

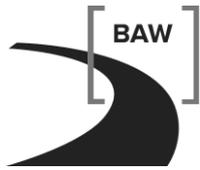


**Bundesanstalt für Wasserbau**  
Kompetenz für die Wasserstraßen

**Nordsee-Basismodell - Teil I: Allgemeine  
Übersicht**

**A39550270116-1**





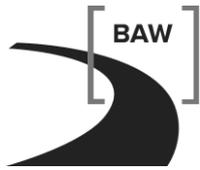
**Bundesanstalt für Wasserbau**  
Kompetenz für die Wasserstraßen

**Nordsee-Basismodell - Teil I: Allgemeine  
Übersicht**

**A39550270116-1**

Stand: 16.10.2013





**Bundesanstalt für Wasserbau**  
Kompetenz für die Wasserstraßen

## **Nordsee-Basismodell - Teil I: Allgemeine Übersicht**

Auftraggeber: Interner Auftrag

Auftrag vom: 01.11.2009 , Az.:

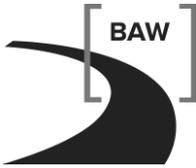
Auftrags-Nr.: BAW-Nr. A39550270116-1

Aufgestellt von:           Abteilung:       Wasserbau im Küstenbereich  
                                  Referat:        Ästuarsysteme I/II (K2/K3)  
                                  Bearbeiter:    Dr. Frank Kösters  
  Dipl. Geoökol. Marko Kastens  
  Dr.-Ing. Andreas Plüß

Hamburg, 16.10.2013

Das Gutachten darf nur ungekürzt vervielfältigt werden. Die Vervielfältigung und eine Veröffentlichung bedürfen der schriftlichen Genehmigung der BAW.





## **Zusammenfassung**

Zur Steuerung hochaufgelöster Ästuarmodelle der Seehafenzufahrten der Deutschen Bucht, sowie für Untersuchungen entlang der deutschen Nordsee Westküste führt die BAW rückblickende (engl. „hindcast“) und szenarische Untersuchungen mit numerischen Modellen der Nordsee durch. Für die Abbildungen des heutigen Systemszustandes nach dem aktuellen Stand der Technik ist es notwendig die bestehenden Modellsysteme zu aktualisieren und für die Berechnung von Sedimenttransport und morphologischer Entwicklung zu erweitern. Dazu liefert der vorliegende Bericht zunächst eine Systembeschreibung der Hydro- und Morphodynamik des Systems Nordsee, eine allgemeine Übersicht über die Anforderungen an die aufzubauenden Modellsysteme und beschreibt das konzeptionelle Modell für den Aufbau der numerischen Verfahren. Der eigentliche Aufbau und die Validierung dieser Modellsysteme werden in separaten nachfolgenden Berichten beschrieben.



<b>Inhaltsverzeichnis</b>		<b>Seite</b>
1	Veranlassung und Aufgabenstellung	1
1.1	Ausgangssituation	1
1.2	Aufgabenstellung	1
1.3	Dokumentenstruktur	2
2	Systembeschreibung	3
2.1	Hydrodynamik	3
2.2	Meteorologie	6
2.2.1	Windsituation	6
2.2.2	Oberwasserabfluss	9
2.3	Sedimenttransport und Morphodynamik	10
2.3.1	Sedimentologie	10
2.3.2	Schwebstoffkonzentration	11
2.3.3	Sedimenttransport	12
2.3.4	Morphodynamik	14
3	Anforderungen an das Nordsee-Basismodell	16
3.1	Untersuchungsgebiet	16
3.2	Untersuchungszeitraum	16
3.3	Zielgrößen	17
3.4	Anforderungen an die Genauigkeit	17
4	Konzeptmodell	19
5	Literaturverzeichnis	21

<b>Bildverzeichnis</b>	<b>Seite</b>
Bild 2-1 Berechnete $M_2$ Amplituden und Phasen (Davies et al. 1997)	3
Bild 2-2 Schematische Darstellung der Restströme in der Nordsee (OSPAR Commission 2000)	4
Bild 2-3 Zirkulationstypen des täglichen Reststroms in der Deutschen Bucht (Loewe, 2009)	5
Bild 2-4 Saisonale Häufigkeitsverteilungen der Zirkulationstypen in der Deutschen Bucht (Loewe, 2009)	5
Bild 2-5 Klassifizierung des Windantriebes auf Basis der Messstation DWD Helgoland	6
Bild 2-6 Verteilung der Windgeschwindigkeit an der Station Helgoland für a) das langjährige Mittel (1980-2009) und b) das Jahr 2006	8
Bild 2-7 Häufigkeitsverteilung des Oberwasserabfluss für a) Ems , b) Weser und c) Elbe.	9
Bild 2-8 Gemessene Sedimentverteilung in der Deutschen Bucht dargestellt als Median des Korndurchmessers (D50) auf Basis des datenbasierten AufMod Modells.	10
Bild 2-9 Verteilung der tiefen- und zeitgemittelten Schwebstoffkonzentration in der Deutschen Bucht (OSPAR, 2000).	11
Bild 2-10 Transport von suspendierten Sedimenten (<20 $\mu\text{m}$ ) in Mt/a in der Deutschen Bucht auf Basis von Modelluntersuchungen für die Jahre 1990-1991 (Puls et al. 1997)	12
Bild 2-11 Schematisches Modell des Geschiebetransportes in der Deutschen Bucht (Zeiler et al. 2000)	13
Bild 2-12 Abschätzung des Sedimenttransports in Mt/a auf Basis veröffentlichter Daten	14
Bild 2-13 Morphologischer Raum (BER) auf Basis des datenbasierten AufMod-Modells	15
Bild 3-1 Gesamtes Untersuchungsgebiet (links) und Fokusgebiet der Deutschen Bucht (rechts)	16
Bild 4-1 Prozesse im Gesamtsystem Schelfmeer (Nittrouer and Wright 1994)	19

## 1 Veranlassung und Aufgabenstellung

### 1.1 Ausgangssituation

Zur Steuerung hochaufgelöster Ästuarmodelle der Seehafenzufahrten der Deutschen Bucht, sowie für Untersuchungen entlang der deutschen Nordsee Westküste ist es Fachaufgabe der BAW rückblickende (engl. „hindcast“) und szenarische Untersuchungen mit numerischen Modellen der Nordsee durchzuführen. Um eine Abbildung der heute prägenden Verhältnisse sicher zu stellen, müssen die bestehenden Modellsysteme regelmäßig aktualisiert werden.

Seit etwa drei Jahrzehnten werden mathematische, prozessbasierte Simulationsmodelle entwickelt und gepflegt, mit denen Wasserstände, Strömungen, Seegang und der Transport von im Wasserkörper gelösten Substanzen wie Salz berechnet werden. Darüber hinaus kann der Transport von Sedimenten und Änderungen der Morphologie modellbasiert abgeschätzt werden. Darauf aufbauend werden mögliche Veränderungen der Bathymetrie (Morphodynamik) bestimmt. Da die Wechselwirkungen zwischen der Dynamik des Wasserkörpers und den vielfältigen Formen und Eigenschaften der Sedimente sehr komplex sind, unterliegt die Simulation der Morphodynamik deutlich größeren Unsicherheiten als die Berechnung der Hydrodynamik. Aus diesem Grunde ist es bis heute nicht gelungen, ein skalenübergreifendes Simulationsmodell für die jeweils ortsspezifische Morphodynamik eines größeren Gewässersystems umfassend zu validieren.

Zur Abschätzung der Leistungsfähigkeit heute verfügbarer Simulationsmodelle wird im Rahmen des Projekts „Aufbau von integrierten Modellsystemen zur Analyse der langfristigen Morphodynamik in der Deutschen Bucht (AufMod)“ für den Bereich der Deutschen Bucht ein umfassender Datensatz von Naturmessungen aufbereitet und mit Ergebnissen von Simulationsmodellen verglichen. Dazu ist es notwendig die bestehenden Modellsysteme mit Berücksichtigung von Sedimenttransport und morphologischer Entwicklung für längerfristige Zeiträume zu betreiben. Im Rahmen des Projekts AufMod wurde eine Zeitspanne für die Untersuchung von 1996-2007 definiert.

Weiterhin werden im Rahmen des Ressortforschungsprogramms KLIWAS (<http://www.kliwas.de>) Anpassungsoptionen für den Klimawandel an der deutschen Nord- und Ostseeküste untersucht. Als Grundlage für die Untersuchungen in den Ästuaren sind Randwerte durch ein geeignetes Nordseemodell zu erzeugen und das Modell für Berechnungen mit unterschiedlichen Szenarien des Meeresspiegelanstiegs nutzbar zu machen.

### 1.2 Aufgabenstellung

Aus der beschriebenen Ausgangssituation folgen unterschiedle Aufgaben für den Bereich der Nordseemodellierung:

- Das bestehende Nordseemodell der BAW (Piüß 2003) muss aktualisiert und die Modellgüte nachgewiesen werden.

