

# **Modellbasierte Analyse langfristiger Formänderungsprozesse an der deutschen Nordseeküste**

Abschlussbericht AufMod E



smile consult GmbH  
Vahrenwalder Straße 4  
30165 Hannover

Version vom 15.01.2013



Vorhabensbezeichnung: AufMod E  
Modellbasierte Analyse langfristiger Formänderungsprozesse  
an der deutschen Nordseeküste

Förderkennzeichen: 03 KIS 086

Laufzeit des Vorhabens: 01.11.2009 - 31.12.2012

Berichtszeitraum: 01.11.2009 - 31.12.2012

Zahlungsempfänger: smile consult GmbH  
Vahrenwalder Straße 4  
30165 Hannover

© smile consult GmbH

Alle Rechte vorbehalten. Die Unterlagen dürfen nur nach Zustimmung der smile consult GmbH kopiert, vervielfältigt oder in andere Sprachen übersetzt werden.



Hannover, den 15.01.2013

apl. Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Milbradt

# Inhaltsverzeichnis

|           |   |          |
|-----------|---|----------|
| <b>1.</b> | <b>Kurzdarstellung</b>  | <b>4</b> |
| 1.1.      | Aufgabenstellung .....  | 4        |
| 1.2.      | Voraussetzungen .....   | 4        |
| 1.3.      | Planung und Ablauf .....  | 5        |
| 1.4.      | Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde ..... | 5        |
| 1.5.      | Projektpartner und Zusammenarbeit mit anderen Stellen .....             | 6        |
| <b>2.</b> | <b>Eingehende Darstellung</b>   | <b>8</b> |
| 2.1.      | Projektergebnisse .....   | 8        |
| 2.1.1.    | Funktionales Bodenmodell .....  | 8        |
| 2.1.2.    | Prozessbasierte morphodynamische Modelluntersuchungen .....             | 11       |
| 2.1.3.    | Ergebnisexport und -dokumentation .....                                 | 12       |
| 2.2.      | Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises .....                | 13       |
| 2.3.      | Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit .....           | 13       |
| 2.4.      | Verwertbarkeit der Ergebnisse .....                                     | 13       |
| 2.5.      | Relevante Ergebnisse Dritter .....                                      | 14       |
| 2.6.      | Erfolge und geplante Veröffentlichungen .....                           | 14       |

# 1. Kurzdarstellung

## 1.1. Aufgabenstellung

Die deutsche Nordseeküste verfügt über einen ausgeprägten Formenreichtum und ist Teil des größten Wattenmeeres der Welt. Sowohl veränderte Umweltbedingungen in Form des globalen Klimawandels und dem damit einhergehenden Anstieg des mittleren Meeresspiegels als auch die unterschiedlichen anthropogenen Nutzungsanforderungen bedürfen eines vertieften Verständnisses der hydrologischen und morphodynamischen Entwicklung in der Deutschen Bucht. Mit der Rahmenausschreibung des KFKI im Jahr 2008 zur Morphodynamik in der Deutschen Bucht wurde diesen Anforderungen Rechnung getragen und im Rahmenprogramm des BMBF „Forschung für Nachhaltige Entwicklung“ (2010-2015) wurden die Schwerpunkte konkretisiert und weitergeführt.

Der Projektverbund „Aufbau von integrierten Modellsystemen zur Analyse der langfristigen Morphodynamik der Deutschen Bucht“- AufMod, koordiniert durch die Bundesanstalt für Wasserbau Dienststelle Hamburg, hatte zum Ziel, die in der Rahmenausschreibung formulierten Forschungsziele bzw. maßgeblichen Untersuchungsinhalte integrativ zu bearbeiten und so wesentliche Grundlagen zum vertieften Verständnis der morphodynamischen Veränderungen in der Deutschen Bucht zu liefern.

Beobachtungs- bzw. Vermessungsdaten des Meeresbodens stellten über einen sehr langen Zeitraum die Methode zur Analyse und Beschreibung der morphodynamischen Veränderungen an der deutschen Nordseeküste dar. Alternative Verfahren bilden heute prozessbasierte numerische Simulationsmodelle. Im Teilprojekt AufMod E, welches für den Zeitraum vom 01.11.2009 bis 31.12.2012 bewilligt wurde, wurde eine enge Verzahnung dieser prozess- und datenbasierten Modellansätze angestrebt, mit dem Ziel die Datengrundlagen sowie Modellwerkzeuge so weiter zu entwickeln, dass morphologische und sedimentologische Veränderungen in der Deutschen Bucht zukünftig besser beurteilt und prognostiziert werden können.

## 1.2. Voraussetzungen

Die Forschung der vergangenen Jahre hat wesentlich dazu beigetragen, die Gewässermorphologie als Spiegel der hydrodynamischen und meteorologischen Kräfte zu sehen. Neben der Analyse von Naturdaten spielen heute numerische Simulationsmodelle in fast allen Bereichen des Küsteningenieurwesens eine wichtige Rolle.

Mit den im Projekt „Konsistente digitale Bathymetrien“ (KoDiBa) entwickelten Methoden der Datenanalyse und der Bathymetriesimulationen steht eine Modellvorstellung einer vierdimensionalen digitalen Bathymetrie zur Verfügung, auf deren Basis erstmals quasi-konsistente und bewertete Tiefeninformationen an jedem Ort und zu jedem Zeitpunkt abgeleitet werden können (MILBRADT (2005)). Im Projekt „Identifikation morphologischer Tendenzen und Geschwindigkeiten im Küstennahbereich“ (ImTG) konnten aus Vermessungsdaten, neben Erosions- und Sedimentationsraten, auch morphologische Geschwindigkeiten abgeleitet werden (MILBRADT (2008)).

