

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 See-gangs- 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.

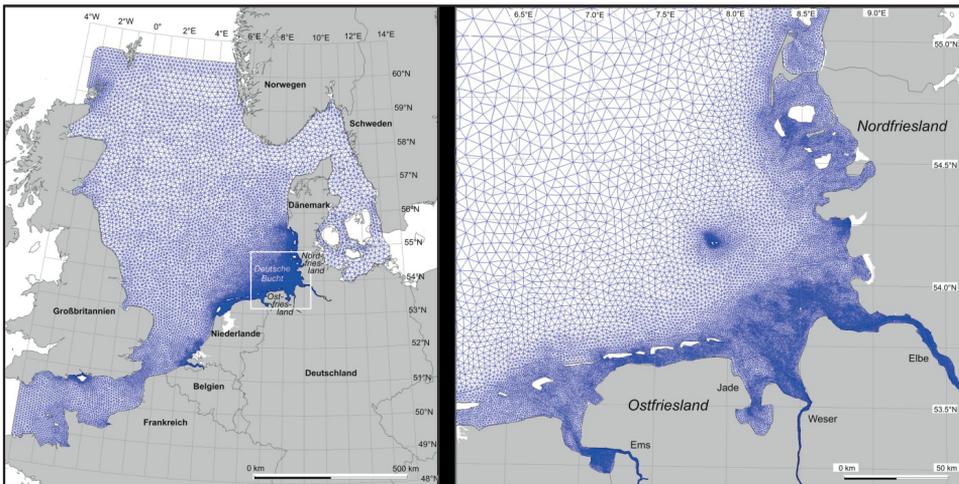


Abbildung 1: Gesamtes Untersuchungsgebiet (links) und Fokusgebiet der Deutschen Bucht (rechts) mit verwendetem unstrukturiertem Gitternetz.

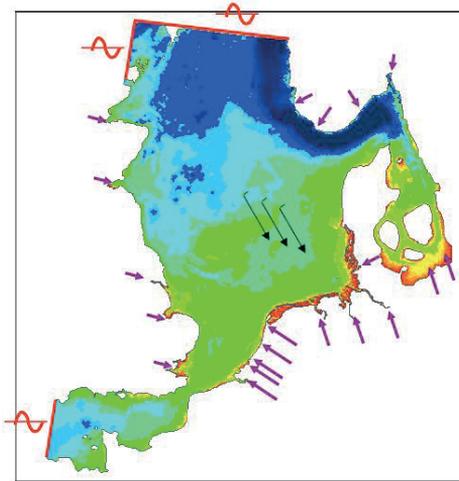
3.2 Randbedingungen und Anfangswerte

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

Bathymetrie

- konstante SPM Konzentration (Gayer, 2004)
- 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.

