen die Deutsche Bucht zu einem ausgeprägten Akkumulationsgebiet (ZEILER et al. 2000). Neben dem weiträumigen Sedimenttransportgeschehen in der Nordsee und der Deutschen Bucht führen vor allem die lokalen hydraulischen Gegebenheiten in Form von Seegangs- und Tidewirkung zur schon beschriebenen Formenvielfalt an der deutschen Nordseeküste.

Mit Hilfe des Funktionalen Bodenmodells (vgl. MILBRADT et al. 2015) kann im Rahmen der Messunsicherheiten die bathymetrische Entwicklung in der Deutschen Bucht über die letzten 30 Jahre beschrieben werden. Mit diesen datenbasierten Hindcast-Simulationen lassen sich die Sedimentvolumina, die in der Deutschen Bucht akkumuliert werden, abschätzen. Die diese Veränderungen hervorrufenden Sedimenttransporte lassen sich jedoch nicht flächendeckend detektieren. Messbare Indikatoren für die Beurteilung von Transportrichtungen bilden flächenhafte Beschreibungen der Zusammensetzung von Oberflächensedimenten und Bodenformen (z. B. Dünen und Rippel). Zur zeitlich und räumlich konsistenten Integration dieser Messungen, und insbesondere zur Analyse der wirksamen, natürlich ablaufenden Vorgänge, werden prozessbasierte Simulationsmodelle genutzt, welche geeignete Werkzeuge zur Abschätzung von Transportmengen und insbesondere -wegen darstellen.

Die Ergebnisse der unterschiedlichen Verfahren und Methoden zur Berechnung des großräumigen Sedimenttransports werden in diesem Beitrag mit Fokus auf grundlegende Aspekte der Modellierung und als Anwendung zur Bestimmung der Lage der Sedimenttransportpfade vergleichend diskutiert. Weitergehende Aspekte zu einzelnen Fragestellungen sind in diesem Heft der Küste dokumentiert (PUTZAR und MALCHEREK 2015; VALERIUS et al. 2015) bzw. im AufMod Abschlussbericht dokumentiert (HEYER und SCHROTTKE 2013).

2 Multi-Modell-Ansatz

Zur Simulation von hydro- und morphodynamischen Phänomenen im Küsteningenieurwesen wurden in der Vergangenheit numerische Simulationsmodelle mit unterschiedlichen Zielsetzungen und Grundlagen entwickelt. Um das breite Spektrum der Phänomene und Fragestellungen aus dem Bereich der Morphodynamik der Deutschen Bucht

abdecken zu können, wurde im Rahmen von AufMod konsequent ein Multi-Modellansatz realisiert. Die Bezeichnung Multi-Modell bezieht sich hierbei sowohl auf die Verknüpfung von daten- und prozessbasierten Modellansätzen als auch auf die numerischen Modellkerne sowie betrachteten Modellzeiträume und -ausdehnungen.

Prozessbasierte numerische Simulationsmodelle basieren auf der Analyse physikalischer Gesetzmäßigkeiten der zu beschreibenden Prozesse, deren mathematischen Formulierung und nicht zuletzt der numerischen Approximation im Rahmen einer softwaretechnischen Realisierung. Wird als Morphodynamik die morphologische Umformung, also die zeitliche Veränderung der Gewässersohle, verstanden, so müssen die hydrodynamischen und Transportprozesse, die dieses bewirken, in einer physikalisch plausiblen Wirkungskette beschrieben werden.

Zu dem zu simulierenden Prozess der

- Morphodynamik

berücksichtigen die prozessbasierten Simulationsmodelle die

- Hydrodynamik
 - Wasserstände,
 - Strömungen und
 - Seegang
- Advektion und turbulente Diffusion gelöster und partikulärer Stoffe
 - Salz,
 - verschiedene Fraktionen suspendierter Feststoffe sowie
 - Sedimenttransport an der Gewässersohle

als die die Morphodynamik wesentlich bestimmenden Einflussgrößen. Sowohl die unterschiedlichen Ziele bei der Entwicklung der physikalischen und mathematischen Modellgrundlagen als auch die softwaretechnische Umsetzung der verfügbaren morphodynamischen Simulationsmodelle führen zu teilweise erheblichen Unterschieden. Um die Variabilität der Simulationsergebnisse unterschiedlicher physikalischer Approximationen und numerischer Umsetzungen zu beurteilen, wurden im Rahmen des Multi-Modell-Ansatzes die folgenden prozessbasierten numerischen Modellkerne eingesetzt:

<u>Hydrodynamik (HN)</u>	<u>Seegang (SG)</u>	<u>Morphodynamik (MD)</u>
UnTRIM	Unk	SediMorph
DELFT3D (FLOW)	SWAN	DELFT3D (MOR)
MARINA	MARINA	MARINA
TELEMAC	TOMAWAC	SISYPHE

Am geringsten sind die Unterschiede bei der Umsetzung der hydrodynamischen Modellkomponenten in den eingesetzten Modellkernen. Größere Unterschiede ergeben sich bei den Seegangsmodellen, die bei MARINA auf einem hyperbolischen instationären Wellenmodell basieren, während SWAN das klassische spektrale Seegangsmodell darstellt. Unk ist ebenfalls ein spektrales Seegangsmodell auf der Basis der Wave-Action-Balance-Gleichung, wohingegen TOMAWAC eine vereinfachte spektrale stationäre Wave-Action-Gleichung löst. Die Sedimenttransportmodule unterscheiden sich in einer Vielzahl von Ansätzen und Approximationen. Beispielsweise werden die zeitvarianten Kornverteilungen bei MARINA durch den mittleren Korndurchmesser und die Sortierung parametrisiert, wohingegen bei SISYPHE, DELFT3D und SediMorph diese durch Kornfraktionen

diskretisiert werden, teilweise für Bodenfracht und suspendierten Transport getrennt. Ähnlich breit ist das Spektrum der eingesetzten Transportansätze, der Berechnung der Bodenschubspannungen und kritischen Bodenschubspannungen. Die Integration der Seegangparameter in morphodynamischen Modellen stellt auch heute noch eine wissenschaftliche Herausforderung dar.

Bei der Kopplung der einzelnen Modellkomponenten bildet das Modellsystem MARINA eine Ausnahme im Vergleich zu den anderen eingesetzten Modellsystemen. Bei MARINA werden zu jedem Zeitschritt alle Modellkomponenten direkt gekoppelt und auf denselben Stützstellen berechnet.

Ausgehend von den Fragestellungen der großräumigen und langfristigen Transport- und Umlagerungsprozesse in der Deutschen Bucht werden im Wesentlichen Zeiträume von 1 bis 10 Jahren und die gesamte Nordsee mit einem verfeinerten Modellbereich der Deutschen Bucht in den Untersuchungen fokussiert. Ergänzt werden diese Modelluntersuchungen durch langfristige Modelluntersuchungen von bis zu 100 Jahren (siehe hierzu PUTZAR und MALCHEREK 2015) und Detailmodelle der Fokusgebiete. Somit wird das Konzept des Multi-Modell-Ansatzes auf die räumliche Ausdehnung und Auflösung sowie die Simulationszeit erweitert.

3 Modellaufbau

Die Kombination eines Modellkerns mit einer Diskretisierung des Untersuchungsraumes, den Rand- und Anfangswerten sowie den modellspezifischen Parametrisierungen führen zum eigentlichen Simulationsmodell. Sind diese entsprechend der zu behandelnden Fragestellung festgelegt, wird das Modell zunächst kalibriert und in einem weiteren Schritt validiert. Für die morphodynamische Modellkomponente wird in der Regel nur von Plausibilisierung gesprochen, da viele der notwendigen Parameter derzeit noch nicht flächendeckend gemessen werden können bzw. die Datenlage der vorhandenen Vermessungsdaten häufig für eine Validierung im eigentlichen Sinne nicht ausreichend ist.

Zur Abschätzung der mehrjährigen Variabilität der hydrodynamischen Parameter und des Sedimenttransportes wurde das Modellsystem UnTRIM-SediMorph für den Untersuchungszeitraum (1996- 2008) als Hindcast-Simulationsmodell aufgebaut, berechnet und validiert. Für kurz- bis mittelfristig direkt gekoppelte morphodynamische Modelluntersuchungen kam das Modellsystem MARINA zum Einsatz. Zur zeitlich darüber hinausgehenden Langfristprognose wurde ein bis zu 100-jähriger Zeitraum auf Basis des Modellsystems TELEMAC-TOMAWAC-SISYPHE genutzt (s. o.).

3.1 Modellausdehnung und -auflösung

Die Beurteilung der großräumigen und langfristig stattfindenden geomorphologischen Veränderungen in der Deutschen Bucht können nicht ohne die Berücksichtigung der Prozesse in der gesamten Nordsee betrachtet werden. Das Modellgebiet des gemeinsamen Basismodells umfasst deshalb sowohl die Nordsee als auch den Englischen Kanal und die westliche Ostsee (siehe Abb. 1). Die Rechenkerne UnTRIM, MARINA und TELEMAC verwenden unstrukturierte Dreieckselemente mit einer variablen Auflösung von ca. 80 m bis ca. 24 km. Dieses erlaubt die gleichzeitige Abbildung der gesamten Nordsee in grober Reproduktion der Strukturen und Tiefen sowie einer höheren

Granularität in der Deutschen Bucht. Einzelne Priele, Tiderinnen und Ästuar sind in diesem Modell jedoch immer noch verhältnismäßig grob diskretisiert.

Für das Modellsystem DELFT3D mussten, auf Grund der spezifischen Anforderungen an die Ortsdiskretisierung, ein eigenständiges Nordseemodell und ein eingebettetes Netz für die Deutsche Bucht erstellt werden.

Für eher kleinräumige Fragestellungen wurden weitere Detailmodelle hoher Auflösung, z. B. für das Jade-Weser-Ästuar, aufgebaut und genutzt.

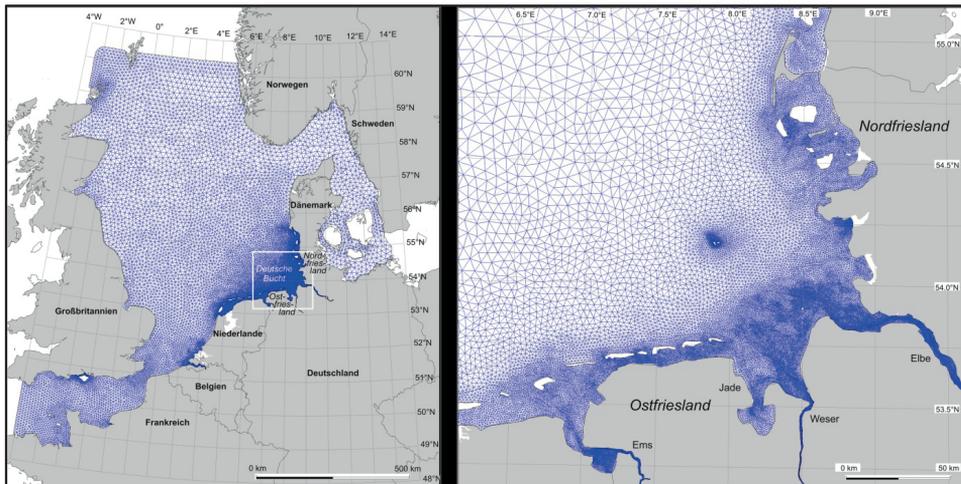


Abbildung 1: Gesamtes Untersuchungsgebiet (links) und Fokusgebiet der Deutschen Bucht (rechts) mit verwendetem unstrukturiertem Gitternetz.

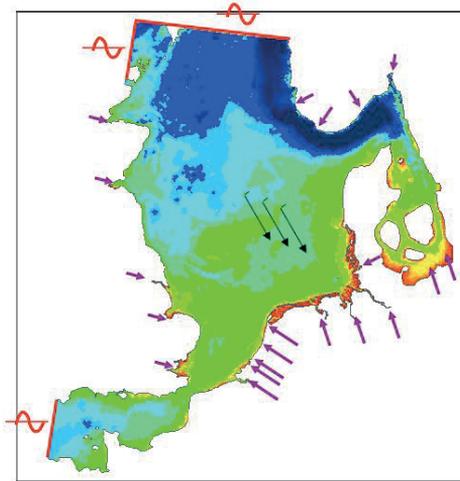
3.2 Randbedingungen und Anfangswerte

Der Betrieb der verschiedenen Simulationsmodelle erfolgte weitgehend unter gleichen Rand- und Anfangsbedingungen (siehe Abb. 2).

Zu Beginn eines jeden Simulationslaufes müssen an allen Knoten des Berechnungsgitters konsistente Zustandsgrößen (Variable) vorgegeben werden.

Die initiale konsistente Tiefenverteilung sowie die Verteilung der Sedimentparameter sind wesentliche Anfangsbedingungen morphodynamischer Simulationsmodelle und werden aus dem Funktionalen Bodenmodell abgeleitet. Die Berechnungspunkte im prozessbasierten numerischen Simulationsmodell repräsentieren in der Regel nicht die Systemzustände an dem Ort des Punktes, sondern sind vielmehr Repräsentanten der sie umgebenden Region (Voronoi-Region). Entsprechend den Besonderheiten der numerischen Verfahren werden deshalb angepasste erhaltungstreue Approximationen zur Initialisierung der Tiefe und der sedimentologischen Parameter in Anlehnung an integrale Mittelwerte über die zugehörigen Voronoi-Regionen herangezogen.

Für die hydrodynamischen Anfangswerte, wie Wasserspiegellage, Strömung, Seegangparameter usw., werden in der Regel eingeschwungene Zustände aus Vorlaufsimulationen genutzt. Abb. 2 zeigt einen Überblick über die gewählten Randbedingungen und Anfangswerte des Nordseemodells.



Wasserstände

- Partialtiden aus globalem Modell FES2004 (Lyard *et al.*, 2006)
- Mittelwasserlage aus dem BSH/DWD Nordatlantikmodell
- Ostsee: konstant

Oberwasserabfluss

- Täglicher Abfluss (Deutsche Bucht) oder saisonale / langfristiges Mittel

Salzgehalt

- Klimatologie (Janssen *et al.*, 1999)

Windschubspannung, Luftdruck

- DWD Prognosemodell

Seegang

- Windwirklänge an der Modellgrenze

Sedimente

- AufMod Bodenmodell

- konstante SPM Konzentration (Gayer, 2004)

Bathymetrie

- AufMod Bodenmodell

Abbildung 2: Übersicht der Rand- und Anfangswerte.

3.3 Modellvalidierung

Morphodynamische Simulationsmodelle beschreiben die Veränderung der Lage des Gewässerbodens und die zugehörigen Transportvorgänge. Zusätzlich liefern diese numerischen Modelle auch häufig Informationen über Veränderungen der Zusammensetzung und Ausprägung des Gewässerbodens.

Die Beurteilung der Güte der (morphodynamischen) Simulationsmodelle, das heißt der Grad der Übereinstimmung der berechneten Ergebnisse mit den Prozessen in der Natur, wird anhand von Vergleichen mit Naturmessungen erbracht und ist immer abhängig von der Problemstellung, zu deren Beantwortung diese herangezogen werden sollen. Dieser Prozess der Modellvalidierung ist der letzte Schritt beim Modellaufbau.

Die Sedimenttransportvorgänge und die morphologischen Veränderungen des Gewässerbodens werden im Wesentlichen durch die hydrodynamischen Kräfte auf den Boden verursacht. Die Variabilität der Hydrodynamik wird ihrerseits wiederum ganz wesentlich durch die Meteorologie beeinflusst. Aus diesem Grunde wurde eine stufenweise Validierung der Modellkomponenten, beginnend bei der Analyse der meteorologischen Randwerte über die hydrodynamischen Modellkomponenten bis hin zu den Transport- und Umlagerungsprozessen der eigentlichen morphodynamischen Modellkomponenten, durchgeführt. Dabei muss beachtet werden, dass die zur Validierung herangezogenen Messungen ebenfalls gewisse Unsicherheiten aufweisen.

Nachfolgend wird im Wesentlichen auf die Validierung der hydrodynamischen und morphodynamischen Modellkomponenten eingegangen. Die Validität der meteorologischen Steuerparameter wurde nur exemplarisch an ausgewählten Windmessungen geprüft und nicht vertieft untersucht.

Die Analyse wurde für die einzelnen Pegelstationen in der Nordsee bzw. Deutschen Bucht durchgeführt und ist exemplarisch für das Jahr 2006 in der Abb. 4 dargestellt. Der Vergleich des wesentlichen Energieeintrags aus der M2-Gezeit (Amplitude in Abb. 4 oben) wird von den einzelnen Modellen im Vergleich zur Messung gut getroffen. Bei einem direkten Vergleich von gemessener und berechneter Wasserspiegellage als root mean square error (RMSE) (Abb. 4 unten) zeigt sich, dass die grob diskretisierten Bereiche deutlich höhere Abweichungen aufweisen als der Fokusbereich der Deutschen Bucht. Dort konnte ein Zielwert von RMSE < 40 cm im Wesentlichen eingehalten werden. Abweichungen zeigt das strukturierte Verfahren DELFT3D, bei dem die in Randlagen positionierten Pegel schlechter approximiert werden können als in den unstrukturierten, feiner aufgelösten Modellen.

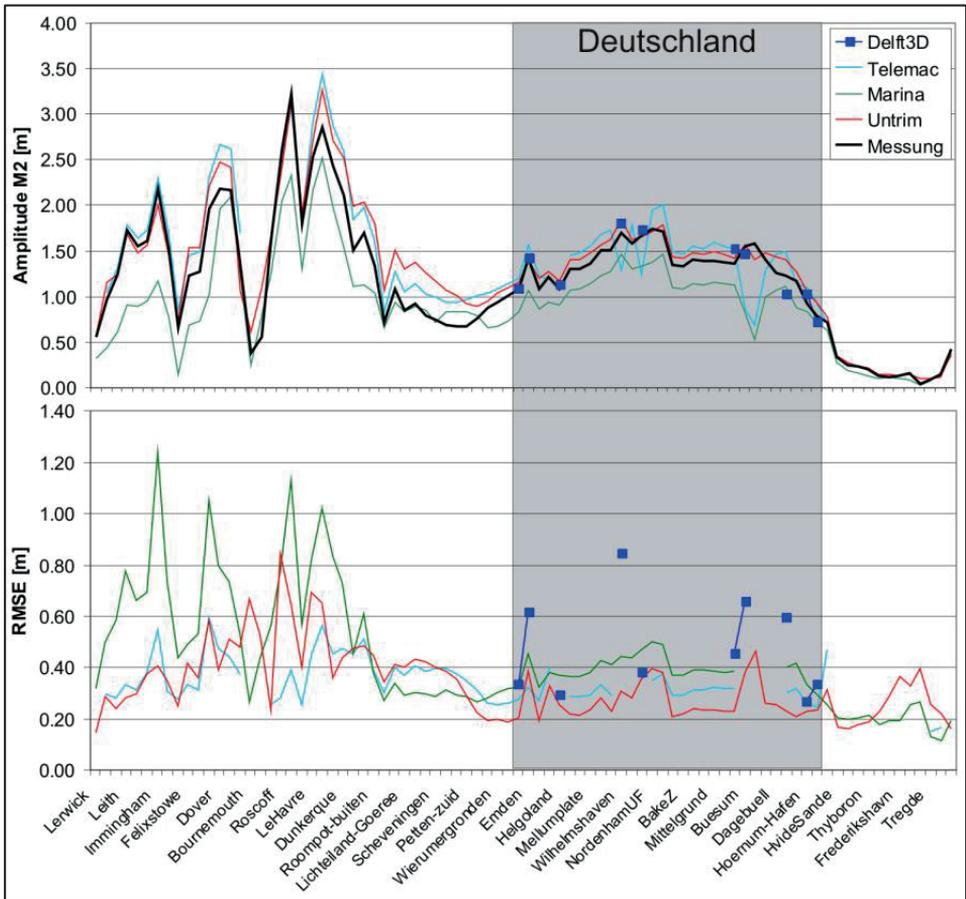


Abbildung 4: Vergleich der M2-Partialtide entlang der Nordseeküste aus den Simulationen und Analysen der Pegelmessungen.

