

Das Funktionale Bodenmodell: Aufbereitung einer konsistenten Datenbasis für die Morphologie und Sedimentologie

Peter Milbradt, Jennifer Valerius und Manfred Zeiler

Zusammenfassung

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 für Hydrodynamik, Transportvorgänge und Morphodynamik. Die Güte auch dieser prozessbasierten morphodynamischen Simulationsmodelle hängt wesentlich von den für den Modellbetrieb und die Validierung zur Verfügung stehenden Naturdaten ab. Das Funktionale Bodenmodell stellt die softwaretechnische Grundlage für eine konsistente Datenbasis zur Beschreibung der Oberfläche des Meeresbodens dar.

Im Beitrag werden sowohl die Datenbasis und die softwaretechnische Realisierung als auch die ableitbaren Produkte vorgestellt.

Schlagwörter

Nordsee, Deutsche Bucht, Sedimentzusammensetzung, Sedimentverteilung, Porosität, Bathymetrie, Sedimenttransport, Morphodynamik, numerische Modellierung, mittlerer Meeresspiegelanstieg

Summary

Observation and measurement data of the sea floor were the method of analysis and description of the morphodynamischen changes on the German North Sea coast over a very long period of time. Alternative procedures are today process-based numerical simulation models for hydrodynamics, transport processes and morphodynamics. The quality of this process-based morphodynamic simulation models also depends on the natural data for the operation of the model and validation available. The functional sea floor model represents the software technical basis for a consistent data base to describe the surface of the seabed. The paper presents both the preparation of a database and the software engineering realization as well as the deriving products.

Keywords

North Sea, German Bight, sediment mixture, sediment distribution, porosity, bathymetry, sediment transport, morphodynamic, numerical modelling, mean sea level rise

Inhalt

1	Einleitung	20
2	Komponenten des Funktionalen Bodenmodells	21
3	Basisdaten.....	22
3.1	Bathymetrische und topographische Vermessungsdaten	22
3.2	Bodenformen.....	23
3.3	Sedimenteigenschaften	23
3.4	Konsolidierter Horizont.....	25
3.5	Wasserbauwerke und Ersatzmodelle.....	26
4	Methodische Grundlagen des Funktionalen Bodenmodells	26
4.1	Bathymetrische Modellkomponente.....	27
4.1.1	Raum-Zeit-Interpolation	28
4.2	Sedimentologische Modellkomponente.....	29
4.2.1	Anisotrope Interpolation.....	29
5	Produkte des Funktionalen Bodenmodells.....	31
5.1	Bathymetrische Zeitreihe Deutsche Bucht.....	31
5.2	Morphologische Parameter.....	32
5.3	Sedimentologische Parameter.....	32
5.4	Modelldaten und Gitter.....	34
6	Geomorphologische Analysen in der Deutschen Bucht	34
6.1	Bathymetrische Entwicklung der Deutschen Bucht	34
6.2	Entwicklung der Wattflächen	35
6.3	Entwicklung des Übergangs zum Schelf.....	35
6.4	Verknüpfung von Meteorologie und bathymetrischer Entwicklung	36
7	Zusammenfassung	37
8	Schriftenverzeichnis.....	37

1 Einleitung

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.

Beobachtungs- bzw. Vermessungsdaten des Meeresbodens bilden auch heute noch die Basis zur Analyse und Beschreibung morphologischer Veränderungen an der deutschen Nordseeküste sowie zum Aufbau, zur Validierung und zum Betrieb prozessbasierter Simulationsmodelle.

In den vergangenen Jahrzehnten sind viele Naturdaten des Meeresbodens neu erhoben worden. Sowohl unterschiedliche Fragestellungen, die der Datenerfassung zugrunde

liegen, als auch die stetige Veränderung bzw. Weiterentwicklung von Messverfahren führten zu einer sehr heterogenen Datenbasis. In dem im KFKI-Projekt AufMod aufgebauten Funktionalen Bodenmodell werden die Beobachtungsdaten, die die Oberfläche des Meeresbodens beschreiben, in ihrem zeitlichen und örtlichen Kontext archiviert und mit räumlichen und zeitlichen Interpolationsverfahren verknüpft. Die Zusammenführung dieser unterschiedlichen Informationen in einem Funktionalen Bodenmodell eröffnet neue Möglichkeiten der Plausibilisierung, geomorphologischen Analyse und Verknüpfung mit hydrologischen und meteorologischen Daten.

2 Komponenten des Funktionalen Bodenmodells

Das Funktionale Bodenmodell beschreibt die Oberflächeneigenschaften des Meeresbodens der Nordsee, mit besonderem Schwerpunkt auf den Bereich der Deutschen Bucht, und besteht derzeit aus folgenden Komponenten:

- Bathymetrie
 - mittlere Höhenlage des Meeresbodens
 - Bodenformen in parametrisierter Form
- Sedimentologie
 - Kornverteilung der Oberflächensedimente
 - Porosität
 - organischer Anteil im Sediment
- konsolidierter Horizont
 - holozäne Basis/Basis nordseezeitlicher Sande
- Wasserbauwerke und Ersatzmodelle

Diese Funktionalität kann um weitere Eigenschaften des Gewässerbodens erweitert werden.

Die örtliche Ausdehnung des Funktionalen Bodenmodells umfasst die gesamte Nordsee und entspricht in der Ausdehnung dem im Forschungsvorhaben AufMod betriebenen Nordseemodell (siehe Abb. 1). Als Basiskoordinatensystem wurde DHDN92 und WGS84 UTM32 zu Projektbeginn festgelegt.

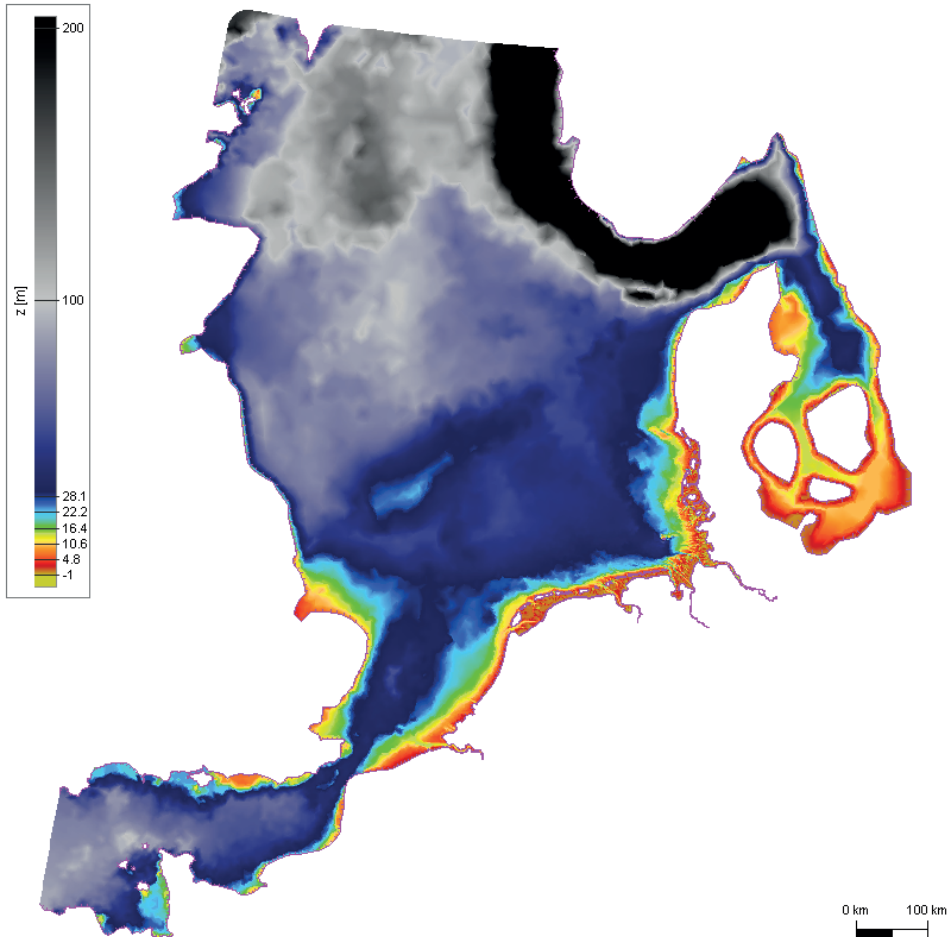


Abbildung 1: Ausdehnung des Funktionalen Bodenmodells.