- Das Modell ist für die Jahre 1996 – 2007 jeweils in Jahreszeitscheiben zu berechnen.
- Aufgrund der hohen Spannweite von Ergebnissen bei der Berechnung von Sedimenttransport und morphologischen Änderungen, ist es zur Abschätzung der Streuung der Ergebnisse erforderlich, neben dem bisher eingesetzten numerischen Verfahren (UnTRIM) zusätzlich das Modellierungssystem Delft3D zu nutzen.

Daraus ergeben sich folgende Aufgabenpakete:

- (1) Aufbereitung von Naturmessungen als Validierungsdaten
- (2) Modellaufbau Nordsee-Basismodell UnTRIM-SediMorph-Unk zur Berechnung der Hydrodynamik, des Seegangs, des Sedimenttransports und der Morphodynamik
- (3) Modellaufbau Nordsee-Basismodell Delft3D zur Berechnung der Hydrodynamik, des Seegangs, des Sedimenttransports und der Morphodynamik
- (4) Kalibrierung und Validierung der aufgebauten Simulationsmodelle

### 1.3 Dokumentenstruktur

Die Ergebnisse der in Abschnitt 1.2 genannten Aufgabenpakete wird in einzelnen Berichten dokumentiert:

Teil 1: Nordsee-Basismodell - Allgemeine Übersicht

Teil 2: Nordsee-Basismodell - Modellsystem UnTRIM-SediMorph-UnK

Teil 2 a): Hydrodynamik: UnTRIM-SediMorph

Teil 2 b): Seegang: UnK

Teil 2 c): Sedimenttransport- und Morphodynamik: UnTRIM-SediMorph-UnK

Teil 3: Nordsee-Basismodell – Modellsystem Delft3D

Teil 3 a): Hydrodynamik: Delft3D-Hyd

Teil 3 b): Seegang: Swan

Teil 3 c): Sedimenttransport- und Morphodynamik: Delft3D-Mor

Teil 4: Nordsee-Basismodell – Aufbereitung und Analyse von Naturmessungen als Validierungsdaten

## 2 Systembeschreibung

### 2.1 Hydrodynamik

Die Nordsee ist ein mit dem Nordatlantik verbundenes Schelfmeer, dessen Dynamik im Wesentlichen durch den Einfluss der Gezeiten geprägt ist (siehe Otto et al. (1990) für einen Überblick der physikalischen Ozeanographie der Nordsee). Bild 2-1 zeigt die räumliche Struktur der dominanten Partialtide ( $M_2$ ) in der Nordsee. Die größten Amplituden befinden sich im südlichen und süd-westlichen Teil der Nordsee aber auch im Bereich der Deutschen Bucht gibt es eine deutliche Zunahme der Amplitude.

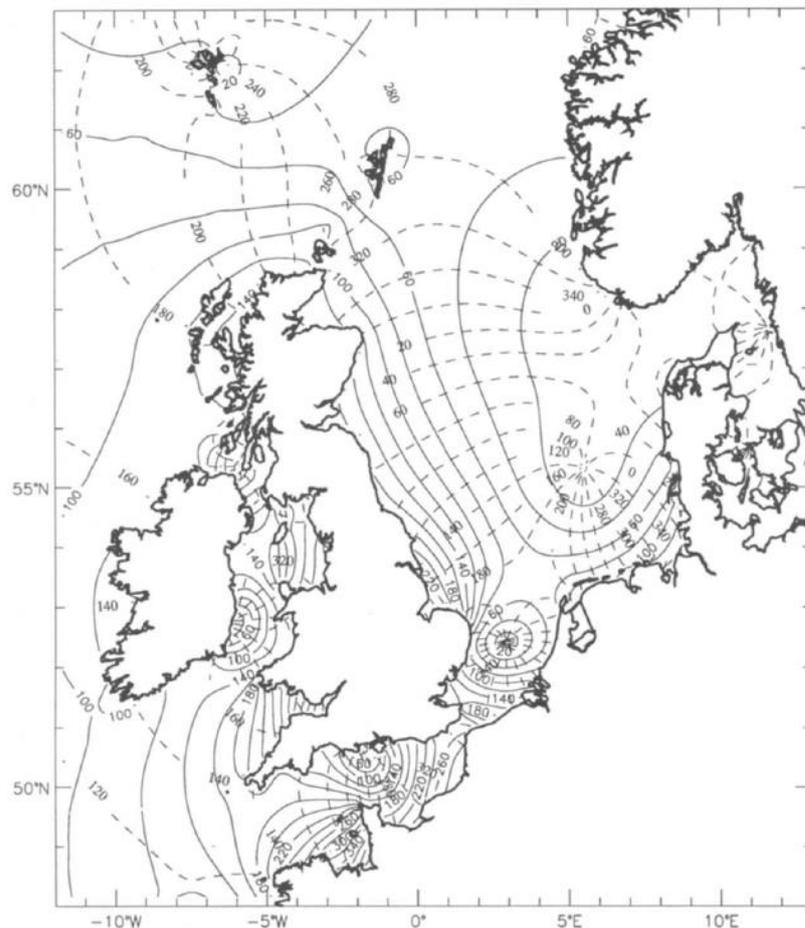


Bild 2-1 Berechnete  $M_2$  Amplituden und Phasen (Davies et al. 1997)

Den Gezeiten induzierten Strömungsmustern überlagern sich barokline Strömungen aus den Zuströmen salzarmen Wassers aus der Ostsee und den Ästuaren, sowie die windgetriebene Zirkulation. Die Restströme sind in Bild 2-2 dargestellt. Das vorherrschende großräumige

Zirkulationsmuster in der Nordsee ist eine zyklonale Strömung von der schottischen Küste in die Deutsche Bucht hinein und entlang der norwegischen Küste.

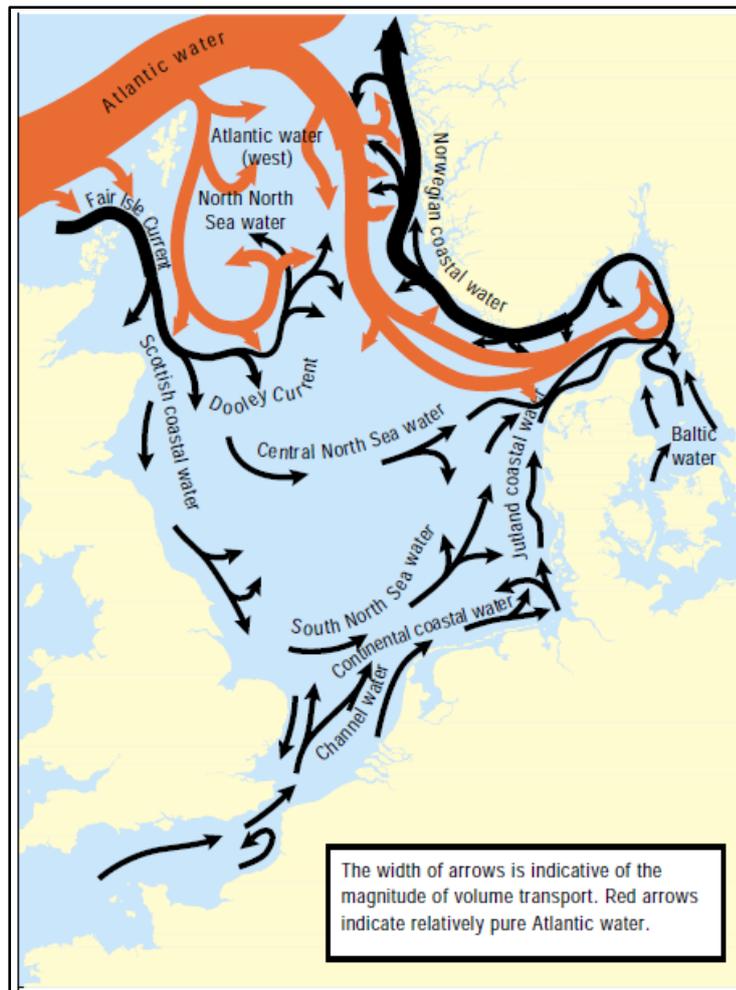


Bild 2-2 Schematische Darstellung der Restströme in der Nordsee (OSPAR Commission 2000)

Die Hydrodynamik der Nordsee wird für einzelne Jahrgänge in Berichten des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) umfassend beschrieben, z.B. für das Jahr 2005 mit den Parametern Strömung, Seegang, Wasserstand, Temperatur und Salzgehalt als meeresphysikalische Größen (Loewe 2009). Die Zirkulationsmuster der Restströmung können in einzelne Klassen eingeteilt (Bild 2-3) und dann zur Klassifizierung eines einzelnen Jahres genutzt werden (Bild 2-4).

Die Klassifizierung zeigt das Vorherrschen zyklonaler Strömungsmuster aber auch jahreszeitliche Schwankungen. Hier spiegeln sich insbesondere unterschiedliche Windsituationen wieder.

