

Aufbau eines morphodynamischen Simulationsmodells für die Deutsche Bucht zur Abschätzung von Sedimenttransportwegen und -mengen

Frank Kösters, Bert Putzar, Peter Milbradt und Andreas Plüß

1 Einleitung

Die Entwicklung der Deutschen Bucht über die letzten Dekaden zeigt großräumig ein komplexes Verhalten aus migrierenden Tiderinnen, dynamischen Wattflächen und Vorstränden (WINTER 2011). Um unser Verständnis der beobachteten Morphologie zu verbessern und damit auch die Fähigkeit zur Vorhersage von Auswirkungen des Klimawandels oder anthropogener Eingriffe, ist es notwendig die relevanten Sedimenttransportprozesse und -pfade zu verstehen. Ein erster Schritt in diese Richtung wurde in dem KFKI-Projekt „Aufbau von integrierten Modellsystemen zur Analyse der langfristigen Morphodynamik in der Deutschen Bucht (AufMod)“ geleistet, in dem eine Datenbasis für Simulationsmodelle geschaffen und bestehende mathematische Verfahren getestet wurden (siehe AufMod Abschlussbericht, HEYER ET AL. 2013). Da es gegenwärtig keine geeignete Messtechnik zur Erfassung der großräumigen Sedimenttransporte für längere Zeitspannen gibt, müssen sich Prognosen zur Sedimentumlagerung deshalb auf numerische Modelle stützen. Auch diese sind in Ihrer Genauigkeit begrenzt. Der Einschätzung von LESSER ET AL. (2004), dass noch keine erfolgreichen morphodynamischen Simulationen mit dreidimensionalen Modellen verfügbar sind, ist auch heute noch für großskalige Modellanwendungen (Größenordnung von 100 km) zuzustimmen. Es wurden jedoch Fortschritte bei der Modellierung von langfristigen Szenarien für kleinere Gebiete (z.B. JUNGE ET AL. 2006; VAN DER WEGEN 2010) und der Abbildung integraler Größen wie dem morphologischen Raum (maximale Änderung der Sohlage in einem definierten Zeitraum) gemacht (KÖSTERS UND WINTER, IN PRESS). Die Parametersensitivität der in numerischen Modellen implementierten empirischen Sedimenttransportformulierungen erfordert eine umfassende Kalibrierung und Validierung der Modelle, die auf Basis der bestehenden Messdaten nur eingeschränkt zu leisten ist. Zur exakten Abbildung der langfristigen morphologischen Umformungen müsste ein numerisches Modell in der Lage sein, alle prägenden Teilprozesse in ihrer zeitlichen Entwicklung korrekt abzubilden. Die begrenzte Verfügbarkeit von flächendeckenden Messungen auf der einen Seite, so wie die Grenzen der numerischen Modelle (Rechnerkapazität, Modellansätze) schränken einen direkten Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Änderungen der Sohlage für großräumige Umformungen stark ein. Eine erfolgreiche Herangehensweise für die Lösung dieses Problems ist der Vergleich unterschiedlicher Modellsysteme zur Beurteilung der Spannbreite von Modellergebnissen (z.B. PLÜß UND HEYER 2007).

2 Mathematische Modellierungswerkzeuge

Im Rahmen des Projekts AufMod wurden die vier folgenden prozessbasierten numerischen Modelle eingesetzt, um die Variabilität der Berechnungsergebnisse unterschiedlicher physikalischer Approximationen und numerischer Umsetzungen abzuschätzen.