3 Basisdaten

Die zusammengetragenen Basisdaten orientieren sich zunächst an den derzeit umgesetzten Komponenten des Funktionalen Bodenmodells. In den folgenden Abschnitten werden sowohl die Daten als auch die zu deren Interpretation herangezogenen Interpolationsverfahren beschrieben.

3.1 Bathymetrische und topographische Vermessungsdaten

Wesentliche Quellen der (See-)Vermessungsdaten bildeten die Datenbestände des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH), der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) und der Küstenschutzbehörden. Ergänzt wurde dieser Datenbestand durch Airborn Laserscanning-Daten aus den Projekten zur Erstellung

Digitaler Geländemodelle für den Wasserlauf (DGM-W) im Auftrag der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) und denen der Landesvermessung Schleswig-Holstein sowie digitalisierten historischen Arbeitskarten der Seevermessung des BSH. Die aus den unterschiedlichen Quellen bereitgestellten Vermessungsdaten, welche völlig unterschiedliche Charakteristika haben (Profilvermessungen, Linienpeilungen, Flächenpeilungen, Laserscandaten,...), wurden plausibilisiert, mit zugehörigen Metadaten verknüpft und in die digitale Bathymetrie-Komponente übernommen.

Insgesamt wurden mehr als 20.000 Vermessungen (~3 Mrd. Punkte) zusammengetragen. Der Erhebungszeitraum dieser Daten umfasst die Jahre von 1948 bis 2012. Neben den Vermessungsdaten von deutschen Verwaltungen und Institutionen wurden dem Projekt auch bathymetrische Daten vom Britischen Oceanographic Data Center (BODC) und der dänischen Küstendirektion zur Verfügung gestellt.

Die Übertragung der in der Regel punktuellen Information in die Fläche erfolgt durch strukturangepasste Interpolationsverfahren (MILBRADT 2011). Um zu einem Zeitpunkt eine Tiefe zu erhalten, wird eine Raum-Zeit-Interpolation verwendet (MILBRADT 2011). Auf diese Weise ist es möglich, auf frei wählbaren Modellgittern zu jedem gewünschten Zeitpunkt Tiefenwerte zu bestimmen.

3.2 Bodenformen

Im Rahmen des Projekts wurden sowohl historische Untersuchungen zur Verteilung von Bodenformen zusammengestellt als auch aktuelle Messdaten analysiert. Analoge Karten der Untersuchung von ULRICH (1973) wurden digitalisiert und dekodiert (ERNSTSEN et al. in review). Ergänzt wurden diese historischen Daten durch im Projekt erstellte Bodenformkarten für Weser, Jade und Elbe. Die Parametrisierung im Funktionalen Bodenmodell erfolgte, wie in der Abb. 2 skizziert, über eine skalare Größe, die Dünenhöhe und zwei Richtungsvektoren, die die Dünenlänge in beiden Richtungen des Dünenkamms parametrisieren.

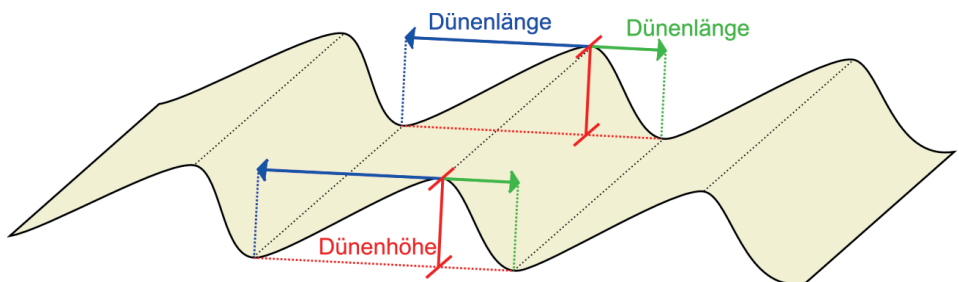


Abbildung 2: Definition der Bodenformparameter (Skizze).

3.3 Sedimenteigenschaften

Die Bestimmung der Sedimenteigenschaften ist wesentlich aufwändiger als die Vermessung der Tiefe. Anhand punktuell entnommener Bodenproben können Parameter, wie beispielsweise die Korngrößenverteilung, erfasst werden. Da für die großflächige Analyse der zeitlichen Entwicklung nicht genügend Wiederholungsmessungen vorhanden sind,

galt es für das Funktionale Bodenmodell, zunächst eine möglichst engmaschige Flächenabdeckung zu erreichen. Im Bereich der Deutschen Bucht besteht durch die räumlich hochauflösende Sedimentbeprobung des Deutschen Hydrographischen Instituts (DHI) eine sehr gute Datenbasis für die 1960er und -70er Jahre. Durch die Unterstützung der geologischen Dienste der Nordsee-Anrainerstaaten konnte eine recht gute Abdeckung für die gesamte Nordsee erreicht werden. Insgesamt wurden rd. 80.000 Korngrößenverteilungen mit unterschiedlichen Auflösungen zusammengetragen und mit Metadaten versehen. In Abb. 3 ist die Verteilung der Probenstationen grafisch dargestellt.

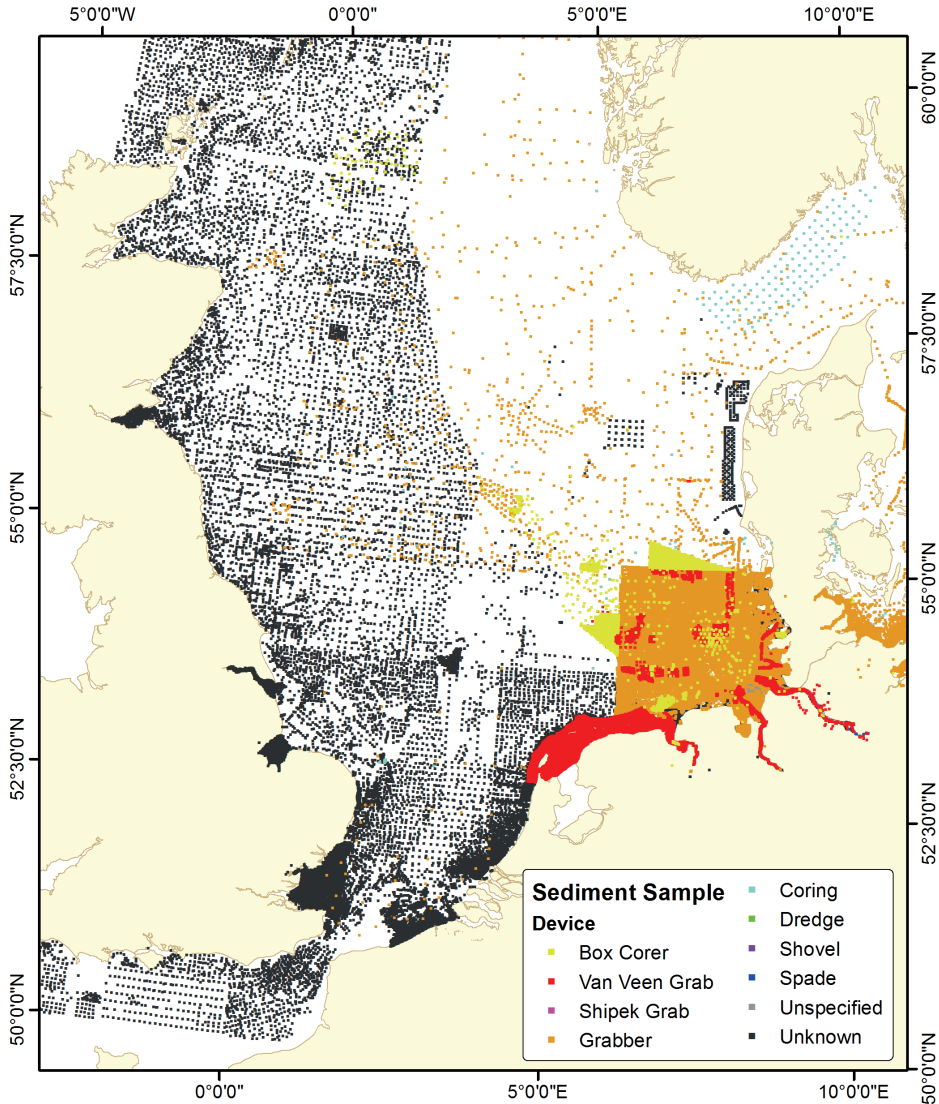


Abbildung 3: Lage und Entnahmeverfahren der zusammengetragenen Sedimentproben.