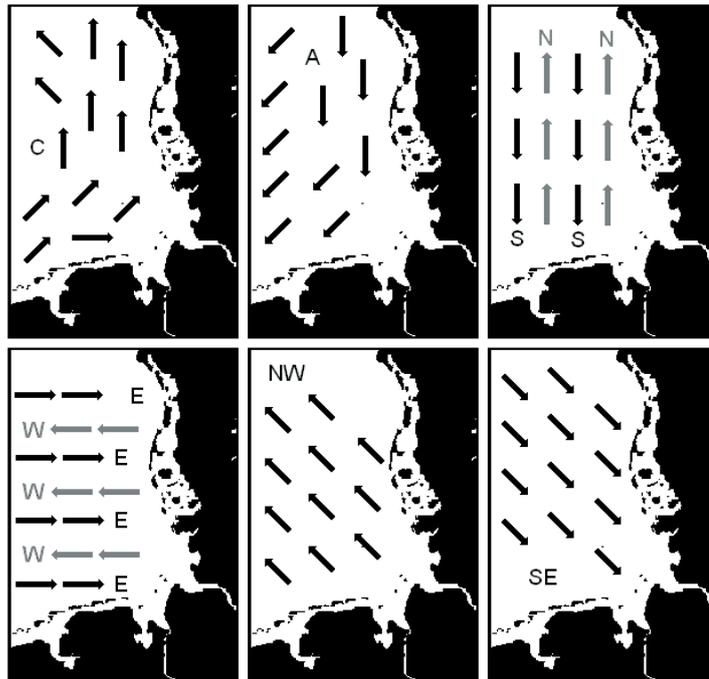


Bild 2-3 Zirkulationstypen des täglichen Reststroms in der Deutschen Bucht (Loewe, 2009)

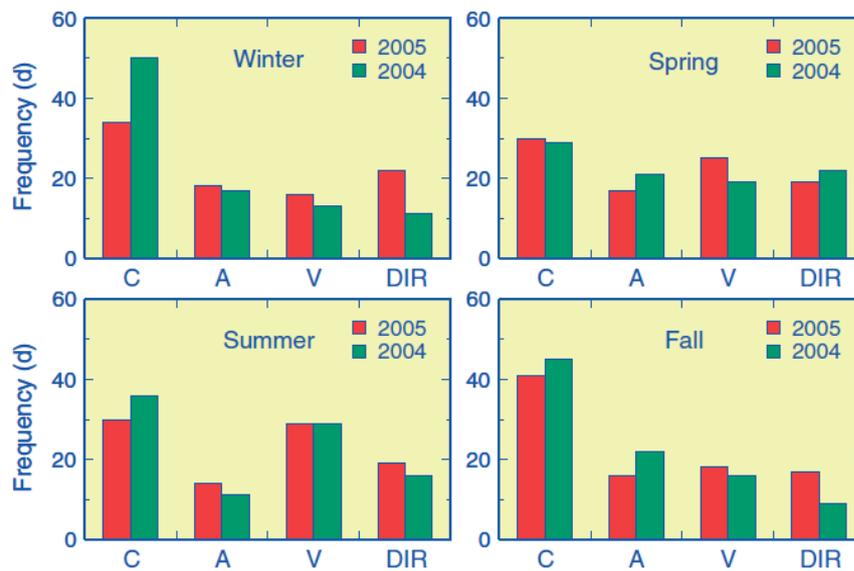


Bild 2-4 Saisonale Häufigkeitsverteilungen der Zirkulationstypen in der Deutschen Bucht (Loewe, 2009)

## 2.2 Meteorologie

### 2.2.1 Windsituation

Zur Abschätzung der meteorologischen Situation im gesamten Untersuchungszeitraum 1996 – 2007 wurde eine Klassifizierung der Windgeschwindigkeiten auf Basis der Messstation Helgoland des Deutschen Wetterdienstes (DWD) durchgeführt. Der auf 10 m über Grund normierte Wind wurde nach Windrichtung und Windgeschwindigkeit eingeteilt. In Bild 2-5 ist die Dauer hoher Windgeschwindigkeit (Windgeschwindigkeit 12,5 m/s – 18 m/s) und die Dauer von Stürmen (Windgeschwindigkeit > 18m/s) nach Richtungssektoren aufgeteilt dargestellt. Eine deutlich weitergehende Untersuchung der meteorologischen und hydrologischen Situation ist den Berichten des BSH zu entnehmen z.B. Loewe (2009).

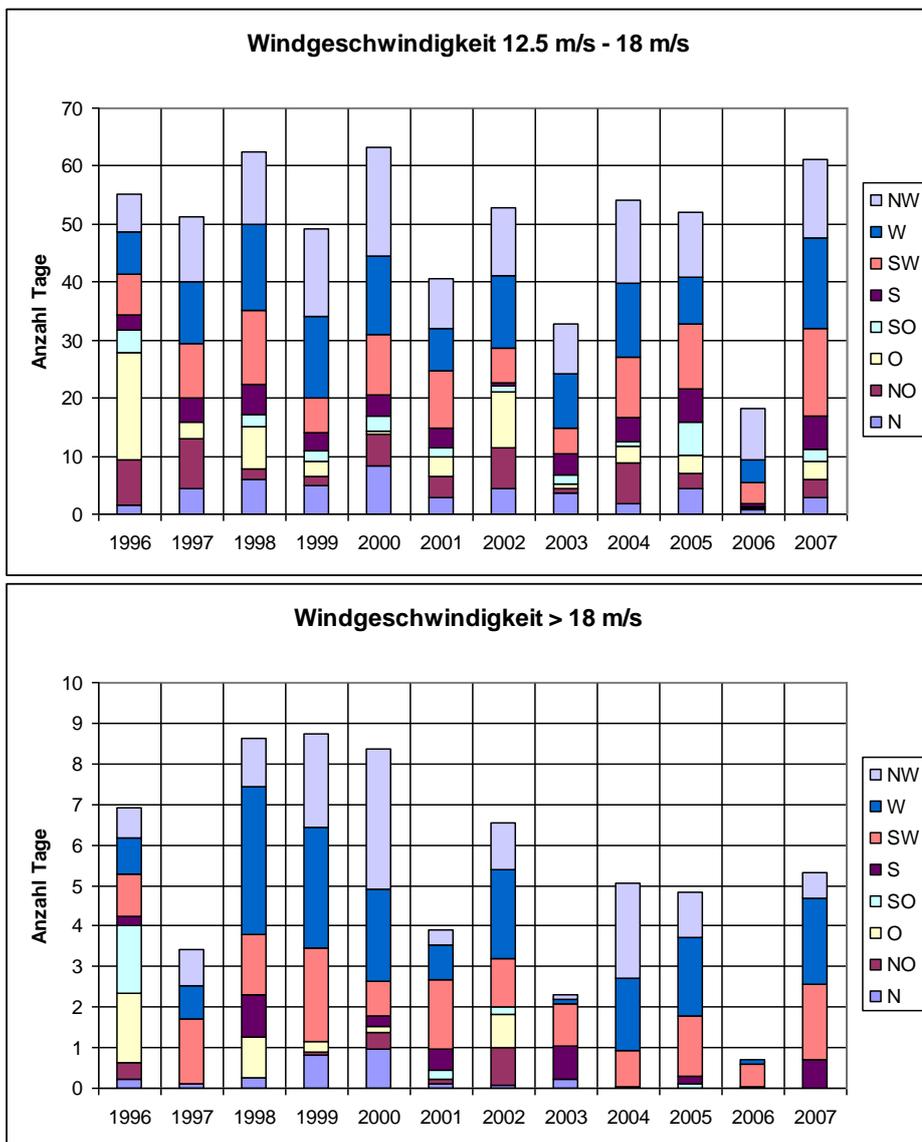
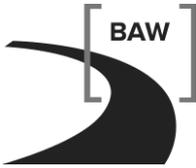


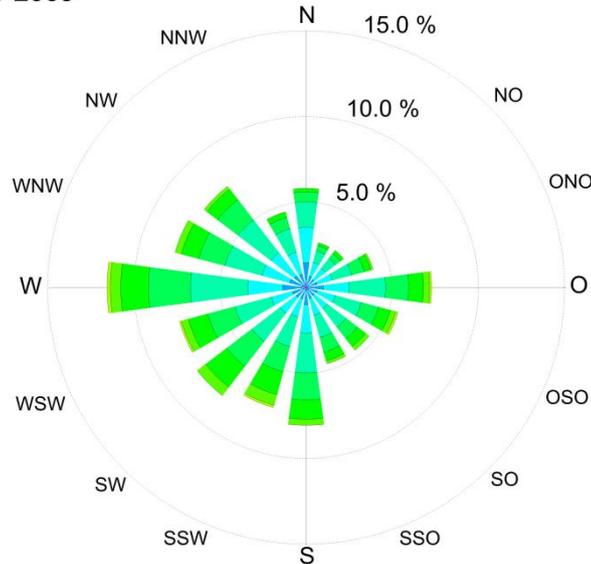
Bild 2-5 Klassifizierung des Windantriebes auf Basis der Messstation DWD Helgoland



