

Einführung, Aufgabenstellung und Bearbeitungsstruktur im KFKI-Projekt AufMod

Harro Heyer und Kerstin Schrottke

Zusammenfassung

Auslöser für das Vorhaben **Aufbau** von integrierten **Modellsystemen** zur Analyse der langfristigen Morphodynamik in der Deutschen Bucht (AufMod, 2009-2012) war eine im Jahr 2008 durchgeführte Ausschreibung des Kuratoriums für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI) mit einer detaillierten Anforderungsliste.

Es galt vor allem, die großräumigen und langfristig stattfindenden geomorphologischen Veränderungen in der Deutschen Bucht zu erfassen und die Prozesse, die diese Veränderungen bewirken, vor dem Hintergrund einer physikalisch plausiblen Wirkungskette zu analysieren. Hierzu war es notwendig, alle verfügbaren bathymetrischen (einschließlich lokal auftretender Bodenformen) wie sedimentrelevanten Daten zu akquirieren, durch neue Datenerhebungen zu vervollständigen und für die Zwecke des Projekts aufzubereiten.

Um diese umfangreiche Aufgabe sinnvoll umzusetzen, wurde im Projekt die Entscheidung getroffen, ein umfassendes softwaregestütztes Bodenmodell zu generieren. Damit sollten Daten zur Bathymetrie und Sedimentbeschaffenheit gemeinsam verwaltet und funktional, d. h. nach spezifischen Vorgaben, verarbeitet und dem Anwender bzw. den Simulationsmodellen anforderungsgerecht zur Verfügung gestellt werden. Dieses sogenannte Funktionale Bodenmodell wurde zudem mit Methoden für datenbasierte Analysen ausgestattet.

Die Erhebung konsistenter Felddaten zur morphologischen Ausprägung, zum geologisch-sedimentologischen Aufbau sowie zur sedimentphysikalischen Beschaffenheit und Dynamik der Gewässersohle auf verschiedenen Raum- und Zeitskalen erfolgte unter Verwendung eines multi-methodischen Ansatzes. Datenerhebung und -auswertung wurden, soweit möglich, nach einem zuvor festgelegten Standard durchgeführt. Die Messungen wurden insbesondere in ausgewählten Gebieten (Fokusegebieten) vorgenommen. Die Gebiete repräsentierten dabei vor allem die wesentlichen, in der Deutschen Bucht dominierenden Küstenelemente wie den Schelf, die Watten und die Ästuar.

Im Rahmen der Anwendung deterministischer Prozessmodelle wurde ein konsequenter Multi-Modell-Ansatz mit morphodynamischen Simulationsmodellen unterschiedlicher Prozessauflösung verwendet, um die Streubreite der Ergebnisse abschätzen zu können. Für die Modelle, welche auf unstrukturierten Modellverfahren basieren, wurden überwiegend identische Gitternetze und Randwerte verwendet. Soweit möglich, wurde auch ein einheitliches Post-Processing durchgeführt, um den Vergleich der Modellergebnisse mit einheitlichen Methoden zu gewährleisten. Mit diesen im Gesamtvorhaben getroffenen Vereinbarungen und Regelungen war gewährleistet, dass die Formulierung „integriertes Modellsystem“ nicht nur eine leere Worthülse blieb. Die Integration des Modellsystems stand auf verschiedenen Säulen:

1. Alle Simulationsmodelle wurden durch das Funktionale Bodenmodell mit Eingangsdaten versorgt.
2. Die Simulationsmodelle nutzten – soweit verfahrensbedingt möglich – einheitliche Eingangsdaten (Gitternetze, Randwerte).
3. Die Modelle wurden vergleichend validiert. An der Validierungsstrategie wird noch weitergearbeitet.
4. Die Modellergebnisdaten wurden, soweit derzeit möglich, mit einheitlichen Methoden prozessiert.
5. Ausgewählte Simulationsdaten wurden in das Funktionale Bodenmodell übernommen und konnten dort auch für datenorientierte Analysen herangezogen werden.

In einer abschließenden Synthese wurden alle relevanten Resultate der Teilprojekte einbezogen und eine übergreifende, gemeinsame Bewertung zur Beantwortung der in der KFKI-Ausschreibung formulierten Ziele erstellt.

Schlagwörter

Nordsee, Deutsche Bucht, Bathymetric, Sedimentverteilung, Sedimentzusammensetzung, Morphodynamik, Bodenmodell, numerisches Modell, Simulation

Summary

The main objective of the multidisciplinary research project AufMod (2009 – 2012) was the development of model-based tools for analyzing long-term sediment transport and morphodynamic (MD) processes in the German Bight. AufMod aimed at bringing together marine geoscientists and coastal engineers to build up consistent bathymetric and sedimentological databases and to compare different numerical models, using the same data input and model grid with respect to uncertainties of their results.

AufMod provides a suite of consistent annual bathymetries as well as initial sediment parameters, which can be used by numerical MD models for further analyses. Different patchy datasets from bathymetric survey campaigns since 1948 have been compiled and undergone a sophisticated post-processing procedure to overcome inconsistencies due to the use of different echosounding techniques, vessels, tidal correction and so on. For the first time, data on grain-size distribution have been composed for the entire North Sea / German Bight in order to analyze geomorphological processes and to calculate sediment input parameters for morphodynamic modelling. By establishing a so-called "Functional Seabed-Model" consistent annual bathymetries and initial sediment distribution and composition (grain-size distribution) have been made available together with their spatial and temporal uncertainties.

The morphodynamic numerical model simulations cover a time span from 1996 to 2008 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 MD models for further analyses. By using the same model grids the strength and weakness of the different numeric models can be evaluated and their uncertainties can be assessed. The morphodynamic model results give a first comprehensive impression of the resulting sediment transport pathways in the German Bight.

Keywords

North Sea, German Bight, bathymetry, topography, sediment distribution, sediment mixture, sediment transport, morphodynamics, seabed model, numeric model, simulation

Inhalt

1	Einführung in die Problematik	3
2	Grundlagen der Ausschreibung des KFKI	4
3	Aufgabenstellung – Konkretisierung innerhalb des AufMod-Projektes	5
3.1	AufMod-A (Bodenmodell)	5
3.2	AufMod-B (Bodenformen)	6
3.3	AufMod-C (Prozessorientierte Modellierung)	6
3.4	AufMod-D (Morphodynamische Langzeitsimulation)	7
3.5	AufMod-E (Modellbasierte Analyse)	8
3.6	AufMod-F (Bodenmodell)	9
3.7	AufMod-G (Bodenmodell)	10
4	Struktur und Zusammenarbeit im Verbundprojekt	11
4.1	Konzeptioneller Aufbau des Bodenmodells und der Simulationsmodellierung	12
4.2	Zusammenwirken/Interaktion von Boden- und Simulationsmodellierung	15
4.3	Dokumentation der Daten und Analysen	16
5	Gemeinsame Darstellung der Untersuchungsergebnisse	17
5.1	Thematische Gliederung im Sonderband	17
5.2	Abschlussbericht	17
5.3	Internetpräsenz	17
6	Danksagung	18
7	Schriftenverzeichnis	18

1 Einführung in die Problematik

„Die langfristige Morphodynamik der Deutschen Bucht steht im Fokus vieler wissenschaftlicher und praktischer Fragestellungen. Das liegt nicht zuletzt daran, dass dieses Küstensystem ein unersetzlicher Naturraum für die wertvollsten Ökosysteme unseres Planeten sowie für die Stabilisierung des Wasserkreislaufes und des Klimas darstellt. Ferner ist es ein unverzichtbarer Lebens- und Wirtschaftsraum unter wachsendem Besiedlungs- und Nutzungsdruck“ (OUMERACI 2013).