Hydrodynamik	Seegang	Morphodynamik
1. UnTRIM (3D)	UnK	SediMorph
2. DELFT3D-HYD (2D)	SWAN	DELFT3D-MOR
3. MARINA (2D)	MARINA	MARINA
4. TELEMAC (2D)	TOMAWAC	SISYPHE

Die Lage des Gewässerbodens (Bathymetrie) wird bei den verschiedenen Modellsystemen jeweils durch ein Gitternetz diskretisiert. Die Rechenmodelle UnTRIM, MARINA und TELEMAC verwenden die gleichen unstrukturierten Dreieckselemente (siehe Abb. 1) mit einer variablen Auflösung von ca. 80 m bis ca. 24 km. Diese erlaubt die gleichzeitige Abbildung der gesamten Nordsee mit grober Auflösung und einer höher aufgelösten Deutschen Bucht. Das Verfahren DELFT3D dagegen setzt strukturierte Gitternetze ein (hier nicht gezeigt), die zur Erreichung einer ähnlichen Auflösung ineinander geschachtelt wurden.

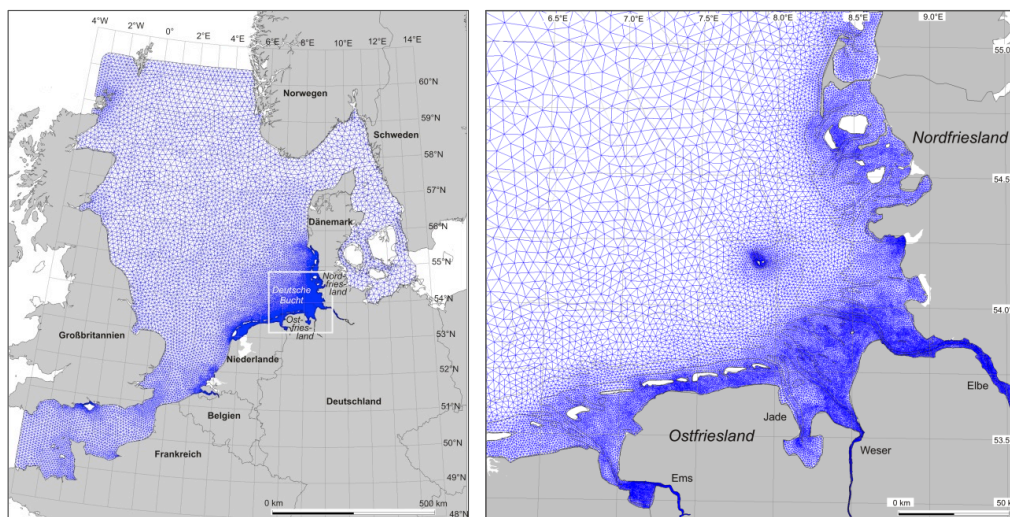


Abb. 1: Gesamtes Untersuchungsgebiet (links) und Fokusgebiet der Deutschen Bucht (rechts) mit verwendetem unstrukturiertem Gitternetz

Die unterschiedlichen Modelle verwenden weitgehend die gleichen Anfangs- und Randbedingungen, um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten. Eine detaillierte Beschreibung des Modellaufbaus ist in dem Abschlussbericht des Projekts AufMod dokumentiert (siehe HEYER ET AL. 2013).

Zur Abschätzung der mehrjährigen Variabilität wurde das Modell UnTRIM-SediMorph für den Untersuchungszeitraum (1996-2008) als Hindcast-Rechnung aufgebaut, berechnet und validiert (BAW 2013). Zur zeitlich darüber hinausgehenden Langfristprognose wurde ein bis zu 100 jähriger Zeitraum auf Basis des Modells TELEMAC-SISYPHE berechnet.

3 Sedimenttransport in der Deutschen Bucht

3.1 Transportpfade

Die räumliche Struktur des Geschiebe- und Suspensionstransports ist in Abb. 2 exemplarisch auf Basis der Ergebnisse des Modells UnTRIM-SediMorph dargestellt. Dazu wurde für das Jahr 2006 der Sedimenttransport von 10 Fraktionen (Feinschluff bis Kies) unter realistischem meteorologischen und hydrologischen Antrieb berechnet. Die räumliche Struktur des Geschiebetransportes (Mittelsand und gröber) entspricht im Wesentlichen dem Suspensionstransport (Feinsand und feiner). Im Mittel wird das Sediment als Küstenlängstransport vor den ostfriesischen Inseln in Richtung Osten transportiert. Im nordfriesischen Bereich zeigen sich fast keine durchgehenden Sedimenttransportbänder, signifikant ist hier nur der Transport in den Tiderinnen. Die Größe des Geschiebetransports ist fast flächendeckend um mehr als eine Magnitude geringer als der Suspensionstransport, mit zunehmender Distanz von der Küste nimmt dabei die relative Bedeutung des Geschiebetransports ab.