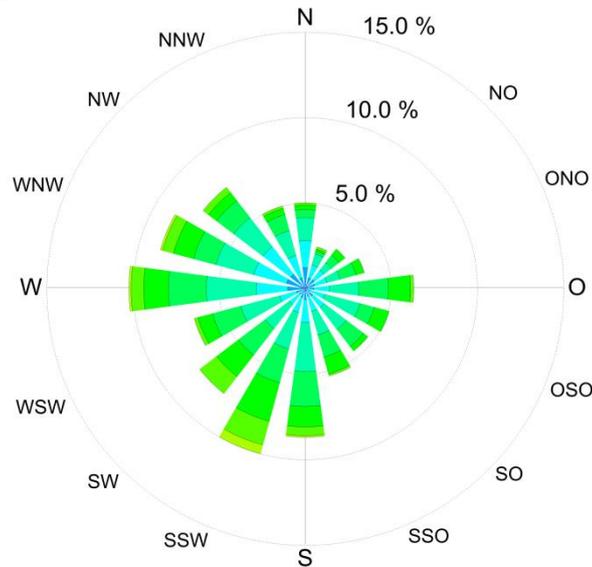
Die Verteilung der Windgeschwindigkeiten für das Jahr 2006 zeigt, dass die Verteilung der Windgeschwindigkeiten im Vergleich zu den Jahren 1996 – 2007 deutlich weniger Tage mit Windgeschwindigkeiten  $> 12.5$  m/s aufweist.

Die räumliche Verteilung der Windgeschwindigkeiten im Jahr 2006 zeigt im Vergleich zum langjährigen Mittel, dass die Verteilung der vorherrschenden Windrichtungen vergleichbar vorzugsweise aus westlicher Richtung kommt (Bild 2-6). Südwestliche Winde waren im Jahr 2006 deutlicher ausgeprägt als im langjährigen Mittel.

a) 1980-2009



b) 2006



Windstille	0 Bft	■	von	0	bis	0.4 m/s
leichter Zug	1 Bft	■	von	0.4	bis	1.8 m/s
leichte Brise	2 Bft	■	von	1.8	bis	3.6 m/s
schwache Brise	3 Bft	■	von	3.6	bis	5.8 m/s
maessige Brise	4 Bft	■	von	5.8	bis	8.5 m/s
frische Brise	5 Bft	■	von	8.5	bis	11. m/s
starker Wind	6 Bft	■	von	11.	bis	14. m/s
steifer Wind	7 Bft	■	von	14.	bis	17. m/s
sturmischer Wind	8 Bft	■	von	17.	bis	21. m/s
Sturm	9 Bft	■	von	21.	bis	25. m/s
schwerer Sturm	10 Bft	■	von	25.	bis	29. m/s
orkanartiger Sturm	11 Bft	■	von	29.	bis	34. m/s
Orkan	12 Bft	■	>	34.	m/s	

Bild 2-6 Verteilung der Windgeschwindigkeit an der Station Helgoland für a) das langjährige Mittel (1980-2009) und b) das Jahr 2006

## 2.2.2 Oberwasserabfluss

Das Jahr 2006 war nach Daten des Klimamonitorings etwas zu trocken (DWD 2007), dies spiegelt sich auch im Oberwasserabfluss der deutschen Ästuare wieder (Bild 2-7). Trotz des generell etwas geringeren Oberwasserabflusses gab es in 2006 einzelne sehr hohe Abflüsse, insbesondere in der Elbe.

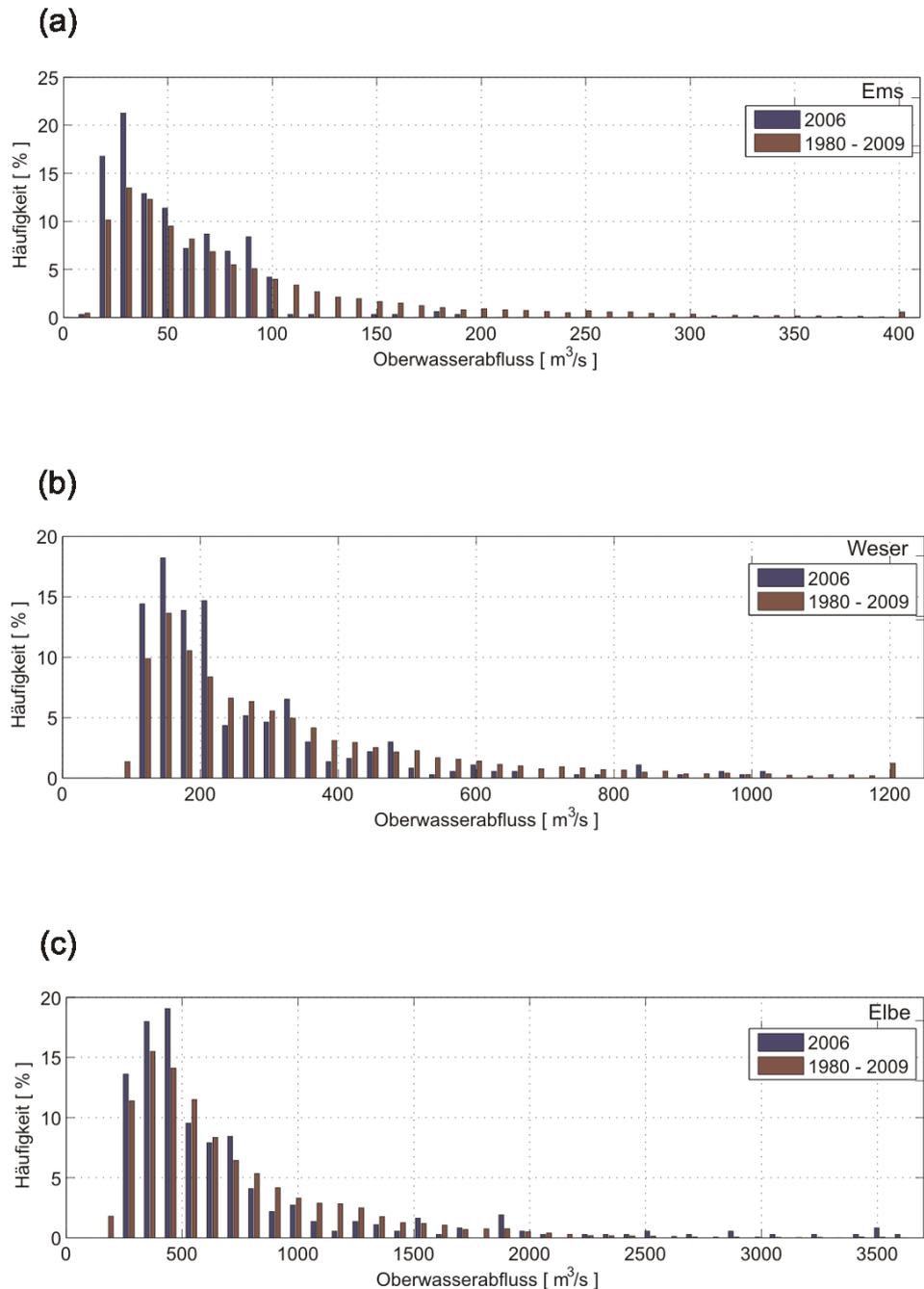


Bild 2-7 Häufigkeitsverteilung des Oberwasserabfluss für a) Ems , b) Weser und c) Elbe.

## 2.3 Sedimenttransport und Morphodynamik

### 2.3.1 Sedimentologie

Eine Voraussetzung für die naturähnliche Simulation morphodynamischer Vorgänge in numerischen Modellen ist eine repräsentative anfängliche Korngrößenverteilung der Sedimente im Untersuchungsgebiet („Anfangskornverteilung“). Durch die Abhängigkeit des Sedimenttransports von der Korngröße bestimmt die Anfangskornverteilung maßgeblich die morphologische Reaktion des Systems (Hirschhäuser et al. 1998). Im Rahmen von AufMod wurde die bereits vorhandene Beschreibung der Sedimentzusammensetzung der Deutschen Bucht von Figge (1981) ergänzt und als datenbasiertes Modell verfügbar gemacht<sup>1</sup>. Die Sedimentverteilung der Deutschen Bucht wurde als Median des Korndurchmessers ( $D_{50}$ ) aus dem datenbasierten AufMod-Modell exportiert (vgl. Bild 2-8 a).