Die Folgen der intensiven wirtschaftlichen Nutzung und des wahrscheinlichen Klimawandels müssen hierzulande, insbesondere im Gebiet der Deutschen Bucht und der Nordsee-Ästuare, analysiert und prognostiziert werden können. Hierzu bedarf es wissenschaftlicher wie ingenieurpraktischer Methoden und Werkzeuge, mit denen die Eingriffe in das Natursystem minimiert und die Schutzfunktionen für Mensch und Natur

weitergehend optimiert werden können. Dieses Ziel, das man allgemein auch als Daseinsvorsorge an der Küste bezeichnen kann, stellt insbesondere auch für das Küsteningenieurwesen eine weitreichende Herausforderung dar, weil der Sedimenttransport und die Morphodynamik der Gewässersysteme vielfältige Veränderungen bewirken. Hierzu gehören z. B. zu- oder abnehmende strömungs- und seegangsbedingte Belastungen auf die Gewässersohle sowie auf Bauwerke, Küsten- und Uferbereiche. Die Hydromorphologie, insbesondere der Sedimenttransport und die Morphodynamik prägen vor allem auch die Lebensbedingungen in den vielfältigen Habitaten in und an der Deutschen Bucht.

Die für das Küsteningenieurwesen definierten Sachthemen stellen die Erfassung der Naturvorgänge, die Transport- und Formänderungsprozesse sowie die Belastungen und Grundlagen zur Bemessung der Bauwerke in den Vordergrund. Hierfür ist das permanent fortgeführte Monitoring der klassischen Zustandsgrößen der Küstengewässer unverzichtbar. Die erhobenen Daten ermöglichen Langzeitstudien, mit denen das Veränderungs- bzw. Anpassungspotenzial der Küste im Hinblick auf natürliche und bauwerksbedingte Einflussgrößen eingeschätzt wird. Die in der Analyse angestrebte Trennung zwischen natürlichen und bauwerksinduzierten Wechsel- und Auswirkungen ist ein wesentliches und herausragendes Merkmal des Küsteningenieurwesens. Im Hinblick auf die Bauwerke werden dabei z. B. Aspekte des Küsten- und Hochwasserschutzes, des See- und Strombaus, des Verkehrswasserbaus, des Hafenausbaus oder auch der Bauwerke auf offener See unterschieden. Insofern ist die Küsteningenieurforschung als ein sehr wichtiger Bestandteil der Küstenforschung einzustufen, die sich weiter gefasst mit dem Lebensraum der Küste beschäftigt (HEYER 2012). Vor diesem Hintergrund hat das KFKI im Jahr 2008 eine Rahmenausschreibung für ein Forschungs-Verbundprojekt zur großräumigen und langfristigen Morphodynamik in der Deutschen Bucht durchgeführt.

2 Grundlagen der Ausschreibung des KFKI

Forschungsobjekt der KFKI-Rahmenausschreibung zur großräumigen und langfristigen Morphodynamik in der Deutschen Bucht war die Deutsche Nordseeküste mit Fokus auf das Küstenvorfeld, die Vorstrände und Strände, die Inseln und Wattgebiete sowie die Tideflüsse. Im konzeptionellen Projektansatz sollten insbesondere Computermodelle berücksichtigt werden. Im Einzelnen wurden folgende Forschungsziele bzw. maßgebliche Untersuchungsinhalte und -grundlagen formuliert:

- Erstellung und Verwendung plausibilisierter, konsistenter Daten zur Bathymetrie und Sedimentverteilung.
- Berücksichtigung der gezeiten- und winderzeugten Strömungen wie auch der seegangs- und brandungserzeugten Strömungen.
- Definition und Analyse von Sedimentverteilungsmustern und deren Stabilität sowie von Sedimenttransportwegen, -richtungen, -mengen und -bilanzen zum Verständnis der langfristigen und großräumigen Sedimentdynamik.
- Analyse und Prognostizierung großräumiger Transport- und Formänderungsprozesse über verschiedene Zeitskalen.
- Ergebnisbasierte Darstellung der Streubreite verschiedener deterministischer Modellverfahren, neuronaler Netze und empirischer Modellansätze.
- Einbindung der Ergebnisdaten in eine offene Datenbank zur Nutzung durch Dritte.

- Gewährleistung über die Verwendung der Modellsysteme für ausgewählte Szenarien (erwartetes Klima, Anstieg des Meeresspiegels und Änderung des Seegangsklimas).

3 Aufgabenstellung – Konkretisierung innerhalb des AufMod-Projektes

Der von der Rahmenausschreibung des KFKI formulierte Anforderungskatalog war sehr umfangreich und ließ sich nur im Zusammenschluss interdisziplinär verzahnter Teilprojekte unter dem Dach einer übergreifenden Projektkoordination bewältigen. Seitens der Antragsteller wurde dazu das multi-disziplinäre Projekt mit dem Titel „Aufbau von integrierten Modellsystemen zur Analyse der langfristigen Morphodynamik in der Deutschen Bucht (AufMod)“ mit insgesamt neun beteiligten Institutionen vorgeschlagen. Dabei wurde eine Gliederung in die Teilprojekte AufMod-A bis AufMod-G vorgenommen (an AufMod-F sind drei Einrichtungen einer Universität beteiligt). Sechs Institutionen beschäftigten sich mit den umfangreichen datenorientierten Aufgaben zum Bodenmodell. Zwei Institutionen nutzten auf Grundlage des Bodenmodells prozessbasierte bzw. prozessorientierte Simulationsverfahren. Eine Institution war sowohl am Bodenmodell als auch an der Modellierung beteiligt.

Es wurde eine Förderung durch das BMBF über das KFKI beantragt und bewilligt.

Aus den für die einzelnen Teilprojekte zusammengestellten Anforderungen galt es ein konzeptionelles Modell zu entwickeln, welches für das Gesamtvorhaben steht und zur ökonomischen Realisierung der Anforderungen beitragen sollte. Die im Projekt angestrebte Vorhabensökonomie musste durch intensive Zusammenarbeit, Mehrfachverwendbarkeit von Teilprodukten und gemeinsame Vorgehensweisen erreicht werden.

Die Hauptziele und Arbeitsschwerpunkte der einzelnen Teilprojekte entsprachen in der Summe im Wesentlichen dem Anforderungskatalog der Rahmenausschreibung des KFKI. Einzig die brandungserzeugten Strömungen sowie die Anwendung der Methode der Neuronalen Netze fanden keine Berücksichtigung. Die wichtigsten Arbeitsschwerpunkte der Teilbeiträge zum Gesamtprojekt sind nachfolgend zusammengefasst.

