



**Aufbau von integrierten Modellsystemen  
zur Analyse der langfristigen  
Morphodynamik in der Deutschen Bucht**

***AufMod***

**Gemeinsamer Statusbericht  
für das Gesamtprojekt  
mit  
Beiträgen aus allen  
7 Teilprojekten**

**Stand: 15. April 2011**

## Zusammenfassung

Das Gesamtvorhaben dient dem Aufbau von integrierten Modellsystemen (**AufMod**) zur Analyse der langfristigen Morphodynamik in der Deutschen Bucht. Auslöser für dieses Vorhaben ist eine im Jahr 2008 durchgeführte Ausschreibung des KFKI mit einer detaillierten Anforderungsliste. Hervorzuheben ist, dass die Ausschreibung verschiedene Einzelaspekte der Sedimentbewegung formuliert, die über eine reine Analyse der Veränderungen in der Bathymetrie weit hinaus gehen. Das nunmehr seit über einem Jahr bearbeitete Gesamtvorhaben orientiert sich sehr eng an den damaligen Ausschreibungsdetails. Es werden nahezu alle genannten Punkte bearbeitet. Hiervon ausgenommen sind brandungserzeugte Sedimentbewegungen, morphologische Veränderungen von Stränden und der Einsatz der Methode neuronaler Netze.

Die Bearbeitung der Sedimenttransportprozesse in der Deutschen Bucht lenkt den Blick zunächst auf großräumige und langfristig stattfindende geomorphologische Veränderungen. Um die Prozesse, die diese Veränderungen bewirken, vor dem Hintergrund einer physikalisch plausiblen Wirkungskette bearbeiten zu können, ist es notwendig, alle verfügbaren Daten für die marine und küstennahe Bathymetrie (einschließlich lokal auftretender Bodenformen) und vor allem auch für die Sedimentologie zu akquirieren und für die Zwecke des Projekts aufzubereiten. Die Akquisition von Daten war fallweise schwierig und insgesamt aufwendig. Die Aufarbeitung des Altdatenbestandes ist weit voran geschritten. Historische Informationen zu den Bodenformen in der Deutschen Bucht wurden ebenfalls aufbereitet.

Hervorzuheben ist, dass es im Projekt nicht nur um eine einzige Startsituation für Bathymetrie und Sedimentologie geht, von der aus man mit Simulationsmodellen zeitliche Entwicklungen berechnen könnte. Es ist vielmehr erforderlich, für verschiedene, auch im Verlauf des Projekts ggf. noch festzulegende Historien in Zeit und Raum konsistente Daten gewinnen zu können. Vor diesem Hintergrund wurde im Projekt sehr frühzeitig die Entscheidung getroffen, ein umfassendes softwaregestütztes Bodenmodell zu generieren, das die Daten zur Bathymetrie und Sedimentologie gemeinsam verwaltet und funktional, d. h. nach spezifischen Vorgaben, verarbeiten und dem Anwender anforderungsgerecht zur Verfügung stellen kann. Die Entscheidung für diese Vorgehensweise bedeutete zunächst einmal mehr Aufbauarbeit im Projekt. Diese zahlt sich aber im späteren Projektverlauf aus, zumal das funktionale Bodenmodell mit Methoden für datenbasierte Analysen ausgestattet werden kann. Darüber hinaus hat man im Rahmen dieser Entscheidung auch daran gedacht, a priori Wege zu gehen, die zu einsatzfähigen Produkten in den am Projekt beteiligten Ressortforschungseinrichtungen führen können.

Wenn man sich mit den Sedimentprozessen in der Deutschen Bucht befasst, kann man dies nicht ohne Berücksichtigung der gesamten Nordsee tun. Im Projekt wurden deshalb auch umfangreiche Daten der Anrainerstaaten akquiriert und in das funktionale Bodenmodell übernommen. Da die großräumigen und langfristigen Sedimentbewegungen auch von lokalen, teilweise zeitlich beschränkten Prozessen beeinflusst werden können, wird im Gesamt-

vorhaben auch auf bestimmte Gebiete fokussiert. Hierzu gehören Gebiete auf dem Schelf bzw. im Küstenvorfeld, im Vorstrandbereich, im Bereich von Inseln und im Wattenmeer. Von besonderem Interesse sind auch die Seewasserstraßen, primär die Mündungsbereiche der Ästuare sowie bestimmte sedimentologische Teilgebiete, wie z. B. die Genese der "Schlicklinse" im Süden von Helgoland. Zur Ergänzung der vor dem Projekt verteilt vorhandenen Daten werden für das Vorhaben mit speziellen Messmethoden zusätzliche Daten erhoben, die insbesondere der datenorientierten Analyse dienen sollen, um das mit Modellen erzielbare Prozessverständnis nachhaltig zu verbessern. Die Auswertung der aktuellen Messfahrten für das Projekt ist zeitaufwendig. Die Ergebnisse dienen primär der direkten Interpretation. Im letzten Projektjahr ist zu prüfen, inwieweit diese Daten noch Eingang in die Simulationsmodelle finden können.

Im Rahmen der Anwendung deterministischer Prozessmodelle wird ein konsequenter Multi-Modell-Ansatz mit Simulationsmodellen unterschiedlicher Prozessauflösung verwendet, um die Streubreite der Ergebnisse abschätzen zu können. Die Prozessmodelle werden von ihrem grundlegenden Ansatz her in prozessbasierte und prozessorientierte Simulationsmodelle eingeteilt. Für die Modelle, welche auf unstrukturierten Modellverfahren basieren, werden überwiegend identische Gitternetze und Randwerte verwendet. Soweit möglich, wird auch ein einheitliches Post-Processing durchgeführt, um den Vergleich der Modellergebnisse mit einheitlichen Methoden zu gewährleisten. Mit diesen im Gesamtvorhaben getroffenen Vereinbarungen und Regelungen soll gewährleistet werden, dass die Formulierung „*integriertes Modellsystem*“ nicht nur eine leere Worthülse bleibt. Die Integration des Modellsystems steht auf verschiedenen Säulen:

1. Alle Simulationsmodelle werden durch ein funktionales Bodenmodell mit Eingangsdaten versorgt.
2. Die Simulationsmodelle nutzen – soweit verfahrensbedingt möglich – einheitliche Eingangsdaten (Gitternetze, Randwerte).
3. Die Modelle werden vergleichend validiert. An der Validierungsstrategie wird noch weiter gearbeitet.
4. Die Modellergebnisdaten werden, soweit derzeit möglich, mit einheitlichen Methoden prozessiert.
5. Ausgewählte Modellergebnisdaten werden in das funktionale Bodenmodell übernommen und können dort auch für datenorientierte Analysen herangezogen werden.

Der grundlegende Aufbau des integrierten Modellsystems ist erfolgreich gelungen und wird in 2011 abgeschlossen werden.

Die Fortführung der Simulationsprojekte für die beabsichtigten Untersuchungszeitspannen (Jahre, Jahrzehnt, Jahrhundert) wird noch eine Herausforderung in der zweiten Projekthälfte darstellen.

Im dritten Projektjahr wird eine abschließende Synthese erarbeitet, die alle relevanten Ergebnisse der Teilprojekte einbeziehen soll. Ziel ist die übergreifende, gemeinsame Bewertung zur Beantwortung der in der KFKI - Ausschreibung formulierten Ziele.

<b>Inhaltsverzeichnis</b>		<b>Seite</b>
1	Einführung in das Gesamtprojekt	1
1.1	Bezug zur Ausschreibung des KFKI	1
1.2	Ziel des Gesamtprojekts	2
1.3	Leitung, Ziele und Inhalte der Teilprojekte	4
1.4	Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter in den Teilprojekten	12
1.5	Projektorganisation	13
2	Konzeptioneller Ansatz des integrierten Modellsystems	15
2.1	Konzeptionelles Bodenmodell	16
2.2	Konzeptionelles Simulationsmodell	18
2.3	Verzahnung von Boden- und Simulationsmodell	20
3	Bodenmodell	22
3.1	Beobachtungsdaten für das Bodenmodell	22
3.1.1	Vorhandene Beobachtungsdaten	23
3.1.1.1	Bathymetrische Vermessungsdaten	24
3.1.1.2	Sedimentologische Daten	27
3.1.1.3	Hydroakustische Daten	31
3.1.1.4	Bodenformen	32
3.1.2	Im <i>AufMod</i> -Projekt erhobene Beobachtungsdaten	33
3.1.2.1	Schelf / Vorstrand	37
3.1.2.2	Watten	38
3.1.2.3	Ästuare	39
3.1.3	Beobachtungsdaten aus laufenden Parallelprojekten	40
3.2	Bodenformmodell	41
3.2.1	Rekonstruktion historischer Daten	42
3.2.2	Analyse aktueller Bodenformen	43
3.3	Das funktionale Bodenmodell	47
3.3.1	Anforderungen an das funktionale Bodenmodell	47
3.3.2	Methoden zur datenbasierten Modellierung	48
3.3.2.1	Digitale Bathymetrie	48
3.3.2.2	Digitales Bodenformmodell	49
3.3.2.3	Digitale Sedimentologie	50
3.3.3	Produkte des funktionalen Bodenmodells	51
4	Ergebnisse des Bodenmodells	53
4.1	Schelf / Vorstrand	53

4.2	Wattenmeer	60
4.3	Ästuare	70
5	Simulationsmodelle	77
5.1	Klassifizierung der Simulationsmodelle	78
5.2	Beschreibung der Modellverfahren	80
5.2.1	Datenbasiertes Simulationsmodell	83
5.2.2	Prozessbasierte Simulationsmodelle	83
5.2.3	Prozessorientiertes Simulationsmodell	84
5.2.3.1	Zielsetzung	84
5.2.3.2	Modellkonzept	84
5.2.3.3	Programmaufbau	87
5.2.3.4	Gezeiteninduzierte Strömungen	89
5.2.3.5	Verfahren für Kennwerte von Partialtiden über Wattflächen	90
5.2.3.6	Entwicklungsstand des Simulationssystems	91
5.3	Modellsteuerung	91
5.3.1	Rand- und Anfangsbedingungen	91
5.3.2	Modellausdehnungen und –auflösung	93
5.3.2.1	Nordseemodell	93
5.3.2.2	Detailmodelle	94
5.4	Validierung der Simulationsergebnisse	95
5.4.1	Gemeinsame Validierungsstrategie	96
5.4.2	Spezifische Validierungsstrategie der datenbasierten Simulation	97
5.4.3	Spezifische Validierung der prozessbasierten Simulationen	98
5.4.4	Spezifische Validierung der prozessorientierten Simulation	100
6	Ergebnisse der morphodynamischen Simulationen	102
6.1	Datenbasierte Simulation	102
6.2	Prozessbasierte Simulation	103
6.2.1	Sensitivitätsstudien	103
6.2.2	Entmischung	105
6.2.3	Vorhersage von Bodenformen	107
6.2.4	Transport von Schwebstoffen	108
6.2.5	Vorhersage der Bodenevolution	110
6.2.6	Strategien zur methodisch einheitlichen Auswertung	112
6.3	Prozessorientierte Simulation	113
6.3.1	Langfristige Sohlevolution	113
6.3.2	Sedimentverteilungsmuster	114
6.4	Klimaänderungsszenarien	115

7	Zusammenfassung	117
7.1	Stand der Bearbeitung	117
7.2	Synthese (erster Versuch)	121
7.3	Botschaften für die Öffentlichkeitsarbeit	125
8	Dokumentation und Verfügbarkeit der <i>AufMod</i> -Ergebnisse und Produkte	127
9	Literaturverzeichnis	130
10	Glossar	135
11	Anhang	140
11.1	Liste der projektbezogenen Veröffentlichungen / Vorträge	140
11.1.1	AufMod-B	140
11.1.2	AufMod-C	140
11.1.3	AufMod-F	141
11.1.4	AufMod-G	141
11.2	Validierungsdokumente Hydrodynamik und Transport	142
11.2.1	Rand- und Anfangsbedingungen	145
11.2.2	Prozessbasierte Modellierung – UnTRIM Grobmodell	149

<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>Seite</b>
Abbildung 1-1: Projektstruktur	14
Abbildung 2-1: Konzeptioneller Ansatz des integrierten Modellsystems	16
Abbildung 2-2: Konzeptionelles Bodenmodell	18
Abbildung 2-3: Übersicht des konzeptionellen Simulationsmodells	19
Abbildung 3-1: Übersicht der repräsentativen Teilflächen zur hochauflösenden Datenerhebung in <i>AufMod</i>	23
Abbildung 3-2: Aussagebereiche der berücksichtigten Vermessungen, eingefärbt nach Aufnahmejahr von gelb (ältere Daten) zu lila (jüngere Daten)	25
Abbildung 3-3: Vermessungsdaten aus dem Jahr 2003, eingefärbt nach Datenerheber bzw. -lieferant	27
Abbildung 3-4: Lokationen von Sedimentproben und Datenherkunft	29
Abbildung 3-5 Verteilung der Bohrungen und des hydroakustischen Messnetzes (rot) zur Erfassung der Holozänbasis / Mächtigkeit der mobilen Deckschicht	30
Abbildung 3-6: Übersicht über die derzeit für <i>AufMod</i> erfassten Datenbestände des IFG-Archivs	31
Abbildung 3-7: Untersuchungsbereich der Studie von ( <i>Ulrich, 1973</i> ) in der Deutschen Bucht	32
Abbildung 3-8: Beispiel Datensatz Außenweser WSA Bremerhaven: a) 2008, b) 2009	33
Abbildung 3-9: Informationsebenen als Eingangsdaten für das Bodenmodell	35
Abbildung 3-10: Übersicht über die untersuchten Flächen in den repräsentativen Teilgebieten von <i>AufMod-F</i> und <i>AufMod-G</i>	36
Abbildung 3-11: Weiterer Bereich (BSH) für das Teilgebiet Shelf / Vorstrand	38
Abbildung 3-12: Rekonstruktion der Daten von ( <i>Ulrich, 1973</i> ) am Beispiel der Außenjade: a Rohdaten, b digitalisierte Punkte / Polygone, c rekonstruierte Höhen, d Darstellung der Höhen (Mittelwerte) im Gesamtbereich	43
Abbildung 3-13: Parameter zur Beschreibung von Bodenformen	44
Abbildung 3-14: Ergebnisse der Analyse eines Feldes von Bodenformen in der Außenweser (Ausschnitt siehe Abbildung 3-8)	45
Abbildung 3-15: Sensitivität des detektierten Bereichs von der Wahl des Winkels. a) Vergleich der detektierten Felder mit Bodenformen bei der Verwendung eines Winkels von 5°, bzw. 10° - b) Vergleich der detektierten Bodenformen (Winkel >10°) der Jahre 2008 und 2009	46
Abbildung 3-16: quasikonsistente Tiefenverteilung der Deutschen Bucht am 29.05.1989	49
Abbildung 3-17: gemessene und interpolierte Summenkurve vor Spiekeroog	51
Abbildung 3-18: Bilanzhöhe zwischen 1989 und 2009	52
Abbildung 4-1: Lage der Kilometer-Punkte, an denen zur Untersuchung der Sedimentdynamik Querprofile ausgewertet wurden	53
Abbildung 4-2: Querprofilauswertung der Jahre 2005-09 für KP 627.3 (Europipe 2)	54

Abbildung 4-3: Änderungen der Sedimentmächtigkeiten über den Rohrleitungen Europipe 1 und 2 im Tiefenbereich >15 m an vier KP	55
Abbildung 4-4: Untersuchungsgebiet im Küstenvorfeld von der Insel Spiekeroog	56
Abbildung 4-5: a) Sedimentverteilung auf der Basis von SSS und MBES-Daten b) 3-D-Blick aus Richtung SO und c) 3-D-Blick aus Richtung NO	56
Abbildung 4-6: Differenzkarte der Tiefenänderungen zwischen a) 2003-2007; b) 2007- 2010; c) 2003-2010. Die Sandrücken stammen aus den Daten von 2010	57
Abbildung 4-7: Vergleich von vier Querprofilen aus hochpräzisen MBES-Messungen aus den Jahren 2003, 2007 und März 2010	57
Abbildung 4-8: Das in 2010 kartierte Gebiet westlich von Sylt. A: Morphologie aus MBES-Daten, B: SSS Mosaik sowie Sedimententnahmepositionen	58
Abbildung 4-9: Verlauf der Europipe 2 durch das Seegatt Accumer Ee mit grafischer Auswertung der Differenzen der Sedimentmächtigkeiten	61
Abbildung 4-10: Histogramme der Differenzen (jahresweise) der Sedimentüberdeckung über der Rohrleitung Europipe 2	62
Abbildung 4-11: Morphologische Veränderung der Hauptstromrinne der Accumer Ee anhand der –8m- Linie (NN). Ergänzung der BSH-Vermessungsdaten 2008	64
Abbildung 4-12: Morphologische Änderungen des Riffbogens der Accumer Ee anhand der –4 m Tiefenlinie (NN)	65
Abbildung 4-13: Differenz der Sedimentüberdeckung von Europipe 2 (Punkte 2008-2006) mit den Differenzen der interpolierten BSH-Vermessungsdaten	66
Abbildung 4-14: Kartenausschnitt der Sedimentklassifikation in der Piep, Grundlage Deutsche Seekarte 105_1, Nautischer Verlag (BSH)	67
Abbildung 4-15: Verlagerung des Tertiusandes führt zur Einengung der Norderpiep	68
Abbildung 4-16: Sedimentverteilung in der Norderhever, Hintergrund Deutsche Seekarte 106_1, Nautischer Verlag (BSH)	69
Abbildung 4-17: SSS Aufnahmen, aus denen die Lage und Geometrie von Sohlformen anhand unterschiedlich hoher Rückstreuwerte erkennbar wird. Links Ausschnitt Sohloberfläche Piep, rechts Norderhever im Jahr 2010	69
Abbildung 4-18: Kartenausschnitte der 2005 und 2010 durchgeführten Sedimentklassifizierung im Weser-Ästuar	71
Abbildung 4-19: Vergleichende Gegenüberstellung von Kartenausschnitten aus der Sedimentverteilungskarte BSH Nr. 2900 von <i>Figge (1981)</i> und der Sedimentklassifizierung des Weser-Ästuars vom März 2010	72
Abbildung 4-20: Ausschnitt des Elbe-Ästuars mit Lokationen, an den Greiferproben Schlickgerölle enthielten, sowie Ausschnitte aus SSS-Aufnahmen, die konsolidierte Feinsedimente an den Uferböschungen sowie subaquatische Dünen im Fahrwasser mit sehr gut sortierten Sanden verbildlichen.	73
Abbildung 4-21: Studie zur Dünenausrichtung anhand von MBES-Daten (Februar 2010)	75
Abbildung 4-22: Vergleich der Bathymetrie im Februar und März 2010	76
Abbildung 5-1: Skalenkaskade ( <i>Brommer et al. 2009</i> )	79



Abbildung 5-2: Die in <i>TP4</i> für die prozessorientierte Modellierung betrachteten Faktoren des Systems Nordsee	85
Abbildung 5-3: Schematischer Aufbau des Langzeitsimulationsmodells nsea100 (blau hinterlegt)	87
Abbildung 5-4: Interner Ablauf einer Simulation mit nsea100. Der Seegang wird im weiteren Projektverlauf integriert	88
Abbildung 5-5: Exemplarische Ergebnisse für Geschwindigkeiten bei Flut (links) und Ebbe (rechts)	90
Abbildung 5-6: M2-Amplitude – links: Werte aus dem BAW-Modell; rechts extrapolierte Werte für das Simulationssystem nsea100	91
Abbildung 5-7: Aus den sedimentologischen Eingangsdaten berechneter mittlerer Korndurchmesser	92
Abbildung 5-8 Darstellung des gesamten Modellgebiets	93
Abbildung 5-9 Gitternetzauflösung des Grobmodells im Bereich Ostfriesland (links: Bathymetrie, rechts: Gitternetz)	94
Abbildung 5-10: Tiefenverteilung der Detailmodelle Elbmündung und Spiekeroog	95
Abbildung 5-11: Vergleich der M2-Partialtide / mittlerer Fehler: Messung, UnTRIM (Grobmodell / Feinmodell) und MARINA	98
Abbildung 5-12: Lage der Bojen zur Seegangsmessung (Seegang: 1.1.2006-09:28), Windfeld und resultierende Wellenhöhenverteilung (MARINA)	99
Abbildung 5-13: Vergleich berechneter zu gemessener Wellenhöhen an der Boje NSB	100
Abbildung 5-14: Vergleich gemessener (Bodenmodell) zu berechneter (nsea100) Sohlentwicklung anhand der 8-m-Tiefenlinie	101
Abbildung 6-1: Bathymetrieentwicklung in der Elbmündung (1990, 2000, 2010)	102
Abbildung 6-2: Resultierende tideinduzierte Sedimenttransportraten bei konstantem mittleren Korndurchmesser von 0.25mm und 2mm (MARINA)	103
Abbildung 6-3 Bathymetrie und Ausdehnung des idealisierten Detailmodells Spiekeroog	104
Abbildung 6-4: Einfluss der Kornvariabilität auf die Bildung von Rinnen im Modell (Simulierte Bathymetrie nach 10 Jahren mit MARINA)	105
Abbildung 6-5 Entmischung eines mittleren Sedimentinventars ohne Seegang (oben) und mit Seegang (unten) mit UnTRIM-SediMorph	106
Abbildung 6-6 Vorhersage von Dünenhöhen (UnTRIM-SediMorph)	108
Abbildung 6-7 Schwebstoffexport der deutschen Nordseeästuare (UnTRIM-SediMorph)	109
Abbildung 6-8 Morphologisch aktive Bereiche aus Messungen Winter (2011) (links) und Modell UnTRIM-SediMorph (rechts)	110
Abbildung 6-9 Bodenevolution für das Jahr 2006: a) funktionales Bodenmodell, b) MARINA, c) UnTRIM-SediMorph und d) nsea100	111
Abbildung 6-10 Querschnittsdefinition zur Bilanzierung der Sedimenttransporte	112
Abbildung 6-11 Exemplarische Entwicklung der Sohle im Gebiet um Baltrum und Langeoog nach 67 Jahren (nsea100)	113

Abbildung 6-12 Beispiel zur zeitlichen Änderung von Sedimentverteilungsmustern nach 38 (2044) und 50 (2056) Jahren (nsea100).	115
Abbildung 6-13 Beispiel zur zeitlichen Änderung von Sedimentverteilungsmustern nach 59 (2065) und 67 (2073) Jahren (nsea100).	115
Abbildung 6-14 Differenz der residuellen Bodenschubspannungswirkung (+80 cm)	116
Abbildung 8-1: Entwurf der Datenströme der verschiedenen Modelle von BAW und BSH. Grün ist geplant, Gelb besteht schon	128
Abbildung 8-2: Entwurf der Gesamtdatenströme durch BAW u. BSH in die MDI-DE. grün ist der geplante Teil von AufMod, blau Teil der MDI-DE	129
Abbildung 11-1 Darstellung der mittleren Salzgehalte aus der Klimatologie von Janssen et al. (1999)	145

<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>Seite</b>
Tabelle 3-1: Übersicht der in <i>AufMod</i> vorhandenen Vermessungsdaten	26
Tabelle 3-2: Übersicht der in <i>AufMod</i> vorhandenen Sedimentdaten	28
Tabelle 3-3: Übersicht der noch zu erwartenden Datensätze zu Korngrößenverteilungen	28
Tabelle 3-4: Übersicht über die seit Projektbeginn durchgeführten schiffsgestützten Ausfahrten für <i>AufMod-F</i> und <i>AufMod-G</i>	35
Tabelle 3-5: Bisherige Datenerhebung im Teilprojekt RAVE – Geologie: Sedimentdynamik und Kolkverhalten im Offshore Testfeld „alpha ventus“	40
Tabelle 4-1: Formparameter der westlich von Sylt auftretenden Sandwellen	59
Tabelle 5-1: Klassifizierung der Modelle nach betrachteten Zeiträumen	79
Tabelle 5-2: Übersicht der verschiedenen Simulationsverfahren in <i>AufMod</i>	81
Tabelle 11-1: Randwerte / Daten für die Simulationsmodelle in <i>AufMod</i>	148

## 1 Einführung in das Gesamtprojekt

### 1.1 Bezug zur Ausschreibung des KFKI

Veranlassung für das Gesamtprojekt ist die vom KFKI im Jahre 2008 veröffentlichte Rahmenausschreibung<sup>1</sup> zur großräumigen und langfristigen Morphodynamik in der Deutschen Bucht. Forschungsobjekt der Rahmenausschreibung ist die Deutsche Nordseeküste mit Fokus auf das Küstenvorfeld, die Vorstrände und Strände, die Inseln und Wattgebiete sowie die Ästuare. Im Einzelnen formuliert die Rahmenausschreibung folgende Forschungsziele bzw. maßgebliche Untersuchungsinhalte und -grundlagen:

- Es sollen plausibilisierte, konsistente Daten für Bathymetrie und Sedimentverteilung erstellt und verwendet werden.
- Die Gezeiten- und winderzeugten Strömungen wie auch die Seegangs- und brandungserzeugten Strömungen sind zu berücksichtigen.
- Zielsetzung ist die Definition und Analyse von Sedimentverteilungsmustern und deren Stabilität, sowie von Sedimenttransportwegen, -richtungen, -mengen und -bilanzen zum Verständnis der langfristigen und großräumigen Sedimentdynamik.
- Großräumige Transport- und Formänderungsprozesse sind über verschiedene Zeitskalen zu prognostizieren.
- Auf Basis der Ergebnisse soll die Streubreite verschiedener deterministischer Modellverfahren, neuronaler Netze und empirischer Modellansätze aufgezeigt werden.
- Ergebnisse sollen in eine Datenbank offen für die Nutzung durch Dritte eingebunden werden.
- Die Modellsysteme sollen für ausgewählte Szenarien (erwartetes Klima, Anstieg des Meeresspiegels und Änderung des Seegangsklimas) verwendet werden können.

Das **Gesamtprojekt** wurde mit Schreiben vom 13.07.2009 bewilligt.

Die folgenden Institutionen sind Zuweisungsempfänger:

BSH (03KIS082),  
BAW (03KIS084),  
Universität der Bundeswehr/München (03KIS085)

Zuwendungsempfänger sind:

Universität Bremen (03KIS083),  
smile consult GmbH, Hannover (03KIS086),  
Universität Kiel (03KIS087),  
Senckenberg Gesellschaft für Naturforschung, Frankfurt (03KIS088)

---

<sup>1</sup> KFKI aktuell 1/2008 (<http://www.kfki.de/kfki-aktuell-inhalt-2008-01/de>, Zugriff 15.03.2011)

Die Zuwendungsempfänger haben einen **Verbund AufMod** hergestellt.

Leitung Gesamtprojekt: Dr. Harro Heyer  
Leitung Verbund: Prof. Dr. Kerstin Schrottke

## 1.2 Ziel des Gesamtprojekts

Die topografische Entwicklung der Gewässersohle (Geomorphodynamik, nachfolgend als Morphodynamik bezeichnet) in der Nordsee und in den Küstengewässern der Deutschen Bucht kann verschiedenen Raum- und Zeitskalen zugeordnet werden. In der Betrachtung kleiner (lokaler) Skalen werden z. B. das Verhalten oder die Eigenschaft einzelner Sedimentkörner, die Dynamik von Transportkörpern (z. B. subaquatische Dünen) oder die Kolkentwicklung an Bauwerken untersucht. Auf der räumlich mittleren (regionalen) Skala geht es um die Veränderungen und Verlagerungen von Sedimenten im Bereich ausgewählter Küstenabschnitte mit dem Küstenvorfeld, Ebbdeltas, Wateinzugsgebieten und in Ästuaren mit ihren weit in die Deutsche Bucht reichenden Mündungsbereichen, Fahrrinnen, Fahrwassern und Häfen. Im Projekt **AufMod** wird eine skalenübergreifende, langfristige Betrachtungsweise angestrebt, indem auch Prozesse zwischen der Nordsee und der Deutschen Bucht mit ihrer amphibischen Küstenzone und den Ästuaren berücksichtigt werden.

Die für den Einsatz im Gesamtprojekt **AufMod** vorgesehenen Simulationsmodelle müssen somit in der Lage sein, das Spektrum der kleinen, mittleren und großen Raumskalen zu berücksichtigen. Änderungen an lokal ausgeprägten Sohlformen können schon nach Stunden oder Tagen festgestellt werden, insbesondere bei kurzzeitig starker Beanspruchung durch ein Strömungs- oder Seegangereignis. Kurze und heftige Ereignisse wie z. B. Sturmfluten können die Morphologie in großen Küstengebieten verändern (*Winter et al., 2006; Etri & Mayerle, 2006; Kuiry et al., 2009*). Hingegen können mittlere Verhältnisse mit mittleren Belastungen der Gewässersohle in ihrer natürlichen Variabilität zu schleichenden und damit langfristigen oder auch zyklischen Veränderungen der Morphologie (Sedimentologie) mit häufig sehr großen Umlagerungsmengen führen. Morphologische Änderungen in den verschiedenen Raumskalen sind mit den entsprechenden Zeitskalen gekoppelt, die in den morphodynamischen Modellen zu berücksichtigen sind.

Seit etwa drei Jahrzehnten werden mathematische prozessbasierte Simulationsmodelle entwickelt und gepflegt, mit denen nicht nur Wasserstände, Strömungen, Seegang und der Transport im Wasserkörper gelöster Substanzen berechnet werden, sondern mit denen auch der Transport von Sedimenten abgeschätzt wird, um daraus schließlich mögliche Veränderungen der Bathymetrie (Morphodynamik) zu bestimmen.

Da die Wechselwirkungen zwischen der Dynamik des Wasserkörpers und den vielfältigen Formen und Eigenschaften der Sedimente sehr komplex sind, unterliegt die Simulation der Morphodynamik gewissen Unsicherheiten (Streubreite\*). Aus diesem Grunde ist es bis heute

nicht gelungen, ein skalenübergreifendes Simulationsmodell für die jeweils ortsspezifische Morphodynamik eines größeren Gewässersystems umfassend zu validieren (z.B. Lesser *et al.*, 2004, Ecofys *et al.*, 2009). Mit den heute verfügbaren Möglichkeiten in der numerischen, prozessbasierten Simulation wurden erste positive Erfahrungen gewonnen. Sie lassen erwarten, dass noch bestehende Defizite, insbesondere in der Simulation der Bodenevolution, durch FuE-Projekte beträchtlich vermindert werden können. Die FuE-Projekte sollten jedoch nicht isoliert voneinander betrieben, sondern sinnvoll miteinander verzahnt werden, weil diese interdisziplinäre Forschungsaufgabe eine große Herausforderung darstellt.

Die mit dem Verbundvorhaben **AufMod** erzielten Forschungsergebnisse sollen verwertbare Grundlagen liefern, die mittel- bis langfristig kontinuierlich weiter gepflegt und entwickelt werden können:

- Zu diesen Grundlagen gehört als erste unverzichtbare Stufe ein umfassendes Bodenmodell, das im Rahmen einer Kernaufgabe von einer Institution dauerhaft gepflegt und wissenschaftlich genutzt werden muss. Das Bodenmodell liefert einerseits Datengrundlagen für datenbasierte Analysen der Morphodynamik sowie für die Anwendung und Validierung prozessbasierter Simulationsmodelle. Hierzu werden neben den Messergebnissen und Analysen des BSH gemeinsam mit der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, dem Forschungsinstitut Senckenberg in Wilhelmshaven und MARUM von der Universität Bremen auch die datenbasierten Modellansätze aus den KFKI-Projekten KoDiBa (Milbradt *et al.*, 2005) und ImTG (Milbradt *et al.*, 2009) zur Beschreibung der morphodynamischen Entwicklungen genutzt. Darüber hinaus werden im Verbundprojekt Untersuchungen zur Verteilung, Dynamik und Wirkung kleinskaliger Bodenformen (Transportkörper, subaquatische Dünen) durchgeführt.
- Das Bodenmodell erzeugt verschiedene Produkte wie sedimentologische Anfangsbedingungen und die Bodenevolution, die als Elemente in den numerischen Modellsystemen zur Verbesserung der Simulationsergebnisse beitragen. Die Projektpartner stellen plausibilisierte, konsistente Daten für Bathymetrie\* und Sedimentologie\* für Multi-Modellanwendungen zur Verfügung. Zur Untersuchung und Dokumentation der Streubreite\* verschiedener morphodynamischer Modelle werden in der Bundesanstalt für Wasserbau, dem Institut für Wasserwesen der Universität der Bundeswehr München und der smile consult GmbH in Hannover umfassende Untersuchungen mit vergleichbaren Grundlagen, aber verschiedenen Modellverfahren und Zielrichtungen durchgeführt. Die Untersuchungen sind bezüglich Modellsteuerung und -aufbau aufeinander abgestimmt und ergänzen sich in den betrachteten Zeitskalen, so dass mit dem Abschluss des Projekts die derzeitigen Möglichkeiten und Grenzen der morphodynamischen Simulation umfassend dokumentiert werden können. Mit dem Ergebnis wird eine Basis für weitergehende Anforderungsdefinitionen für Forschung und Entwicklung im Küsteningenieurwesen vorgelegt.