3.3.1.2 Seegang

Neben den tide- und windgetriebenen Strömungsgeschwindigkeiten hat insbesondere das Seegangsgeschehen eine signifikante Wirkung auf die Mobilisierung von Sedimenten. Die Verteilung der berechneten signifikanten Wellenhöhe in der Nordsee (24.02.2006 – 11:00 Uhr) wird beispielhaft in Abb. 5 wiedergegeben.

Zur Validierung der Seegangmodelle standen für das Jahr 2006 Seegangsmessungen an den Bojen WSB, NSB, Helgoland, FINO und Elbe zur Verfügung.

Die Analyse der Unterschiede zwischen den punktuell gemessenen und den berechneten Seegangparametern erfolgte auf der Basis von Zeitreihen. Die in der Abb. 6 exemplarisch gegenübergestellte gemessene und berechnete Wellenhöhe an der Boje NSB zeigt im Rahmen der Genauigkeit der Eingangsgrößen, wie z. B. dem Windfeld, eine hinreichende Übereinstimmung.

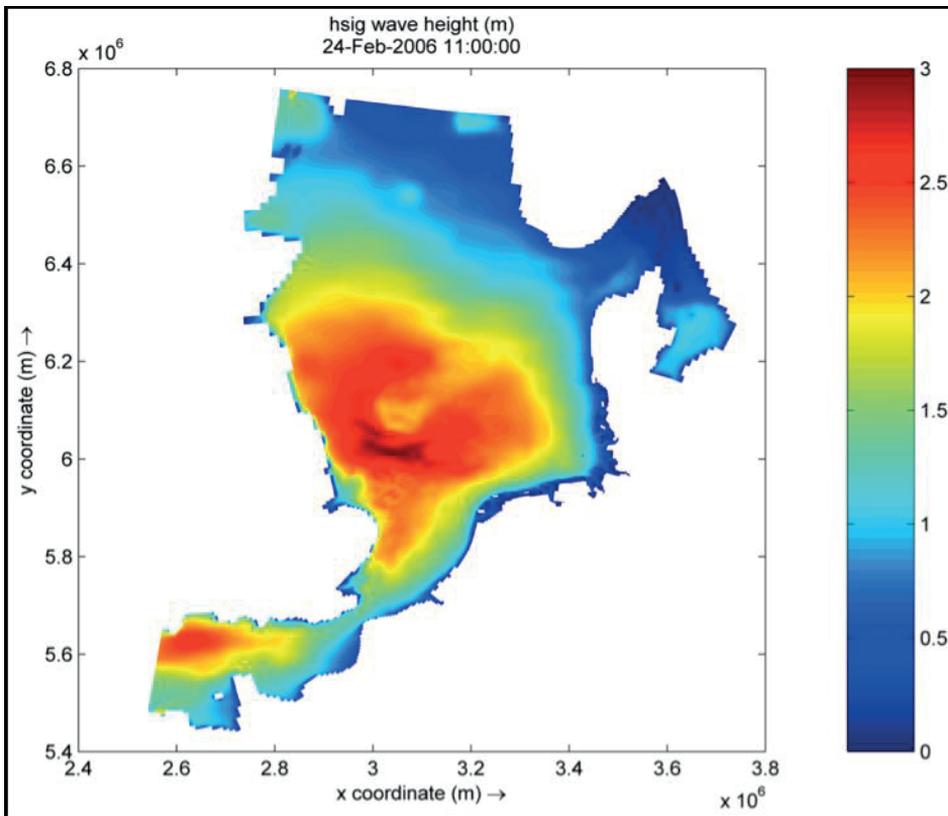


Abbildung 5: Mit SWAN berechnete Verteilung der signifikanten Wellenhöhe in der gesamten Nordsee am 24.02.2006 – 11:00 Uhr.

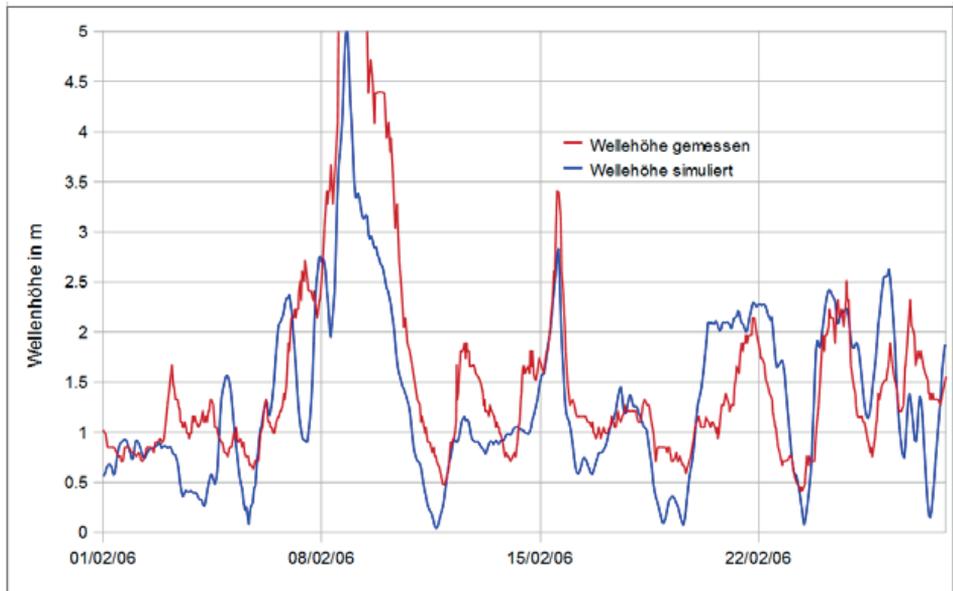


Abbildung 6: Vergleich berechneter (MARINA) zu gemessener Wellenhöhen an der Boje NSB.

3.3.2 Morphodynamik

Entsprechend der Fragestellungen an die morphodynamischen Modelluntersuchungen können unterschiedliche Detaillierungsstufen der Modellplausibilisierung betrachtet werden. Für die Plausibilisierung der morphodynamischen Modellkomponenten können regelmäßige Vermessungen des Gewässerbodens in Verbindung mit geeigneten räumlichen und zeitlichen Interpolationsverfahren herangezogen werden. Neben volumetrischen Betrachtungen der Gewässerbettentwicklung lassen sich weiterhin Bodenformen und die Veränderung der Kornzusammensetzung zur Plausibilisierung verwenden.

Die absolute Lage des Gewässerbodens eignet sich nicht als Validierungsgröße, da die Messunsicherheiten insbesondere in großen Tiefen und in morphologisch hoch aktiven Bereichen recht groß sind.

4 Sedimenttransport in der Deutschen Bucht

Der Sedimenttransport in der Deutschen Bucht wird aus unterschiedlichen Quellen gespeist. Hierzu zählen die Ästuarie, vor allem aber die angrenzenden Bereiche der Nordsee. Schon in der Vergangenheit wurde hierzu eine Vielzahl von Untersuchungen durchgeführt. In Abb. 7 sind die wesentlichen Abschätzungen des Sedimenttransportes in der Nordsee aus einer Literaturstudie und den im Rahmen der gutachterlichen Tätigkeit der Bundesanstalt für Wasserbau identifizierten Sedimenteinträge von Elbe-, Weser- und Ems-Ästuar in die Deutsche Bucht zusammengefasst. Siehe hierzu u. a.: POHLMANN und PULS (1994); MCMANUS und PRANDLE (1997); EISMA und IRION (1988); MCCAVE (1987); ODD und MURPHY (1992); BOON et al. (1997); VAN ALPHEN (1990); EISMA (1981); PULS et al. (1997); DE KOK (2004); NAUW und RIDDERINKHOF (2009).

Im Rahmen von AufMod wurden zur Beurteilung der großräumigen und mittel- bzw. langfristigen morphodynamischen Verhältnisse in der Deutschen Bucht morphodynamische Simulationsrechnungen jeweils über ein Jahr durchgeführt und diese Modellergebnisse unter unterschiedlichen Aspekten analysiert.

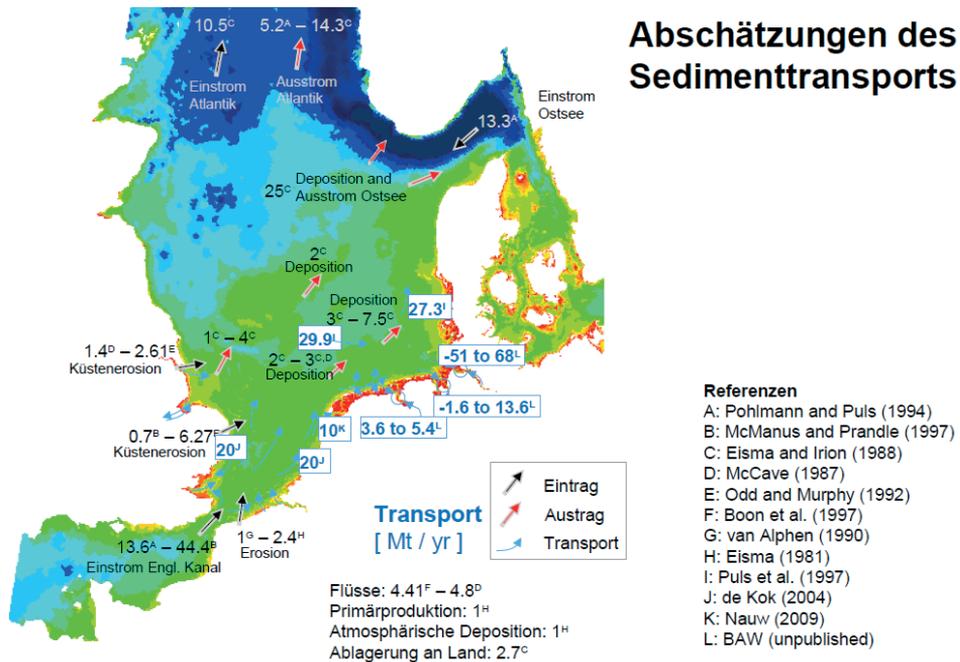


Abbildung 7: Abschätzung der jährlichen Sedimenttransportmengen auf der Basis unterschiedlicher Literaturquellen.

4.1 Sedimenttransportpfade

Als Synthese der in den einzelnen Modellen berechneten Sedimenttransporte wurde in AufMod als Analyseansatz die Berechnung von Sedimenttransportpfaden genutzt. Zur Veranschaulichung der räumlichen Struktur des Sedimenttransports wird dazu im Sinne Lagrangescher Trajektorien berechnet, wie sich einzelne Sedimentpartikel basierend auf dem analysierten mittleren Transport bewegen würden. In Abb. 8 sind diese Trajektorien für die einzelnen Modelle und die zur Berechnung der Trajektorien herangezogenen resultierenden Sedimenttransporte als Intensität (Farbskala) und Richtung (Vektoren) dargestellt. Zur Vergleichbarkeit der einzelnen Modellsysteme wurde dazu der Gesamttransport, als Summe aus Suspensions- und Geschiebetransport, genutzt. Ausgehend vom Multi-Modellansatz wurde abschließend das arithmetische Mittel der resultierenden Transporte und zugehörigen Transportpfade aus allen drei vorgenannten Simulationsergebnissen ermittelt (AufMod-Modell-Ergebnis).

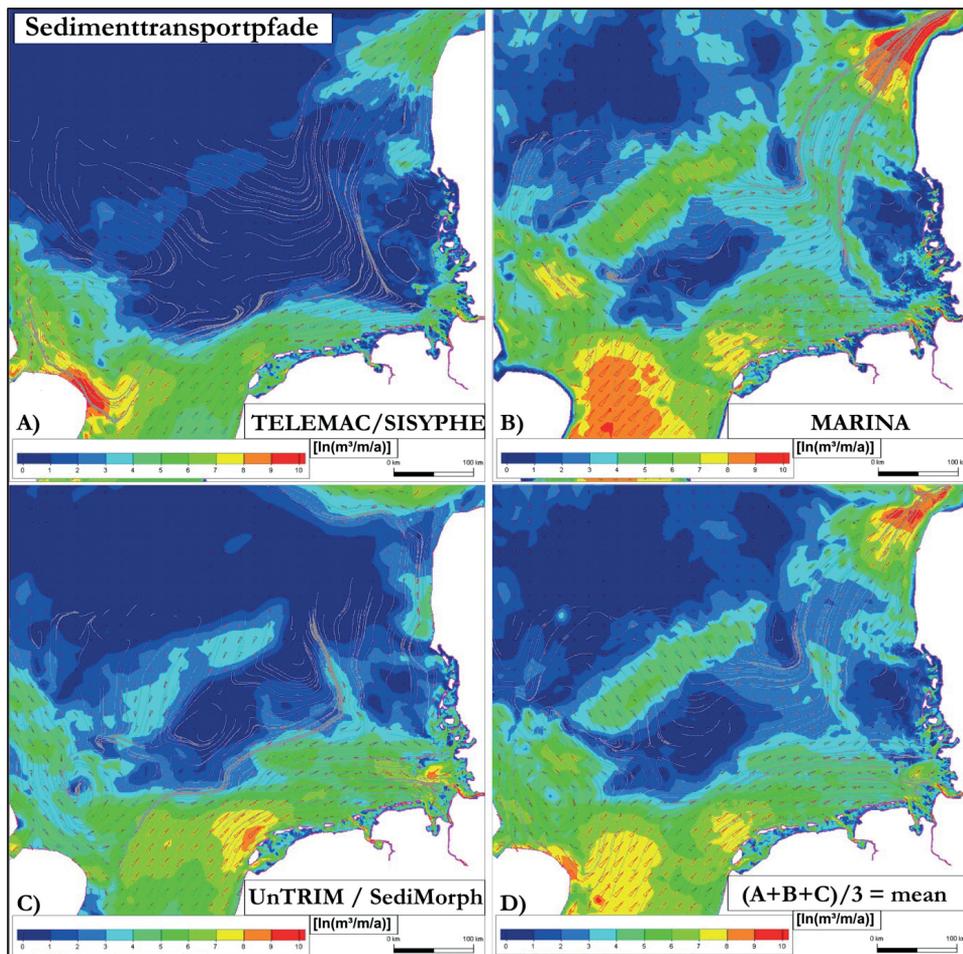


Abbildung 8: Sedimenttransportpfade und -intensitäten des Sedimenttransports in der erweiterten Deutschen Bucht auf Basis der Modellsysteme A) TELEMAC-SISYPHE, B) MARINA, C) UnTRIM-SediMorph und D) der Mittelwert aus allen drei Simulationen.

Für die betrachteten Modelle zeigt sich ein konsistentes Bild der Transportpfade. Der berechnete Sedimenttransport ist entlang der ostfriesischen Inseln in die Innere Deutsche Bucht hinein gerichtet. Das in diesen Bereich transportierte Material verbleibt im Wesentlichen in der Deutschen Bucht. Auffällig ist das Abknicken der Transportpfade westlich von Helgoland in nordwestlicher Richtung entlang des ehemaligen Elbeurstromtales. Die genaue Ausprägung dieser generellen Transportrichtung und insbesondere die Menge des transportierten Materials unterscheiden sich dagegen in den einzelnen Modellen zum Teil erheblich. Der nach Osten gerichtete Sedimenttransport im südlichen Teil der Deutschen Bucht sowie das Abknicken der Transportrichtungen über dem ehemaligen Elbeurstromtal decken sich mit den Erkenntnissen aus der Analyse der Oberflächensedimentverteilungsmuster in der Deutschen Bucht (VALERIUS et al. 2015).

Die Aufteilung der resultierenden Sedimenttransportfrachten in den Anteil der suspendierten und am Boden transportierten Anteile wird auf Abb. 9 deutlich. Die bodennahen Transporte konzentrieren sich im Wesentlichen in den Ästuarmündungen und im Bereich der Inseln. Die Schwebstofffrachten sind rund eine Größenordnung stärker als die Geschiebefracht.

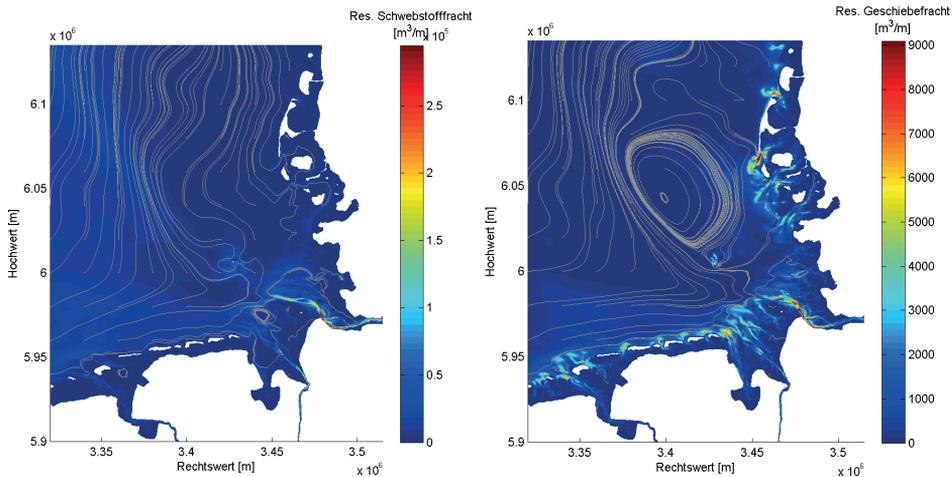


Abbildung 9: Resultierende Schwebstofffracht (links) und resultierende Geschiebefracht (rechts) [m^3/m] bzw. Pfade für das Szenario 2006.

4.2 Variation der Transportpfade

Eine Vielzahl numerischer Simulationen hat gezeigt, dass sich Veränderungen in den Transportmengen und -pfaden in Abhängigkeit der meteorologischen Gegebenheiten zur Folge haben. Diese Änderungen lassen sich bezgl. ganzer Jahre ausmachen und bis hin zu jahreszeitlichen Einflüssen analysieren.

In der Abb. 10 wurden beispielsweise Modellsimulationen mit den meteorologischen Randbedingungen der Jahre 1998 und 2006 durchgeführt und die zugehörigen resultierenden Sedimenttransportpfade dargestellt. Im Vergleich zum meteorologisch eher ruhigen Jahr 2006 kam es 1998 zu höheren Wind- und Seegangseinwirkungen in der Deutschen Bucht. Hierdurch haben sich die mittleren resultierenden Sedimenttransportpfade in Richtung Osten verschoben. Das typische Abknicken vor Helgoland und die anschließende Bündelung im Elbe-Urstromtal ist ein stabiles Muster.