Sedimentologische Eigenschaften des Meeresbodens werden in der Regel auf der Basis klassischer Karten beschrieben. Eine Verknüpfung bathymetrischer und sedimentologischer Daten erfolgt hierbei durch das Übereinanderlegen von Karten. Die Verknüpfung weiterer, die

Oberfläche des Meeresbodens beschreibender Daten zu einem integralen Modell stand bei Projektbeantragung noch aus.

Solche datenbasierten Modelle können in der Regel nur für Hindcast-Untersuchungen herangezogen werden. Für prognostische Abschätzungen morphodynamischer Prozesse kommen immer häufiger prozessbasierte morphodynamische Simulationsmodelle unterschiedlicher Komplexität und Modellausdehnungen zum Einsatz. Klassische numerische Simulationsmodelle für morphodynamische Prozesse (Delft, Mike...) werden von verschiedenen Unternehmen und Institutionen entwickelt und insbesondere für die Beurteilung tidedominanter Küstenabschnitte und Flusssysteme eingesetzt. Wirkt zusätzlich Seegang auf die Transportprozesse, so wird dieser in der Regel nicht berücksichtigt bzw. unzureichend approximiert (LEHFELDT (2002)). Der Antragsteller ist Entwickler eines holistischen Modellsystems MARINA2D (MILBRADT (1995)), in dem Seegang-, Tide- und Sedimenttransport sowie Bodenevolution direkt gekoppelt behandelt werden und so vertrauenswürdige Prognosen auch für seegangsbeeinflusste Ästuare (BAW ELBE (2006)) berechnet werden können.

Die enge Verzahnung dieser beiden Modellansätze ist ein wesentlicher Kern dieses Teilprojektes E im Rahmen des Verbundprojektes AufMod.

### **1.3. Planung und Ablauf**

#### **Laufzeit**

Das Projekt war auf eine Laufzeit von 3 Jahren ausgelegt (01.11.2009 bis 31.10.2012). Um auch in der Schlussphase des Verbundprojektes AufMod eine enge Verzahnung aller Teilprojekte zu gewährleisten, wurde eine 2-monatige kostenneutrale Verlängerung bis zum 31.12.2012 beantragt und durch den Projektträger genehmigt.

#### **Arbeitspakete**

Das Projekt AufMod E bestand im Wesentlichen aus vier Arbeitspaketen, die um Dokumentation und Projektmanagement ergänzt wurden. Die Ausgestaltung und deren zeitliche Einordnung erfolgte in enger Abstimmung mit den Projektpartnern des Verbundvorhabens AufMod und der projektbegleitenden Gruppe des KFKI.

#### **Projektmanagement und Ablauf**

Die sehr enge Zusammenarbeit innerhalb des Verbundprojektes führte zu einer kontinuierlichen Abstimmung von Zwischenständen, Ergebnissen und Bearbeitungszielen. In regelmäßigen Projekttreffen wurden die grundlegenden Konzepte diskutiert, Schnittstellen konkretisiert und Zwischenergebnisse vorgestellt sowie die weitere Zusammenarbeit abgestimmt. Neben diesen Projekttreffen wurden weiterhin problembezogenen Arbeitsgruppentreffen durchgeführt, in denen spezielle Fragestellungen diskutiert und bearbeitet wurden. Auf den Sitzungen der projektbegleitenden Gruppe wurde der Stand der Arbeiten vorgestellt und das weitere Vorgehen konkretisiert. Ergänzt wurden diese Treffen durch Workshops und Doktorandenseminare. Die smile consult GmbH hat in diesem Rahmen unter anderem die Workshops „Modellvalidierung“ und das Doktorandenseminar zum Themenschwerpunkt „Datenbasierte Modellierung“ durchgeführt und gestaltet.

### **1.4. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde**

Wie bereits im Projektantrag dargestellt wurde, sind in der Vergangenheit eine Vielzahl von numerischen Simulationsmodellen entwickelt worden, die Sedimenttransportprozesse und

damit einhergehende Bodenevolution beschreiben können. Anwendungsgebiete lagen eher in kleinräumigen und kurzfristigen Analysen. Um die morphodynamischen Vorgänge in der gesamten Deutschen Bucht numerisch beschreiben zu können, ist es notwendig sowohl die numerischen Verfahren zu verbessern und zu validieren als auch die Datengrundlage hierfür zusammenzustellen. Mit den KFKI-Projekten KoDiBa und ImTG wurden wesentliche Grundlagen für die Verwaltung und Analyse bathymetrischer Vermessungsdaten an kleineren Projektgebieten an der deutschen Nord- und Ostseeküste gelegt. Für eine fast flächendeckende zeitvariante Bathymetrie waren die Algorithmen noch nicht ausgereift genug und die Datenlage nicht ausreichend aufbereitet. Erste Überlegungen, auch sedimentologische Parameter wie den  $d_{50}$  analog zu behandeln, wurden diskutiert, aber nicht weiter verfolgt. Auch im internationalen Umfeld wurden und werden sedimentologische Parameter im Wesentlichen durch Karten beschrieben. Die Idee eines funktionalen Bodenmodells, welches den Meeresboden und dessen sedimentologische Eigenschaften beschreibt, ist erst in der Anfangsphase des Projektes gereift.