3.1 AufMod-A (Bodenmodell)

Institution: Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH)

Ziel: Aufbau und Plausibilisierung des Bodenmodells „Deutsche Bucht“ mit seiner Dynamik als Grundlage für die numerische Modellierung

Arbeitsschwerpunkte:

- Entwicklung eines plausibilisierten und möglichst konsistenten Bodenmodells unter Einbindung bathymetrischer und sedimentologischer Daten
- Aufarbeitung und Homogenisierung der bestehenden Sedimentdaten
- Weitere Probennahmen und Analysen bei Datenlücken
- Plausibilisierung der Dynamik des Bodenmodells
- Aufnahme und Analyse sedimentologischer Zeitreihen in ausgewählten Gebieten
- Grunddaten zur Validierung morphodynamischer Simulationsmodelle

Die Umsetzung erfolgte in Zusammenarbeit mit den Teilprojekten AufMod-B, AufMod-F und AufMod-G. Qualitätsgeprüfte Ergebnisse wurden in der GIS-Geodatenbank des Shelf Geo-Explorer des BSH, der in die Marine Dateninfrastruktur Deutschland (MDI-DE) eingebunden ist, abgelegt.

3.2 AufMod-B (Bodenformen)

Institution: Universität Bremen, Zentrum für marine Umweltwissenschaften (MARUM)

Ziel: Quantitative Evaluation bestehender empirischer Gleichungen zur Prognose sub-mariner Bodenformen und deren Wirkung auf die Hydro- und Sedimentdynamik in Küstengewässern.

Arbeitsschwerpunkte:

- Datengenerierung zur Entstehung, Gestalt und Wirkung von Bodenformen
- Mathematische Beschreibung bzw. Parametrisierung der verschiedenen Bodenformen
- Formulierung der hydraulischen Rauheit
- Evaluation bestehender empirischer Formeln
- Flächenhafte Verschneidung repräsentativer bathymetrischer, hydrodynamischer, sedimentologischer und geomorphologischer Kennwerte
- Vorhersagen und verbesserte Ansätze

Generell werden für Berechnungen zur Entstehung und Dynamik von Bodenformen empirische Beziehungen unterschiedlicher Komplexität und Datengrundlage verwendet. Dabei werden dimensionslose Parameter zur Beschreibung der relevanten Zustandsgrößen formuliert und deren beste Korrelationsfunktion angegeben. Die Verschneidung und Analyse flächendeckend hochaufgelöster bathymetrischer und sedimentologischer Daten, verschnitten mit zeitaufgelösten, repräsentativen hydrodynamischen Informationen, ermöglicht ein vertieftes Verständnis über das Auftreten und die Entwicklung von Bodenformen.

Die Ergebnisse der Untersuchungen aus AufMod-B flossen unmittelbar in das Bodenmodell ein.

3.3 AufMod-C (Prozessorientierte Modellierung)

Institution: Bundesanstalt für Wasserbau, Außenstelle Küste (BAW)

Ziel: Analyse langfristiger, großräumiger Prozesse durch prozessbasierte Simulation der Deutschen Bucht.

Die skalenübergreifende, prozessbasierte 3D- und 2D-Modellierung des Gesamtsystems Nordsee, Deutsche Bucht, Wattenmeer und Ästuar diente in hoher Modellauflösung der Validierung der Modellergebnisse für Zeitspannen von mehreren Jahren. Grundlage hierbei waren die konsistenten bathymetrischen Daten aus dem Bodenmodell. Eingesetzt wurden die Modellverfahren UnTRIM mit SediMorph und K-Modell (auf unstrukturierten Gitternetzen: UnK) sowie DELFT3D und SWAN. Generiert wurden Modellergebnisdaten und der Vergleich von Modellergebnissen mit den Projektpartnern.

Arbeitsschwerpunkte:

- Analyse von Messdaten
- Hydro- und sedimentdynamische Prozessanalyse (3D)
- Tide- und Seegangswirkung in der Nordsee und der Deutschen Bucht
- Simulation mit verschiedenen Modellverfahren – längerfristige Zeiträume
- Nutzung der durch die Projektpartner plausibilisierten Bathymetriedaten
- Verwendung des Bodenmodells für die Simulation (Korn- und Formrauheit – räumliche Sedimentverteilung)
- Simulation von Hydrodynamik, Salztransport und Seegangswirkung – Vergleich mit Messwerten (Kalibrierung und Validierung) für Jahreszeiträume
- Simulation des fraktionierten Sedimenttransportes – Analyse der Sedimentdynamik und morphologische Reaktion der Sohle in Rückwirkung auf die Hydro- und Sedimentdynamik
- Vergleich der berechneten Bodenumlagerungen mit bathymetrischen Vermessungsdaten
- Erste Prognosen großräumiger Transport- und Formänderungsprozesse
- Beschickung einer Datenbank mit den Simulations- und Analyseergebnissen
- Qualitätsmanagement der Rechenergebnisse und Datenbankanhalte
- Systemverständnis zu den langfristigen Sedimentbewegungen und morphologischen Veränderungen im Küstenvorfeld und den Ästuarmündungen
- Einfluss ausgewählter Klimaänderungsszenarien auf die sedimentologischen und morphodynamischen Verhältnisse
- Qualitätsgeprüfte Ergebnisse wurden über einen Server der BAW in die MDI-DE eingebunden

3.4 AufMod-D (Morphodynamische Langzeitsimulation)

Institution: Universität der Bundeswehr, München (Uni-Bw)

Ziel: Morphodynamische Langzeitsimulation durch Entkopplung von Hydro- und Morphodynamik.

Die Simulation der Morphodynamik bis zu einem über 100-jährigen Zeitraum sollte auf einem hoch aufgelösten, unstrukturierten Modellgitter durch Lösung der allgemeinen Sohlevolutionsgleichung im (hier eigenständigen) morphodynamischen Modul SediMorph erfolgen. Dabei galt es, sehr kurze Simulationszeiten auf Supercomputern zu realisieren, so dass verschiedene Szenarien simuliert und ausgewertet werden konnten. In den Seeschiffahrtsstraßen wurden Nassbaggerungen und Umlagerungen des Baggergutes im Gewässersystem als unverzichtbarer Faktor für Langfristuntersuchungen berücksichtigt (Einsatz des morphodynamischen Moduls DredgeSim).

Arbeitsschwerpunkte:

- Mittelfristige (10 Jahre) bis langfristige (100 Jahre) Simulation der Morphodynamik
- Lösen der Sohlevolutionsgleichung (deterministisches Verfahren)
- Berücksichtigung der Bestandteile des anstehenden Bodens, fraktioniert durch verschiedene Sedimentklassen

- Berücksichtigung treibender hydromechanischer, meteorologischer und anthropogener Prozesse durch parametrisierte Datenmodelle (von der Morphodynamik entkoppelt)
- Datenmodelle aus empirischen oder deterministischen Quellen
- Einsatz des Verfahrens SediMorph-UnS (simuliert Morphodynamik bei beliebig einsteuerbaren Belastungen)
- Übernahme morphologischer Anfangsbedingungen aus dem Bodenmodell
- Belastungen aus Gezeitenströmungen resultierend aus flächenhaften Partialtidenkennwerten
- Sohlschubspannungen oder Strömungsgeschwindigkeiten aus der Impulserhaltung
- Berücksichtigung des Seegangs durch das Entwickeln verschiedener Szenarien
- Berücksichtigung anthropogener Eingriffe wie Baggerungen und Verklappungen

Die Methode der Entkopplung (Hydrodynamik aus Partialtiden generiert) erwies sich als nicht zielführend. Aus diesem Grund wurde nach der Hälfte der Bearbeitungsdauer auf eine andere Methodik zurückgegriffen. Hierbei handelte es sich um das Modellsystem TELEMAC/SISYPHE. Dieses wurde dann durch Kopplung mit dem vorhandenen Modul DredgeSim und dem Einsatz massiver Parallelisierung erfolgreich für große Zeitspannen eingesetzt!