- Die Einbindung von NOKIS\* und MDI-DE\* Entwicklern und Anwendern in das Verbundprojekt schafft die Grundlage für eine nachhaltige Verfügbarkeit und Nutzung der Datenbank für die Forschungsergebnisse. Die Dokumentation der eingesetzten Daten und Modelle, beispielsweise durch Metadaten und Validierungsdokumente, in Verbindung mit einem Qualitätsmanagement in Anlehnung nach ISO 9001, unter Koordination des BSH, wird im Verbund mit den Projektpartnern bewältigt.
- Zu erwartende Änderungen des Meeresspiegels und des Seegangsklimas werden von verschiedenen Projektpartnern in anderen Projekten untersucht und fließen somit dem Verbundprojekt zu (FuE-Projekte der Bundesoberbehörden DWD, BfG, BSH und BAW) für die Seeschiffahrtstraßen im Auftrag des BMVBS sowie des BMBF z.B. für KLIMZUG).

Das Gesamtprojekt **AufMod** beinhaltet sieben Teilprojekte **AufMod-A** bis **AufMod-G**, deren Titel und Inhalte im nachfolgenden Kapitel zusammengefasst werden.

### 1.3 Leitung, Ziele und Inhalte der Teilprojekte

Nachfolgend werden für jedes Teilprojekt die im Forschungsantrag formulierten Hauptziele und die in den Bewilligungsschreiben formulierten wichtigsten Anforderungen wiedergegeben. Diese Informationen sollen insbesondere der vom KFKI eingesetzten Projekt begleitenden Gruppe dienlich sein, die das Gesamtprojekt fachlich und begutachtend begleitet.

Vorhaben: **AufMod-A**

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

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

Hauptziele des Teilprojekts:

Aufbau und Plausibilisierung eines Bodenmodells und seiner Dynamik als Grundlage für die numerische Modellierung. Die Entwicklung eines parametrisierten Bodenmodells „Deutsche Bucht“ bzgl. Bathymetrie und Sedimenten sowie Bereitstellung konsistenter und plausibilisierter Eingangsdatensätze in dokumentierter Qualität erfolgten in Zusammenarbeit mit den Teilprojekten **AufMod-B**, **AufMod-F** und **AufMod-G**.

Qualitätsgesicherte Speicherung der relevanten Ergebnisse in der GIS-Geodatenbank des Shelf Geo Explorer\* des BSH, die über NOKIS\* recherchierbar und in die MDI-DE\* eingebunden sein wird.

Wichtige Punkte aus dem Bewilligungsschreiben:

- Entwicklung eines plausibilisierten und möglichst konsistenten Bodenmodells unter Einbindung bathymetrischer und sedimentologischer Daten

- Aufarbeitung und Homogenisierung der bestehenden Sedimentdaten
- bei Datenlücken ggf. weitere Probennahme und Analyse
- Dynamik des Bodenmodells plausibilisieren
- Aufnahme / Analyse sedimentologischer Zeitreihen in ausgewählten Gebieten
- Datensätze in Raum und Zeit – Validierung numerischer Modellergebnisse

Vorhaben: **AufMod-B**

**Bodenformen: Verbreitung und Prognose submariner Bodenformen in Küstengewässern**

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

Hauptziele des Teilprojekts:

Die Modellierung der großräumigen und langfristigen Morphodynamik von Küstengebieten setzt eine genaue Kenntnis der relevanten physikalischen Prozesse und die Verteilung und Zusammensetzung der Anfangs- und Randbedingungen von Simulationsszenarien voraus. Neben der Bathymetrie und Sedimentologie ist die korrekte Vorgabe der Bodenrauigkeit von ausschlaggebender Bedeutung für die Naturähnlichkeit von Modellergebnissen. Neben der Kornrauigkeit ist besonders die Formrauigkeit der Bodenformen unterschiedlicher Gestalt und Größe bestimmend.

Im Unterschied zur Hydrodynamik stehen zur Berechnung von sedimentdynamischen Problemen keine bekannten Grundgleichungen zur Verfügung, die direkt gelöst werden können. Für die Berechnung der Entstehung und Dynamik von Bodenformen werden deshalb empirische Beziehungen unterschiedlicher Komplexität und Datengrundlage verwendet. Dabei werden dimensionslose Parameter zur Beschreibung der relevanten Zustandsgrößen formuliert und deren beste Korrelationsfunktion angegeben. Selbst anerkannte Formeln (z.B. *van Rijn, 1984; Yalin, 1964*) basieren größtenteils auf unidirektionalen stationären Strömungskanalexperimenten und wenigen Felddaten.

Vorläufige Untersuchungen in Tidekanälen an der deutschen und dänischen Küste (*Ernstsen et al., 2006; Putzar, 2003*) hatten gezeigt, dass diese Gleichgewichtsbeziehungen das Auftreten und die Dimensionen von Bodenformen, und ihre natürliche Dynamik nur unzureichend beschreiben. Allein die ubiquitäre Überlagerung von großen Bodenformen durch kleine Dünen und Kleinstformen (Riffeln) widerspricht schon der Gültigkeit einer einfachen Gleichgewichtsbeziehung zwischen Strömung und Bodenform.

Durch die Verschneidung und gemeinsame Analyse flächenhafter hochaufgelöster bathymetrischer (aus der Peildatenbank Küste PDBK), sedimentologischer (vom BSH, **TP1**, MARUM, Senckenberg, Literatur), und zeitaufgelöster und repräsentativer hydrodynamischer Information (**TP3**) ist ein vertieftes Verständnis des Auftretens und der Entwicklung von Bodenformen, einer quantitativen Evaluation bestehender empirischer Gleichungen zur Prognose von Bodenformen und deren Wirkung auf die Hydro- und Sedimentdynamik, deren Verbesserung und deren Implementation in Modellsysteme möglich.

Ergebnisse dieser Untersuchungen fließen unmittelbar in das funktionale Bodenmodell ein.

Wichtige Punkte aus dem Bewilligungsschreiben:

- Entstehung, Gestalt und Wirkung von Bodenformen
- Mathematische Beschreibung / Parametrisierung der verschiedenen Bodenformen
- hydraulische Rauigkeit
- Evaluation bestehender empirischer Formeln
- flächenhafte Verschneidung repräsentativer bathymetrischer, hydrodynamischer, sedimentologischer und geomorphologischer Kennwerte
- Vorhersage - verbesserte Ansätze

Im Rahmen dieses Berichts wird auf die Inhalte des ersten Teils der Untersuchungen eingegangen:

- Beschaffung und Zusammenführung relevanter bathymetrischer Daten aus der Peildatenbank Küste (PDBK) und direkt von den zuständigen WSÄ und BSH in ein Geoinformationssystem.
- Konsistenzanalyse, Klassifizierung und Parametrisierung von Bodenformen zu eindeutigen und rekursiven Kenngrößen.
- Untersuchung der Dynamik von Bodenformen im Zeitraum von Jahren durch Verschneidung mehrerer Jahrgänge. Aussagen zur Variabilität der Geometrie und Ausdehnung.
- Einbindung der Analyse zur Untersuchung von (*Ulrich, 1973, Ulrich, 1979*) Analyse der langfristigen Änderungen in anthropogen beeinflussten und natürlich entwickelten Gebieten.

Vorhaben: **AufMod-C**

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

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

Hauptziele des Teilprojekts:

Skalenübergreifende, prozessbasierte 3D-Modellierung des Gesamtsystems Nordsee, Deutsche Bucht, Wattenmeer und Ästuare in hoher Auflösung; Validierung des Modells für Zeitspannen von mehreren Jahren auf der Grundlage konsistenter bathymetrischer Daten. Einsatz der Modellverfahren UnTRIM mit SediMorph und K-Modell sowie Delft3D und SWAN. Generieren von Modellergebnisdaten für die Projektpartner; Vergleich der Modellergebnisse mit den Projektpartnern.



Wichtige Punkte aus dem Bewilligungsschreiben:

- hydro- und sedimentdynamische Prozesse (3D)
- Analyse von Messdaten
- Tide und Seegangswirkung in der Nordsee und der Deutschen Bucht
- Simulation mit verschiedenen Modellverfahren - längerfristige Zeiträume
- Einbau der durch Projektpartner plausibilisierten Bathymetriedaten
- Verwendung des Bodenmodells für die Simulation (Korn- und Formrauheit – räumlich verteilte Sedimente)
- Simulation von Hydrodynamik, Salztransport und Seegangswirkung - Vergleich mit Messwerten (Kalibrierung und Validierung) für Jahreszeiträume
- Simulation von fraktioniertem Sedimenttransport - 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 Datenbankinhalte
- Kenntnis über langfristige Sedimentbewegungen und morphologische Veränderungen im Küstenvorfeld und den Ästuarmündungen
- Einfluss ausgewählter Klimaänderungsszenarien auf die sedimentologischen und morphodynamischen Verhältnisse

Vorhaben: **AufMod-D**

### **Morphodynamische Langzeitsimulation durch Entkopplung von Hydro- und Morphodynamik**

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

Hauptziele des Teilprojekts:

Morphodynamische Langzeitsimulation durch Entkopplung von Hydro- und Morphodynamik durch prozessorientierte Modellierung. Simulation der Morphodynamik über einen langen Zeitraum (100 Jahre) auf einem hoch aufgelösten, unstrukturierten Modellgitter durch Lösung der allgemeinen Sohlevolutionsgleichung im (hier eigenständigen) morphodynamischen Modul SediMorph. Ziel ist die Realisierung sehr kurzer Simulationszeiten auf Supercomputern, so dass verschiedene Szenarien simuliert und ausgewertet werden können. In den Seeschiffahrtsstraßen wird das Bagger- und

Verklappgeschehen als prägender Faktor berücksichtigt (Einsatz des morphodynamischen Moduls DredgeSim).

Wichtige Punkte aus dem Bewilligungsschreiben:

- mittelfristige (10 Jahre) bis langfristige (100Jahre) Simulation der Morphodynamik
- Lösen der Sohlevolutionsgleichung (deterministisches Verfahren)
- Bestandteile des anstehenden Bodens, fraktioniert durch verschiedene Sedimentklassen berücksichtigen
- treibende hydromechanische, meteorologische und anthropogene Prozesse durch parametrisierte Datenmodelle berücksichtigen (von der Morphodynamik entkoppelt)
- Datenmodelle aus empirischen oder deterministischen Quellen
- Einsatz des Verfahrens SediMorph-UnS (simuliert Morphodynamik bei beliebig einsteuerbaren Belastungen)
- morphologische Anfangsbedingungen aus Bodenmodell
- Belastungen aus Gezeitenströmungen resultierend aus flächenhaften Partialtidenkennwerten
- Sohlschubspannungen oder Strömungsgeschwindigkeiten aus der Impulserhaltung
- Berücksichtigung des Seegangs durch das Entwickeln verschiedener Szenarien
- anthropogene Eingriffe wie Baggerungen und Verklappungen berücksichtigen

Vorhaben: **AufMod-E**

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

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

Hauptziele des Teilprojekts:

Die modellbasierte Analyse langfristiger Formänderungsprozesse an der deutschen Nordseeküste gründet sich in diesem Teilprojekt auf einer engen Verknüpfung von daten- und prozessbasierten Simulationsmodellen.

Datenbasierte Modelle ermöglichen eine vertiefte Analyse der zurückliegenden morphodynamischen Entwicklungen in der Deutschen Bucht durch die Bestimmung von Erosions- und Sedimentationsraten, morphologischen Geschwindigkeiten und resultierenden Sedimenttransportraten. Die Verknüpfung mit hydrodynamischen und meteorologischen Daten ermöglicht die Identifikation von Ursache - Wirkungsbeziehungen und die Entwicklung datenbasierter Prognosemodelle.

Prozessbasierte Simulationsmodelle für ein Zeitfenster von mehreren Wochen bis wenigen Jahren mit einem holistischen Modellverfahren (mathematisch einheitliche Modellbeschreibung aller Modellkomponenten in Form eines geschlossenen Differentialgleichungssystems) ermöglichen örtlich und zeitlich differenzierte Analysen der Ursache-Wirkungs-Beziehungen zwischen Meteorologie, Seegang, Strömung, Transportraten und Tiefenänderungen für

charakteristische Ereignisse (eine Tide, ein Sturmereignis). Morphologische Geschwindigkeiten und resultierende Transporte können sowohl aus dem daten- als auch prozessbasierten Modellansatz gewonnen werden und bilden die Grundlage für die Entwicklung von morphodynamischen Langzeitsimulationen in Form von makroskopischen Kontinuitätsgleichungen für ausgewählte Zeitspannen. Die Entwicklung generischer Identifikatoren für morphologische Kenngrößen (Tiefenänderungsraten, morphologische Geschwindigkeiten, ...) ermöglicht nicht nur eine einheitliche Bewertung der unterschiedlichen Modellsysteme, sondern führt auch zu einem Ausgleich der modellspezifischen Unsicherheiten und Defizite.

Wichtige Punkte aus dem Bewilligungsschreiben:

- Methode zur datenbasierten Beschreibung der morphodynamischen Entwicklungen auf Grundlage von Vermessungen
- Methode der prozessbasierten numerischen Simulation für die Morphodynamik
- enge Verzahnung beider Herangehensweisen (Methoden)
- daten- / messspezifische Unsicherheiten und Defizite quantifizieren und deren Fortpflanzung in den (daten- und prozessgetriebenen) Modellen abschätzen
- integrative Identifikations-, Analyse- und Vorhersageverfahren für Formänderungsprozesse entwickeln
- Aufbau von daten- und prozessbasierten hierarchischen morphodynamischen Modellen
- holistische Simulationsrechnungen von Hydrodynamik, Seegang und Morphodynamik für unterschiedliche charakteristische Zeiträume
- Entwicklung 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

Vorhaben: **AufMod-F** (mit 3 Subprojekten)

**Bodenmodell: Stabilität von Sedimentverteilungsmustern in der Deutschen Bucht**

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

Leitung Subprojekt: Schelf / Vorstrand: Dr. Klaus Schwarzer (Universität Kiel, IFG)

Leitung Subprojekt: Watten: Dr. Klaus Ricklefs (Universität Kiel, FTZ Büsum)

Leitung Subprojekt Ästuare: Prof. Dr. Kerstin Schrottke (Universität Kiel, ExC)

#### Hauptziele des Teilprojekts:

Konsistente Felddaten zur morphologischen Ausprägung, zum geologisch-sedimentologischen Aufbau, zur sedimentphysikalischen Beschaffenheit und Dynamik der Gewässersohle auf verschiedenen Raum- und Zeitskalen sind für die Weiterentwicklung von morphodynamischen Modellen zur großräumigen und Langzeit-Simulation zwingend erforderlich. Auch dienen sie der Erweiterung des Prozessverständnisses, das wiederum in die Modellentwicklung einfließt. Grundvoraussetzung sind entsprechende, hochauflösende und gleichzeitig flächendeckende Datensätze. Diese werden in **AufMod-F** mittels moderner, vor allem hydroakustischer Messsysteme, einschließlich hochgenauer Positionierung und „Groundtruthing“ erhoben, analysiert, interpretiert und sowohl in das zu entwickelnde Bodenmodell (siehe **AufMod-A**) einfließen als auch in Form konsistenter und plausibilisierter Modelleingangsparameter zur Verfügung stehen. Im Vergleich früherer Herangehensweisen mit punktueller Informationsermittlung, wird so ein vollständigeres Bild zu den Verhältnissen der Gewässersohle erzeugt und damit ein wesentlicher Beitrag zur Analyse und zum Verständnis der langfristigen Sediment- und Morphodynamik der Deutschen Bucht geleistet. Alte Datensätze verlieren damit jedoch ihren Stellenwert nicht und werden, soweit möglich, in **AufMod-F** mit neuen Daten verschnitten bzw. zu vergleichenden Analysen herangezogen.

Die Umsetzung der hier genannten Ziele erfolgt zunächst in repräsentativen Teilgebieten des Schelf / Vorstrandes, der Watten und Ästuar, in Zusammenarbeit mit **AufMod-A**, **AufMod-B** und **AufMod-G**. Eine qualitätsgesicherte Daten- und Ergebnisspeicherung in der GIS-Geodatenbank Shelf Geo Explorer\* des BSH wird erfolgen und über NOKIS recherchierbar sein.

#### Wichtige Punkte aus dem Bewilligungsschreiben:

- 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 Bodenmodells „Deutsche Bucht“ mit abgestimmter Parametrisierung für Langzeitsimulation der Morphodynamik
- Erarbeitung plausibilisierter Gitterdatensätze 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 hochauflösender Datensätze für die Verifikation der Modellergebnisse
- Beschreibung von großräumigen Sedimentumlagerungen, -transportwegen und -transportraten (Synthese numerischer Modellergebnisse und geologisch / sedimentologischer Analysen)

Vorhaben: **AufMod-G**

**Bodenmodell: Sediment-Fazies der deutschen Nordsee**

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

Hauptziele des Teilprojekts:

Aufbau und Plausibilisierung eines Bodenmodells und seiner Dynamik im Hinblick auf fazieller Einheiten als Grundlage für die numerische Modellierung. Die Entwicklung eines parametrisierten Bodenmodells „Deutsche Bucht“ bzgl. Bathymetrie und Sedimenten in den Faziesräumen, speziell im Küstenvorfeld Spiekeroog und im Ausgang der nördlichen Jade sowie Bereitstellung konsistenter und plausibilisierter Eingangsdatensätze in dokumentierter Qualität erfolgt in Zusammenarbeit mit den Teilprojekten **AufMod-A**, **AufMod-B** und **AufMod-F**.

Qualitätsgesicherte Speicherung der relevanten Ergebnisse in der GIS-Geodatenbank des Shelf Geo Explorer\* des BSH, die über NOKIS recherchierbar sein werden.

Wichtige Punkte aus dem Bewilligungsschreiben:

- Erstellung eines konzeptionellen Sedimenttransportmodells sowie Umsatz in die numerischen Modelle mittels eines kombinierten Methodenansatzes
- Sedimentumlagerungen, Sedimenttransportwege und Transportraten im Rahmen großräumiger Faziesräume beschreiben
- langfristige und großräumige Sedimentdynamik - Modellierung
- 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 in Küstenvorfeld von Spiekeroog und in der nördlichen Jade

- Parametrisierung der Modelle über flächendeckende Datensätze

Aus den für die einzelnen Teilprojekte zusammengestellten Anforderungen ist ein konzeptionelles Modell zu entwickeln, welches für das Gesamtvorhaben steht und zur ökonomischen Realisierung der Anforderungen beitragen kann. Es ist a priori selbstverständlich, dass diese Vorhabensökonomie nur durch intensive Zusammenarbeit, Mehrfachverwendbarkeit von Teilprodukten und gemeinsame Vorgehensweisen erzielt werden kann.

#### 1.4 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter in den Teilprojekten

Im Folgenden werden die Förderanteile zu den jeweiligen Teilprojekten aufgeführt; die Eigenleistungen für Personalkosten der Institutionen sind in Klammern angegeben. Die im vorstehenden Kapitel genannten Leitungspersonen werden an dieser Stelle nicht noch einmal aufgeführt.

##### *AufMod-A*

Dipl. Umweltwiss. Jennifer Valerius 100%

##### *AufMod-B*

Dr. Verner B. Ernstsen 100%

##### *AufMod-C*

Dr.-Ing. Andreas Plüß (70%)

Dr. Frank Kösters 60%

Dipl.-Geoökol. Marko Kastens 40%

Dipl.-Geoinf. Christoph Wosniok 50%

##### *AufMod-D*

Dipl.-Ing. Bert Putzar 100%

##### *AufMod-E*

Prof. Dr. Peter Milbradt 35% (15%)

Dipl.-Ing. Jan Feldmann 56% (24%)

MSc. Nahn Vo 70% (30%)

Dipl.-Ing. Christoph Lippert 17,5% (7,5%)

##### *AufMod-F*

ExC Dipl. Geol. Jens Boczek 100%

IFG Dr. Tobias Dolch 100%

FTZ Dipl. Geogr. Daniela Arp 100%

##### *AufMod-G*

Dr. Adam Kubicki 100%

Die Prozentangaben stehen für den Umfang der durch *AufMod* finanzierten Projektstelle. Hier nicht explizit aufgeführt sind die Besatzungsmitglieder der Forschungsschiffe (vgl. Kapitel 3.1.2).

## 1.5 Projektorganisation

### Verwendete Abkürzungen:

**BAW:** Bundesanstalt für Wasserbau – Hamburg [**AufMod-C** / 03KIS084]

**BSH:** Bundesamt f. Seeschifffahrt u. Hydrographie – Hamburg [**AufMod-A** / 03KIS082]

**MARUM:** Universität Bremen – Zentrum f. marine Umweltwissenschaften [**AufMod-B** / 03KIS083]

**smile:** smile consult GmbH Hannover [**AufMod-E** / 03KIS086]

**Uni-Bw:** Universität der Bundeswehr München [**AufMod-D** / 03KIS085]

**SNG:** Senckenberg Gesellschaft für Naturforschung [**AufMod-G** / 03KIS088]

**CAU:** Christian-Albrechts-Universität zu Kiel [**AufMod-F** / 03KIS087] mit

Institut für Geowissenschaften (IfG),

Exzellenzcluster „Future Ocean“ (ExC-IfG) und

Forschungs- und Technologiezentrum Westküste (FTZ Büsum)

Das KFKI-Forschungsprojekt „Aufbau von integrierten Modellsystemen zur Analyse der langfristigen Morphodynamik in der Deutschen Bucht“ (**AufMod**) ist am 13.11.2009 vom PTJ mit einer Laufzeit von drei Jahren (01.11.2009 – 31.10.2012) genehmigt worden.

Das Gesamtprojekt wird von der BAW (Dr. Heyer) koordiniert und besteht aus fünf Teilprojekten (**TP**):

- **TP1:** Bodenmodell [**BSH + CAU + SNG**]
- **TP2:** Bodenformen [**MARUM**]
- **TP3:** Prozessbasierte Modellierung [**BAW**]
- **TP4:** Morphodynamische Langzeitmodellierung [**Uni-Bw**]
- **TP5:** Daten- und prozessbasierte Modellierung [**smile**]

Der Verbund wird von Frau Prof. Dr. Schrottke geleitet und umfasst die

1. Universität Bremen [**MARUM**]
2. smile consult GmbH, Hannover [**smile**]
3. Universität Kiel [**CAU**]
4. Senckenberg Gesellschaft für Naturforschung, Frankfurt [**SNG**]

Laut Bestimmungen und Hinweisen, die in der Anlage zum Zuweisungsschreiben vom 10.11.2009 ausgegeben sind, besteht das Projekt **AufMod** aus dem Verbund und den assoziierten Partnern. Ferner sind danach Koordinator und Verbundkoordinatorin für die Erstellung des gemeinsamen Abschlussberichtes zuständig. Die Zusammenarbeit aller Partner wurde in einem Kooperationsvertrag durch die Verbundkoordination über das Präsidium der CAU geregelt. Der Verbundkoordinatorin hat darüber hinaus sicherzustellen, dass den Berichtspflichten innerhalb des Verbundes nachgekommen wird. Der Verbund fügt sich der Gesamtleitung durch den Koordinator. So wird eine einheitliche Projektorganisation möglich.

Eine Übersicht der Projektorganisation wird als Organigramm in Abbildung 1-1 gegeben.

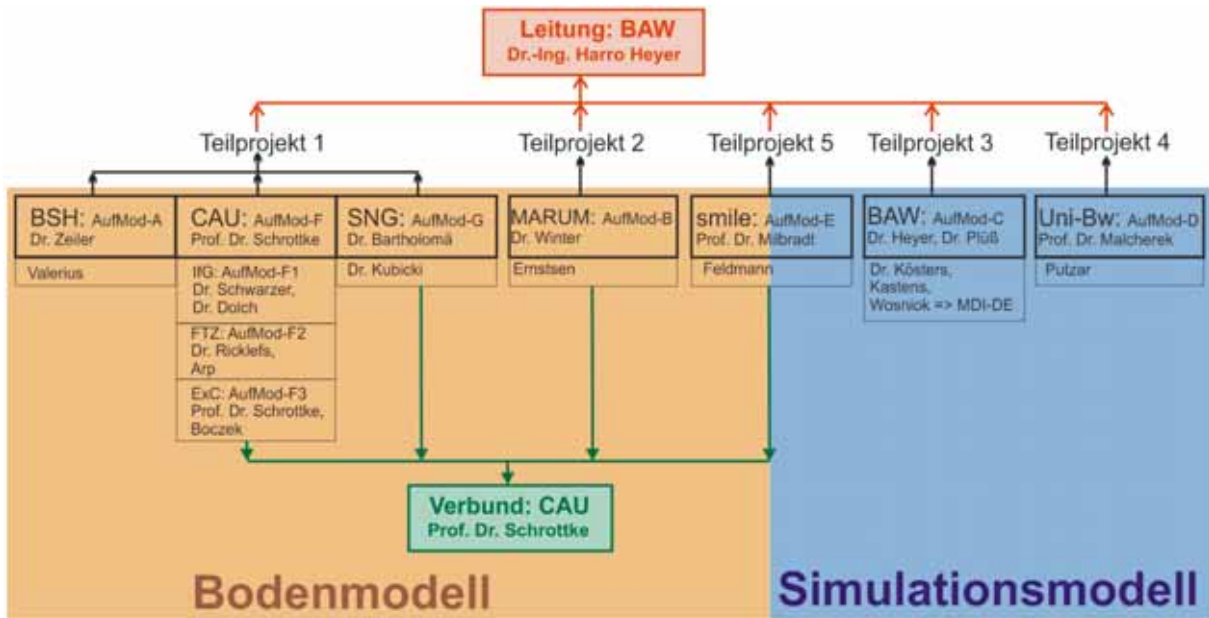


Abbildung 1-1: Projektstruktur



## 2 Konzeptioneller Ansatz des integrierten Modellsystems

Die Grundlage für die Beurteilung der morphodynamischen Entwicklungen in der Deutschen Bucht bilden meteorologische und hydrodynamische Messdaten und vor allem bathymetrische Vermessungsdaten und sedimentologische Messdaten. Diese Beobachtungsdaten werden durch die Projektpartner zusammengetragen, gesichtet, plausibilisiert und um projektrelevante Metadaten vervollständigt. In den Kerngebieten werden diese Daten durch zusätzliche Naturmessungen ergänzt. Diese Basisdaten bilden eine Grundlage sowohl für die Steuerung der unterschiedlichen morphodynamischen Simulationsmodelle als auch für den Aufbau des Bodenmodells.

Das integrierte Modellsystem zur Analyse der langfristigen Morphodynamik basiert im Wesentlichen auf zwei Säulen (Abbildung 2-1):

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

Bathymetrie und Bodenformen sowie der Aufbau und die Zusammensetzung der Gewässersohle werden auf der Basis von Beobachtungsdaten im Bodenmodell zusammengefasst (braune Säule). Diese Informationen werden zusammen mit meteorologischen und hydrodynamischen Beobachtungsdaten (Modellsteuerung) in den verschiedenen Modellsystemen des konzeptionellen Simulationsmodells verwendet (blaue Säule mit gelben Kästen). Ergebnisse aus den morphodynamischen Modellen fließen wiederum in das Bodenmodell für die Interpretation der Messdaten ein.

Die Informationen und Daten aus dem Bodenmodell sowie die Ergebnisse und Analysen der morphodynamischen Simulationsmodelle werden in einem Informationsmodell gespeichert (siehe Kapitel 8). Kombiniert mit Metadaten stehen sie so allen Projektteilnehmern und durch die Einbindung in das KFKI-Projekt Marine Daten-Infrastruktur für Deutschland (MDI-DE<sup>\*</sup>) der interessierten Fachöffentlichkeit nach Abschluss von **AufMod** zur Verfügung. Die Verzahnung mit dem KFKI-Projekt Marine Daten-Infrastruktur für Deutschland (MDI-DE<sup>\*</sup>) wird in Kapitel 8 verdeutlicht.

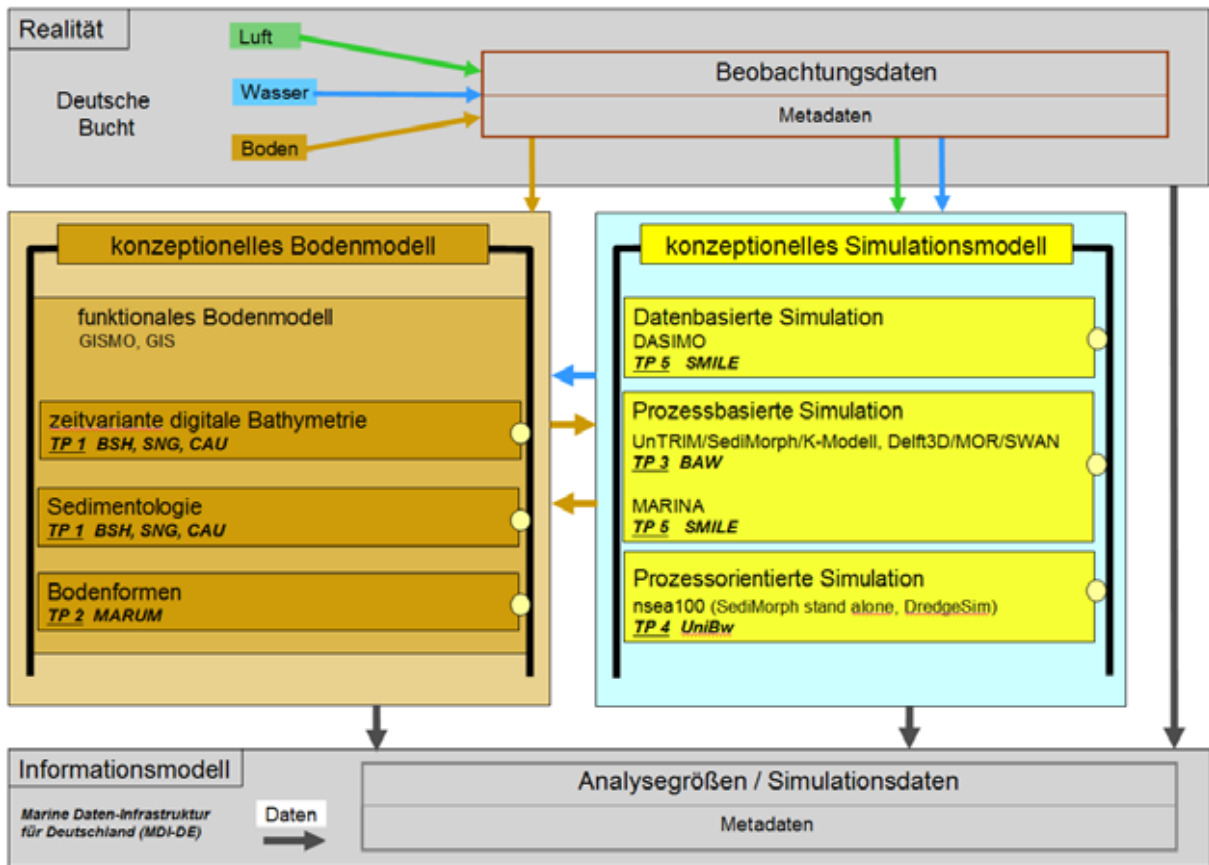


Abbildung 2-1: Konzeptioneller Ansatz des integrierten Modellsystems

## 2.1 Konzeptionelles Bodenmodell

Die Gewässersohle ist ein dynamisches komplexes System, welches in enger Wechselwirkung mit der sie gestaltenden Hydrodynamik (hydraulische Kräfte\*) steht. Sowohl 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 und deren küstennahen Regionen wird ein Multi-Methodenansatz verwendet, um diesen unterschiedlichen räumlichen als auch zeitlichen Skalen gerecht zu werden.