Die Erfahrungen aus Modellanwendungen morphodynamischer Simulationsmodelle in der Vergangenheit haben gezeigt, dass sich die Modelle in einer Vielzahl von Ansätzen, Parametern und Vereinfachungen unterscheiden. Eine qualitative oder sogar quantitative Beschreibung dieser Unterschiede war in der Vergangenheit kaum möglich, da hierfür in der Regel die Vergleichbarkeit der Gebiete, Auflösungen und Zeiträume fehlte. Hier ist mit dem Verbundvorhaben ein entscheidender Schritt getan worden, in dem verschiedene Modelle auf gleiche Situationen und sogar Modellauflösungen angewendet wurden.

Das Verbundforschungsprojekt AufMod kann als einzigartig auch deshalb bezeichnet werden, weil es gelungen ist sowohl Modellierer als auch die messenden KollegInnen in einem Projektverbund zu einer sehr engen Zusammenarbeit zu bringen.

## **1.5. Projektpartner und Zusammenarbeit mit anderen Stellen**

Die räumliche und zeitliche Ausdehnung sowie die Komplexität der zu betrachtenden morphodynamischen Fragestellungen in der Deutschen Bucht erforderte eine enge Zusammenarbeit sowohl mit den Projektpartnern des Forschungsverbundes AufMod als auch mit weiteren Dienststellen und Institutionen an der deutschen Nordseeküste. Das Gesamtprojekt AufMod beinhaltet sieben Teilprojekte AufMod-A bis AufMod-G, deren Titel, Projektleiter und durchführende Institution im Folgenden zusammengefasst werden:

### **AufMod-A**

Bodenmodell: Aufbau und Plausibilisierung eines Bodenmodells und seiner Dynamik als Grundlage für die numerische Modellierung

*Projektleitung:* Dr. Manfred Zeiler (BSH – 03KIS082)

### **AufMod-B**

Bodenformen: Verbreitung und Prognose submariner Bodenformen in Küstengewässern

*Projektleitung:* Dr. Christian Winter (Universität Bremen / MARUM – 03KIS083)

### **AufMod-C**

Prozessorientierte Modellierung: Analyse langfristiger, großräumiger Prozesse durch prozessorientierte Simulation der Deutschen Bucht

*Projektleitung:* Dr. Harro Heyer, Dr. Andreas Plüß (BAW – 03KIS084)

### **AufMod-D**

Morphodynamische Langzeitsimulation durch Entkopplung von Hydro- und Morphodynamik

*Projektleitung:* Prof. Dr. Andreas Malcherek (Universität der Bundeswehr, München – 03KIS085)

### **AufMod-E**

Modellbasierte Analyse langfristiger Formänderungsprozesse an der deutschen Nordseeküste

*Projektleitung:* Prof. Dr. Peter Milbradt (smile consult GmbH – 03KIS086)

### **AufMod-F** (mit 3 Unterprojekten)

Bodenmodell: Stabilität von Sedimentverteilungsmustern in der Deutschen Bucht

*Gesamtprojektleitung:* Prof. Dr. Kerstin Schrottke (Universität Kiel – 03KIS087)

Unterprojektleitung *Schelf / Vorstrand:* Dr. Klaus Schwarzer (Universität Kiel, IFG)

Unterprojektleitung *Watten:* Dr. Klaus Ricklefs (Universität Kiel, FTZ Büsum)

Unterprojektleitung *Ästuar:* Prof. Dr. Kerstin Schrottke (Universität Kiel, ExC)

### **AufMod-G**

Bodenmodell: Sediment-Fazies der deutschen Nordsee

*Projektleitung:* Dr. Alexander Bartholomä (Senckenberg Gesellschaft für Naturforschung – 03KIS088)

Besonders hervorzuheben ist die große Bereitschaft nationaler und internationaler Datenerheber, Messdaten für den Aufbau und die Validierung der Modelle bereitzustellen. Hier sind besonders die Dienststellen der Wasser und Schifffahrtsverwaltungen, aber auch das Alfred-Wegener-Institut (AWI), das LKN-SH und das Helmholtz-Zentrum für Material- und Küstenforschung Geesthacht zu nennen. Eine Ausnahme bildete hierbei der Niedersächsische Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN), der trotz mehrfacher Bitte um kostenneutrale Bereitstellung von Daten aus dem Bereich der ostfriesischen Inseln keine Daten zur Verfügung stellte.

## 2. Eingehende Darstellung

Das Teilvorhaben AufMod E hatte zum Ziel, eine enge Verzahnung von prozess- und datenbasierten Modellansätzen zur Analyse der langfristigen und großräumigen Formänderungsprozesse in der Deutschen Bucht zu erreichen. Im Verlauf des Projektes hat sich ein Teil des datenbasierten Modellansatzes, das Funktionale Bodenmodell, als eine zentrale Komponente im gesamten Verbundprojekt entwickelt. Das Funktionale Bodenmodell stellte Anfangsparameter und Validierungsdaten für alle prozessbasierten morphodynamischen Simulationsmodelle bereit. Zusätzlich konnten datenbasierte Hindcast-Analysen der geomorphologischen Entwicklung der deutschen Nordseeküste durchgeführt werden und weitere Produkte, wie Karten der Bodenformen und der Verteilung von Sedimentparametern, bereitgestellt werden. Für die Abschätzung von Sedimenttransportpfaden und -mengen wurde das prozessbasierte morphodynamische Simulationsmodell MARINA weiterentwickelt und für unterschiedliche Modellausdehnungen und -zeiträume eingesetzt.

In den folgenden Abschnitten wird ein Überblick über die wesentlichen Ergebnisse des Teilprojektes AufMod E und deren Einordnung in das Verbundprojekt AufMod gegeben. Eine detaillierte Darstellung der Methodik, Vorgehensweise und Einbindung der Ergebnisse in die anderen Teilprojekte des Verbundvorhabens wird im gemeinsamen Abschlussbericht des Verbundvorhabens gegeben.