3.5 AufMod-E (Modellbasierte Analyse)

Institution: smile consult GmbH, Hannover (smile)

Ziel: Modellbasierte Analyse langfristiger Formänderungsprozesse an der deutschen Nordseeküste in enger Verknüpfung von daten- und prozessbasierten Simulationsmodellen.

Die datenbasierten Modelle sollten vertiefte Analysen der zurückliegenden morphodynamischen Entwicklungen in der Deutschen Bucht durch die Bestimmung von Erosions- und Sedimentationsraten, morphologischen Geschwindigkeiten und resultierenden Sedimenttransportraten zulassen. Die Verknüpfung mit hydrodynamischen und meteorologischen Daten sollte die Identifikation von Ursache-Wirkungsbeziehungen und die Entwicklung datenbasierter Prognosemodelle ermöglichen. Ergänzend galt es, prozessbasierte Simulationen für Zeitspannen von mehreren Wochen bis zu wenigen Jahren mit einem holistischen Modellverfahren durchzuführen. Morphologische Geschwindigkeiten und resultierende Transporte sollten sowohl aus den daten- als auch aus den prozessbasierten Modellen gewonnen werden. Sie bildeten die Grundlage für die Entwicklung morphodynamischer Langzeitsimulationen für ausgewählte Zeitspannen. Die Erzeugung generischer Identifikatoren für morphologische Kenngrößen (Tiefenänderungsraten, morphologische Geschwindigkeiten, ...) sollte nicht nur eine einheitliche Bewertung der unterschiedlichen Modellsysteme ermöglichen, sondern auch zu einem Ausgleich der modellspezifischen Unsicherheiten und Defizite führen.

Arbeitsschwerpunkte:

- Methode zur datenbasierten Beschreibung der morphodynamischen Entwicklungen auf Grundlage von Vermessungen
- Methode der prozessbasierten numerischen Simulation für die Morphodynamik
- Enge Verzahnung beider Herangehensweisen (Methoden)

- Quantifizierung von daten- und messspezifischen Unsicherheiten und Defiziten sowie Abschätzung von deren Fortpflanzung in den daten- und prozessgetriebenen Modellen
- Entwicklung integrativer Identifikations-, Analyse- und Vorhersageverfahren für Formänderungsprozesse
- Aufbau von daten- und prozessbasierten hierarchischen morphodynamischen Modellen
- Holistische Simulationsrechnungen von Hydrodynamik, Seegang und Morphodynamik für unterschiedliche charakteristische Zeiträume
- Erstellung und Evaluierung unterschiedlicher Strategien der langzeitmorphodynamischen Simulation
- Durchführung von langzeitmorphodynamischen Modelluntersuchungen in der Deutschen Bucht
- Entwicklung von Kopplungsstrategien zwischen datenbasierten und prozessbasierten Modellen
- Archivierung der Simulations- und Analyseergebnisse in einem offenen Informationssystem
- Qualitätsmanagement der Modellbeschreibungen und Simulationsergebnisse

3.6 AufMod-F (Bodenmodell)

Institutionen an der Christian-Albrechts-Universität Kiel:

- Exzellenzcluster „Future Ocean“ (ExC)
- Institut für Geowissenschaften (IFG)
- Forschungs- und Technologiezentrum (FTZ) Büsum

Ziel: Datenerhebungen und Analysen zur Stabilität von Sedimentverteilungsmustern in der Deutschen Bucht.

Es galt konsistente Felddaten zur morphologischen Ausprägung, zum geologisch-sedimentologischen Aufbau, zur sedimentphysikalischen Beschaffenheit und zur Dynamik der Gewässersohle auf verschiedenen Raum- und Zeitskalen zu erheben. Diese sind für die Weiterentwicklung und Anwendung von morphodynamischen Modellen zur großräumigen und Langzeit-Simulation zwingend erforderlich. Diese Daten dienen dabei auch der Erweiterung des Prozessverständnisses. Hochauflösende und gleichzeitig flächendeckende Datensätze sollten mittels moderner, vor allem hydroakustischer Messsysteme, einschließlich hochgenauer Positionierung und „Groundtruthing“, erhoben, analysiert, interpretiert und sowohl in das Bodenmodell einfließen als auch in Form konsistenter und plausibilisierter Modelleingangsparameter zur Verfügung stehen. Im Vergleich früherer Herangehensweisen mit punktueller Informationsermittlung galt es, so ein vollständigeres flächenhaftes Bild zu den Verhältnissen der Gewässersohle zu erzeugen und damit einen wesentlichen Beitrag zur Analyse und zum Verständnis der langfristigen Sediment- und Morphodynamik der Deutschen Bucht zu leisten. Alte Datensätze sollten, soweit möglich, mit neuen Daten verschnitten bzw. zu vergleichenden Analysen herangezogen werden.

Arbeitsschwerpunkte:

- Hochauflösende, flächendeckende Erfassung der Gewässersohle in ausgewählten Untersuchungsgebieten
- Erstellung eines detaillierten Abbildes der Gewässersohle hinsichtlich Sedimentzusammensetzung und -verteilung, Sedimentmächtigkeit und soweit möglich Sedimentmobilität
- Bereitstellung neuer Interpretationsansätze der die Morpho- und Sedimentdynamik steuernden Parameter und Prozesse auf verschiedenen Zeitskalen
- Erarbeitung flächendeckender Sedimentparameter zur Entwicklung des Funktionalen Bodenmodells „Deutsche Bucht“ mit abgestimmter Parametrisierung für Langzeitsimulation der Morphodynamik
- Erarbeitung plausibilisierter „Gitter-Datensätze“ zur Sedimentologie als flächenhafter Eingangsdatensatz für die numerische Modellierung
- Quantitative Erfassung der Dynamik der Modellparameter in repräsentativen Teilflächen von Schelf, Vorstrand, Watten und Ästuaren
- Erarbeitung hochaufgelöster Datensätze für die Verifikation der Modellergebnisse
- Beschreibung von großräumigen Sedimentumlagerungen, -transportwegen und -transportraten (Synthese numerischer Modellergebnisse und geologisch/sedimentologischer Analysen)

Die Datenerhebung erfolgte in repräsentativen Teilgebieten (Fokusgebiete) des Schelfs/Vorstrandes, der Watten und der Ästuare in Zusammenarbeit mit AufMod-A, AufMod-B und AufMod-G. Eine qualitätsgesicherte Speicherung der relevanten Ergebnisse erfolgte im Shelf Geo-Explorer des BSH (vgl. Kap. 3.1).