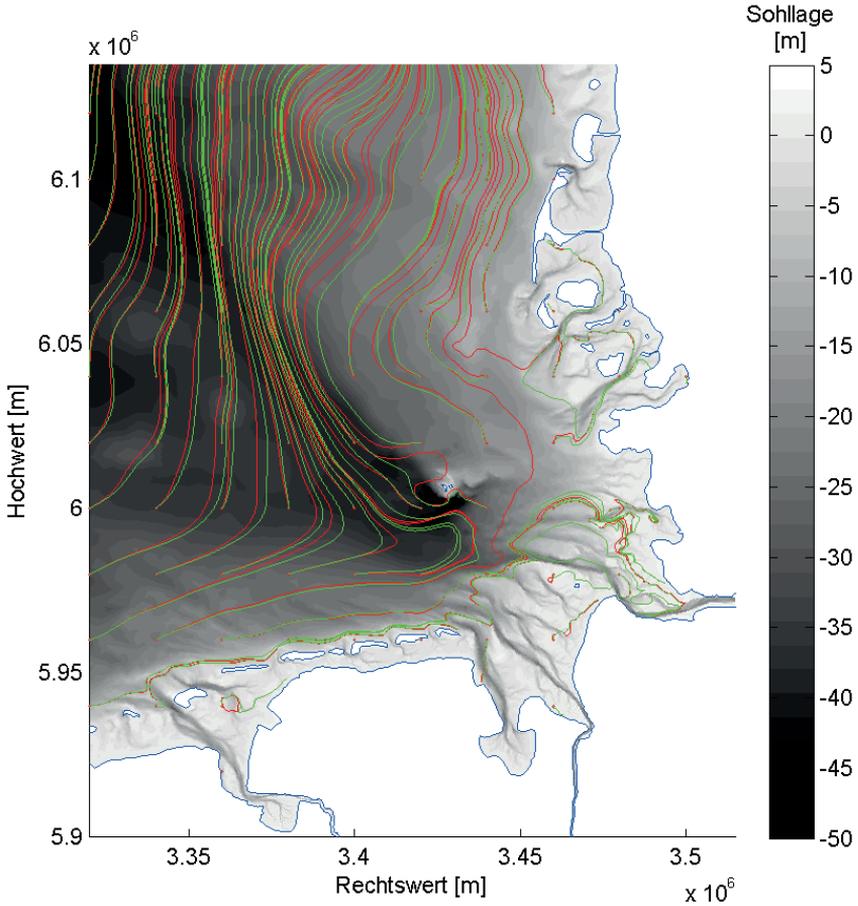


Abbildung 10: Unterschiedliche Transportpfade der Jahre 1998 (grün) und 2006 (rot).

4.3 Volumenbilanzen

Zur Abschätzung des Nettotransports in die Deutsche Bucht hinein bzw. aus der Deutschen Bucht heraus, wurden die Sedimenttransporte entlang ausgewählter Profile für den Untersuchungszeitraum 1996-2007 bilanziert. Eine Gegenüberstellung der Simulationsergebnisse von UnTRIM-SediMorph (rot, 1996-2007), TELEMAC-SISYPHE (grün, 1998 und 2006) sowie von MARINA (hellblau, 2006) untereinander sowie der Bezug zur Dauer hoher Windgeschwindigkeiten ($W > 18$ m/s, blau) wird auf Abb. 11 dargestellt.

Der Vergleich mit der Dauer hoher Windgeschwindigkeit zeigt überwiegend eine hohe Korrelation mit der Netto-Deposition und weist daher auf die starke Wirkung des meteorologischen Antriebs für die Richtung und Menge des resultierenden Sedimenttransportes in der Deutschen Bucht hin.

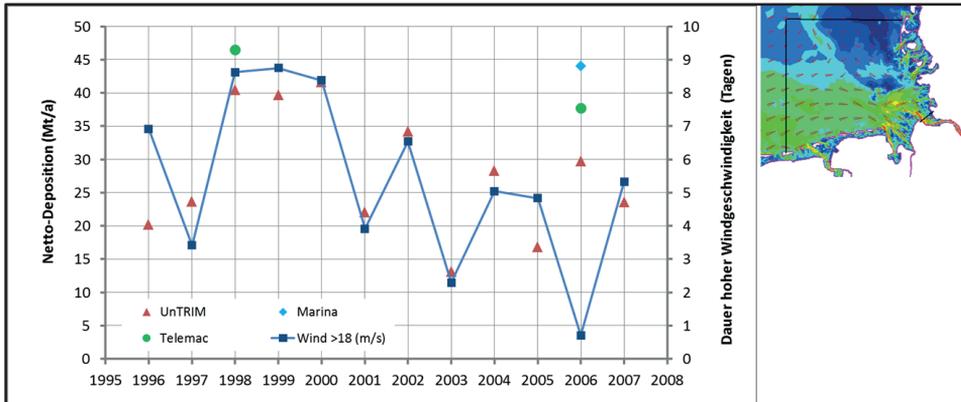


Abbildung 11: Netto-Deposition [Mt/a] in der Deutschen Bucht auf Basis der Berechnungen (rot: UnTRIM, grün: TELEMAC, hellblau: MARINA) und Dauer hoher Windgeschwindigkeit (>18 m/s) in Helgoland (blau). Die Lage der Schnittprofile ist rechts dargestellt.

Die ausgetragenen Mengen aus der Deutschen Bucht sind um etwa eine Größenordnung geringer als die Eintragsmengen. Der Austausch mit den Ästuaren ist in den Modellen durch die gewählte räumliche Auflösung nur unzureichend aufgelöst und wird für die Bilanzierung nicht explizit berücksichtigt. Die Netto-Deposition in der Deutschen Bucht, als Differenz des residuellen Sedimenttransports über die Bilanzierungsprofile basiert z. B. auf den Ergebnissen von UnTRIM-SediMorph (1996 – 2007) und beträgt im Mittel ca. 28 Mt/a. Der höchste Wert von ca. 42 Mt/a in der untersuchten Jahreszeitreihe wird in den anderen Jahren nur zu etwa 1/2 bzw. 1/3 erreicht.

Der Vergleich der Berechnungsergebnisse der unterschiedlichen Modelle zeigt für das Jahr 1998 eine relativ gute Übereinstimmung (40,5-46,5 Mt/a), während für das Jahr 2006 deutlichere Unterschiede sichtbar werden (30 Mt/a-44 Mt/a). In der Größenordnung entsprechen die Ergebnisse der prozessbasierten Simulationsmodelle denen aus den Vermessungsdaten abgeleiteten volumetrischen Veränderungen in der Deutschen Bucht. Bei einer Fläche der Deutschen Bucht von rd. 32.000 km² und einer Porosität von 0,4 ergibt sich für eine Netto-Deposition von 28 Mt/a eine gleichmäßige, flächendeckende Erhöhung der Sohle von rd. 0,55 mm/a.

Sowohl die datenbasierten Modelle (Funktionales Bodenmodell) als auch die prozessbasierten Simulationen (Morphodynamischer Multi-Modell Ansatz) weisen eine Akkumulation von Sedimenten in der Deutschen Bucht aus. Insbesondere wächst das Watt schon heute an (vgl. MILBRADT et al. 2015).

5 Zusammenfassung

Die Einbettung der prozessbasierten morphodynamischen Simulationsmodelle in den konzeptionellen Modellansatz in AufMod hat zu einer Verbesserung des Verständnisses der morphodynamischen Prozesse in der Deutschen Bucht geführt. Der konzeptionelle Modellansatz beinhaltet die Verbesserung von Naturmessverfahren über ein generalisiertes Datenmodell bis hin zum konzeptionellen morphodynamischen Modell der Deutschen Bucht als Verknüpfung aller zusammengetragenen Informationen. Die Kombination unterschiedlicher Modellkerne auf der Basis möglichst gleicher Netzauflösungen,

Randbedingungen und Anfangswerten ermöglichte die Darstellung von Unterschieden und vor allem die Identifikation von modellunabhängigen Mustern in den Simulationsergebnissen.

Ein wesentliches Ergebnis der prozessbasierten Modelluntersuchungen war die reproduzierbare Bestimmung von resultierenden Sedimenttransportpfaden in der Deutschen Bucht. Nicht zuletzt konnten auf der Basis der morphodynamischen Multi-Modellsimulationen belastbare resultierende Sedimenttransportmengen, die in die Deutsche Bucht ein- und ausgetragen werden, abgeschätzt werden. Die durch die Modelle prognostizierten 13 Mt/a bis über 46 Mt/a Netto-Depositionen berücksichtigten auf Grund der Modellausdehnungen und -auflösungen jedoch noch nicht den Austausch mit den Ästuaren und korrelieren gut mit dem meteorologischen Antrieb. Die im Rahmen von AufMod durchgeführten morphodynamischen Simulationen weisen ebenfalls eine hohe Schwankungsbreite zwischen den Modellergebnissen auf, deren Bewertung durch die aktuelle Messgenauigkeit und Abdeckung stark eingeschränkt ist und zusätzlich anthropogene Einflüsse wie Bagger- und Verklappungsvorgänge berücksichtigen muss. Die Weiterentwicklung der morphodynamischen Simulationen für die äußeren Ästuare stellt daher eine Herausforderung dar, die in zukünftigen Forschungsvorhaben weiter vorangetrieben werden muss.

6 Schriftenverzeichnis

- BOON, J.; VAN DER KAAIJ, T.; VOS, R. J. and GERRITSEN, H.: Modelling of suspended matter (SPM) in the North Sea, model set up and first sensitivity analysis. Delft Hydraulics Research Report, Z2025, 1997.
- CHU, K.; WINTER, C.; HEBBELN, D. and SCHULZ, M.: Improvement of morphodynamic modeling of tidal channel migration by nudging. In: Coastal Engineering, Jg. 77, 1-13, doi: 10.1016/j.coastaleng.2013.02.004, 2013.
- EHLERS, J.: The morphodynamics of the Wadden Sea. Balkema, Rotterdam, Brookfield, U.S.A., VIII, 397 S, 1988.
- EISMA, D.: Supply and deposition of suspended matter in the North Sea. Spec Publ Int Ass Sediment 5, 415-428, 1981.
- EISMA, D. and IRION, G.: Suspended Matter and Sediment Transport. In: SALOMONS, W.; BAYNE, B. L.; DUURSMA, E. K. and FÖRSTNER, U. (eds.): Pollution of the North Sea. Berlin, Heidelberg, 20-35, doi: 10.1007/978-3-642-73709-1_2, 1988.
- GAYER, G.; DICK, S. und PLESKACHEVSKY, A.: Modellierung von Schwebstofftransporten in Nordsee und Ostsee. BSH-Hamburg, Berichte des BSH, 2004.
- GERRITSEN, H.; VOS, R. J.; VAN DER KAAIJ, T.; LANE, A. and BOON, J. G.: Suspended sediment modelling in a shelf sea (North Sea). In: Coastal Engineering, Jg. 41, 1-3, 317-352, doi: 10.1016/S0378-3839(00)00042-9, 2000.
- HEYER, H. und SCHROTTKE, K.: Aufbau von integrierten Modellsystemen zur Analyse der langfristigen Morphodynamik in der Deutschen Bucht – AufMod, Gemeinsamer Abschlussbericht für das Gesamtprojekt mit Beiträgen aus allen 7 Teilprojekten. doi: 10.2314/GBV:780783271, 2013.
- Stand 2013: <http://edok01.tib.uni-hannover.de/edoks/e01fb14/780783271.pdf>

- JANSSEN, F.; SCHRUM, C. and BACKHAUS, J. O.: A Climatological Data Set of Temperature and Salinity for the Baltic Sea and the North Sea. *Journal of Hydrography*, 9, 1999.
- JUNGE, I.; WILKENS, J.; HOYME, H. and MAYERLE, R.: Modelling of Medium-Scale Morphodynamics in a Tidal Flat Area in the South-Eastern German Bight. In: *Die Küste*, 69, 279-311, 2006.
- DE KOK, J. M.: Slibtransport langs de Nederlandse kust. Bronnen, fluxen en concentraties. Report RIKZ/OS/2004.148w, Ministry of Transport, Public Works and Water Management, Rijkswaterstaat, 2004.
- LYARD, F.; LEFEVRE, F.; LETELLIER, T. and FRANCIS, O.: Modelling the global ocean tides: modern insights from FES2004. *Ocean Dynamics*, Vol. 53, 394-415, 2006.
- MCCAVE, I. N.: Fine sediment sources and sinks around the East Anglian Coast (UK). In: *Journal of the Geological Society*, Vol. 144, 1, 149-152, doi: 10.1144/gsjgs.144.1.0149, 1987.
- MCMANUS, J. P. and PRANDLE, D.: Development of a model to reproduce observed suspended sediment distributions in the southern North Sea using Principal Component Analysis and Multiple Linear Regression. In: *Continental Shelf Research*, Vol. 17, 7, 761-778, doi: 10.1016/S0278-4343(96)00057-X, 1997.
- MILBRADT, P.: Analyse morphodynamischer Veränderungen auf der Basis zeitvarianter digitaler Bathymetriem. *Die Küste*, 78, 33-58, 2011.
- MILBRADT, P.; VALERIUS, J. und ZEILER, M.: Das Funktionale Bodenmodell. *Die Küste*, 83, 2015.
- NAUW, J. J. and RIDDERINKHOF, H.: Slibtransport door het Marsdiep op basis van veerbootmetingen (project nr. RKW-1700), NIOZ report 2009-7, 2009.
- ODD, N. V. M. and MURPHY, D. G.: Particulate pollutants in the North Sea. Report SR 292, 1992.
- OTTO, L.; ZIMMERMAN, J.; FURNES, G.; MORK, M.; SAETRE, R. and BECKER, G.: Review of the physical oceanography of the North Sea. In: *Netherlands Journal of Sea Research*, Jg. 26, 2-4, 161-238, doi: 10.1016/0077-7579(90)90091-T, 1990.
- PLÜB, A. and HEYER, H.: Morphodynamic Multi-Model approach for the Elbe estuary. In: DOHMEN-JANSSEN, C. und HUSCHLER, S. (Hrsg.): *River, Coastal and Estuarine Morphodynamics: RCEM 2007, Two Volume Set*, 113-117, doi: 10.1201/NOE0415453639-c15, 2007.
- POHLMANN, T. and PULS, W.: Currents and Transport in Water. In: SÜNDERMANN, J. (ed.): *Circulation and Contaminant Fluxes in the North Sea*. Berlin, Heidelberg, 345-402, doi: 10.1007/978-3-642-78294-7_11, 1994.
- PULS, W.; HEINRICH, H. and MAYER, B.: Suspended particulate matter budget for the German Bight. In: *Marine Pollution Bulletin*, Vol. 34, 6, 398-409, doi: 10.1016/S0025-326X(96)00161-0, 1997.
- PUTZAR, B. und MALCHEREK, A.: Entwicklung und Anwendung eines Langfrist-Morphodynamik-Modells für die Deutsche Bucht. *Die Küste*, 83, 2015.
- STANEV, E. V.; AL-NADHAIRI, R.; STANEVA, J.; SCHULZ-STELLENFLETH, J. and VALLE-LEVINSON, A.: Tidal wave transformations in the German Bight. In: *Ocean Dynamics*, Jg. 64, 7, 951-968, doi: 10.1007/s10236-014-0733-6, 2014.
- STANEVA, J.; STANEV, E. V.; WOLFF, J.-O.; BADEWIEN, T. H.; REUTER, R.; FLEMMING, B.; BARTHOLOMÄ, A. and BOLDING, K.: Hydrodynamics and sediment dynamics in

- the German Bight. A focus on observations and numerical modelling in the East Frisian Wadden Sea. In: *Continental Shelf Research*, Jg. 29, 1, 302-319, doi: 10.1016/j.csr.2008.01.006, 2009.
- SÜNDERMANN, J. and POHLMANN, T.: A brief analysis of North Sea physics. In: *Oceanologia*, Jg. 53, 3, 663-689, doi: 10.5697/oc.53-3.663, 2011.
- VAN ALPHEN, J.: A mud balance for Belgian-Dutch coastal waters between 1969 and 1986. In: *Netherlands Journal of Sea Research*, Vol. 25, 1-2, 19-30, doi: 10.1016/0077-7579(90)90005-2, 1990.
- VALERIUS, J.; KÖSTERS, F. und ZEILER, M.: Erfassung von Sandverteilungsmustern zur großräumigen Analyse der Sedimentdynamik auf dem Schelf der Deutschen Bucht. *Die Küste*, 83, 2015.
- WINTER, C.: Macro scale morphodynamics of the German North Sea coast. In: *Journal of Coastal Research*, Jg. 64, 706-710, 2011.
- ZEILER, M.; SCHULZ-OHLBERG, J. and FIGGE, K.: Mobile sand deposits and shoreface sediment dynamics in the inner German Bight (North Sea). In: *Marine Geology*, Jg. 170, 3-4, 363-380, doi: 10.1016/S0025-3227(00)00089-X, 2000.

Datenmanagement in AufMod

Christoph Wosniok und Jennifer Valerius

Zusammenfassung

Mit dem Abschluss vieler Forschungsprojekte sind Ergebnisse für Außenstehende nur noch über einen persönlichen Kontakt zu erlangen. So wird weitere Forschung und Entwicklung deutlich erschwert. Auch sind Datenformate und Datenzugangsstrukturen vom jeweiligen Verwalter der Projektergebnisse abhängig. Im BMBF-geförderten KFKI-Projekt AufMod wurden Ergebnisprodukte über die Strukturen der Marinen Dateninfrastruktur Deutschland MDI-DE bereitgestellt. Somit sind mit Abschluss des Projekts sowohl Metadaten als auch Ergebnisdaten für die Öffentlichkeit standardisiert und dauerhaft verfügbar. Dieser Weg zeigt, insbesondere in Hinblick auf deutsche und europäische Gesetze und Richtlinien, die Möglichkeiten zur Bereitstellung für Ergebnisse aus anderen F&E-Projekten auf.

Schlagwörter

AufMod, Datenmanagement, Geodateninfrastruktur, Metadaten, WMS, WFS, WCS

Summary

With the closure of many research projects results can only be gathered via a personal contact with project members. Consequently, further research and development is hindered. Additionally, data access structures and formats depend on the administrative handling of project results. Within the BMBF-supported KFKI-Project "Long-term analysis of morphosedimentary processes within the German Bight with integrated modeling" (AufMod) (2009-2012) resulting products have been provided via the Marine Data Infrastructure Germany MDI-DE. Project results are permanently available in standardized data and metadata formats. This opens possibilities for a standardized data publication on a regular basis for other research and development projects results, regarding specifically German and European laws and directives.

Keywords

AufMod, Data management, Spatial Data Infrastructure, Metadata, WMS, WFS, WCS

Inhalt

1	Einleitung.....	168
2	Marine Dateninfrastruktur Deutschland MDI-DE	169
3	AufMod in der MDI-DE.....	170
3.1	AufMod-Datenmanagement im ISK BAW	172
3.2	Verwaltung der AufMod-Daten in der GDI-BSH.....	174

4	Zusammenfassung und Ausblick.....	176
5	Schriftenverzeichnis.....	177

1 Einleitung

Mit dem Ende eines Forschungs- und Entwicklungsprojekts sind Ergebnisdatensätze in der Regel nur sehr eingeschränkt zugänglich. Oft ist nur über einen persönlichen Kontakt eine Weiternutzung möglich. Einheitliche Zugangsmethoden werden kaum bereitgestellt, ebenso wie standardisierte Dokumentationen der Daten.