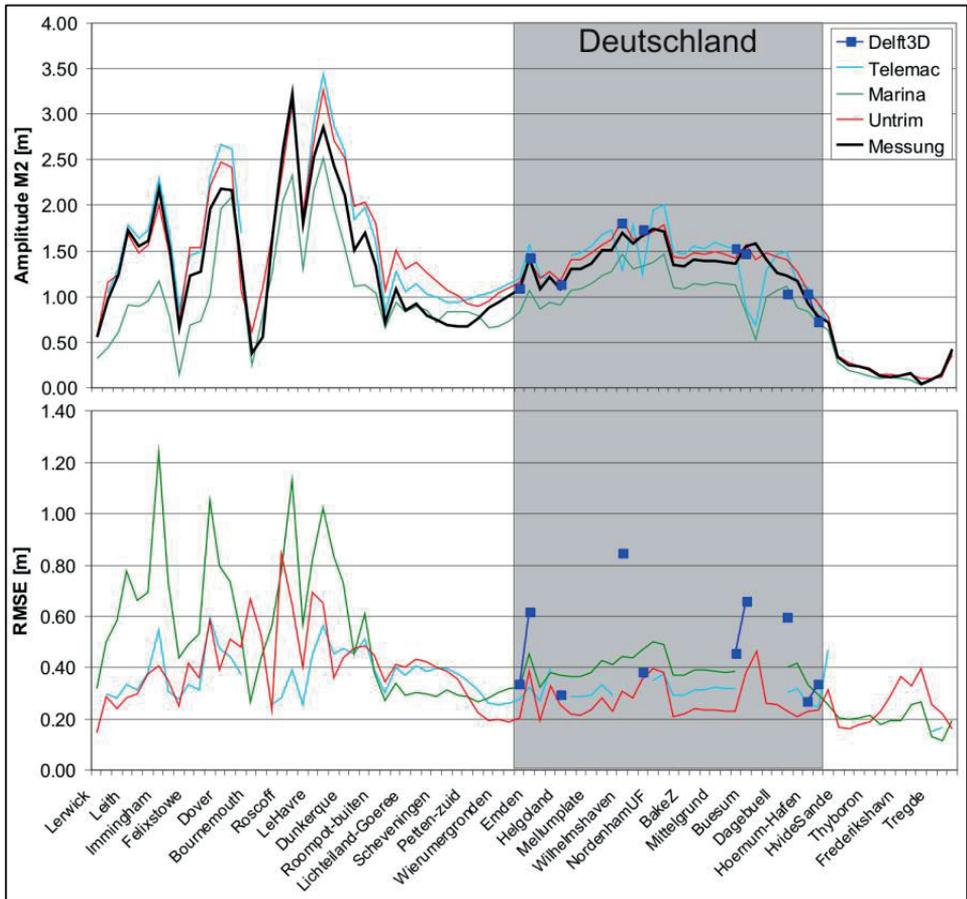


Abbildung 4: Vergleich der M2-Partialtide entlang der Nordseeküste aus den Simulationen und Analysen der Pegelmessungen.

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.

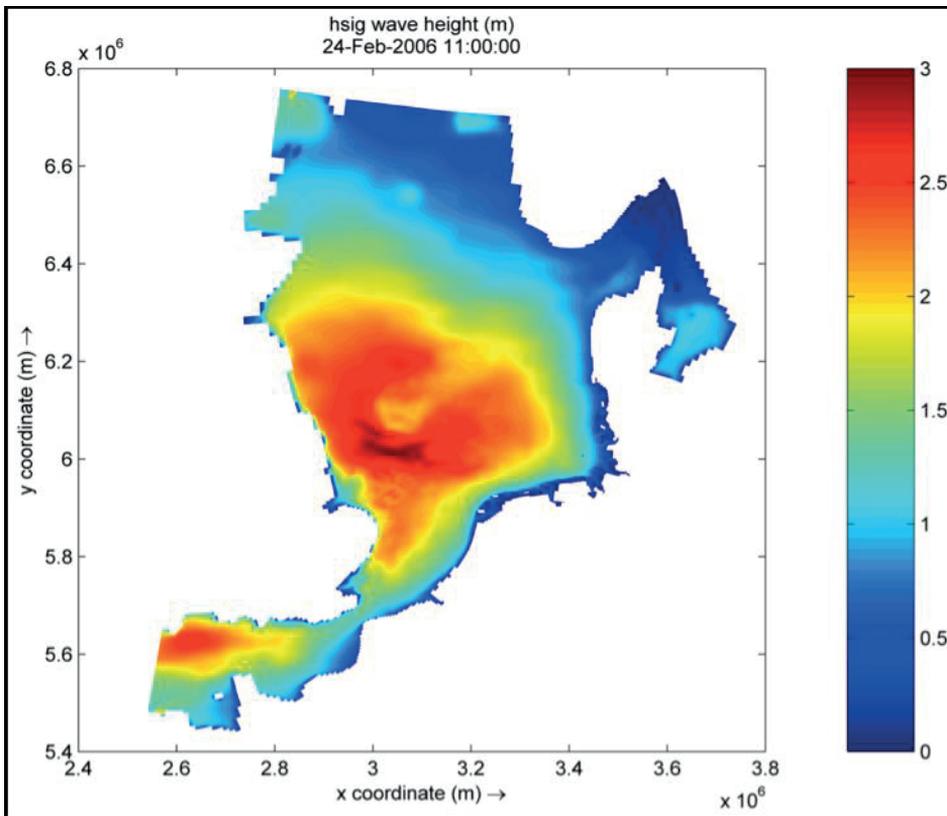


Abbildung 5: Mit SWAN berechnete Verteilung der signifikanten Wellenhöhe in der gesamten Nordsee am 24.02.2006 – 11:00 Uhr.