3.7 AufMod-G (Bodenmodell)

Institution: Senckenberg am Meer (SaM), Wilhelmshafen

Ziel: Erhebung und Analyse bathymetrischer und sedimentologischer Daten in den verschiedenen Fazies-Räumen der deutschen Nordsee zum Aufbau und zur Plausibilisierung des Funktionalen Bodenmodells und seiner Dynamik im Hinblick auf fazielle Einheiten als Grundlage für die numerische Modellierung.

Die Datenerhebung sollte speziell im Küstenvorfeld der Insel Spiekeroog sowie im Bereich der nördlichen Jade durchgeführt werden. Die Bereitstellung konsistenter und plausibilisierter Eingangsdatensätze erfolgte in dokumentierter Qualität in Zusammenarbeit mit den Teilprojekten AufMod-A, AufMod-B und AufMod-F.

Relevante Ergebnisse wurden qualitätsgesichert in der Geodatenbank des Shelf Geo-Explorers abgelegt und recherchierbar gemacht.

Arbeitsschwerpunkte:

- Erstellung eines konzeptionellen Sedimenttransportmodells sowie Umsatz in die numerischen Modelle mittels eines kombinierten Methodenansatzes
- Beschreibung von Sedimentumlagerungen, Sedimenttransportwegen und Transportraten im Rahmen großräumiger Faziesräume
- Modellierung – Langfristige und großräumige Sedimentdynamik
- Prognosen zur Veränderung weiträumiger Transport- und Verteilungsprozesse

- Ausgewählte Szenarien in Rückkopplung mit numerischen Modellen
- Bodenmodell „Deutsche Bucht“ mit abgestimmter Parametrisierung für die großräumige und Langzeit-Simulation der Morphodynamik
- Plausibilisierte „Gitter-Datensätze“ zur Bathymetrie
- Dynamikbereich der Modelle/reale morphologische und sedimentologische Zeitreihen
- Hydroakustische Untersuchungen im Küstenvorfeld von Spiekeroog und in der nördlichen Jade
- Parametrisierung der Modelle über flächendeckende Datensätze

4 Struktur und Zusammenarbeit im Verbundprojekt

Bei der Bearbeitung des multidisziplinären Forschungsprojektes wurden einzelne Institutionen zu thematisch zusammenhängenden Teilprojekten (TP) kombiniert. Aus diesen fünf TP wurden die beiden Säulen der gemeinsamen Forschung gebildet: das Bodenmodell und die numerischen Simulationsmodelle.

Die Zusammenarbeit der Teilprojekte und Partner wurde in einem Kooperationsvertrag durch die Verbundkoordination über das Präsidium der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel geregelt. Der Verbund fügte sich der Gesamtleitung durch den Koordinator. Damit wurde eine funktionierende Projektorganisation ermöglicht. Eine Übersicht zur Projektorganisation zeigt Abb. 1. Die Bedeutung des Bodenmodells im Hinblick auf die Aufgabenstellung ist hieraus ersichtlich.

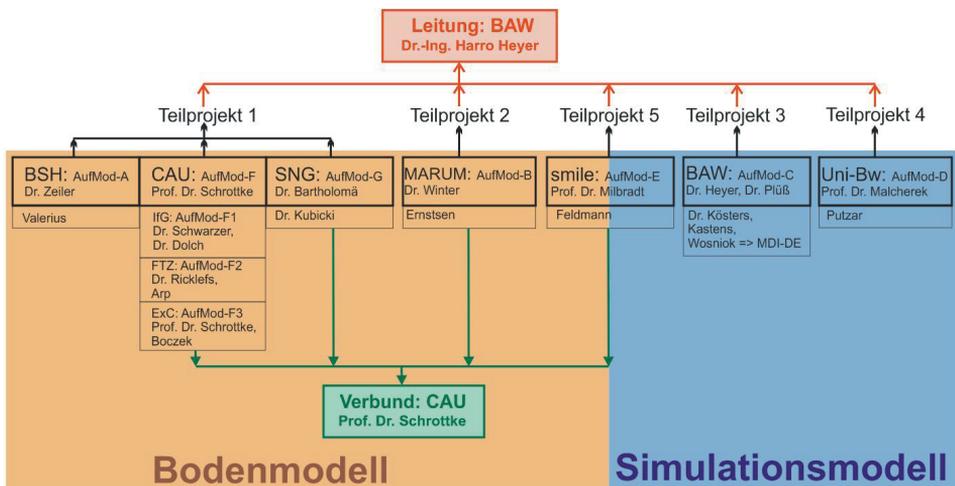


Abbildung 1: Struktur der Organisation des Projekts AufMod.

Die interdisziplinäre Zusammenarbeit wurde durch wiederholte Treffen auf unterschiedlichen Sachebenen und durch regen Datenaustausch realisiert. Über den gesamten Projektzeitraum hinweg fanden in regelmäßigem Turnus Sitzungen des ganzen Projektverbunds statt, innerhalb derer der Arbeitsstand der einzelnen Teilprojekte vorgestellt und fachübergreifende Sachthemen diskutiert sowie Organisatorisches abgestimmt wurden. Darüber hinaus wurden auch Treffen in kleineren Arbeitsgruppen initiiert, um Vorgehen

oder Antworten auf fachspezifische Fragestellungen zu erarbeiten. Die Zusammensetzung der Beteiligten richtete sich dabei nach den jeweiligen thematischen Anliegen. Auch bei diesen Treffen wurde darauf geachtet, fachfremde Kollegen aus anderen Teilprojekten mit einzubeziehen, um aus dem interdisziplinären Ansatz möglichst viel Nutzen zu ziehen. Zur Entwicklung eines gegenseitigen Verständnisses für andere Fachdisziplinen wurden darüber hinaus Workshops und Doktoranden-Seminare zur datenbasierten Modellierung, zum Simulationsverfahren TELEMAC, zu den Messverfahren für die Aktualisierung und Verfeinerung des Bodenmodells und zur gemeinsamen Synthese im Gesamtprojekt durchgeführt.

4.1 Konzeptioneller Aufbau des Bodenmodells und der Simulationsmodellierung

Wiederholte bathymetrische Vermessungen und Aufnahmen der Sedimentverteilung und -charakteristik über verschiedene Zeitepochen bilden die Grundlage für die Analyse der morphologischen Entwicklung des Meeresbodens in der Deutschen Bucht. Die Ursachen morphologischer Veränderungen bzw. der Sedimenttransporte, die in Raum und Zeit einer erheblichen Variabilität unterliegen können, lassen sich damit jedoch meist nicht abschließend erfassen. Ein vollständiges Systemverständnis kann vielmehr in einer übergreifenden Ergebnisauswertung datengetriebener Bodenmodelle und prozessbasierter Simulationsmodelle erlangt werden. Hierzu bedarf es eines integrierten Modellsystems, das die Möglichkeit eröffnet, Analysen aus datengetriebenen Modellen des Gewässerbodens und aus prozessbasierten Simulationen der Wechselwirkungen zwischen dem Gewässer und der Gewässersohle auf einheitlicher Datengrundlage und nach einheitlichen Kriterien, Methoden und Kennwerten durchführen zu können. Die Variabilität der Sedimenttransporte, die in komplexer Weise mit den Gezeiten des Meeres und dem stochastischen Wettergeschehen, aber auch in rückgekoppelter Weise mit der morphodynamischen Veränderung des Meeresbodens verknüpft ist, wird dabei berücksichtigt.

