

Modellierung großräumiger Sedimenttransporte in der Deutschen Bucht (Nordsee)

Manfred Zeiler, Peter Milbradt, Andreas Pliß und Jennifer Valerius

Zusammenfassung

Der Aufbau von integrierten Modellsystemen (AufMod) zur Analyse der langfristigen Morphodynamik in der Deutschen Bucht war Ziel des KFKI-Verbundforschungsvorhabens (Laufzeit: 2009-2012). Auslöser hierfür war eine im Jahr 2008 durchgeführte Ausschreibung des KFKI mit einer detaillierten Anforderungsliste.

Im Projekt wurde 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 anforderungsgerecht zur Verfügung stellen kann (Funktionales Bodenmodell).

Die Betrachtung der Sedimentprozesse in der Deutschen Bucht kann nicht ohne die Berücksichtigung der Prozesse in der gesamten Nordsee erfolgen. Deshalb wurden auch umfangreiche Daten der Anrainerstaaten akquiriert und in das Funktionale Bodenmodell übernommen. Die großräumigen und langfristigen Sedimentbewegungen sind auch von lokalen, teilweise zeitlich beschränkten Prozessen beeinflusst. Deshalb fokussierte sich das Funktionale Bodenmodell auf bestimmte Gebiete: den Schelf bzw. das Küstenvorfeld, den Vorstrandbereich, die Bereiche von Inseln und im Wattenmeer.

Im Rahmen der Anwendung deterministischer Prozessmodelle wurde ein konsequenter Multi-Modell-Ansatz mit 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.

Abschließend wurde eine gemeinsame Synthese erarbeitet, die alle relevanten Ergebnisse der Teilprojekte einbezieht und eine übergreifende, gemeinsame Bewertung zur Beantwortung der in der KFKI-Ausschreibung formulierten Ziele erstellt.

Schlagwörter

Nordsee, Deutsche Bucht, Sedimentverteilung, Sedimentzusammensetzung, Porosität, Bathymetrie, Topographie, Sedimenttransport, Morphodynamik, Numerische Modellierung, Meeresspiegelanstieg

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 in 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 have undergone a sophisticated postprocessing procedure to overcome inconsistencies arising from 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 including the 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. They are based on natural processes and take account of the whole variability of tides, external surge, river run-off, wind and waves. "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 provide a first comprehensive impression of the resulting sediment transport pathways in the German Bight.

Further model runs have focused on the sensitivity of sediment transport and the morphological response due to wind forcing, mean sea level rise and variation in porosity.

Keywords

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

Inhalt

1	Einleitung	401
2	Untersuchungsgebiet	402
3	Datenbasis	403
3.1	Sedimentologische Daten	403
3.2	Bathymetrische Daten	406
3.3	Hydrodynamische und meteorologische Daten	407
4	Funktionales Bodenmodell.....	408
5	Suite der numerischen Modellierungswerkzeuge.....	414
5.1	Modellgebiet (Gitter).....	414
5.2	Randbedingungen	415
5.3	Modellkalibrierung und -validierung.....	415
5.4	Sensitivitätsstudien.....	417
6	Sedimenttransport in der Deutschen Bucht.....	417
6.1	Sedimenttransportpfade.....	418

6.2	Sedimentbilanz	419
7	Schlussfolgerungen	420
8	Schriftenverzeichnis	421

1 Einleitung

Ein besseres Verständnis der morphodynamischen Prozesse an der deutschen Nordseeküste ist für viele Aspekte von Bedeutung: den Küstenschutz, die kosteneffektive Unterhaltung von Schifffahrtswegen, die Planung der Küsteninfrastruktur (z. B. Unterwasserkabel) sowie, in jüngerer Zeit, die Umweltverträglichkeitsprüfungen, die im Zusammenhang mit der Umsetzung von EU-Richtlinien durchgeführt werden. Daher veröffentlichte das Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI) im Jahr 2008 eine Ausschreibung mit dem Schwerpunkt auf einer besseren numerischen Modellierung der relevanten großräumigen und langfristigen Sedimentbewegungen, d. h. Sedimenttransportrichtungen und Bilanzen. Das daraus entstandene Forschungs- und Entwicklungsprojekt AufMod (Aufbau von integrierten Modellsystemen zur Analyse der langfristigen Morphodynamik in der Deutschen Bucht) wurde im Zeitraum von 2009 bis 2012 von einer interdisziplinären Forschungsgruppe unter der Führung der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) durchgeführt. Sein Ziel war die Entwicklung eines integrierten Modellsystems zur Analyse der langfristigen Morphodynamik in der Deutschen Bucht (Nordsee). Hierzu wurden daten- und prozessbasierte Modelle kombiniert und verbessert und zur Untersuchung langfristiger Sedimenttransporte und morphodynamischer Prozesse herangezogen. Gefördert wurde AufMod durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF).

Die Projektgruppe umfasste die Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), das Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH), die Christian-Albrechts-Universität, Kiel, die Universität Bremen, die Universität der Bundeswehr München, das Senckenberg-Institut Wilhelmshaven und die smile consult GmbH, Hannover.

AufMod verfolgte primär die folgenden Ziele:

- Schaffung einer möglichst konsistenten und plausiblen Datenbasis zur Beschreibung der Meeresbodenoberfläche und physischer Sedimenteigenschaften und anschließende Nutzbarmachung dieses Datenbestands für Dritte auch über den Projektzeitraum hinaus
- Aufbau und Entwicklung einer morphodynamischen Modell-Suite, die auch Tiden, Wellen und welleninduzierte Strömungen berücksichtigt
- Analyse verschiedener Szenarien des Meeresspiegelanstiegs infolge des Klimawandels
- Onlineveröffentlichung der Daten in Kooperation mit dem FuE-Projekt „Marine Dateninfrastruktur Deutschland (MDI-DE)“

Eine wichtige wissenschaftliche Zielsetzung von AufMod war die Ermittlung der für den langfristigen Sedimenttransport und die morphodynamische Reaktion der Gewässersohle relevanten Prozesse und Auswirkungen. Das Konzept des AufMod-Projekts beinhaltete die Erfassung meteorologischer, hydrodynamischer und sedimentologischer Daten, die Analyse morpho- und sedimentdynamischer Prozesse in daten- und prozessbasierten

Modellen und die Präsentation der Ergebnisse (Produkte) in einer integrierten Geodateninfrastruktur (Abb. 1).

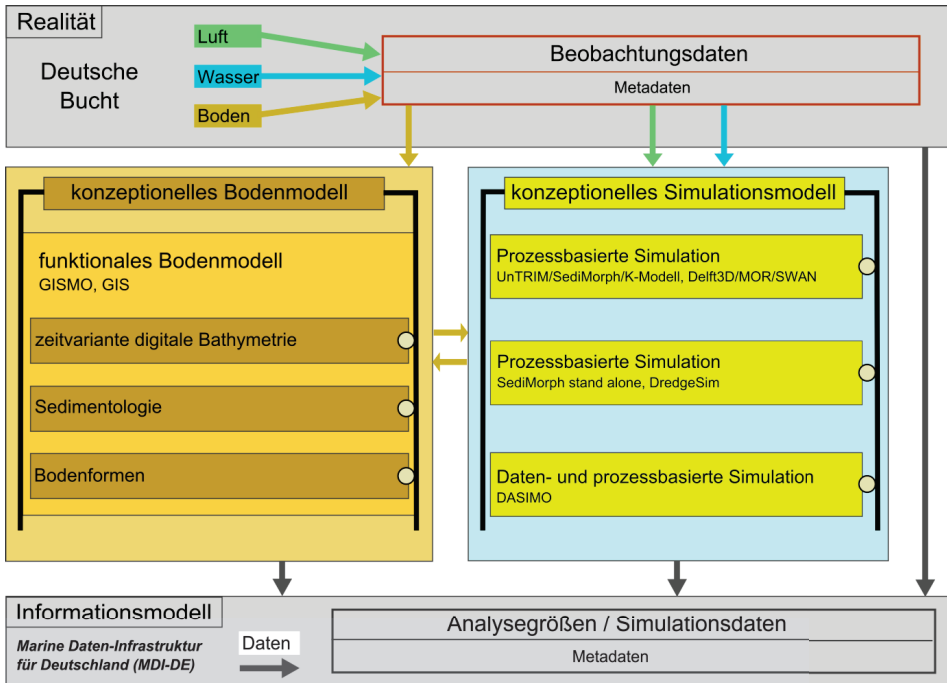


Abbildung 1: Konzeptioneller Ansatz des integrierten Modellsystems.

Mit dem „Funktionales Bodenmodell“ (FBM) sollte zunächst eine Datenbasis mit konsistenten Daten zur Bathymetrie und Sedimentologie geschaffen werden, auf deren Grundlage sich die zahlreichen in AufMod eingesetzten numerischen morphodynamischen Modelle auch hinsichtlich ihrer Validierungsaspekte testen ließen, und die eine kritische Auseinandersetzung mit ersten Ergebnissen zu den Sedimenttransportpfaden aus verschiedenen Modellläufen ermöglichte. Der AufMod-Ansatz zur Untersuchung des langfristig stattfindenden Sedimenttransports beruht auf der Kombination von daten- und prozessbasierten Modellen.

2 Untersuchungsgebiet

Der Schwerpunkt des Projekts lag auf der Deutschen Bucht im südöstlichen Teil der Nordsee. Die hier von Westen (den Niederlanden) eindringenden halbtäglichen Partialtiden breiten sich entgegen dem Uhrzeigersinn entlang der Küstenlinie der Deutschen Bucht in Richtung der dänischen Gewässer aus und unterliegen dem Einfluss von Coriolis-Beschleunigungen. Der Tidenhub variiert von ca. 1,5 m (Inseln Borkum und Sylt) bis zu ca. 3,5 m (in der Flussmündung der Elbe).

Der Meeresboden wird durch unterschiedliche Sandablagerungen dominiert, die im derzeitigen hydrodynamischen Regime Sedimentations- und Erosionsprozessen unterliegen. Größere Sedimente kommen in den Tidekanälen vor, in denen Strömungs-

geschwindigkeiten von bis zu 1,5 m s⁻¹ erreicht werden. Auch in einigen Bereichen des Schelfs treten größere Sande und Kiese auf, Relikte der Vereisung zur Saalezeit und/oder fluvioglaziale Sedimente aus der Weichseiszeit.