Informationen zum organischen Anteil oder der Porosität lagen nur für sehr wenige Proben vor, so dass diese Informationen in das Funktionale Bodenmodell aufgenommen wurden, jedoch für die im Weiteren dargestellten räumlichen und zeitlichen Interpolations- und Approximationsanalysen nicht nutzbar waren.

3.4 Konsolidierter Horizont

Sowohl für den Betrieb morphodynamischer Simulationsmodelle als auch geomorphologischer Analysen ist die Kenntnis des verfügbaren mobilisierbaren Sedimentes notwendig. Die Modellierung der Mächtigkeit der mobilen Deckschicht erfolgte indirekt durch den Aufbau eines Modells eines zunächst stationären konsolidierten Horizontes. Für das Modell des konsolidierten Horizontes wurde auf verfügbare Daten zurückgegriffen, die entweder die Lage der Holozänbasis oder die Basis der Nordsee-zeitlichen Sande abbilden. In Verbindung mit der zeitvarianten Bathymetrie des Funktionalen Bodenmodells ergibt sich ein zeitvariantes Modell der mobilen Deckschicht.

Quellen für den Aufbau des Modells des konsolidierten Horizontes waren die vorangegangenen KFKI-Forschungsprojekte für den Bereich der Nord- und Ostfriesischen Inseln (KFKI-Forschungsprojekt „Materialinventur an der deutschen Nordseeküste“ (ZEILER et al. 2000a) und „Wattenmeersedimente: Sedimentinventar Nordfriesisches Wattenmeer“ (EPPEL et al. 2006)). Außerdem wurden vorhandene Modelle der Holozänbasis herangezogen (RICKLEFS and ASP NETO 2005), digitalisierte Isolinien des Elbeurstromtals (FIGGE 1981) und aus der „Geologischen Küstenkarte von Niedersachsen – Relief der Holozänbasis (GHBK25)“ des Landesamtes für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG). Abb. 4 zeigt die räumliche Verbreitung der verwendeten Daten, markiert nach deren Urhebern.

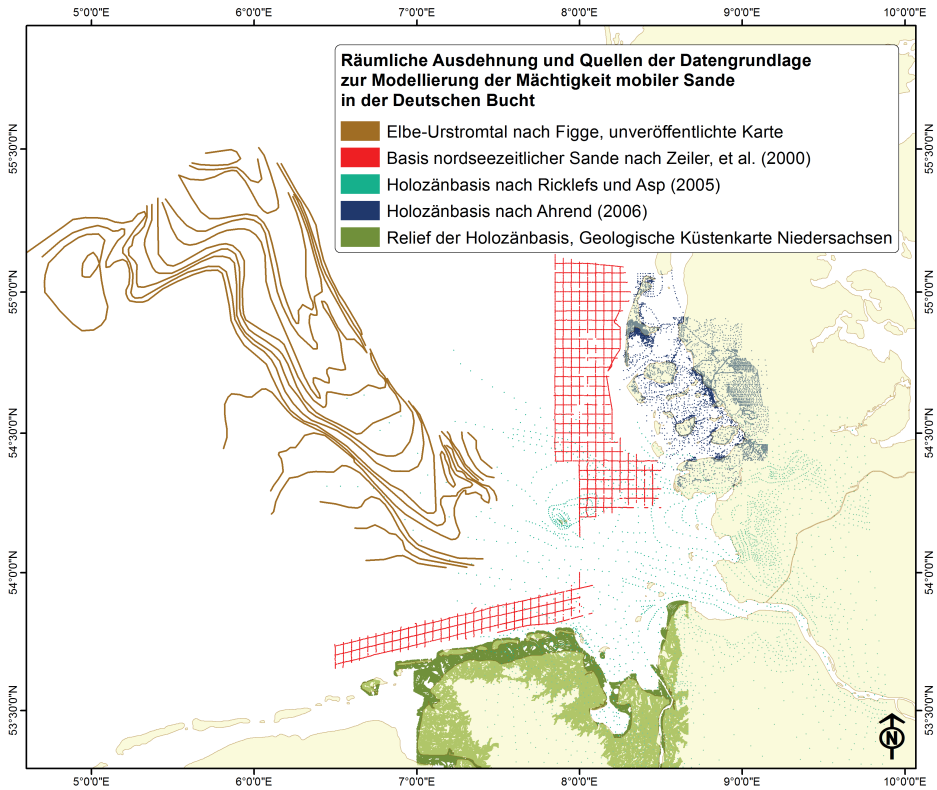


Abbildung 4: Verteilung der Datengrundlage zur Modellierung des konsolidierten Horizonts.

3.5 Wasserbauwerke und Ersatzmodelle

Große Bereiche des Küstenraumes sind geprägt durch anthropogene Eingriffe. Hierzu zählen

- starre Wasserbauwerke wie Buhnen, Leitwerke, Deckwerke, Häfen usw.
- flexible Wasserbauwerke wie Sandaufspülungen, Klappstellen usw.
- Fahrrinnen, die auf eine vorher festgelegte Tiefe zu unterhalten sind.

Starre Wasserbauwerke werden auf der Basis von Plänen, Karten und Luftbildern als entsprechende digitale Bauwerksmodelle im Funktionalen Bodenmodell berücksichtigt.

4 Methodische Grundlagen des Funktionalen Bodenmodells

Die im Funktionalen Bodenmodell integrierten Naturdaten haben sehr unterschiedliche Datendichten und -abdeckungen. Jede Komponente des Funktionalen Bodenmodells ist für zukünftige Nutzungen als zeitvariantes Modell entworfen worden. Die Möglichkeit, zeitvariable Modellergebnisse zu erhalten, hängt ganz wesentlich von den zugrundeliegenden Daten ab. Die derzeit verfügbare Datenbasis erlaubt noch nicht für alle

Komponenten zeitvariable Ergebnisse. Deshalb bestehen alle Modellkomponenten aus einem zeitinvarianten Basis-Modell und den eigentlichen Messdaten mit zugehörigen Metadaten, inklusive Angaben zu den empfohlenen Interpolationsmethoden.

Das **zeitinvariante Basismodell** stellt sicher, dass für alle Örtlichkeiten des Modellgebietes und jede Modellkomponente eine Information geliefert wird. Diese zeitinvarianten Basismodellkomponenten bekommen einen Zeitstempel, der vor allen verfügbaren gemessenen Datensätzen liegt (in der Regel 01.01.1900).