Für Daten, die mit öffentlichen Mitteln gewonnenen wurden, gilt in vielen Fällen die 2007 in Kraft getretene INSPIRE-Richtlinie (Infrastructure for Spatial Information in the European Community) (EUROPÄISCHES PARLAMENT UND RAT 2007). Diese gibt den technischen Rahmen für die Bereitstellung von standardisierten Metadaten und Webdiensten vor. Sie wird auch für andere europäische Richtlinien wie die Meeresstrategie-Rahmenrichtlinie (MSRL) (EUROPÄISCHES PARLAMENT UND RAT 2008) oder die Wasser-Rahmenrichtlinie (WRRL) (EUROPÄISCHES PARLAMENT UND RAT 2000) bei der Bereitstellung von Datensätzen angewandt. In Deutschland wurde INSPIRE mit dem Geodatenzugangsgesetz ratifiziert (GeoZG 2012).

Ergebnisse aus Forschungsprojekten fallen in der Regel nicht unter die INSPIRE-Richtlinie. Trotzdem gibt es mehrere Bestimmungen, wie auch diese Daten nach und nach der Öffentlichkeit zugänglich werden müssen. Das Umweltinformationsgesetz (UIG 2013) ermöglicht es heute schon prinzipiell jedem Bürger und Unternehmen, aus öffentlicher Hand erhobene Daten einzusehen und weiter zu nutzen. Damit wird dem Open Government-Paradigma gefolgt, demzufolge ein offener, vernetzter und bürgerorientierter Staat geschaffen werden soll (SCHLIESKY 2006). In den USA und anderen Ländern werden vergleichbare Bestrebungen mit Initiativen wie data.gov oder data.gov.uk schon seit einiger Zeit betrieben. Gleichzeitig wird unter dem Begriff eGovernment die Verlagerung von Dienstleistungen des Staates auf digitale Wege angestrebt, um die Verwaltung schneller und effizienter zu gestalten (EGovG 2013). Gründe für die Schaffung von Transparenz gegenüber dem Bürger sind beispielsweise kontrovers diskutierte Themen wie die Fahrrinnenanpassung der Elbe oder eine verbesserte Wiederverwertung von Daten in Forschung und Wirtschaft und die damit verbundene Schaffung von Mehrwert. Dieser Paradigmenwechsel auf internationaler und nationaler Ebene, weg von „grundsätzlichen geheimen“ zu „grundsätzlich offenen“ aus öffentlichen Geldern geschaffenen Daten, birgt mitunter noch Klärungsbedarf. Offene Fragen liegen unter anderem in den Bereichen Qualitätssicherung, Lizenzierung, Haftung oder der technischen Umsetzung in Form von Standardisierung von Methoden und Formaten vor.

Somit ist anzunehmen, dass eine Veröffentlichung von Forschungsergebnissen zunehmend Teil von Genehmigungsbedingungen für F&E-Projekten sein wird. Dies war bei der Ausschreibung für das BMBF-geförderte Projekt AufMod durch das KFKI der Fall, welches im Folgenden beschrieben werden soll. Ergebnisse dieses interdisziplinären Projekts waren unter anderem Kennwerte aus hydrodynamischen Simulationen oder sedimentologische und morphologische Messdaten und daraus abgeleitete Produkte. Zeitlich nahezu parallel wurde die Marine Dateninfrastruktur Deutschland (MDI-DE) ins Leben gerufen. In der MDI-DE wurden die technologischen Grundlagen konform zu Standards des ISO für Metadaten, des OpenGeospatial Consortiums (OGC) für

Webdienste und von INSPIRE umgesetzt. Über die verteilte Architektur der MDI-DE ist es möglich, die Daten bei verschiedenen Projektpartnern von AufMod zu halten und bereitzustellen.

2 Marine Dateninfrastruktur Deutschland MDI-DE

Die MDI-DE wurde 2010 als dreijähriges Projekt vom BMBF gefördert und nach Projektende 2013 in den Dauerbetrieb überführt. In einem Verbund, bestehend aus mehreren Landesbehörden der deutschen Nord- und Ostseeküste, den Bundesoberbehörden Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) und Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH), der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung und der Universität Rostock für die wissenschaftliche Begleitforschung, wurden die Strukturen für die Bereitstellung von Daten aus Meeresnaturschutz, Küstengewässerschutz, Küsteningenieurwesen und Forschung geschaffen. Über die MDI-DE werden auch Richtlinien wie die MSRL oder INSPIRE bedient. Zentrales Element ist ein Portal zur Suche von Datensätzen und Metadaten über alle angeschlossenen Datenbestände, sog. Infrastrukturknoten (ISK), sowie die Möglichkeit zur Visualisierung von Webdiensten (MDI-DE 2014b) (Abb. 1).



Abbildung 1: Die Einstiegsseite des MDI-DE Portals mit Suchoptionen für AufMod-Produkte: Die freie Suche und der Themeneinstieg.

Jeder ISK verfügt über einen Metadatenkatalog und über einen Datenspeicher für die Bereitstellung von Webdiensten (BINDER et al. 2012). Im zentralen Portal werden die Metadaten tagesaktuell bereitgestellt, in diesen befinden sich dann Links auf die Daten oder Webdienste. Diese Dienste-orientierte Architektur ermöglicht es, das Datentransportvolumen gering zu halten und trotzdem alle relevanten Informationen zu den Daten

zu transportieren. Prinzipiell ist es möglich, Verknüpfungen zu Datenbeständen in beliebigen Formaten zu setzen. Für eine interoperable Bereitstellung wird aber die Nutzung von Webdiensten angestrebt. Die unter der Leitung des OGC entwickelten Dienste gehören dabei zu den etablierten Standards. Diese umfassen den Web Mapping Service (WMS) (DE LA BEAUJARDIERE 2006) für die Darstellung von Vektorgrafiken, den Web Coverage Service (WCS) (BAUMANN 2010) für die Darstellung von Rasterdaten und den Web Feature Service (WFS) (VRETANOS 2010) für den Download von Daten. Über einen OGC Catalogue Service for the Web (CSW) (VOGES and SENKLER 2007) werden die Metadaten von Infrastrukturknoten auf das zentrale Portal gespiegelt, der sogenannte Harvesting-Mechanismus. Das Portal selbst hält so keine Daten bereit, sondern bündelt die Metadaten der angeschlossenen Infrastrukturknoten tagesaktuell.

Die Metadaten folgen dabei den Standards von ISO (ISO 19115: Geographic Information – Metadata) (ISO 19115:2003) und von INSPIRE (EUROPEAN COMMISSION JOINT RESEARCH CENTRE, METADATA DRAFTING TEAM 2010). Eine minimale Teilmenge von zwingend auszufüllenden Elementen bewirkt die Interoperabilität zwischen verschiedenen Metadateninformationssystemen. Die Zusammenführung der Metadaten kann somit nur durch die Nutzung eines gemeinsamen Standards gelingen. Die Standardisierung stellt so die semantische Integrität und Vergleichbarkeit der Metadaten her. Folglich bilden Metadaten, neben der strukturierten Dokumentation der Datensätze, auch die Grundlage für die Suche nach Daten in Geodatenportalen wie der MDI-DE. Zudem bewirken die notwendigerweise auszufüllenden Metadatenelemente zumindest eine grobe Qualitätssicherung.

3 AufMod in der MDI-DE

Das vom BMBF geförderte KFKI-Projekt AufMod befasste sich mit dem übergeordneten Ziel, Grundlagen zur großräumigen Untersuchung von Sedimenttransportwegen, -richtungen und -mengen in der Deutschen Bucht zu schaffen. Das Projekt fußte auf zwei Disziplinen, dem Küsteningenieurwesen und der Geologie, deren Zusammenarbeit grundlegend zum Erkenntnisgewinn beitrug. So wurde zum einen ein messdatenbasiertes Bodenmodell für das Gebiet der Deutschen Bucht aufgebaut (Funktionales Bodenmodell, siehe MILBRADT et al. 2015), welches konsistente Informationen über die Morphologie und Sedimente des Meeresbodens liefert. Weiterhin wurden prozess- und datenbasierte numerische Verfahren zur Simulation sediment- und morphodynamischer Vorgänge in der Deutschen Bucht weiterentwickelt. Ergebnisprodukte sind Messdaten, sedimentologische und morphologische Parameter, konsistente Bathymetriemessungen sowie hydrodynamische Kennwerte.

Um diese umfangreichen und heterogenen Ergebnisse langfristig einer möglichst breiten Öffentlichkeit verfügbar machen zu können, wurde eine Infrastruktur benötigt, die über die monolithische Darstellung einer Projekt-Webseite hinausgeht. Für eine Bereitstellung war eine umfassende Dokumentation der Datenprodukte unerlässlich. Produkte sollten außerdem in verschiedenen Formaten angeboten werden können. Die MDI-DE stellte hierfür die entsprechenden Technologien bereit, um Ergebnisse standardkonform und auch von räumlich verteilten Datenknoten aus bereitzustellen. So wurde nicht nur das Datenvolumen aufgeteilt, es konnten lokal etablierte Softwaresysteme und -werkzeuge auch weiterhin genutzt werden.

Abb. 2 zeigt die vereinfachte Struktur der AufMod-Daten in der MDI-DE. BAW und BSH stellen zunächst je einen Infrastrukturknoten mit jeweils einem Datenspeicher und einem Metadaten system bereit. Über Verlinkungen in den Metadaten wird auf die verschiedenen Repräsentationsformen der Daten in den Speicherstrukturen gezeigt. Diese Datenspeicher bestehen insbesondere aus Webservern, die Daten in Form von standardisierten Webdiensten zur Verfügung stellen. Es ist aber auch möglich, auf beliebige Speicher, zum Beispiel FTP-Server zu verweisen, um unterschiedliche Datenformate zu bedienen.

Das zentrale Portal der MDI-DE ruft die Metadaten von den Metadaten systemen des BSH und der BAW per harvesting ab. Das Portal stellt die AufMod-Metadaten außerdem für übergeordnete Portale, wie das Geoportal.DE (GDI-DE 2014), bereit, von wo aus die europäische Ebene mit INSPIRE bedient wird.

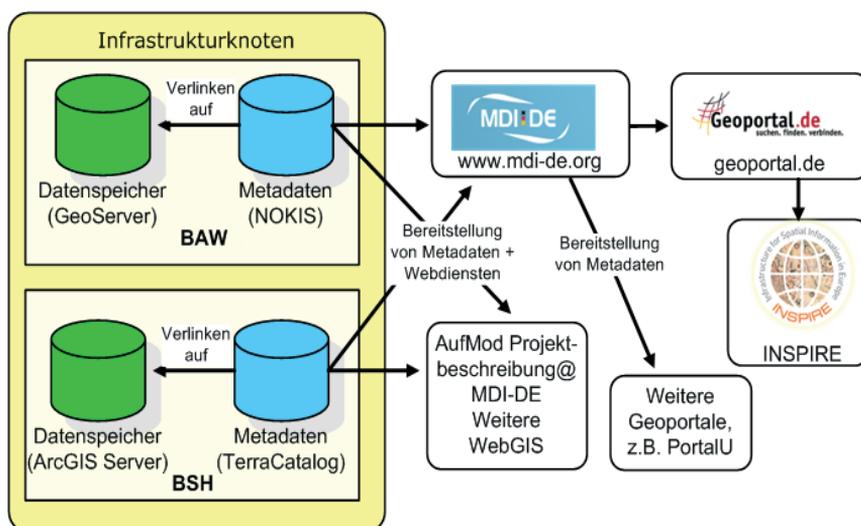


Abbildung 2: Verteilte Struktur der AufMod-Produkte in der MDI-DE, aufgeteilt auf die Infrastrukturknoten BAW und BSH. Eine Zusammenführung der Daten findet über die MDI-DE statt, von wo aus auch eine Weitergabe an das Geoportal.DE und weitere Zielsysteme erfolgt.

Für alle AufMod-Produkte wurden deshalb ISO- und INSPIRE-konforme Metadaten (WOSNIOK et al. 2013) ausgefüllt. Das zusammenführende Element für die AufMod-Datenprodukte ist das gemeinsame Schlüsselwort „aufmod“. Die Daten aus der BAW wie auch aus dem BSH können so gesammelt im Portal der MDI-DE gefunden werden. Ein elementarer Bestandteil eines Metadatensatzes, die Verknüpfung mit den tatsächlichen Daten, wird in AufMod über Links zu WMS, WFS und auch zu FTP-Servern realisiert. Diese Verknüpfungen wurden in den Metadaten notiert, so können die hinterlegten Daten oder Dienste direkt heruntergeladen oder beispielsweise im MDI-DE-Portal visualisiert werden.

Gemeinsamer Einstiegspunkt für alle AufMod-Produkte in der MDI-DE ist die Startseite des MDI-DE Portals (Abb. 1). In diesem Portal stellen alle Datenknoten der MDI-DE ihre Daten gebündelt bereit. Zusätzlich zur freien Suche ist AufMod als Themeneinstieg auf der Startseite des Portals registriert: mit einem Mausklick lässt sich eine vorgefertigte Zusammenstellung aus Webdiensten aufrufen, diese werden in der Kartenansicht

dargestellt. Weitere Datensätze können durch gezieltes Suchen gefunden werden. Ein weiterer Weg nach den Daten zu suchen, ist die NOKIS-Suchoberfläche (KFKI 2014; MDI-DE 2014c)

Die Verknüpfungen in den Metadaten führen dann zu den verschiedenen Darstellungs- und Downloadoptionen der Daten. Neben der Darstellung im MDI-DE-Portal wurde eine Dokumentationsseite für Daten geschaffen (MDI-DE 2014a), auf der einzelne Datensätze im Detail vorgestellt werden.

3.1 AufMod-Datenmanagement im ISK BAW

AufMod-Produkte werden über zwei intern unterschiedlich aufgebaute Infrastrukturknoten, dem ISK BAW und dem ISK GDI-BSH, an die MDI-DE angebunden (vgl. Abb. 3 und Abb. 5). Der ISK BAW nutzt als Metadaten-System den hausintern bereits etablierten NOKIS-Metadaten-Editor, der auf dem umfassenden NOKIS-Küstenmetadatenprofil aufbaut (LEHFELDT und REIMERS 2008). Als Webdienste-Server wird die OpenSource-Lösung GeoServer in Verbindung mit einer PostgreSQL-Datenbank mit der PostGIS-Erweiterung für räumliche Daten eingesetzt. GeoServer ist die Referenzimplementierung der OGC Dienste WFS und WCS. Diese ist auch konform mit anderen Standards wie WMS.

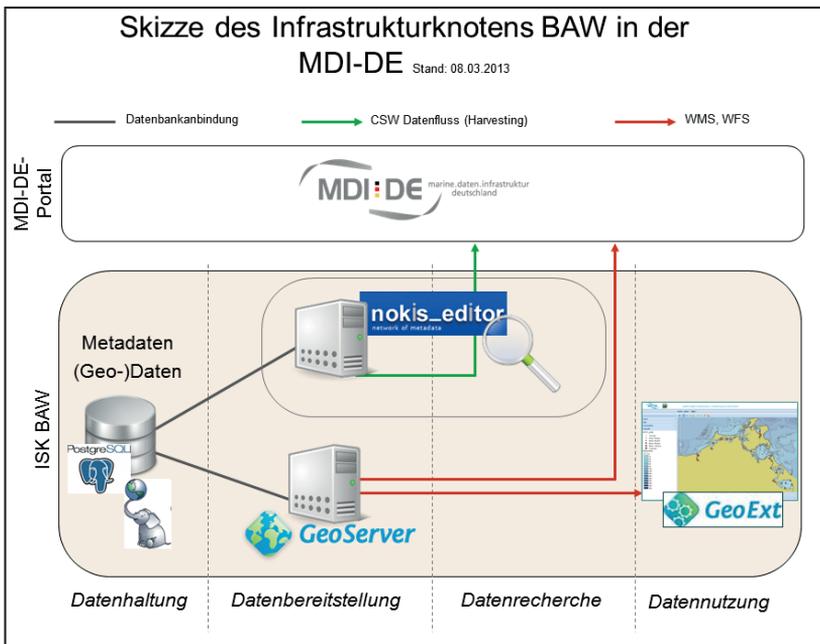


Abbildung 3: Struktur des Infrastrukturknotens der BAW mit dem Metadaten-System NOKIS und dem Webdienste-Server GeoServer.

Über den ISK BAW werden Simulationsergebnisse aus der prozessbasierten Modellierung bereitgestellt (vgl. Kapitel 7). Bei diesen handelt es sich vorrangig um Tidekennwerte des Wasserstandes und der Strömung für unterschiedliche Wind- und Tidesituationen (Tab. 1).

Jede Analysegröße wird unter verschiedenen Bedingungen bereitgestellt: Acht Windrichtungen wurden in 45° Schritten (Nord, Nord-Ost, Ost...) mit einer Windgeschwindigkeit von 12,5 m/s in einem Zeitraum von zwei Tagen (21.08.2006 - 23.08.2006) jeweils gemittelt und zur Verfügung gestellt. Zudem wurden, ebenfalls in diesem Zeitraum, die Zustände bei Windrichtung West mit einer Windgeschwindigkeit von 0,6 und 25 m/s aufgezeichnet. Außerdem wird, ohne Berücksichtigung von Wind, ein Spring-Nipp-Mittel (1.1.2006 - 1.1.2007) bereitgestellt. Insgesamt ergibt sich so eine Anzahl von 260 Datensätzen.

Tabelle 1: Von der BAW bereitgestellte Analysegrößen.

Mit. Tidehochwasser (THW)
Mit. Tideniedrigwasser (TNW)
Mit. Tidemittelwasser (TMW)
Mit. Tidenhub (THB)
Mit. THW Eintrittszeit
Mit. TNW Eintrittszeit
Mit. Flutdauer
Mit. Ebbedauer
Mit. Flut- zu Ebbedauer
Max. Flutstromgeschwindigkeit
Max. Ebbestromgeschwindigkeit
Max. Flut- zu Ebbestromgeschwindigkeit
Mit. Flutstromgeschwindigkeit
Mit. Ebbestromgeschwindigkeit
Mit. Flutstrom zu mit. Ebbestrom
Mit. Flutstromdauer
Mit. Ebbestromdauer
Mit. Reststrom
Mit. Tidestromvolumen
Mit. Flutstrom-Bodenschubspannung
Mit. Ebbestrom-Bodenschubspannung
Mit. Residuelle Bodenschubspannungswirkung
Mit. Signifikante Wellenhöhe (Hs)
Mit. Peakfrequenz

Um die Simulationsergebnisse besser darstellen und vergleichen zu können, wurde für die Kennwerte der BAW ein Tideatlas erstellt, der auf der MDI-DE-Dokumentationsseite zu finden ist. Hier können einzelne untersuchte Parameter in verschiedenen berechneten Zuständen im Untersuchungsgebiet Deutsche Bucht verglichen werden (Abb. 4). Die Metadaten für diese Daten werden deshalb in großen Teilen zusammengelegt.

Die Legenden für die Darstellung der BAW-Produkte mussten für die Nutzung im WMS angepasst werden, hierzu wird im GeoServer der OGC Styled Layer Descriptor (SLD) Standard (LUPP 2007) genutzt. Die Darstellung der in der BAW bekannten Darstellungsformen für diverse Parameter und Zustände wurde in dieses XML-Format übertragen, um die in der BAW bekannte Ansicht zu reproduzieren.