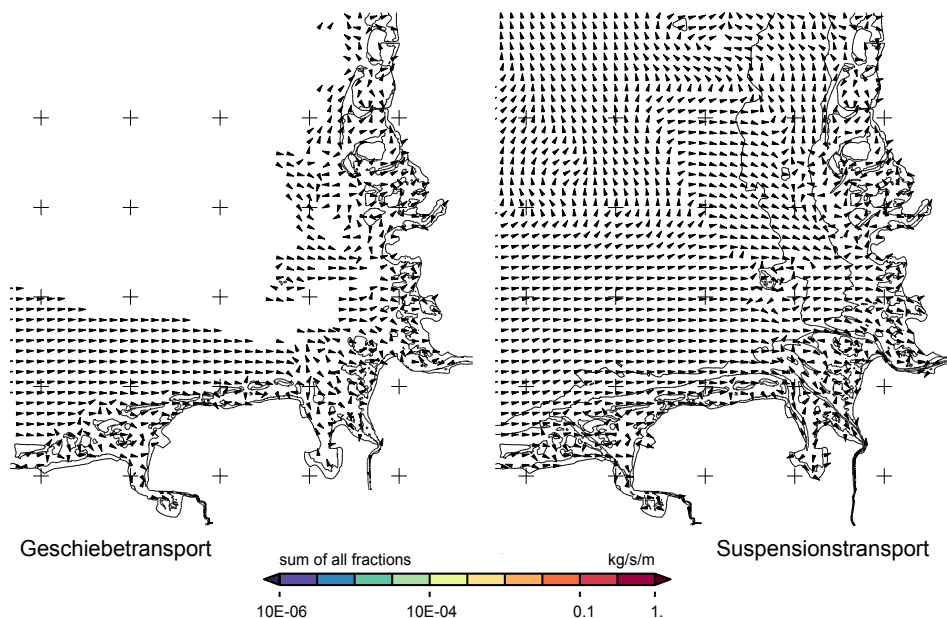


Abb. 2: Mittlerer Sedimenttransport für das Jahr 2006 aufgeteilt in Geschiebetransport (links) und Suspensionstransport (rechts) auf Basis des Modellverfahrens UnTRIM-SediMorph

Zur Veranschaulichung der Sedimenttransportpfade wurden für den Gesamttransport als Summe aus Suspension und Geschiebe berechnet, wie sich einzelne Sedimentpartikel basierend auf dem mittleren Transport in den unterschiedlichen Modellsystemen bewegen würden (Lagrange-Trajektorien, vgl. Abb. 3).