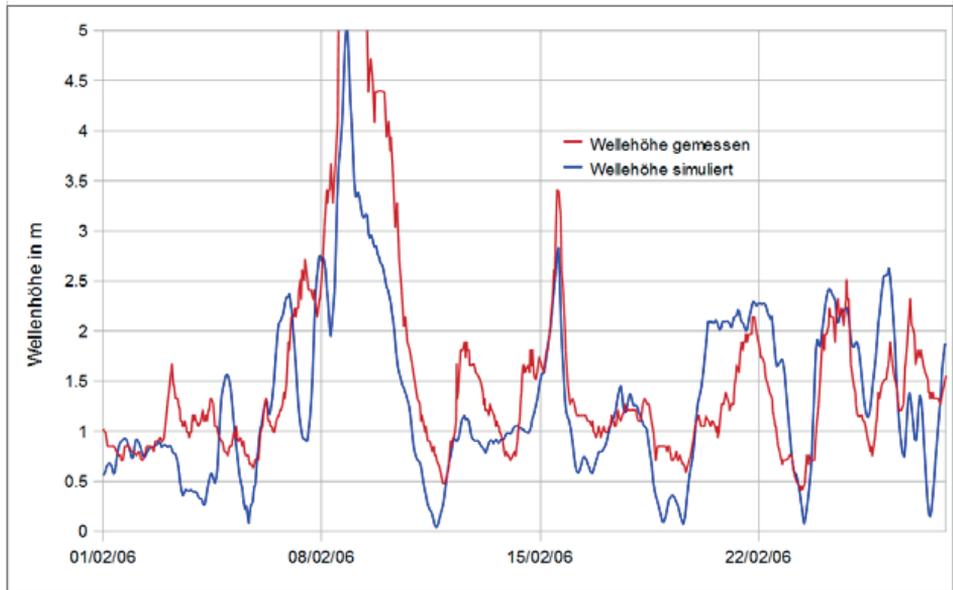


Abbildung 6: Vergleich berechneter (MARINA) zu gemessener Wellenhöhen an der Boje NSB.

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.

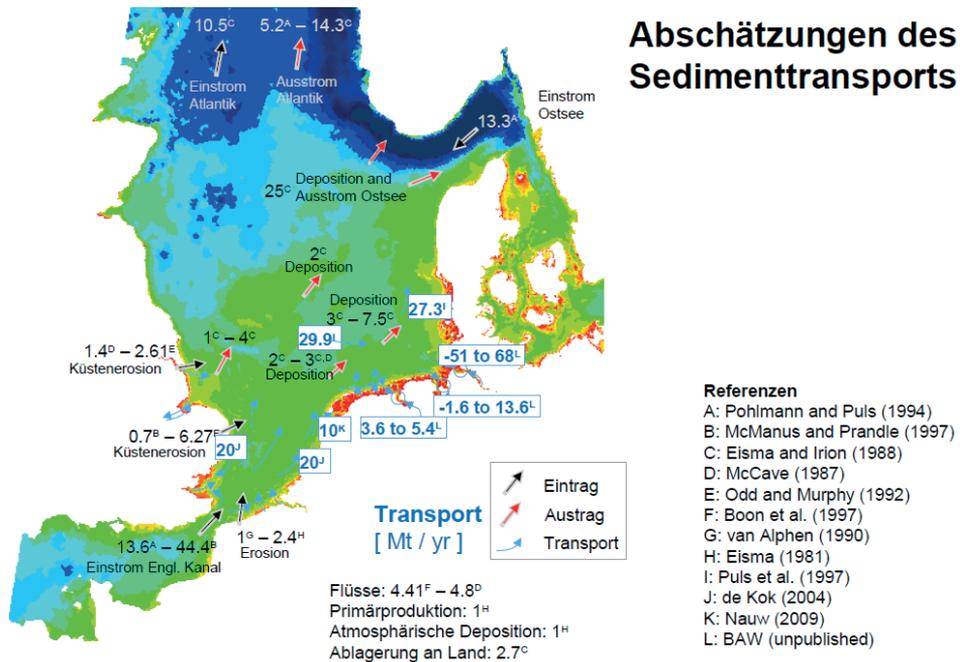


Abbildung 7: Abschätzung der jährlichen Sedimenttransportmengen auf der Basis unterschiedlicher Literaturquellen.

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).