3 Datenbasis

Die Grundlage aller Untersuchungen bildete eine umfangreiche Datenbasis zur physischen Beschaffenheit der Nordsee. Hierzu wurden in AufMod verschiedenste Datensätze zusammengetragen und ausgewertet:

1. sedimentologische Daten (z. B. Korngrößenverteilung, Porosität)
2. bathymetrische Daten unter Berücksichtigung von Sohlformen,
3. hydrodynamische und meteorologische Daten und
4. Modellergebnisse nach Modellaufbau und -lauf sowie Interpolation und Interpretation

3.1 Sedimentologische Daten

Für die morphodynamische Modellierung waren folgende Parameter relevant:

1. Korngrößenanalysen von Oberflächensedimenten,
2. Porosität,
3. Mächtigkeit der mobilen Sanddeckschicht und
4. organischer Anteil in Schlicksedimenten

Tabelle 1: Quellen der sedimentologischen Datensätze.

Daten	Herkunft	Probenmenge	Räumlicher Aussagebereich	Zeitlicher Aussagebereich
MUDAB - Korngrößenverteilung	BSH	25.309	Nordsee	1924-2008
WADABA - Korngrößenverteilung	Helmholtzzentrum Geesthacht	1.449	Deutsches Wattenmeer	1987-2003
Korngrößenverteilungen Spiekeroog	Forschungsinstitut Senckenberg am Meer, Wilhelmshaven	941	Küstenvorfeld Spiekeroog	1986-1989 2005
Korngrößenverteilungen Großbritannien	British Geological Survey (BGS), Nottingham, Großbritannien	15.946	Nordseesektor Großbritannien	
Korngrößenverteilungen Niederlande	Geologische Studien in den Niederlanden (INO), Utrecht, die Niederlande	6.619	Nordseesektor Niederlande	1969-2006
Korngrößenverteilungen Norwegen	Norges Geologiske Undersøkelse (NGU), Trondheim, Norwegen	129	Skagerrak	1992-1994
Interpolierte Mediane von Korngrößenverteilungen, Belgien	Royal Belgian Institute of Natural Sciences, Brüssel, Belgien	250-m-Gitter	Nordseesektor Belgien	
Korngrößenverteilungen Belgien	Royal Belgian Institute of Natural Sciences, Brüssel, Belgien	3.468	Nordseesektor Belgien	1984-2009
Korngrößenverteilungen Norwegen	Royal Belgian Institute of Natural Sciences, Brüssel, Belgien	3.468	Nordseesektor Belgien	1984-2009
Korngrößenverteilungen Dänemark	GEUS, Kopenhagen, Dänemark	215	Nordsee	2000-2008
Korngrößenverteilungen Dänemark	Dänische Küstendirektion, Verkehrs- und Energieministerium, Dänemark	215	Nordseesektor Dänemark	2010
GPDN - Korngrößenverteilung	Geopotential Deutsche Nordsee (BSH, BGR, LBEG), Deutschland	1.363	Nordseesektor Deutschland	2008-2011
SedDB (Küste) – Korngrößenverteilung	BfG, Koblenz, Deutschland	4.949	Elbe-, Jade-, Weser-, Emsästuar	1982-2009
Korngrößenverteilungen, Sedimentatlas Waddenzee	Waterdienst (Rikswaterstaat, Ministerie van Infrastructuur en Milieu), Lelystad, Netherlands	7.502	Waddenzee der Niederlande	1989-1997

Daten	Herkunft	Probenmenge	Räumlicher Aussagebereich	Zeitlicher Aussagebereich
Korngrößenverteilungen Offshore-Windparks, Genehmigungsverfahren	BSH (vertraulich), Deutschland	4.383	Nordseesektor Deutschland	2000-2008
FeDaBa – Korngrößenverteilung	BfG, Koblenz, Deutschland	3.163	Elbe-, Jade-, Weser-, Emsästuar	1980-2012
GROBEKART – Korngrößenverteilung	AWI, Deutschland	4.373	Schelf von Schleswig-Holstein	2004-2011

Die Korngrößenanalysen decken die Deutsche Bucht mit einer recht hohen räumlichen Auflösung von einer halben bis einer nautischen Meile ab. Im Gegensatz zur bathymetrischen Datenbasis sind hier fast keine Zeitreihen verfügbar (Tab. 1). Die Oberflächensedimentproben wurden über einen Zeitraum von ca. 90 Jahren in der Deutschen Bucht erhoben, überwiegend zwischen 1960 und 1970. Die Korngrößenanalysen wurden für den gesamten Nordseebereich zur Verfügung gestellt, Abb. 2 zeigt die Probenentnahmestellen. Die Partikelgrößenverteilungen wurden entsprechend ihrer Auflösung als Summenkurve in einer logarithmischen Skala gespeichert. Die einzelnen Kornfraktionen der kumulierten Partikelgrößenverteilung wurden über eine lineare oder monoton kubische Spline-Interpolation generiert (KRUGER 2004).

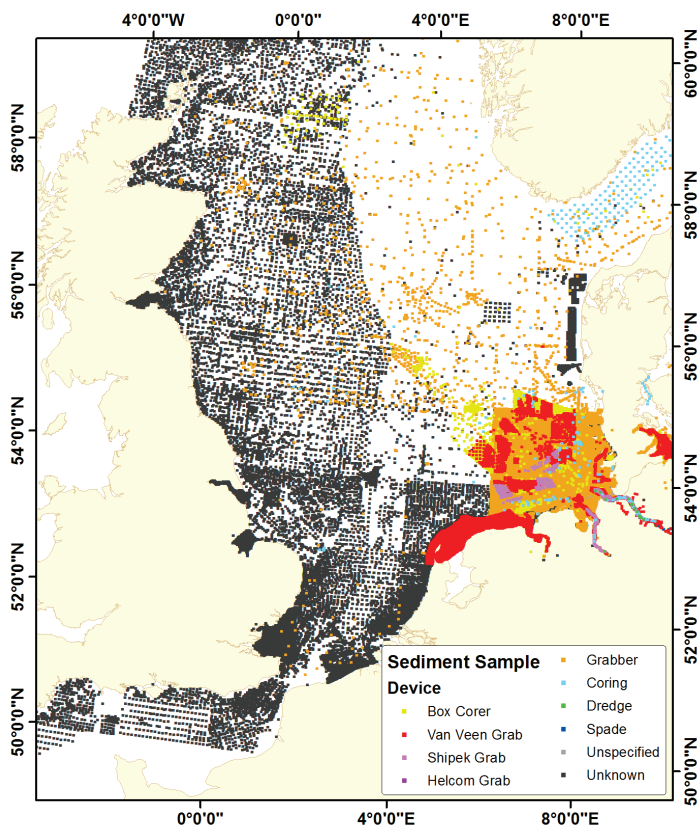


Abbildung 2: Positionen der Korngrößenanalysen in der Nordsee.

Für die deutsche Nordsee, insbesondere für sandige Sedimente, sind nahezu keine Porositätsdaten verfügbar. Die Porosität der Sande im Wattenmeer der inneren Deutschen Bucht liegt bei ca. 40 % (FÜCHTBAUER und REINECK 1963). Im Rahmen des AufMod-Projekts wurden zudem Porositätsmessungen für die feinkörnigen Sedimente im Elbe-Weser-Ästuar vorgenommen.

Abb. 3 veranschaulicht eine Zusammenführung von Datensätzen zur Mächtigkeit der mobilen Sanddeckschicht, die in den morphodynamischen Modellen stellvertretend für die verfügbare Sedimentmenge eingesetzt wurde. Die Eingangsdaten stammen aus früheren FuE-Projekten sowie geologischen Kartierungsprogrammen.

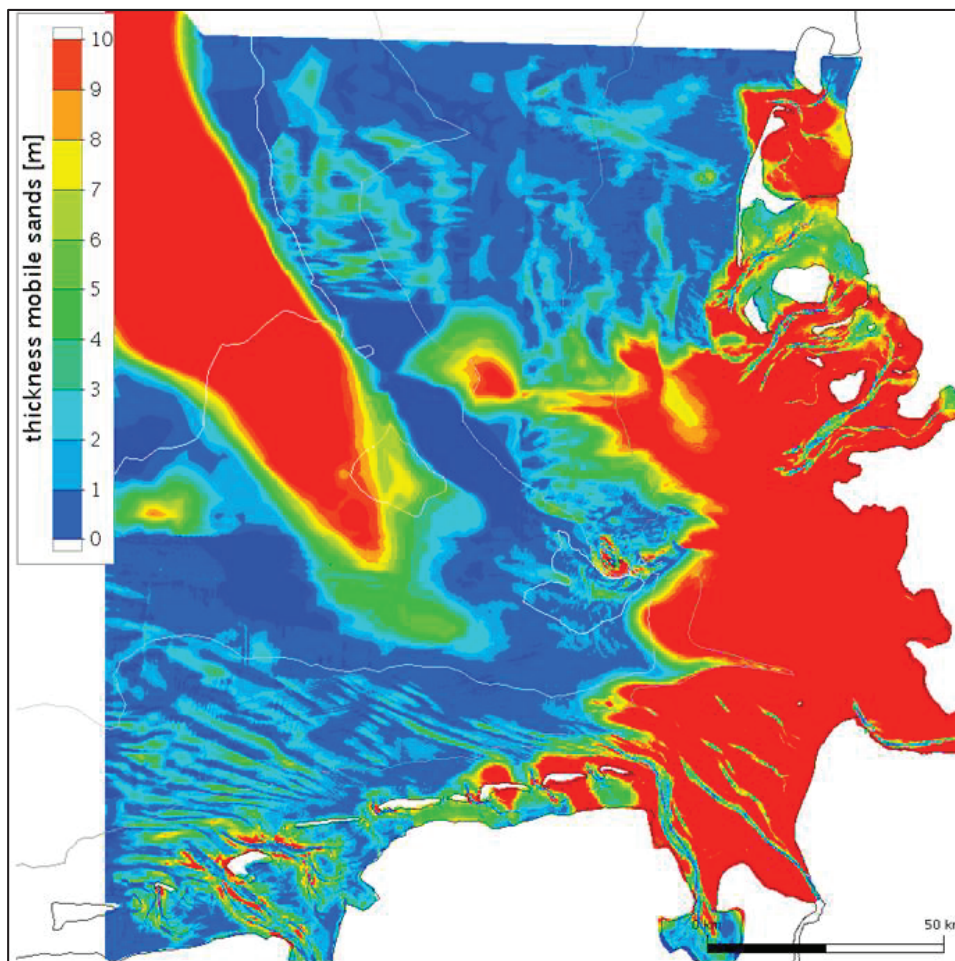


Abbildung 3: Mächtigkeit der oberen Sedimente (mobile Deckschicht und holozäne Sedimente) in der Deutschen Bucht.