Für die Beurteilung der räumlichen Verteilung und Entwicklung kleinräumiger Strukturen werden Modelle der Gewässersohle auf der Basis von hochauflösenden hydroakustischen Messdaten zur Bathymetrie unter Einbeziehung von Einzelmessungen und Bodenproben aufgebaut.

Die Modellierung der Entstehung und Entwicklung von Bodenformen, wie beispielsweise von Unterwasserdünen, erfolgt auf der Basis von Analysen hochauflösender bathymetrischer Vermessungsdaten und wird in einem Bodenformmodell zusammengefasst.

Für die Beschreibung der bathymetrischen Entwicklung in der gesamten Deutschen Bucht werden die Vermessungsdaten des BSH und der WSÄ zusammengetragen und in einem zeitvarianten bathymetrischen Modell aggregiert.

Für den sedimentologischen Aufbau werden sedimentologische Modelle auf der Basis von Sedimentproben (z.B. Korngrößenverteilungen aus Datenbanken wie z. B. MUDAB, Sedimentkataster der WSV u. a.) mit Daten innovativer Messtechniken (Seitensichtsonar<sup>\*</sup>), verknüpft, um sowohl großräumig als auch insbesondere in den Kerngebieten kleinräumig die Sedimentverteilung und Bodenbeschaffenheit zu verstehen und mit den gestaltenden hydrodynamischen Prozessen in Verbindung zu bringen.

Obwohl die Besiedlung bzw. der Bewuchs sowie der Anteil organischen Materials einen deutlichen Einfluss auf die Sedimentstabilität und somit auf die Gestaltungsvorgänge an der deutschen Nordseeküste und insbesondere in den Watten haben, finden im Rahmen der ersten Phase des Projektes ökologische Parameter im konzeptionellen Bodenmodell zunächst keine Berücksichtigung. Im Aufbau des funktionalen Bodenmodells ist jedoch die Integration ökologischer Parameter vorgesehen.

Die im Rahmen des konzeptionellen Bodenmodells zusammengetragenen und um projektspezifische Metadaten erweiterten Messdaten stellen umfangreiche, 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 werden.

Das funktionale Bodenmodell ermöglicht eine prototypische Umsetzung solcher Methoden durch 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.

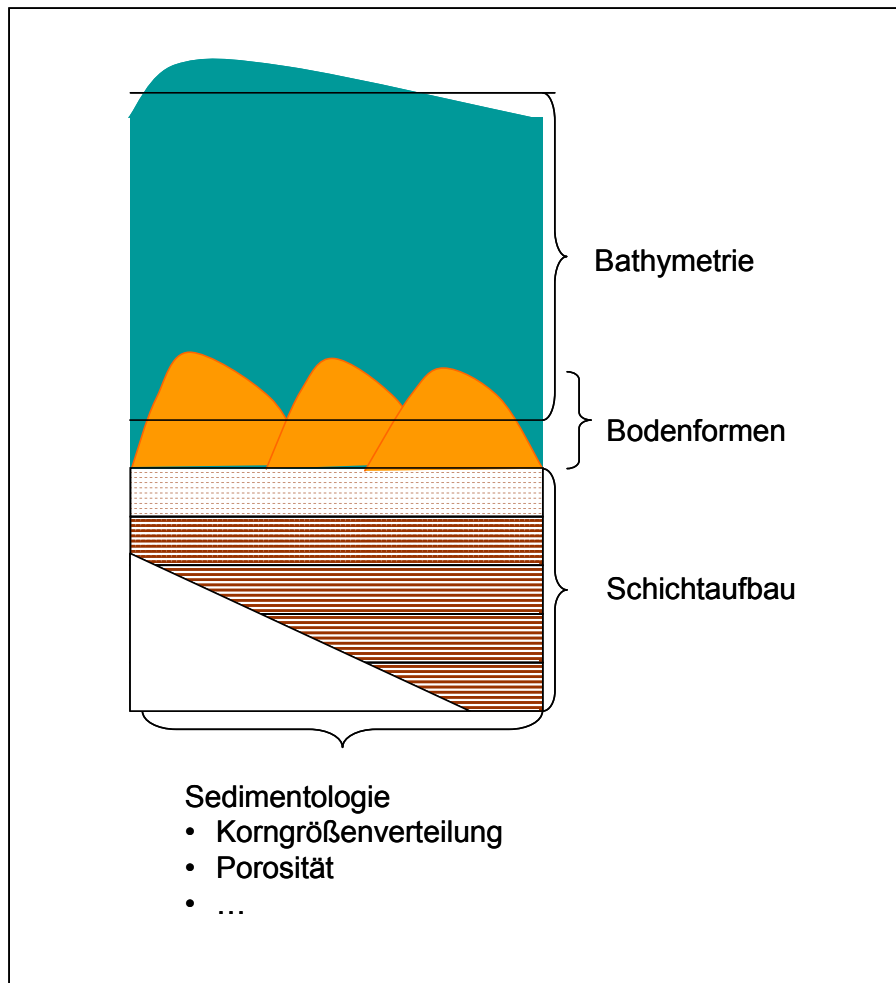


Abbildung 2-2: Konzeptionelles Bodenmodell

## 2.2 Konzeptionelles Simulationsmodell

Numerische Simulationsmodelle haben sich seit vielen Jahren in den Ingenieur- und Umweltwissenschaften als geeignete Werkzeuge zur Analyse des Verhaltens komplexer Systeme etabliert. Zur Simulation von hydro- und morphodynamischen Phänomenen im Küsteningenieurwesen wurden in der Vergangenheit numerische Simulationsmodelle mit unterschiedlichen Zielsetzungen und Grundlagen entwickelt. Um das breite Spektrum der Phänomene und Fragestellungen aus dem Bereich der Morphodynamik der Deutschen Bucht abdecken zu können, wurde bei den numerischen Simulationsmodellen ein Multimodellansatz (Plüß, 2007) gewählt. Die in **AufMod** eingesetzten Simulationsmodelle lassen sich sowohl nach systemtheoretischen als auch physikalischen Aspekten klassifizieren.

Aus systemtheoretischer Sicht lassen sich in **AufMod** folgende Modelltypen klassifizieren:

- datenbasierte Simulation,
- prozessbasierte Simulationen und
- prozessorientierte Simulation.

Bezüglich der durch die 2D- und 3D-Simulationsmodelle beschreibbaren Zeitspannen morphodynamischer Entwicklungen lassen sich die Modelle unterteilen in

- kurzfristige Zeitspannen (Monate bis Jahre vorzugsweise in 3D),
- mittelfristige Zeitspannen (Jahre bis Jahrzehnte – 2D) und
- langfristige Zeitspannen (Jahrzehnte bis 100 Jahre – 2D).

Weitere Unterteilungen ergeben sich bezüglich der berücksichtigten physikalischen Phänomene sowie deren Granularität (Auflösung im Modell). Eine detaillierte Klassifizierung erfolgt in Kapitel 5.1, und eine weitergehende Beschreibung der einzelnen Simulationssysteme wird in Kapitel 5.2 gegeben; eine Übersicht des konzeptionellen Simulationsmodells gibt Abbildung 2-3.

Der Einsatz unterschiedlicher numerischer Modelle mit gleichen bzw. gleichartigen Randwerten und gemeinsamer Gitterstruktur bzw. Bathymetrie erlaubt eine Abschätzung der Modellunsicherheiten morphodynamischer Simulationsmodelle, insbesondere auch bezüglich der unterschiedlichen Modellapproximationen und Vereinfachungen.

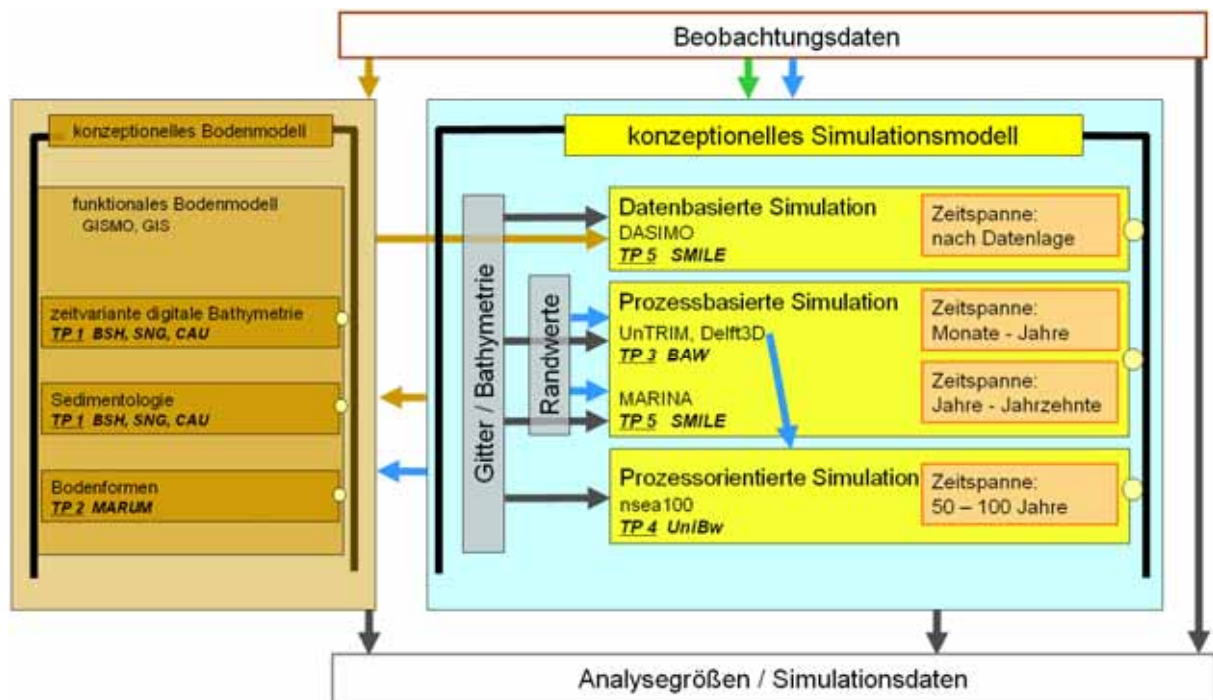


Abbildung 2-3: Übersicht des konzeptionellen Simulationsmodells

### 2.3 Verzahnung von Boden- und Simulationsmodell

Die Beschreibung der Gewässersohle im konzeptionellen Bodenmodell in seinen unterschiedlichen Ausprägungen bildet neben den hydrodynamischen und meteorologischen Basisdaten eine wesentliche Grundlage für die Steuerung der morphodynamischen Simulationsmodelle. Hierzu gehören vor allem initiale

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

Für die Plausibilisierung und Validierung der morphodynamischen Simulationsmodelle werden HINDCAST\*-Rechnungen durchgeführt, welche mit Ergebnissen aus dem Bodenmodell verglichen und validiert werden. Hierzu gehören, die aus dem Bodenmodell abgeleiteten Analysen zu:

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

Parametrisierungen in den morphodynamischen Simulationsmodellen lassen sich auf der Basis der Bodenmodelle verbessern. Aus den im Projekt zusammengetragenen Bodenformverteilungen in Verbindung mit hydrodynamischen Modellergebnissen lassen sich beispielsweise Verbesserungen der Formulierungen der Formrauheiten in den hydrodynamischen Modellen erreichen. Die Kornrauheit kann direkt aus der Korngrößenverteilung des Bodenmodells ohne zusätzliche Parametrisierung übernommen werden.

Die Datengrundlage für die Bodenmodelle ist in der Regel spärlich, was sowohl die räumliche als auch zeitliche Auflösung betrifft. Die Übertragung der häufig nur punktuell vorliegenden Messdaten in die Ebene verlangt deshalb problemangepasste Interpolations- und Approximationsmethoden. Eine Verbesserung dieser Interpretationsvorschriften kann durch die Hinzunahme weiterer physikalischer Parameter erfolgen. Hierzu gehört beispielsweise

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

Nicht zuletzt lassen sich Datenlücken in den Daten der Bodenmodelle durch Ergebnisse aus morphodynamischen Modellen auffüllen.

Die Analysen im Bodenmodell sowie die Methoden des funktionalen Bodenmodells lassen sich durch Hinzunahme von Auswertungen aus den Simulationsmodellen verbessern. Insbesondere die datenbasierte Simulation profitiert von Bodeninformationen und prozessbasierten Simulationsanalysen gleichermaßen.

### 3 Bodenmodell

Das Bodenmodell basiert auf Naturdaten in Verbindung mit fachspezifischen geologischen Interpretationen, um zu einer dreidimensionalen Beschreibung des Sedimentkörpers und insbesondere der oberen Sedimentschichten an der Gewässersohle zu kommen. Für den Aufbau des Bodenmodells werden Daten aus verschiedenen Quellen zusammengeführt sowie neue Daten erhoben.

#### 3.1 Beobachtungsdaten für das Bodenmodell

Für **AufMod** werden zunächst folgende Parameter in das Bodenmodell aufgenommen:

- Bathymetrie - Höhenlage der Gewässersohle
- Mächtigkeiten der mobilen Deckschicht - Sedimentmächtigkeiten
- Körnungslinien als Funktion über den Korndurchmesser
- Porositäten
- Bodenformen
- Prozentuale Anteile organischer Komponenten bei kohäsiven Feinsedimenten

Die bathymetrischen Vermessungsdaten wurden für einen längeren Zeitraum ab den 1980er Jahren zusammengetragen. Räumlich reichen sie über die Deutsche Bucht hinaus. Korngrößenverteilungen liegen bereits fast flächendeckend für das gesamte Nordseegebiet vor. Für andere Bodenparameter wie Porosität und Bodenformen wurde sich besonders auf repräsentative Teilgebiete\* (Fokusgebiete\*) konzentriert.

Diese Teilgebiete sind so ausgewählt, dass die Systeme Schelf/Vorstrand, Wattenmeer und Ästuare repräsentativ abgebildet werden (Abbildung 3-1). In diesen werden im **TP1** (CAU und SNG) flächenhaft hochauflösende Datensätze erhoben. Zudem werden durch Wiederholungsmessungen Zeitreihen erstellt oder fortgeführt. Für die drei dargestellten Transitrohrleitungen liegen dem BSH Überwachungsberichte vor, die bis zurück in die Planungsphase der jeweiligen Rohrleitungen reichen und somit für **AufMod** nutzbare Daten-Zeitreihen beinhalten. Die Daten der Teilgebiete\* dienen insbesondere zur Erfassung und Beschreibung der Dynamik einzelner Modellparameter und sollen einen Beitrag zur Verifikation von Modellergebnissen darstellen.

Eine flächendeckende Datengrundlage zum Bodenaufbau (Stratigraphie\*) ist in Arbeit.



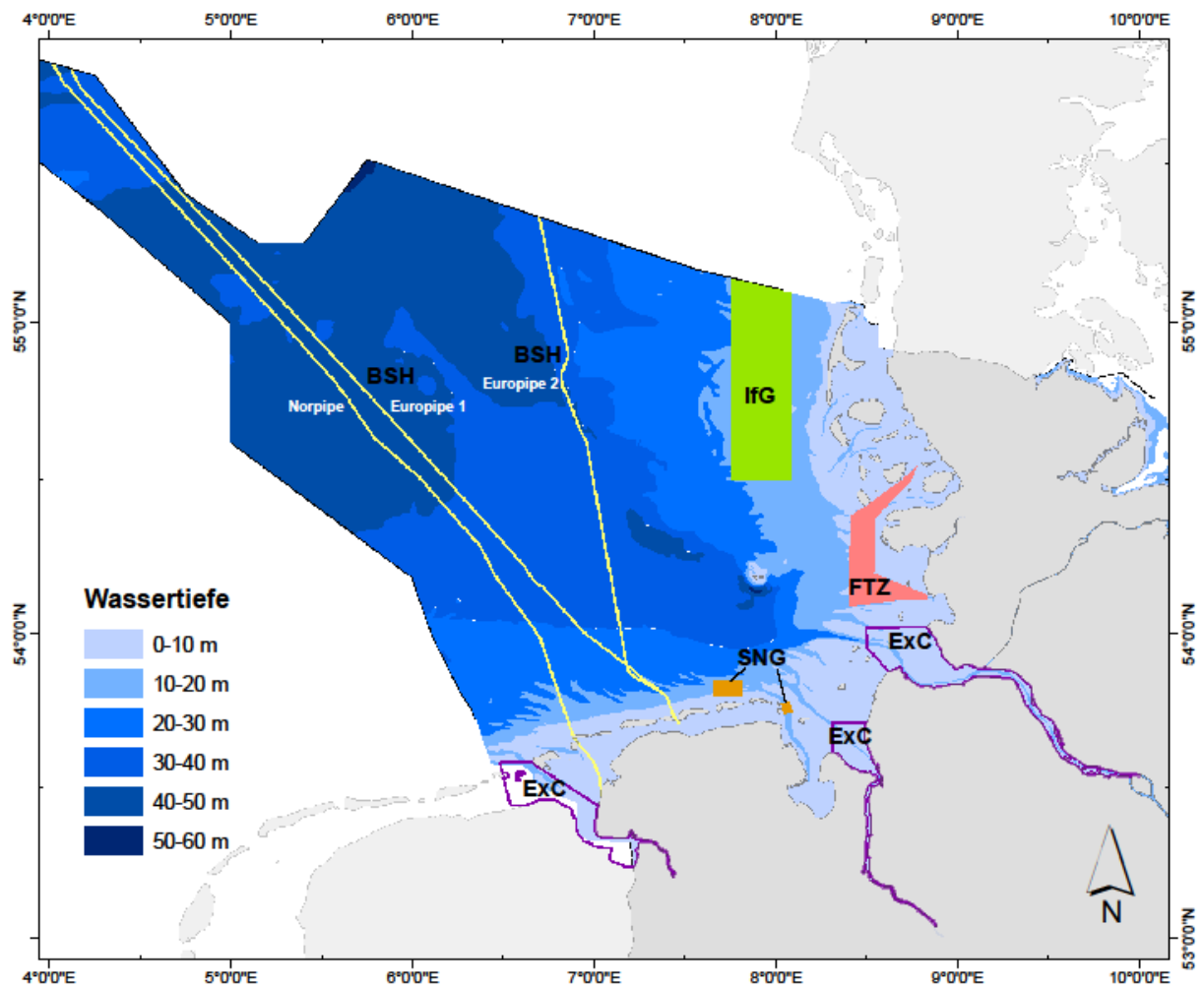


Abbildung 3-1: Übersicht der repräsentativen Teilflächen zur hochauflösenden Datenerhebung in *AufMod*

### 3.1.1 Vorhandene Beobachtungsdaten

Für das zu betrachtende Untersuchungsgebiet der Deutschen Bucht liegen bei verschiedenen Institutionen teilweise umfangreiche Daten zur Bathymetrie und Sedimentologie vor, die, im Zuge von *AufMod* zusammengeführt, zu quasi-konsistenten und plausibilisierten Datensätzen weiterverarbeitet und über die Projektlaufzeit hinaus Dritten verfügbar gemacht werden sollen.

Für den Aufbau des Bodenmodells ist die integrale Betrachtung der Bereiche Schelf / Vorstrand, Wattenmeer und Ästuar erforderlich; in diesen Räumen laufen die morphodynamischen Prozesse bekanntlich auf unterschiedlichen Skalen ab, was sich in der

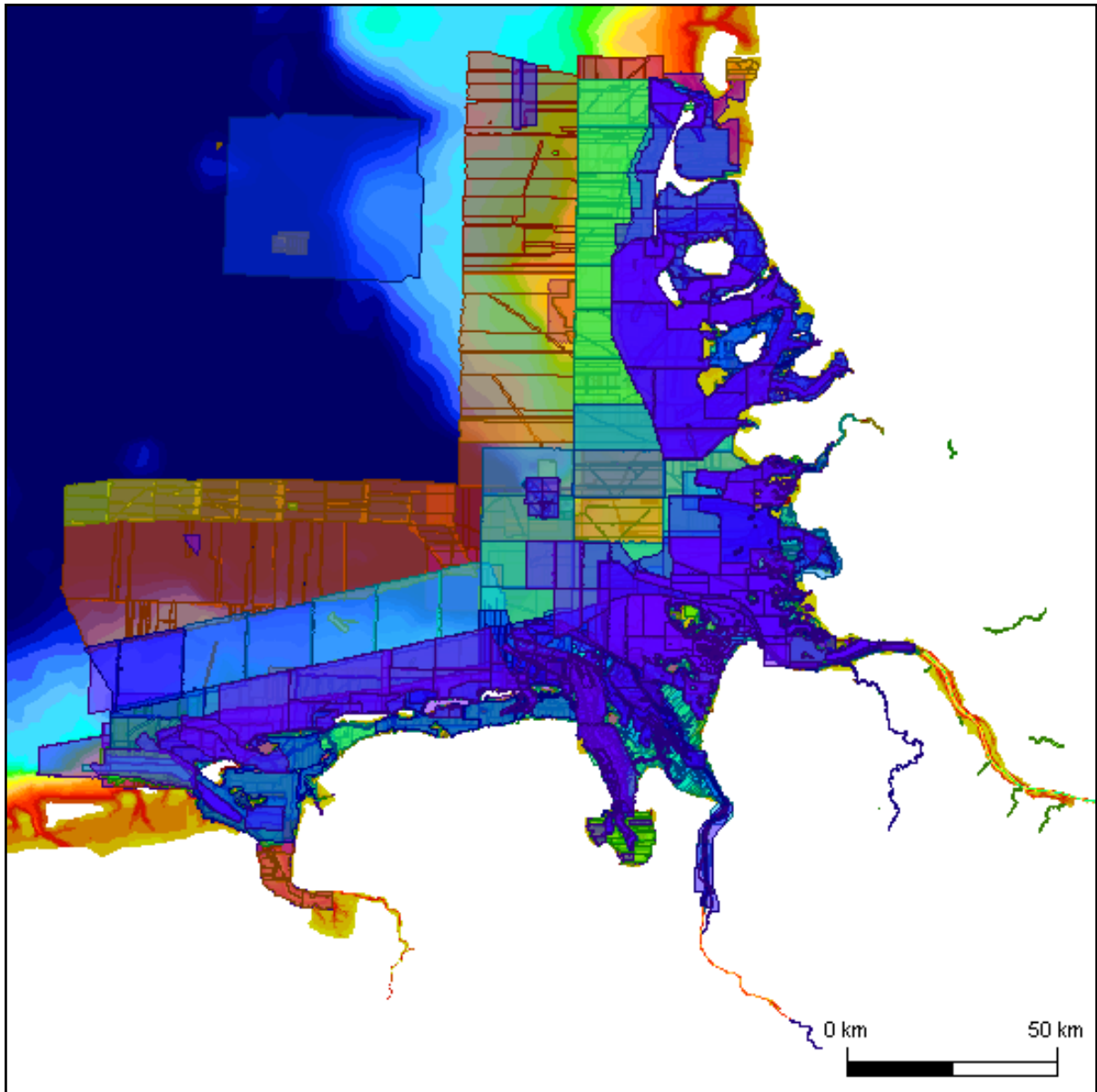
Datenbelegung, d.h. dem Umfang der verfügbaren bathymetrischen und sedimentologischen Zeitreihen widerspiegelt, die im Folgenden beschrieben werden.

### **3.1.1.1 Bathymetrische Vermessungsdaten**

Im Rahmen des Forschungsvorhabens *AufMod* wurden zunächst Seevermessungsdaten des BSH, der WSV und den Küstenschutzbehörden aus dem Küstenvorfeld der Deutschen Bucht, den Küstenschutzvermessungen der Inselstrände und den Verkehrssicherungspeilungen in den Ästuaren gesichtet. Hierbei wurden die Daten der verschiedenen Quellen grafisch verglichen, um eine erste Abschätzung der Datengüte zu gewinnen.

Daraufhin wurden die Daten um projektspezifische Metadaten erweitert. Besonderes Interesse bei der Datenrecherche galt hierbei dem Projektzeitraum und den repräsentativen Teilgebieten. Die so zusammengetragenen Vermessungsdaten wurden in eine digitale Bathymetrie übernommen und bilden die Grundlage für die Erstellung quasikonsistenter digitaler Geländemodelle.

Es wurden 13577 Vermessungen zusammengetragen. Der Zeitraum umfasst im Wesentlichen die Jahre von 1983 bis 2010. Standen vereinzelt noch ältere Daten zur Verfügung, so wurden diese ebenfalls aufgenommen. Eine Übersicht über die Aussagebereiche aller, ca. 660 Millionen, Vermessungspunkte ist in Abbildung 3-2 dargestellt. Die Farben der Polygone sind nach Jahren eingefärbt, wobei die ältesten Vermessungsdaten gelb und die neuesten lila aufgeführt sind. In der Abbildung 3-3 ist die räumliche Verteilung der Daten nach Herkunft, beispielhaft für das Jahr 2003, dokumentiert.



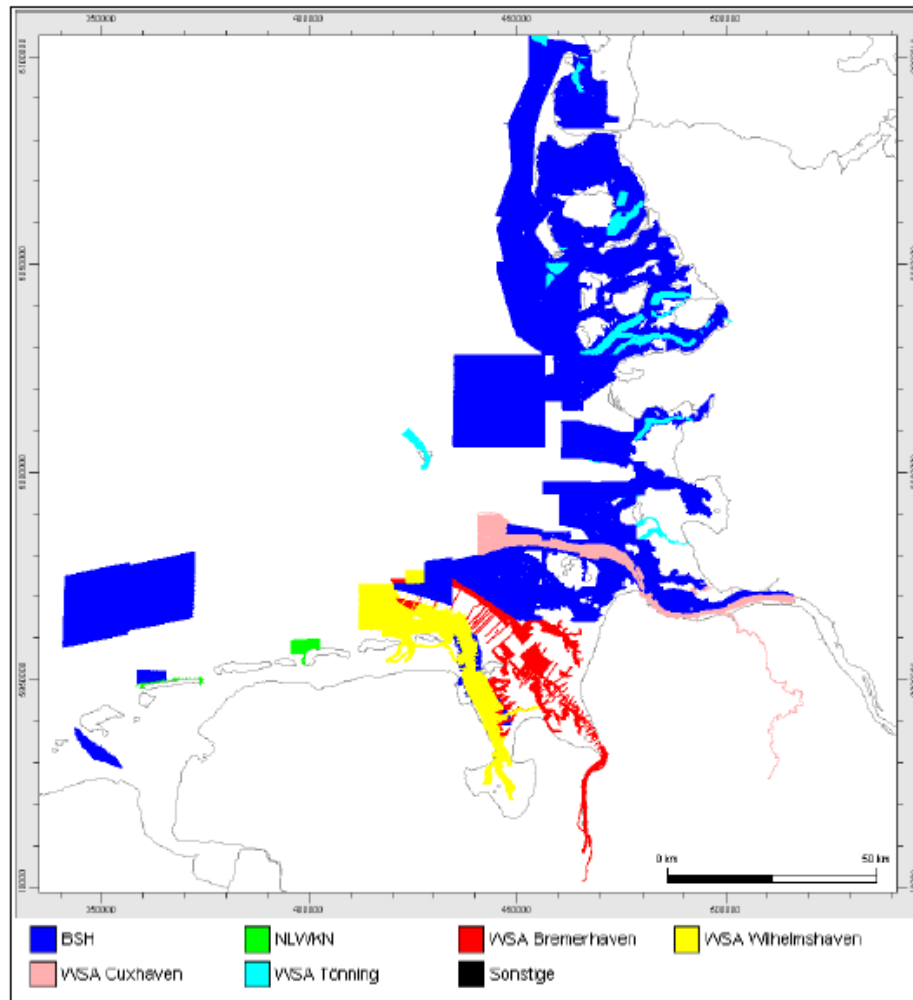
**Abbildung 3-2: Aussagebereiche der berücksichtigten Vermessungen, eingefärbt nach Aufnahmejahr von gelb (ältere Daten) zu lila (jüngere Daten)**

Das Zusammentragen der Vermessungsdaten hat länger als erwartet gedauert, wobei dies vor allem an der unterschiedlichen Unterstützung der diese Daten verwaltenden Institutionen lag. Die Datenbasis der bathymetrischen Vermessungen wird bei Verfügbarkeit weiterer Daten stetig erweitert und gepflegt.

Neben den Vermessungsdaten von deutschen Verwaltungen und Institutionen (Abbildung 3-3) und den Daten aus der Überwachung der Gasrohrleitungen Europipe 1 und 2 sowie Norpipe wurden dem Projekt auch bathymetrische Daten vom Britischen Oceanographic Data Center (BODC) und der Dänischen Küstendirektion zur Verfügung gestellt, welche insbesondere beim Aufbau des Nordseemodells berücksichtigt wurden (Tabelle 3-1).

**Tabelle 3-1: Übersicht der in *AufMod* vorhandenen Vermessungsdaten**

<b>Herkunft der Vermessungsdaten</b>	<b>Räumliche Ausdehnung</b>	<b>Zeitliche Ausdehnung</b>
BSH	Deutsche Bucht in jährweise unterschiedlicher Flächenabdeckung	1983-2010
WSA Bremen	Weser	2008-2009
WSA Bremerhaven	Weser-Ästuar, teilweise Jadebusen	1996-2009
WSA Cuxhaven	Elbmündung bis Nordwesten von Helgoland	1990-2009
WSA Emden	Ems-Ästuar	1990-2002
WSA Tönning	Rinnen Nordfriesisches Wattenmeer	1990-2005
WSA Wilhelmshaven	Jadefahrwasser, Gebiet um Spiekeroog und Wangerooge	1996-2008
NLWKN	Nördlicher Strandbereich Juist und Langeoog	1983-2007
British Oceanographic Data Centre	Digitale Geländemodelle der gesamten Nordsee	1998, 2008
Danish Hydraulic Institute	Digitale Geländemodelle der gesamten Nordsee	2003, 2009
Kystdirektoratet/The Danish Coastal Authority	Dänisches Wattenmeer von Blåvandshuk bis zum Hindenburgdamm	2008
Forschungsinstitut Senckenberg (SNG), Wilhelmshaven	Küstenvorfeld Spiekeroog	2003, 2007



**Abbildung 3-3: Vermessungsdaten aus dem Jahr 2003, eingefärbt nach Datenerheber bzw. -lieferant**

### 3.1.1.2 Sedimentologische Daten

Die Verteilung sedimentologischer Parameter, wie die Korngröße, Porosität oder auch die Mächtigkeit der mobilen Deckschicht ist zum einen Spiegel der morphodynamischen Gestaltungsvorgänge und bildet zum anderen eine wesentliche Grundlage für den Aufbau und den Betrieb morphodynamischer Simulationsmodelle. Auch hier wurden zunächst Daten aus unterschiedlichen nationalen und internationalen Quellen zusammengetragen, die Datengüte grafisch abgeschätzt und um projektbezogenen Metadaten ergänzt.