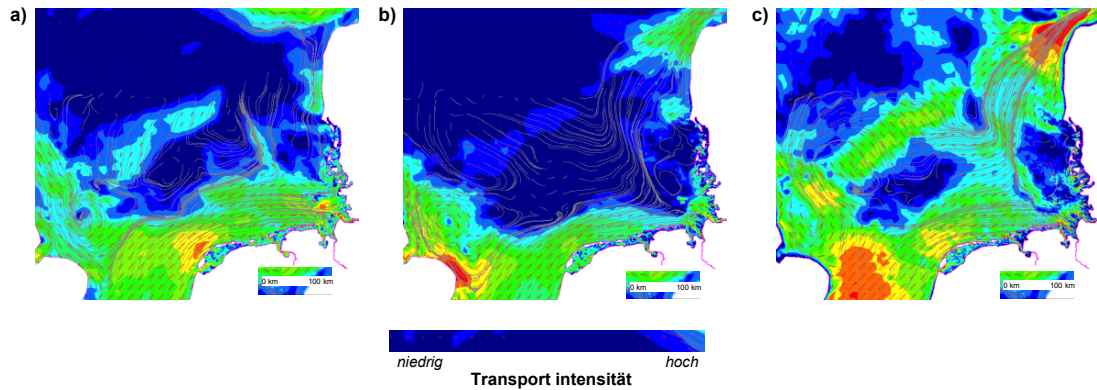


Abb. 3: Transportpfade und -intensität des Sedimenttransports in der erweiterten Deutschen Bucht auf Basis der Modellsysteme a) UnTRIM-SediMorph, b) TELEMAC-SISYPHE und c) MARINA

Für die betrachteten Modelle zeigt sich ein konsistentes Bild der Transportpfade. Der berechnete Sedimenttransport ist entlang der ostfriesischen Inseln in die Innere Deutsche Bucht gerichtet. Das in diesen Bereich transportierte Material verbleibt im Wesentlichen hier. Nur im tieferen Bereich ($\gg 20$ m) verzweigt der Sedimenttransport westlich von Helgoland nordwärts. Die genaue Ausprägung dieser generellen Transportrichtung und insbesondere die Menge des transportierten Materials unterscheiden sich dagegen in den einzelnen Modellen zum Teil deutlich.

3.2 Bilanzierung

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 (siehe Abb. 4).

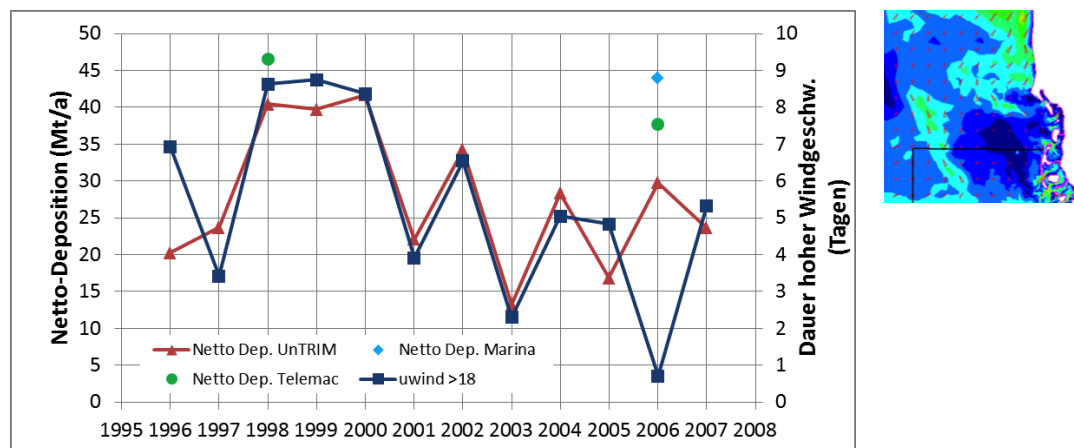


Abb. 4: Netto-Deposition in der Deutschen Bucht auf Basis der Simulationsergebnisse (rot: UnTRIM-SediMorph, grün: TELEMAC-SISYPHE, hellblau: MARINA) und Dauer hoher Windgeschwindigkeit (>18 m/s) an der Station Helgoland (blau). Die Lage der Schnittprofile ist in der Abbildung rechts dargestellt.

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 nicht hinreichend aufgelöst und wird für die Bilanzierung

nicht berücksichtigt. Die berechnete Netto-Deposition in der Deutschen Bucht als Differenz des residuelle Sedimenteintransports über die Bilanzierungsprofile basierend auf den Ergebnissen von UnTRIM-SediMorph beträgt im Mittel ca. 28 Mt/a. Bezogen auf die Gesamtfläche der Deutschen Bucht von ca. 32.000 km² ergibt sich aus der mittleren Deposition eine theoretische mittlere Aufwuchshöhe von ca. 0,5 mm, die sich in der Natur jedoch räumlich differenziert in der Deutschen Bucht verteilt. Der höchste Wert von ca. 42 Mt/a 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).