### 2.1. Projektergebnisse

Die Projektergebnisse des Teilprojektes AufMod E lassen sich in vier Bereiche gruppieren. Das Zusammentragen, Plausibilisieren, mit Metadaten versehen und Arrangieren der Natur- und Messdaten aus unterschiedlichen Quellen, unterschiedlicher Qualität und Ausdehnung war im Rückblick der aufwändigste Aufgabenbereich. Hierzu gehörte auch die Implementierung geeigneter Filter und Datenbankschema. Aufbauend auf diesen homogenisierten Daten konnte das sogenannte Funktionale Bodenmodell implementiert werden. Der dritte große Arbeitsbereich umfasste die Entwicklung, Implementierung und Nutzung von Verfahren zur geomorphologischen Analyse. Parallel zu diesen datenorientierten Arbeiten wurden prozessbasierte morphodynamische Simulationsmodelle aufgebaut, validiert und betrieben.

#### 2.1.1. Funktionales Bodenmodell

Die softwaretechnische Realisierung eines datenbasierten Modells des Meeresbodens erfolgte im sogenannten Funktionalen Bodenmodell, auf dessen Basis u. a. Hindcast-Analysen der geomorphologischen Entwicklung der deutschen Nordseeküste durchgeführt werden konnten.

Das Funktionale Bodenmodell stellt an jedem Ort der Deutschen Bucht (in großen Bereichen der gesamten Nordsee) und zu jedem Datum im Zeitraum von 1990 bis heute folgende Informationen zur Verfügung:

- Höhenlage der Bodens
- Parametrisierte Bodenformen
- Kornverteilungskurve



- Porosität und Anteil der organischen Bestandteile, wenn diese verfügbar sind.

Ergänzt wird die Datenbasis des funktionalen Bodenmodells durch ein Modell eines konsolidierten Horizontes (holozäne Basis). Die Verknüpfung der zeitvariablen Höhenlage des Bodens mit dem zeitunabhängigen konsolidierten Horizont ermöglicht die Bestimmung der Mächtigkeit der mobilen Deckschicht.

Die Übertragung der punktuellen Messinformationen auf die Fläche erfolgt über datenangepasste Interpolations- und Approximationsverfahren. Die Verwaltung der gemessenen Daten erfolgt datenbankbasiert. Durch die enge Verknüpfung der Daten mit, um projektspezifische Informationen erweiterte, Metadaten konnte eine effiziente Verwaltung und Nutzung der Naturdaten erreicht werden.

### Bathymetrische Modellkomponente

Die bathymetrische Datenbasis des Funktionalen Bodenmodells besteht zum Projektende aus über 17 Tsd. Datensätzen mit insgesamt ca. 2 Mrd. Messpunkten, die von unterschiedlichen Institutionen mit unterschiedlichen Zielstellungen aufgenommen wurden. Ergänzt wurden diese gemessenen Tiefen durch digitalisierte historische Karteninformationen. Von einer brauchbaren Datenlage kann ab dem Jahr 1980, von einer guten ab 1990 und von einer vertrauenswürdigen Datenlage ab ca. 2000 gesprochen werden. Auf Grund der Menge der Vermessungsdaten erfolgte eine Konzentration auf die Deutsche Bucht. Vermessungsdaten aus den restlichen Teilen der Nordsee wurden dahingehend aufgenommen, dass eine konsistente Abdeckung erfolgte und somit vertrauenswürdige Tiefenverteilungen für den Modellaufbau bereitgestellt werden konnten.

Sowohl die räumliche als auch zeitliche Abdeckung der Vermessungen erlaubte die Implementierung und Optimierung von datenangepassten Raum-Zeit-Interpolationen. Diese ermöglichen die bathymetrische Hindcast-Simulation von konsistenten Tiefenverteilungen und zugehörigen Vertrauenswürdigkeiten.