3.2 Bathymetrische Daten

Zur Beschreibung der Veränderungen des Gewässerbodens wurde von der Modellvorstellung einer kontinuierlichen Funktion $z(x,y,t)$ in Raum und Zeit ausgegangen. Das digitale bathymetrische Modell basiert auf diskreten Vermessungspunkten und zugehörigen Interpretationsmethoden in Raum und Zeit.

In einem ersten Schritt wurden bathymetrische Daten aus verschiedenen Datenquellen zusammengetragen (Tab. 2). Abb. 4 zeigt die räumliche und zeitliche Verteilung der verschiedenen bathymetrischen Vermessungskampagnen, die gemäß den hydrographischen Vermessungsanforderungen einer Qualitätsbewertung unterzogen wurden. Sie wurden in unterschiedlichen Zeitintervallen überwiegend in den Elbe-, Weser- und Emsästuaren sowie in den Flachwasserbereichen mit einer Wassertiefe von bis zu 20 m durchgeführt.

Im nächsten Schritt wurde die bathymetrische Datenbank durch relevante Metadaten ergänzt, um eine umfassende Beschreibung der Vermessungsdaten zu gewährleisten. Beispiele hierzu sind Angaben zum räumlichen Konfidenzbereich, dem zeitlichen Konfidenzintervall, zur Messgenauigkeit und zur empfohlenen räumlichen Interpolationsmethode.

Insgesamt wurden auf diese Weise 1,7 Milliarden Datenpunkte aus mehr als 16.000 bathymetrischen Vermessungen zusammengestellt, die den Zeitraum von 1948 bis 2012 abdecken.

Auf Basis der zeitvarianten digitalen Bathymetrien lassen sich Aussagen zu morphologischen Veränderungen analysieren (MILBRADT et al. 2015)

Tabelle 2: Anbieter bathymetrischer Daten.

Quelle	Räumlicher Aussagebereich	Zeitlicher Aussagebereich
BSH	Deutsche Nordsee	1983-2012
BSH	Digitalisierte Arbeitskarten hydrologischer Vermessungen für verschiedene Teilgebiete der deutschen Nordsee	1974-1979
KFKI-Projekt 03KIS308	Digitalisierte Arbeitskarten hydrologischer Vermessungen für verschiedene Teilgebiete der deutschen Nordsee	1948-1982
WSA Bremen	Weser	2008-2009
WSA Bremerhaven	Weserästuar, Jadebusen	1996-2009
WSA Cuxhaven	Elbeästuar bis Nordwesten von Helgoland	1990-2012
WSA Emden	Emsästuar	1990-2011
WSA Tönning	Rinnen Nordfriesisches Wattenmeers	1990-2010
WSA Wilhelmshaven	Fahrinne der Jade, Gebiet um Spiekeroog und Wangerooge	1996-2012
NLWK	Nördlicher Strandbereich von Juist und Langeoog	1983-2007
LKN-SH	Wattgrundkarten	1935-2012
Landesvermessungsamt Schleswig-Holstein	ALS - Daten für das Wattenmeer (Schleswig-Holstein)	2005/06
British Oceanographic Data Centre	Digitale Geländemodelle der Nordsee	1998, 2008
Dänisches hydraulisches Institut	Digitale Geländemodelle der Nordsee	2003, 2009
Kystdirektoratet/Die Dänische Küstenbehörde	Dänisches Wattenmeer, Blåvandshuk bis Hindenburgdamm	2008
Senckenberg am Meer, Wilhelmshaven	Küstenvorfeld Spiekeroog	2003, 2007
JadeWeserPort Logistics Zone GmbH & Co.KG	Jade	2010

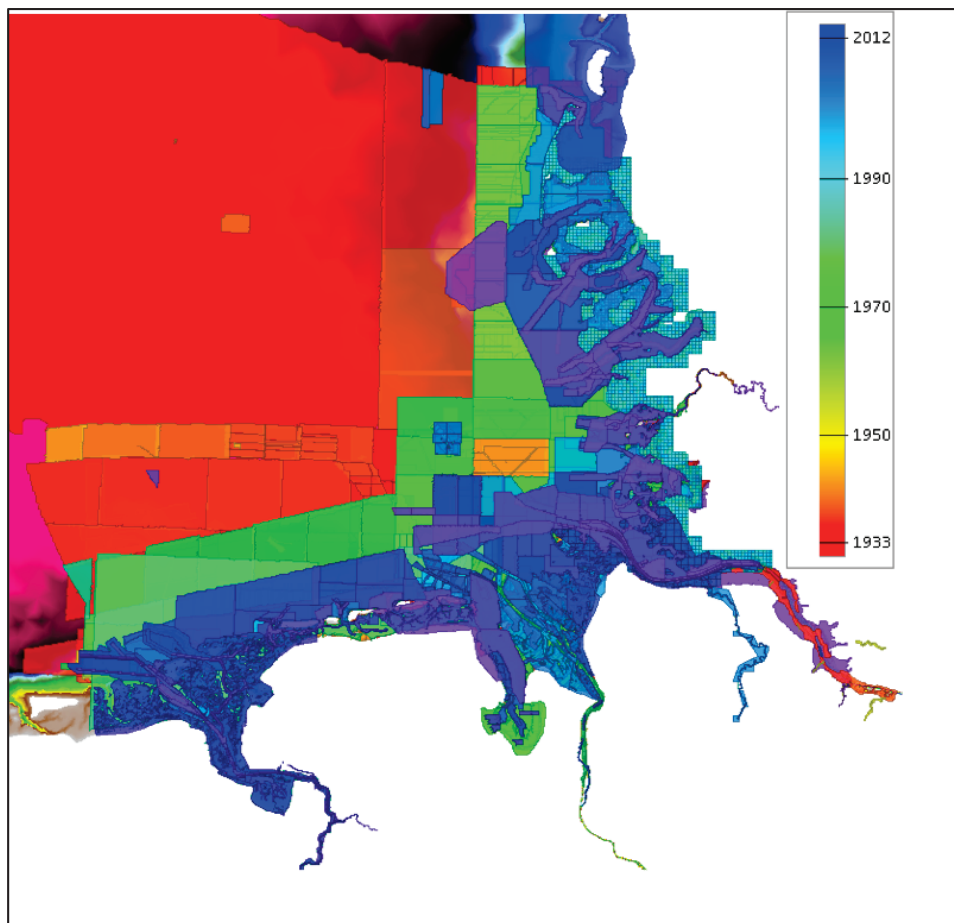


Abbildung 4: Für morphodynamische Analysen relevanter räumlicher und zeitlicher Aussagebereiche der bathymetrischen Vermessungsdaten in der Deutschen Bucht (Nordsee).

3.3 Hydrodynamische und meteorologische Daten

Meteorologie und Hydrodynamik sind die Antriebskräfte der Morphodynamik in der Deutschen Bucht. Für hydrodynamische und morphodynamische Simulationen sowie morphodynamische Analysen wurden neben den Bathymetrie- und Sedimentdaten auch Daten zu zeitabhängigen Wasserständen an den offenen (seeseitigen) Modellrändern, zur Menge des Oberwasserzuflusses und zu den Windgeschwindigkeiten in Zeit und Raum zusammengetragen:

- Wasserstände: Das Tidesignal stammte aus dem globalen Gezeitenmodell FES2004.
- Die Abflüsse wurden aus Messungen in der Deutschen Bucht, die langfristigen Mittelwerte für die übrigen Oberwasserzuflüsse aus Analysen übernommen.
- Der verwendete Windantrieb stammte aus Ergebnissen des Prognosemodells des Deutschen Wetterdienstes (DWD).

4 Funktionales Bodenmodell

Das sogenannte „Funktionale Bodenmodell“ (FBM) ist eine Datenbank für morphodynamische Analysen, die datenbasierte Modelle der Bathymetrie und Sedimenteigenschaften für frei wählbare Orte und Zeiten im Untersuchungsgebiet umfasst. Das FBM bildet darüber hinaus die Entwicklung der Gewässersohle im Zeitverlauf ab. Die Generierung der zweidimensionalen Modelle der Bathymetrien und Sedimenteigenschaften erfolgt mit Hilfe geeigneter Interpolations- und Approximationsmethoden (MILBRADT 2011).

Derzeit liefert das Funktionale Bodenmodell Informationen zu den folgenden Parametern:

- Zeitvariante Topographie (Bathymetrie),
- Mächtigkeit der mobilen Sedimentschicht,
- Porosität,
- Korngrößenverteilung,
- organischer Anteil im Sediment,
- Beständigkeit konsolidierter Sedimente und
- Sohlformen.

Im Hintergrund des Funktionalen Bodenmodells liegt ein zeitinvariantes Basismodell, das die Interpolation oder Approximation übernimmt, wenn für einen bestimmten Ort keine Messdaten vorliegen. Das topographische Basismodell enthält das Nordsee-Modellgitter der BAW und bündelt alle bathymetrischen Daten bis zum Jahr 1989. Das Basismodell zur Mächtigkeit der mobilen Sanddeckschicht geht auf das Jahr 1985 zurück und wurde, auf Grundlage der Erosionstiefe zwischen den Jahren 1985 und 2009, auf mindestens 1 m geschätzt. Dem FBM liegt hierbei die Modellvorstellung zugrunde, dass unterhalb der mobilen Sanddeckschicht konsolidiertes Sediment liegt, das selbst nicht mobilisiert werden kann. Die Porosität wurde im Basismodell auf 25 %, der organische Anteil im Sediment auf 5 % eingestellt.

Im FBM werden in der Regel kumulative Korngrößenverteilungen verwendet. Für das Basismodell wird eine repräsentative Verteilung von D50 (Median der Korngrößensummenkurve) modelliert, die auf einer Kombination aus Korngrößendaten vom BSH und aus Simulationsergebnissen basiert. So ergibt sich insbesondere in den Ästuaren und Wattflächen, für die keine Stichproben mit ausreichender räumlicher Auflösung vorliegen, eine konsistente D50-Verteilung.

Auf der Basis des FBM wurden in der Projektlaufzeit AufMod-Produkte erstellt und zur weiteren Nutzung veröffentlicht. Diese beinhaltet jährlich generierte digitale Geländemodelle (Abb. 5) von der Küstenlinie bis zu einer Wassertiefe von ca. 20 m. Darüber hinaus sind die jährlichen Bathymetrien mit Layern zur räumlichen Unsicherheit verknüpft, z. B. räumliche Konfidenz (Abb. 6) und Mindestabstand in Bezug auf den Datensatz im Zeitverlauf.