Die Datensätze des Tidekennwertatlas werden über die standardisierten OGC Dienste WMS und WFS bereitgestellt. Für die Darstellung und den Download der BAW-

Datensätze als WMS und WFS wird in einem Geoinformationssystem über entsprechende Werkzeuge eine URL eingebunden (BAW 2014a, 2014b). Eine vollständige WMS-Anfrage umfasst eine gewisse Anzahl an Parametern, wie das Beispiel Tidehochwasser mit Windrichtung West und Windgeschwindigkeit 12,5 m/s zeigt (BAW 2014c). Ein WFS-Aufruf verläuft ähnlich, Downloadformate bei einem WFS sind beispielsweise JSON, GML, Shape oder CSV.

Alle von der BAW bereitgestellten Datensätzen sind in ISO-konformen Metadaten beschrieben. Im Rahmen der Metadatenerstellung konnte aber festgestellt werden, dass die vorhandenen Elemente unzureichend für die Beschreibung von Ergebnissen aus numerischen Modellen sind. Beispielsweise kann die zum Teil sehr umfangreiche Entstehungsgeschichte eines Modellierungsergebnisses nur sehr abstrakt beschrieben werden (WOSNIOK and LEHFELDT 2013).

Tidekennwertatlas

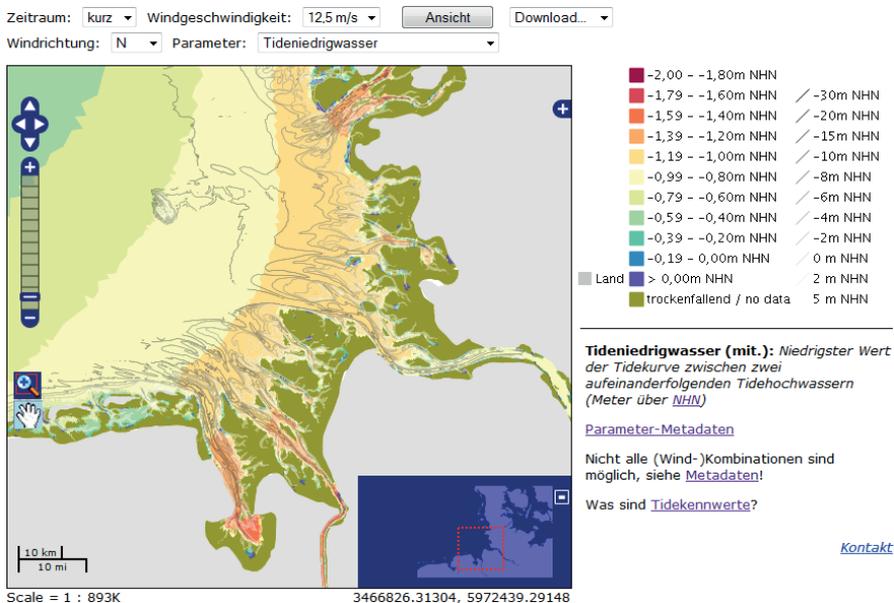


Abbildung 4: Tidekennwertatlas mit allen Funktionen. Neben dem Einblenden der Analysegrößen kann die Bathymetrie hinzugeschaltet werden und die Legende ein- oder ausgeklappt werden. Ein Download im CSV oder Shapeformat ist direkt möglich.

3.2 Verwaltung der AufMod-Daten in der GDI-BSH

Die auf den Meeresboden bezogenen Ergebnisse des AufMod-Bodenmodells werden durch den „Infrastrukturknoten GDI-BSH“ bereitgestellt (Abb. 5). Hierzu wird das für geologische Fachdaten entwickelte, GIS-gestützte Fachinformationssystem (FIS) „Shelf Geo-Explorer“ (SGE) verwendet (ZEILER et al. 2007). Die Fachdaten der verschiedenen FIS des BSH werden über ETL-Routinen (Extract, Transform, Load) ausgelesen, aufbereitet und in ein Data-Warehouse, basierend auf einer Oracle-Datenbank, geladen. Auf Grundlage des Data-Warehouse erzeugt ein ESRI ArcGIS-Server Webdienste. Dieser

stellt die Webdienste dem Geodatenportal des BSH, dem GeoSeaPortal, und dem Portal der MDI-DE zur Verfügung. In einer gesonderten Datenbank werden für alle bereitgestellten Daten und Dienste Metadaten gespeichert. Zur Bearbeitung der Metadaten wird der Metadatenkatalog terraCatalog der conterra GmbH verwendet. Das zentrale Portal der MDI-DE kopiert (harvestet) neue oder veränderte Metadatenätze täglich automatisch vom terraCatalog der GDI-BSH in den Metadatenkatalog des Portals. Somit ist der Zugriff auf die Geodaten des BSH für externe Nutzer sowohl über das GeoSeaPortal als auch über die MDI-DE möglich.

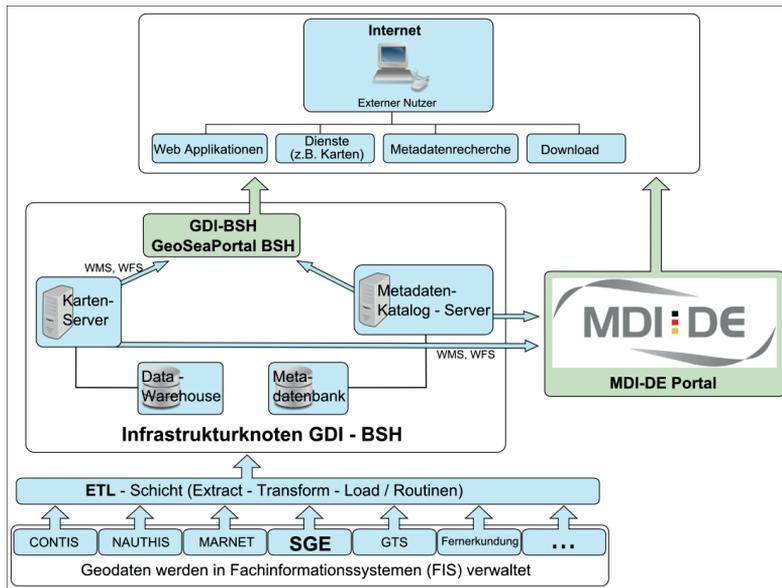


Abbildung 5: Die Struktur der GDI-BSH, mit dem hervorgehobenen Shelf Geo-Explorer (SGE) und der Anbindung an die MDI-DE über den Infrastrukturknoten GDI-BSH.

Die bereitgestellten Produkte umfassen die Ergebnisse der datenbasierten Modellierung sedimentologischer und morphologischer Parameter (MILBRADT et al. 2014). Weiterhin werden Informationen zur Felddatenerhebung, Auswertungen der Seitensichtsonardaten in den Fokusgebieten und die digitale Überarbeitung der Karte von ULRICH (1971) (ERNSTENSEN et al. 2014) angeboten. Grundsätzlich wird angestrebt, alle Daten sowohl über digitale Kartendienste (WMS) wie auch digitale Datendienste (WFS) konform zu den Vorgaben des OGC bereitzustellen. Bis zur vollständigen Fertigstellung der Dienste des AufMod-Bodenmodells werden alle Produkte auch als FTP-Download mit zugehörigen Metadaten angeboten. Die Ergebnisse der datenbasierten Modellierung des Funktionalen Bodenmodells (vgl. Kap. 2) liegen als parametrisierte Modellgitterpunkte im CSV- bzw. XYZ-Format vor. Zusätzlich sind diese Daten als klassifizierte Polygone verfügbar, die in Form von Feature-Classes in einer ESRI File-Geodatabase zusammengefasst wurden. Auf diese Weise können die sehr umfangreichen Datensätze geschlossen heruntergeladen werden. Morphologische Zeitreihen können zudem durch die Zusammenfassung einzelner Zeitschritte in einer Feature-Class animiert werden. Informationen zur Datenerhebung und Auswertung der Seitensichtsonardaten in den Fokusgebieten und die digitale

Überarbeitung der Karte von ULRICH (1971) (vgl. Kap. 4) sind ebenfalls als Vektordaten in File-Geodatabases erhältlich. Tab. 2 gibt einen Überblick über die angebotenen Produkte auf dem FTP-Server des BSH.

Tabelle 2: Produkt-Pakete des AufMod-Bodenmodells. Alle Produkte sind über den Link <ftp://ftp.bsh.de/outgoing/AufMod-Data> zugänglich, die jeweiligen Unterordner sind in der rechten Spalte aufgelistet.

Produkt-Paket	Format	FTP-Link
Datenbasierte Modell- ergebnisse, Punktdaten	xyz, csv	../CSV_XYZ_files
Datenbasierte Modell- ergebnisse, Punktdaten	File-Geo-Database (gdb)	../FGDB_VectorData/AufMod DatabasedModelling.zip
Daten der AufMod- Fokusgebiete	File-Geo-Database (gdb)	../FGDB_VectorData/AufMod FocusAreas.zip
Digitalisierte Karte nach ULRICH (1971); (ERNSTENSEN et al. 2014)	File-Geo-Database (gdb)	../FGDB_VectorData/AufMod Bedforms.zip

4 Zusammenfassung und Ausblick

Die Einbindung und Präsentation von Produkten des F&E-Projekts AufMod in die Marine Dateninfrastruktur Deutschland MDI-DE hat deutlich zur Verbreitung der Forschungsergebnisse beigetragen. Standardisierte Webdienste für die Visualisierung und den Download von Datensätzen sowie standardkonforme Metadaten ermöglichen einen interoperablen Austausch mit anderen Informationssystemen. Webdienste zum Download und zur Visualisierung ermöglichen es, Produkte nur einmal aufzubereiten und anschließend an beliebigen Stellen einzusetzen. Neben der Darstellung im zentralen MDI-DE Portal können Nutzer beispielsweise in Geoinformationssystemen auf dem Desktop-Rechner über die Adressen der Dienste auf die Daten zugreifen.

Die flexible Struktur der MDI-DE ermöglicht es, auch andere Projekte ähnlich zu präsentieren und Ergebnisse zu veröffentlichen. Die Voraussetzung dafür ist die Nutzung eines Infrastrukturknotens mit einem Metadatenkatalog und einem Datenspeicher bzw. einem Dienste-Server. Über die CSW-Schnittstelle wird der Metadatenkatalog an das Portal der MDI-DE und an weitere Informationssysteme angeschlossen. Eine individuelle Aufbereitung der Datenbestände war im BSH und in der BAW für AufMod notwendig und wird auch zukünftig bei anderen Projekten nötig sein. Für die regelmäßige Veröffentlichung von Datenprodukten über einen ISK bietet es sich an, einzelne Arbeitsschritte zu automatisieren. Hierzu gehört auch die Erstellung von validen Metadaten. Dies empfiehlt sich insbesondere für die Modellmetadaten, die bisher auch aufgrund ihres Umfangs nicht vollständig erfasst werden.

Die rechtlichen Rahmenbedingungen für die Bereitstellung von Daten werden direkt von den Institutionen festgelegt und in den Metadaten notiert. Für AufMod wurden alle Datenprodukte mit einem Zusatz versehen, der besagt, dass die Daten für nicht-kommerzielle Zwecke weiterverwendet werden dürfen. Bei kommerzieller Nutzung muss die Genehmigung der BAW oder des BSH eingeholt werden, ebenso sobald die Daten

ein essentieller Bestandteil einer Veröffentlichung sind. Die Nutzung von bestehenden Lizenzen wird angestrebt, wobei es eine Vielzahl von Lizenzmodellen auf dem Markt gibt, deren Nutzung in vielen Institutionen noch nicht festgelegt wurde.

5 Schriftenverzeichnis

- BAUMANN, P. (Hrsg.): OGC WCS 2.0 Interface Standard – Core. Open Geospatial Consortium (OGC 09-110r3), 2010.
- BAW (Hrsg.): AufMod WFS der BAW, 2014a.
Stand 04.02.2014: <http://mdi-dienste.baw.de/geoserver/aufmod/ows?service=WFS&version=1.0.0>
- BAW (Hrsg.): AufMod WMS der BAW, 2014b.
Stand 04.02.2014: <http://mdi-dienste.baw.de/geoserver/aufmod/wms>
- BAW (Hrsg.): OpenLayers map preview, 2014c.
Stand 04.02.2014: http://mdi-dienste.baw.de/geoserver/aufmod/wms?service=WMS&version=1.3&request=GetMap&layers=aufmod:ti_k_wrw_wg12_00025&styles=&bbox=3258732.75,5880627.0,3588950.75,6166362.0&width=512&height=443&srs=EPSG:31467&format=application/openlayers
- BINDER, K.; DUDEN, S.; HELBING, F.; LÜBKER, T.; RÄDER, M.; SCHACHT, C. und ZÜHR, D.: Leitfaden zur Anbindung eines Infrastrukturknotens an die MDI-DE. 2012.
- DE LA BEAUJARDIERE, J. (ed.): OpenGIS Web Map Server Implementation Specification. Open Geospatial Consortium (OGC 06-042), 2006.
- EGovG: Gesetz zur Förderung der elektronischen Verwaltung sowie zur Änderung weiterer Vorschriften. In: Bundesgesetzblatt, von 201343, 2749-2760, 2013.
Stand 2013: http://www.bmi.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/Themen/OED_Verwaltung/Informationsgesellschaft/egovg_verkuendung.pdf
- ERNSTENSEN, V. B.; WINTER, C. and LEFEBVRE, A.: Reconstruction of quantitative bedform parameters in the German Bight: revisiting the Ulrich (1973) bedform classification charts. In: Geo Marine Letters, in review, 2014.
- EUROPEAN COMMISSION JOINT RESEARCH CENTRE, METADATA DRAFTING TEAM (ed.): INSPIRE Metadata Implementing Rules: Technical Guidelines based on EN ISO 19115 and EN ISO 19119 (MD_IR_and_ISO_v1_2_20100616), 2010.
- EUROPÄISCHES PARLAMENT UND RAT: Richtlinie 2000/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2000 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik, WFD. In: Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften, L 327/1, 1-73, 2000. Stand 2000: http://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:5c835afb-2ec6-4577-bdf8-756d3d694eeb.0003.02/DOC_1&format=PDF
- EUROPÄISCHES PARLAMENT UND RAT: Richtlinie 2007/2/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 14. März 2007 zur Schaffung einer Geodateninfrastruktur in der Europäischen Gemeinschaft (INSPIRE). In: Amtsblatt der Europäischen Union, L108/1, 1-14, 2007. Stand <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32007L0002&from=EN>.
- EUROPÄISCHES PARLAMENT UND RAT: Richtlinie 2008/56/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 17. Juni 2008 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens

für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Meeresumwelt (Meeresstrategie-Rahmenrichtlinie), L164/19, 19-40, 2008.

Stand 2008: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32008L0056&from=EN>.

GDI-DE (Hrsg.): Geoportal.de – Geodaten aus Deutschland – Geoportal, 2014.

Stand 04.02.2014: <http://www.geoportal.de>.

GeoZG: Gesetz über den Zugang zu digitalen Geodaten (Geodatenzugangsgesetz – GeoZG). In: BGBl. I, 278, 2012.

Stand 2012: <http://www.gesetze-im-internet.de/geozg/>.

ISO 19115:2003: Geographic Information – Metadata. International Organization of Standardization, Geneva, Switzerland, ISO/TC211, 2003.

KFKI (Hrsg.): Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI) – NOKIS, 2014.

Stand 04.02.2014: <http://www.kfki.de/de/service/nokis>

LEHFELDT, R. und REIMERS, H.-C.: Abschlussbericht NOKIS++ (03KIS049 und 03F0412B) Informations-Infrastrukturen für ein Integriertes Küsteningenieurwesen, 2008.

LUPP, M. (ed.): Styled Layer Descriptor profile of the Web Map Service Implementation Specification. Open Geospatial Consortium (OGC 05-078r4), 2007.

MDI-DE (Hrsg.): Aufbau von integrierten Modellsystemen, 2014a.

Stand 04.02.2014: <http://projekt.mdi-de.org/services/verwandte-projekte/40-aufbau-von-integrierten-modellsystemen.html>

MDI-DE (Hrsg.): MDI-DE Portal, 2014b.

Stand 04.02.2014: <http://www.mdi-de.org>

MDI-DE (Hrsg.): NOKIS, 2014c.

Stand 04.02.2012: <http://projekt.mdi-de.org/services/nokis.html>

MILBRADT, P.; VALERIUS, J. und ZEILER, M.: Das Funktionale Bodenmodell: Aufbereitung einer konsistenten Datenbasis für die Morphologie und Sedimentologie. Die Küste, 83, 2015.

SCHLIESKY, U. (Hrsg.): EGovernment in Deutschland. Lorenz-von-Stein-Inst. für Verwaltungswiss., Kiel, XIV, 137 S., 2006.

UIG: Umweltinformationsgesetz. In: BGBl. I, 3154, 2013.

Stand 2013: http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/uig_2005/gesamt.pdf

ULRICH, J.: Die Verbreitung submariner Riesen- und Großrippeln in der Deutschen Bucht. In: Ergänzungsheft zur Deutschen Hydrographischen Zeitschrift, Jg. 4, 14, 1-31, 1971.

VOGES, U. and SENKLER, K. (eds.): OpenGIS Catalogue Services Specification 2.0.2 - ISO Metadata Application Profile. Open Geospatial Consortium (OGC 07-045), 2007.

VRETANOS, P. (ed.): OpenGIS Web Feature Service 2.0 Interface Standard. Open Geospatial Consortium (OGC 09-025r1 and ISO/DIS 1914), 2010.

WOSNIOK, C. and LEHFELDT, R.: A Metadata-Driven Management System for Numerical Modeling. In: IEEE/MTS (ed.): Oceans - San Diego, 2013. San Diego, CA, USA, 1-7, 2013.

- WOSNIOK, C.; VALERIUS, J. und LAMBERS-HUESMANN, M.: Das Projekt AufMod in der Marinen Dateninfrastruktur Deutschland. In: TRAUB, K.-P., KOHLUS, J. und LÜLLWITZ, T. (Hrsg.): Geoinformationen für die Küstenzone. Hamburg, 125-134, 2013.
- ZEILER, M.; LAMBERS-HUESMANN, M. und SCHULZ-OHLBERG, J.: Das Continental Shelf Informationssystem (CONTIS) und der Shelf Geology Explorer. In: TRAUB, K.-P. und KOHLUS, J. (Hrsg.): Geoinformationen für die Küstenzone. Hamburg, 125-132, 2007.

Synthese der interdisziplinären Forschung in AufMod

Harro Heyer, Kerstin Schrottke, Manfred Zeiler und Andreas Plüß

Zusammenfassung

Die Synthese der Ergebnisse aus dem F&E-Projekt AufMod bestätigt die allgemein formulierte Erkenntnis, dass eine breit angelegte interdisziplinäre Zusammenarbeit erforderlich ist, um die komplexen Fragestellungen zur Morphodynamik und zum Sedimenttransport in der Deutschen Bucht sachgerecht und umfassend zu beantworten. Die erarbeiteten wissenschaftlichen Informationen tragen zum Systemverständnis der historischen Entwicklungen und zum Wirkungsgefüge des Ist-Zustands der Deutschen Bucht bei. Darüber hinaus sollen die Ergebnisse in Vorhersagesysteme für langfristige küstendynamische Entwicklungen integriert werden. Dieses ist ein weiteres gestecktes Ziel von AufMod, für das in der Nachnutzung der Ergebnisse und in Anschlussvorhaben Schritte für Schritte weitere fachlich belastbare Methoden und Werkzeuge bereitgestellt werden müssen. Neben der Integration vorhandener Daten und Informationen wurden mit AufMod die Erweiterung und Verbesserung der bisher eingesetzten Methoden und Verfahren angestrebt.