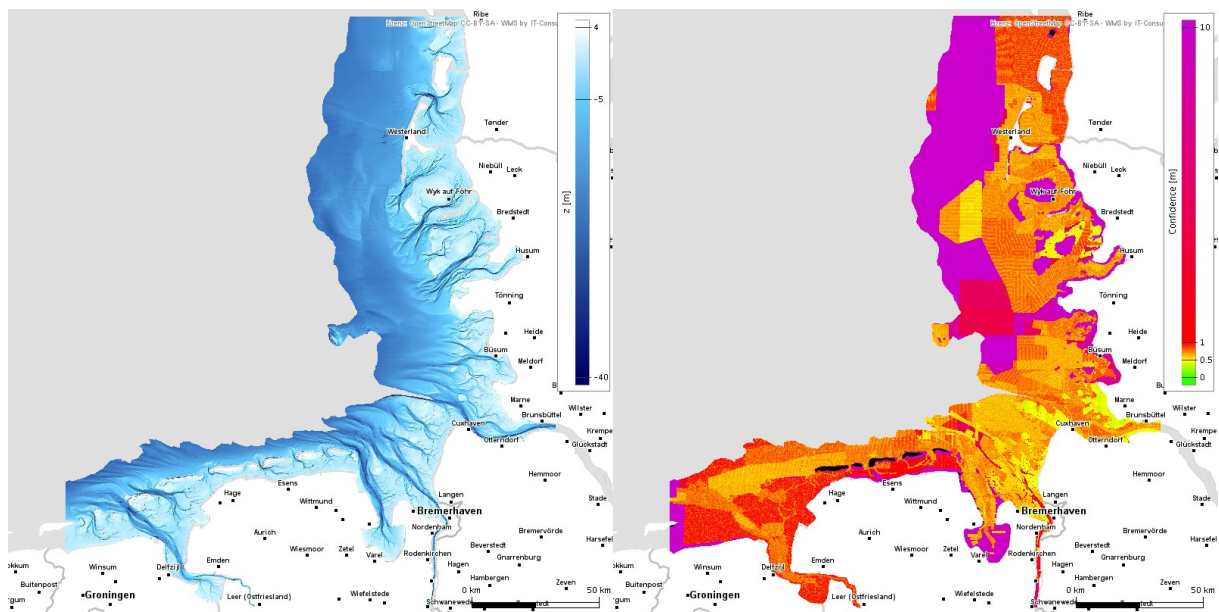


Abbildung 1: Tiefenverteilung zum 01.01.2006 und zugehörige Vertrauenswürdigkeiten

Die Vertrauenswürdigkeit ergibt sich zum einen aus der Messunschärfe der einzelnen Vermessungen und der Unschärfe, die durch die Interpolation selbst induziert wird.

Einfache Analysen, wie die Bestimmung von Erosions- und Sedimentationsmengen lassen sich auf der Basis von Differenzbetrachtungen aus jährlichen Tiefenverteilungen realisieren. Zusätzlich hierzu kann an jedem Ort eine Zeitreihe der Tiefenentwicklung berechnet und statistisch bzw. funktionalanalytisch ausgewertet werden. So ergeben sich morphologische Kenngrößen, wie der morphologische Raum oder der morphologische Drive (siehe Abbildung 2).

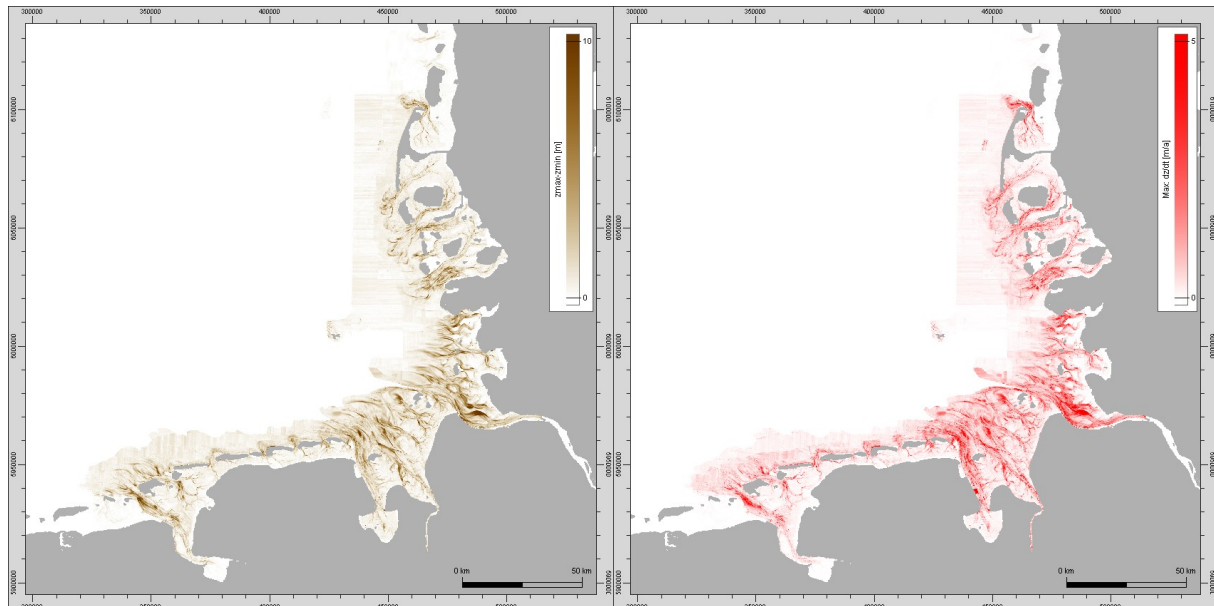


Abbildung 2: Morphologischer Raum und Drive in der Deutschen Bucht

Ein wesentliches Ergebnis der datenbasierten geomorphologischen Analysen ist der Nachweis, dass die Watten in den letzten 20 Jahren um ca. 1 cm pro Jahr im Mittel gewachsen sind. Abhängig von der verfügbaren Datendichte und Genauigkeit der Messdaten konnte sowohl eine räumliche als auch zeitliche Differenzierung der Veränderungen in den Wattvolumen und -flächen angegeben werden. Neben dem Anwachsen des Watts konnte auch die Tendenz des steiler werdens des Küstenvorfeldes in den Daten des Funktionalen Bodenmodells nachgewiesen werden.

Weitere Produkte der bathymetrischen Komponente des Funktionalen Bodenmodells sind konsistente Tiefenverteilungen als Anfangswerte und Validierungsdaten für die prozessbasierten morphodynamischen Modelle des Verbundvorhabens. Hierbei hat sich gezeigt, dass entsprechend der verwendeten numerischen Methode der Simulationsmodelle (FDM, FEM oder FVM) angepasste Approximationsverfahren im Funktionalen Bodenmodell implementiert werden mussten. Rechenknoten in einem prozessbasierten Simulationsmodell sind immer Repräsentanten für zugehörige Regionen, so dass eine punktuelle Interpolation wie sie in der Vergangenheit angewendet wurde, nicht zulässig ist. Für die Erstellung von Anfangstiefenverteilungen und Validierungsdaten wurden entsprechende volumentreue Approximationsverfahren entwickelt und implementiert.