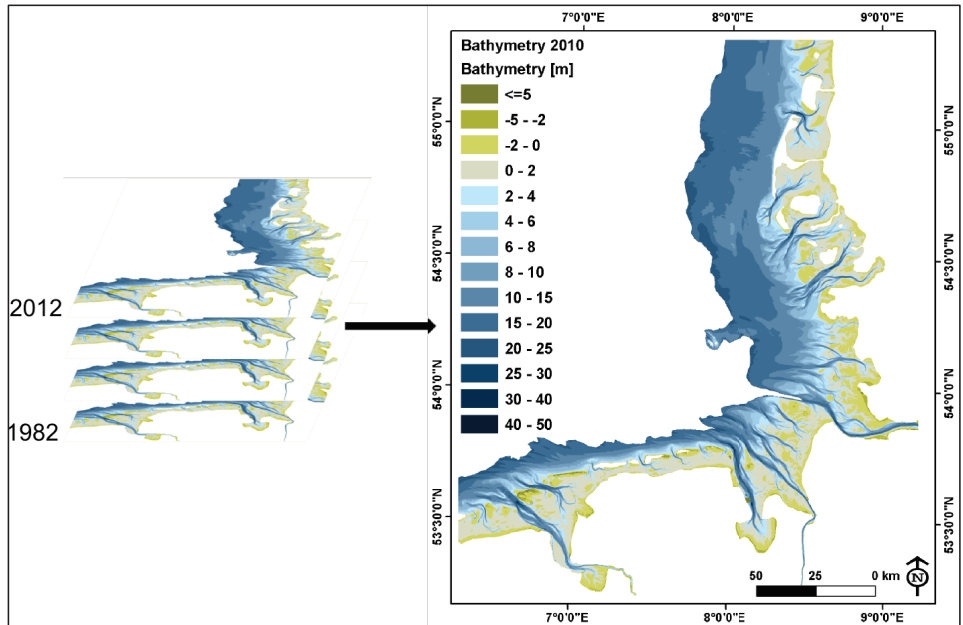


Abbildung 5: Beispiel für die Bathymetrie eines Jahres (digitales Geländemodell).

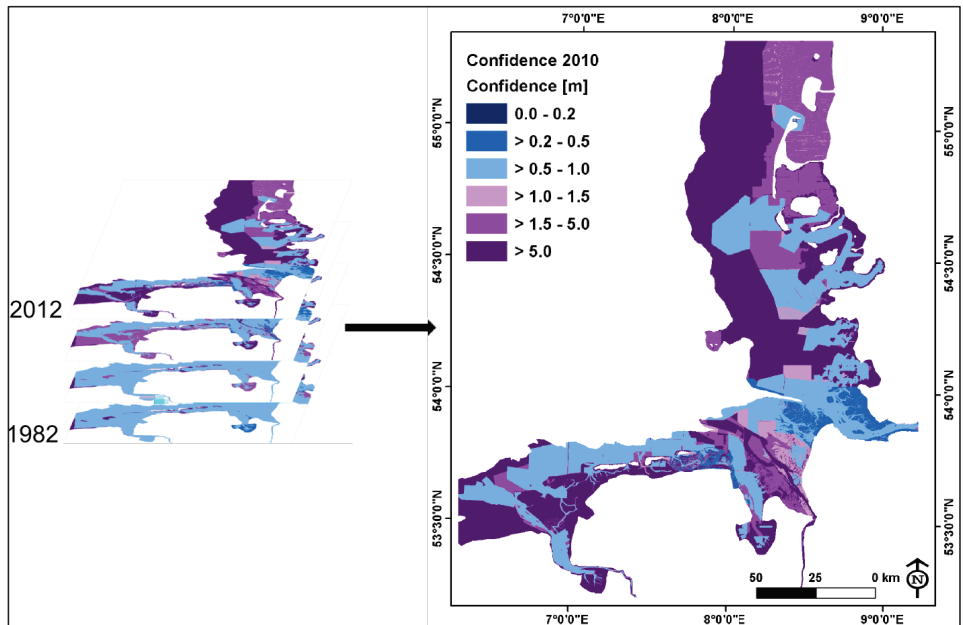


Abbildung 6: Räumliche Konfidenz für die Jahres-Bathymetrie aus Abb. 5.

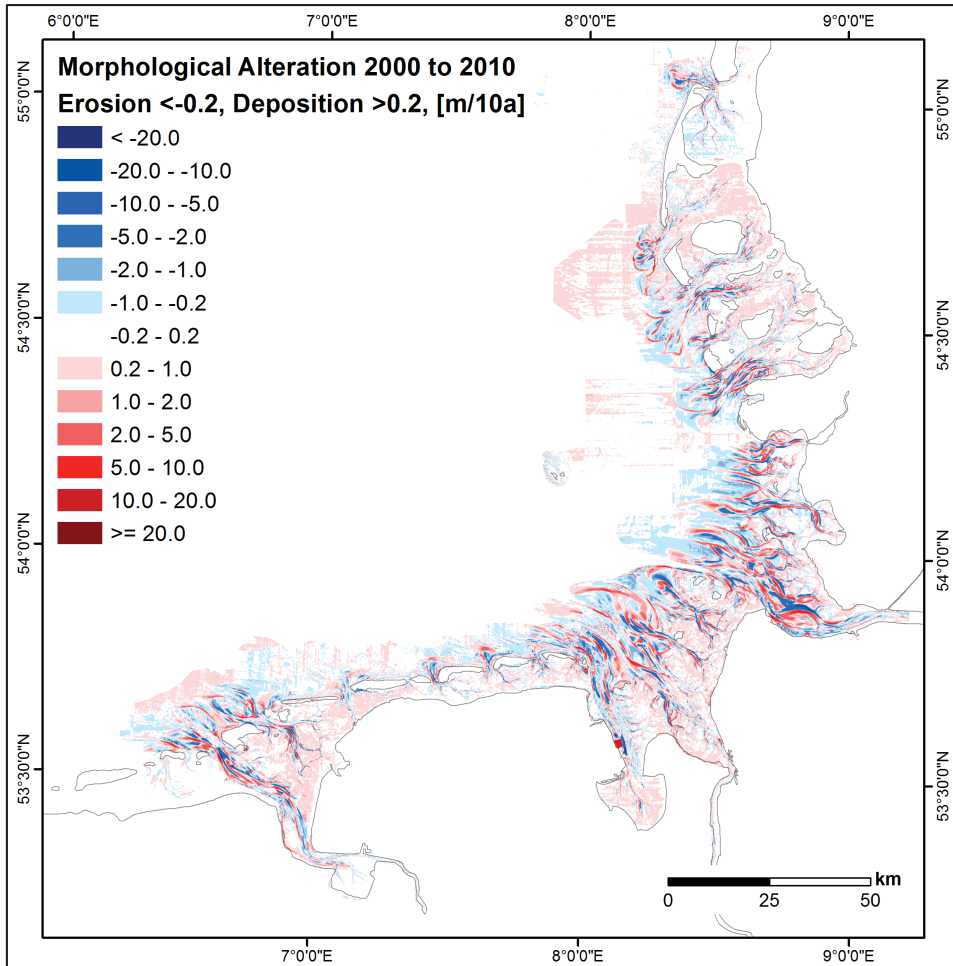


Abbildung 7: Beispiel für morphologische Veränderungen auf der Basis von jährlichen Bathymetriemodellen.

Die jährlichen Topographien sind die Voraussetzung für die Modellierung weiterer Datensätze zur Beschreibung bezüglich der Entwicklung der Gewässersohle im Laufe der Zeit:

- morphologische Veränderung (Abb. 7): Tiefendifferenzen in einem Zeitraum von 1, 5, 10 und 30 Jahren
- morphologischer Raum (Abb. 8): Differenz der höchsten und niedrigsten Wassertiefen in bestimmten Zeitintervallen (5, 10, 30 Jahre)
- morphologischer Drive (Abb. 9): Differenz der maximalen und minimalen Tiefenänderung pro Jahr in unterschiedlichen Zeitintervallen (5, 10, 30 Jahre)

Weitere Produkte des FBM sind räumliche Verteilungen statistischer Parameter, die aus der kumulativen Korngrößenverteilung abgeleitet wurden, wie Median (Abb. 11) oder Sortierung (Abb. 10) sowie unterschiedliche Korngrößenklassen. Diese Parameter sind

nützlich für die Analyse der Sedimentdynamik in mehr als 20 m Wassertiefe im Schelfbereich, denn hier sind bathymetrische Zeitreihen selten, und morphologische Änderungen liegen innerhalb des Unsicherheitsbereichs der Messdaten.

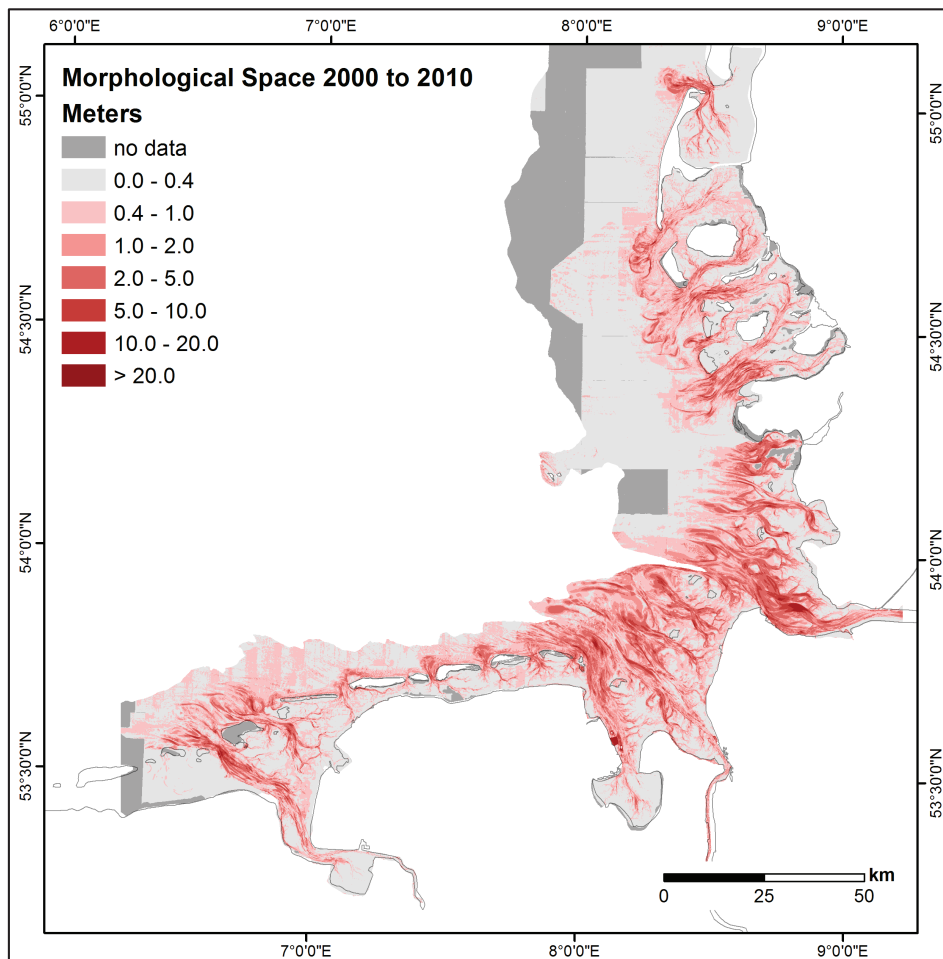


Abbildung 8: Beispiel für den morphologischen Raum auf der Basis von jährlichen bathymetrischen Vermessungen.