Schlagwörter

Nordsee, Deutsche Bucht, Bathymetrie, Küstendynamik, Modellsysteme, Vorhersagemodelle, Systemverständnis, Sedimentverteilung, Sedimentzusammensetzung, Sedimenttransport

Summary

The main objective of the multidisciplinary research project “AufMod” (2009–2012) was the development of model-based tools for analyzing long-term morphodynamics (MD) and sediment transport in the German Bight. AufMod aimed at bringing together marine geoscientists and coastal engineers to build up consistent quality-proofed bathymetric and sedimentological databases and to compare them with different numerical model results. Applying different numerical models follow the Morphodynamic-Multi-Model-Approach by utilize the same data input and comparably model grid topologies with respect to uncertainties of their results.

Keywords

North Sea, German Bight, bathymetry, coastal dynamics, numeric model, prediction model, system understanding, sediment distribution, sediment mixture, sediment transport, morphodynamic, seabed model, simulation, topography

Inhalt

1	Das integrierte Modellsystem.....	182
2	Systemverständnis.....	183
3	Verknüpfung der Boden- und Modellierungsgruppe.....	185
4	Ausblick auf die Nachnutzung der Daten und Analysen aus AufMod	186
5	Weiterer Forschungsbedarf, der sich aus AufMod ergibt.....	187
6	Schriftenverzeichnis.....	191

1 Das integrierte Modellsystem

Der Aufbau eines integrierten Modellsystems zur Analyse der langfristigen Morphodynamik in der Deutschen Bucht war das übergeordnete Ziel des Gesamtvorhabens AufMod. Die Erprobung und Bestätigung dieses Modellsystems werden als eine unverzichtbare Grundlage für die nachvollziehbare und reproduzierbare Erweiterung des Wissens um die Naturvorgänge angesehen. Das Modellsystem wurde nach den gestellten Anforderungen entwickelt und unter verschiedenen Aspekten im Projekt exemplarisch genutzt. Mittlerweile steht es der Küstengemeinschaft auf Dauer zur Verfügung. Es kann seit 2013 für projektbezogene Anwendungen sowohl hinsichtlich der zusammengetragenen und dokumentierten Datenbasis als auch auf Grundlage der entwickelten Modellbildungen genutzt werden.

Aspekte zur Nachnutzung der AufMod-Produkte wurden bereits im Rahmen der Antragstellung hervorgehoben. Darüber hinaus bietet das integrierte Modellsystem eine gute Grundlage für weitergehende Forschungen und Entwicklungen, vor allem auch für noch notwendige Erweiterungen in der Beschreibung und Analyse der Naturprozesse. Diese Aufgabe erfordert zusätzliche mittel- bis langfristige Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen im Rahmen fachübergreifender Schwerpunktbildungen.

Die Beschreibung, Analyse und Prognose der Morpho- und Sedimentdynamik in der Deutschen Bucht wurden auf Grundlage des integrierten Konzepts mit gemeinsam nutzbaren Bausteinen durchgeführt. Hierzu wurden ausschließlich abiotische Daten verwendet und analysiert. Das von Anfang an realisierte Konzept erlaubt jedoch die Integration biotischer Parameter in nachfolgenden Entwicklungsstufen.

Im bisher erreichten Entwicklungsstand ist das Modellsystem ein gemeinsames Produkt folgender Fachdisziplinen:

- Küsten- und Schelfgeologie,
- Ozeanographie,
- Küsteningenieurwesen,
- Verkehrswasserbau sowie
- Informatik.

Alle beteiligten Fachdisziplinen haben eigenständig Produkte erarbeitet, die in das gemeinsame Modellsystem integriert wurden. Bereits in der ersten Projektphase wurde gefordert - und auch realisiert-, dass die relevanten Produkte und Erkenntnisse aller Teilprojekte in einer Synthese zusammengeführt werden, um damit zu einem verbesserten Systemverständnis in fachübergreifender Sichtweise beizutragen. Diese Zusammenfas-

sung und Verknüpfung zielt damit zunächst einmal auf die Erweiterung des Wissens ab. Sie bezieht die geologischen, sedimentologischen und morphodynamischen Analysen sowie die Ergebnisse aus Modellsimulationen gleichgewichtig ein. Die in den Teilprojekten erarbeiteten Ergebnisse waren zunächst Einzelbausteine, die nach Zusammenstellung und wechselseitiger Nutzung ein Gesamtbild zum Systemverständnis einschließlich der Ausweisung von Quantitäten (z. B. der Sedimentbilanzen) ermöglichten. Hierzu war es erforderlich, ein Kennwertsystem zu nutzen, das geeignet ist, die Naturphänomene zu erklären. Ein wichtiger Aspekt liegt dabei auch in der Aufdeckung und Bewertung aller bekannten Asymmetrien der Gezeitendynamik, der Seegangswirkung, der Transportdynamik und der Sohlformen.

2 Systemverständnis

Für die Daseinsvorsorge an der Küste stehen nicht nur das Systemverständnis für die historischen Entwicklungen und die Analyse des Wirkungsgefüges im heutigen Zustand im Fokus der Fragestellungen. Besonders wichtig ist vor allem auch, die wissenschaftlichen Grundlagen zur Sicherung von Vorhersagen zur Dynamik der Küstengewässer zu verbessern. Dieses Ziel kann nach Überzeugung der Verfasser nur in der fortgeführten intensiven Zusammenarbeit verschiedener Fachdisziplinen erreicht werden. Es wurden bereits Konzepte zur Vorhersage langfristiger und großräumiger Küstenentwicklungen insbesondere in Bezug auf die Sedimentdynamik veröffentlicht (BROMMER and BOCHEV VAN DER BURGH 2009). Die Autoren beschreiben die Sichtweisen und Erklärungsmechanismen verschiedener wissenschaftlicher Gruppen:

- **Geologen**, die sich mit den Schichten, dem Alter und der Dynamik der Erde befassen sowie, kleinskaliger betrachtet, komplexe Sedimenttransportprozesse analysieren, aber auch Klimaentwicklungen und Meeresspiegeländerungen und die Reaktion der Küsten darauf ermitteln.
- **Geomorphologen**, die sich mit der Formenvielfalt und Veränderung sowie mit der Verteilung der Oberflächenformen des Bodens im betrachteten System beschäftigen.
- **Küsteningenieure**, die Messungen und Simulationen räumlich und zeitlich kleinskaliger Prozesse analysieren (prozessbasierte Modellierung) und/oder verhaltensorientierte Modelle ohne vollständige Berücksichtigung des gesamten prozessbasierten Wissens für großräumige Phänomene entwickeln.

Die Autoren kommen zu der wichtigen Erkenntnis, dass die von diesen Gruppen erzielten wissenschaftlichen Informationen in Vorhersagesysteme für langfristige küstendynamische Entwicklungen integriert werden müssen. Dieses war auch ein Ziel von AufMod. Alle genannten wissenschaftlichen Gruppen waren im Projekt vertreten und das gemeinsame, übergeordnete Ziel wurde allgemein anerkannt. Neben der Integration vorhandener Daten und Informationen wurden in AufMod auch die Erweiterung und Verbesserung der bisher eingesetzten Methoden und Verfahren angestrebt.

Hervorzuheben ist, dass es im Projekt nicht nur um eine einzige Startsituation bezüglich der Bathymetrie und der Sedimentbeschaffenheit gegangen ist, von der aus man mit Simulationsmodellen nun zeitliche Entwicklungen berechnen kann. Es ist vielmehr gelungen, für verschiedene Historien in Zeit und Raum konsistente Daten zu gewinnen.

Hierzu wurde im Projekt sehr frühzeitig die Entscheidung getroffen, ein umfassendes softwaregestütztes Bodenmodell zu generieren, das die Daten zur Bathymetrie und Sedimentbeschaffenheit gemeinsam verwaltet und funktional, d. h. nach spezifischen Vorgaben, verarbeiten und dem Anwender aus den verschiedenen beteiligten Fachdisziplinen anforderungsgerecht zur Verfügung stellen kann. Dieses Funktionale Bodenmodell liefert ein detailliertes Abbild der Gewässersohle hinsichtlich Bathymetrie, Sedimentzusammensetzung, -verteilung, -mächtigkeit und -mobilität sowie in Bezug auf Formenvielfalt und Ausprägung von Sohlformen.

Die Betrachtung der Sedimenttransportprozesse in der Deutschen Bucht kann nicht isoliert ohne die Berücksichtigung der Prozesse in der gesamten Nordsee erfolgen. Im Projekt AufMod wurden deshalb auch umfangreiche Daten der Anrainerstaaten akquiriert und in das Funktionale Bodenmodell übernommen. Da die großräumigen und langfristigen Sedimentbewegungen auch von lokalen, teilweise zeitlich beschränkten Prozessen beeinflusst werden können, wurden jene in sogenannten Fokusgebieten näher studiert. Hierzu gehörten ausgewählte Gebiete auf dem Schelf bzw. im Küstenvorfeld, im Vorstrandbereich, im Bereich von Inseln und im Wattenmeer. Von besonderem Interesse waren auch die Seewasserstraßen, primär die Mündungsbereiche der Ästuarie, sowie bestimmte sedimentologische Teilgebiete, wie z. B. die „Schlicklinse“ im Süden von Helgoland.

Ein vollständiges Systemverständnis wird man für komplexe Natursysteme niemals erreichen. Insofern muss der Grad der Synthese grundsätzlich beschränkt bleiben. Mit den Projektergebnissen konnten die derzeit möglichen Antworten auf grundsätzliche Kernfragen zum Systemverständnis gegeben werden. Die bis heute erreichte Nachvollziehbarkeit, aber auch die Unschärfe der Antworten, dokumentieren gleichzeitig das im Projekt erreichte Grundgerüst der eingesetzten Methoden und Verfahren. Die für die Synthese behandelten Fragenkomplexe können in Hinblick auf die Herkunft der verwendeten Daten unterschieden werden:

1. Die Fragen zur Verteilung und Zusammensetzung der Sedimente, zu den kleinräumigen Transportkörpern und zur Morphodynamik konnten primär auf der Grundlage von Messdaten beantwortet werden.
2. Mit den eingesetzten Simulationsmodellen wurde untersucht, inwieweit die aus der Messdatenanalyse gezogenen Erkenntnisse bestätigt werden können, um das Systemverständnis damit zu ergänzen.
3. Die Fragen zum Sedimenttransport, zur Differenzierung der Wirkungen antreibender Kräfte und zur Vorhersage morphodynamischer Entwicklungen wurden primär mit den Simulationsmodellen beantwortet.

Im Projekt wurden die folgenden Kernfragen gestellt und nach dem derzeitigen Erkenntnisstand ausführlich bearbeitet:

1. Wie kann man die großräumige Sedimentverteilung phänomenologisch erklären?
2. Was kennzeichnet die Sedimentverteilungen in den Fokusgebieten, und wie können diese in die großräumige Phänomenologie eingeordnet werden?
3. Was kann aus der dokumentierten Verteilung der Bodenformen geschlossen werden?
4. Gibt es eine gesicherte Grundlage zur Genese und Anpassung der Bodenformen?

5. Tragen bewegliche Bodenformen nennenswert zum großräumigen Sedimenttransport bei?
6. Hat sich die Bathymetrie der Deutschen Bucht morphodynamisch signifikant bzw. erkennbar verändert? Welche Zeitspannen sollen zur Beantwortung dieser Frage betrachtet werden?
7. In welchen Gebieten besteht eine starke, mittlere oder schwache Morphodynamik?
8. Welche morphologischen Veränderungen sind natürlich oder anthropogen geprägt?
9. Wie ist die hydrodynamische Belastung des Bodens als Antrieb für den Sedimenttransport in den Teilgebieten der Deutschen Bucht einzustufen?
10. Wie verlaufen die langfristigen und großräumigen Sedimenttransportrichtungen, welche Massen werden in welche Richtung transportiert und was ergibt sich daraus für die Sedimentbilanz der Deutschen Bucht?
11. Wie lassen sich die natürlichen Prozesse (analysierte Messergebnisse) mit Simulationsergebnissen vergleichen? Wie ist hierfür der Status der Datenakquisition und -aufbereitung zu bewerten?
12. In welchen Teilgebieten ist die Einbeziehung von Baggeraktivitäten in die morphodynamische Analyse unverzichtbar?
13. Wie sind Prognosen bzgl. der Morphodynamik zu bewerten und wie kommt man zu belastbaren Prognosen?

Die verschiedenen im Projekt integrierten Fachdisziplinen boten bei Beantwortung dieser Fragestellungen eine gute Grundlage zur differenzierten Fachdiskussion und Ergebnisanalyse. Zur Diskussion der Ergebnisse auf diese Fragestellungen wird auf den Abschlussbericht (HEYER und SCHROTTKE 2013) und die vorangestellten Fachbeiträge dieser Publikation verwiesen.

3 Verknüpfung der Boden- und Modellierungsgruppe

Die inneren Wechselwirkungen zwischen Sedimentzusammensetzung, Sedimentverteilung, Sedimenttransport und Dynamik des Gewässerbodens in der Deutschen Bucht wurden von den am Projekt beteiligten Fachdisziplinen räumlich differenziert und methodisch in unterschiedlicher Weise analysiert. Die in mess- und datenorientierten Teilprojekten durchgeführten Analysen konzentrierten sich überwiegend auf die Fokusgebiete, um in diesen verfeinerte lokale Phänomene und Zusammenhänge aufzudecken. Für die Synthese wurden diese Erkenntnisbausteine großräumig und langfristig in die regionalen Wechselwirkungen der Morpho- und Sedimentdynamik in der Deutschen Bucht eingeordnet. Darüber hinaus wurden Bewertungen vorgenommen, welche Einzelphänomene zu einer allgemeingültigen, wissenschaftlich gesicherten Aussage beitragen können.

Ein besonders wichtiger praktischer Aspekt der Synthese bestand in der gemeinsamen Erprobung und Bestätigung des integrierten Modellsystems, das nach Abschluss des Projekts von allen genannten wissenschaftlichen Disziplinen weiter getragen und genutzt werden kann. Das Modellsystem liefert eine methodische, funktionale und modellgestützte Basis. Auf dieser interferierten die verschiedenen Fachgruppierungen, d. h. jene, die sich mit dem Aufbau und der Zusammensetzung des Meeresbodens befassen oder aber mit der Hydromorphologie bzw. den Wechselwirkungen zwischen der Dynamik des Meeres und der Dynamik des Bodens auseinandersetzen. Grundlage waren dabei wiederkeh-

rend die Betrachtung und Bewertung von Unschärfen und Unsicherheiten, die sowohl in den Messdaten, den aufbereiteten Modelleingangsdaten und auch in den Parametrisierungen und Annahmen der Simulationsmodelle vorliegen. Für küstenfernere Gebiete der Deutschen Bucht liegen die aus Messdaten ermittelten morphologischen Änderungen beispielsweise innerhalb des Mess- und Beschickungsfehlers. Die natürlichen Prozesse können hier nicht allein mit den Messdaten großräumig analysiert werden. Eine Synthese der Ergebnisse aus Daten- und Simulationsmodellen war deshalb unverzichtbar.

Im Projekt AufMod hat sich die organisatorische und fachliche Verknüpfung der Boden- und Modellierungsgruppen als entscheidender fachlicher Vorteil erwiesen. Das Bodenmodell ist auch weiterhin die wichtigste Voraussetzung für morphodynamische Prozessanalysen. Mit der Erweiterung des Bodenmodells hin zum Funktionalen Bodenmodell wurde ein Werkzeug nutzbar gemacht, mit dem einerseits die datenbasierte morphodynamische Prozessanalyse effizient durchgeführt werden kann und mit dem andererseits eine konsistente Datenbasis zum Aufbau, zum Betrieb und zur Kalibrierung/Validierung morphodynamischer Simulationsmodelle für die Deutsche Bucht zur Verfügung gestellt worden ist.

4 Ausblick auf die Nachnutzung der Daten und Analysen aus AufMod

Die Nachnutzung der Daten- und Analyseprodukte aus AufMod wird bereits heute in den folgenden Aufgabenbereichen angestrebt. Alle nachfolgend genannten Themen haben einen direkten Bezug zu den morpho- und sedimentdynamischen Prozessen der Küstengewässer:

- Sturmflutschutz, Deichsicherheit und Ufersicherung
- Sandentnahmen im Küstenvorfeld und in küstennahen Gewässersystemen
- Sandvorspülungen
- Langfristige Konzepte zur Optimierung von Sedimentmanagementstrategien, darunter Unterhaltungsmaßnahmen in Fahrrinnen
- Integrierte Bewirtschaftungspläne für Ästuare und andere Küstengebiete
- Gutes ökologisches Potenzial der Küstengewässer, u. a. die Rolle von Suspensionskonzentrationen auf die Gewässergüte
- Optimierung künstlicher und natürlicher Bauwerke im und am Gewässer
- Ausbau von Seeschiffahrtsstraßen und Häfen
- Offshore-Windenergieanlagen (WEA)
- Überwachung und Optimierung linienförmiger Infrastrukturelemente (Seekabel, Pipelines)
- Überwachung von Schiffswracks
- Maßnahmen zur Anpassung an Klimaentwicklungen
- Prognosen zu Küstenänderungen durch den Anstieg des Meeresspiegels
- Ökosystemstabilität
- Erweiterung von Habitatausweisungen
- Zukunftsorientierte Informationsweitergabe an die Öffentlichkeit im Sinne von OpenAccess und OpenData

5 Weiterer Forschungsbedarf, der sich aus AufMod ergibt

Durch die Diskussion der Ergebnisse zu den in AufMod formulierten Kernfragen (vgl. Kap. 2) wurde der unmittelbare Forschungsbedarf offenbar, wie folgende Beispiele verdeutlichen sollen. So ist die Anlage der bathymetrischen Ausprägung des Meeresbodens in der Deutschen Bucht auf einen Zeitraum zurückzuführen, der den im Projekt als langfristig bezeichneten Zeitraum (Bezug zur Simulationsdauer) bei Weitem überschreitet. Bathymetrische Veränderungen in größeren Tiefen der Nordsee sind nur durch langfristig anhaltende Veränderungen der hydrodynamischen Bedingungen zu erwarten. Eine Aussage zu den bereits im Prozess befindlichen Veränderungen ist hier aber aufgrund der geringen Dokumentationsdichte nur unzureichend und nicht abschließend zu beantworten; entsprechend benötigte Zeitreihen fehlen für große Bereiche des Schelfs.

Auch ist festzustellen, dass der Fehlerbereich der bathymetrischen Daten vom Schelfbereich für viele Abschnitte morphologische Änderungen bzw. quantitative Aussagen derzeit nicht zulässt. Für diesen Küstenbereich wäre für eine Auswertung von Daten aus der Seevermessung des BSH, der Beschickungsfehler von bis zu 1 Meter aufweist, deutlich zu reduzieren und Wiederholungsmessungen wären notwendig geworden.

Die Frage, inwieweit anthropogene Eingriffe erfassbar sind, lässt sich dahingehend positiv beantworten, dass beispielsweise die Fahrrinnenanpassung der Tideelbe (1999–2000), vereinzelte Bagger- und Umlagerungsaktivitäten in der Tideelbe sowie der Bau des Jade-Weser-Ports im Bodenmodell abbildbar sind. Andere anthropogene Eingriffe sind hingegen noch nicht identifizierbar, weil auch hier die Datenreihen zeitlich zu kurz und oft räumlich zu gering aufgelöst sind bzw. Daten komplett fehlen oder auf Grund unzureichender Projektunterstützung noch nicht hinreichend gut eingepflegt werden konnten. Dieses betrifft beispielsweise die langfristigen Wirkungen der Fixierungen von Inselköpfen durch feste Bauwerke, die Eindeichungsmaßnahmen oder die historischen Ausbauten der Hafenzufahrten in der Elbe, der Weser, der Jade und der Ems.