Als Modellgröße werden plausible Informationen gewählt:

- Für die örtliche *mittlere Höhenlage des Bodens* wird der Mittelwert aller gemessenen z -Werte an einem Ort verwendet und bekommt in der aktuellen bathymetrischen Modellkomponente das Datum 01.01.1900 (da die Höhenlage nicht bekannt ist, entspricht diese Vorgehensweise einer zeitlichen Extrapolation auf der Basis der Shepard-Interpolation). Für die Höhenunschärfe kann dann im Weiteren die Varianz der z -Werte am Ort verwendet werden.
- Für *Bodenformen* wird die Bodenformkarte von ULRICH (1973), mit dem Zeitstempel 01.01.1970, herangezogen. Die fehlende Richtungsinformation der Bodenformvektoren wurde auf der Basis resultierender Strömungen auf der Bathymetrie von 1970 abgeschätzt.
- Für die *Korngrößenverteilung* wird auf der Basis eines mittleren d_{50} eine lognormale Korngrößenverteilung verwendet, die den Zeitstempel 01.01.1900 bekommt.
- Die *Porosität* wird aus dem mittleren d_{50} nach WU und WANG (2006) bestimmt und bekommt den Zeitstempel 01.01.1900.
- Der *organische Anteil* wird als konstant 5 % gesetzt und bekommt den Zeitstempel 01.01.1900.
- Der *konsolidierte Horizont* entsteht aus der Verknüpfung der in Kap. 3.4 aufgeführten Datenquellen. Um die gesamte Fläche der Deutschen Bucht abzudecken, wurde in Bereichen ohne Informationen die größte Tiefe, die in allen bathymetrischen Vermessungsdaten zu beobachten war, herangezogen. Der konsolidierte Horizont bekommt den Zeitstempel 01.01.1900.

Liegen ausreichende Vermessungen über die Zeit vor, so lassen sich aus diesen Messdaten in Verbindung mit geeigneten räumlichen und zeitlichen Interpolationsverfahren **zeitvariante Modelle** ableiten. Die in AufMod zusammengetragenen Daten lassen im Prinzip nur bei den bathymetrischen Vermessungen den Aufbau einer zeitvarianten Modellkomponente zu (MILBRADT 2011). In Verbindung mit dem stationären Modell des konsolidierten Horizontes kann dann ein zeitvariantes Modell der Mächtigkeit der mobilen Sande bestimmt werden.

4.1 Bathymetrische Modellkomponente

Die digitale bathymetrische Modellkomponente basiert auf Vermessungen, zugehörigen Metadaten und Interpolationsverfahren in Raum und Zeit. Zur Beschreibung der Veränderungen des Gewässerbodens wird von der Modellvorstellung einer kontinuierlichen Funktion $z(x,y,t)$ in Raum und Zeit ausgegangen.

4.1.1 Raum-Zeit-Interpolation

Der Aufbau der bathymetrischen Modellkomponente ist in Abb. 5 schematisch dargestellt. In Bereichen, in denen Wiederholungsmessungen vorhanden sind, stellen die Zeitpunkte der frühesten und letzten Tiefenmessung die Grenzen einer kontinuierlichen Raum-Zeit-Bathymetrie dar. Innerhalb dieser kontinuierlichen Raum-Zeit-Bathymetrie können durch die im Funktionalen Bodenmodell implementierten raum-zeitlichen Interpolationsverfahren quasi-synoptische Tiefenverteilungen berechnet werden. Unter einer quasi-synoptischen Bathymetrie wird also der horizontale Schnitt durch die kontinuierliche Raum-Zeit-Bathymetrie verstanden.

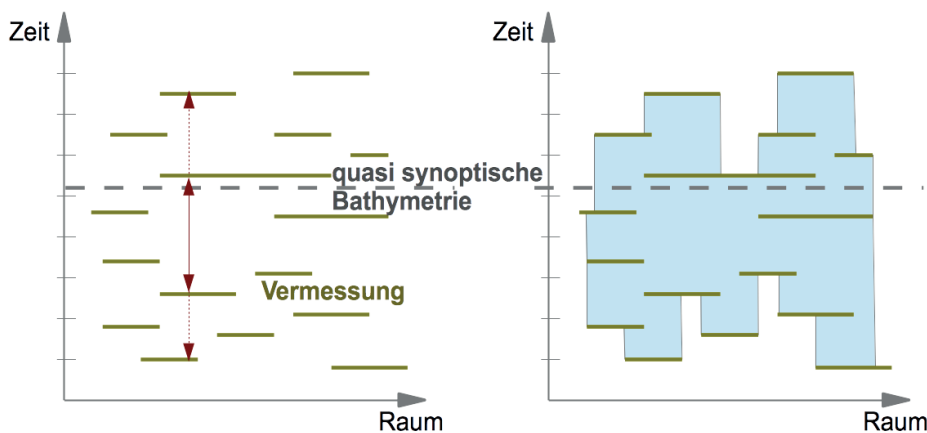


Abbildung 5: Schematische Darstellung einer Raum-Zeit-Interpolation (links) und des zeitlichen Aussagebereiches (rechts).

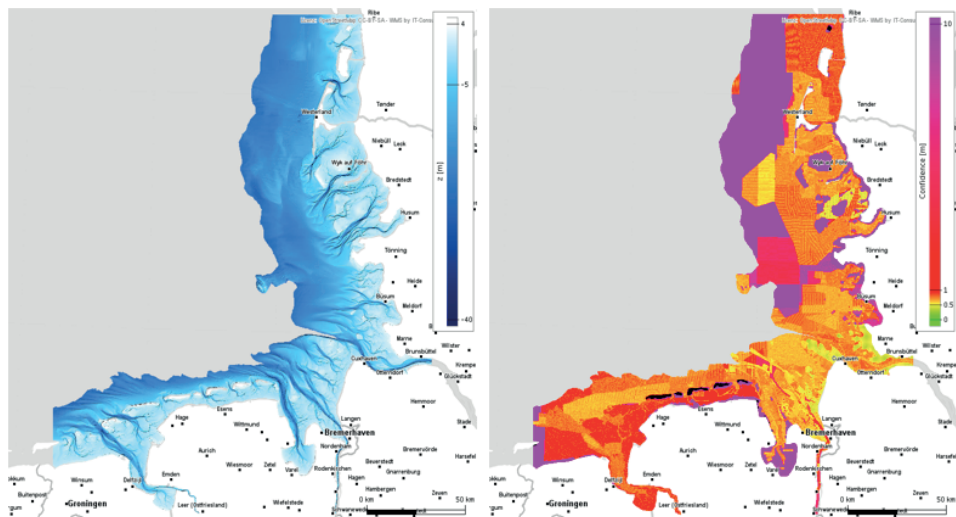


Abbildung 6: Räumlich und zeitlich interpolierte Tiefenverteilung zum 01.01.2006 (links) und zugehörige absolute Unschärfe (rechts).

Um die Lage des Gewässerbodens an einer Stelle und zu einem Zeitpunkt zu bestimmen, wird in allen betrachteten Orten aus den dort enthaltenden Vermessungen der z-Wert bestimmt und mit dem Aufnahmezeitpunkt verknüpft. Anschließend wird in der Zeit interpoliert. Abb. 6 (links) zeigt eine auf diese Weise generierte Tiefenverteilung in der Deutschen Bucht auf einem 50 m-Raster zum 01.01.2006. Die rechte Abbildung gibt die zugehörige absolute Unschärfe wieder.

Die absolute Unschärfe ergibt sich aus der Messunschärfe (in Lage und Höhe) und der durch die Interpolation in Raum und Zeit induzierten Unschärfe. In einem weiteren Schritt müssen diese induzierten Unschärfen mit den morphologischen Gegebenheiten verknüpft werden.

4.2 Sedimentologische Modellkomponente

Die Korngrößenverteilungen wurden in unterschiedlichen Auflösungen bereitgestellt. Die Bandbreite reichte von nur einem Parameter d_{50} über 3 Kornklassen bis hin zu in $\frac{1}{4}$ Phi-Graden aufgelösten Korngrößenverteilungen. Die Kornparameter wurden in Summenkurven überführt. Stand nur ein d_{50} zur Verfügung, so wurde eine Summenkurve einer Log-Normal-Verteilung herangezogen. Für alle anderen Auflösungen der Korngrößenverteilung wurde über eine monotone kubische Spline-Interpolation (KRUGER 2014) für jede Sedimentprobe eine Summenkurve generiert. Die so homogenisierten Summenkurven können nun im Rahmen von Interpolations- und Approximationsverfahren miteinander kombiniert werden.