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 des Reststroms 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.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Prognosen zum mittel- bis langfristigen Sedimenttransport und zur Morphodynamik sind mit großen Unsicherheiten behaftet. Zur Abschätzung der Spannbreite von Ergebnissen ist daher eine Kombination von daten- und prozessbasierten Modellen notwendig. Die prozessbasierte Modellierung ermöglicht die Analyse der großräumigen Zirkulation und Sedimentbewegung in der Deutschen Bucht, als bestimmende Größe für den seeseitigen Sedimenttransport in den deutschen Ästuaren. Analysen der Modellergebnisse weisen eine hohe Variabilität des generell zyklonalen Küstenlängstransport in der Deutschen Bucht auf, sowohl in Magnitude als auch in Richtung. Die Modellergebnisse zeigen einen etwa gleichwertigen Einfluss des tidegetriebenen Sedimenttransports im Vergleich zur kombinierten Wirkung von Wind und Seegang. Eine verlässliche Validierung der transportierten Sedimentmengen ist auf Basis der verfügbaren Messungen derzeit nicht möglich, der qualitative Vergleich mit geologischen Auswertungen bestätigt die generelle Funktion der Deutschen Bucht als Netto-Depositionsbereich. Die Modelle prognostizieren 13 Mt/a bis über 46 Mt/a Netto-Deposition. Die Bilanzierung berücksichtigt dabei jedoch nicht den Austausch mit den Ästuaren. Die Netto-Deposition ist eng mit dem meteorologischen Antrieb korreliert. Eine Untersuchung in wie weit diese Korrelation auch auf Baggermengen in den äußeren Ästuaren übertragbar ist, ist eine Fragestellung zukünftiger Untersuchungen. 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 Verklappvorgänge berücksichtigen muss. Die Weiterentwicklung der morphodynamischen Simulationen für die äußeren Ästuare stellt daher eine Herausforderung dar, die in zukünftige Forschungsvorhaben weiter voran getrieben werden muss.

Literatur

- BAW: Nordsee-Basismodell - Teil II: Modellsystem UnTRIM-SediMorph, a) Hydrodynamik (UnTRIM-SediMorph). UnTRIM Basismodell. BAW Bericht. 2013
http://www.baw.de/methoden/index.php5/Validierungsstudien_Nordsee
- HEYER UND SCHROTTKE: 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. 292 S. 2013
- KÖSTERS UND WINTER: Exploring German Bight coastal morphodynamics based on modelled bed shear stress, Geo-Mar Lett 34. doi: 10.1007/s00367-013-0346-y. in press 2014
- JUNGE, WILKENS, HOYME UND MAYERLE: Modelling of medium-scale morphodynamics in a tidal flat area in the south-eastern German Bight. Die Küste 69: 279–311, 2006
- LESSER, ROELVINK, VAN KESTER, STELLING: Development and validation of a three-dimensional morphological model. Coastal Engineering 51. S. 883-915. 2004
- PLÜB UND HEYER.: Morphodynamic Multi-Model approach for the Elbe estuary. Proceedings of the 5th IAHR Symposium on River, Coastal and Estuarine Morphodynamics (RCEM). Enschede, The Netherlands. S. 113-117. 2007
- VAN DER WEGEN, DASTGHEIB, JAFFE, ROELVINK: Bed composition generation for morphodynamic modeling: case study of San Pablo Bay in California, USA. Ocean Dyn 61(2/3):173–186. doi:10.1007/s10236-010-0314-2. 2011
- WINTER: Macro scale morphodynamics of the German North Sea coast. J Coastal Res 64:706–710, 2011