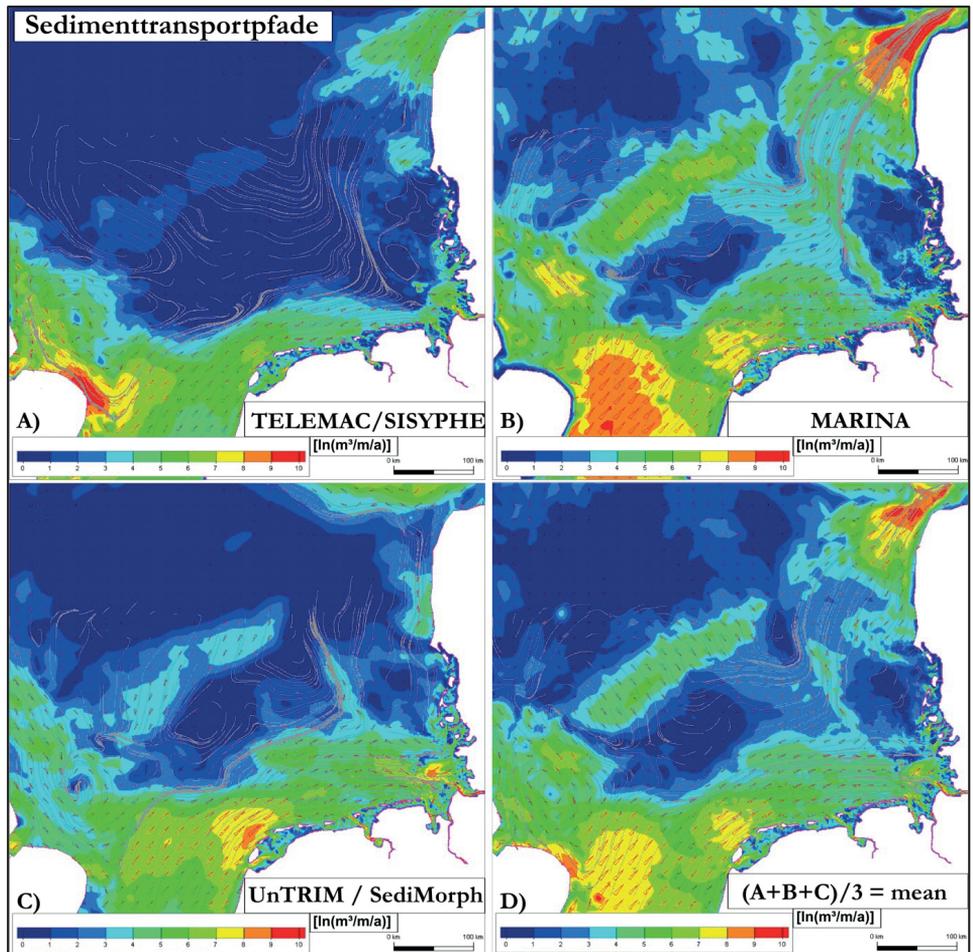


Abbildung 8: Sedimenttransportpfade und -intensitäten des Sedimenttransports in der erweiterten Deutschen Bucht auf Basis der Modellsysteme A) TELEMAC-SISYPHE, B) MARINA, C) UnTRIM-SediMorph und D) der Mittelwert aus allen drei Simulationen.

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.

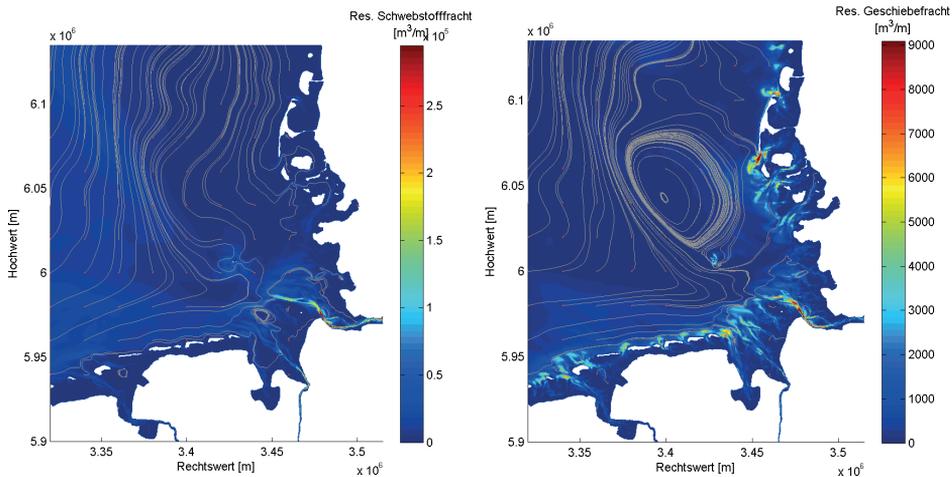


Abbildung 9: Resultierende Schwebstofffracht (links) und resultierende Geschiebefracht (rechts) [m^3/m] bzw. Pfade für das Szenario 2006.