Im Gegensatz zu den bathymetrischen Vermessungsdaten, für die bereits flächendeckende Zeitreihen existieren, liegen die sedimentologischen Daten bei weitem nicht in der zeitlichen Auflösung vor; vielmehr galt es, hierfür möglichst die gesamte Fläche der Deutschen Bucht abzudecken. Korngrößenverteilungen konnten mit Unterstützung der geologischen Dienste

der Nordsee-Anrainerstaaten für die gesamte Nordsee in einer recht guten Abdeckung zusammengetragen werden. Auch diese werden weiterhin ergänzt.

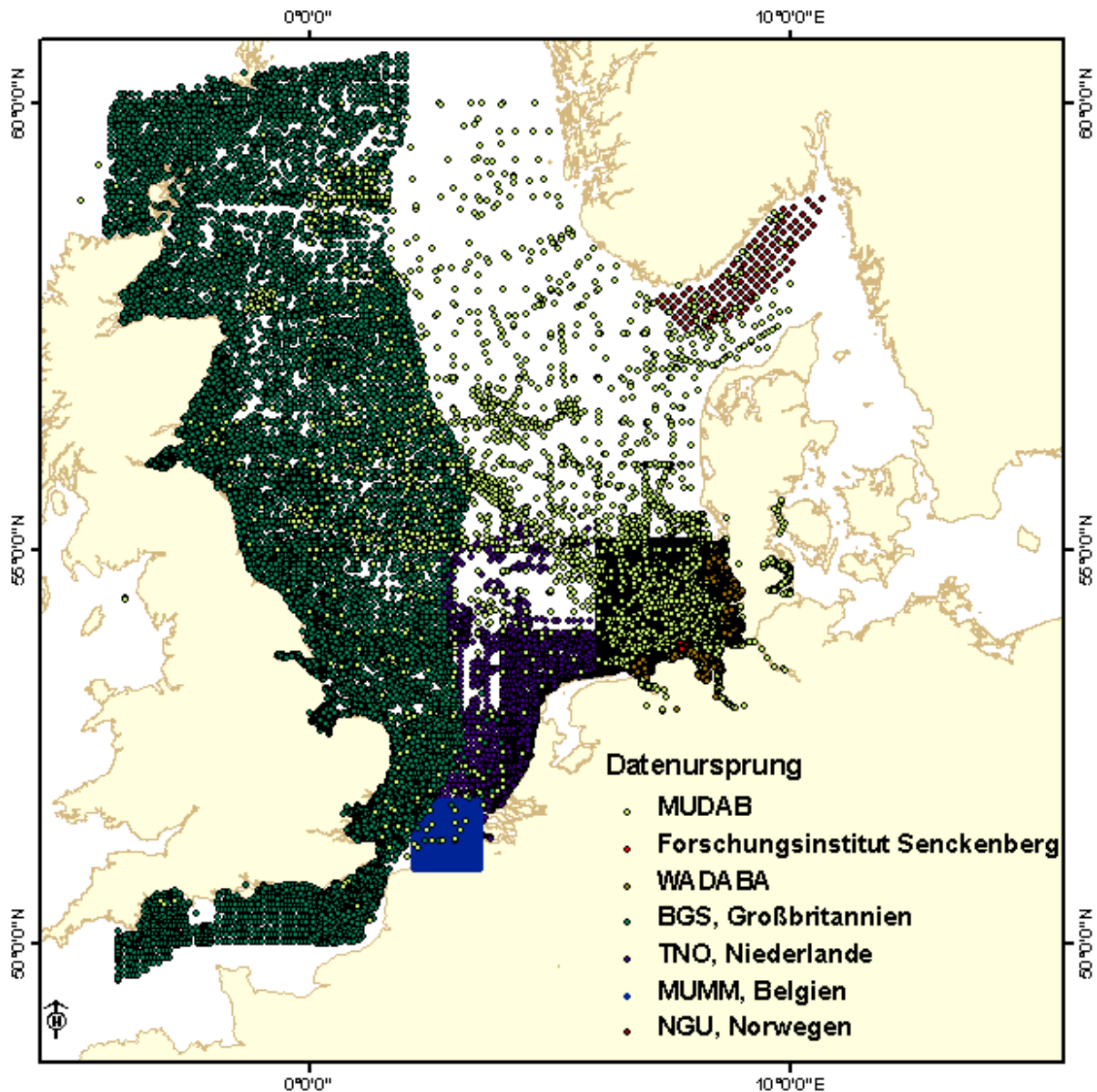
Bisher konnten rund 50.000 Korngrößenverteilungen aufgenommen werden. Tabelle 3-2 gibt eine Übersicht über deren Herkunft sowie räumlichen wie zeitlichen Ausdehnung. In Abbildung 3-4 ist die Verteilung der Messpunkte grafisch dargestellt. In naher Zukunft werden zusätzlich Korngrößenverteilungen aus dem Sedimentkataster der WSV (SedKat WSV) und vom GEUS in Dänemark in das funktionale Bodenmodell einfließen (Tabelle 3-3).

**Tabelle 3-2: Übersicht der in *AufMod* vorhandenen Sedimentdaten**

<b>Titel</b>	<b>Herkunft</b>	<b>Probenpunktmenge</b>	<b>Räumliche Ausdehnung</b>	<b>Zeitliche Ausdehnung</b>
MUDAB-Korngrößenverteilungen	BSH	25.309	Gesamte Nordsee	1924-2008
WADABA – Korngrößenverteilungen	Helmholtzzentrum Geesthacht	1.449	Nord- und Ostfriesische Küste	1987-2003
Oberflächensedimentproben Spiekeroog	Forschungsinstitut Senckenberg (SNG), Wilhelmshaven	941	Küstenvorfeld Spiekeroog	1986-1989, 2005
Oberflächensedimentproben Großbritannien	British Geological Survey (BGS), Nottingham, Großbritannien	15.946	AWZ Großbritannien	
Oberflächensedimentproben Niederlande	Geological Survey of the Netherlands (TNO), Utrecht, Niederlande	6.619	AWZ Niederlande	1969-2006
Oberflächensedimentproben Norwegen	Norges geologiske undersøkelse (NGU), Trondheim, Norwegen	129	Skagerrak	1992-1994
Interpolierte Korngrößenverteilungen Belgien	Royal Belgian Institute of Natural Sciences, Brüssel, Belgien	250m-Grid	AWZ Belgien	

**Tabelle 3-3: Übersicht der noch zu erwartenden Datensätze zu Korngrößenverteilungen**

<b>Titel</b>	<b>Herkunft</b>	<b>Räumliche Ausdehnung</b>
Oberflächensedimentproben der WSV	Sedimentkataster der WSV	Nord- und Ostfriesischer Küstenbereich mit Ästuaren
Oberflächensedimentproben Dänemark	GEUS, Kopenhagen, Dänemark	AWZ Dänemark

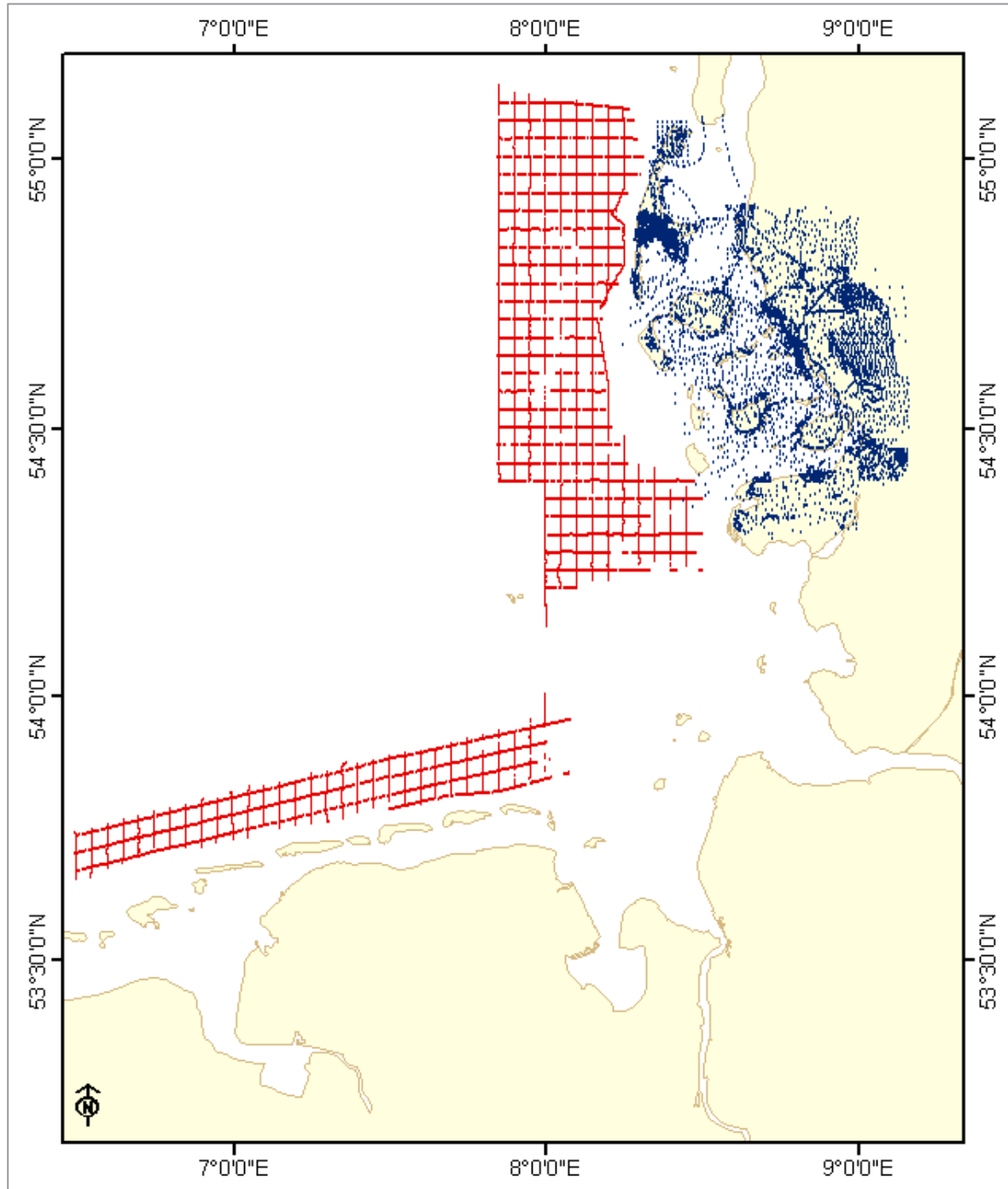


**Abbildung 3-4: Lokationen von Sedimentproben und Datenherkunft**

Daten zur Mächtigkeit der mobilen Deckschicht stehen aus vorangegangenen Forschungsprojekten für den Bereich der Nord- und Ostfriesischen Inseln zu Verfügung (Abbildung 3-5: KFKI-Forschungsprojekt „Materialinventur an der deutschen Nordseeküste“ (rot) und „Sedimentinventar Nordfriesisches Wattenmeer“ (blau)).

In Abbildung 3-5 sind Flächen mit interpolierten Sedimentmächtigkeiten für die Deutsche Bucht auf Basis hydroakustischer Messungen dargestellt (rot), während blau Lokationen von Bohrungen und Stützstellen zur Erfassung der Holozänbasis bzw. Mächtigkeit der mobilen Deckschicht zeigt. Für die Daten zur Mächtigkeit der mobilen Deckschicht konnte auf vorangegangene Forschungsprojekte mit Bereichen der Nord- und Ostfriesischen Inseln zurückgegriffen werden (KFKI- Forschungsprojekt „Sedimentinventar Nordfriesisches Wattenmeer“ und „Sedimentinventar Nordfriesisches Wattenmeer“ Abbildung 3-5).

Porositätswerte werden in erster Linie in den repräsentativen Teilgebieten erhoben und, soweit möglich bzw. vorhanden, durch Literaturwerte ergänzt. Falls erforderlich, werden neue Porositätsbestimmungen für die jeweiligen Sedimenttypen im Zuge des Projekts erhoben. Geplant ist, Porositätsdaten flächendeckend für die Deutsche Bucht in das Bodenmodell aufzunehmen.



**Abbildung 3-5 Verteilung der Bohrungen und des hydroakustischen Messnetzes (rot) zur Erfassung der Holozänbasis / Mächtigkeit der mobilen Deckschicht**



### 3.1.1.3 Hydroakustische Daten

Das IFG der CAU verfügt über eine umfangreiche Sammlung hydroakustischer Daten (Einstrahlecholot, Seitensichtsonar, Sedimentlot), die im Rahmen verschiedener Projekte und Arbeiten erhoben wurden und bis in das Jahr 1954 zurückreichen. Die älteren Daten liegen analog vor. Sie wurden zudem mit unterschiedlichen Positionierungssystemen erfasst. Ziel ist es, für **AufMod** verwertbare Daten, wenn in analoger Form vorliegend, in digitale Daten zu konvertieren, neu zu georeferenzieren und in ein einheitliches Koordinatensystem zu überführen. Derzeit findet eine Sichtung und Erfassung des für **AufMod** relevanten Datenbestandes statt. In einem nächsten Schritt erfolgt die Bewertung der Datenqualität. Mit der Umrechnung von Decca-Koordinaten in das Koordinatensystem UTM, Zone 32 N, WGS 84 sowie mit der Einarbeitung der hydroakustischen Daten ins GIS wurde bereits begonnen (Abbildung 3-6).

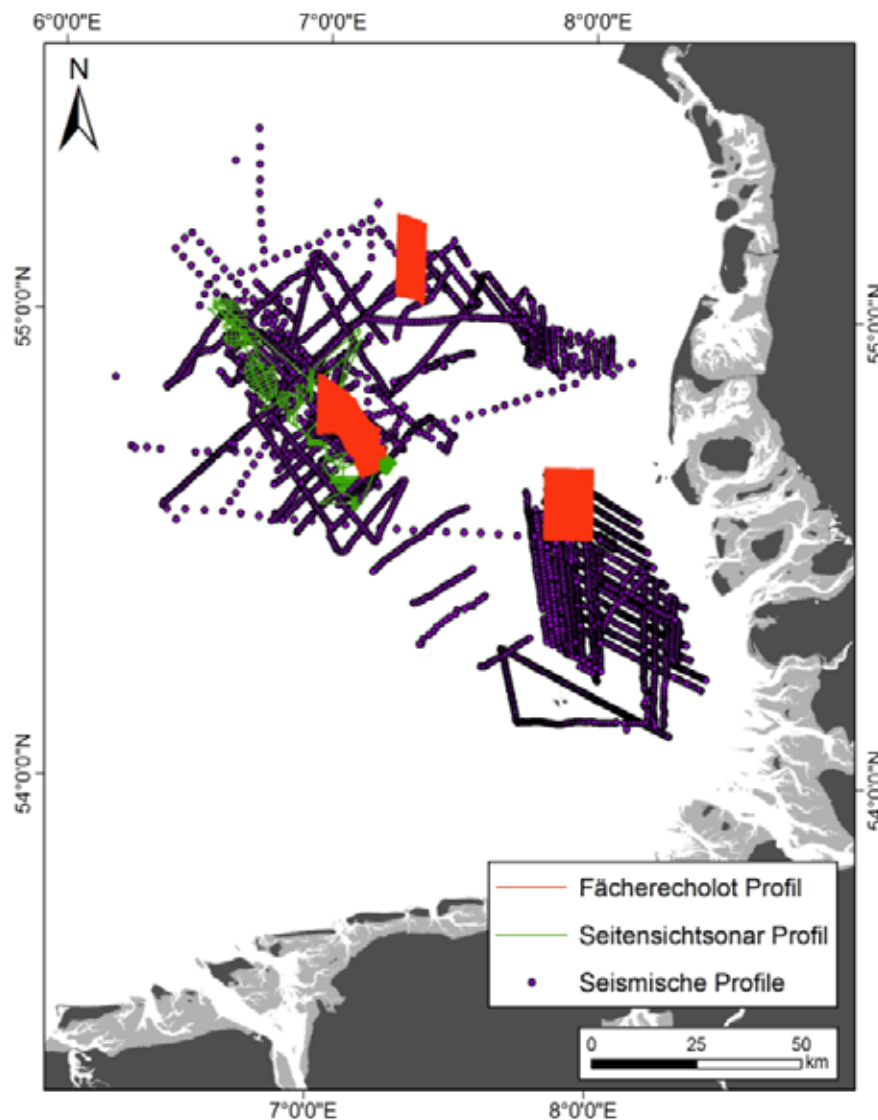
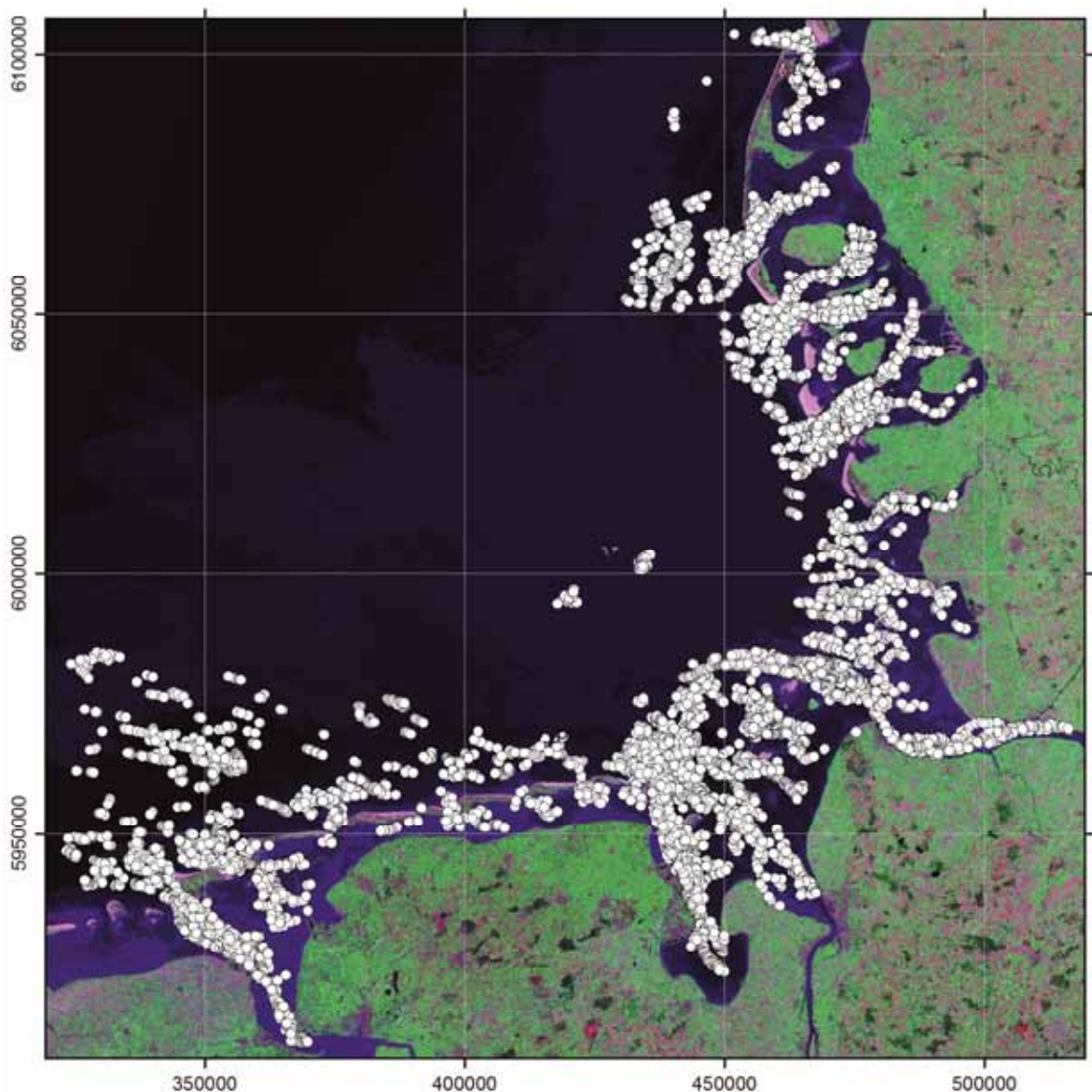


Abbildung 3-6: Übersicht über die derzeit für **AufMod** erfassten Datenbestände des IFG-Archivs

### 3.1.1.4 Bodenformen

Für den Projektteil **AufMod-B** wurden historische Analysen der Verteilung von Bodenformen und aktuelle Messdaten zusammengestellt.

Im Rahmen des Schwerpunktprogramms „Sandbewegung im deutschen Küstenraum“ wurden in den Jahren 1967-1971 flächenhaft für die deutsche Nordseeküste Bodenkörper kartiert und klassifiziert (Ulrich, 1973 Abbildung 3-7).



**Abbildung 3-7: Untersuchungsgebiet der Studie von (Ulrich, 1973) in der Deutschen Bucht**

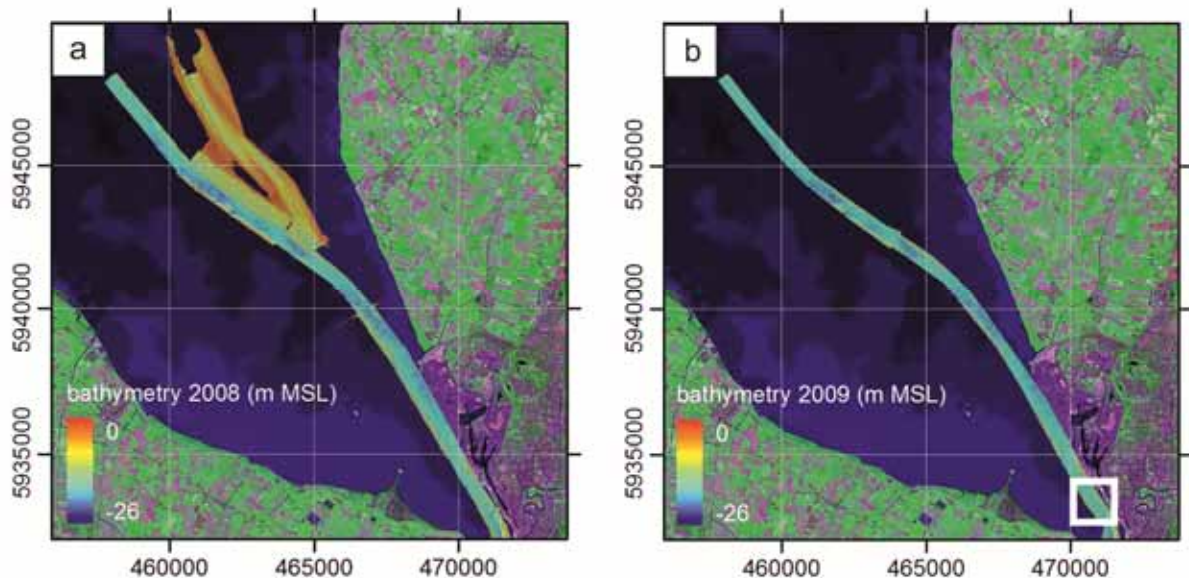
Dort wurden Echolotschriebe der 1960er und 1970er Jahre hinsichtlich der abgebildeten Bodenformen ausgewertet, klassifiziert und kodiert. Die Ergebnisse der damaligen Untersuchungen liegen in der Form von analogen Karten vor, die bestimmte Bereiche der Küstengewässer den (zu damaliger Zeit) dort typischen Formparametern zuweisen.

Abbildung 3-7 zeigt die Verteilung der ca. 11.000 Stellen, an denen in der Arbeit von (Ulrich, 1973) Bodenformen vermerkt sind.

Im Rahmen des Teilprojekts **AufMod-B** wurden die historischen Daten digitalisiert und der Zustand der Bodenformen zum damaligen Zeitpunkt rekonstruiert (vgl. Kapitel 3.2.1).

Für die Auswertung des heutigen Zustands werden hochauflösende bathymetrische Daten verwendet. Die folgenden Datensätze aus bathymetrischen Vermessungen mit Fächer-echolot sind von den zuständigen WSÄ bezogen worden:

- 1) WSA Cuxhaven: 2008 und 2009, Zellgröße 2 m x 2 m.
- 2) WSA Bremerhaven: 2008 und 2009, Zellgröße 2 m x 2 m.
- 3) WSA Wilhelmshaven: 2008, Zellgröße 2 m x 2 m.
- 4) WSA Bremen: 2008 und 2009, Zellgröße 2m x 2m



**Abbildung 3-8: Beispiel Datensatz Außenweser WSA Bremerhaven: a) 2008, b) 2009**

Die Abbildung 3-8 zeigt beispielhaft die Abdeckung der Datensätze des WSA Bremerhaven für die Jahre 2008 und 2009. Die Auswertung dieser Daten im Rahmen des Projekts wird in Abschnitt 3.2.2 beschrieben.

### 3.1.2 Im **AufMod**-Projekt erhobene Beobachtungsdaten

In den drei repräsentativen Teilgebieten Schelf / Vorstrand, Watten und Ästuaren sind seit Projektbeginn neue Daten erhoben worden, um vorhandene Datensätze zu ergänzen, Zeitreihenanalysen zu ermöglichen sowie um Bereiche ohne Datenabdeckung erstmalig zu versorgen. Da unterschiedliche Messdaten (vgl. Kapitel 3.1) möglichst flächendeckend und zeitgleich erhoben werden sollen, ist ein multimethodischer Ansatz gewählt worden. Dieser basiert auf dem Einsatz hydroakustischer und optisch basierter Messgeräte sowie Geräten

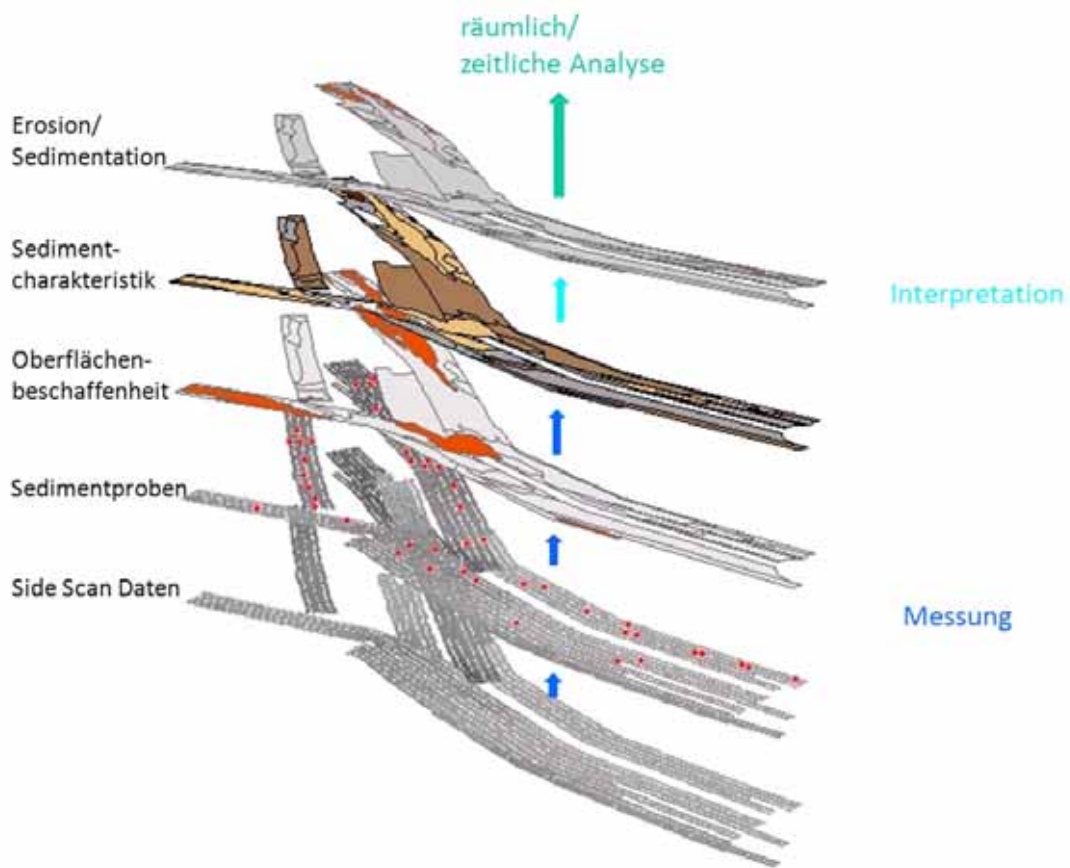
zur Sedimentbeprobung. Dieser Ansatz hat sich bereits in anderen, teils gemeinsam durchgeführten Vorhaben des BSH, der CAU und des SNG als erfolgreich erwiesen. Allen hydroakustischen Messverfahren gemein ist die Aussendung von Schallwellen sowie die anschließende Erfassung des an Grenzflächen (z.B. Gewässersohle, Schichtgrenzen oder sogar Partikel in der Wassersäule) reflektierten oder rückgestreuten Messsignals (*Blondel & Murton, 1997, Blondel, 2009, Lurton, 2002*). Über Signalauswertungen lassen sich Aussagen über die physikalischen Eigenschaften der Reflektoren treffen.

Zur Aufnahme bathymetrischer Daten werden Einstrahlecholote (SBES) oder Fächerecholotsysteme (MBES) unterschiedlicher technischer Auslegung eingesetzt. Seitensichtsonare (SSS) dienen der flächenhaften Abbildung der Sohloberfläche. Die akustischen Aufnahmen können einerseits mittels Sedimentinformationen, die über Sedimentanalysen gewonnen werden sowie unter Einbeziehung von Expertenwissen und durch die Verschneidung mit Metainformationen, kalibriert werden. Andererseits werden automatisierte Verfahren zur Sedimentklassifizierung eingesetzt (*Bartholomä, 2006*).

Detaillierte Informationen zur Beschaffenheit bzw. zum Aufbau der oberflächennahen Gewässersohle, insbesondere der ersten 5 m, liefern flachseismische Messsysteme wie sub-bottom profiler (SBP) bzw. parametrische Sedimentecholote wie das SES (*Wunderlich & Müller, 2003*). Über Änderungen der akustischen Impedanz können Aussagen zu Schichtmächtigkeiten, Schichteinfallen und Lagerungsgefügen getroffen werden. Kernentnahmen unterstützen die Dateninterpretation und dienen zur Kalibrierung. Zur akustischen Erfassung von Suspensionen sowie deren Verteilungen und Veränderlichkeiten werden in den Ästuaren sowohl das SES als auch hochfrequente Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP\*) eingesetzt (*Deines, 1999*) und mit Angaben zu in-situ Größenverteilungen von Schwebstoffpartikeln mittels des LISST\*-Systems (Laser In-Situ Scattering & Transmissometry) verschnitten.

Insgesamt werden durch die detaillierte und flächendeckende Aufnahme charakteristischer Eigenschaften der Gewässersohle mittels verschiedener, sich teilweise ergänzender hydroakustischer Messungen und diskreten Entnahmen von Sedimentproben Datensätze erarbeitet, die anhand von automatisierten Verfahren, besonders aber auf Basis von geologischem Hintergrundwissen, zu einer Informationsebene mit einem bestimmten Informationsgehalt (z. B. Korngröße) zusammengefasst werden.

In Kopplung mit, oft wiederum auf geologisches Hintergrundwissen basierten, Metainformationen entsteht ein Stapel von Informationsebenen (Abbildung 3-9), der aufbereitet in Kartenform oder raumbezogenen Datensätzen in das Bodenmodell eingeht. Auf Basis einzelner oder mehrerer Informationsebenen, lassen sich zudem konzeptionelle Modelle hinsichtlich verschiedener Fragestellungen entwickeln, welche wiederum für einen Vergleich mit den Ergebnissen numerischer Simulationen herangezogen werden können.



**Abbildung 3-9: Informationsebenen als Eingangsdaten für das Bodenmodell**

Alle seegestützten Messungen erfolgen von der für diese Arbeiten zur Verfügung stehenden Schiffsflotte des BSH, der CAU mit FTZ (FK Littorina, FS Südfall) und des SNG (FK Senckenberg). Seit Projektbeginn wurden die Schiffe an 101 Tagen eingesetzt. Das erfordert eine Personaldecke von bis zu 5 Mann Besatzung und bis zu 4 Wissenschaftlern pro Schiffstag. Insgesamt wurde eine Profilgesamtlänge von 1937 Seemeilen messtechnisch abgedeckt (Tabelle 3-4, Abbildung 3-10).