### Sedimentologische Modellkomponente

Die sedimentologische Datenbasis besteht in der gesamten Nordsee aus ca. 80 Tsd. Kornverteilungen unterschiedlicher Auflösungen. Im Gegensatz zu den bathymetrischen Vermessungsdaten ist die örtliche und erst recht die zeitliche Abdeckung wesentlich schlechter. Insbesondere stellte die konsistente Übertragung der punktuellen

Kornverteilungen in die Ebene eine große Herausforderung dar. Es wurden verschiedene räumliche (geometrische und statistische) Interpolations- und Approximationsverfahren implementiert und auf ihre Eignung und Plausibilität geprüft. Es hat sich gezeigt, dass bei der Interpolation von Kornverteilungen eine physikalisch basierende Interpolation genutzt werden muss. Am geeignetsten hat sich hier eine Shepard-Interpolation mit einer anisotropen Metrik auf der Basis jährlich resultierender Sedimenttransporte herausgestellt. Die anisotrope Metrik (siehe Abbildung 3) basiert auf den resultierenden Sedimenttransportmengen des Jahres 2006, welche mit dem prozessbasierten Simulationsmodell MARINA bestimmt wurden.

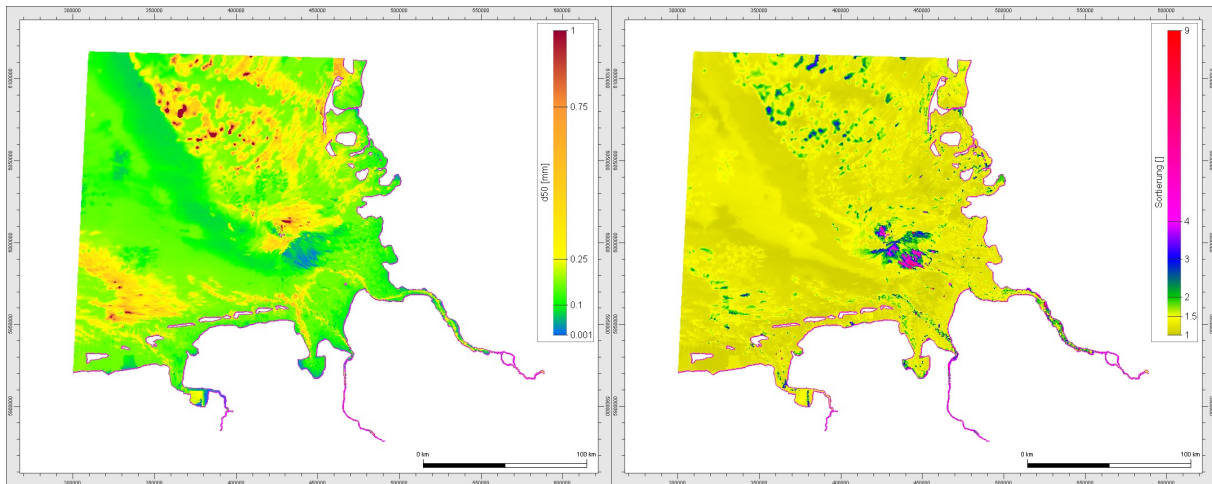


Abbildung 3: Verteilung des  $d_{50}$  und der Kornsortierung in der Deutschen Bucht

Basierend auf der sedimentologischen Komponente konnten verschiedene Karten z. B. zum Feinsandanteil oder Median, zur Sortierung, Schiefe oder Kurtosis erstellt werden. In Verbindung mit großräumigen Strömungsmustern konnten hieraus erste Abschätzungen der Sedimenttransportrichtungen abgeleitet werden.

### 2.1.2. Prozessbasierte morphodynamische Modelluntersuchungen

Prozessbasierte Simulationsmodelle ermöglichen nicht nur die Analyse zurückliegender Zeiträume, sondern sind insbesondere Ingenieurwerkzeuge zur Analyse von zukünftigen Veränderungen. Sie erlauben aber auch die systematische Untersuchung von Zusammenhängen, die in der Natur nur schlecht oder gar nicht zu beobachten sind.

#### Modellaufbau und Validierung

Für die unterschiedlichen Fragestellungen wurden mehrere morphodynamische Modelle aufgebaut und plausibilisiert. Im Rahmen des Verbundprojektes wurde für die gesamte Nordsee ein Modell aufgebaut, um zunächst die hydrodynamischen Parameter wie Wasserstände und Seegangparameter zu validieren. Hierzu wurden u. a. umfangreiche Pegeldaten entlang der Küsten der Nordsee und Seegangsmessdaten in der Deutschen Bucht zusammengetragen. Als Validierungszeitraum für alle Modelle des Verbundprojektes wurde das Jahr 2006 gewählt. Für einen Bereich um die Insel Spiekeroog und das Elbeästuar wurden Detailmodelle mit hoher Netzauflösung aufgebaut, um kleinräumige Effekte besser studieren zu können. Diese Detailmodelle wurden mit den Daten des Nordseemodells gesteuert. Besonders hervorzuheben sind die gewonnen Erkenntnisse zur Variabilität der Strömungs- und Sedimenttransportvorgänge, die durch natürliche und anthropogen bathymetrische Veränderungen hervorgerufen werden. Hierzu wurde das

prozessbasierte Simulationsmodell MARINA mit dem Funktionalen Bodenmodell direkt gekoppelt. Die Modelluntersuchungen wurden über 20 Jahre durchgeführt und analysiert.

Die morphodynamischen Komponenten von MARINA wurden ebenfalls für 2006 plausibilisiert. Hervorzuheben ist hier besonders, dass auch bei diesen Simulationen die Tendenz zum Anwachsen der Watten gut wiedergegeben wird.