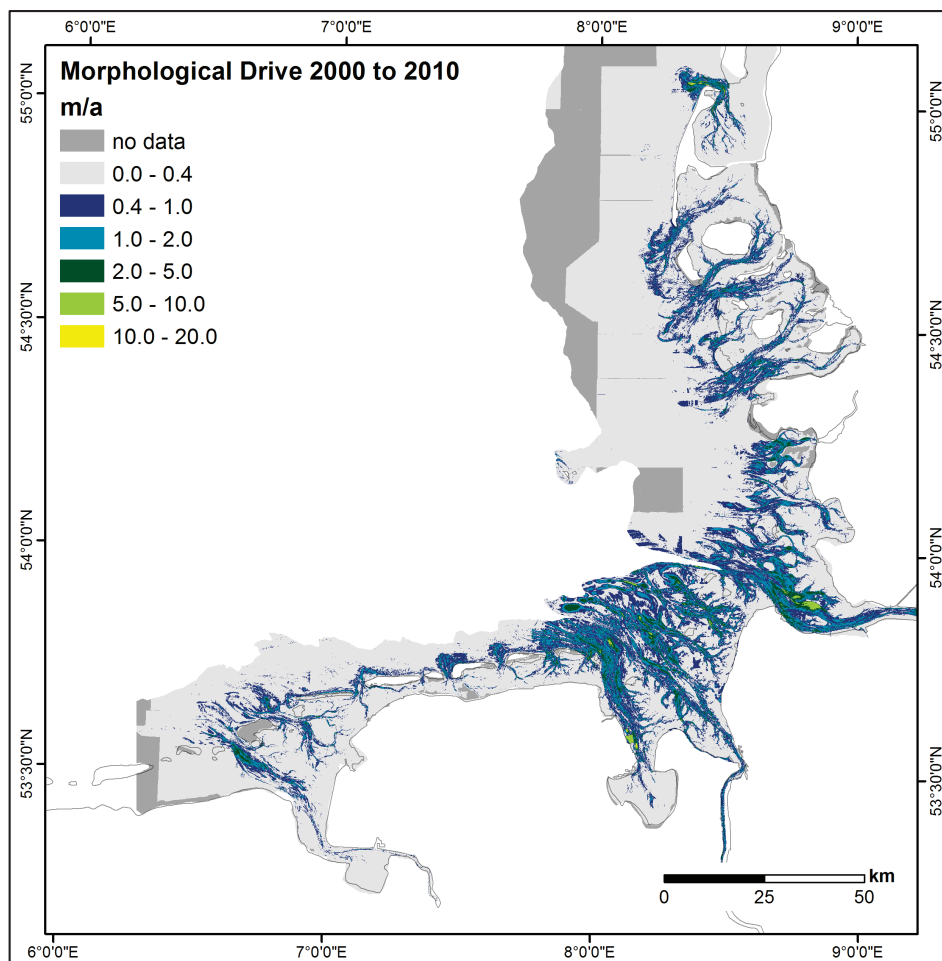


Abbildung 9: Beispiel für den morphologischen Drive auf der Basis von jährlichen bathymetrischen Vermessungen.

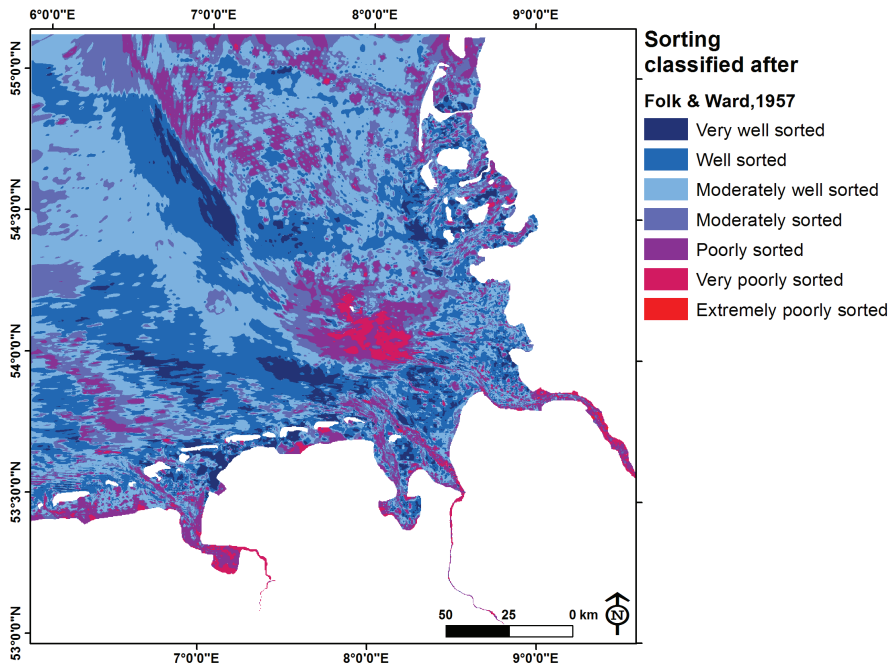


Abbildung 10: Sortierung der Oberflächensedimente in der Deutschen Bucht (Nordsee).

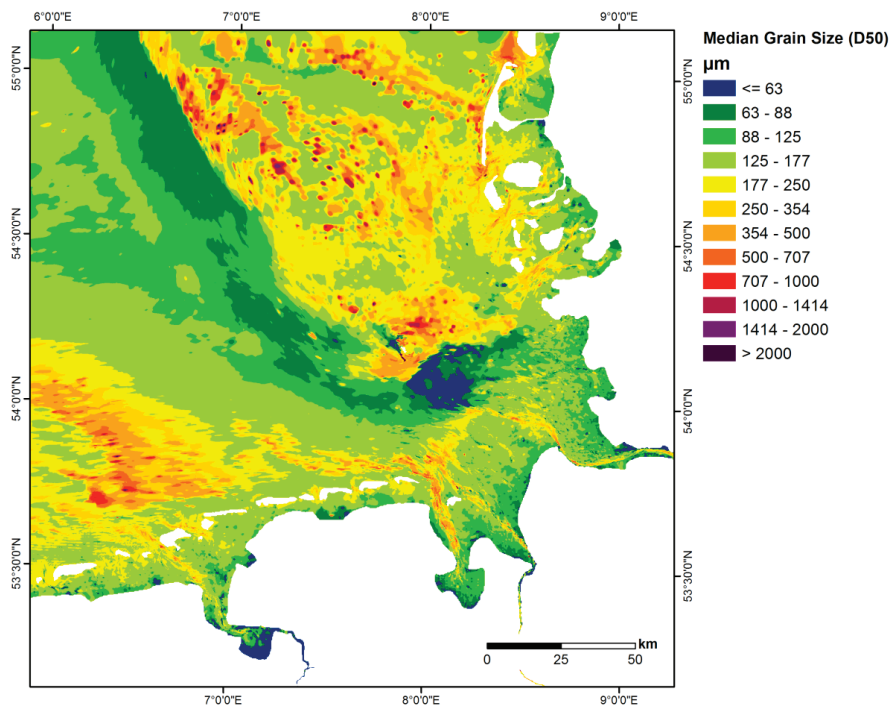


Abbildung 11: Mittlere Korngröße (D50) der Oberflächensedimente in der Deutschen Bucht.

5 Suite der numerischen Modellierungswerkzeuge

In den letzten Jahrzehnten haben sich numerische Simulationsmodelle als Ingenieurwerkzeuge für die Prognose und Einschätzung großräumiger Sedimenttransporte in der Deutschen Bucht etabliert. Der Schwerpunkt liegt dabei auf Auswirkungen:

- des Klimawandels,
- auf erneuerbare Offshore-Energiesysteme und ihre Festlandanbindung und
- auf die Sicherheit und Leichtigkeit der Schifffahrt.

Dabei muss beachtet werden, dass morphodynamische Simulationsmodelle nach wie vor mit großen Unsicherheiten behaftet sind und sich sowohl die Modell- als auch die Naturmessverfahren in fortlaufender Entwicklung befinden.

Im Rahmen der Anwendung deterministischer numerischer Modelle in AufMod wurde ein konsequenter Multi-Modell-Ansatz verfolgt, der eine umfassende Suite an numerischen Werkzeugen bereitstellt (Tab. 3). Die Modelle wendeten unterschiedliche Prozessauflösungen an, um die Streubreite der Ergebnisse abschätzen zu können. Alle Modelle deckten die gesamte Nordsee ab, mit einem feiner werdenden Gitter in der Deutschen Bucht. Es wurde der von Tidenströmungen, windgetriebenen Zirkulationen und Seegang verursachte Sedimenttransport berücksichtigt.

Tabelle 3: In AufMod verwendete Modellsysteme.

Klassifizierung	Hydrodynamik	Seegang	Morphodynamik
Short-term 1 Tag - 12 Monate	MARINA UnTRIM	MARINA UnK	MARINA SediMorph
Medium-term 1 - 10 Jahre	DELFT3D-FLOW	SWAN	DELFT3D-MOR
Medium-term 1 - 10 Jahre Long-term 10 - 100 Jahre	TELEMAC	TOMAWAC	SISYPHE

5.1 Modellgebiet (Gitter)

Zur Suite der numerischen Modellsysteme gehörten die auf ein Modellgitter ausgerichteten Hydrodynamik- und Sedimenttransportmodelle UnTRIM2007 (CASULLI und ZANOLLI 2002), TELEMAC (HERVOUET 2000) und MARINA (MILBRADT 2011, smile consult) (Abb. 12 links) sowie DELFT3D mit einem Konzept für zwei Modellgitter (LESSER et al. 2004; Abb. 12, rechts). Um eine Vergleichbarkeit der Modellergebnisse sicher zu stellen, wurden gleiche Randbedingungen für Wasserstand, Oberwasserzufluss und Wind zur Modellsteuerung gewählt.