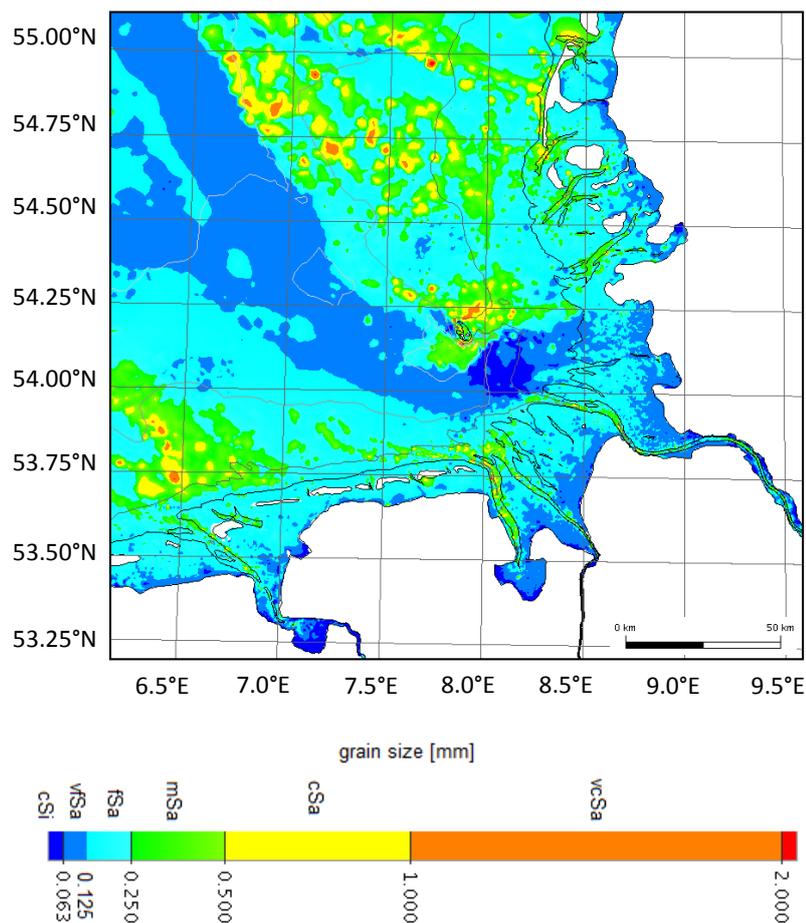


Bild 2-8 Gemessene Sedimentverteilung in der Deutschen Bucht dargestellt als Median des Korndurchmessers ( $D_{50}$ ) auf Basis des datenbasierten AufMod Modells.

<sup>1</sup> Siehe Rubrik AufMod unter <http://www.mdi-de.org>

Die gemessene Sedimentverteilung wird in dem Übersichtsartikel von Zeiler et al. (2008) beschrieben. Die heutige Sedimentologie resultiert aus der Sortierung holozäner Sedimente durch die angreifende Strömung und anstehende Pleistozäne Sedimente in Gebieten mit Sedimentmangel, die nicht durch Holozäne Sedimente überdeckt sind. Die Sedimente bestehen im Wesentlichen aus gut sortierten Feinsanden, sowie regional aus Mittelsanden im nordfriesischen Bereich, wie seeseitig der Insel Sylt und im westlichen Bereich der ostfriesischen Inseln, dem Borkumer Riffgrund. Teilweise sind auch gröbere Sedimente an der Sohle zu finden, so stehen im westlichen Bereich des nordfriesischen Schelfs Kiesablagerungen an. Feinkörnigere Sedimente finden sich im Wattenmeer, z.B. im Sylter Rückseitenwatt, in den Ästuaren wie der Ems, im Bereich der Helgoländer Schlicklinse und im Elbeurstromtal. In den Tiderinnen der Ästuare, wie im Elbeästuar und in den Seegatten wie zwischen Langeoog und Spiekeroog können grobkörnigere Sedimente gefunden werden.

### 2.3.2 Schwebstoffkonzentration

Schwebstoffe, hier definiert als suspendiertes partikuläres Material mit einem Korndurchmesser kleiner 20 µm, werden über die seeseitigen Ränder, mit dem Oberwasser sowie aus der Atmosphäre in die Nordsee eingetragen. Hinzu kommen Primärproduktion, die Erosion von Klippen und Ufern, sowie Sedimentumlagerungen innerhalb der Nordsee.

Eine sich daraus ergebende gemessene Verteilung der Schwebstoffkonzentration ist in Bild 2-9 auf Basis der Projekte NERC-NSP (UK, 1988–9), TUVAS (Deutschland, 1989–92) und KUSTOS (Deutschland, 1994–6) dargestellt.

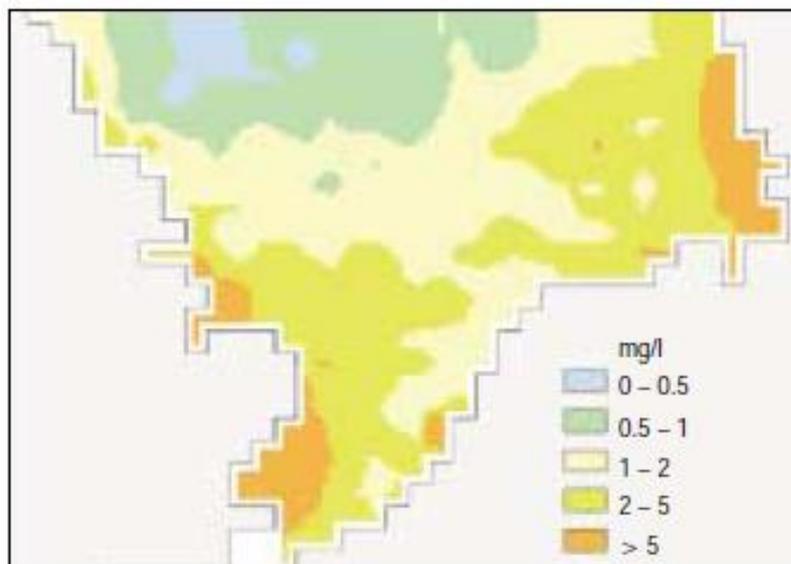


Bild 2-9 Verteilung der tiefen- und zeitgemittelten Schwebstoffkonzentration in der Deutschen Bucht (OSPAR, 2000).

### 2.3.3 Sedimenttransport

Eine synoptische Abschätzung der großräumigen Sedimenttransporte auf Basis von Naturmessungen ist mit den bis heute verfügbaren Messmethoden nicht zu leisten. Gemessene Sedimenttransporte beschränken sich daher auf kleinräumigere Untersuchungsgebiete, wie einzelne Rinnen und Abschnitte von Ästuaren. Um dennoch Aussagen über Sedimenttransporte auf jährlichen Zeitskalen zu bekommen, können Messungen mit numerischen Modelluntersuchungen kombiniert werden. So schätzen Puls et al. (1997) im Rahmen des TUVAS Projekts auf Basis von Naturmessungen und numerischen Modelluntersuchungen für den Transport von Feinsedimente (<math><20\ \mu\text{m}</math>) in der Deutschen Bucht einen Eintrag von 29.9 Mt/a und einen Austrag von 27.3 Mt/a ab, also eine Nettodeposition von ca. 2.6 Mt/a.

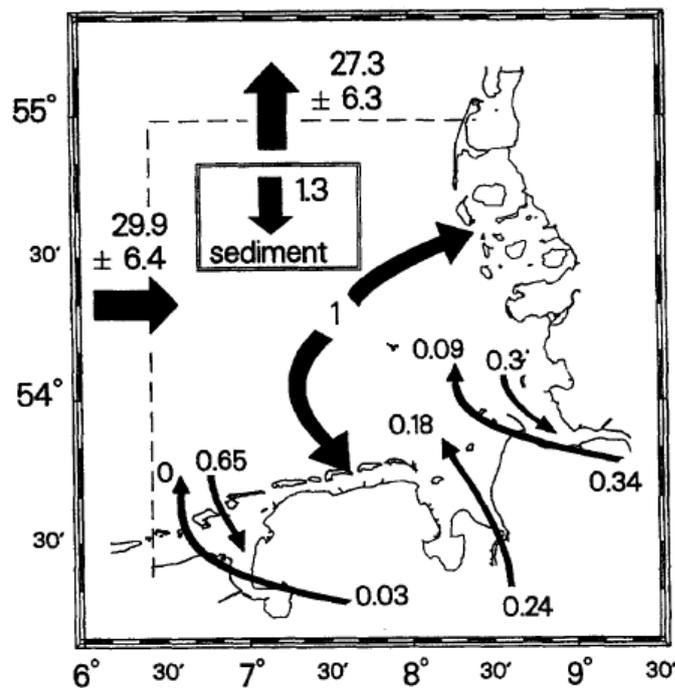


Bild 2-10 Transport von suspendierten Sedimenten (<math><20\ \mu\text{m}</math>) in Mt/a in der Deutschen Bucht auf Basis von Modelluntersuchungen für die Jahre 1990-1991 (Puls et al. 1997)

In Ergänzung zu den Untersuchungen von Puls et al. (1997) für den Suspensionstransport der Feinsedimente <math><20\ \mu\text{m}</math> können für längere Zeitskalen auch geologische Ansätze genutzt werden. Auf Basis der Sedimentologie und der Ausbildung von Sohlformen können großräumige Transporte zumindest qualitativ abschätzen. Bei der Untersuchung zur Mächtigkeit der mobilen Sande in der Deutschen Bucht haben Zeiler et al. (2000) so ein konzeptionelles Modell der großräumigen Geschiebetransporte entwickelt (Bild 2-11). Dies zeigt für den Bereich der inneren Deutschen Bucht eine Konvergenzzone des Geschiebetransportes an. Es ist also zu erwarten, dass sich bei einer Bilanzierung über diesen Bereich auch für die sandigen Fraktionen eine Netto Deposition ergibt.