Neue Fragestellungen ergeben sich ebenfalls aus der kleinräumigen Wirkung von Bauwerken wie Offshore-Windenergieanlagen oder Plattformen auf die Bathymetrie des Meeresbodens. Von zunehmender Bedeutung ist diese Problematik auch im Zusammenhang mit der Bewertung von Umweltauswirkungen bei der Verlegung von Seekabeln oder auch bei der Gewinnung von marinen Sanden und Kiesen. Ein offenes Thema für die zukünftige Forschung ist dabei, ob für Teilbereiche der Deutschen Bucht Kennwerte entwickelt werden können, mit denen die „Natürlichkeit“ der Morphodynamik quantifizierbar ist. Veränderungen dieser Kenngrößen könnten weitergehend auf Veränderungen des morphodynamischen Regimes hinweisen.

Insgesamt lässt sich mit den Ergebnissen aus AufMod verdeutlichen, dass für ein langfristiges Küstensedimentmanagement alle anthropogenen Eingriffe sowohl im Funktionalen Bodenmodell als auch in den Simulationsmodellen zu berücksichtigen sind. Hierzu gehören Vorspülungen, Sandentnahmen, Eindeichungen, Baggerungen und Umlagerungen, Bühnenbau, Fahrrinnenanpassungen, Hafenbau und Hafenerweiterungen gleichermaßen.

Zu der wichtigen Fragestellung im Projekt, ob und inwieweit Simulationsmodelle die auf Messdaten basierenden Sedimentverteilungen reproduzieren können, wenn eine homogene Kornverteilung als Anfangszustand (entsprechend der aus den Messungen be-

rechneten mittleren Sedimentverteilung für die Deutsche Bucht) in der Simulation vorgegeben wird, lassen sich folgende Ergebnisse festhalten:

- Wichtige Merkmale der Sedimentverteilung können reproduziert werden.
- Feinsedimente werden in das Rückseitenwatt der nordfriesischen Inseln, in die Ästuarare und in das Elbe-Urstromtal eingetragen.
- Grobkörnige Sedimentflächen (z. B. am Borkum Riffgrund) lassen sich nur teilweise bzw. nicht (nordfriesischer Schelfbereich) reproduzieren.
- Größere Sedimente können sich in den tiefen Rinnen der Ästuarare und Seegatten tendenziell ausbilden, werden aber mengenmäßig unterschätzt.
- Das Schlickfallgebiet südlich von Helgoland („Helgoländer Schlicklinse“) wird nur im Ansatz bzw. gar nicht anhand der Modellergebnisse identifiziert.

Wichtig ist, dass morphodynamische Modellsimulationen das Einschwingen in den Zustand der gut sortierten Sedimentflächen im Wesentlichen reproduzieren können. Allerdings lassen sich mit einem solchen Simulationsansatz die pleistozänen Flächen mit hohem Erosionswiderstand a priori nicht nachbilden. Bisher konnte die gewählte Gitternetzauflösung der Modelle die gemessene Sedimentverteilung nur diffus abbilden. Die Simulationsmodelle sind folglich im Hinblick auf die Nachbildung der bekannten räumlichen Differenzierung in der Sedimentverteilung und der Zusammensetzung der gut sortierten Sedimentflächen weitergehend zu optimieren.

Die mit konstanten initialen Sedimentverteilungen in Simulationsmodellen nachgebildete hydraulische Sortierung ist in den Ästuarare ansatzweise erkennbar. Simulationen ergaben nach längerer Berechnung Änderungen (Sortierung) der Sedimente in den Tiderinnen und Wattbereichen. Die Berechnungen schlugen bis dato jedoch in den Bereichen noch fehl, in denen die Sedimentverteilung an der Sohle nicht primär durch die heutige Hydrodynamik geprägt ist. Eine Herausforderung für zukünftige Forschungsaktivitäten besteht damit in der Nachbildung der stratigraphischen Sortierung.

Grundsätzlich ist anzumerken, dass die Erhebung von Felddaten zur Oberflächencharakteristik in der Regel Momentaufnahmen darstellen. Die räumlich-zeitliche Variabilität muss deshalb in ausgewählten Gebieten weitergehend untersucht und das Ergebnis mit neuen Simulationen verglichen werden. Besonders hervorzuheben sind die neuen Erkenntnisse zur Porosität der Oberflächensedimente. Porositätsmessungen in verschiedenen Gebieten mit unterschiedlichen Oberflächensedimentzusammensetzungen und zu unterschiedlichen Zeiten haben mittlere Werte von rund 40,4 % für sandige und 70,5 % für feinkörnigere Sedimente ergeben. Diese Angaben decken sich mit bisherigen Angaben aus der Literatur. Ferner konnte bestätigt werden, dass jene Porositätswerte, die für Modellrechnungen genutzt werden, im richtigen Bereich liegen. Allerdings unterliegen die neuen Messdaten einer teils erheblichen Variabilität, die sich nicht allein auf methodische Unsicherheiten zurückführen lässt. Hier gilt es noch, weitere Analysen durchzuführen, um mögliche konkrete Zusammenhänge zu den hydro- und sedimentdynamischen Rahmenbedingungen herstellen zu können.

Im Zuge neuer Sedimentbeprobungen, insbesondere in den Wattgebieten und Ästuarare, zeigte sich, dass das Vorkommen sogenannter Schlickgerölle auf bzw. im Oberflächensediment durchaus nicht als lokales Phänomen zu betrachten ist, sondern vielerorts war die Gewässersohle sogar nahezu vollständig bedeckt. Bei deren Präsenz ist je nach Anzahl und geometrischer Ausprägung von einer nicht unerheblichen Beeinflussung auf

die physikalischen Eigenschaften der Sedimentmatrix auszugehen. Derzeit werden derartige Mischsedimente nicht in den Modellen als solche berücksichtigt. Es müssen weitere Untersuchungen durchgeführt werden, um den Einfluss von Schlickgeröllen auf die physikalischen Eigenschaften des Oberflächensedimentes zu erfassen.

Änderungen der physikalischen Eigenschaften des Bodens hinsichtlich Rauheit und Festigkeit werden u. a. auch bei Präsenz des Bäumchen-Röhrenwurms (*Lanice chonchilega*) vermutet. Großflächige Kolonien, die jüngst im Bereich des nordfriesischen Schelfs beobachtet wurden, sind ebenfalls modelltechnisch noch nicht erfasst.

Das Sylter Außenriff wurde im Projekt als ein Repräsentant für den Schelfbereich eingestuft. Die dort anstehenden glazialen Ablagerungen sind teilweise von einer nur dünnen Decke holozäner Sedimente überdeckt. Es erscheint erforderlich, insbesondere in diesen Sedimentmangelgebieten, mehr Informationen über die Sedimenttransporte und die Wirtktiefe der morphodynamischen Prozesse zu erlangen. Es ist zu klären, ob in diesen Gebieten zukünftig noch mit Volumenverlusten gerechnet werden muss.

Die Böschungsbereiche der tiefen Rinnen bestehen in den Wattgebieten und Ästuaren vielerorts aus Kleilagen oder Geschiebemergel. Dieser Bodenaufbau muss zukünftig in verbesserten morphodynamischen Modellierungen berücksichtigt werden. Dies führt zur grundsätzlichen Berücksichtigung der Stratigraphie in den mathematischen Simulationsmodellen für die Morphodynamik. Dieser erweiterte Modellansatz sollte auch das Entstehen oder Verschwinden der dünnen holozänen Sedimentschichten über den erosionsfesten glazialen Ablagerungen reproduzieren können.

Bisher kann die mit den Datenmodellen im Hindcast analysierte Rinnendynamik nur im Ansatz mit hydromorphologischen Simulationsmodellen nachvollzogen werden. Hier besteht noch ein erheblicher Verbesserungsbedarf bei den Simulationsmethoden.

Im Gebiet der Helgoländer Schlicklinse wird der Erosionswiderstand der kohäsiven Sedimente von vorhandenen Modellansätzen offenbar deutlich unterschätzt. Zur naturähnlichen Simulation der Wechselwirkungen zwischen den Weichsedimentschichten und dem Wasserkörper besteht offensichtlich noch großer Bedarf an Grundlagenforschung.

Es müssen vermehrt unstrukturierte dreidimensionale Simulationsverfahren in hoher Auflösung für die Deutsche Bucht einschließlich der angeschlossenen Ästuarare eingesetzt werden, um die Prozesse der thermohalinen Zirkulation zu berücksichtigen.

Die Validierung der Simulationsmodelle ist für die Gezeiten des Meeres und die Tidedynamik der Küstengewässer in Bezug auf Wasserstände, Thermodynamik, Salzgehalt und Seegang weit vorangeschritten. In AufMod wurde die Thermodynamik bisher jedoch noch nicht berücksichtigt. Dies soll in einer weiteren Forschungs- und Entwicklungsstufe realisiert werden. Dem Seegang sollte neben dem Wasserstand in der Validierung hohe Aufmerksamkeit geschenkt werden, da er zusätzlich zur Tideenergie ein bedeutender Energielieferant für die Morphodynamik ist. Die Validierung morphodynamischer Simulationsergebnisse ist noch nicht abgeschlossen. Mess- und Modellunsicherheiten werden in der Regel noch nicht oder nur rudimentär berücksichtigt. Beim Brill Skill Score wird zwar die Messunschärfe der zu vergleichenden Größe herangezogen, die Unsicherheiten in den Modellparametern (Unsicherheitskaskade) werden jedoch vernachlässigt.

Neben den in der Natur messbaren morphologischen und sedimentologischen Zuständen (Tiefen, Bodenformen, Sedimentverteilungen) lassen sich beim Vergleich von Modellergebnissen auch Sedimentkonzentrationen, Transportraten und Bilanzierungen gegenüberstellen. Die Modellvergleiche können auf der Grundlage verschiedener Simula-

tionsmodelle oder durch Vorgabe variierender Parametrisierungen in einem Simulationsmodell durchgeführt werden. Der Maßstab für die Beurteilung der Modellergebnisse muss aber stets die Natur sein. Der Vergleich der in AufMod für die Nordseesimulationen eingesetzten Modellverfahren ergab, dass in der Regel nur geringfügig abweichende Kalibrierungen vorgenommen werden mussten, wenn flächendeckend naturähnliche Korngrößen- und Bodenformverteilungen verwendet wurden. Beim Einsatz unterschiedlicher Simulationsmodelle sowie systematischer Parametervariation ergibt sich eine Streubreite der Simulationsergebnisse. Diese gilt es fachlich zu bewerten, um damit insbesondere im Hinblick auf die Morphodynamik zu einer belastbaren und verbesserten Einschätzung des Systemverhaltens zu gelangen. Hierdurch wird das Systemverständnis insgesamt beträchtlich erweitert.

Im Zuge der Umsetzung der INSPIRE-Richtlinie haben die Behörden unter Einsatz substanzialer Ressourcen eine vernetzte Geodateninfrastruktur aufgebaut, die über die Datenportale von GDI-DE für deutschlandweite Geodaten und MDI-DE für den Meeresbereich geeignete Plattformen zur kostenfreien Bereitstellung von Geodaten sicherstellt. Beide Portale bieten mit ihrer verteilten Dateninfrastruktur die Möglichkeit von räumlich verteilten Servern aus Metadaten und Daten, über standardisierte Schnittstellen, zur Verfügung zu stellen. Durch den langfristig sichergestellten Betrieb der MDI-DE ist dabei die Bereitstellung der AufMod-Datensätze gesichert.

Die Ergebnisse aus dem Funktionalen Bodenmodell werden über den Shelf Ge Explorer des BSH der öffentlichen Verwaltung (z. B. Küstenschutzbehörden), Wissenschaft und Wirtschaft als digitale Kartendienste sowie als Datensätze über einen FTP-Dienst unter <ftp://ftp.bsh.de/outgoing/AufMod-Data> in der MDI-DE zur Verfügung gestellt. Zu den wesentlichen Produkten des Funktionalen Bodenmodells gehören konsistente Tiefenverteilungen und daraus abgeleitete morphologische Parameter, sowie sedimentologische Kenngrößen. Damit ist ein erster, aber wichtiger Grundstein gelegt, eine konsistente Datenbasis für die Analyse der morphodynamischen Prozesse zur Hand zu haben und in integrierten Modellsystemen zu testen und zu kalibrieren.

Die BAW stellt über eine eigene Architektur ebenfalls Geowebdienste für die Darstellung und den Download von Datensätzen unter anderem in Form eines Tidekennwertatlas über die MDI-DE Projektseite bereit. Ausgewählte Analysewerte der BAW werden hier für das Modellierungsjahr 2006 angeboten. So können Nutzer schnell und komfortabel Kennwerte für verschiedene Windrichtungen und -geschwindigkeiten vergleichen.

Der Arbeitsweg von der Aufbereitung aus verschiedenen Datenformaten oder Datenbanken, über den Transfer in eine für einen Webdiensteserver lesbare Datenbank und das Festlegen eines geeigneten Layouts hat sich dabei als äußerst aufwendig herausgestellt. Einige Erfahrungen mit einer Automatisierung konnten gemacht werden, dennoch musste fast jeder der im Rahmen von AufMod bereitgestellten insgesamt etwa 300 Datensätze individuell verarbeitet werden. So hat sich beispielsweise bei Datensätzen aus der numerischen Modellierung herausgestellt, dass ein einheitliches Format wie netCDF sehr hilfreich wäre. Für die Zukunft ist es deshalb sinnvoll auf eine weitgehende Automatisierung und Standardisierung der Datenverarbeitung hinzuwirken, um in vergleichbaren Projekten den Datenverarbeitungsaufwand zu reduzieren. Dies gilt insbesondere für die Erstellung von Metadaten, welche als Qualitätssicherung und Grundlage für die Kommunikation in Geodateninfrastrukturen dienen.

6 Schriftenverzeichnis

- BROMMER, M. B. and BOCHEV VAN DER BURGH, L. M.: Sustainable Coastal Zone Management: A Concept for Forecasting Long-Term and Large-Scale Coastal Evolution. *Journal of Coastal Research*, 25, 181-188, 2009.
- BUNDESREGIERUNG: Koalitionsvertrag. http://www.bundesregierung.de/Content/DE/_Anlagen/2013/2013-12-17-koalitionsvertrag.pdf, Stand: 23.06.2014.
- EUROPÄISCHE KOMMISSION: Grünbuch Meereskenntnisse 2020. http://ec.europa.eu/maritimeaffairs/documentation/publications/documents/marine-knowledge-2020-green-paper_de.pdf, Stand: 25.06.2014.
- HEYER, H. und SCHROTIKE, K.: Aufbau von integrierten Modellsystemen zur Analyse der langfristigen Morphodynamik in der Deutschen Bucht – AufMod. doi: 10.2314/GBV:780783271, 2013.

Glossar

Begriff	Erklärung
ADCP	Acoustic Doppler Current Profiler: Akustisch basiertes Messgerät zur profilierenden Erfassung von Strömungsrichtung und Geschwindigkeiten in der Wassersäule bzw. des Seegangs unter Nutzung des Doppler-Effekts. Die akustische Rückstreustärke wird auch zur Abschätzung von Schwebstoffgehalten genutzt.
Akkumulation	Ablagerung von Bodensediment – Verringerung der Wassertiefe (Sedimentation)
ArcGIS	Geoinformationssystem der Fa. ESRI
ASTM	Die American Society for Testing and Materials ist eine internationale Standardisierungsorganisation mit Sitz in West Conshohocken, Pennsylvania, USA. Sie veröffentlicht technische Standards für Waren und Dienstleistungen Quelle: https://de.wikipedia.org/wiki/ASTM_International). Unter anderem gibt die ASTM Standards zur Korngrößenanalyse vor.
AufMod	Aufbau von integrierten Modellsystemen zur Analyse der langfristigen Morphodynamik in der Deutschen Bucht, KFKI Projekt 03KIS082-03KIS088 http://www.kfki.de/de/projekte/aufmod
Bathymetrie	Tiefe der Gewässersohle unter dem mittleren Meeresspiegel – Synonym für die Lage der Gewässersohle
BAW	Bundesanstalt für Wasserbau
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
Bodenmodell	Zusammenfassung von Bathymetriedaten, Bodenformen und Sedimentologie einschließlich Stratigraphie der oberen Schicht der Gewässersohle
BSH	Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie
BSS	The Brier skill score is a proper score function that measures the accuracy of probabilistic predictions. It was proposed by Glenn W. Brier in 1950. GLENN W. BRIER, 1950: VERIFICATION OF FORECASTS EXPRESSED IN TERMS OF PROBABILITY. Mon. Wea. Rev., 78, 1–3. doi: <a href="http://dx.doi.org/10.1175/1520-0493(1950)078<0001:VOFEIT>2.0.CO;2">http://dx.doi.org/10.1175/1520-0493(1950)078<0001:VOFEIT>2.0.CO;2
BSSI	bed shear stress intensity
CAU	Christian-Albrechts-Universität zu Kiel

CSV	Comma separate value: Format, bei dem die Werte jeweils mit einem Komma getrennt ausgegeben werden. Neben Kommata werden häufig auch Semikolon, Leerzeichen oder Tabs verwendet.
CSW	Catalogue Services Web (auch: CS-W): OGC Standard für die Weitergabe von Metadaten
D50	Korngrößendurchmesser, bei dem 50 % der Korngrößensummenkurve erreicht sind (Medianwert der Korngrößensummenkurve).
data.gov	OpenData Portal der USA, in Deutschland govdata.de
Datenbasierte Simulation	Berechnungsvorschrift auf der Grundlage von Daten – hier sedimentologische Daten
DELFT3D (Flow und MOR)	Softwaremodul von DELTARES zur Simulation von Hydrodynamik (Flow) und Sedimenttransport mit nachfolgender morphologischer Bodenänderung (MOR)
Deltares	Deltares is an independent institute for applied research in the field of water and subsurface. https://www.deltares.nl/en/
DGPS, RTK, LRK	Differential-Global positioning system (DGPS) mit Echtzeit-Kinematik (RTK) und Langstrecken-Kinematik (LRK)
DHI	Deutsches Hydrographisches Institut
DOC	Dissolved organic carbon (DOC = gelöster organischer Kohlenstoff) is defined as the organic matter that is able to pass through a filter (filters generally range in size between 0.7 and 0.22 μm).
DredgeSim	Softwaremodul zur Berücksichtigung von Bagger- und Umlageungsmaßnahmen in numerischen Modellsystemen
Ebbdelta	Seewärtige Ausbildung von Bodenformationen in Ästuarmündungen und Seegatten
EdF	Die Électricité de France SA (EDF) ist eine börsennotierte, staatlich dominierte französische Elektrizitätsgesellschaft.
EGovG	Gesetz zur Förderung der elektronischen Verwaltung http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/egovg/gesamt.pdf
Erosion	Abtrag von Bodensedimenten – Erhöhung der Wassertiefe
ESRI	Hersteller von GIS http://www.esri.de/