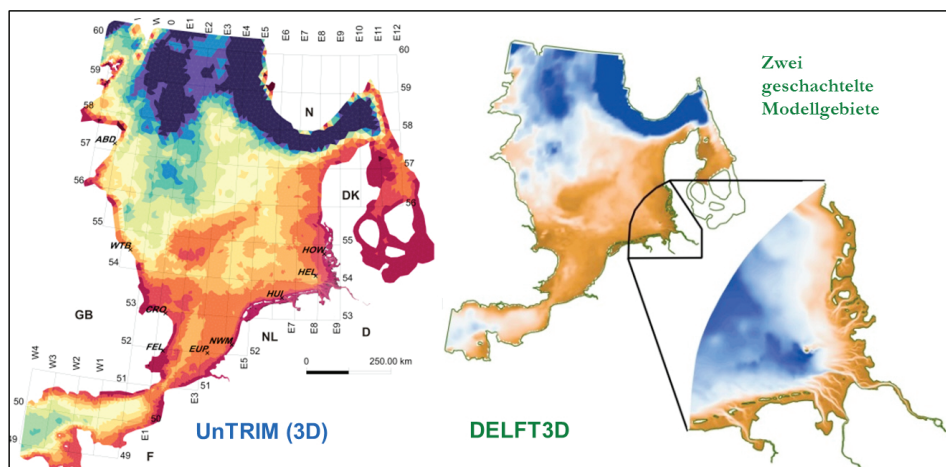


Abbildung 12: Modellgebiet der Nordsee: UnTRIM, TELEMAC und MARINA (links) und ein zusätzlich eingebettetes Modell der Deutschen Bucht in der Nordsee für DELFT3D (rechts).

5.2 Randbedingungen

Der Betrieb der verschiedenen Modellsysteme erfolgte unter gleichen Randbedingungen. Einen Überblick hierzu liefert Abb. 13.

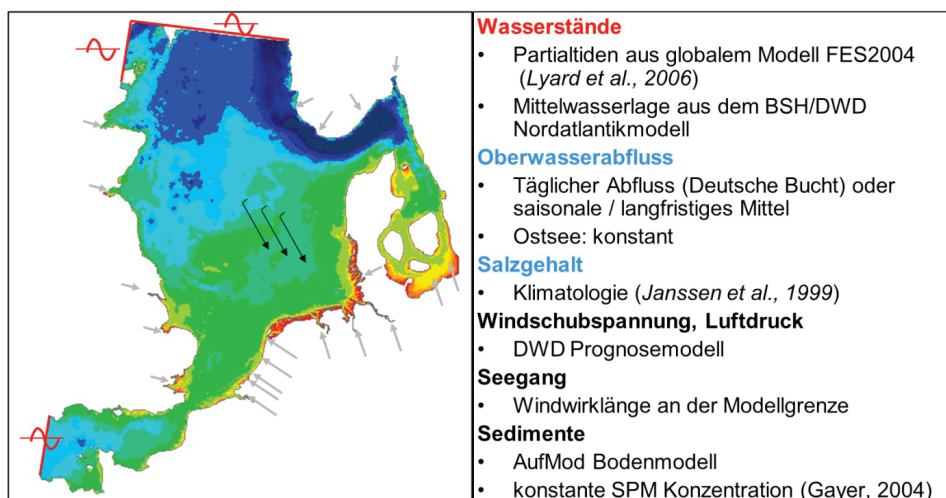


Abbildung 13: Randbedingungen aller Modellläufe in AufMod.

5.3 Modellkalibrierung und -validierung

Die Kalibrierung und anschließende Validierung der morphodynamischen Simulationsmodelle wurde in mehreren Schritten durchgeführt.

Vor der eigentlichen Modellkalibrierung und Validierung wurde zunächst eine Analyse der Unsicherheiten der gemessenen Basisdaten durchgeführt. Dieselbe Vorgehensweise galt auch für die Messdaten, die zu Validierungszwecken verwendet wurden. Die Ungenauigkeit der Daten während des gesamten Datenflusses (Messungen und Modellierung) gab das Spektrum und den Bereich der Modellparametrisierung für die Kalibrierung vor. Analog müssen die Modellergebnisse im Unsicherheitsbereich der Zielparameter bei der Kalibrierung und Validierung fallen.

Die Plausibilität der Komponenten des morphodynamischen Modells wurde mit Hilfe regulärer Messungen der Gewässersohle in Verbindung mit angemessenen räumlichen und zeitlichen Interpolationsmethoden geprüft. Neben der volumetrischen Entwicklung der Gewässersohle sind auch Sohlformen und veränderte Sedimentzusammensetzungen relevant.

Ein Beispiel für die Validierung hydrodynamischer Modellkomponenten ist der dokumentierte Vergleich von Messungen mit Simulationsergebnissen für Wellen und Wasserstände (M2-Komponenten). Angesichts der großen Zahl an verschiedenen verfügbaren Modellergebnissen wurden exemplarisch nur die Vergleiche von Seegang und Wasserstand (harmonische Analyse: M2-Tide) auf Abb. 14 dokumentiert.

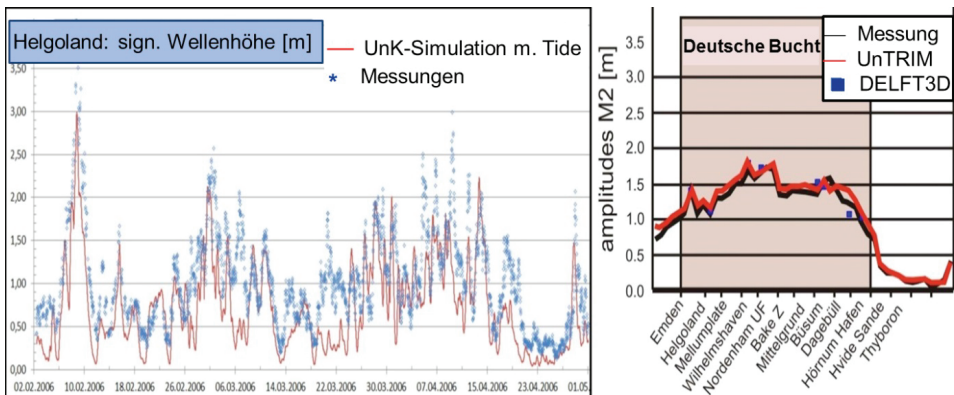


Abbildung 14: Vergleichsmessungen/Berechnung (links: Seegang, rechts: Wasserstand).

Durch einen bloßen Vergleich der an verschiedenen Orten gesammelten Messdaten ist keine angemessene Validierung des Sedimenttransports möglich. Die Messmethoden und die mit der Interpretation der Daten verbundenen Unsicherheiten sowie die nur spärlich vorhandenen räumlichen und zeitlichen Daten lassen keinen direkten Vergleich mit den Modellergebnissen selbst zu.

Für die Plausibilisierung der morphodynamischen Modellkomponenten wurden drei wichtige Parameter herangezogen:

1. morphologischer Raum,
2. volumetrische Veränderungen der Bathymetrie und
3. Histogramme der Sedimentmengen/Transportmassen

5.4 Sensitivitätsstudien

Zur Untersuchung des Einflusses von Sedimenttransport und Morphodynamik wurden verschiedene Sensitivitätsstudien durchgeführt, die sich auf folgende Parameter bezogen:

- Einfluss von Wind/Seegang (KÖSTERS und WINTER 2014),
- Porosität (PLÜB und KÖSTERS 2014),
- Sedimentzusammensetzung (VALERIUS, KÖSTERS und ZEILER 2015),
- langfristige Simulationen (PUTZAR und MALCHEREK 2012; PUTZAR und MALCHEREK 2015; MILBRADT 2011) und
- mittlerer Meeresspiegelanstieg (PLÜB und KÖSTERS 2014).

6 Sedimenttransport in der Deutschen Bucht

Die transportierten Sedimentmengen werden aus verschiedenen Quellen eingespeist. Unterhalb der Oberwasserzuflüsse von den Ästuaren in die Deutsche Bucht findet ein beträchtlicher Austausch mit den an die Nordsee angrenzenden Gebieten statt. Bereits in der Vergangenheit war der weiträumige Sedimenttransport innerhalb der Nordsee und der Deutschen Bucht Gegenstand zahlreicher Untersuchungen. Abb. 15 stellt die grundlegenden Ergebnisse zusammen.

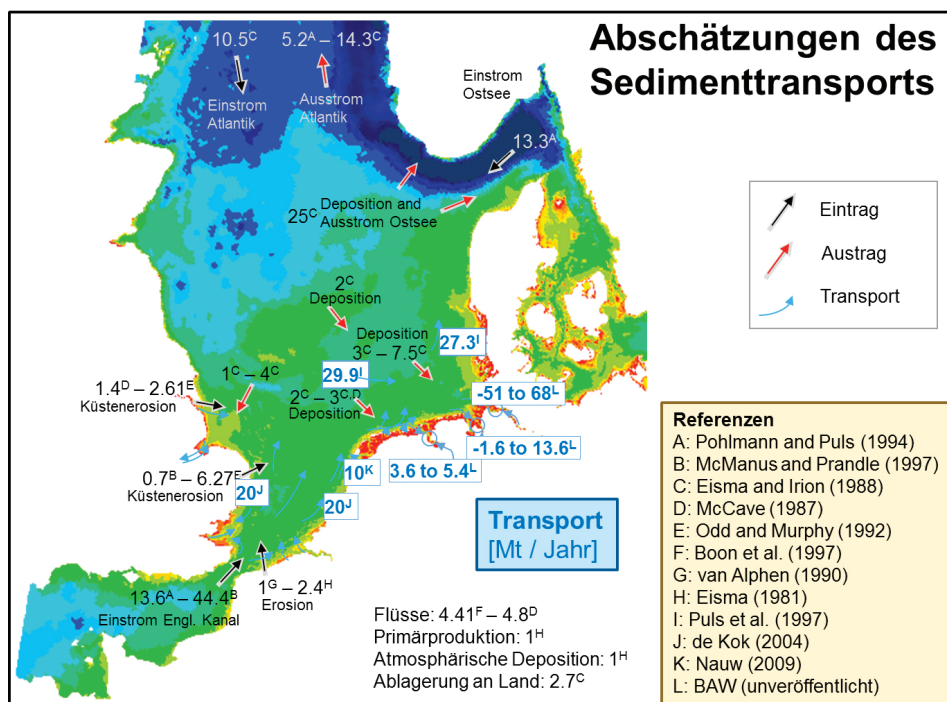


Abbildung 15: Schätzung der Sedimenttransportbilanzen in der Literatur.