4.2.1 Anisotrope Interpolation

Die räumliche Interpolation auf spärlich verteilten Daten erfordert speziell angepasste Interpolationsverfahren. Traditionelle Interpolationsverfahren können durch die Berücksichtigung von physikalischen Gegebenheiten deutlich verbessert werden. Zur räumlichen Interpolation der Sedimentsummenkurven wurde eine anisotrope Shepard-Interpolation herangezogen, die sich an resultierenden Sedimenttransportvektoren ausrichtete. Diese anisotrope inverse Abstandsinterpolation berücksichtigt jeweils zehn Messpunkte innerhalb einer Ellipse um den Gitternetzpunkt. Die Länge und Ausrichtung der Haupt- und Nebenachsen der Ellipse ergeben sich aus simulierten residualen Sedimenttransporten des Jahres 2006. Abb. 7 veranschaulicht die Verteilung von Messpunkten und Vektoren residualer Sedimenttransporte am Beispiel des Elbeästuars (rechte Abbildung) sowie die Ausrichtung einer Ellipse anhand von Vektoren im Gegensatz zu einem metrischen Suchradius (links).

Eine Gegenüberstellung des Mediankorndurchmessers, der durch eine anisotrope und durch eine isotrope Shepard-Interpolation modelliert wurde, ist in Abb. 8 für den Ausschnitt des Elbeästuars dargestellt. Es zeigt sich, dass das gröbere Sediment im Bereich der Hauptrinne der Elbe durch die anisotrope Interpolation weniger gesprenkelt wirkt (links) als im Falle einer isotropen Interpolation (rechts).

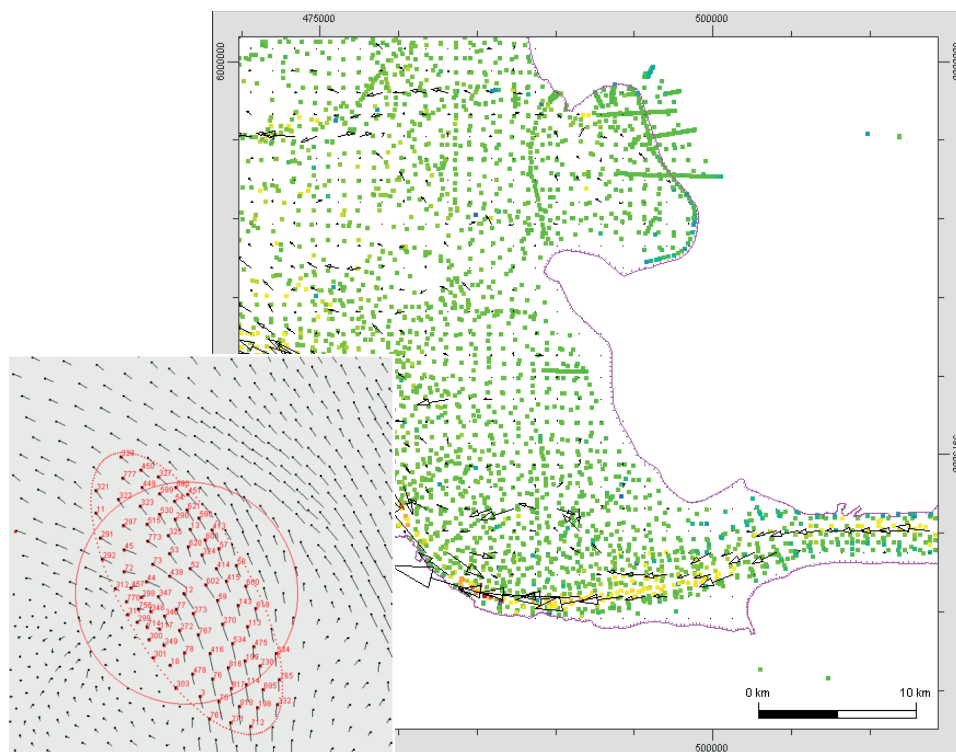


Abbildung 7: Median (d50) der Korngrößenverteilung (Punkte) und Vektoren resultierender Sedimenttransporte im Elbeästuar für das Jahr 2006. Ausrichtung einer Ellipse nach Vektoren residuärer Sedimenttransporte (links).

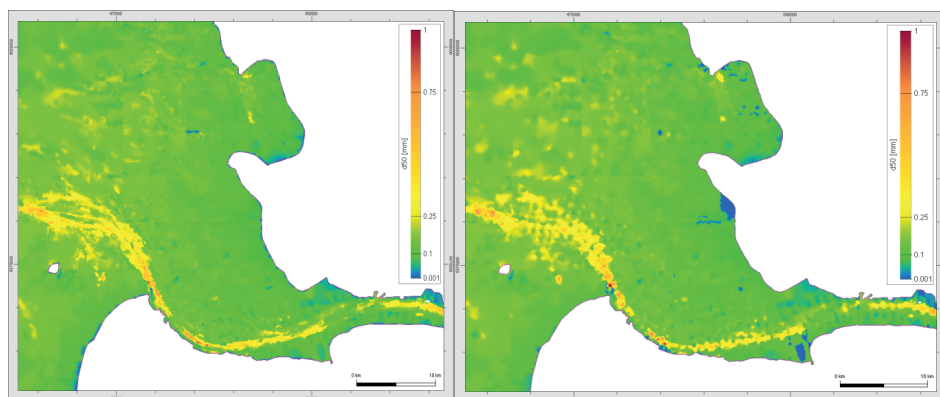


Abbildung 8: Gegenüberstellung einer anisotropen Interpolation des Medianwerts (links) und einer isotropen Interpolation (rechts) im Elbeästuar, auf Grundlage der in Abb. 7 dargestellten Messpunkte und Vektoren.

5 Produkte des Funktionalen Bodenmodells

Zu den wesentlichen Produkten des Funktionalen Bodenmodells gehören konsistente Tiefenverteilungen und daraus abgeleitete morphologische und sedimentologische Parameter.

Die Produkte stehen unter <ftp://ftp.bsh.de/outgoing/AufMod-Data> zur Nutzung zur Verfügung.

5.1 Bathymetrische Zeitreihe Deutsche Bucht

Die Tiefenverteilung der gesamten deutschen Nordsee wurde auf ein 250 m * 250 m-Raster interpoliert, zeitlich bezogen auf den 01.06.2012. Für den morphologisch hoch dynamischen Küstennahbereich war es aufgrund der umfangreichen Wiederholungsmessungen möglich, zeitvariante Bathymetrien zu berechnen.

Der Zeitraum dieser Datenreihe reicht von 1982 bis 2012, wobei jeweils zum 01.06. eines jeden Jahres eine Topographie raum-zeitlich interpoliert wurde. Die räumliche Auflösung des Modellgitters dieser umfangreichen Zeitreihe beträgt 50 m * 50 m, mit einer Ausdehnung von der Küstenlinie bis zur seewärtigen 20 m-Isobathe (vgl. Abb. 9). Zusätzlich werden für jeden Tiefendatensatz zwei Indikatoren zur Einschätzung der Güte der Tiefenapproximation aufgrund der Modellbildung und des zeitlichen und örtlichen Abstandes zu den Messpunkten angegeben. Die *Confidence* beschreibt hierbei eine absolute Unschärfe (vgl. Kap. 4.1.1), wohingegen *Minimum dt* die zeitliche Entfernung der nächsten Vermessung, die zur Interpolation herangezogen wurde, beschreibt.