Das integrierte Modellsystem zur Analyse der langfristigen Morphodynamik basiert im Wesentlichen auf zwei Säulen (siehe Abb. 2):

- dem Modell für die Gewässersohle → konzeptionelles Bodenmodell und
- den hydromorphologischen Modellen → konzeptionelles Simulationsmodell

Bathymetrie und Bodenformen sowie der Aufbau und die Zusammensetzung der Gewässersohle sind auf der Basis von Beobachtungsdaten im Bodenmodell zusammengefasst (braune Säule). Die Daten des Bodenmodells lassen sich mit meteorologischen und hydrodynamischen Beobachtungsdaten zur Modellsteuerung und Modellvalidierung der verschiedenen Modellsysteme des konzeptionellen Simulationsmodells verwenden (blaue Säule mit gelben Kästen). Ergebnisse aus den morphodynamischen Simulationsmodellen fließen wiederum in das Funktionale Bodenmodell zur verbesserten Interpretation der Messdaten ein.

Die für das konzeptionelle Bodenmodell zusammengetragenen und um projektspezifische Metadaten erweiterten Messdaten stellen umfangreiche, jedoch oft räumlich fleckenhafte und zeitlich inkonsistente Geodatensätze dar, welche mittels geeigneter Interpolations- und Approximationsverfahren (MILBRADT et al. 2005; MILBRADT et al. 2009) zu flächenhaften Informationen für unterschiedliche Zeitmarken verarbeitet wurden. Mit

den hierfür entwickelten Methoden und Verfahren wurde das konzeptionelle Bodenmodell zu einem Funktionalen Bodenmodell (FBM) erweitert, womit die bereits zu Projektbeginn angestrebte Vorhabensökonomie maßgeblich unterstützt wurde. Das Funktionale Bodenmodell basiert allgemein ausgedrückt auf Mengen von Messdaten, zugehörigen Metadaten und Interpretationsvorschriften (Interpolations- und Approximationsmethoden). Räumlich umfasst es die gesamte Nordsee.

Das FBM ermöglicht prototypische Anwendungen der Methoden für den Export abgeleiteter Daten zur Analyse und Modellsteuerung. Durch die Kombination verschiedener Datenquellen stellt das Funktionale Bodenmodell erweiterte Sichten auf Daten und Modelle des konzeptionellen Bodenmodells zur Verfügung.

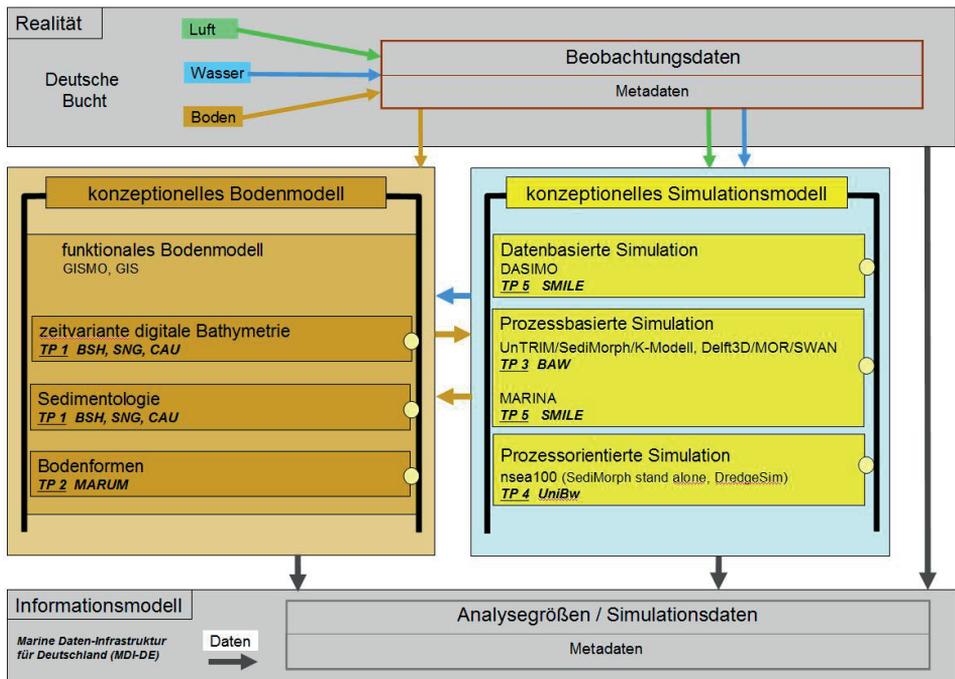


Abbildung 2: Konzeptioneller Ansatz des integrierten Modellsystems.

Der geologische Aufbau und die Zusammensetzung des Bodens sowie die unterschiedlichen Skalen der räumlichen Strukturen als auch der zeitlichen Veränderungen führen zu ganz unterschiedlichen Modellvorstellungen. Zur Beschreibung des morphologischen Zustandes und der zeitlichen Entwicklung der Gewässersohle in der Deutschen Bucht, der Küstengebiete und der Ästuarer wurde in AufMod ein Multi-Methodenansatz verwendet, um diesen unterschiedlichen räumlichen und zeitlichen Skalen gerecht zu werden.

- Für die Beschreibung der bathymetrischen Entwicklung in der gesamten Deutschen Bucht wurden die Vermessungsdaten des BSH und der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung (WSV) zusammengetragen und in einem zeitvarianten bathymetrischen Modell aggregiert.
- Für die Beurteilung der räumlichen Verteilung und Entwicklung kleinräumiger Strukturen wurden Modelle der Gewässersohle auf der Basis von hochauflösenden

hydroakustischen Messdaten unter Einbeziehung von Einzelmessungen und Bodenproben aufgebaut.

- Die Modellierung der Entstehung und Entwicklung von Bodenformen, wie beispielsweise von subaquatischen Dünen, erfolgte auf der Basis von Analysen hochauflösender bathymetrischer Vermessungsdaten. Die Bodenformen flossen in parametrisierter Form in das Modul „Bathymetrie“ des Funktionalen Bodenmodells ein.
- Für den sedimentologischen Aufbau wurden Modelle auf der Basis von alten und neuen Sedimentproben (z. B. Korngrößenverteilungen auch aus Datenbanken wie z. B. MUDAB, Sedimentkataster der WSV u. a.) mit Daten hochauflösender Messtechniken (Seitensichtsonar) verknüpft, um sowohl großräumig als auch insbesondere in den Fokusgebieten kleinräumig die Sedimentverteilung und Bodenbeschaffenheit zu verstehen und mit den gestaltenden hydrodynamischen Prozessen in Verbindung zu bringen.