**Tabelle 3-4: Übersicht über die seit Projektbeginn durchgeführten schiffsgestützten Ausfahrten für AufMod-F und AufMod-G**

Fokusregion	Schelf / Vorstrand	Watten	Ästulare
Schiff	FK Littorina, FK Senckenberg	Südfall	FK Littorina, FK Senckenberg
Schiffstage	12+10	24	34+21
Geräte	SSS, MBES, SBP, Van Veen Greifer, CTD, UW-Kamera	SSS, SBES, SBP, Van Veen Greifer	SSS, MBES, SES, Shipek-Greifer, CTD, LISST, ADCP, Wasserschöpfer
Profilgesamtlänge [sm]	384+105	368	923+157
Sedimentproben [n]	31+28	171	649+87
Beprobungsgebiet [km <sup>2</sup> ]	134,85+18,2	68,15	174,30+14,2

Die bisher gewonnenen Sedimentproben sind bzw. werden zurzeit noch in den Laboren ausgewertet. Es werden Korngrößenverteilungen mittels Trockensiebung nach ASTM in ¼ Phi-Stufung von 63µm – 2000µm ermittelt. Bei Schlickanteilen (Fraktionen < 63 µm) von mehr als 30 Gewichtsprozent am Gesamtsediment werden die Proben zusätzlich mittels Laserbeugung (0,04 – 2000 µm) analysiert. Ferner werden Porositäten sowie Glühverluste an Proben mit hohem organischem Anteil bestimmt sowie Schwebstoffkonzentrationen über Filtration von Wasserproben ermittelt.

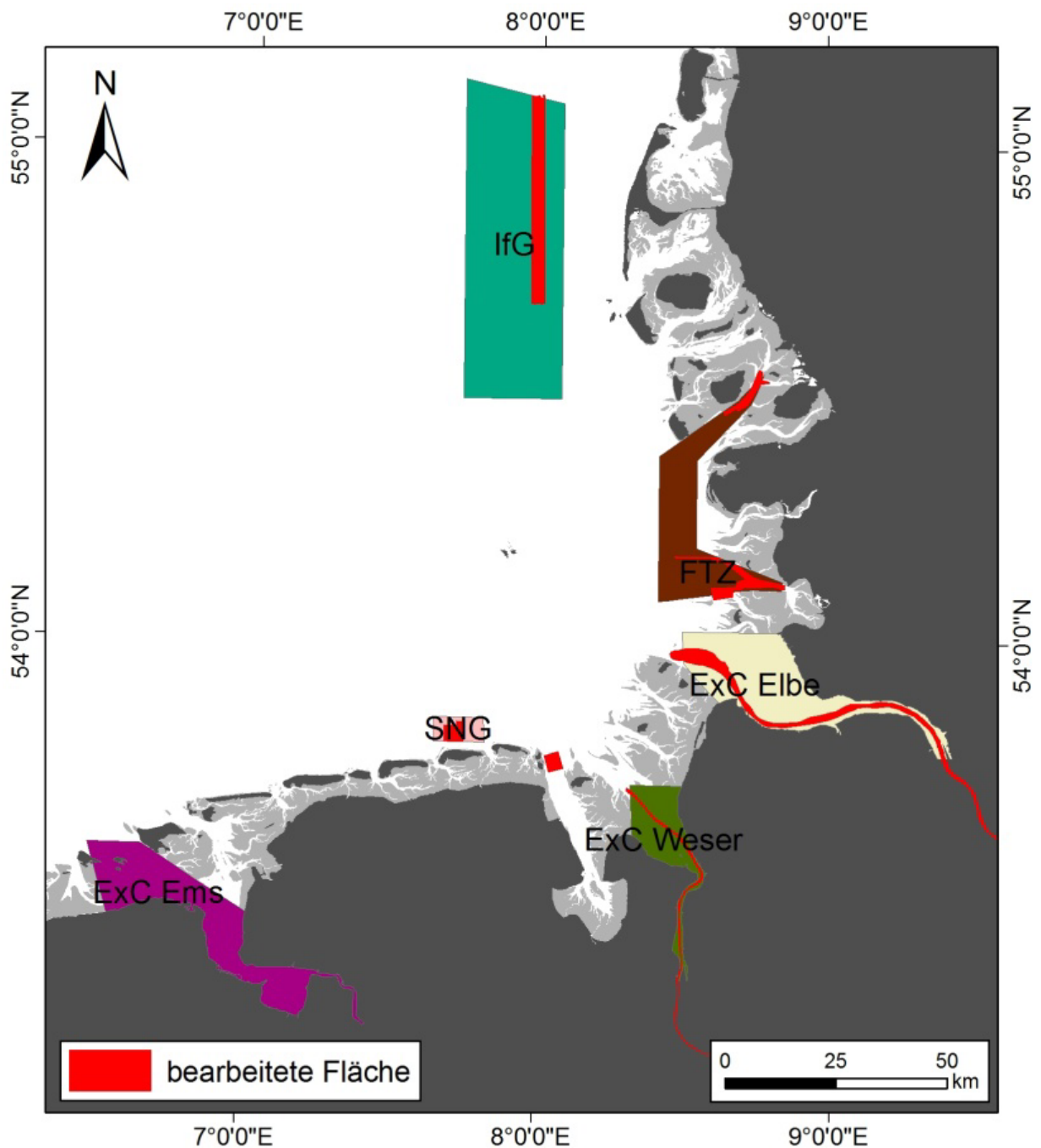


Abbildung 3-10: Übersicht über die untersuchten Flächen in den repräsentativen Teilgebieten von *AufMod-F* und *AufMod-G*

### 3.1.2.1 Schelf / Vorstrand

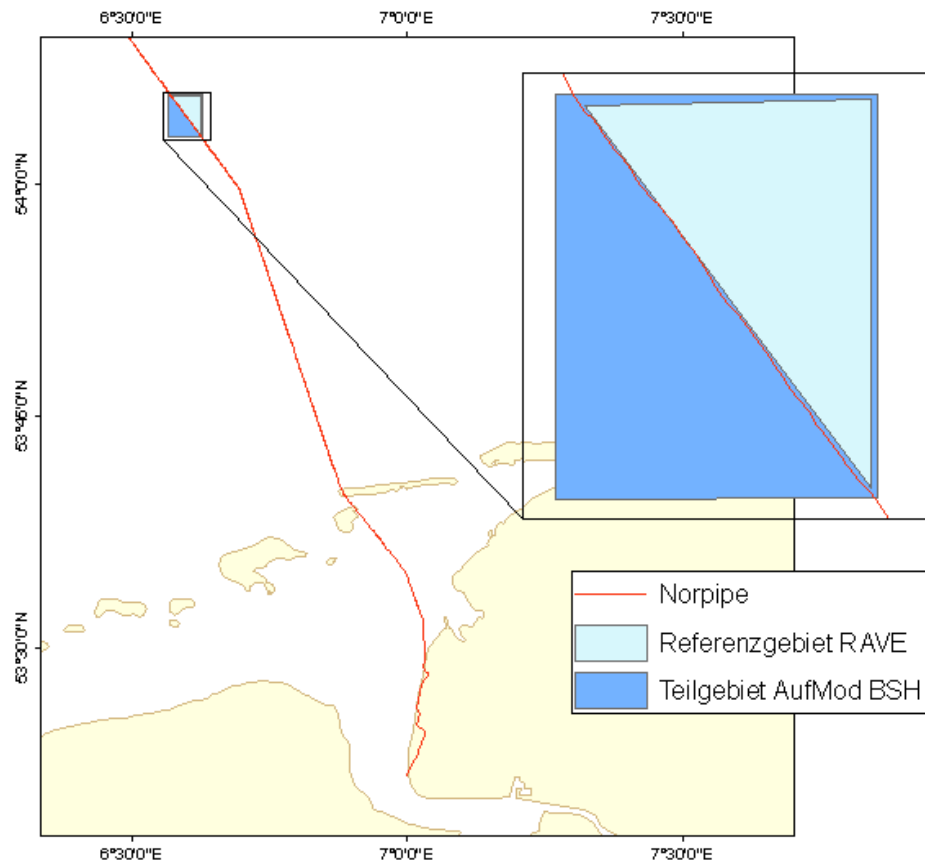
Das Küstenvorfeld von Spiekeroog wurde aufgrund der für die ostfriesischen Inselvorfelder küstengebundenen Zungenriffe ausgewählt, deren komplexe Dynamik bisher nicht vollständig geklärt ist. Spiekeroog gehört zu den Barriereinseln, die sich entlang der ostfriesischen und niederländischen Küste ziehen. Sie stellen in der Deutschen Bucht ein einzigartiges morphologisches Element dar, weltweit jedoch treten sie an vielen Küsten auf (Swift, 1978, van de Meene and van Rijn, 2000). Aus eigenen Vorarbeiten liegen Zeitreihen zur Bathymetrie und Sedimentologie in unterschiedlichen räumlichen Auflösungen für den Bereich Spiekeroog vor, die bereits Eingang in das funktionale Bodenmodell gefunden haben. Das Gebiet wurde bereits in **AufMod-G** mit *FK Senckenberg* zweimal im Jahr 2010 hydroakustisch aufgenommen und mit Bodenproben validiert.

Das Küstenvorfeld westlich der Insel Sylt wurde als ein repräsentatives Messgebiet ausgewählt, da dieser Bereich, wie weite Teile der Nordseesohle, von marinen Sedimenten holozänen Ursprungs dominiert wird, die dem pleistozänen Untergrund geringmächtig auflagern (Zeiler et al., 2000). Für dieses Seegebiet stehen neben den Sedimentdaten des BSH Karte Nr. 2900 (Figge, 1981) eine ganze Reihe weiterer Informationen aus vorhergehenden Verbundforschungsprojekten (Sandbewegung im Küstenraum, DFG 1979, Optimierung des Küstenschutzes auf Sylt, BMBF 1991, 1994) oder einzelnen Studien (Tiniakos, 1978; Kachholz, 1982, Ahrendt, 1988, Ahrendt, 1994) zur Verfügung. Meist beruhen diese älteren Ergebnisse jedoch auf punktuellen Beobachtungen. Eine erneute, diesmal aber flächendeckende Aufnahme bietet daher den großen Vorteil, dass neben der räumlichen Verdichtung der Datenbasis auch Informationen zur zeitlichen Variabilität des Sedimentationsraumes erfasst werden.

Aufgrund der relativ hohen Anforderungen an die Schiffkapazität wurde in diesem Seegebiet bislang eine Messkampagne durchgeführt (Tabelle 3-4). Zu weiteren Datenaufnahmen sind für 2011 zwei längere Ausfahrten mit FS Alkor und FK Littorina genehmigt worden. Geplant ist, die Seegrundkartierung nach Westen fortzuführen. Zudem sollen kleinere Bereiche des in 2010 untersuchten Gebietes erneut kartiert werden, um mögliche Änderungen nach einem Jahr erfassen zu können. Detailbereiche, wie eine der in diesem Gebiet präsenten Sohlformen, sollen engmaschig beprobt werden, um Sedimentübergänge genauer zu ermitteln. Durch die Entnahme von Sedimentkernen soll die Mächtigkeit mobiler Deckschichten verifiziert werden.

Aus der Diskussion der PBG-Sitzung vom 17. November 2010 ergab sich das Erfordernis, die sedimentdynamischen Vorgänge im Schelfbereich durch Hinzuziehung weiterer Bereiche noch repräsentativer und aussagekräftiger zu erfassen. Daher wurde seitens des BSH ein weiterer Bereich für das Teilgebiet Schelf / Vorstrand in Abstimmung mit CAU und SNG ausgewählt (Abbildung 3-11). Dieser Bereich bietet den Vorteil, dass er als Referenzgebiet der Forschungsinitiative „RAVE“ bathymetrisch und sedimentologisch bereits untersucht

worden ist. Hierzu wurden Messkampagnen durchgeführt, deren Ergebnisse in **AufMod** genutzt werden können (vgl. Kapitel 3.1.3). Zusätzlich verläuft die Rohrleitung „Norpipe“ durch das Gebiet. Dies ermöglicht weitere Erkenntnisse aus deren Überwachungen zu nutzen. Für Ende Juli 2011 ist in diesem Gebiet eine Messkampagne geplant, in der hydroakustische Verfahren angewendet und Kastengreiferproben entnommen werden sollen.



**Abbildung 3-11: Weiterer Bereich (BSH) für das Teilgebiet Shelf / Vorstrand**

### 3.1.2.2 Watten

Das Wattenmeer zwischen der offenen Nordsee und dem Festland mit seinen intertidalen Flächen, Gezeitenrinnen und Prielsystemen ist durch intensive Sedimentumlagerungen und schnelle morphologische Veränderungen gekennzeichnet. Innerhalb dieses Küstenraumes fungieren die Gezeitenrinnen als wichtige Transportbahnen für Wasser und Sediment. Der Kenntnisstand über die Ausbildung der Gewässersohle sowie die Verbreitung von Sedimenten ist für die meisten Rinnen gering. Entsprechend unscharf können bislang Eingangsdaten für die numerische Modellierung von Transportvorgängen in diesem dynamischen Raum formuliert werden.

Im Rahmen von **AufMod-F** sind bisher Abschnitte der Gezeitenrinnen Piep (Dithmarscher Wattenmeer) und Norderhever (Nordfriesisches Wattenmeer) bearbeitet worden. In beiden Rinnen wird die Korngrößenzusammensetzung der Gewässersohle in relativ grober Form



durch die Sedimentverteilungskarte Nr. 2900 des BSH (*Figge, 1981*) beschrieben. Neben wenigen lokalen Informationen (*Nommensen, 1982*) liegen für die Norderhever keine weiteren Beschreibungen zur Sedimentverteilung vor. Für die Piep finden sich entweder für Teilbereiche bei *Ricklefs & Asp (2005)* oder in grober Klassifizierung bei *Poerbandono & Mayerle (2005)* Angaben zur Zusammensetzung und Verbreitung von Sedimenten. Somit erfolgt in beiden Rinnen erstmals eine detaillierte und flächendeckende Aufnahme der Sedimentverteilung und Sohlausbildung. Im Verlauf des Projekts sollen die Datenerhebungen flächenmäßig weiter ausgedehnt werden.

### 3.1.2.3 Ästuare

Tidedominierte Flussmündungen (Ästuare) zählen zu den hoch komplexen Küstensystemen der Erde, nicht zuletzt, da sie die Schnittstelle zwischen Flusssystem und der offenen See darstellen. Insbesondere im Bereich, in dem die Wassermassen des Flusses mit denen des Meeres interagieren (Trübungszone), kommt es zu Anreicherung hoher Schwebstoffmengen und entsprechenden Sedimentumlagerungen. Ästuare, wie die Weser, Elbe und Ems, sind zudem nicht unwesentliche Transportwege für Schwebstoffe in die Deutsche Bucht (*Puls et al., 1997*). Auch die Jade wird zu den Ästuaren gezählt, auch wenn diese eine Sonderstellung einnimmt, da in die Jade kein großes Flusssystem entwässert. Aufgrund der Buchtenstruktur finden sich hier komplexe bidirektionale Sohlformmuster, speziell im externen Bereich, die ähnliche Charakteristika zu denen in Gezeitenrinnen aufweisen.

Zur Sicherung des Schiffverkehrs werden wiederholt Gewässervermessungen durch die WSÄ vorgenommen. Ferner liegen meist punktuelle Angaben zur Sedimentbeschaffenheit vor. Ein Teil der Ästuare wurde in die Sedimentverteilungskarte von *Figge (1981)* in einem groben Raster aufgenommen. Eine vergleichende Gegenüberstellung von Änderungen der Gewässersohle im Fahrwasser des Weser-Ästuars auf Basis hydroakustischer Aufnahmen erfolgte von *Schrottke et al. (2005)*.

Für eine repräsentative Erfassung der für das Bodenmodell benötigten Parameter (vgl. Kapitel 3.1) in diesen hochdynamischen Gebieten ist es notwendig Wiederholungsmessungen durchzuführen, um gesicherte Aussagen über Sedimentänderungen und Morphodynamik treffen zu können. Zudem wurde die Beprobungsstrategie auf sich schnell ändernde Rahmenbedingungen angepasst, d.h. einerseits wesentlich engmaschiger gesetzt, als es normalerweise für den Abgleich mit den hydroakustischen Aufnahmen nötig ist und die Zeiten zwischen hydroakustischer Ausnahme und Beprobung auf vergleichbare Tidebedingungen angeglichen. Es hat sich gezeigt, dass Zusatzinformationen über Strömung, Schwebstoffcharakteristik und -gehalte (vgl. Kapitel 3.1.2) die Dateninterpretation wesentlich voranbringen.

Bislang wurden im Rahmen von **AufMod-F** vier Ausfahrten durchgeführt (Tabelle 3-4), weitere Ausfahrten in 2011 und 2012 sind geplant. Darunter wird Ende Mai 2011 ein im Teilgebiet Ästuare besonders zu berücksichtigender Bereich, die Medemrinne in der

Elbmündung, im Vordergrund stehen. Sie stellt nach Angaben der Projektpartner ein wichtiges Testfeld zur Überprüfung der Modellgüte dar.

In der Außenjade wurden von **AufMod-G** mit FK Senckenberg bereits drei hydroakustische Vermessungen in 2010 durchgeführt, in 2011 sind zwei weitere geplant

### 3.1.3 Beobachtungsdaten aus laufenden Parallelprojekten

#### RAVE – Research at alpha ventus

Forschungsinitiative des Bundesministeriums

Teilprojekt RAVE – Geologie: Sedimentdynamik und Kolkverhalten im Offshore Testfeld „alpha ventus“. Während des Projektverlaufs wurden sowohl im Testfeld als auch in einem nördlich davon gelegenen Referenzgebiet hydroakustische Messungen aufgenommen. Der vom BSH geplante, weitere Bereich des Teilgebietes Schelf / Vorstrand beinhaltet das Referenzgebiet von RAVE (vgl. Kapitel 3.1.2.1). Tabelle 3-5 zeigt eine Übersicht der dort und im Testfeld „alpha ventus“ bisher erhobenen Daten.

**Tabelle 3-5: Bisherige Datenerhebung im Teilprojekt RAVE – Geologie: Sedimentdynamik und Kolkverhalten im Offshore Testfeld „alpha ventus“**

Zeitpunkt	Gerät	Profilverlauf
Mai 2008	SSS MBES	Ost-West-Richtung 100m-Abstand
Mai 2008	SBP SBES	Gitternetz 300m-Abstand, 200m-Abstand (alpha ventus)
April 2010	SSS MBES	Ost-West-Richtung 100m-Abstand
April 2010	SBP SBES	Gitternetz 300m-Abstand 200m-Abstand (alpha ventus)

#### GPDN – Geopotenzial Deutsche Nordsee

*Laufzeit:* 2009-2013

*Auftraggeber:* Bundesministerium für Wirtschaft (BMWi), Wirtschaftsministerium Niedersachsen

*Auftragnehmer:* BGR, LBEG, BSH

Das Modul B beschäftigt sich mit der Erstellung eines Kartenwerks über die Sedimentverbreitung an der Gewässersohle der Deutschen Bucht und der Erforschung des Untergrunds durch seismische Verfahren. Dazu wurden bereits in weiten Abschnitten Greiferproben und Bohrkerne entnommen und hydroakustische Messungen durchgeführt. Im

zukünftigen Projektverlauf ist mit weiteren Datenerhebungen zu rechnen, sodass hier für **AufMod** relevante Datensätze über Korngrößenverteilungen und Sandmächtigkeiten zu erwarten sind. Eine entsprechende Abstimmung bzgl. eines Datenaustauschs wird von BSH (Dr. Zeiler) und LBEG (Dr. Schwarz) vorgenommen.

### **WIMO – Verbundprojekt „Wissenschaftliche Monitoringkonzepte für die Deutsche Bucht**

*Laufzeit:* 2009-2012

*Auftraggeber:* Nds. Ministerium für Umwelt und Klimaschutz, Nds. Ministerium für Wissenschaft und Kultur

*Auftragnehmer:* HWK, SGN, Unis Bremen, Hannover, Osnabrück; NPV Nds.; DLR; GKSS

Das Projekt besteht aus vier großen Modulen; Modul 1 beschäftigt sich mit der Einführung hydroakustischer Verfahren zur effizienten und flächendeckenden Kartierung der Seebodentypen, Habitate und Benthosgemeinschaften des Meeresbodens als Instrumentarium zur Bewertung des Zustands der AWZ-Nordsee und des Wattenmeers.

### **3.2 Bodenformmodell**

Für die deutschen Küstengewässer liegen nur wenige Daten zum Auftreten und zu den Dimensionen von subaquatischen Bodenformen vor. Konsistente Datensätze für beliebige Zeitpunkte sind bis auf die Arbeit von (Ulrich, 1973) bisher nicht zusammengestellt worden. Die Geometrie von Bodenformen und deren hydraulische Wirkung werden stattdessen meist auf Grund von empirischen Gleichgewichtsbeziehungen abgeschätzt. Es liegt eine Vielzahl von Formeln vor, die meist (dimensionslose) hydrodynamische Zustandsgrößen mit Kenngrößen der Gewässersohle in Beziehung setzen (Gill, 1971; Knaapen, 2005; Soulsby & Whitehouse, 2005; van Rijn, 1984; van Rijn, 2007; Yalin, 1964, Yalin, 1977).

Diese Beziehungen sind wegen ihrer empirischen Natur nur gültig für den Bereich der Kenngrößen, auf dem sie basieren. Obwohl im Vergleich mit Daten aus Experimenten und aus der Natur durchaus Ergebnisse in gleicher Größenordnung erreicht werden können, sind die vorliegenden Formulierungen in mehrerer Hinsicht unbefriedigend: Die Formeln basieren hauptsächlich auf Labordaten und sind deshalb in ihrer Gültigkeit auf Bodenformen bis hin zu einer Höhe von wenigen Dezimetern limitiert. Weiterhin werden hauptsächlich stationäre Zustände in gleichgerichteter Strömung betrachtet. Die Wirkung der in tidedominierten Gebieten vorherrschenden Strömungsumkehr wird meist vernachlässigt. Naturmessungen werden durchaus auch in Formulierungen eingebracht, allerdings meist in stark vereinfachter Form. Die tatsächliche komplexe Struktur sich überlagernder Formen wird meist auf die größten Bodenformen reduziert.

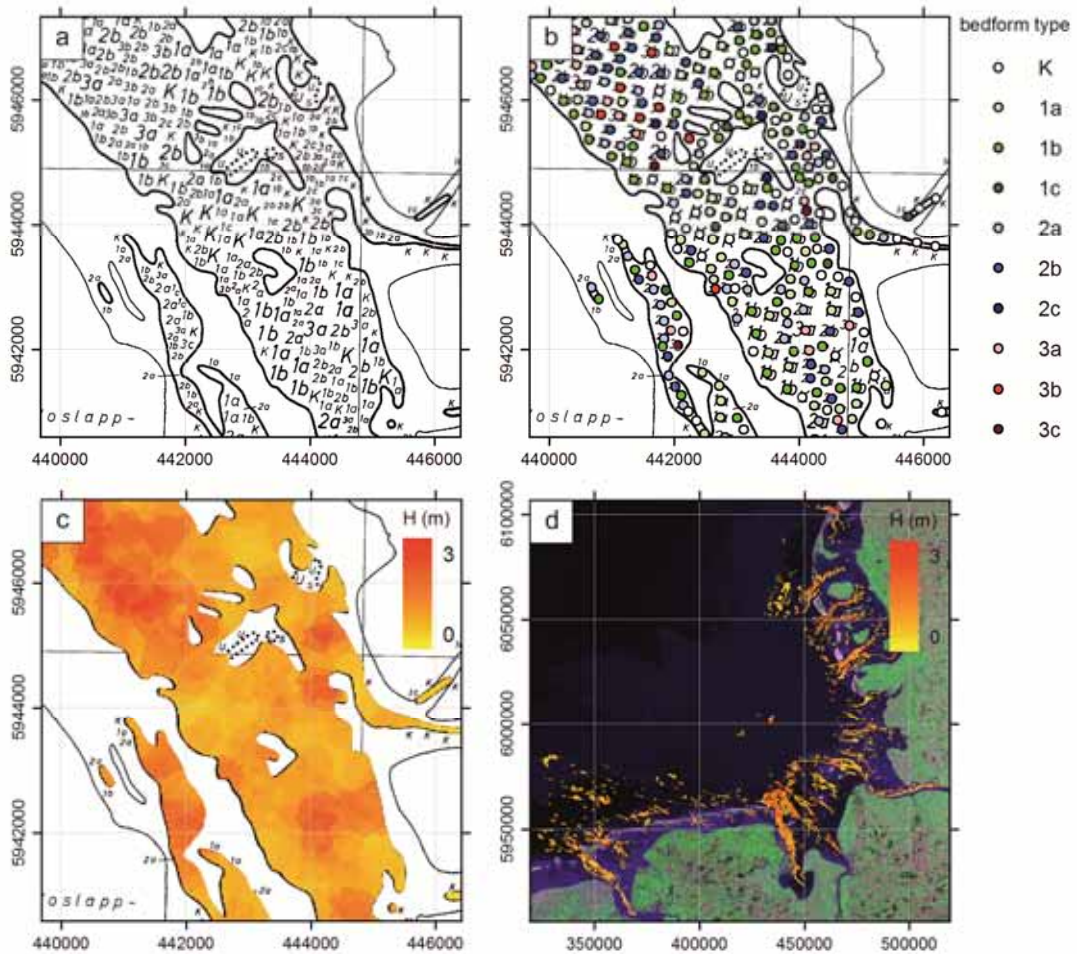
Durch die Verschneidung und gemeinsame Analyse flächenhafter hochaufgelöster bathymetrischer (aus der Peildatenbank Küste PDBK), sedimentologischer (vom BSH, **TP1**, MARUM, SNG, Literatur) und zeitaufgelöster Daten sowie repräsentativer hydrodynamischer

Informationen (aus **TP3**) wird ein vertieftes Verständnis von Bodenformen angestrebt. Dieses umfasst das Auftreten und die Entwicklung von Bodenformen, die quantitative Evaluation bestehender empirischer Gleichungen zur Prognose von Bodenformen und deren Wirkung auf die Hydro- und Sedimentdynamik, deren Verbesserung und deren Implementation in Modellsysteme möglich. Dazu sind im ersten Berichtszeitraum die beantragten Schritte vollzogen und die angekündigten Meilensteine erreicht worden.

### 3.2.1 Rekonstruktion historischer Daten

Die ausschließlich analog vorhandenen Karten der Untersuchung von (*Ulrich, 1973*) wurden im Rahmen des Projekts **AufMod-B** digitalisiert und dekodiert. Im Einzelnen wurden die folgenden Schritte durchgeführt (Abbildung 3-12):

- Digitalisierung (scannen) der analogen Karten in TIF-Dateien (Abbildung 3-12 a).
- Einbindung der Dateien in ARC GIS, Georeferenzierung. Manuelle Digitalisierung der Bereiche von Bodenformen durch Polygone. Manuelle Digitalisierung der Orte und Kodierung der Bodenformklassen (Abbildung 3-12 b).
- Dekodierung der Bodenformklassen in Höhen H und Steilheiten H/L gemäß der Klassifizierung von Ulrich (*Ulrich, 1973*). Inter- und Extrapolation der Punktwerte auf die Bereiche zur Darstellung der flächigen Verteilung von Kenngrößen H und H/L (Mindest- Höchst- und Mittelwerte) (Abbildung 3-12 c , Abbildung 3-12 d).



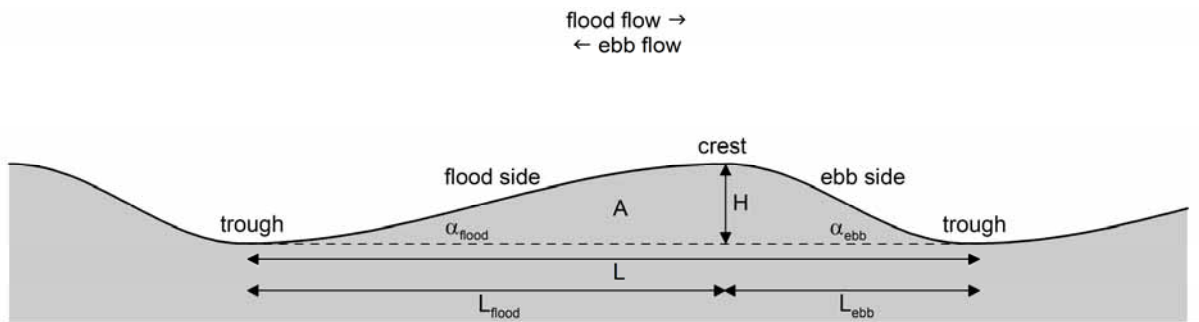
**Abbildung 3-12: Rekonstruktion der Daten von (Ulrich, 1973) am Beispiel der Außenjade: a Rohdaten, b digitalisierte Punkte / Polygone, c rekonstruierte Höhen, d Darstellung der Höhen (Mittelwerte) im Gesamtbereich**

Mit der Rekonstruktion der flächenhaften Verteilung von Bodenformkennwerten liegt eine wertvolle Datengrundlage vor, die im weiteren Verlauf des Projekts zur Auswertung empirischer Zusammenhänge zwischen gewässerphysikalischen Zustandsgrößen, dem Vergleich mit dem heutigen Zustand und der Initialisierung von numerischen Modellen Verwendung findet.

### 3.2.2 Analyse aktueller Bodenformen

MBES-Peilungen für die Teilgebiete Jade, Weser und Elbe sind von den zuständigen WSÄ bezogen worden. Für die Bearbeitung und Verschneidung mit anderen Daten wurden die im Gauß-Krüger System vorhandenen Daten auf das Koordinatensystem UTM Zone 32 N WGS 84 mit ARC GIS projiziert. Das System ermöglicht eine schnelle Darstellung und Verarbeitung von Geodaten verschiedener Quellen. Zusätzliche Daten, die von Projektpartnern zur Verfügung gestellt und bislang in ARC GIS eingebunden wurden, sind hydrodynamische Zustandsgrößen (bereitgestellt vom Projektpartner BAW), und die Verteilung sedimentologischer Kenngrößen (bereitgestellt vom Projektpartner BSH).

Die hohe räumliche Auflösung der MBES-Daten ermöglicht die dreidimensionale Darstellung von Bodenformen. Die Analyse muss sich dabei auf die Bereiche beschränken, die datentechnisch abgedeckt werden. Die Daten wurden von offensichtlichen Ausreißern und Inkonsistenzen bereinigt. Abbildung 3-13 zeigt die Definition der zur Darstellung von Bodenformen gewählten Parameter Höhe  $H$ , Länge  $L$  (sowie Länge der Flutseite  $L_{\text{flood}}$  und der Ebbeseite  $L_{\text{ebb}}$ ), mittlere Winkel des Luv- und Leehangs  $\alpha$  (bzw. der Flut- und Ebbeseite) und Areal (Volumen per Breitenmeter) der Bodenform.