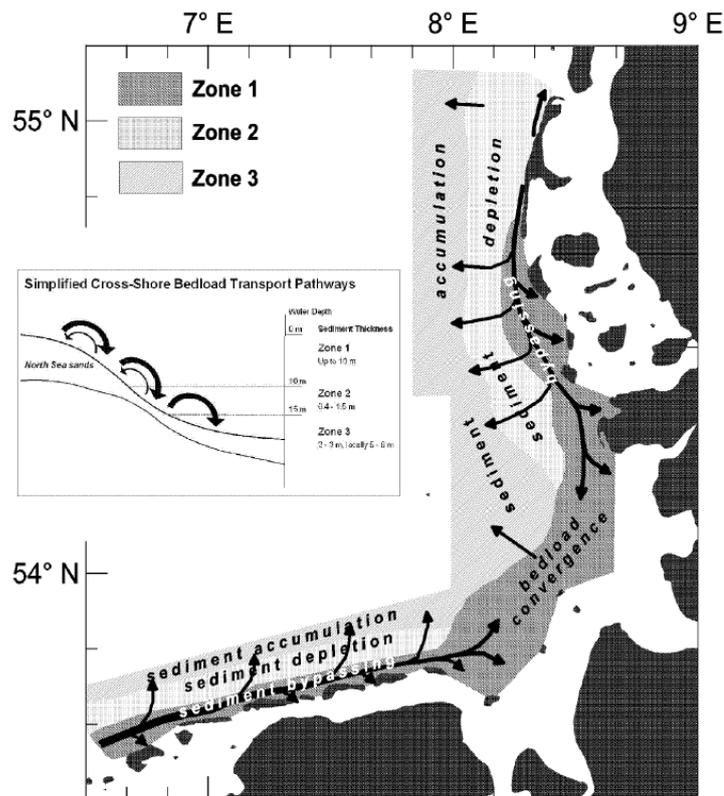


Bild 2-11 Schematisches Modell des Geschiebetransportes in der Deutschen Bucht (Zeiler et al. 2000)

Die unterschiedlichen kleinräumigen Untersuchungen erlauben zwar keine synoptische Abschätzung der Sedimenttransporte, diese können jedoch zusammengefasst genutzt werden, um konzeptionelle Modelle wie das von Zeiler et al. (2000) zu vervollständigen. Eine Übersicht der vorhandenen Messungen wird z.B. in Gerritsen et al. (2000) und Gerritsen et al. (2001) gegeben. Die darin enthaltenen Angaben sind in Bild 2-12 zusammen mit Abschätzungen für die Ästuare auf Basis unveröffentlichter BAW Daten und der Abschätzung von Puls et al. (1997) dargestellt.

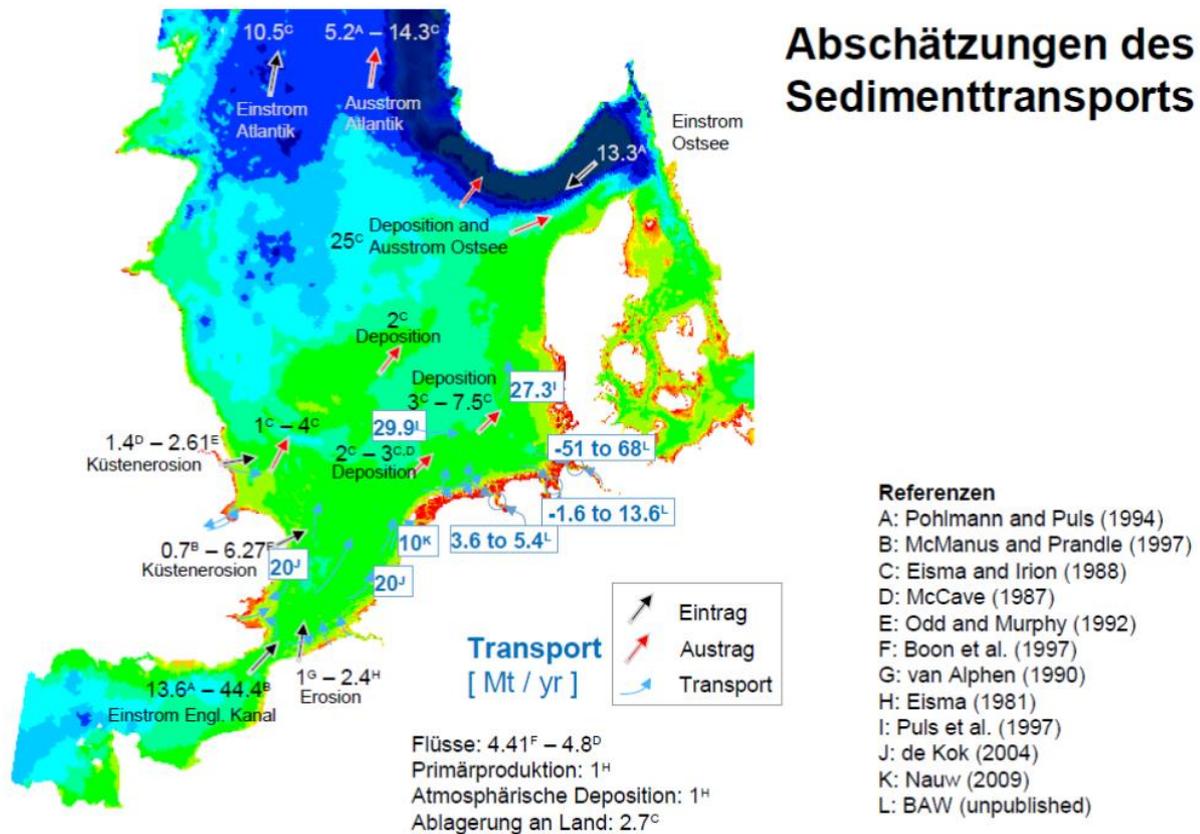


Bild 2-12 Abschätzung des Sedimenttransports in Mt/a auf Basis veröffentlichter Daten

### 2.3.4 Morphodynamik

Als Morphodynamik wird die morphologische Umformung, also die zeitliche Veränderung der Gewässersohle, bezeichnet. Die Analyse der Morphodynamik im Sinne einer morphologischen Aktivität oder Umhüllenden der einzelnen Sohländerungen gelingt durch die Berechnung des morphologischen Raums oder „bed elevation range (BER)“ (Winter 2011). Die morphologische Aktivität an dem Ort  $(i, j)$  in der Zeitspanne von  $t_1$  bis  $t_2$  kann durch die Differenz der maximalen Sohlage  $\text{MAX } z_{i,j}(t)$  und der minimalen Sohlage  $\text{MIN } z_{i,j}(t)$  abgeschätzt werden:

$$\text{BER}_{i,j} = \left| \text{MAX } z_{i,j}(t) - \text{MIN } z_{i,j}(t) \right|, \forall t_1 \leq t \leq t_2$$

Vorteil dieser Betrachtungsweise ist, dass alle Informationen von Sohländerungen im betrachteten Zeitraum einfließen. Deutlich wird dies an dem Beispiel einer migrierenden Rinne, die über den Gesamtbereich der Migration eine hohe morphologische Aktivität erzeugt, wenn diese Migration durch die zugrundeliegenden Daten abgedeckt ist. Der auf Basis des Auf-Mod Datensatzes der Bathymetrie berechnete morphologische Raum ist in Bild 2-13 dargestellt.