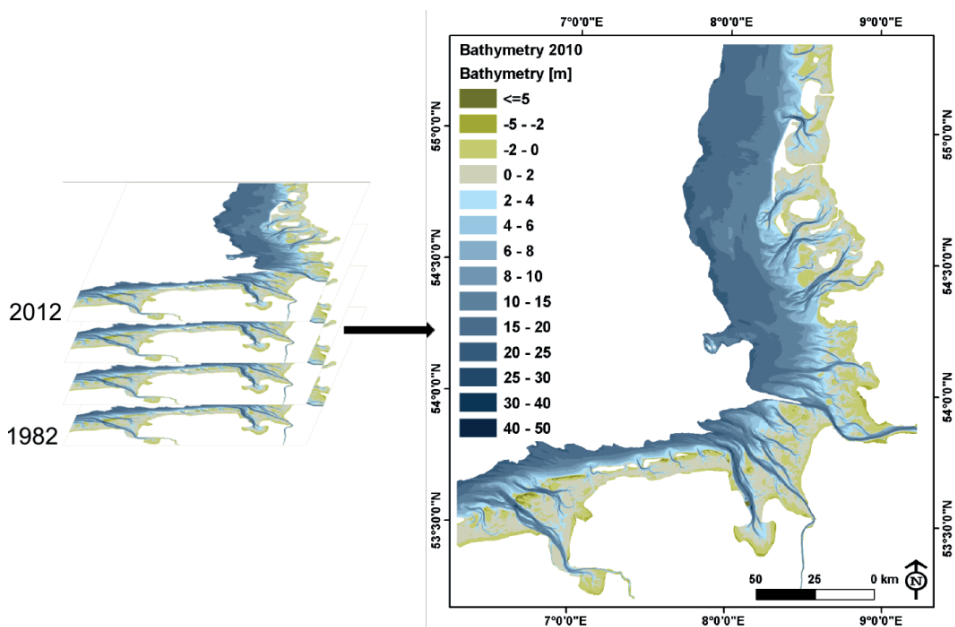


Abbildung 9: Bathymetrische Zeitreihe mit jährlichen Tiefenverteilungen über den Zeitraum 1982 - 2012, jeweils zum 01.06.2010. Rechts: Zeitscheibe vom 01.06.2010, nach der Klassifizierung im Fachinformationssystem „Shelf Geo-Explorer“ des BSH.

5.2 Morphologische Parameter

Durch analytische und statistische Auswertungen der bathymetrischen Zeitreihe können weitere Informationen über die Morphodynamik des Betrachtungsraums gewonnen werden.

Bathymetrische Änderungsraten (Erosions- und Sedimentationsraten) erhält man, indem Tiefendifferenzen zweier Jahrestopographien für unterschiedliche Zeiträume (1, 5, 10 und 30 Jahre) berechnet werden.

Der *Morphologische Raum* errechnet sich aus der Differenz der maximalen und minimalen Tiefe an jedem Gitterpunkt. Er gibt demnach Aufschluss über die Mächtigkeit der maximalen Sedimentverlagerung innerhalb des Betrachtungszeitraums ($(z_{\max}-z_{\min})$, vgl. Abb. 10 links). Dieser Wert eignet sich besonders zur Analyse der großräumigen Morphodynamik. Auf diese Weise lassen sich die hochdynamischen Rinnen von den weniger mobilen Wattflächen gut abgrenzen. Es ist jedoch nicht ersichtlich, ob im betrachteten Zeitraum Sedimentation oder Erosion stattgefunden hat. Auch das Zeitintervall, in dem die morphologische Aktivität stattgefunden hat, ist nicht erkennbar.

Ein weiterer Parameter zur Analyse der Morphodynamik ist der *Morphologische Drive* ($((dz/da)_{\max}-(dz/da)_{\min})$), die Differenz aus der größten beobachteten Sedimentation und Erosion (vgl. Abb. 11, rechts). Diese Kenngröße ermöglicht eine Aussage darüber, ob eine morphologische Änderung über den Betrachtungszeitraum stetig verlief oder ob Extremereignisse stattgefunden haben. Hiermit lässt sich auch die Verlagerung von Rinnen gut identifizieren.

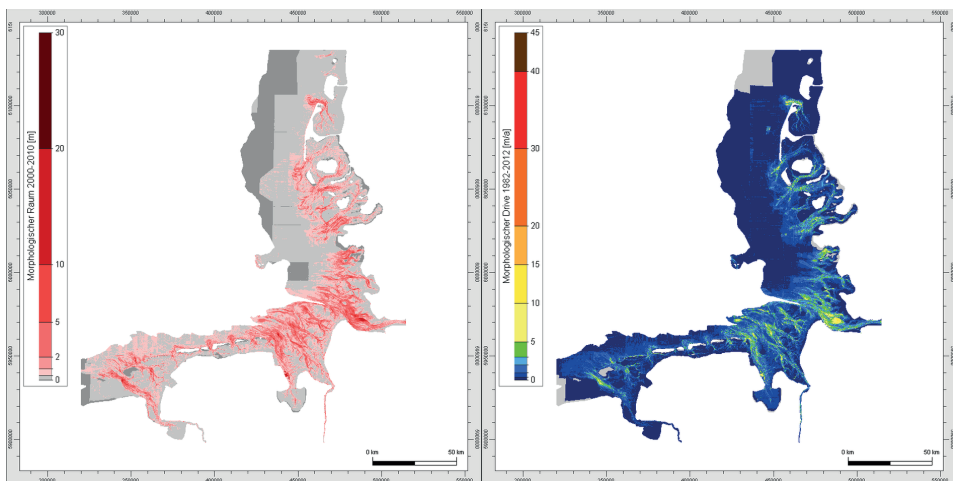


Abbildung 10: Bathymetrischer Raum und Drive für den Küstenstreifen der Deutschen Bucht.

5.3 Sedimentologische Parameter

Für den Bereich der Deutschen Bucht wurden Korngrößenverteilungen auf ein $250\text{ m} \times 250\text{ m}$ -Raster nach dem in Kap. 4.2.1 beschriebenen Verfahren interpoliert. Auf der Grundlage dieser Kornsummenkurven wurden folgende Parameter als Produkte für den Bereich der Deutschen Bucht aufbereitet:

- Median-Korndurchmesser der interpolierten Kornsummenkurve
- Mittelwert des Korndurchmessers
- Sortierung nach TRASK (1932)

$$\sqrt{\frac{D_{75}}{D_{25}}} \quad (1)$$

- Sortierung nach FOLK und WARD (1957)

$$\sigma_1 = \frac{\Phi_{84} - \Phi_{16}}{4} + \frac{\Phi_{95} - \Phi_5}{6,6} \quad (2)$$

- Schiefe nach FOLK und WARD (1957):

$$Sk_1 = \frac{\Phi_{16} + \Phi_{84} - 2 \cdot \Phi_{50}}{2 \cdot (\Phi_{84} - \Phi_{16})} + \frac{\Phi_5 + \Phi_{95} - 2 \cdot \Phi_{50}}{2 \cdot (\Phi_{95} - \Phi_5)} \quad (3)$$

- Kurtosis nach FOLK und WARD (1957):

$$K_G = \frac{\Phi_{95} - \Phi_5}{2,44 \cdot (\Phi_{75} - \Phi_{25})} \quad (4)$$

- Kornfraktionen in 1/2-Phi -Intervallen

Verfügbar sind diese zum einen zusammengeführt in einer CSV-Datei und zum anderen als klassifizierte Polygondatensätze für jeden einzelnen Parameter. Die Abb. 11 zeigt zwei der erzeugten Datensätze, den Median der interpolierten Kornsummenkurven und den prozentualen Anteil der Feinsandfraktion 125 – 177 µm. Durch die Analyse der Datensätze, wie etwa die Verschneidung unterschiedlicher sedimentologischer Kenngrößen, können weiterführende Erkenntnisse über sedimentdynamische Prozesse am Meeresboden gewonnen werden. Zudem dienen die Datensätze als Eingangsgrößen für fachübergreifende numerische Verfahren.

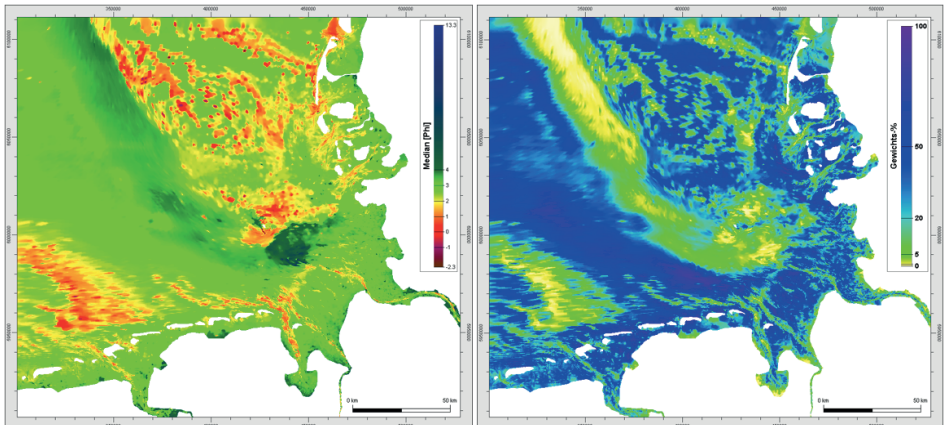


Abbildung 11: Median des Korndurchmessers und Anteil der Feinsandfraktion 125 – 177 µm in der Deutschen Bucht.