Die Erhebung neuer Felddaten erfolgte nicht nur in enger Absprache mit Projektpartnern aus den „messenden“ Einrichtungen, sondern auch in aufeinander aufbauenden Abstimmungen mit der gesamten Projektgruppe. So wurde erreicht, dass die Datenerfassung, soweit möglich, einheitlich bzw. standardisiert erfolgte und die Belange der modellierenden Fraktion aufgenommen werden konnten. Besonderes Augenmerk wurde dabei auch bei der Auswahl der die Messdaten flankierenden Metadaten gelegt. Das in AufMod entwickelte Bodenmodell bildet den Rahmen für alle messtechnisch erhobenen Parameter, die den Meeresboden betreffen. Felddaten sind darin in Verbindung mit fachspezifischen geologischen Interpretationen gesetzt, um eine dreidimensionale Beschreibung des Gewässerbodens und insbesondere der oberen Sedimentschichten an der Gewässersohle zu erhalten. Für den Aufbau des Bodenmodells wurden Daten aus verschiedenen Quellen zusammengeführt sowie neue Daten erhoben. Folgende Parameter und Eigenschaften wurden betrachtet:

- Bathymetrie = Höhenlage der Gewässersohle
- Bodenformen (hier insbesondere subaquatische Dünen)
- Beschaffenheit des Oberflächensediments (anhand von Auswertungen der Seitensichtsonaraufnahmen und Kopplung mit Bodenproben)
- Korngrößenverteilung der Oberflächensedimente
- Porosität
- Prozentualer Anteil organischer Komponenten bei kohäsiven Feinsedimenten
- Mächtigkeit der mobilen Deckschicht = Sedimentmächtigkeit

Um das breite Spektrum der Phänomene und Fragestellungen aus dem Bereich der Morphodynamik der Deutschen Bucht abdecken zu können, wurde für das konzeptionelle Simulationsmodell ein Multi-Modellansatz genutzt (PLÜB and HEYER 2007). Die in AufMod eingesetzten Simulationsmodelle lassen sich sowohl nach systemtheoretischen (datenbasiert, prozessbasiert, prozessorientiert) als auch nach physikalischen Aspekten klassifizieren. Bezüglich der durch die Simulationsmodelle beschreibbaren Zeitspannen morphodynamischer Entwicklungen lassen sich die Modelle unterteilen in

- kurzfristige Zeitspannen (Tage bis zu einem Jahr),
- mittelfristige Zeitspannen (Jahre bis Jahrzehnte) und
- langfristige Zeitspannen (Jahrzehnte bis 100 Jahre).

Weitere Unterteilungen ergeben sich bezüglich der berücksichtigten physikalischen Phänomene sowie deren Granularität (Auflösung im Modell). Eine Übersicht des konzeptionellen Simulationsmodells gibt Abb. 3.

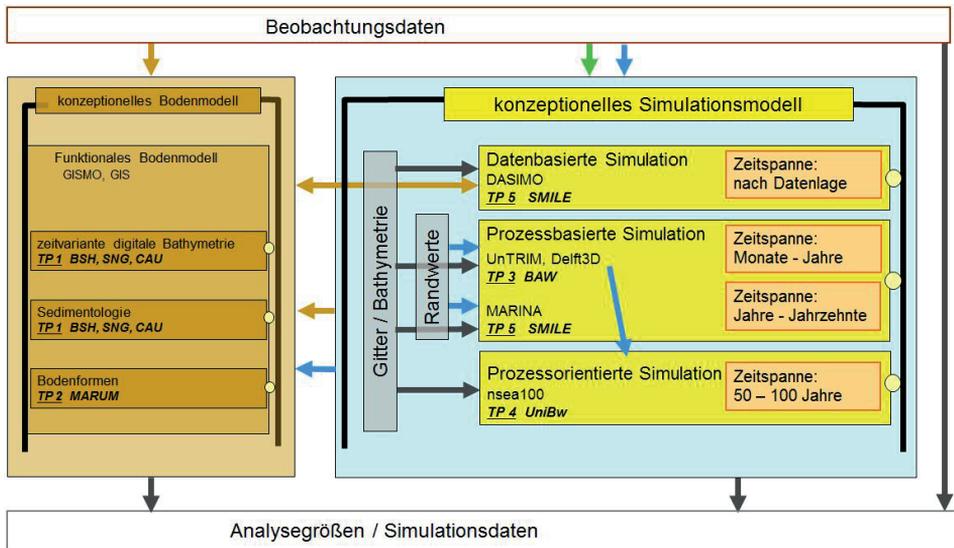


Abbildung 3: Übersicht des konzeptionellen Simulationsmodells.

4.2 Zusammenwirken/Interaktion von Boden- und Simulationsmodellierung

Im Gesamtprojekt AufMod wurde eine rückgekoppelte Verzahnung der Produkte aus Boden- und Simulationsmodell realisiert. Das Funktionale Bodenmodell liefert je nach Fragestellung und betrachteter Zeitspanne unterschiedliche Ergebnisse zur Beschreibung und Analyse des Meeresbodens. Hierzu gehören vor allem initiale

- Bathymetrien,
- Korngrößenverteilungen,
- Informationen über schwer erodierbare Bodenhorizonte,
- Porositäten usw.

Diese Produkte des Funktionalen Bodenmodells bilden gemeinsam mit den zeitlich zuordnenden hydrodynamischen und meteorologischen Daten die wesentliche Grundlage zur Steuerung der morphodynamischen Simulationsmodelle.

Zur Plausibilisierung und Validierung der morphodynamischen Simulationsmodelle wurden Hindcast-Rechnungen durchgeführt und mit Ergebnissen aus dem Bodenmodell verglichen. Hierzu gehörten die aus dem Bodenmodell abgeleiteten Analysen zu:

- Änderungen der Bathymetrie (morphologisch aktiver Raum),
- Änderungen der Korngrößenverteilung,
- Änderungen der Bodenformen sowie
- morphologische Geschwindigkeiten.

Mit den Informationen aus dem Bodenmodell konnten die Parametrisierungen der morphodynamischen Simulationsmodelle verbessert werden. Aus den im Projekt zusammengetragenen Bodenformverteilungen wurden in Verbindung mit hydrodynamischen Modellergebnissen Verbesserungen der Formulierungen für die Formrauheiten in den hydrodynamischen Modellen erreicht. Die Kornrauheit wurde direkt aus der Korngrößenverteilung des Bodenmodells ohne zusätzliche Parametrisierung übernommen.

Für eine umfassende morphodynamische Analyse der Vorgänge in der Deutschen Bucht ist die Datengrundlage hinsichtlich Abdeckung in Raum und Zeit immer noch lückenhaft. Die Übertragung der häufig nur punktuell vorliegenden Messdaten in die Fläche erforderte deshalb für die jeweilige Fragestellung geeignete Interpolations- und Approximationsmethoden. Eine Verbesserung der dafür einzusetzenden Interpretationsvorschriften konnte durch Hinzunahme weiterer physikalischer Parameter erfolgen. Hierzu gehören beispielsweise

- die Ausrichtung der netzfreien Interpolation der Bathymetrie nach den resultierenden Strömungen und
- die Berücksichtigung von mittleren Bodenschubspannungsverteilungen bei der Interpolation von Korngrößenverteilungen.