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.

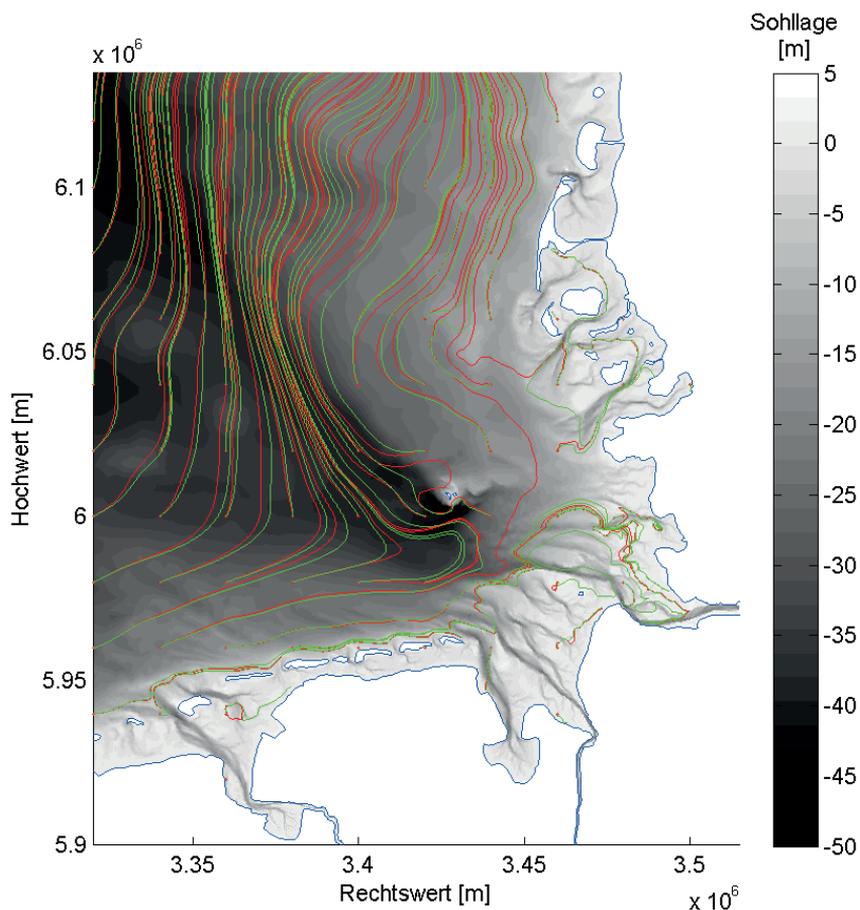


Abbildung 10: Unterschiedliche Transportpfade der Jahre 1998 (grün) und 2006 (rot).

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.

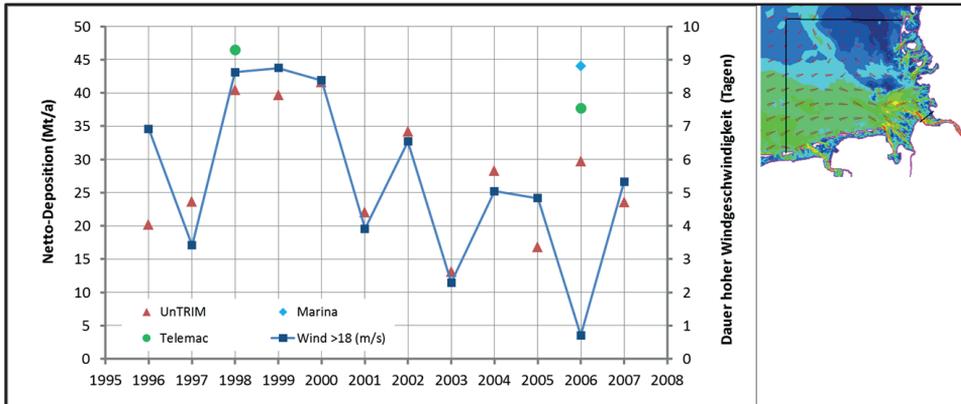


Abbildung 11: Netto-Deposition [Mt/a] in der Deutschen Bucht auf Basis der Berechnungen (rot: UnTRIM, grün: TELEMAC, hellblau: MARINA) und Dauer hoher Windgeschwindigkeit (>18 m/s) in Helgoland (blau). Die Lage der Schnittprofile ist rechts dargestellt.

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.