

Synthese der interdisziplinären Forschung in AufMod

Harro Heyer, Kerstin Schrottke, Manfred Zeiler und Andreas Plüß

Zusammenfassung

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

Schlagwörter

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

Summary

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

Keywords

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

Inhalt

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

1 Das integrierte Modellsystem

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

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

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

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

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

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

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

2 Systemverständnis

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

3 Verknüpfung der Boden- und Modellierungsgruppe

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

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

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

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

4 Ausblick auf die Nachnutzung der Daten und Analysen aus AufMod

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

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

5 Weiterer Forschungsbedarf, der sich aus AufMod ergibt

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

6 Schriftenverzeichnis

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