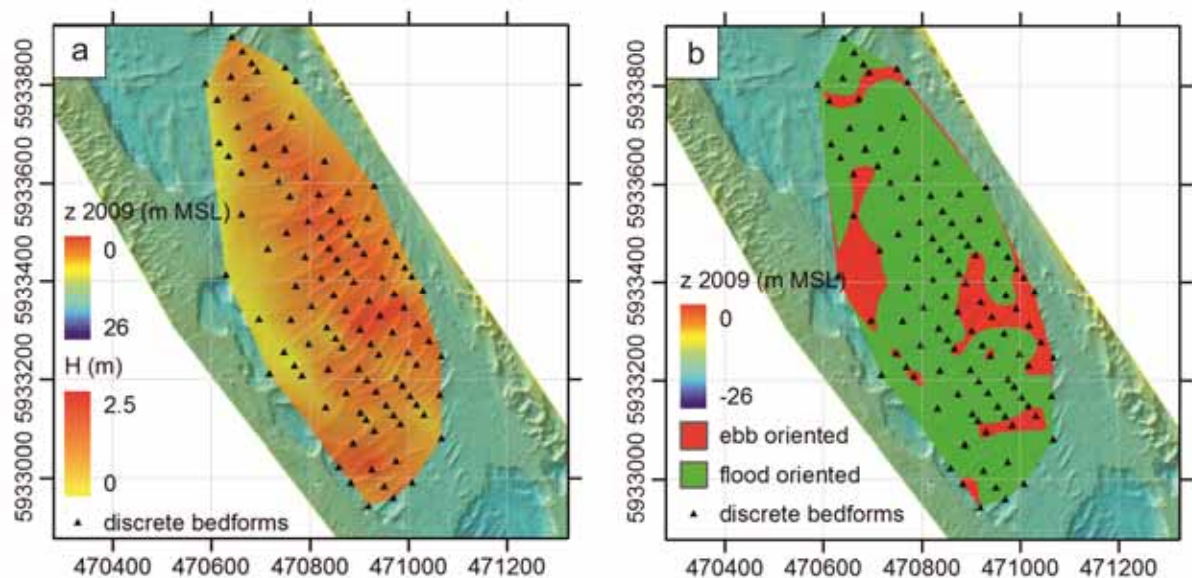
**Abbildung 3-13: Parameter zur Beschreibung von Bodenformen**

Mit dem Ziel einer automatisierten und objektiven Analyse bathymetrischer Informationen wurden ARC GIS Makros (Programmskripte) entwickelt, die die Schritte von der Erstellung von digitalen Geländemodellen bis zur der Detektion und Parametrisierung von Bodenformen beinhalten. Letztere Schritte verlangen die Definition von Kenngrößen zur Identifikation von Bodenformen (im Unterschied zu anderen ausgeprägten Geländeformen wie Fahrrinnenränder, Baggerspuren o. ä.). Zunächst wurde dabei das Kriterium der hydraulisch relevanten Bodenform eingeführt. Als hydraulisch relevant werden Formen angesehen, deren Formrauigkeit durch Wirbelablösung (Rezirkulation) bestimmt wird. Das Kriterium für die Ablösung der Grenzschicht an Geländesprüngen ist ein Leewinkel von mehr als  $10^\circ$  (Paarlberg *et al.*, 2009). Die folgenden Schritte werden bei der Analyse durchlaufen:

- Erstellung eines Gitternetzes und Geländemodells durch Interpolation (Nearest Neighbor Algorithmus), Interpolation der hydraulischen Zustandsgrößen auf das Gitter
- Bestimmung und Kennzeichnung von individuellen Bodenformen: Berechnung der lokalen Neigungsrichtung  $\alpha$  an jedem Gitterpunkt. Bestimmung der Zellen mit  $\alpha > 10^\circ$  (und anderen Winkeln); Kennzeichnung aller Gitterpunkte mit einer Ausrichtung in Richtung der Strömung ( $\pm 45^\circ$ ); Gruppierung der detektierten Bodenformen (Leeseiten) zu Feldern.
- Analyse der Kenngrößen in den detektierten Feldern: Extraktion von Profilen längs zur Strömungsrichtung; Bestimmung individueller Bodenformen durch Zero-Upcrossing Verfahren (Ernstsen *et al.*, 2010); Berechnung der Parameter Länge  $L$ ,

Höhe  $H$ , Steilheit  $H/L$ , Mittlere Winkel des Luv- und Leehangs, Symmetrieverhältnis ( $L_{\text{ebb}}/L$  oder  $L_{\text{flood}}/L$ , Ebb- oder Flutstromdominierte Form) und Formfaktor  $\Psi = A/LH$ , wobei  $A$  die Fläche (Volumen pro Meter Breite) der Bodenform, d.h. ein perfektes Dreieck hat ein Formfaktor gleich 0.5.

Beispielhaft ist das Ergebnis einer Analyse für einen Bereich der Außenweser in Abbildung 3-14 gezeigt. Hier wurde mit den o. g. Kriterien ein Bereich mit strömungsnormalen Bodenformen ausgewiesen und Kenngrößen anhand von neun Längsprofilen (normal zur Kammorientierung) ermittelt. Die Abbildung zeigt überwiegend flutstromorientierte Formen mit Höhen von 0.5 bis 2.5 Metern in der Fahrrinne.



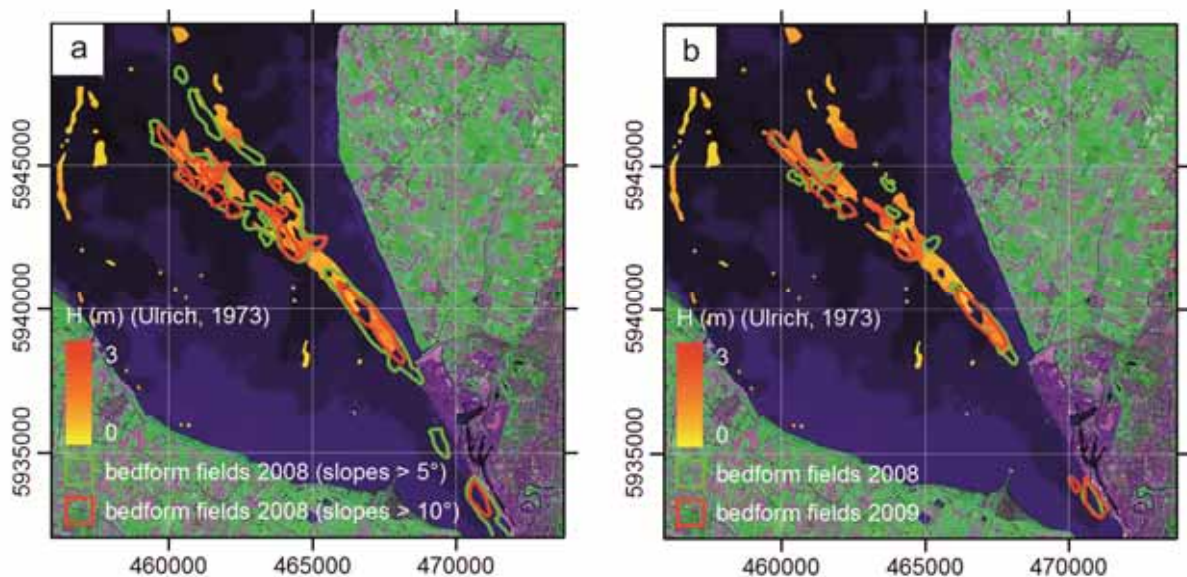
**Abbildung 3-14: Ergebnisse der Analyse eines Feldes von Bodenformen in der Außenweser (Ausschnitt siehe Abbildung 3-8)**

Vorherige Studien über die Dynamik von Bodenformen haben gezeigt, dass individuelle große Dünen in Gezeitenrinnen sich in Größenordnungen mehrerer Meter pro Tidezyklus bewegen. Im monatlichen Vergleich liegen residuale Geschwindigkeiten bei einigen Metern. Im Rahmen dieser Arbeit soll nun die Stabilität der Bereiche abgeschätzt werden, in denen Bodenformen vorkommen. Die Verschneidung der oben genannten Daten ermöglicht die Abschätzung räumlicher Änderungen der Verteilung von Bodenformen.

Hier ist zunächst exemplarisch die Entwicklung von Feldern über zwei Jahre im Bereich Bremerhaven gezeigt. Die Bestimmung von Bodenformen und die Ausweisung von Feldern sind stark abhängig von dem gewählten Kriterium von Rezirkulation (Leewinkel). Die Abhängigkeit des Ergebnisses von der Wahl des Winkels ist beispielhaft in Abbildung 3-15 a

gezeigt. Wie erwartet, zeigt sich eine größere Ausdehnung der Felder mit Bodenformen bei der Vorgabe eines kleineren Winkels. Die Überlagerung mit den Daten von (Ulrich, 1973) zeigt teilweise eine Übereinstimmung von Bereichen mit Bodenformen.

Es ergeben sich Bereiche, in denen auch schon in den historischen Daten Bodenformen vermerkt sind. In Teilbereichen sind in den neuen Daten Bodenformen detektiert worden, für die es in der Arbeit von (Ulrich, 1973) keinen Hinweis gibt. Die Interpretation der Entwicklung über mehrere Jahrzehnte muss berücksichtigen, dass für die historischen Daten keine Angaben über die objektiven Kriterien zur Definition von Bodenformen vorliegen.



**Abbildung 3-15: Sensitivität des detektierten Bereichs von der Wahl des Winkels. a) Vergleich der detektierten Felder mit Bodenformen bei der Verwendung eines Winkels von 5°, bzw. 10° - b) Vergleich der detektierten Bodenformen (Winkel >10°) der Jahre 2008 und 2009**

Basierend auf dem momentanen Stand ist es noch nicht möglich, eine Aussage darüber zu treffen, ob die räumliche Verteilung über mehrere Jahrzehnte sich wegen

- 1) Änderungen der Tideregime (Hydrodynamik),
- 2) Änderungen der Sedimentverteilung und/oder Sedimentverfügbarkeit oder
- 3) Migration von ganzen Bodenformfeldern geändert hat.

Der Vergleich der Daten von 2008 und 2009 (Abbildung 3-15 b) zeigt die räumliche Übereinstimmung der gefundenen Felder. Die vorläufige Analyse der jährlichen Änderungen zeigt keine eindeutigen Trends, aber prägnante Unterschiede der Ausdehnung der großen Felder. Teilweise sind die Änderungen der Felder bedingt durch die Ausdehnung und Abdeckung der Datensätze (Abbildung 3-8).



### 3.3 Das funktionale Bodenmodell

Unter dem funktionalen Bodenmodell wird die modelltechnische Realisierung eines flächenhaften, zeitvarianten Modells der oberen Schicht der Gewässersohle verstanden. Das funktionale Bodenmodell basiert auf Messdaten in Verbindung mit angepassten Interpretationsvorschriften. Durch Methoden zur flächendeckenden Interpolation und Analyse dieser Datensätze liefert es an jedem Ort der Deutschen Bucht und zu jedem Datum (von 1990 bis heute) folgende Informationen:

- Höhenlage der Bodens
- Kornverteilungskurve
- Mächtigkeit der mobilen Deckschicht
- Porosität
- Anteil der organischen Bestandteile
- Bodenformen / Sohlformen

Das funktionale Bodenmodell ist modular aufgebaut und lässt sich durch Adaption weiterer (biologischer und chemischer) Parameter und Komponenten erweitern. Um an jedem Ort mindestens eine Größe zu jedem Parameter verfügbar zu haben, wurde zunächst jeweils ein Layer, das sogenannte stationäre Bodenmodell, für den Zeitpunkt 1989 erstellt. Können im zeitvarianten Bodenmodell zu einem Zeitpunkt und an einem vorgegebenen Ort keine Größen aus real gemessenen Daten interpoliert werden, so werden diese aus dem stationären Bodenmodell generiert.

Die prototypische Implementierung des funktionalen Bodenmodells ist datenbankbasiert, verfügt über umfangreiche Programmschnittstellen und lässt sich teilweise über eine graphische Benutzeroberfläche administrieren und nutzen.

#### 3.3.1 Anforderungen an das funktionale Bodenmodell

Das funktionale Bodenmodell hat sich zu einem zentralen Element des Verbundprojektes entwickelt. Es bildet die Grundlage für die Modellerstellung, die Modellplausibilisierung und auch für die Modellkalibrierung / -validierung. Durch eine ganzheitliche Modellsicht wird eine Verbesserung des Systemverständnisses erreicht und eine bessere Einordnung neuer Messergebnisse unterstützt.

Anforderungen an die abzuleitenden Daten und Informationen des funktionalen Bodenmodells ergeben sich u.a. aus den unterschiedlichen Fragestellungen der Teilprojekte. Aber auch der Aufbau und die Pflege des funktionalen Bodenmodells stellen besondere Anforderungen an die Messdaten und vor allem an die dazu gehörigen Metadaten.

Die Metadaten zu einer Messung / Messkampagne legen u. a. den räumlichen und zeitlichen Aussagebereich sowie die zugehörigen Interpretationsvorschriften (z.B. Interpolation) fest. Für die Interpretation, Analyse und Weiterverarbeitung zu abgeleiteten Produkten ist die

Spezifikation der in den Messdaten enthaltenen Mess- und Prozessierungsunschärfe notwendig.

Das funktionale Bodenmodell liefert für die prozessbasierten und prozessorientierten morphodynamischen Simulationsmodelle wesentliche Anfangsbedingungen und Modellparameter:

- Initiale Tiefenverteilungen
- Initiale Korngrößenverteilung entsprechend den Anforderungen der unterschiedlichen Simulationsmodelle
- Erosionstiefen bzw. schwer erodierbare Horizonte
- Bodenformen für die Parametrisierung von Formrauheiten

Die Analyse der Unschärfe sowie örtlichen und zeitlichen Variationen der zu Grunde liegenden Messwerte zeigen die Bereiche möglicher Variationen der Modellparameter im Rahmen der Modellkalibrierung auf.

Für die Plausibilisierung und Validierung der Modellergebnisse stellt das funktionale Bodenmodell quasikonsistente Bathymetrien zu jedem gewünschten Zeitpunkt, jährliche Erosion und Sedimentation sowie weitere abgeleitete bathymetrische Größen zur Verfügung. Werden durch die numerischen Simulationsmodelle auch Veränderungen der Kornzusammensetzungen berechnet, so können entsprechende konsistente Verteilungen, bei einer ausreichenden Datenlage, generiert und zur Plausibilisierung herangezogen werden.

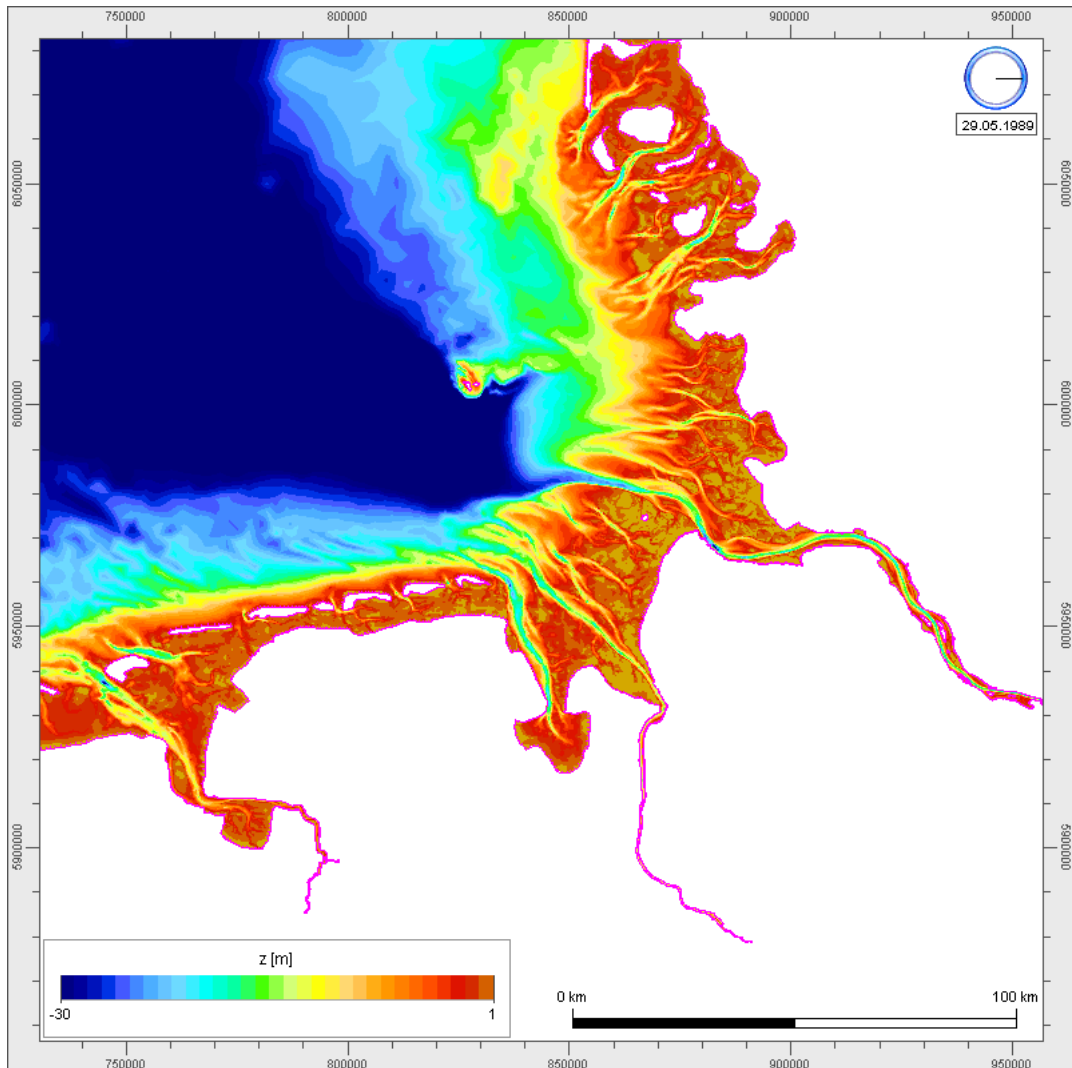
### **3.3.2 Methoden zur datenbasierten Modellierung**

Das modular aufgebaute funktionale Bodenmodell basiert auf Messdaten und zugehörigen Interpretationsvorschriften. Der Entwicklungsstand bei den einzelnen Modulen des funktionalen Bodenmodells hat unterschiedliche Reifegrade erreicht.

#### **3.3.2.1 Digitale Bathymetrie**

Das Modul zur Beschreibung der räumlichen Verteilung und zeitlichen Entwicklung der Gewässersohle, die zeitvariante digitale Bathymetrie, ist als eigenständiges Modul über das Softwareprodukt GISMO weitestgehend administrierbar und nutzbar. Die graphische Benutzeroberfläche dient hierbei zur Verwaltung und Plausibilisierung der verschiedenen Vermessungen sowie zur Pflege der zugehörigen Metadaten auf der Basis eines verteilten Datenbanksystems.

Zur Ableitung einer quasikonsistenten Bathymetrie für eine Menge von Stützstellen zu einem Zeitpunkt wird eine Raum-Zeit-Interpolation auf der Basis der zeitlich am nächsten gelegenen Vermessungen (KoDiBa-Abschlussbericht 2005), (ImTG-Abschlussbericht 2009) durchgeführt. Aus den zeitlichen Entfernungen und den Tiefendifferenzen zwischen zwei Vermessungen lassen sich zusätzlich jährliche Tiefenänderungen bestimmen.



**Abbildung 3-16: quasikonsistente Tiefenverteilung der Deutschen Bucht am 29.05.1989**

Neben der Ableitung von Tiefeninformationen zu einem Datum über die Fläche (Beispiel Deutsche Bucht zum 29.05.1989 in Abbildung 3-16) lassen sich auch an jedem Ort Zeitreihen der Tiefenentwicklung generieren, die ihrerseits für weitere Analysen zur Verfügung stehen. So kann beispielsweise an jedem Ort die maximale oder minimale Tiefe bestimmt werden. Die statistische und funktionalanalytische Auswertung dieser Zeitreihen ermöglicht die Ableitung einer Vielzahl von morphologischen Identifikatoren.

### 3.3.2.2 Digitales Bodenformmodell

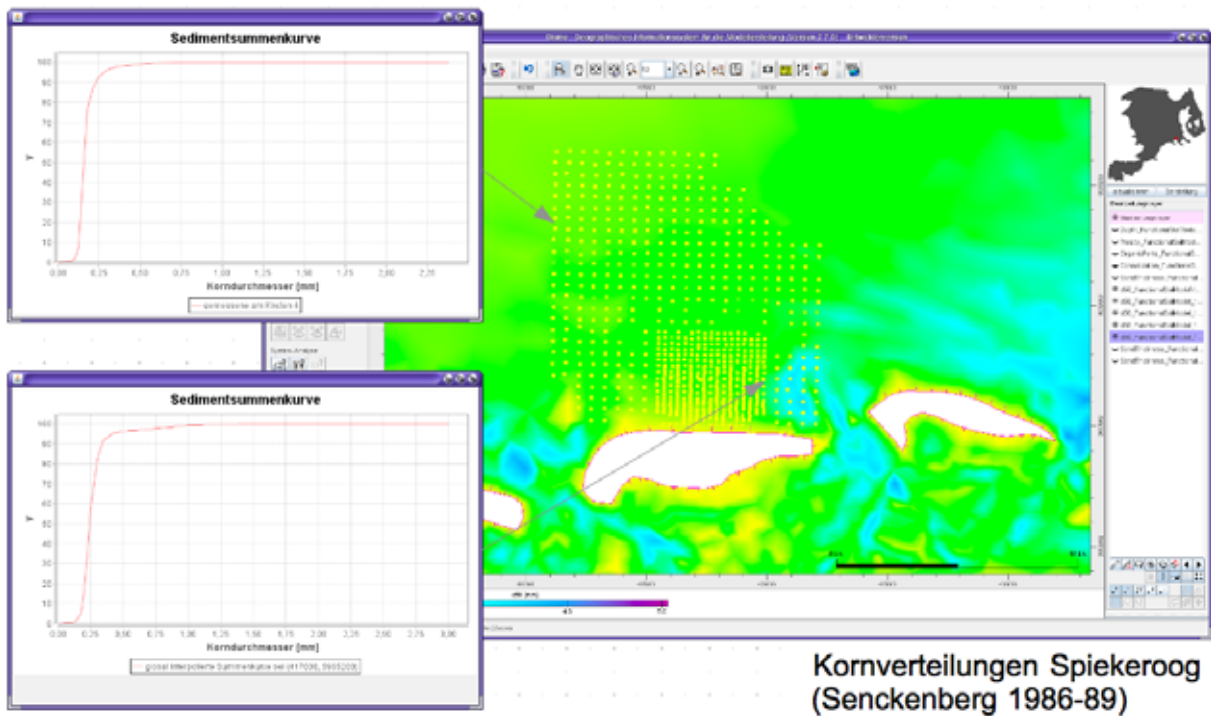
Die im Rahmen des Bodenmodells digitalisierten historischen Daten und auch die im Projekt semiautomatisch generierten digitalen Bodenformkarten lassen sich in das funktionale Bodenmodell integrieren. Die durch die Projektpartner in unterschiedlicher Form bereitge-

stellten Daten zu den Bodenformen werden mit spezifischen Metadaten ergänzt. Sowohl die räumliche als auch zeitliche Interpolation von Bodenformparametern erfordern weitergehende Untersuchungen und die Entwicklung geeigneter Methoden.

### **3.3.2.3 Digitale Sedimentologie**

Sowohl die wesentlich geringere örtliche aber auch zeitliche Datendichte und die unterschiedliche Struktur der sedimentologischen Daten erfordern die Entwicklung angepasster Interpolations- und Approximationsverfahren sowohl im Ort als auch in der Zeit. Die Mächtigkeit der mobilen Deckschicht (Sandmächtigkeit), die Porosität und der Anteil an organischem Material im Boden lassen sich als skalare Größen beschreiben und verwenden im Prinzip dieselben Interpolationsverfahren wie für die Lage des Bodens. Die Daten für diese Größen sind in der Regel sehr spärlich, so dass eine Triangulation und damit stückweise lineare Interpolation der Daten in der Regel nicht in Frage kommt. Das Zusammenführen aller verfügbaren Daten, in Verbindung mit einer Ausgleichapproximation, ermöglicht zunächst die Erstellung der stationären Bodenmodell-Layer für die Sandmächtigkeit, die Porosität und den organischen Anteil. Eine geeignete Interpolation mit zeitlich einzuordnenden einzelnen Messdaten muss noch entwickelt werden.

Korngrößenverteilungen werden im funktionalen Bodenmodell als Summenkurve entsprechend der verwendeten Korngrößenanalyse archiviert. Einzelne Messungen werden, wenn möglich, zu Messkampagnen zusammengefasst und mit einem repräsentativen Zeitstempel und Aussagebereich versehen. Entsprechend der dann verfügbaren Datendichte, können die Stützstellen trianguliert oder als netzfreie Stützstellen archiviert werden. Innerhalb einer Messkampagne können die Sedimentsummenkurven stückweise linear oder über umgekehrte Abstände interpoliert werden. Eine inverse Abstandsinterpolation ist beispielhaft in Abbildung 3-17 dargestellt.



**Abbildung 3-17: gemessene und interpolierte Summenkurve vor Spiekerooog**

### 3.3.3 Produkte des funktionalen Bodenmodells

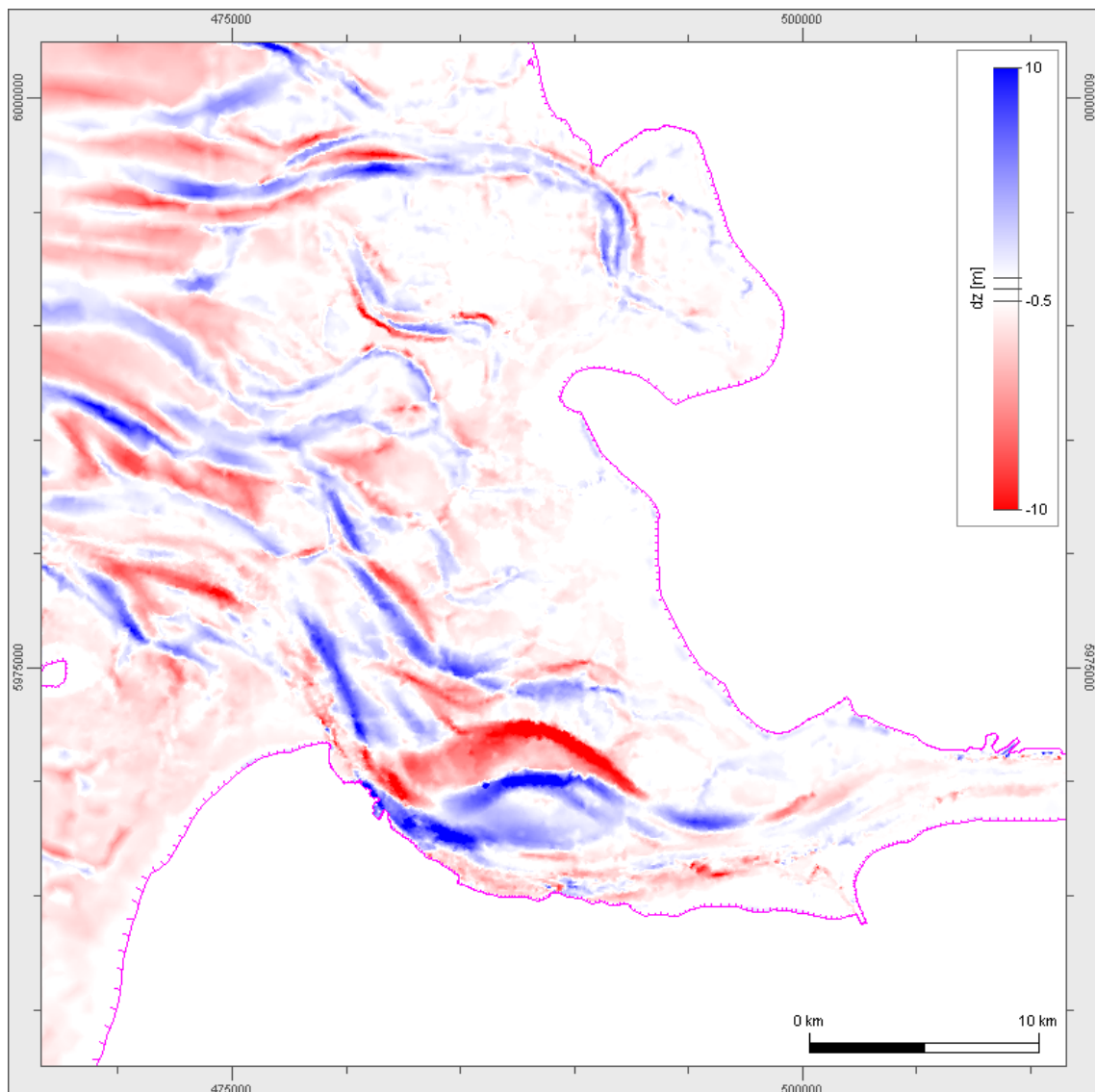
Die prototypische Implementierung des funktionalen Bodenmodells und auch die dafür notwendigen Daten werden bei smile consult gepflegt und weiterentwickelt. Die momentane Komplexität und der hohe Pflegeaufwand der Prototypen erlauben derzeit noch keine allgemeine Verfügbarkeit im Projekt. Die smile consult GmbH erstellt jedoch auf Anfrage der Projektpartner Produkte auf der Basis des funktionalen Bodenmodells.

Zu den wesentlichen Produkten für die Erstellung der Simulationsmodelle gehören:

- Initiale Bathymetrie
- Korngrößenverteilungen als IPDS\* -Dateien
- Formrauheiten der Gewässersohle
- Erosionstiefen

Die wesentlichen Produkte für die Modellvalidierung sind:

- zeitliche Verläufe der Bodenentwicklung
  - zeitliche Verläufe von Erosions- und Sedimentationsraten, vor allem aber auch bathymetrische Analysen über längere Zeiträume wie
    - Bilanzhöhen (Abbildung 3-18)
    - Morphologischer Raum
    - Morphologischer Drive
    - Statistische Kenngrößen



**Abbildung 3-18: Bilanzhöhe zwischen 1989 und 2009**

Die Festlegung weiterer Indikatoren und Kenngrößen erfolgt in enger Abstimmung mit den Entwicklern und Betreibern der numerischen Simulationsmodelle. Hierzu zählen beispielsweise hypsométrische Analysen sowohl der Vermessungsdaten als auch die Analyse der prognostizierten Veränderungen der Hypsometrien.

## 4 Ergebnisse des Bodenmodells

Im Folgenden werden Teilaspekte aus den jeweiligen repräsentativen Teilgebieten (Fokusgebiete) Schelf / Vorstrand, Watten und Ästuar exemplarisch aufgezeigt.

### 4.1 Schelf / Vorstrand

Die Lage der drei Transit-Rohrleitungen, die durch die deutsche AWZ in der Nordsee verlaufen (Europipe 1 und 2, Norpipe), werden seit ihrer Verlegung regelmäßig durch die Betreiber überwacht. In festgelegten Abschnitten (z.B. in den Verkehrstrennungsgebieten) erfolgt die Überwachung jährlich, ansonsten alle zwei bis acht Jahre. Unter anderem wird überprüft, ob die vorgeschriebene Sedimentüberdeckung eingehalten wird. Die vertikale Lage der Rohrleitungen im Sediment wird durch eine Kombination aus hydroakustischen und magnetischen Messverfahren erfasst. Die relative Genauigkeit der ermittelten Sedimentmächtigkeiten über den Rohrleitungen liegt bei diesem Verfahren bei  $\pm 20\text{cm}$ . Da die Rohrleitungen im Sediment nach einschlägiger Fachliteratur und bisherigen Erfahrungen als lagestabil anzusehen sind, geben Änderungen der Sedimentbedeckung Auskunft über die Sedimentdynamik.

Für den Tiefenbereich der Deutschen Bucht über 15 m wurden entlang der Europipe 1 und 2 an unterschiedlichen Abschnitten sog. Kilometer-Punkte (KP) Messergebnisse entlang von Querprofilen ausgewertet (Abbildung 4-1).