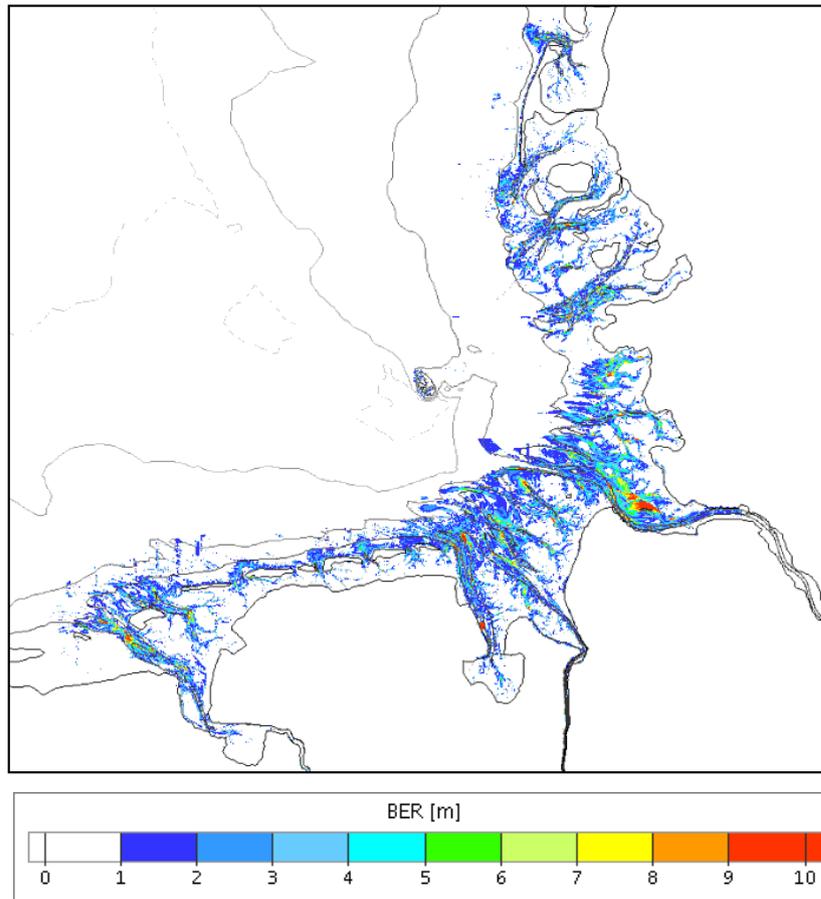


Bild 2-13 Morphologischer Raum (BER) auf Basis des datenbasierten AufMod-Modells

Die Abbildung zeigt die höchste morphologische Aktivität im Bereich der äußeren Ästuar- und den Tiderinnen im ostfriesischen und nordfriesischen Bereich.

### 3 Anforderungen an das Nordsee-Basismodell

#### 3.1 Untersuchungsgebiet

Das Untersuchungsgebiet umfasst die gesamte Nordsee vom Englischen Kanal bis zur Nordspitze Schottlands und die westliche Ostsee (Bild 3-1). Diese Ausdehnung ist notwendig, um die großräumigen Sedimenttransportpfade insbesondere von der englischen Küste in die Deutsche Bucht bis hin zur Norwegischen Rinne korrekt beschreiben zu können. Im Bereich der Deutschen Bucht liegt der Fokus der Untersuchungen, hier ist eine erhöhte Auflösung zur Abbildung des Küstenbereichs mit den angeschlossenen Ästuaren notwendig. Aussagen über kleinräumige morphodynamische Strukturen können mit der angestrebten Modellauflösung des Basismodells nicht getroffen werden. Hierzu ist zu einem späteren Zeitpunkt der Aufbau von Detailmodellen geplant.

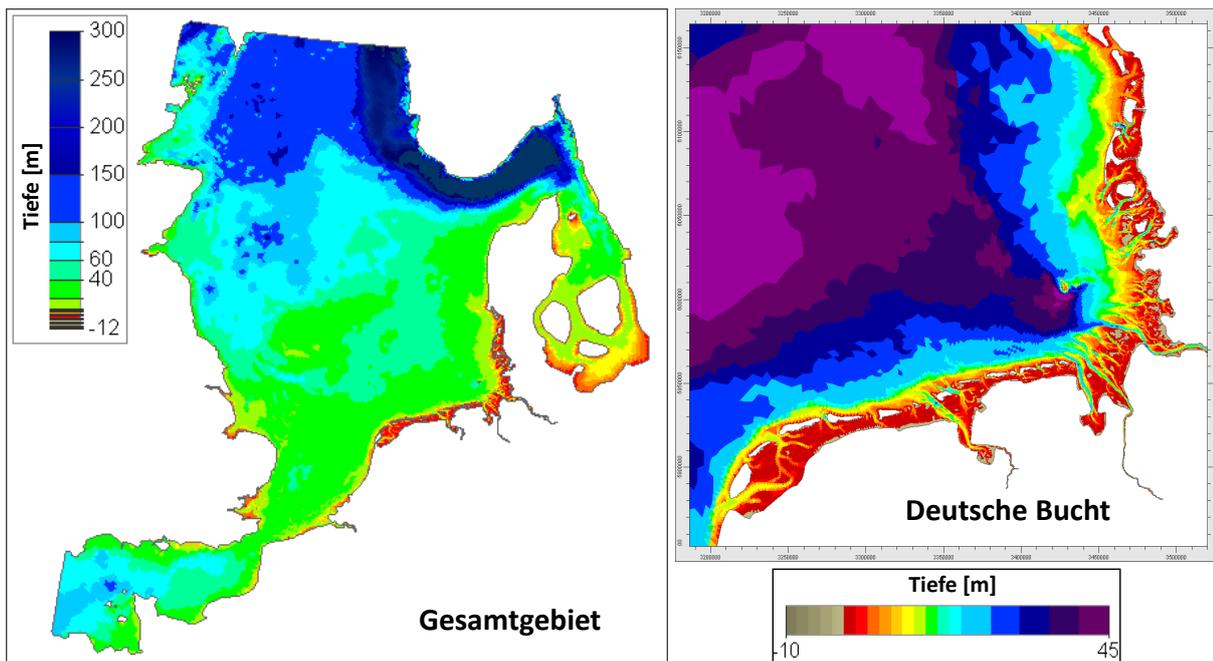


Bild 3-1 Gesamtes Untersuchungsgebiet (links) und Fokusgebiet der Deutschen Bucht (rechts)

#### 3.2 Untersuchungszeitraum

Als Referenzjahr für die Modellkalibrierung und –validierung wurde das Jahr 2006 gewählt. Das Jahr 2006 wurde zuvor im Rahmen des Ressortforschungsprogramms KLIWAS (<http://www.kliwas.de>) als Referenzjahr bestimmt. Wie in der Diskussion der Windsituation (Abschnitt 2.2.1) dargestellt, ist die Häufigkeit hoher Windgeschwindigkeit nicht repräsentativ

für den gesamten Untersuchungszeitraum 1996 – 2007, die Verfügbarkeit von Daten für den Modellaufbau war hier jedoch maßgebend.

Aufbauend auf das Jahr 2006 wird die gesamte Zeitspanne von 1996 bis 2007 in Form von Jahresrechnungen abgedeckt.

### 3.3 Zielgrößen

Ziel der Untersuchungen sind rückblickende Simulationen einzelner Jahre, das heißt es werden synoptische Zustände des Systems berechnet (20 Minuten Abstände) und für nachfolgende Rechnungen vorgehalten, diese umfassen:

- Lage des Wasserspiegels
- Höhe und Richtung der Strömungsgeschwindigkeit
- Seegangparameter (signifikante Wellenhöhen und Peakperioden)
- Strömungsbelastung (Sohlschubspannung)
- Sedimenttransport (Sedimentkonzentration und –transport, Geschiebetransport)
- Lage der Gewässersohle
- Sedimentzusammensetzung (Kornverteilung)

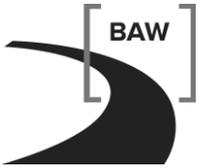
Die Analyse der synoptischen Parameter erfolgt mit Hilfe von Kennwerten, diese sind:

- Wasserstände: Tidekennwerte des Wasserstandes (z.B. Tnw, Thw)
- Strömungsgeschwindigkeiten: flächenhafte Kennwerte der Strömungsgeschwindigkeit (z.B. maximale Flut- und Ebbestromgeschwindigkeit)
- Seegang: flächenhafte Kennwerte des Seegangs (signifikante Wellenhöhen und Peakperioden)
- Strömungsbelastung: flächenhafte Kennwerte der Sohlschubspannung
- Sedimenttransport (Suspension und Geschiebe): flächenhafte Sedimenttransporte, Bilanzierung über Profile
- Sohllage: flächenhafte morphologische Änderungen, z.B. Verlagerung von Prielen und Rinnen
- Sedimentzusammensetzung: Flächenhafte Kornverteilung zur Identifikation von Veränderungen der Sedimentzusammensetzung

### 3.4 Anforderungen an die Genauigkeit

Ziel ist die naturähnliche Abbildung der Wasserstände und Strömungsgeschwindigkeiten im Bereich der gesamten Nordsee, insbesondere der Deutschen Bucht.

- Als Anhaltspunkt für eine Naturähnlichkeit wird die Wiedergabe der küstenfernen Pegel (z.B. Leuchtturm Alte Weser, Helgoland) eine mittlere Genauigkeit der Kennwerte des Wasserstandes von ca.  $\pm 15$  cm im Tnw und Thw und  $\pm 1$  Stunde in der Phase angestrebt.
- Die Validierung erfolgt durch die Bewertung der Güte der Wiedergabe von Partialtiden und Kennwerten des Wasserstandes.



- Zusätzlich ist eine korrekte Wiedergabe von Sturmereignissen, wegen derer morphologischer Wirksamkeit, sicher zu stellen.