Die prozessbasierten Modelluntersuchungen haben wesentlich zum Verständnis der großräumigen Umlagerungsprozesse in der Deutschen Bucht beigetragen. Ausgehend von resultierenden Sedimenttransporten über das Jahr 2006 konnten charakteristische Transportpfade in der Deutschen Bucht identifiziert und Transportmengen erstmals realistisch abgeschätzt und mit Angaben in der Literatur verglichen werden.

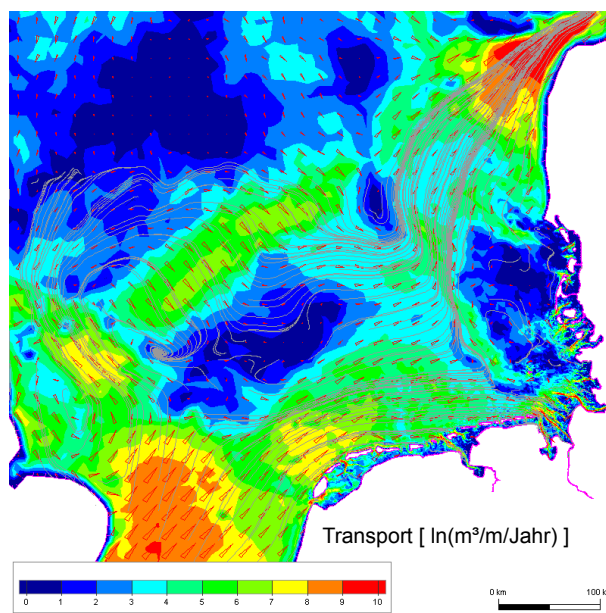


Abbildung 4: Resultierende Sedimenttransporte und Transportpfade in der Nordsee

Durch das Aktivieren und Deaktivieren von einzelnen Komponenten des holistischen Simulationsmodells MARINA konnte die Bedeutung des Seegangs auf die großräumigen Sedimenttransportprozesse aufgezeigt werden. Weiterhin konnten Flächen in der deutschen Bucht identifiziert werden, die besonders durch Seegangswirkung oder durch die Tide beeinflusst werden.

Durch eher kleinräumige morphodynamische Simulationen konnte u. a. aufgezeigt werden, dass morphodynamische Simulationsmodelle sowohl zur Prädiktion von Bodenformen und Sedimentporositäten als auch zur Veränderung von Sedimentzusammensetzungen eingesetzt werden können.

### 2.1.3. Ergebnisexport und -dokumentation

Um die Nachhaltigkeit der im Rahmen des Teilprojektes wie auch des Verbundprojektes erarbeiteten Produkte und Forschungsergebnisse sicherzustellen, wurde eine enge Verknüpfung zum Projekt MDI-DE und dem operationell betriebenen Fachinformationssystem Shelf Geo Explorer (SGE) des BSH angestrebt. Die Einbindung der Modell-ergebnisse des datenbasierten wie auch prozessbasierten Simulationsmodells in die zugehörige Metadatensuche erforderte den Export in standardisierte Formate und die

Beschreibung der Ergebnisse durch zugehörige Metadaten.

## **2.2. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises**

Im Projekt AufMod E waren die wesentlichen Kosten die Personalkosten. Um die zusammengetragenen Messdaten in ihren unterschiedlichen Ausprägungen effizient zu verwalten, wurde zu Projektbeginn ein Datenbank- und Computerserver angeschafft. Dieser ermöglichte auch erst die Vielzahl von lange laufenden morphodynamischen Simulationsrechnungen, mit denen beispielsweise zum ersten Mal reproduzierbare und realistische Sedimenttransportpfade und -mengen in der Deutschen Bucht bestimmt werden konnten. Nicht zuletzt haben die bereitgestellten Reisekosten die Durchführung von regelmäßigen Projekttreffen, Workshops und Doktorandenseminaren sowie die Vorstellung der Projektergebnisse auf einer international renommierten Konferenz, der ICHE, ermöglicht.

## **2.3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit**

Der Verlauf der Arbeiten im Teilprojekt AufMod E folgte im Westlichen der im Projektantrag formulierten Planung. Alle im Arbeitsplan formulierten Aufgaben wurden erfolgreich bearbeitet. Der Aufwand für die Datenaufbereitung und Verwaltung wurde jedoch bei Projektantrag unterschätzt und musste mit hohem personellen Engagement aufgefangen werden.

## **2.4. Verwertbarkeit der Ergebnisse**

Sowohl im Verbundprojekt AufMod als auch im Teilprojekt AufMod E lag der Schwerpunkt der Arbeiten auf Themen aus dem Bereich der Grundlagenforschung. Eine direkte wirtschaftliche Nutzung der Forschungsergebnisse ist zurzeit nicht zu erkennen. Die im Rahmen der Projektbearbeitung entwickelten und implementierten Softwarekomponenten sind in die Klassenbibliothek der smile consult GmbH integriert worden und stehen für alle weiteren Ingenieurprojekte zur Verfügung. Durch die umfangreiche Validierung und Plausibilisierung des Modellsystems MARINA für den Küstenbereich kann erwartet werden, dass sich hierdurch neue Anwendungsgebiete erschließen.