6.1 Sedimenttransportpfade

Die Bestimmung von Sedimenttransportpfaden in der Deutschen Bucht war eines der wesentlichen Ziele von AufMod. Zur Berechnung dienten die Vektoren des resultierenden Gesamttransports (Schwebstoff- und Geschiebetransport) im Jahr 2006 unter Einbeziehung der Seegangswirkung. In Abb. 16 werden die mit TELEMAC (A), MARINA (B) und UnTRIM (C) berechneten Sedimenttransportpfade in der südlichen Nordsee und auch der Mittelwert aus den unterschiedlichen Simulationsläufen (D) dokumentiert.

Hier wird der grundlegende Trend der Sedimentbewegung von West nach Ost seewärts der west- und ostfriesischen Küste deutlich. Im Bereich der inneren Deutschen Bucht (Jade, Weser, Elbästuar bis in die Nähe von Helgoland) herrschen uneinheitliche Transporte vor. Westlich der Nordfriesischen Küste schwenken die Vektoren weit seewwärts in nördliche Richtung um. Im Bereich zwischen Wash und Doggerbank bildet sich eine linksdrehende Zirkulation aus.

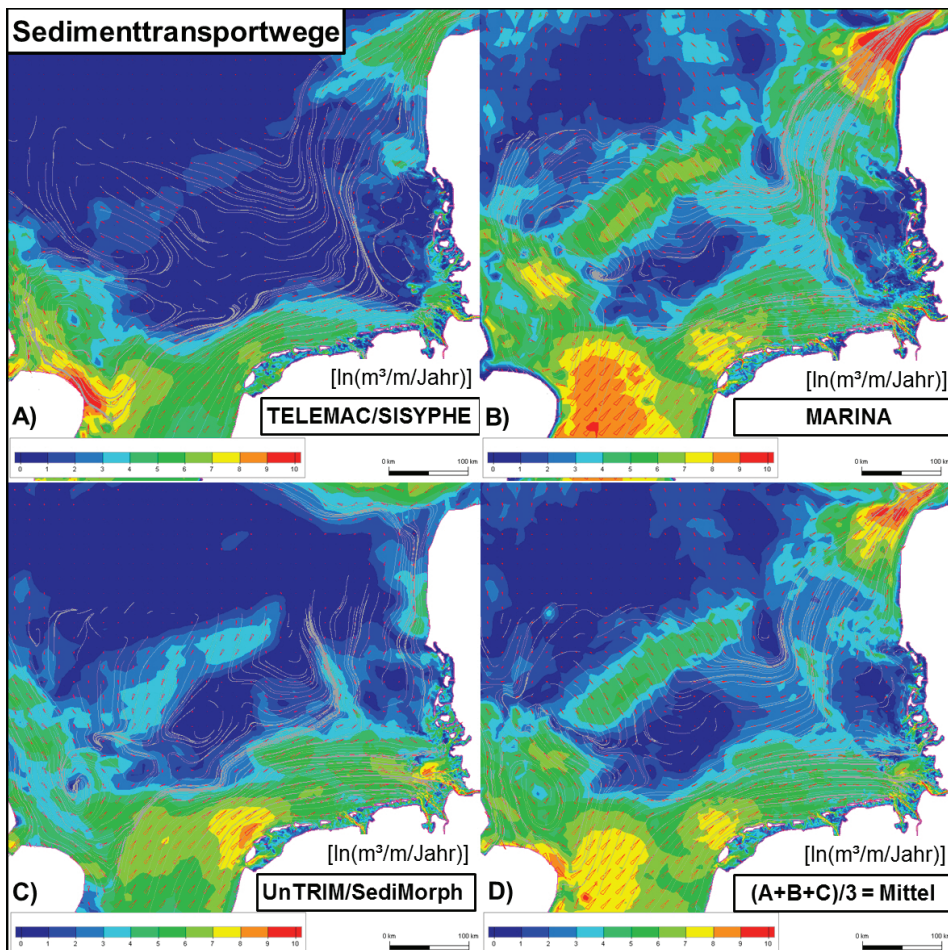


Abbildung 16: Sedimenttransportpfade aus verschiedenen Modellsystemen und Mittelwert.

Die Form und Position der Sedimenttransportpfade hat sich im Verlauf der Jahre in den Simulationen als relativ stabil erwiesen. Besonders auffällig ist in allen Modellergebnissen das Defizit der Sedimente im Gebiet der Nordfriesischen Inseln (nördlicher Teil der Deutschen Bucht).

Die Variation der Transportpfade ist in den Ausläufern der deutschen Ästuar aufgrund der komplexen bathymetrischen Gegebenheiten und der Oberwasserzuflüsse mit ihrer großen Auswirkung auf den Sedimenttransport erheblich höher. Abb. 17 zeigt die mittleren Sedimenttransportpfade für die Mündung des Elbeästuars im Jahr 2000 (obere Abbildung) und im Jahr 2010 (untere Abbildung).

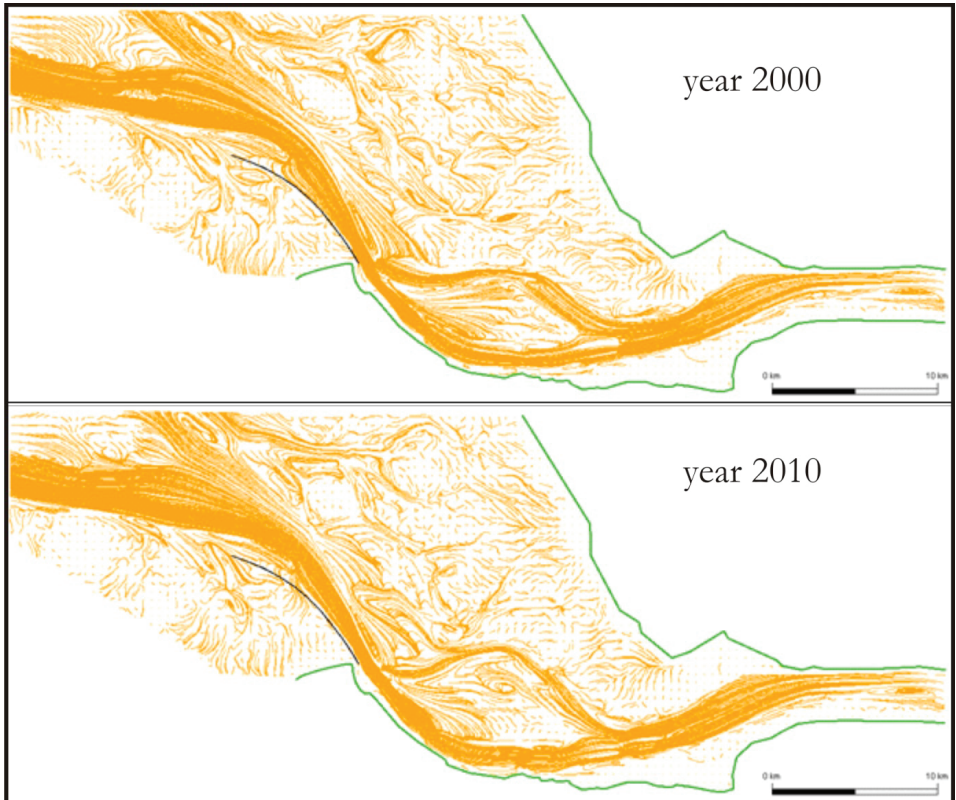


Abbildung 17: Charakteristische Sedimenttransportpfade in der Mündung des Elbeästuars in den Jahren 2000 und 2010.

6.2 Sedimentbilanz

Zur Abschätzung der Nettotransporte in die Deutsche Bucht hinein bzw. aus der Deutschen Bucht heraus, wurden die Sedimenttransporte entlang definierter Analyseprofile bilanziert, welche die Sedimentmenge über einen Zeitraum von einem Jahr berücksichtigten.

Abb. 18 zeigt die Ergebnisse für drei verschiedene Modelluntersuchungen: Un-TRIM (rot: 1996-2007), TELEMAC (grün: 1998 und 2006) und MARINA (hellblau: 2006). Ein

Vergleich mit der Dauer [d] hoher Windgeschwindigkeiten ($> 18 \text{ m/s}$) bei Helgoland ergibt einen bemerkenswert deutlichen Zusammenhang zwischen Transport und Wind.

Die aus der Deutschen Bucht ausgetragenen Mengen sind um etwa eine Größenordnung geringer als die Eintragsmengen. Für den Austausch mit den Ästuaren liegen aufgrund der relativ groben räumlichen Auflösung der numerischen Modellgitter keine Ergebnisse vor. Die Austauschmengen können daher in der Bilanzierung nur unzureichend berücksichtigt werden.

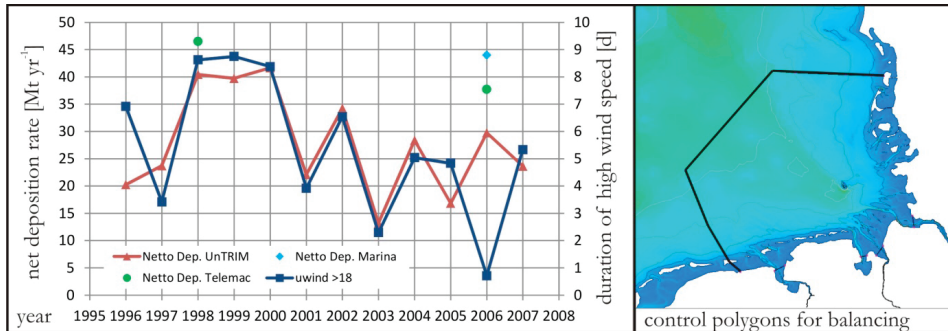


Abbildung 18: Über den Rand der Deutschen Bucht integrierte Netto-Deposition aus UnTRIM (rot), TELEMAC (grün) und MARINA (hellblau) und Dauer hoher Windgeschwindigkeiten ($> 18 \text{ m/s}$) bei Helgoland. In der rechten Abbildung sind die Kontrollabschnitte für die Bilanzierung markiert.