5.4 Modelldaten und Gitter

Für numerische Simulationsmodelle werden besondere Anforderungen an bathymetrische und sedimentologische Approximationen gestellt. Die Berechnungspunkte in den numerischen Simulationsmodellen sind in der Regel, entsprechend dem zugrundeliegenden numerischen Verfahren, Repräsentanten für einen Bereich und nicht die Tiefe bzw. der sedimentologische Parameter an der Stelle selbst. Diese Tatsache erfordert komplexe Integrationsprozesse auf den zugehörigen Voronoi-Regionen der Berechnungspunkte, die unter anderem auch hydrodynamisch wirksame Strukturinformationen erhalten.

6 Geomorphologische Analysen in der Deutschen Bucht

Die umfangreichen Vermessungsdaten und deren räumliche sowie zeitliche Einordnung in Verbindung mit den sedimentologischen Gegebenheiten ermöglichen Analysen der Entwicklung der Bathymetrie der Deutschen Bucht. Auf der Basis von Differenzen zwischen konsistenten Tiefenverteilungen lassen sich Erosions- und Sedimentationsbereiche identifizieren und volumetrische Veränderungen in der Deutschen Bucht analysieren. Ergänzt werden können diese Analysen durch funktionalanalytische Betrachtungen der Zeitreihen der Tiefenentwicklung an jedem Punkt des Untersuchungsraumes.

6.1 Bathymetrische Entwicklung der Deutschen Bucht

Auf Grund ihrer Lage ist die Deutsche Bucht eines der größten Sedimentationsgebiete in der Nordsee. Die Vermessungsdaten ermöglichen eine Abschätzung des Volumens an Sediment, welches in der Deutschen Bucht abgelagert wird. Die in der Abb. 12 dargestellten volumetrischen Veränderungen wurden auf der Basis von Differenzen jährlicher quasi-konsistenter Bathymetrien (Summe aus Sedimentations- und Erosionsvolumen) berechnet. Die so bestimmten Mengen schwanken erheblich.

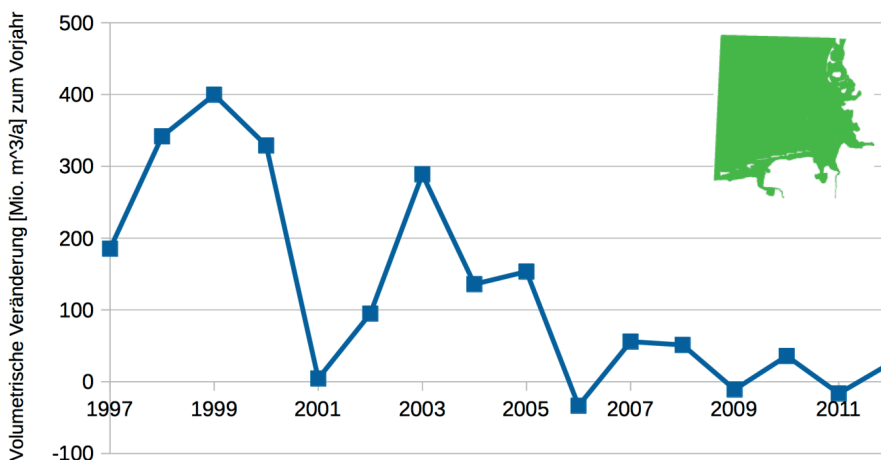


Abbildung 12: Volumetrische Entwicklung in der Deutschen Bucht (die Karte rechts oben zeigt die ausgewertete Fläche).

Die Abnahme der Änderungen zum Ende des betrachteten Zeitraums kann durch die Abnahme der Datenüberdeckung und -dichte erklärt werden.

6.2 Entwicklung der Wattflächen

Die Küstenzone ist durch das Wattenmeer geprägt, welches sich durch den Gezeiteinfluss und dem großen Sedimentangebot während des Holozäns entwickeln konnte und ständigen morphologischen Änderungen unterworfen ist. Auch heute lagert sich feines Sediment insbesondere auf den Watten ab. Die zusammengetragenen Vermessungsdaten lassen auf ein Wattwachstum von im Schnitt 0,74 cm/a (auf der Basis der letzten 10 Jahre) schließen. Dieses Wattwachstum kompensiert im Durchschnitt den des Anstiegs der mittleren Meeresspiegellage in der Deutschen Bucht von ca. 0,21 cm/a (beobachtet über die letzten 60 Jahre am Pegel Helgoland). Das Anwachsen der Wattbereiche variiert dabei sowohl zeitlich als auch örtlich. Das Anwachsen ist in der Regel am größten in den Ästuaren und nimmt von Westen entgegen dem Uhrzeigersinn ab, so dass insbesondere die schleswig-holsteinische Nordseeküste am schlechtesten mit Sedimenten versorgt wird.

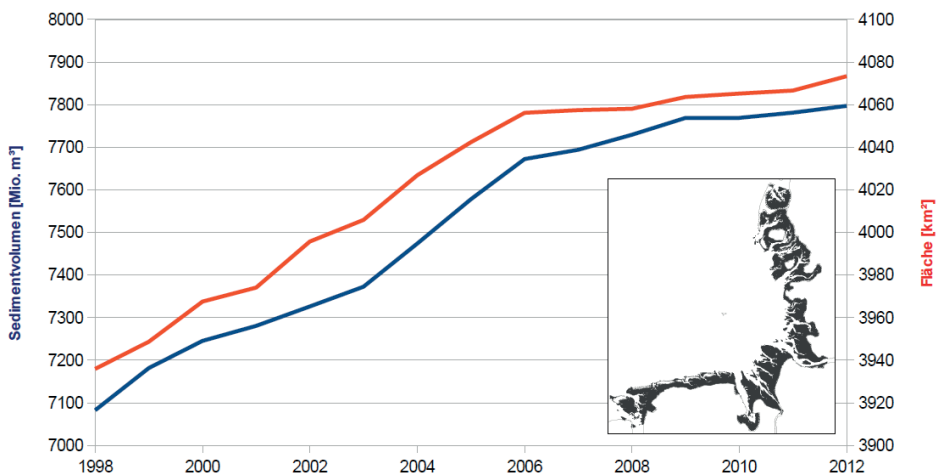


Abbildung 13: Entwicklung der Wattflächen und -volumen in der Deutschen Bucht (Bezugshorizont: -2 m bis 2 m [NHN]; die Karte rechts unten zeigt die Fläche, die als Wattfläche interpretiert wird).

6.3 Entwicklung des Übergangs zum Schelf

Obwohl die Deutsche Bucht ein großräumiges Sedimentationsgebiet in der Nordsee ist, führt das relativ schnelle Anwachsen der Watten zu einem steiler werdenden Küstenvorfeld.