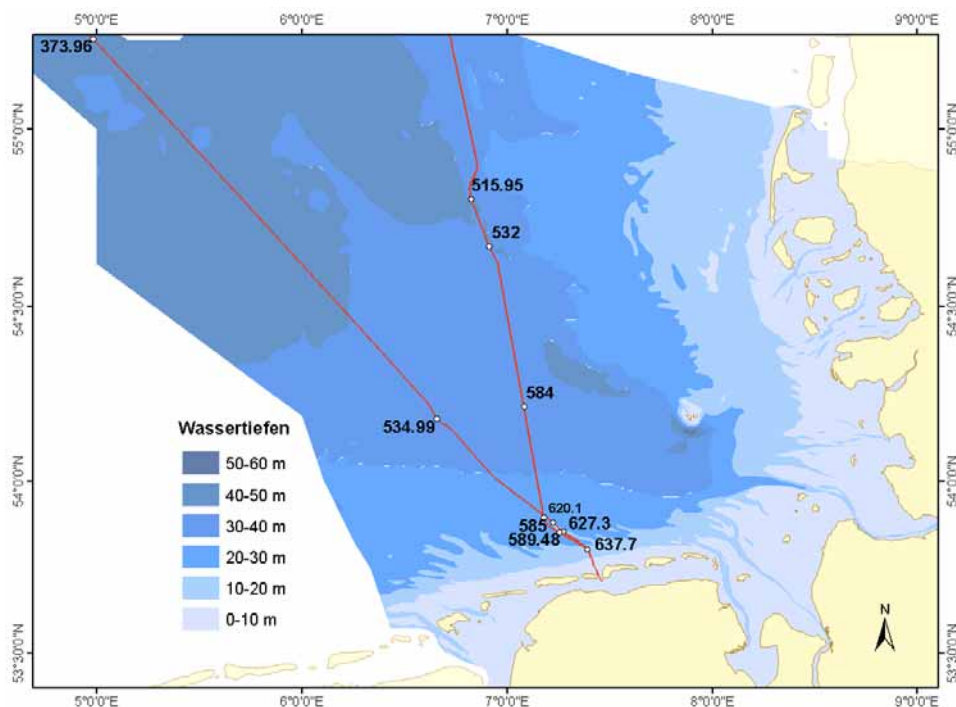
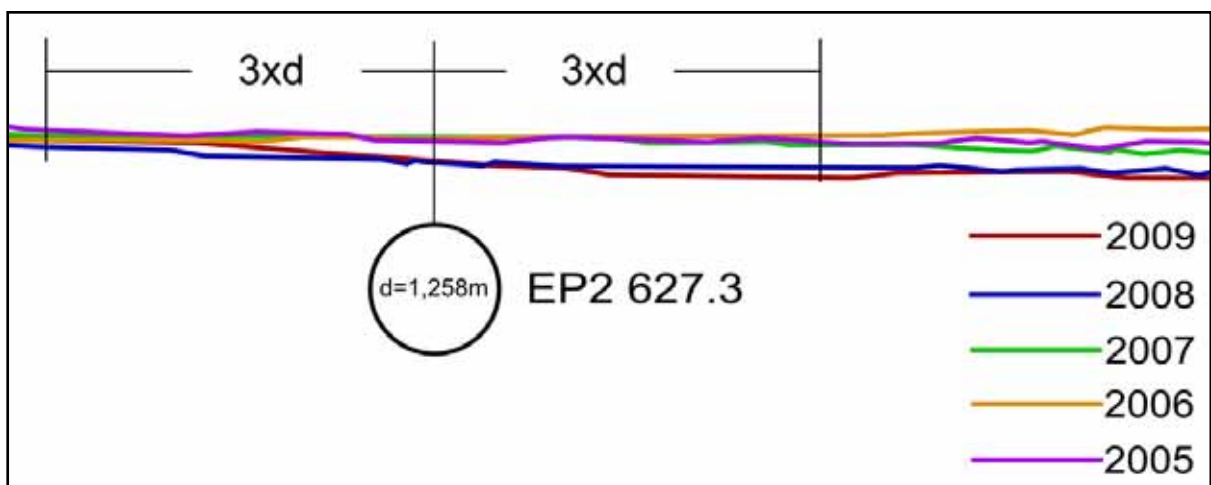


Abbildung 4-1: Lage der Kilometer-Punkte, an denen zur Untersuchung der Sedimentdynamik Querprofile ausgewertet wurden

Die Profile stellen die Rohrleitung im Querschnitt mit der jeweiligen Sedimentbedeckung dar. So konnten die Differenzen der Sedimentüberdeckung unterschiedlicher Zeitpunkte erfasst werden. Hierzu wurden die Querprofile gleicher KP verschiedener Jahrgänge grafisch übereinandergelegt, unter Verwendung des Rohrdurchmessers als Lage- und Maßstabsreferenz. Die Differenzen wurden an drei Punkten im Profil gemessen: Direkt über der Rohrleitung und im Abstand von drei Rohrdurchmessern zu beiden Seiten hin.

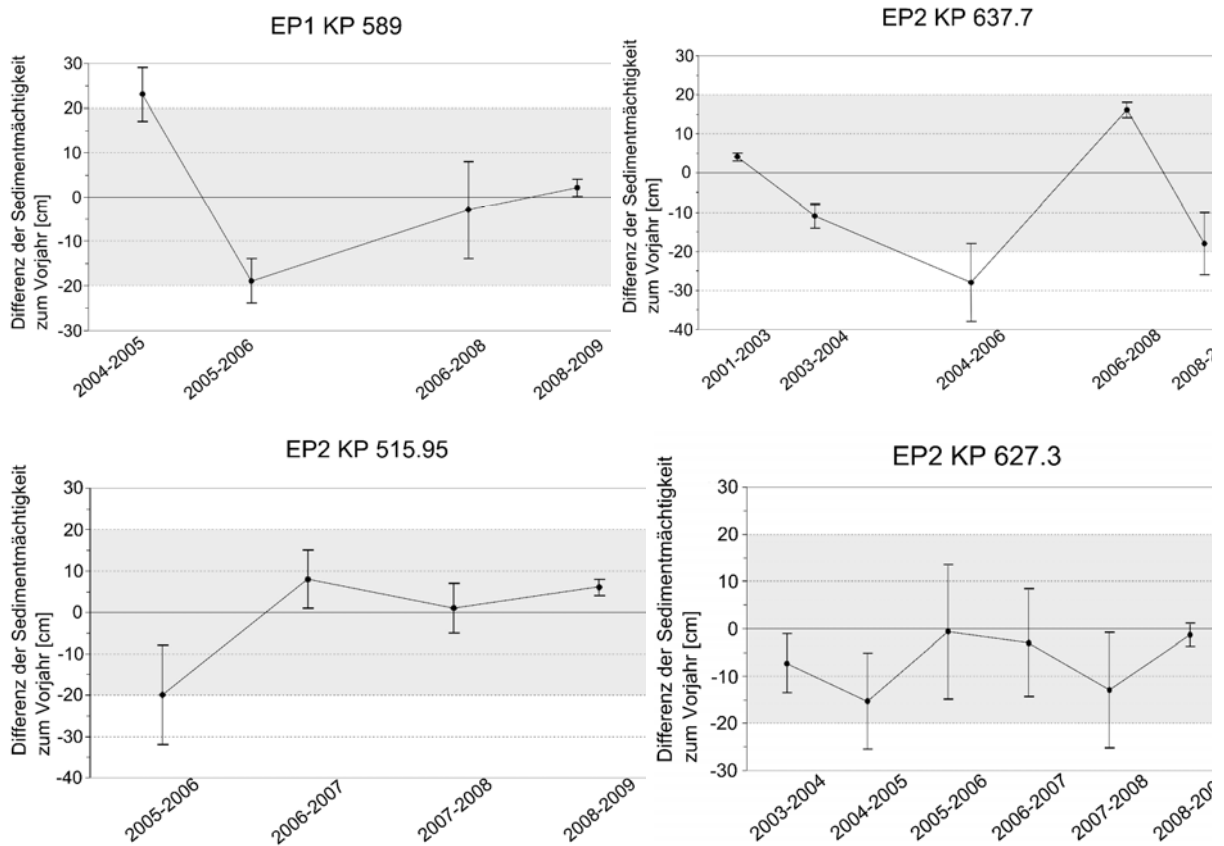
Abbildung 4-2 gibt ein Beispiel zur Auswertung der Querprofile der Jahre 2005 - 2009 für KP 627.3 (Europipe 2). Der Rohrlungsdurchmesser ( $d=1,258$  m) dient als Maßstabsreferenz zur Ermittlung von Änderungen der Sedimentauflage.



**Abbildung 4-2: Querprofilanalyse der Jahre 2005-09 für KP 627.3 (Europipe 2)**

Abbildung 4-3 zeigt exemplarisch die Ergebnisse an vier KP für Rohrleitung Europipe 1 und 2. Ähnliche Ergebnisse ergaben sich für alle zehn untersuchten Abschnitte im Tiefenbereich über 15 m. Die ermittelten Differenzen liegen an allen Messpunkten überwiegend im Bereich der Messungenauigkeit von  $\pm 20$  cm, d. h. unter einem halben Meter.





**Abbildung 4-3: Änderungen der Sedimentmächtigkeiten über den Rohrleitungen Europipe 1 und 2 im Tiefenbereich >15 m an vier KP**

Vom äußeren zum inneren Schelf vor den Ostfriesischen Inseln wechselnd, bilden sogenannte Zungenriffe, die für diesen Küstenraum typischen morphologischen Elemente. Die Zungenriffe streichen in Nord-West – Süd-Ost Richtung und prägen die Morphologie des Küstenvorfeldes entlang der Ostfriesischen Inseln (siehe Tiefenlinie -20 m in Abbildung 4-4). Sie wurden bereits mehrfach untersucht (z.B. Chowdhuri & Reineck, 1987; Antia, 1993; Flemming & Davies, 1994; Son, 2009), aber die Entstehung dieser Sedimentkörper bis zu 20 km Länge ist bis heute nicht vollständig geklärt. Die kleinskaligeren Systeme bis zu einigen Kilometern Länge im flacheren Küstenvorfeld zeigen starke, lokale Bewegungen in West-Ost-Richtung, sind aber über lange Zeit insgesamt lagestabil (Antia et al., 1994). Das aktuelle Messgebiet umfasst beide morphologischen Einheiten. In Abbildung 4-5 ist a) die Sedimentverteilung auf der Basis von SSS<sup>\*</sup> und MBES<sup>\*</sup> Daten (aufgenommen im März 2010), b) 3-D-Blick aus südöstlicher Richtung und c) nordöstlicher Richtung auf das Messgebiet (beide 100-fach überhöht) dargestellt.

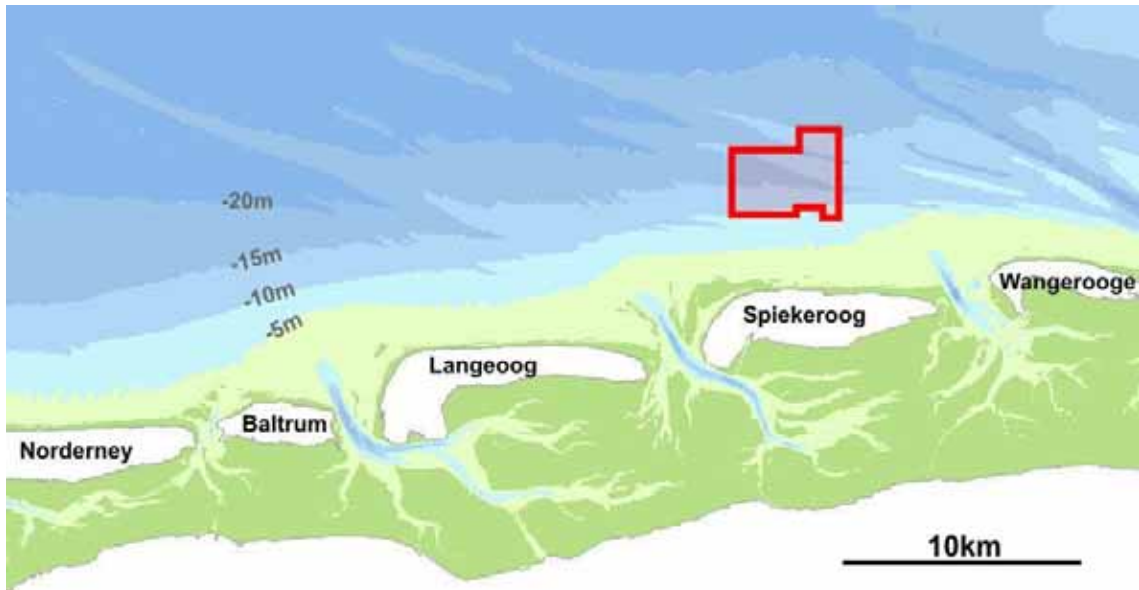


Abbildung 4-4: Untersuchungsgebiet im Küstenvorfeld von der Insel Spiekeroog

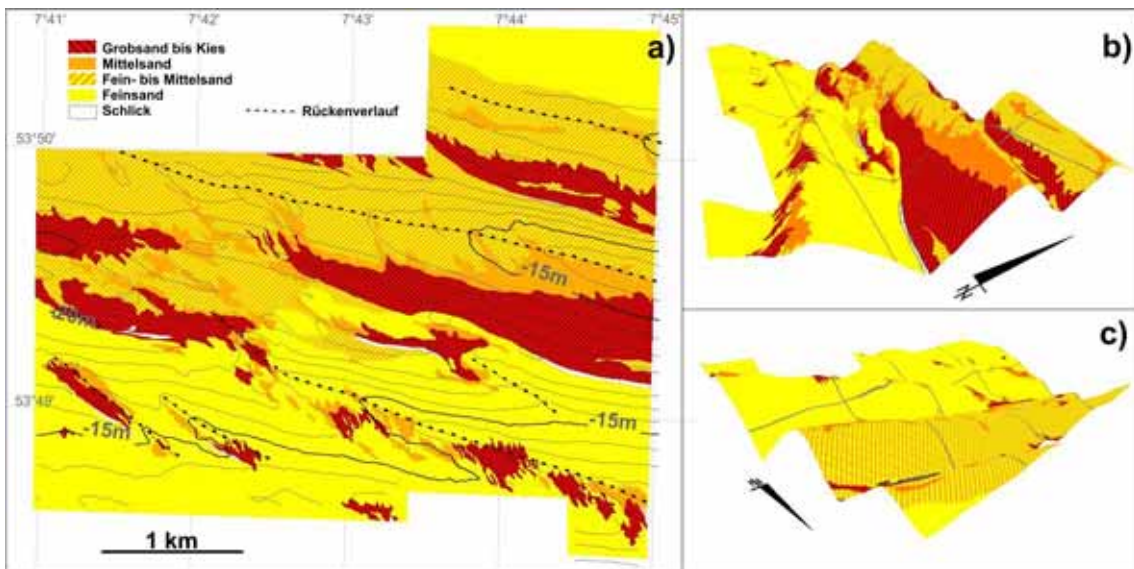
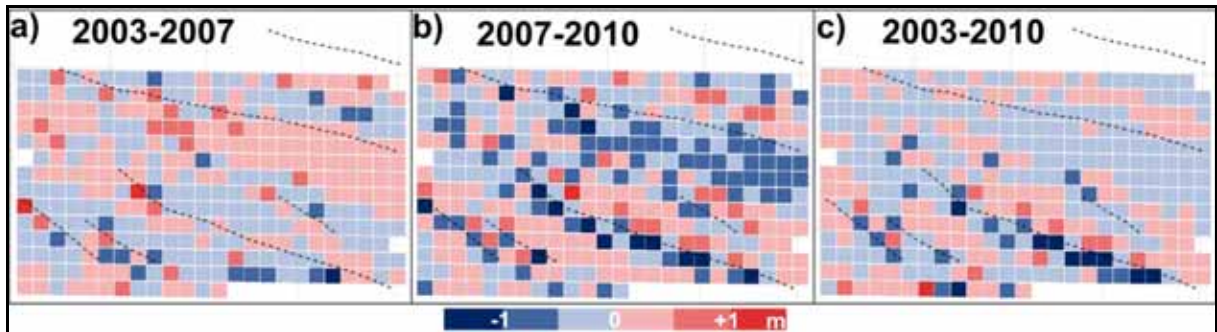


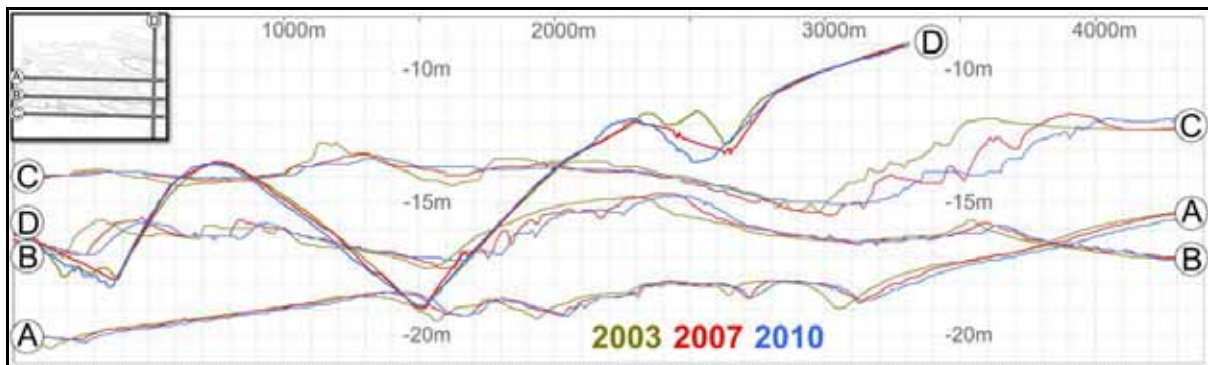
Abbildung 4-5: a) Sedimentverteilung auf der Basis von SSS und MBES-Daten b) 3-D-Blick aus Richtung SO und c) 3-D-Blick aus Richtung NO

Die Ergebnisse aus den interpretierten SSS-Daten und den Bodenproben zeigen ein sehr komplexes Verteilungsmuster der Oberflächensedimente. Die mehr landwärts, südlich liegenden Zungenriffe bestehen aus groben Sanden und feinen Kiesen. Die mehr seewärts, nordwärts liegenden Zungenriffe dagegen sind deutlich feiner. Sie bestehen aus fein- bis mittelkörnigen Sanden. Ähnlich verteilte Sedimente wurden bereits von *Antia* (1993) beobachtet. Darüber hinaus wurden in den Trögen immer wieder lokal Schlickablagerungen beobachtet, die aufgrund hydraulischer Senken in Abhängigkeit von der Wassertiefe sedimentieren können.



**Abbildung 4-6: Differenzkarte der Tiefenänderungen zwischen a) 2003-2007; b) 2007-2010; c) 2003-2010. Die Sandrücken stammen aus den Daten von 2010**

Für die Änderung der Wassertiefen wurden hochaufgelöste MBES-Messungen aus den Jahren 2003 und 2007 (Son, 2009) mit den Neuaufnahmen vom März 2010 verglichen. Dabei zeigt sich eine deutliche Erosion zwischen 2003 und 2010 (Abbildung 4-5 b). Die geringe südostwärtige Verlagerung innerhalb dieser sieben Jahre zeigt eine geringe Dynamik in den nördlichen Sandriffen. In der gleichen Zeit wandern die südlichen Sandriffe bis zu 300 m. (Abbildung 4-7).

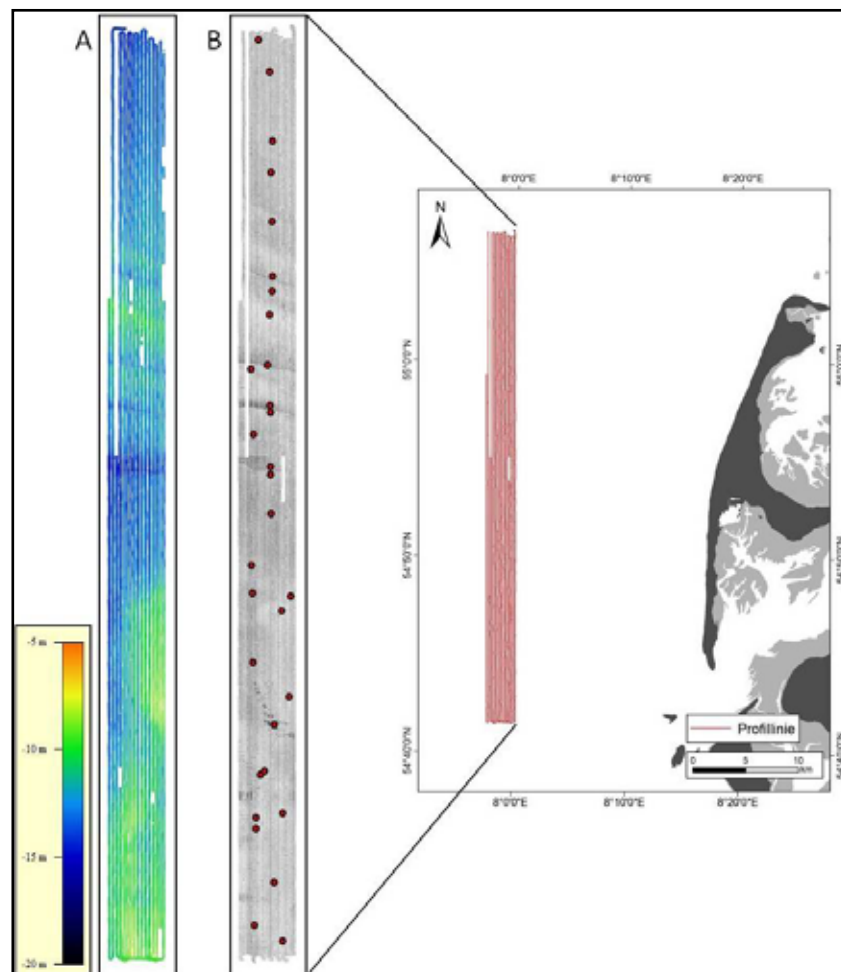


**Abbildung 4-7: Vergleich von vier Querprofilen aus hochpräzisen MBES-Messungen aus den Jahren 2003, 2007 und März 2010**

Basierend auf dem derzeitigen Erkenntnisstand sind die Zungenriffe in Abhängigkeit von ihrer Lage unterschiedlich stabil. Die sehr stabilen nördlichen Zungenriffe sind stark an den geologischen Untergrund gebunden. Die Wanderung der südlichen Sandriffe ist nicht einfach zu erklären. Vermutlich liegt der Grund in der östlichen Verlagerung eines Küstenlängstransports, dessen Genese nicht eindeutig geklärt ist. Während der Niedrigenergiebedingungen mit Fließgeschwindigkeiten von weniger als 0,45 m/s wird kaum Sediment bewegt, vermutlich sind es nur die Hochenergiephasen, hier fehlen jedoch noch entsprechende Daten. Weitere hydroakustische Messungen werden benötigt, um die Aussage zu stützen, dass ausschließlich Hochenergieereignisse eine Sedimentremobilisierung auslösen können.

Im Vergleich zum Ostfriesischen Schelf lassen sich im Bereich des Nordfriesischen Schelfs andere, aber ebenfalls für den Küstenraum typische Sohlausprägungen finden. Im Seegebiet 20 km westlich von Sylt wurde im bisherigen Zeitraum eine Fläche von 134,9 km<sup>2</sup>

flächendeckend hydroakustisch kartiert, durch Sedimentbeprobungen kalibriert und bathymetrisch vermessen. Die SSS\* Aufnahmen kombiniert mit Ergebnissen der Sedimentanalysen spiegeln eine aus Fein- bis Grobsanden aufgebaute Sedimentoberfläche wider (Abbildung 4-8). Silt sowie organische Partikel treten nur in sehr geringen Anteilen auf. In den SSS\* Aufnahmen werden die Feinsande durch geringe Rückstreuwerte (hellgrau) repräsentiert, während eine hohe akustische Rückstreuung (dunklere Grautöne) hier gröberes Material anzeigt. Insgesamt lassen sich unterschiedliche Sedimenttypen ausweisen, die durch plötzliche Wechsel in der Rückstreuung des akustischen Signals und sehr scharfe, sedimentologische Grenzen geprägt sind.



**Abbildung 4-8: Das in 2010 kartierte Gebiet westlich von Sylt. A: Morphologie aus MBES-Daten, B: SSS Mosaik sowie Sedimententnahmepositionen**

Die erhobenen MBES – Daten wurden mittels des Pegels „Westerland“ beschickt. Es treten unterschiedliche Sohlformen auf (Abbildung 4-8). In erster Linie sind dies sog. „sorted bedforms“ – in älterer Literatur auch „rippled scour depressions“ genannt (Cacchione, 1984, Goff, 2005), die Flächen von ca. 10 – 600 m Länge in Nord-Süd-Richtung und ca. 90 – 1450 m Breite in Ost-West-Richtung einnehmen. Sorted bedforms sind Bodenformen, die durch Turbulenzen in der Wassersäule erzeugt werden. Diese Turbulenzen sorgen für eine lokale

Vertiefung des Meeresbodens und für eine Sedimentsortierung, die sich durch scharfe Grenzen in der Sedimentverteilung sowie gröberem Material innerhalb der sorted bedform und feinerem Material außerhalb der sorted bedform darstellen (Goff, 2005). Neben den sorted bedforms\* kommen auch größere Bodenformen vor, die als Sandwellen gedeutet werden können (Allen, 1980, Ashley, 1990). Diese Sandwellen erstrecken sich über ca. 1.600 – 4.500 m Länge in Nord-Süd-Richtung und > 3.000 m Breite in Ost-West-Richtung. Im nördlichen Gebietsabschnitt lassen sich vier Sandwellen mit Kammabständen von 2.500 – 3.000 m ausweisen. Formparameter der Sandwellen (Ashley, 1990) sind in Tabelle 4-1 aufgeführt.

Ihre überwiegend asymmetrische Form lässt eine nordwärts gerichtete Verlagerungsrichtung vermuten. Innerhalb der Sandwellen lassen sich Stufen und Kanten von ca. 170 – 360 m Länge in Nord-Süd-Richtung und 0,4 - 1,0 m Höhe beobachten, die sich durch unterschiedliche Neigungsgradienten voneinander abheben. Dies kann darauf hindeuten, dass die Sandwellen durch verschiedene Prozesse geformt wurden. Die Sedimentoberfläche der Sandwellen ist fein- bis mittelsandig ausgebildet, während Restsedimente, bestehend aus Grobsand in den sie voneinander abgrenzenden Tälern lagern. Inwieweit diese Restsedimente die Sandwellen flächig unterlagern, konnte bisher nicht geklärt werden. Die Sandwellen selbst sind aus mobilen Sedimenten aufgebaut.

Der südliche Gebietsabschnitt liegt 3 bis 4 m höher als der Nördliche. Sorted bedforms\* sind vorwiegend im südlichen Gebietsabschnitt vorzufinden. Die größten und markantesten treten auf einer Art Plateau auf, das sich 2 m vom umliegenden Meeresboden abhebt. Alle sorted bedforms sind in Ost-West Richtung ausgerichtet. Sie sind regelmäßig verteilt, liegen mit Abständen zwischen 50 – 400 m parallel zueinander und bilden auf diese Weise Felder in der Größenordnung bis zu 7 x 2,3 km aus. Diese sorted bedforms\* heben sich durch sehr scharfe Grenzen vom umgebenden Sediment ab und liegen 0,2 bis 0,7 m tiefer als die umgebende Gewässersohle. Sie bestehen aus Grobsand oder grobem Grobsand, während die umliegende Gewässersohle aus Feinsanden aufgebaut ist.

**Tabelle 4-1: Formparameter der westlich von Sylt auftretenden Sandwellen**

	Sandwelle 1	Sandwelle 2	Sandwelle 3	Sandwelle 4
Höhe (H) in m	2,3	1,7	2,6	1,3
Länge (L) in m	3000	2100	4500	1600
Steilheit (H/L)	1: 1300	1: 1230	1: 1730	1: 1230

Anhand der Sohlformen und der Sedimentverteilung lässt sich eine Mächtigkeit der mobilen holozänen Deckschicht zwischen 0,2 bis 2,5 m ableiten.

Ein Datenvergleich mit älteren Kartierungen lässt im Seegebiet westlich von Sylt sowohl Dynamik als auch Stabilität erkennen. Im nördlichen Teil, wo heute aus Feinsand aufgebaute

Sandwellen dominieren, sind in der BSH-Karte Nr. 2900 (Figge, 1981) zwei aus Mittel- bis Grobsand aufgebaute, sich Ost-West erstreckende Bänder eingezeichnet. Es ist zu vermuten, dass diese Bänder sehr stark vom pleistozänen Untergrund geprägt sind. Hingegen entfallen die heute aus Grobsand aufgebauten Täler auf Flächen, die in der BSH-Karte Nr. 2900 als Feinsandflächen ausgewiesen sind. Hieraus lässt sich eine Mobilität der Sandwellen ableiten, die auch schon Kösters (Kösters, 1979) beobachtet hat.

Auf dem oben beschriebenen Plateau im südlichen Gebietsabschnitt befindet sich laut BSH-Karte Nr. 2900 ein Vorkommen sandig kiesiger Sedimente, die heute jedoch als sorted bedforms\* interpretiert werden. Das Plateau sowie ein südlich davon gelegenes Feld von sorted bedforms sind in ihrer Position, Form und Größe heute auffällig gleich dem Vorkommen von Mittel- bis Grobsanden, wie sie in der BSH-Karte Nr. 2900 dokumentiert sind. Es ist zu vermuten, dass bei der BSH-Karte Nr. 2900 der zwischen den Sohlformen lagernde Fein – Mittelsand durch die punktuellen Sedimentproben nicht erfasst oder aufgrund der Interpolationsmethode übergangen wurde.

Während früher Einzelpunktinformationen über die Fläche interpoliert werden mussten, wobei die Güte der Interpolation von der Dichte der Messpunkte abhing, liegen heute flächendeckende, hochauflösende und positionsgenaue Informationen vor. Diese lückenlose und präzise Kartierungsmethode ermöglicht es, bestehende Sedimentkarten der Nordsee zu aktualisieren und aufgrund der hohen Auflösung weiter zu ergänzen. Daraus ergeben sich neue Ansätze zur Analyse und Interpretation, die mittels Modellierung weitergeführt werden können.

## 4.2 Wattenmeer

Vermessungsdaten der Rohrleitungsüberwachungen lassen sich auch zur Beschreibung morphologischer Abläufe in Teilbereichen des Ostfriesischen Wattenmeers heranziehen. Die Rohrleitungen der Europipe 1 und 2 verlaufen ab einer Wassertiefe von weniger als 15 m nebeneinander (Abstand 5 – 10 m) und durchqueren das Seegatt „Accumer Ee“ zwischen Baltrum und Langeoog. Für diese Rohrleitungsabschnitte existieren Tabellen, in denen Sedimentüberdeckung und Mächtigkeitsdifferenzen zum jeweiligen Vorjahr eingetragen sind. Die Differenzen geben Auskunft darüber, ob sedimentierende, erodierende oder unveränderte Bedingungen der Sedimentdynamik im Verlauf eines Jahres vorherrschten.

In Abbildung 4-9 ist exemplarisch der Rohrleitungsverlauf der Europipe 2 im morphologischen Kontext dargestellt (linke Grafik) sowie Differenzen der Überdeckungshöhen in den Jahren 2001, 2004, 2006 – 2009 (rechte Grafik). Alle farbigen Punkte zeigen an, dass hier messbare Veränderungen vorliegen.

Die größte Dynamik ist im Bereich der Hauptstromrinne zwischen den beiden Inseln und des Riffbogens des Seegatts zu erkennen, wobei mit Ausnahme des Jahres 2001 im Wesentlichen Sedimentation überwiegt. Es werden Akkumulationen über 2,10 m pro Jahr (vorwie-

gend im Jahr 2007) erreicht. Abtrag ist seit 2004 vor allem im nördlichen Abschnitt der Hauptstromrinne, zwischen der 15 m und 10 m Tiefenlinie, und stellenweise innerhalb des Riffbogens erkennbar, und erreicht Werte bis -1,90 m pro Jahr. Im Jahr 2001 herrscht über den gesamten Rohrleitungsabschnitt Erosion vor, mit einer Häufung im tiefsten Rinnenbereich und einem Maximalwert von mehr als 2m pro Jahr.