Mit diesem Vorgehen ließen sich Lücken in den Daten des Bodenmodells mit den Ergebnissen der morphodynamischen Modelle auffüllen. Die mit dem Bodenmodell gewonnenen Analysen und auch die im Funktionalen Bodenmodell implementierten Methoden konnten mit Ergebnissen der Simulationsmodelle ergänzt und verbessert werden. Insbesondere die datenbasierte Simulation profitierte so von Bodeninformationen und prozessbasierten Simulationsanalysen gleichermaßen.

4.3 Dokumentation der Daten und Analysen

Im zeitlich parallel zu AufMod durchgeführten F&E Projekt Marine Dateninfrastruktur Deutschland (MDI-DE) wurden die Grundlagen für eine webbasierte Veröffentlichung von Daten nach internationalen Standards geschaffen. Diese Standards wurden für einen „Infrastrukturknoten des BSH“ und den „Shelf Geo-Explorer“ in der Geodateninfrastruktur des BSH umgesetzt. Die Produkte aus AufMod konnten in der MDI-DE mit standardisierten Webdiensten und Metadaten aufbereitet und langfristig bereitgestellt werden.

In den Standardisierungsorganisationen befinden sich die Webdienste jedoch teilweise noch in Entwicklungs- und Veränderungsprozessen, was zu mitunter aufwendigen Anpassungen bei der Bereitstellung von Modellierungsdaten sowie zu weiterem Forschungsbedarf geführt hat. Die derzeit abgestimmten Dateninfrastrukturen der MDI-DE boten dennoch eine gute Grundlage für die erfolgreiche Durchführung des Projekts AufMod. Die umfangreichen Ergebnisse von AufMod werden auf dieser Grundlage langfristig bereitgestellt und einer breiten Öffentlichkeit verfügbar gemacht. Hierzu dient das zentrale Portal der MDI-DE (MDI-DE 2014).

5 Gemeinsame Darstellung der Untersuchungsergebnisse

Die gemeinsame Darstellung der umfangreichen Ergebnisse aus dem Verbundprojekt sind in Form von Zwischenberichten und einem Abschlussbericht als Datenprodukte über das Internet verfügbar. Die Veröffentlichung ausgewählter Ergebnisse ist in diesem Band, im Rahmen der Schriftenreihe „Die Küste“ (Heft 83, 2015), inhaltlich gegliedert und wird in 10 separaten Artikeln mit unterschiedlichen Verfassern dokumentiert.

5.1 Thematische Gliederung im Sonderband

Der AufMod-Sonderband ist thematisch in separate Artikel wie folgt gegliedert:

1. Einführung
2. Das Funktionale Bodenmodell: Aufbereitung einer konsistenten Datenbasis für die Morphologie und Sedimentologie
3. Erfassung von Sandverteilungsmustern zur großräumigen Analyse der Sedimentdynamik auf dem Schelf der Deutschen Bucht
4. Die Verteilung und Eigenschaften von Bodenformen in der Deutschen Bucht, eine Rekonstruktion der Karten von Ulrich (1973)
5. Zur zeitlichen Variabilität der Sedimentverteilung in den Gezeitenrinnen Piep und Hever
6. Schließen von Datenlücken und Verbesserung der Messmethoden
7. Entwicklung und Anwendung eines Langfrist-Morphodynamikmodells für die Deutsche Bucht
8. Analyse des Sedimenttransports und der Morphodynamik in der Deutschen Bucht auf Basis des Multi-Modell-Ansatzes
9. Datenmanagement in AufMod
10. Synthese der interdisziplinären Forschung in AufMod

5.2 Abschlussbericht

Der gemeinsame Abschlussbericht aller am Projekt beteiligten Institutionen ist zentral gespeichert und abrufbar bei:

Technische Information Bibliothek (TIB) Hannover
(DOI = 10.2314/GBV:780783271) und verlinkt unter:
<http://edok01.tib.uni-hannover.de/edoks/e01fb14/780783271.pdf>

5.3 Internetpräsenz

Informationen und Daten über und von AufMod können über das Internet recherchiert und heruntergeladen werden. Dazu einige URL-Adressen:

- KFKI: <http://www.kfki.de/prj-aufmod/en>
- MDI-DE: <https://www.mdi-de.org/>
- AufMod Projektseite unter MDI-DE:
<http://projekt.mdi-de.org/verwandte-projekte/40-aufbau-von-integriertenmodellsystemen.html>

- GeoSeaPortal, das Geodatenportal des BSH auch mit AufMod-Daten:
<https://www.geoseaportal.de/>

6 Danksagung

Unser Dank gebührt dem Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI), das dieses Projekt aus Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) unter der Leitung des Projektträgers Jülich (PTJ) finanziell über einen Zeitraum von drei Jahren gefördert hat. Weiterhin danken wir dem KFKI für die fachliche Unterstützung im Rahmen der projektbegleitenden Gruppe. Unser Dank gilt auch allen Behörden und Institutionen, die Daten für die Realisierung des Projektes bereitgestellt haben. Zuletzt bedanken wir uns bei allen Projektpartnern für die konstruktive Zusammenarbeit.

Die einzelnen Förderkennzeichen lauten:

- AufMod-A: 03KIS082 (Bodenmodell BSH)
- AufMod-B: 03KIS083 (Bodenformen)
- AufMod-C: 03KIS084 (Prozessorientierte Modellierung)
- AufMod-D: 03KIS085 (MD-Langzeitsimulation)
- AufMod-E: 03KIS086 (Modellbasierte Analyse)
- AufMod-F: 03KIS087 (Bodenmodell Uni Kiel)
- AufMod-G: 03KIS087 (Bodenmodell SaM)

7 Schriftenverzeichnis

- HEYER, H.: Forschung und Entwicklung im Küsteningenieurwesen – Ein Beitrag zum Themenhorizont aus aktueller Sicht. In: KFKI Aktuell, Jg. 12, 1, 1-2, 2012.
- 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, <http://edok01.tib.uni-hannover.de/edoks/e01fb14/780783271.pdf>, 2013.
- MDI-DE (Hrsg.): Webseite, Stand 23.06.2014: <http://www.mdi-de.org>.
- MILBRADT, P.; DOROW, C. und ASCHE, C.: Identifikation morphologischer Tendenzen und Geschwindigkeiten im Küstennahbereich (ImTG). Abschlussbericht KFKI-Projekt 03KIS059. Leibniz Universität Hannover: <http://edok01.tib.uni-hannover.de/edoks/e01fb10/620636149.pdf>, 2009.
- MILBRADT, P.; SELLERHOFF, F. und KRÖNERT, N.: Entwicklung und Implementierung von Methoden zur Aufbereitung konsistenter digitaler Bathymetrien KODIBA. Abschlussbericht KFKI-Projekt 03KIS042. Hannover, smile consult GmbH, 2005. <http://edok01.tib.uni-hannover.de/edoks/e01fb05/493564357.pdf>
- OUMERACI, H.: KFKI-Forschung im Küsteningenieurwesen. In: KFKI Aktuell, Jg. 13, 2, 1-2, 2013.
- PLÜB, A. and HEYER, H.: Morphodynamic Multi-model Approach for the Elbe estuary. In: DOHMEN-JANSSEN, C. and HUSCHLER, S. (Hrsg.): River, Coastal and Estuarine Morphodynamics: RCEM 2007, Two Volume Set. 113-117. doi: 10.1201/NOE0415453639-c15, 2007.