#### 4 Konzeptmodell

Die Untersuchung der Hydrodynamik und des großräumigen Sedimenttransports des Gesamtsystems Nordsee mit Fokus auf der Deutschen Bucht macht die Berücksichtigung von Prozessen auf unterschiedlichen Skalen notwendig. Eine beispielhafte Darstellung von Prozessen in einem Schelfmeer wie der Nordsee ist in Bild 4-1 dargestellt (Nittrouer and Wright 1994).

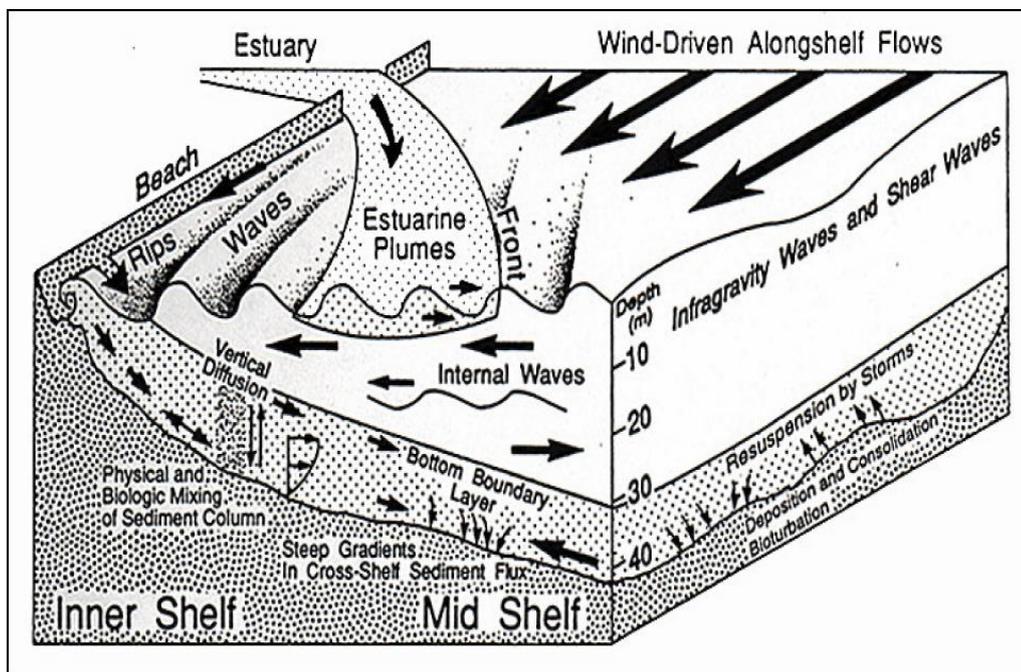


Bild 4-1 Prozesse im Gesamtsystem Schelfmeer (Nittrouer and Wright 1994)

Es wird daher ein prozessbasierter Ansatz gewählt, der die folgenden Einflussfaktoren berücksichtigt:

- die Variabilität der Tide (verschiedene Verhältnisse von Spring- / Nippzyklen),
- die Veränderungen der Mittelwasserlagen (langperiodischen Schwankungen des Füllstandes der Nordsee),
- die gemessenen (deutsche Ästuar) bzw. klimatologischen Oberwasserzuflüsse,
- die flächenhafte, zeitvariable Windverteilung über der gesamten Nordsee (DWD-Vorhersagewindfelder) und
- orts- und zeitvariable Seegangsfelder.

Um nicht nur großräumige (Schelfmeer) sondern auch die kleinräumige (Ästuar) hydro- und sedimentdynamische Prozesse korrekt wiederzugeben, müssen die Berechnungen dreidimensional durchgeführt werden. Nur so können neben der zweidimensionalen Ausbreitung der Tidewelle auch Vermischungsprozesse des salzarmen Oberwassers in den Ästuaren

abgebildet werden. Neben der vertikalen Auflösung bedingt dies natürlich auch für die horizontale Auflösung höhere Anforderungen in den Ästuaren als im z.B. im Inneren der Nordsee.

Es ist zu erwarten, dass sich die morphologisch prägenden Prozesse den einzelnen Bereichen (z.B. Küstennahbereich im Vergleich zur Inneren Nordsee) unterscheiden. So ist im Inneren der Nordsee eine starke Abhängigkeit von den Tidenströmungen, im Küstennahbereich jedoch ein zunehmender Einfluss des Seegangs zu erwarten. Speziell in Ästuaren werden auch barokline Strömungen und der Oberwasserabfluss selbst eine Rolle spielen. Es ist also eine gekoppelte Berechnung von Hydrodynamik, Salztransport und Seegang notwendig. Die barokline Zirkulation durch die Wirkung von Temperaturunterschieden wird als eher gering eingeschätzt und hier nicht weiter betrachtet. Trotzdem ist es empfehlenswert in nachfolgenden Untersuchungen den Wärmetransport zu berücksichtigen, um die Dämpfung des vertikalen Austausches turbulenter kinetischer Energie bei bestehender thermischer Schichtung zu berücksichtigen. Ein zukünftiges Forschungsthema stellt der Einfluss von biologischen Komponenten (Bewuchs, Bioturbation, Produktion) dar, zurzeit kann diese Betrachtung noch nicht realisiert werden und muss deshalb als Fehlergröße in die abschließende Bewertung einbezogen werden.

Für eine naturähnliche Betrachtung des Sedimenttransports ist eine Approximation der natürlichen Kornverteilung notwendig, die hier als fraktionierter Sedimenttransport berücksichtigt wird. Die Zielsetzung langfristiger Berechnungen macht eine morphodynamische Berechnung erforderlich, das heißt eine sich ändernde Sohlage als Reaktion auf die Hydro- und Sedimentdynamik.

## 5 Literaturverzeichnis

- Davies AM, Kwong SC, Flather RA (1997) Formulation of a variable-function three-dimensional model, with applications to the M2 and M4 tide on the North-West European Continental Shelf. *Continental Shelf Research* 17(2):165–204. doi: 10.1016/S0278-4343(96)00025-8
- DWD (2007) Klimastatusbericht 2006 - Aktuelle Ergebnisse des Klimamonitorings. Klimastatusbericht, vol 2006. Deutscher Wetterdienst, Offenbach am Main
- Figge K (1981) Begleitheft zur Karte der Sedimentverteilung in der Deutschen Bucht 1:250000 (Nr. 2900)
- Gerritsen H, Boon J, van der Kaaij T, Vos R (2001) Integrated Modelling of Suspended Matter in the North Sea. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 53(4):581–594. doi: 10.1006/ecss.2000.0633
- Gerritsen H, Vos RJ, van der Kaaij T, Lane A, Boon JG (2000) Suspended sediment modelling in a shelf sea (North Sea). *Coastal Engineering* 41(1-3):317–352. doi: 10.1016/S0378-3839(00)00042-9
- Hirschhäuser T, Mewis P, Zanke U (1998) Determination of the Initial Distribution of Particle Size in Morphodynamic Modelling in Tidal Areas
- Loewe P (ed) (2009) System Nordsee – Zustand 2005 im Kontext langzeitlicher Entwicklungen. *Berichte des BSH*, vol 44, Hamburg und Rostock
- Nittrouer CA, Wright LD (1994) Transport of particles across continental shelves. *Rev. Geophys.* 32(1):85. doi: 10.1029/93RG02603
- OSPAR Commission (2000) Quality status report 2000. OSPAR Commission, London
- Otto L, Zimmerman J, Furnes G, Mork M, Saetre R, Becker G (1990) Review of the physical oceanography of the North Sea. *Netherlands Journal of Sea Research* 26(2-4):161–238. doi: 10.1016/0077-7579(90)90091-T
- Plüß A (2003) Das Nordseemodell der BAW zur Simulation der Tide in der Deutschen Bucht. *Die Küste* 67:83–127
- Puls W, Heinrich H, Mayer B (1997) Suspended particulate matter budget for the German Bight. *Marine Pollution Bulletin* 34(6):398–409. doi: 10.1016/S0025-326X(96)00161-0
- Winter C (2011) Macro scale morphodynamics of the German North Sea coast. *Journal of Coastal Research* 64:706–710
- Zeiler M, Schulz-Ohlberg J, Figge K (2000) Mobile sand deposits and shoreface sediment dynamics in the inner German Bight (North Sea). *Marine Geology* 170(3-4):363–380. doi: 10.1016/S0025-3227(00)00089-X
- Zeiler M, Schwarzer K, Ricklefs K (2008) Seabed Morphology and Sediment Dynamics. *Die Küste*(74):31–44







**Bundesanstalt für Wasserbau**  
Kompetenz für die Wasserstraßen

Kußmaulstraße 17 · 76187 Karlsruhe  
Tel. 0721 97 26-0 · Fax 0721 97 26-45 40

Wedeler Landstraße 157 · 22559 Hamburg  
Tel. 040 81 908-0 · Fax 040 81 908-373

[www.baw.de](http://www.baw.de)