Die im Verbundprojekt und insbesondere auch im Teilprojekt zusammengetragenen Daten, implementierten Prototypen und wissenschaftlichen Ergebnisse haben zu einem vertieften Systemverständnis der Morphodynamik der Deutschen Bucht geführt und werden zu einer verbesserten Beratung und optimierten Durchführung zukünftiger Ingenieurprojekte aus dem Bereich des Küsteningenieurwesens führen. Produkte aus dem Funktionalen Bodenmodell, wie jährliche Tiefenverteilungen und konsistente Sedimentologien, stehen, durch die Einbindung in das operationell betriebene Fachinformationssystem Shelf Geo Explorer (SGE) des BSH und die Verknüpfung mit dem KFKI-Projekt MDI-DE, der interessierten Öffentlichkeit zur Verfügung.

Das Potential möglicher Analysen auf dem Funktionalen Bodenmodell ist noch lange nicht ausgeschöpft. Erste prototypische Untersuchungen zur Verknüpfung des Funktionalen Bodenmodells mit meteorologischen Daten sowie prozessbasierten Simulationsergebnissen lassen ganz neuartige Erkenntnisse erwarten.

Die kontinuierliche Integration neuer Messdaten und die Pflege des gesamten Datenbestandes und der zugehörigen Methodenbank ist aus unserer Sicht eine wesentliche Voraussetzung für die Nachhaltigkeit des Projektes.

Die im Rahmen des Verbundprojektes von den Projektpartnern durchgeführten Natur-

messungen haben u. a. die Bedeutung biogener Einflüsse auf die Sedimentzusammensetzung und die Eigenschaften des Meeresbodens aufgezeigt. Auf der anderen Seite beeinflussen Sedimenttransportprozesse die Wasserqualität und somit auch den ökologischen Zustand bzw. die Entwicklung der Deutschen Bucht. Aus unserer Sicht sind Erweiterungen des Funktionalen Bodenmodells und des Modellsystems MARINA um biologische und ökologische Modellkomponenten ein notwendiger Schritt, um zukünftigen Anforderungen an Nachweisen im Küsteningenieurwesen nachzukommen.

## **2.5. Relevante Ergebnisse Dritter**

Morphodynamische Modelluntersuchungen gewinnen eine immer größere Bedeutung bei der Beurteilung natürlicher Veränderungen und der Wirkung von anthropogenen Veränderungen sowohl im Küsten- als auch Binnenbereich. Schwerpunkte der nationalen und internationalen Entwicklungen liegen vor allem in der Verbesserung der numerischen Verfahren und physikalischen Ansätze der prozessbasierten Simulationsmodelle. Anwendungen solcher Simulationsmodelle sind eher auf kleinräumige und kurzfristige Fragestellungen ausgerichtet. Defizite bestehen auch weiterhin im Bereich der Basisdaten für den Betrieb und die Validierung morphodynamischer Modelle. Hier hat das Verbundvorhaben und insbesondere das in diesem Teilprojekt entwickelte Funktionale Bodenmodell international beachtete Grundlagen geschaffen. Diskussionen mit nationalen und internationalen FachkollegInnen zeigen ein großes Interesse an den Ergebnissen des Verbundprojektes AufMod und lassen die Erwartung erkennen, dass insbesondere die zusammengetragene Datengrundlage weiter gepflegt und erweitert sowie die Analysen auf angrenzende Bereiche ausgedehnt werden.

## **2.6. Erfolgte und geplante Veröffentlichungen**

Im Rahmen des Projekts wurden erste Ergebnisse bei verschiedenen Veranstaltungen wie Vorträge, Workshops und Konferenzen vorgestellt. Insbesondere auf das Funktionale Bodenmodell wurde eingegangen in:

MILBRADT P. (2012). Analysis of the Morphodynamics of the German North Sea Coast on the Basis of a Functional Seabed Model, Proceedings of the 10th International Conference on Hydroscience & Engineering, Orlando, Florida

VALERIUS J., MILBRADT P., VAN ZOEST M., ZEILER M. (2012). Development of a seabed model for analysing sediment and morpho-dynamic processes in the German Bight (North Sea). 8th International Conference on Tidal Environments, Caen, France

Die Ergebnisse des Verbundprojektes wurden auf den Statusseminaren des KFKI 2010, 2011 und 2012 vorgestellt.

### **Geplante Veröffentlichungen**

In einem Sonderband der „Küste“ werden die wesentlichen Ergebnisse des Verbundvorhabens veröffentlicht.

Weitere Veröffentlichungen in Fachzeitschriften sind im Rahmen der Projektgruppe diskutiert worden und befinden sich in Vorbereitung.

### **Daten und Ergebnispräsentation**

Die Nutzung der im Verbundprojekt erstellten Daten, Informationen und Berichte ist durch die Einbindung in das operationell betriebene Fachinformationssystem Shelf Geo Explorer (SGE) des BSH und die enge Zusammenarbeit mit dem KFKI-Projekt MDI-DE sichergestellt.

## Literaturverzeichnis

BAW ELBE (2006). Bundesanstalt für Wasserbau: Anpassung der Fahrrinne von Unter- und Außenelbe an die Containerschiffahrt, Gutachten zur ausbaubedingten Änderung der morphodynamischen Prozesse (BAW-Nr A3955 03 10062)

LEHFELDT (2002). Lehfeldt, R., Milbradt, P., Zyserman, J. A., Barthel, V.: Evaluation of simulation models used for morphodynamic studies, ICCE

MARINA Handbuch (2012). smile consult GmbH

MILBRADT (2005). Milbradt, P., Sellerhoff, F., Krönert, N.: KODIBA-Abschlussbericht, smile consult GmbH

MILBRADT (2008). Milbradt, P., Dorow, C.: ImTG-Abschlussbericht

MILBRADT (1995). Zur mathematischen Modellierung großräumiger Wellen- und Strömungsvorgänge, Inst. f. Bauinformatik