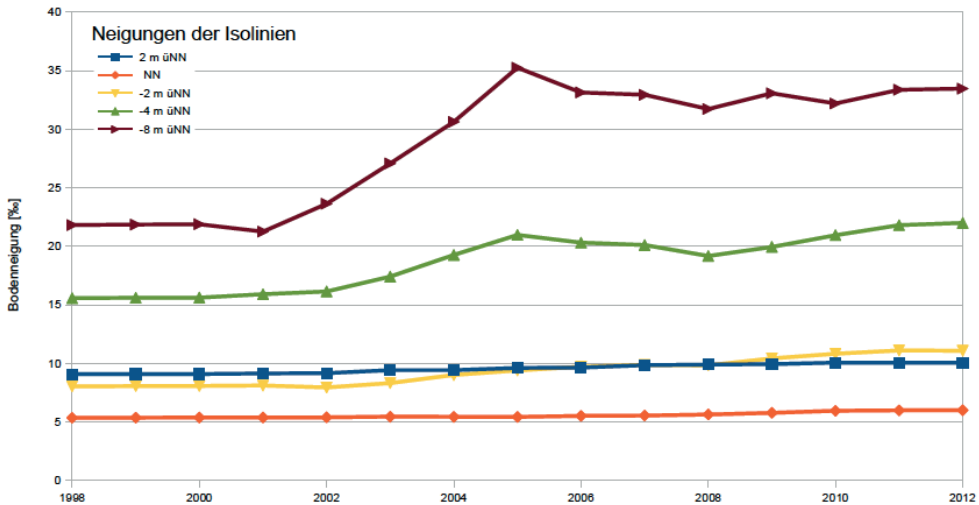


Abbildung 14: Entwicklung der Bodengradienten orthogonal zu den Isobathen in der Deutschen Bucht.

In der Abb. 14 ist gut zu erkennen, dass sich die Steigungen an den Isobathen 2 müNN und NN über die letzten 15 Jahre kaum verändert haben. In den Isobathen -2, -4 und -8 müNN ist ein kontinuierlicher Trend zu einem immer steiler werdenden Übergang zum Schelf zu beobachten. Die Ursache für den verstärkten Anstieg der Boden­neigung zwischen 2001 bis 2005 konnte im Rahmen des Projektes nicht geklärt werden.

6.4 Verknüpfung von Meteorologie und bathymetrischer Entwicklung

Die großräumigen morphodynamischen Prozesse in der Deutschen Bucht werden im Wesentlichen durch die Hydrodynamik und diese wesentlich beeinflussende Meteorologie bestimmt. Für das Küstenvorfeld der Deutschen Bucht ist die Verknüpfung der volumetrischen Änderungen zu den jährlichen Starkwindanteilen aus nordwestlichen Richtungen in der Abb. 14 dargestellt. Gut erkennbar ist die Tendenz zur erhöhten Sedimentation bei geringer Windeinwirkung aus nord-westlicher Richtung und umgekehrt.

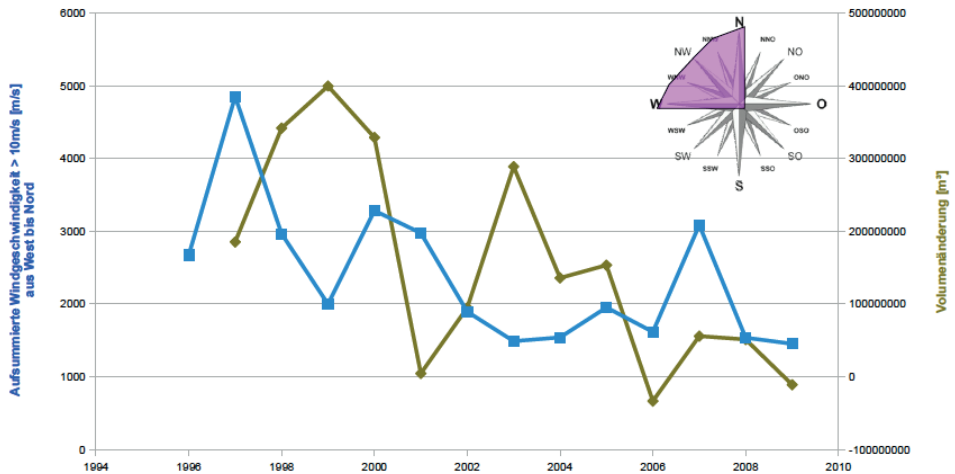


Abbildung 15: Volumetrische Veränderung im Küstensaum der Deutschen Bucht (Bereich bis zur 20 m-Tiefenlinie).

7 Zusammenfassung

Mit dem Funktionalen Bodenmodell steht ein Werkzeug zur Verfügung, das sowohl für das Küsteningenieurwesen als auch für die Forschung unterschiedlicher Fachbereiche, wie Marine Geologie und Biologie, eine umfassende Datengrundlage der Oberflächeneigenschaften küstennaher Meeresböden liefern kann. Durch die implementierten Interpolations- und Approximationsverfahren können Datensätze für den jeweiligen Einsatz individuell generiert werden. So sind die räumliche und zeitliche Auflösung frei wählbar. Die sedimentologische Modellkomponente ermöglicht zudem die Bereitstellung von interpolierten Kornverteilungen mit angepassten Fraktionierungen.

Das Funktionale Bodenmodell lässt sich in Verbindung mit vorgegebenen Berechnungsnetzen und der Vorgabe von Ergebniszeitschritten, als Hindcast-Simulationsmodell betreiben. Die Verknüpfung mit prozessbasierten hydro- und morphodynamischen Modellen ermöglicht auf diese Weise die Berücksichtigung der Variabilität des Gewässerbodens im Rahmen der Modellvalidierung.

Die Verknüpfung der unterschiedlichen Daten des Funktionalen Bodenmodells untereinander, aber auch mit Modellergebnissen aus prozessbasierten Simulationsmodellen, eröffnet in Zukunft ganz neuartige Analyse- und Interpretationsmöglichkeiten, die zu einem weiteren vertieften Systemverständnis der Morphodynamik und Sedimentologie in der Deutschen Bucht beitragen können.

8 Schriftenverzeichnis

EPPEL, D.; AHRENDT, K. und LUDWIG, S.: Wattenmeersedimente: Sedimentinventar Nordfriesisches Wattenmeer. Abschlussbericht KFKI-Projekt 03 KIS 037, GKSS-Bericht 1, 2006.

- ERNSTSEN V. B.; WINTER, C. and LEFEBVRE, A.: Reconstruction of quantitative bedform parameters in the German Bight: revisiting the Ulrich (1973) bedform classification charts. *Geo Marine Letters*, in review.
- FIGGE, K.: Karte und Begleitheft zur Karte der Sedimentverteilung in der Deutschen Bucht. Maßstab 1:250.000, Deutsches Hydrographisches Institut Hamburg, 1981.
- FOLK, R. L. and WARD, W. C.: Brazos River bar: a study in the significance of grain size parameters. *Journal of Sedimentary Petrology*, 27, 3-26, 1957.
- KRUGER, C. J. C.: Constrained Cubic Spline Interpolation for Chemical Engineering Applications.
Stand: 16.05.2014: <http://www.korf.co.uk/spline.pdf>
- LANDESAMT FÜR BERGBAU, ENERGIE UND GEOLOGIE: Geologische Küstenkarte von Niedersachsen - Relief der Holozänbasis (GHBK25). Maßstab 1:25 000, Hannover, 1998.
- MILBRADT, P.: Analyse morphodynamischer Veränderungen auf der Basis zeitvarianter digitaler Bathymetrien. *Die Küste*, 78, 33-58, 2011.
- RICKLEFS, K. and ASP NETO, N. E.: Geology and Morphodynamics of a Tidal Flat Area along the German North Sea Coast. *Die Küste*, 69, 93-127, 2005.
- TRASK, P. D.: Origin and Environment of Source Sediments of Petroleum. Gulf Publishing Company, Houston, 1932.
- ULRICH J.: Die Verbreitung submariner Riesen- und Großrippeln in der Deutschen Bucht. *Deutsche Hydrographische Zeitschrift / Ergänzungsheft, Reihe B*, 14, 1973.
- WU, W. and WANG, S.: Formulas for Sediment Porosity and Settling Velocity. In: *Journal of Hydraulic Engineering* © ASCE, 862, doi: 10.1061/(ASCE)0733-9429 (2006) 132:8 (858), 2006.
- ZEILER, M.; SCHULZ-OHLBERG, J. und FIGGE, K.: Materialinventur an der deutschen Nordseeküste, *Die Küste*, 62, 53-87, 2000a.