ETL	ETL-Routinen: Extract, Transform, Load (ETL) ist ein Prozess, bei dem Daten aus mehreren gegebenenfalls unterschiedlich strukturierten Datenquellen in einer Zieldatenbank vereinigt werden (Quelle: https://de.wikipedia.org/wiki/ETL-Prozess).
Exnergleichung	Bilanzgleichung aller zu- und abgeführten Sedimentmengen in einem Kontrollraum zur Berechnung der daraus resultierenden Bodenänderungen s. a. Sohlevolutionsgleichung
Fächerecholot	Dient der bathymetrischen Erfassung der Gewässersohle. Von einer fest eingebauten Schallquelle unter dem Schiff werden bis zu mehrere hundert Schallstrahlen eng gebündelt quer zur Fahrtrichtung ausgesandt. Aus der Messung von Laufzeit und Ankunfts Winkel der von der Gewässersohle zurückgestreuten Schallwellen erfolgt die flächenhafte Erfassung von Wassertiefen. Die Breite des Messstreifens hängt von der Wassertiefe ab. Sie liegt bei den gängigen Systemen bei dem 6–8fachen der Wassertiefe. Die verwendeten Frequenzen liegen zwischen etwa 30 und mehreren hundert kHz.
Fazies	Unter einer Fazies werden in der Geologie/Sedimentologie Eigenschaften eines Gesteins, bzw. Sediments zusammengefasst, die auf seine Entstehungsgeschichte zurückzuführen sind.
FBM	Das Funktionale Bodenmodell wurde im Rahmen des F&E-Projektes AufMod entwickelt und beschreibt die Oberflächeneigenschaften des Meeresbodens der Nordsee, mit besonderem Schwerpunkt auf den Bereich der Deutschen Bucht. Es besteht derzeit aus folgenden Komponenten: Bathymetrie als mittlere Höhenlage des Meeresbodens sowie der Bodenformen in parametrisierter Form, Sedimentologie als Korngrößenverteilung der Oberflächensedimente, der Porosität und dem organischen Anteil im Sediment und Daten zum konsolidierten Horizont der Sedimente (holozäne Basis/Basis nordseezeitlicher Sande).
Fehler	Fehler = Messung – Modellergebnis
FIGGE-Karte	Umgangssprachliche Abkürzung für die Karte „Sedimentverteilung in der Deutschen Bucht“ nach der Klassifikation von Figge (1981). Zu unterscheiden ist hier die erste Version der Karte von Figge (1981) und die erweiterte und überarbeitete Version von Laurer, Naumann und Zeiler (2014). www.GPDN.de
FINO	FINO = Forschungsplattformen in Nord- und Ostsee http://fino-offshore.de/de/
FIS	Fachinformationssystem

Fokusgebiet	Ein Fokusgebiet (Teilgebiet) ist ein Teilraum eines Modellgebietes mit größerem Maßstab zur kleinteiligen Erfassung sedimentologischer und hydrodynamischer Prozesse.
Formänderungsprozess	Veränderung der Grenzschicht zwischen Wasser und Boden, beinhaltet sowohl die Entwicklung von Rippeln und Dünen als auch großräumige Erosion und Sedimentation.
FTZ	Forschungs- und Technologiezentrum Büsum der CAU Kiel
Funktionales Bodenmodell	Werkzeug (Software mit geeigneten Interpretationsvorschriften) zur Erstellung eines flächenhaften, zeitvarianten Modells der Gewässersohle, basierend auf Messdaten.
Future Ocean (ExC)	Der Exzellenzcluster „Future Ocean“ oder Ozean der Zukunft ist ein interdisziplinärer, von der DFG geförderter Forschungsverbund der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel (CAU) in Zusammenarbeit mit der Muthesius Kunsthochschule (MKHS), dem Institut für Weltwirtschaft (IfW) und dem Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung (GEOMAR) (Quelle: https://de.wikipedia.org/wiki/Ozean_der_Zukunft).
GDI-BSH	Geodaten Infrastruktur des BSH: Im BSH sind die in den verschiedenen Fachabteilungen vorhandenen Geodatenbestände in der Geodateninfrastruktur des BSH (GDI-BSH) zusammengeführt. Dies ermöglicht einen schnellen, standardisierten und fachübergreifenden Zugriff auf die BSH-Geodaten zur Bearbeitung verschiedener Problemstellungen über die Fachgrenzen hinweg.
GeoZG	Geodatenzugangsgesetz http://www.gesetze-im-internet.de/geozg/index.html
Gewässersohle	Gewässersohle = Gewässerboden = Meeresboden
GML	Geography Markup Language = Datenformat zum Austausch raumbezogener Objekte
Groundtruthing	Im Rahmen der Sedimentkartierung mit Seitensichtsonaren werden Bodenproben genommen, um die fernerkundlichen Daten zu klassifizieren.
Harvesting	Web scraping (web harvesting or web data extraction) is a computer software technique of extracting information from websites. https://en.wikipedia.org/wiki/Web_scraping
HINDCAST	Nachhersage – Berechnung von Zustandsgrößen aus der Vergangenheit
Hindcast-Simulationsmodell	Simulationsmodelle, die zurückliegende Zeiträume beschreiben

Hydraulische Kräfte	Unter hydraulischen Kräften werden Orbital- und Brandungsströmungen, Tide-, Trift-, Gefälle- und Dichteströmungen zusammengefasst.
Hydrodynamik (HN)	Teilgebiet der Strömungslehre, welches sich mit den Bewegungen von Flüssigkeiten beschäftigt.
IFG	Institut für Geowissenschaften
ImTG	Identifikation morphologischer Tendenzen und Geschwindigkeiten im Küstennahbereich, KFKI Projekt 03KIS059 http://www.kfki.de/de/projekte/imgt
INSPIRE	Infrastructure for Spatial Information in Europe. EU-Richtlinie für den Aufbau einer Geodateninfrastruktur in Europa
IPDS-Format	Datenformat der BAW zur Beschreibung der anfänglichen flächenhaften und fraktionierten Bodensedimentbelegung (Initial physical data set) http://wiki.baw.de/methoden/index.php5/IPDS.DAT
ISK	Infrastrukturknoten der MDI-DE
JSON	JavaScript Object Notation. Kompaktes Datenformat, insbesondere im JavaScript-Umfeld genutzt
KFKI	Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen
KODIBA	Entwicklung und Implementierung von Methoden zur Aufbereitung konsistenter digitaler Bathymetrien, KFKI Projekt 03KIS042 http://www.kfki.de/de/projekte/kodiba
Konzept	Ein Konzept beschreibt eine Grundvorstellung, Skizze, Entwurf oder die erste Fassung. In der Regel wird ein Konzept als eine Sammlung von Leitgedanken verstanden.
LAT	Niedrigstmöglicher Gezeitenwasserstand: lowest astronomical tide, ersetzt ab 2013 den Höhenbezug Seekartennull (SKN) http://www.bsh.de/de/Produkte/Infomaterial/Seekartennull/index.jsp
LISST	Laser In-Situ Scattering & Transmissometry: Gerät das mittels Laserbeugung Partikelgrößenverteilungen in der Wassersäule in-situ erfasst.
LKN	LKN-SH: Landesbetrieb für Küstenschutz, Nationalpark und Meeresschutz Schleswig-Holstein http://www.schleswig-holstein.de/DE/Landesregierung/LKN/lkn_node.html
MacroGranometer	Sinkgeschwindigkeitsröhre zur granulometrischen Analyse von Bodenproben
MAE	Mean Absolute Error = mittlere absolute Abweichung

MARINA	Gekoppeltes numerisches Hydrodynamik- und Seegangmodell von smile consult
Mathematisches Modell	Mathematische Modelle sind in mathematischen Formeln beschriebene Modelle. Sie versuchen, die wesentlichen Parameter der meist natürlichen Phänomene zu erfassen. Durch die formelle Beschreibung kann ein Modell berechnet und wissenschaftlich geprüft werden. http://de.wikipedia.org/wiki/Modell
MBES	Multi-Beam-Echo-Sounder: Fächerecholotsystem mit binärem Datenformat der WSÄ (seit 2002) einschließlich Metainformationen. (Abschlussbericht KFKI Projekt KODIBA) http://edok01.tib.uni-hannover.de/edoks/e01fb05/493564357.pdf
MD Modelle	Hydrodynamisch-numerische Modelle zur Berechnung der Veränderung des Bodens s. a. Morphodynamik (MD)
MDI-DE	Marine Dateninfrastruktur Deutschland, KFKI Projekt 03KIS089-03KIS082 http://www.kfki.de/de/projekte/mdi-de
Modell	Ein vereinfachtes, abstraktes Abbild der Realität https://de.wikipedia.org/wiki/Modell
Modellgebiet	Modellgebiet ist ein räumlicher Rahmen/Raumtyp in dem physikalische Fragestellungen behandelt/simuliert werden.
MORAN	Morphologische Analysen Nordseeküste, KFKI Projekt KFKI 16 http://www.kfki.de/de/projekte/moran
Morphodynamik	Evolution der Gewässersohle in Wechselwirkung mit der hydraulischen Belastung.
morphologische Geschwindigkeiten	Geschwindigkeit, mit der sich morphologische Strukturen bewegen. Die Berechnung basiert auf der Geschwindigkeit, mit der sich Isolinien bewegen.
morphologische Veränderungen	Raum- und zeitvariable Gestaltänderung (Morphologische Änderung = Morphodynamik) der Gewässersohle.
morphologischer Faktor	Technik zur Extrapolation von Modellergebnissen über längere Zeiträume, in dem die berechneten Änderungen der Gewässersohle (z. B. nach jeder vollständigen Tide) in der Zeit linear extrapoliert werden.
MPI-Fähigkeiten	Message Passing Interface (MPI) ist ein Standard, der den Nachrichtenaustausch bei parallelen Berechnungen beschreibt.
MSRL	Meeresstrategie-Rahmenrichtlinie

MUDAB	Die Meeresumweltdatenbank (MUDAB) ist die zentrale Datenbank des Bund/Länder-Messprogramms für die Meeresumwelt von Nord- und Ostsee (BLMP). http://www.bsh.de/de/Meeresdaten/Umweltschutz/MUDAB-Datenbank/
NetCDF	Network Common Data Format (NetCDF) ist ein Dateiformat für den Austausch wissenschaftlicher Daten. Es handelt sich um ein binäres Dateiformat, das durch die Angabe der Byte-Reihenfolge im Header maschinenunabhängig ist. http://www.unidata.ucar.edu/software/netcdf/
NHN	Normal Höhen Null = Höhe über dem Meeresspiegel (ehem. NN). Als Basis dient die Meereshöhe in Amsterdam (NAP).
NOKIS	Nord-Ostsee-Küsten-Informationen-System http://www.kfki.de/de/projekte/nokis
Nunc-Becher	Messgerät (Becher) zur Porositätsanalyse
OGC	Open Geospatial Consortium = Bereitsteller von vielen Standards für die Verarbeitung und Weitergabe von Geodaten
OpenAccess	Paradigma, was den freien Zugang zu Informationen und (wissenschaftlichem) Material im Internet auf Grundlage von verschiedenen Lizenzen vertritt
OpenData	Paradigma, was die freie Verfügbar- und Nutzbarkeit von meist öffentlichen Daten vertritt.
Pangaea	Datenbank PANGAEA: Data Publisher for Earth & Environmental Science http://www.pangaea.de/
Partialtiden	Bei der Partialtidenanalyse der Tide wird das Signal des Wasserstands in eine Reihe von Sinus-Gliedern mit unterschiedlicher, fest vorgegebener Frequenz zerlegt. http://wiki.baw.de/methoden/index.php5/FRQWF
POC-Gehalt	Particulate organic carbon (POC = partikulärer organischer Kohlenstoff) is that carbon that is too large and is filtered out of a sample.
PostGIS	Erweiterung für die PostgreSQL-Datenbank für die Ablage von räumlichen Daten
PostgreSQL-Datenbank	Datenbanksystem nach dem OpenSource-Prinzip
Prozessbasierte Simulation	Numerisches Verfahren auf der Basis der zugrundeliegenden physikalischen Gesetzmäßigkeiten, die im mathematischen System formuliert und approximiert werden.
Prozessorientierte Simulation	Numerisches Verfahren auf der Basis von eingeschränkten physikalischen Gesetzmäßigkeiten, die im mathematischen System formuliert und approximiert werden.

PTJ	Projektträger Jülich
Riffbogen	Seewärtige Ausbildung von Bodenformationen in Seegatten, die bogenförmig vom Westende Insel einer zum Ostende der benachbarten Insel verlaufen.
Riffel	kleinskalige Sohlformen (auch: Rippel)
RMSE	Root Mean Square Error = mittlere Standardabweichung
SaM	Senckenberg am Meer (SaM) Wilhelmshaven ist seit 1928 der marine Standort des Forschungsinstituts und Naturmuseums Senckenberg. http://www.deutsche-meeresforschung.de/de/senckenberg
Sandwelle	Von der Gewässersohle aufragende Bodenform, die quer zur Hauptströmungsrichtung ausgerichtet ist und im Querprofil eine asymmetrische Form aufweist. Sandwellen werden durch wechselnde Strömungsrichtungen und -stärken geformt und sind typischerweise aus Fein- und Mittelsand aufgebaut, wobei eine zunehmende Größe mit gröber werdendem Material einhergeht.
SBES	Single-Beam-Echo-Sounder = Einstrahlecholot
SBP	Der Subbottom Profiler dient der Erkundung des geologischen Aufbaus der Gewässersohle. Grundlage ist die partielle Reflexion von Schallwellen an Grenzflächen zwischen geologischen Einheiten mit unterschiedlichen Impedanzeigenschaften. Typischerweise werden akustische Signale mit Frequenzen zwischen 2 bis 30 kHz verwendet. Die Schallquelle ist entweder fest am Schiffsboden angebracht oder wird zusammen mit der Empfangseinheit an der Wasseroberfläche geschleppt.
Sedigraphen	Der Sedigraph dient zur quantitativen Analyse von Korngrößenspektren.
Sedimentation	Anlagerung von Sedimenten am Boden = Verringerung der Wassertiefe.
Sedimentologie	Lehre der Sedimente; umfasst die Beschreibung, Klassifizierung von Sedimenten und Sedimentgesteinen sowie deren Eigenschaften (Sedimentzusammensetzung, Sedimentmächtigkeit).
SediMorph	Bei dem mathematischen Verfahren SediMorph handelt es sich um ein morphodynamisches Modell, welches die Prozesse in einem Gewässerboden dreidimensional simuliert. http://wiki.baw.de/methoden/index.php5/Mathematisches_Verfahren_SEDIMORPH
Seegatt	Zwischen Barriereinseln gelegene Verbindung des Rückseitenwatts mit der offenen See. Aufbau in Richtung See: Flutdelta, Gezeitenrinnen zwischen den Inseln: Ebbdelta.

Seitensichtsonar	Dient der flächenhaften Erfassung der Rückstreuungseigenschaften der Sedimentoberfläche der Gewässersohle mittels hochfrequenter Schallwellen (Frequenzbereiche zwischen 100 und 1000 kHz). Die Schallquelle wird in der Regel in der Wassersäule dicht über dem Meeresboden hinter dem Schiff geschleppt. Die Breite des zu kartierenden Streifens ist unabhängig von der Wassertiefe.
Selafin-Format	Binäres Standard-Format von TELEMAC, auch genutzt von nsea100
SES	Sediment-Echo-Sounder: Sedimentecholot ist ein akustisch basiertes Messsystem, das unter Aussendung von Schallsignalen um 100kHz mit hohem Schalldruck niederfrequente Sekundärsignale erzeugt (parametrischer Effekt), die in die obere Gewässersohle eindringen und an Grenzflächen rückgestreut werden.
Shelf Geo Explorer (SGE)	Geologisches Fachinformationssystem des BSH. Es beinhaltet Geodaten über Sedimentverteilung, -mächtigkeiten, Morphodynamik, Kernpositionen und Beschreibungen, Positionen von Drucksondierungen sowie Lage von Profilen zur Hydroakustik, Magnetik und Videoaufnahmen in Nord- und Ostsee. www.BSH-SGE
Shape	Geodatenformat
SISYPHE	Numerisches Modell der EdF zur Simulation von Sedimenttransport und Morphodynamik - gekoppelt mit TELEMAC
SLD	Styled-Layer-Descriptor. OGC Standard für die Beschreibung von Legenden für OGC Web Mapping Services
Sohlevolutionsgleichung	Bilanzgleichung aller zu- und abgeführten Sedimentmengen in einem Kontrollraum zur Berechnung der daraus resultierenden Bodenänderungen, s. a. Exnergleichung
Sohlformen	Sohlformen = Bodenformen = Oberfläche der Gewässersohle
Sorted bedform	Langgestreckte, ausgeräumte Bodenform, die durch Turbulenzen in der Wassersäule erzeugt wird. Die Turbulenzen sorgen für eine lokale Vertiefung des Meeresbodens und für eine Sedimentsortierung mit scharfen Sedimentverteilungsgrenzen, wobei sich gröberes Material innerhalb und feineres Material außerhalb der Bodenform befindet. Sorted bedforms kommen oft parallel-liegend in größerer Anzahl von bis zu mehreren hundert vor und bilden so Felder aus.
SSS	Side-Scan-Sonar = Seitensichtsonar
Stratigraphie	Sedimentologischer Aufbau/vertikale Zusammensetzung der Gewässersohle – vertikale Schichtung.

Streubreite	Die Streubreite ist die Differenz zwischen dem höchsten und dem niedrigsten Messwert/Simulationsergebnis http://de.statista.com/statistik/lexikonListe/letter/S/
SWAN	Simulating Waves Nearshore (SWAN) ist ein numerisches Seegangmodell der TU-Delft. http://www.swan.tudelft.nl/
Teilgebiet	Teilgebiet = Fokusgebiet in AufMod
TELEMAC	Numerisches Modell der EdF zur Simulation von Hydrodynamik und Transport
terraCatalog	Metadatenkatalog und -Datenbank von ESRI
TOMAWAC	Numerisches Seegangmodell der EdF
Trajektorien	Bahnkurven
UIG	Umweltinformationsgesetz
UNESCO-Formel	Formel zur Bestimmung der praktischen Salinität (Salzgehalt) http://unesdoc.unesco.org/images/0007/000763/076307mb.pdf
Uni-Bw	Universität der Bundeswehr, München
UNK	Numerisches Seegangmodell der BAW, basierend auf unstrukturierten Gitterelementen
UnTRIM	Numerisches Simulationsmodell für Hydrodynamik und Transport der BAW, basierend auf unstrukturierten Gitterelementen
URL	Uniform Resource Locator, Webadresse
Voronoi-Region	Alle Punkte des Raumes, die in Bezug zu einer Metrik näher am Zentrum der Region liegen als an jedem anderen Zentrum (beschreibt häufig Einzugs- bzw. Gültigkeitsbereiche eines Punktes).
WADABA	Zentrale Datenbank des Wattenmeerinformationssystems WATiS. Halter: Helmholtzzentrum Geesthacht
Watteinzugsgebiet	Wattfläche, deren Rinnensystem geschlossen durch ein Seegatt entwässert
WCS	OGC Web Coverage Service. OGC Standard für die Darstellung von Rasterdaten
WDC-MARE	Datenbank für georeferenzierte Daten WDC-MARE www.wdc-mare.org
WEA	Wind Energie Anlagen
WFS	OGC Web Feature Service. OGC Standard für den Download von vektorialen Geodaten
WMS	OGC Web Mapping Service. OGC Standard für die Darstellung von Karten/Geodaten
WRRL	Wasserrahmenrichtlinie

WSV	Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes
XYZ-Format	Einfaches Dateitextformat mit xyz-Koordinaten plus Mess- oder andere Werte