Der höchste Wert der Netto-Deposition der untersuchten jährlichen Simulationen beträgt 42 Mt/a . Dieser Wert wird in anderen Jahren nur zu etwa $1/2$ bzw. $1/3$ erreicht. Der Vergleich der Berechnungsergebnisse der unterschiedlichen Modelle weist für das Jahr 1998 eine relativ gute Übereinstimmung ($40,5\text{-}46,5 \text{ Mt/a}$) auf, während für das Jahr 2006 deutlichere Unterschiede sichtbar werden ($30\text{-}44 \text{ Mt/a}$).

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 in Bezug auf die Magnitude und Richtung der residuellen Strömungsgeschwindigkeiten/Transporte in der Deutschen Bucht hin.

Von besonderem Interesse ist die tiefenabhängige Verteilung der Netto-Transportmassen. Detailanalysen ergaben, dass der überwiegende Anteil im Tiefenbereich zwischen 10 m und 20 m liegt. Der Transport im Rückseitenwatt der ostfriesischen Inseln ist deutlich geringer.

7 Schlussfolgerungen

Bewertungen der morphologischen Gegebenheiten in der Deutschen Bucht sind aus vielerlei Gründen mit großen Unsicherheiten behaftet. Die Messverfahren und Felddaten selbst können keinen hinreichenden Grad an Genauigkeit sicherstellen. Modelle basieren naturgemäß immer auf Vereinfachungen, und besonders Simulationsmodelle sind auch aufgrund der numerischen Approximation der Physik und der Grenzen der Computersysteme (Bauweise, Entwicklung) Beschränkungen unterworfen.

Nur mit einem interdisziplinären Ansatz wird es möglich sein, die Zuverlässigkeit von Reproduktion, Analyse und Prognose von Sedimenttransport und Morphodynamik in der Deutschen Bucht zu erhöhen. Dieses integrierte Konzept garantiert einen umfangreichen und konsistenten Datenbestand für zukünftige Analysen und numerische Modellierungen von morphodynamischen Prozessen in der Deutschen Bucht.

Unsicherheiten werden mit Hilfe eines Multimodellansatzes und prozessbasierter Simulationsmodelle reduziert. Auch verschiedene Verbesserungen der räumlichen und zeitlichen Modelle sowie diverse physikalische Approximationen in unterschiedlichen Modellsystemen werden zu einer höheren Genauigkeit der Gesamtergebnisse beitragen.

Der prozessbasierte Modellansatz ermöglicht die Simulation und Analyse großräumiger Zirkulations- und Sedimenttransportprozesse in der gesamten Deutschen Bucht. Dies ist besonders für die Bestimmung der seeseitigen Randbedingungen für die Ästuarmodellierung von Bedeutung. Analysen der Modellergebnisse zeigen eine hohe lokale Variabilität des generell zyklonalen Sedimenttransports an der Küste der Deutschen Bucht - sowohl in der Magnitude als auch in der Richtung.

Eine verlässliche Validierung der transportierten Sedimentmengen ist auf Basis der verfügbaren Messungen derzeit nicht möglich. Ein quantitativer Vergleich mit geologischen Analysen bestätigt die generelle Rolle der Deutschen Bucht als Netto-Depositionsbereich. Die verwendeten Modelle prognostizieren eine Netto-Deposition zwischen 13 und 46 Mt/a. Bis heute gibt diese Bilanz jedoch keinen genauen Aufschluss über die Wechselwirkung zwischen den Transportprozessen an der Küste und in den Ästuaren.

Die Netto-Depositionsrates ist eng mit dem variablen aktuellen meteorologischen Antrieb verknüpft. Künftige Untersuchungen sollten Baggermaßnahmen und Verklappungen in den äußeren Ästuaren berücksichtigen, die einen wesentlichen Einfluss auf die Netto-Depositionsrates haben.

Die im Rahmen von AufMod durchgeführten morphodynamischen Untersuchungen weisen ebenfalls eine hohe Schwankungsbreite zwischen den verschiedenen Simulationsergebnissen auf. Die Bewertung des AufMod-Projekts ist jedoch durch Messungenauigkeiten der räumlichen und zeitlichen Daten eingeschränkt. Die Weiterentwicklung der morphodynamischen Simulationen, insbesondere die Auswirkung der Interaktionen von Küste und Ästuaren, stellt daher eine Herausforderung dar, die in zukünftigen Forschungsvorhaben weiter vorangetrieben werden muss.

Ein zusammenfassender Endbericht, der alle Ergebnisse der verschiedenen Institute beinhaltet, ist ebenfalls verfügbar (HEYER und SCHROTTKE 2013).

8 Schriftenverzeichnis

- BOON, J.; VAN DER KAAIJ, T.; VOS, R. J. and GERRITSEN, H.: Modelling of suspended particulate matter (SPM) in the North Sea. Model set-up and first sensitivity analysis. Delft Hydraulics Research Report, Z2025, 1997.
- CASULLI, V. and ZANOLLI, P.: Semi-Implicit Numerical Modelling of Non-Hydrostatic Free-surface Flows for Environmental Problems. *Mathematical and Computer Modelling*, 36, 1131–1149, 2002.
- DE KOK, J. M.: Slibtransport langs de Nederlandse kust. Bronnen, fluxen en concentraties. RIKZ/OS/2004.148w, 2004.

- EISMA, D.: Supply and deposition of suspended matter in the North Sea. In: Nio, S.D., Schüttenhelm, R.T.E., Van Weering, T.C.E. (Eds.), *Holocene Marine Sedimentation in North Sea Basin*. Spec. Publ. Int. Assoc. Sedimentol. 5, 415-428, 1981.
- EISMA, D. and IRION, G.: Suspended matter and sediment transport. In *Pollution of the North Sea -An Assessment*, eds. W. Salomons, B.L. Bayne, E.K. Dursma and U. Förstner, Springer, 20-35, 1988.
- FÜCHTBAUER, H. und REINECK, H. R.: Porosität und Verdichtung rezenter, mariner Sedimente. *Sedimentology*, 2, 294-306, 1963.
- HERVOUET, J. M. and BATES, P.: The TELEMAC Modelling System. Special Issue of *Hydrological Processes* 14, 2000.
- 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.
<http://edok01.tib.uni-hannover.de/edoks/e01fb14/780783271.pdf>,
- KÖSTERS, F. and WINTER, C.: Exploring German Bight coastal morphodynamics based on modelled bed shear stress. *Geo-Marine Letters*, 34, 21-36, doi: 10.1007/s00367-013-0346-y, 2014.
- KRUGER, C. J. C.: Constrained Cubic Spline Interpolation for Chemical Engineering Applications, 2004. <http://www.korf.co.uk/spline.pdf>
- LESSER, G. R.; ROELVINK, J. A.; VAN KESTER, J. A. T. M. and STELLING, G. S.: Development and validation of a three-dimensional morphological model. *Coastal Engineering*, 51, 883-915, 2004.
- MCCAVE, I. N.: Fine sediment sources and sinks around the East Anglian Coast (UK). *Journal of the Geol. Soc. London*, 144, 149-152, 1987.
- MILBRADT, P.: Sedimenttransport und Morphodynamik in der Deutschen Bucht. *Die Küste*, 78, 33-58, ISSN 0452-7739, 2011.
- MILBRADT, P.; KÖSTERS, F.; PUTZAR, B. und PLÜB, A.: Analyse morphodynamischer Veränderungen auf der Basis zeitvarianter digitaler Bathymetrien. *Die Küste*, 83, 2015.
- 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. *Continental Shelf Research*, 17 (7), 761-778, 1997.
- ODD, N. V. and MURPHY, D.: Particulate pollutants in the North Sea. Calibration of a 20 km gridded 3D model simulating a representative annual cycle of mud transport. H. R. Wallingford, Report SR 292, 15 pp., 1992.
- PLÜB, A.: Das Nordseemodell der Bundesanstalt für Wasserbau, Dienststelle Hamburg *Die Küste*, 67, 83-128, ISBN 3-8042-1058-9, 2003.
- PLÜB, A. and KÖSTERS, F.: Morphodynamic modelling for the entire German Bight: an initial study on model sensitivity and uncertainty. *Advances in Geoscience*, 39, 61-68, doi: 10.5194/adgeo-39-61-2014, 2014.
<http://edok01.tib.uni-hannover.de/edoks/e01fb14/780783271.pdf>
- POHLMANN, T. and PULS, W.: Currents and transport in water. In: SÜNDERMANN, J. (ed.) *Circulation and contaminant fluxes in the North Sea*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 345-402, 1994.

- PULS, W.; HEINRICH, H. and MAYER, B.: Suspended Particulate Matter Budget for the German Bight, *Marine Pollution Bulletin*, 34, 6, 398-409, PII: s0025-326X(96)00161-0, 1997.
- PUTZAR, B. and MALCHEREK, A.: Development of a Long Term Morphodynamic Model of the German Bight. In: BOURBAN, S.; DURAND, N. und HERVOUET, J.-M. (Hrsg.): XIXth TELEMAC-MASCARET Users Conference, 2012.
- PUTZAR, B. und MALCHEREK, A.: Entwicklung und Anwendung eines Langfrist-Morphodynamikmodells für die Deutsche Bucht. *Die Küste*, 83, 2015.
- RICKLEFS, K. and ASP, N.: Geology and Morphodynamics of a Tidal Flat Area along the German North Sea Coast. *Die Küste*, 69, 93-127, 2005.
- SCHROTTKE, K. and ABEGG, F.: Near-Bed Suspended Sediment Dynamics in a Tidal Channel of the German Wadden Sea. *Die Küste*, 69, 353-368, 2005.
- VALERIUS, J.; KÖSTERS, F. und ZEILER, M.: Erfassung von Sandverteilungsmuster zur großräumigen Analyse der Sedimentdynamik auf dem Schelf der Deutschen Bucht. *Die Küste*, 83, 2015.
- VAN ALPHEN, J. S. L. J.: A mud balance for Belgian-Dutch coastal waters between 1969 and 1986. *Netherlands Journal of Sea Research*, 25 (1/2), 19-30, 1990.
- ZEILER, M.; SCHULZ-OHLBERG, J. and FIGGE, K.: Mobile sand deposits and shoreface sediment dynamics in the inner German Bight (North Sea). *Marine Geology*, 170, 363-380, 2000.
- ZEILER, M.; SCHWARZER, K. and RICKLEFS, K.: Seabed Morphology and Sediment Dynamics. *Die Küste*, 74, 31-44, 2008.
- WINTER, C.: Macro scale morphodynamics of the German North Sea Coast. *Journal of Coastal Research*, 64, 706-710, 2011.