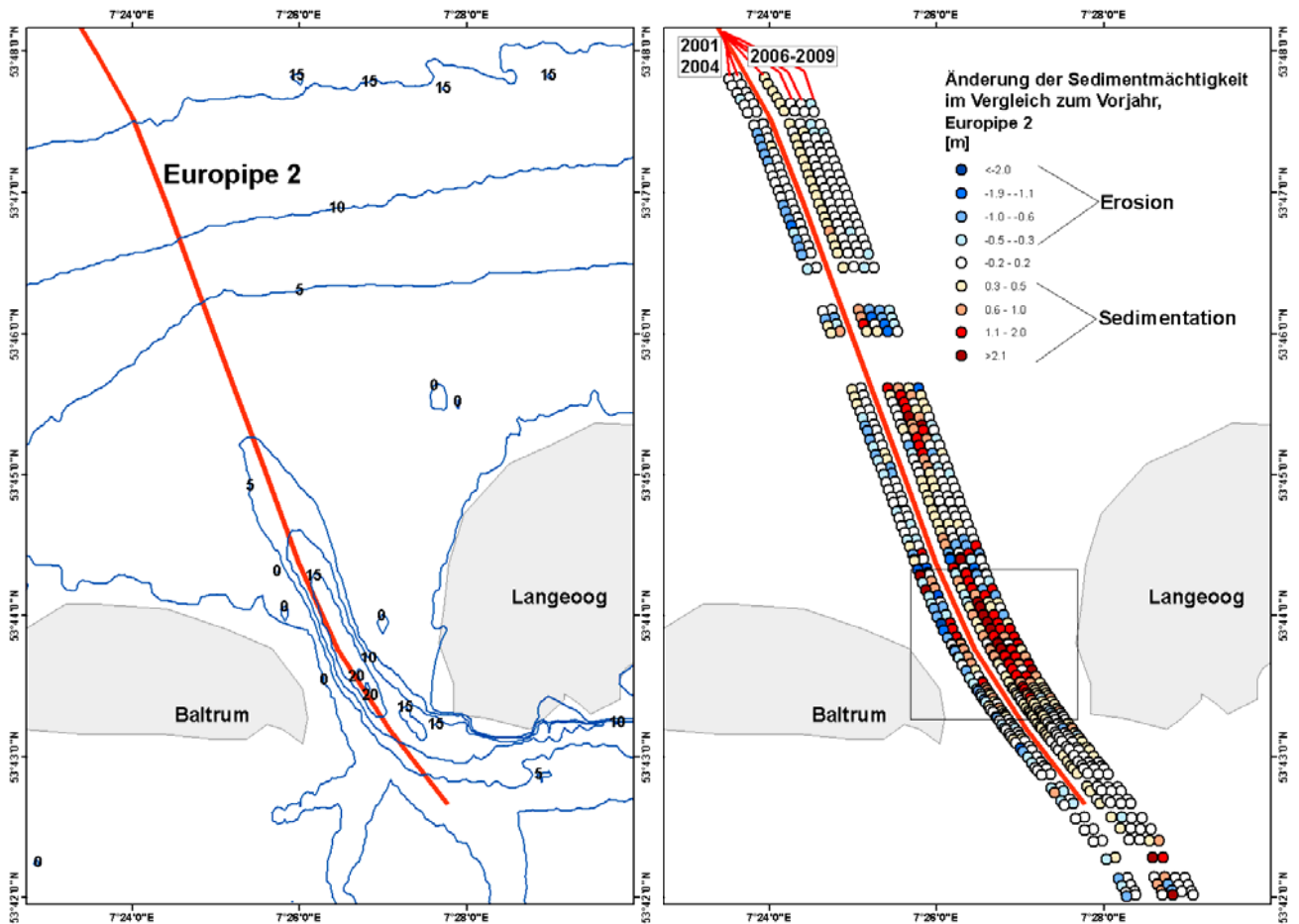


Abbildung 4-9: Verlauf der Europipe 2 durch das Seegatt Accumer Ee mit grafischer Auswertung der Differenzen der Sedimentmächtigkeiten

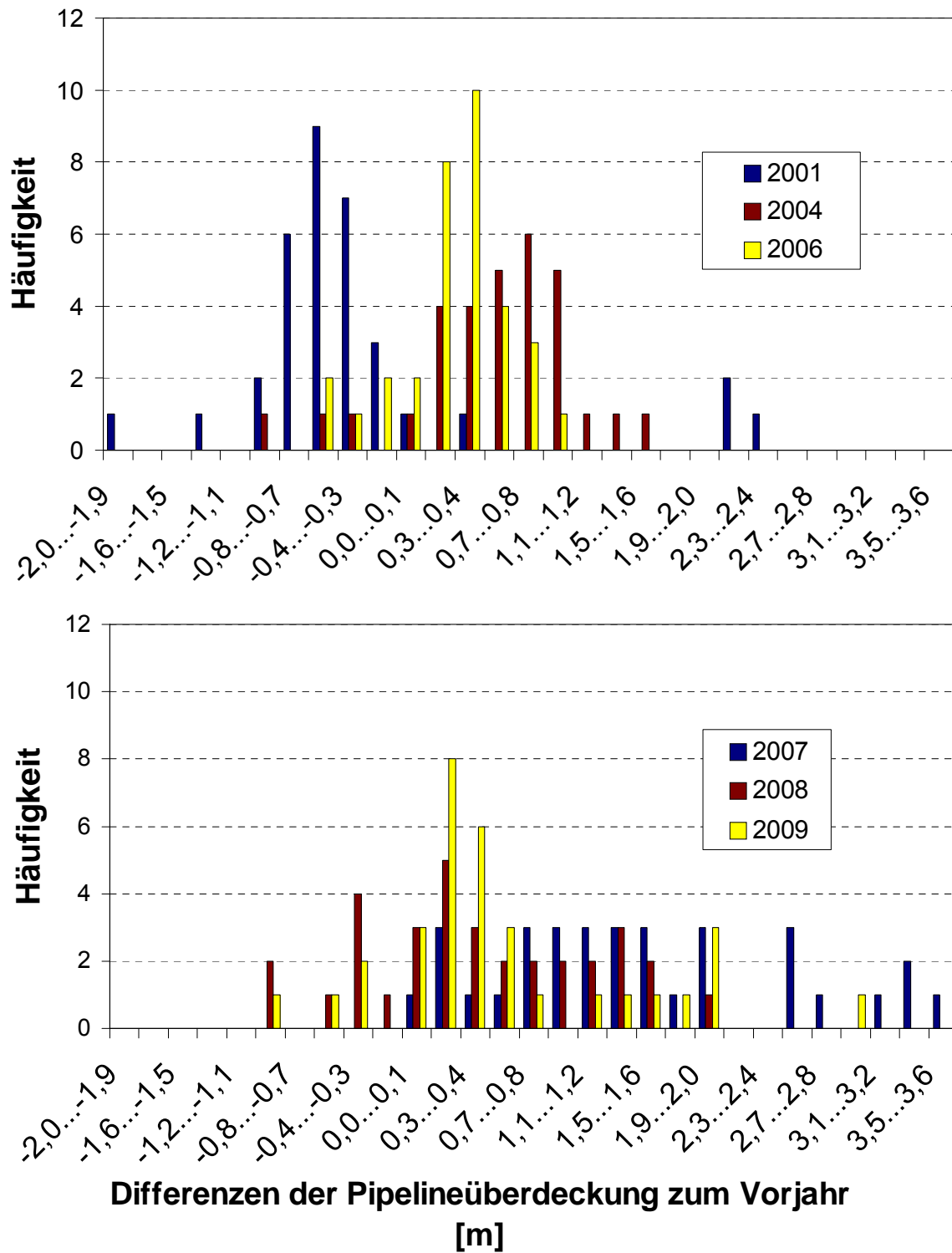


Abbildung 4-10: Histogramme der Differenzen (jahresweise) der Sedimentüberdeckung über der Rohrleitung Europipe 2



Abbildung 4-10 zeigt Histogramme über Sedimentumlagerungen des Europepe 2 Abschnitts zwischen den Inseln Baltrum und Langeoog (Lage der Datenpunkte vergleiche Abbildung 4-9 rechts: schwarzes Rechteck). Die Jahre 2001, 2004 und 2006 zeigen eine Verteilung mit einem deutlichen Maximum, wobei das Maximum im Jahr 2001 im erosiven Bereich liegt, ab 2004 herrscht dagegen Sedimentation vor. 2007 und 2008 weisen die Daten plötzlich eine breitere Streuung auf. Im Jahr 2007 werden die höchsten Sedimentationswerte bis zu 3,60 m erreicht. Im Jahr 2009 bildet sich ein weiteres Maximum aus, welches im selben Wertebereich wie 2006 liegt (0,3 – 0,4 m pro Jahr).

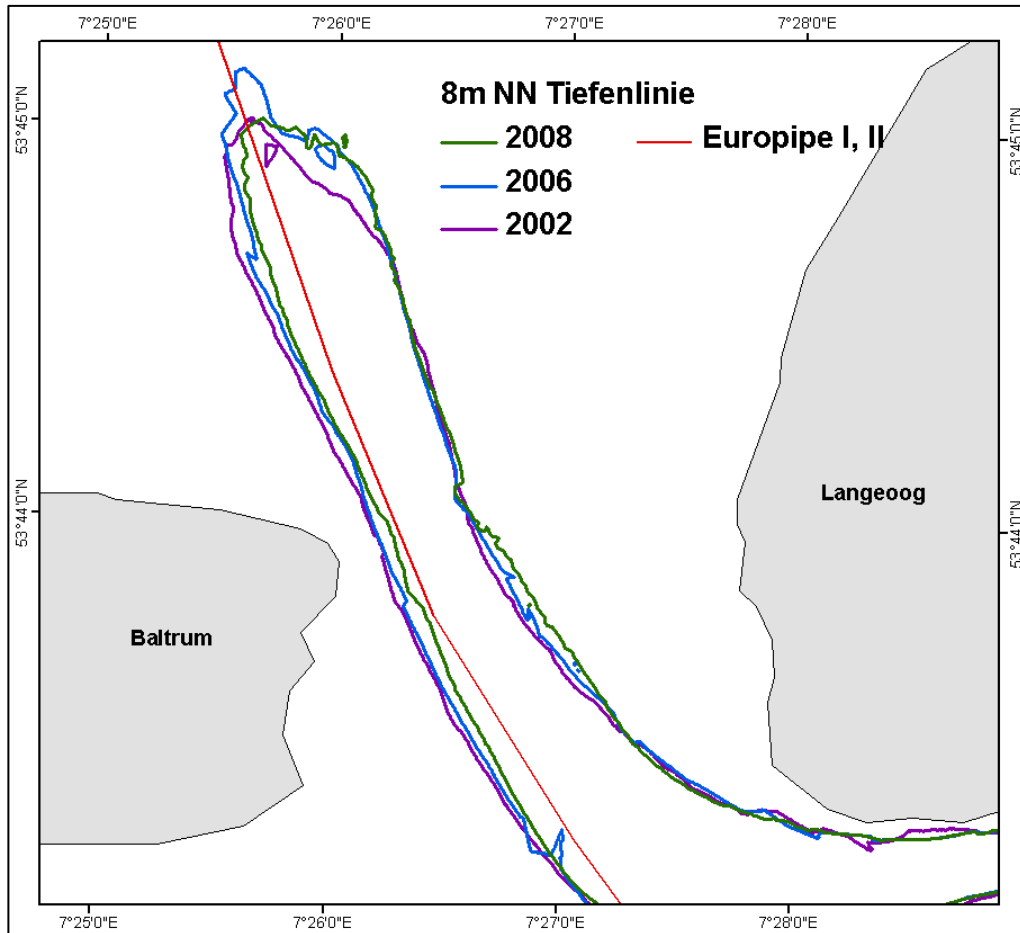
Um eine Erklärung für die Auffälligkeiten in der linienhaften Datenverteilung zu finden, wurden flächenhafte Vermessungsdaten von 1983 bis 2008 betrachtet und Ergebnisse aus der Fachliteratur einbezogen. Da nicht für jedes Jahr Vermessungsdaten über den gesamten Bereich der Accumer Ee vorhanden sind, wurden raum-zeitliche Interpolationen aus dem funktionalen Bodenmodell verwendet.

Das Seegatt Accumer Ee stellt eine morphologische Besonderheit dar. Die Hauptstromrinne galt lange als besonders lagestabil. Dies wird zum einen durch anstehenden Lauenburger Ton, der schwer erodierbar ist, begründet (*Barckhausen, 1970*) und zum anderen durch das Größenverhältnis des südwestlichen zum südöstlichen Wattgebiet (*Lüders, 1972*). Der nördliche Rinnenausläufer liegt im Vergleich zu benachbarten Seegatten relativ weit im Westen. Diese Form wird dadurch erklärt, dass das östliche Wateinzugsgebiet größer ist als das westliche, was zu einem stärkeren Stromarbeitsvermögen in nordwestliche Richtung führt und somit dem Wellengang aus westlicher Richtung entgegenwirkt (*Ladage, 2002*).

Anhand der Analyse der Vermessungsdaten lässt sich eine über den betrachteten Zeitraum kontinuierliche Ostverlagerung der Hauptstromrinne erkennen (Abbildung 4-11, Abbildung 4-8). Außerdem vertiefte sich das Seegatt seit Mitte der 1980er Jahre um 5 bis 10 m, sodass die maximale Rinnentiefe heute über 25 m NN erreicht. Diese Entwicklung resultiert nach *Ladage (2002)* aus Rinnenverlagerungen im östlichen Wateinzugsgebiet und dessen Vergrößerung, welche zu einem höheren Stromarbeitsvermögen führte.

Da die Europepe 2 entlang der Westflanke des Seegatts verläuft (Abbildung 4-9, ) kann die in den Daten seit 2004 ersichtliche Sedimentation im Bereich der Hauptstromrinne auf die Ostverlagerung zurückgeführt werden. 2001 herrschte Erosion vor, da die Rohrleitung noch im Bereich der Rinnensohle verlief, die sich vertiefte. Im Datensatz 2004 hingegen war die Westflanke des Seegatts bereits so weit nach Osten vorgedrungen, dass sie die Europepe 2 erreichte und seitdem zu Sedimentation führte. Die Ursache für die breite Streuung in den Histogrammen 2007 und 2008 kann in den Sturmfluten von November 2006 und 2007 zu finden sein. Das Sturmtief „Britta“ (1.11.2006) löste eine schwere bis sehr schwere Sturmflut aus, die im Bereich der ostfriesischen Inseln Dünenabbrüche verursachte (Deutsche Rückversicherung AG, 2006). Da sie während der Flut eintraf führte sie zeitweise zu einer Umkehr ebbdominanter zu flutdominanten Bedingungen (*Bartholomä, 2009*). Dieses Extremereignis brachte die sedimentdynamischen Bedingungen der Accumer Ee aus dem Gleichgewicht, welches 2009 wieder hergestellt wurde. Daher zeigen die Histogramme 2006 und 2009 ein ähnliches Bild (Abbildung 4-10). Ob der Datensatz von 2008 Auswirkungen von

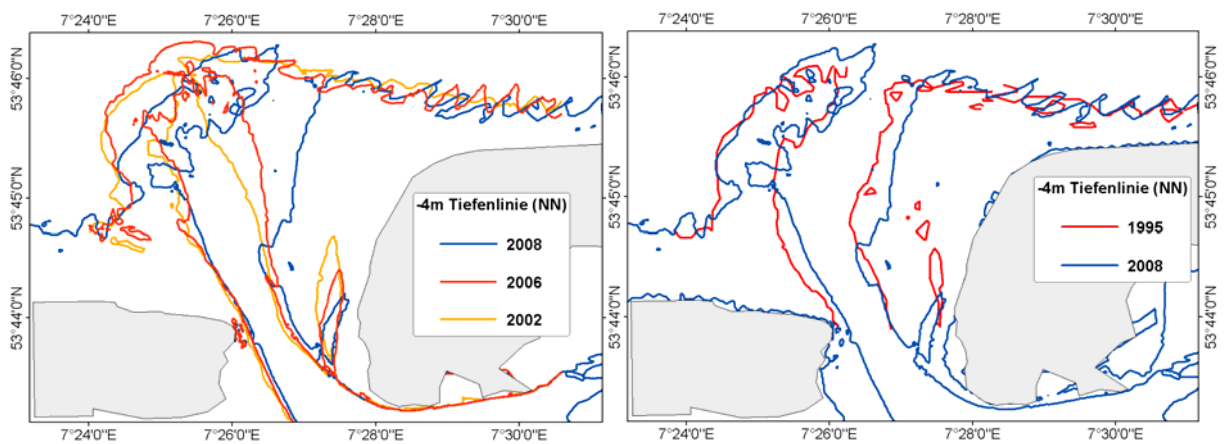
Sturmtief „Tilo“ (9.11.2007) zeigt, oder noch auf die Störung vom Vorjahr zurückzuführen ist, lässt sich nicht feststellen.



**Abbildung 4-11: Morphologische Veränderung der Hauptstromrinne der Accumer Ee anhand der –8m- Linie (NN). Ergänzung der BSH-Vermessungsdaten 2008**

Die Auswirkungen der Sturmfluten sind auch am Riffbogen erkennbar (Abbildung 4-12, *Ladage, 2002* - Ergänzung der BSH-Vermessungsdaten 2008). Während sich dieser nach 1995 in nordwestliche Richtung ausweitete und an Volumen zunahm, verschob er sich 2008 südostwärts und verlor an Volumen. Die nördliche Hauptstromrinne zeigt im Verlauf 2008 ebenfalls einen Knick nach Osten. Die Platen vor Baltrum wurden durch die welleninduzierten Strömungen schlagartig in Richtung Langeoog verlagert. Nach *Streif (1990)* stellt eine Südverlagerung und Erniedrigung des Riffbogens eine typische Reaktion auf Sturmereignisse dar. Dabei erscheint der Verlauf der –4 m-Linie (NN) nahezu deckungsgleich mit dem Zustand von 1995. Hier begründet *Ladage (2002)* den verarmten Riffbogen durch das Ausbleiben neuer Platingruppen aus westlicher Richtung seit 1988. Für das Jahr 2008 ist das jedoch auszuschließen, da der Datensatz von 2006, d. h. vor den Sturmfluten,

einen gut ausgeprägten Riffbogen aufweist. Die Darstellung der Tiefen-Differenzen 2008 - 2006 (Abbildung 4-13) verdeutlicht die plötzliche, extreme Änderung der Platenausbildung. Die Punktwerte von 2007 in Abbildung 4-9. zeigen, dass zwischen 53°45'N und 53°46'N ungewöhnlich viel Sediment abgelagert wurde. Dies kann mit der Wanderung der Platen über die Rohrleitung begründet werden und bestärkt die Annahme, dass sich die enormen morphologischen Veränderungen im Bereich des Riffbogens auf das Sturmereignis Ende 2006 zurückzuführen sind.



**Abbildung 4-12: Morphologische Änderungen des Riffbogens der Accumer Ee anhand der -4 m Tiefenlinie (NN)**

Zur Plausibilisierung der Rohrleitungsüberwachungsdaten und der interpolierten flächenhaften Vermessungsdaten wurden übereinstimmende Jahre gesucht, in denen in beiden Fällen Vermessungen stattfanden (2006 und 2008) und Differenzen gebildet. Diese sind in Abbildung 4-13 dargestellt. Auffallend ist, dass die Wertebereiche sehr gut übereinstimmen. Da die beiden Datensätze anhand voneinander unabhängiger Methoden erhoben wurden, bestätigen die Daten aus den Rohrleitungsberichten zumindest linienhaft die Sedimentations-Erosions-Bilanzen aus den jährlichen Vermessungen und stellen damit eine in **AufMod** nutzbare Möglichkeit zur lokalen Plausibilitätsprüfung dar.

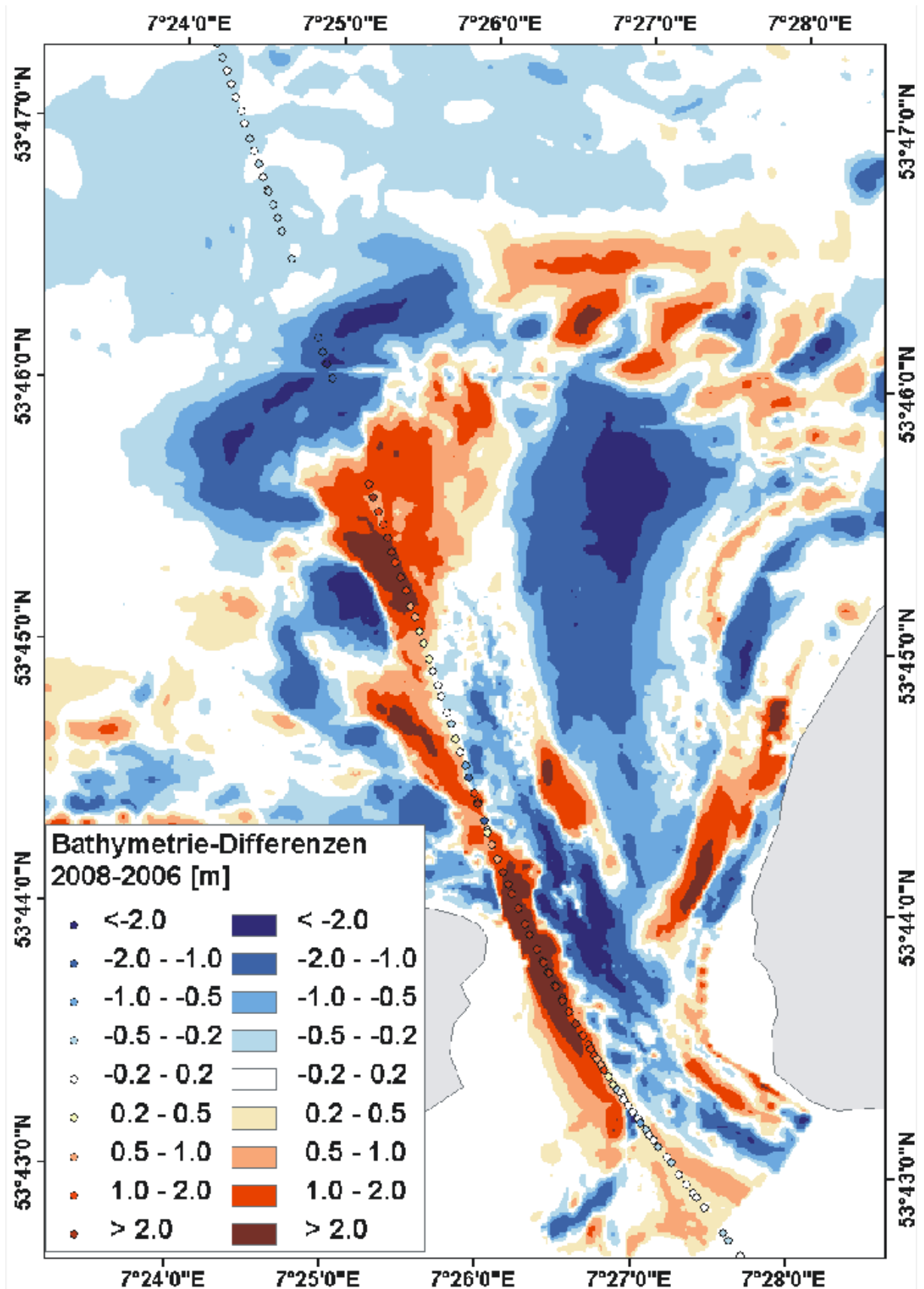


Abbildung 4-13: Differenz der Sedimentüberdeckung von Europepe 2 (Punkte 2008-2006) mit den Differenzen der interpolierten BSH-Vermessungsdaten

Vom Ostfriesischen zum Schleswig-Holsteinischen Wattenmeer überwechselnd, werden im Folgenden Ergebnisse zu flächenhaften Verteilungen von Oberflächensedimenten und Sohlformen in den Gezeitenrinnen Piep und Norderhever näher beleuchtet. Da für diese beiden Rinnensysteme bislang nur eine vergleichsweise grobe Beschreibung über die Sedimentverteilungskarte des BSH Nr. 2900 vorliegt, sowie wenige Detailinformationen über kleinräumige Bereiche (vgl. Kapitel 3.1.2.2), können nun anhand neuer flächenhafter Seegrundkartierungen erstmals weiterreichende Informationen zur Interpretation von Sedimentverteilung und Sohlformen herangezogen werden.

Anhand neuer Sedimentklassifizierungen zeigt sich in der Piep ein fast flächendeckendes Vorkommen von Feinsand (Abbildung 4-14). Auch Schlickablagerungen treten in einem nennenswerten Umfang auf. Größere Sedimente sind hier bislang nur in sehr kleinen Bereichen kartiert worden. Neben mobilen Feinsanden wird die Gewässersohle auch von konsolidierten Kleiablagerungen eingenommen, die stratigraphisch ins mittlere Holozän zu stellen sind. Diese Sedimente finden sich in tiefen Abschnitten der Rinne nahe Büsum und beiderseits des Tertiusandes in Norder- und Süderpiep. Dort bilden sie nach *Ricklefs & Asp (2005)* aufgrund ihrer Erosionsstabilität eine Art Gleitbahn für morphodynamische Abläufe. Ein Vergleich mit den im Jahre 2000 aufgenommenen Daten zeigt aber, dass in der Norderpiep die Verbreitung anstehenden Kleis abgenommen hat. Bislang ist aber noch unklar, ob dies auf einen Sedimenteintrag in die Rinne hinweist, der im Zusammenhang mit einer Verlagerung des Tertiusandes (Abbildung 4-15) stehen könnte.

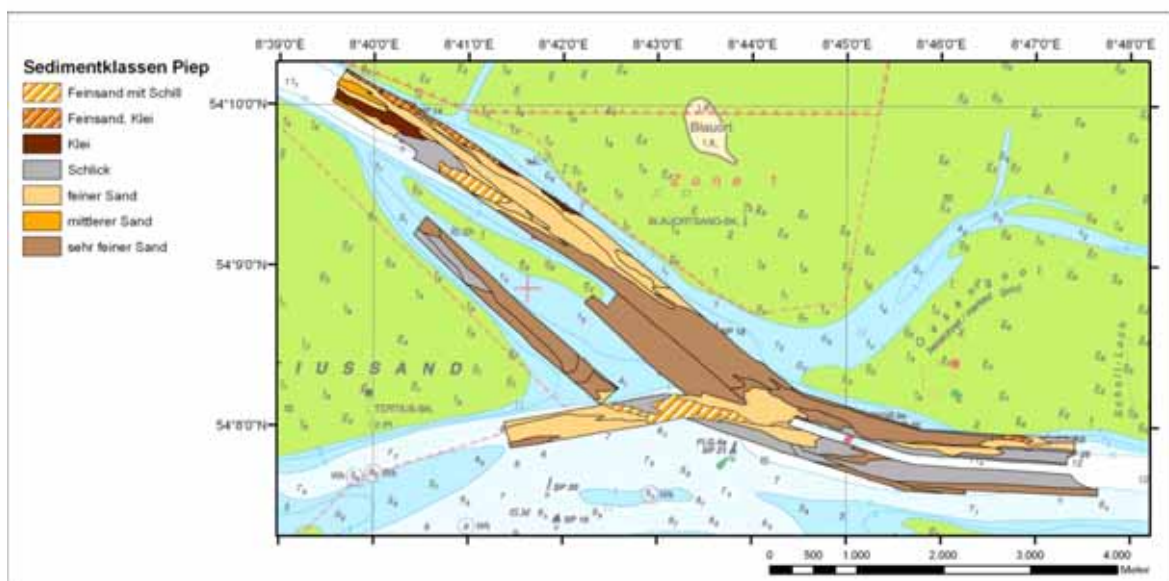
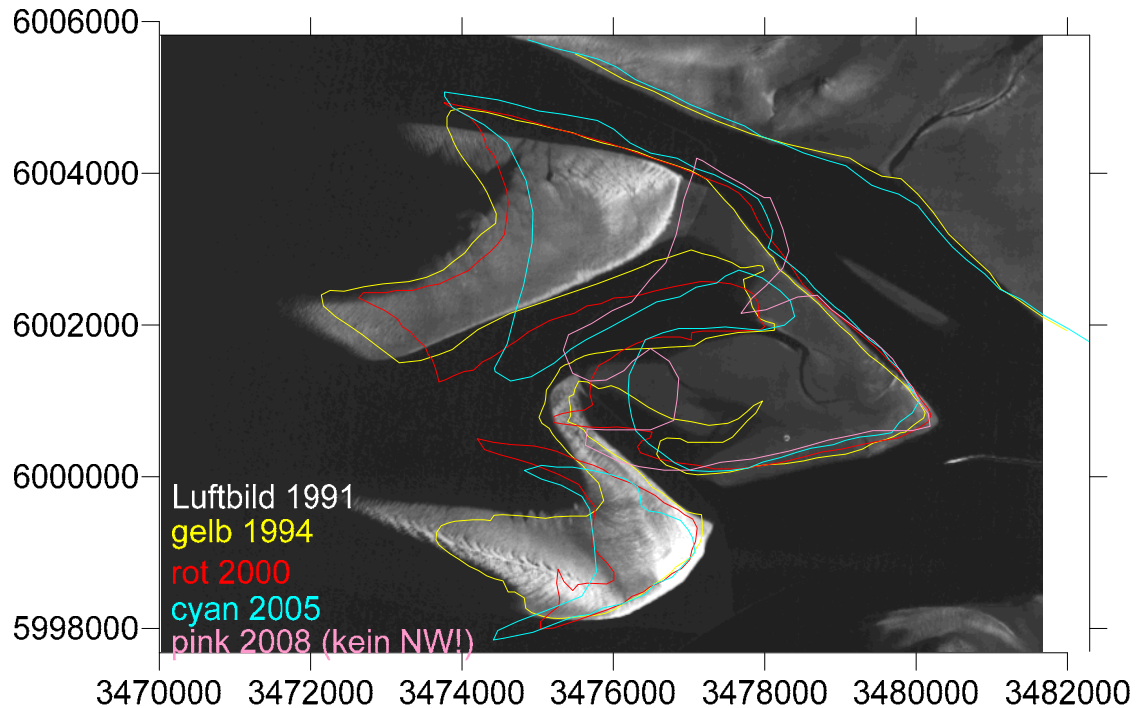


Abbildung 4-14: Kartenausschnitt der Sedimentklassifikation in der Piep, Grundlage Deutsche Seekarte 105\_1, Nautischer Verlag (BSH)



**Abbildung 4-15: Verlagerung des Tertiusandes führt zur Einengung der Norderpiep**

Im Zuge der Charakterisierung der Gewässersohle der Norderhever lässt sich ebenfalls ein hoher Differenzierungsgrad erreichen. Obwohl der Klassifizierungsprozess noch nicht vollständig abgeschlossen ist, ist schon jetzt abzusehen, dass sich im Vergleich zur Sedimentverteilungskarte des BSH Nr. 2900 eine wesentlich feinere Auflösung des Sedimentverteilungsmusters erreichen lässt. Das Spektrum der Sedimente in der Norderhever reicht dabei von Schlick- bzw. Kleiablagerungen, über Fein- und Mittelsande bis hin zu Grobsanden. In Abbildung 4-16 ist eine dem Maßstab der Karte angepasste Sedimentverteilung gezeigt. Die gröberen Sande finden sich dabei meist in Bereichen, in denen sich ausgeprägte Transportkörper insbesondere in Form von asymmetrischen Sohlformen ausgebildet haben. Deren Geometrie ermöglicht Rückschlüsse auf dominierende Sedimenttransportrichtungen. Dies gilt auch für die in den Pieprinnen erkannten Sohlformen, die jedoch mit maximal 1 m Höhe im Vergleich zu den bis 6 m hohen Transportkörpern in der Norderhever als klein einzustufen sind (Abbildung 4-17).

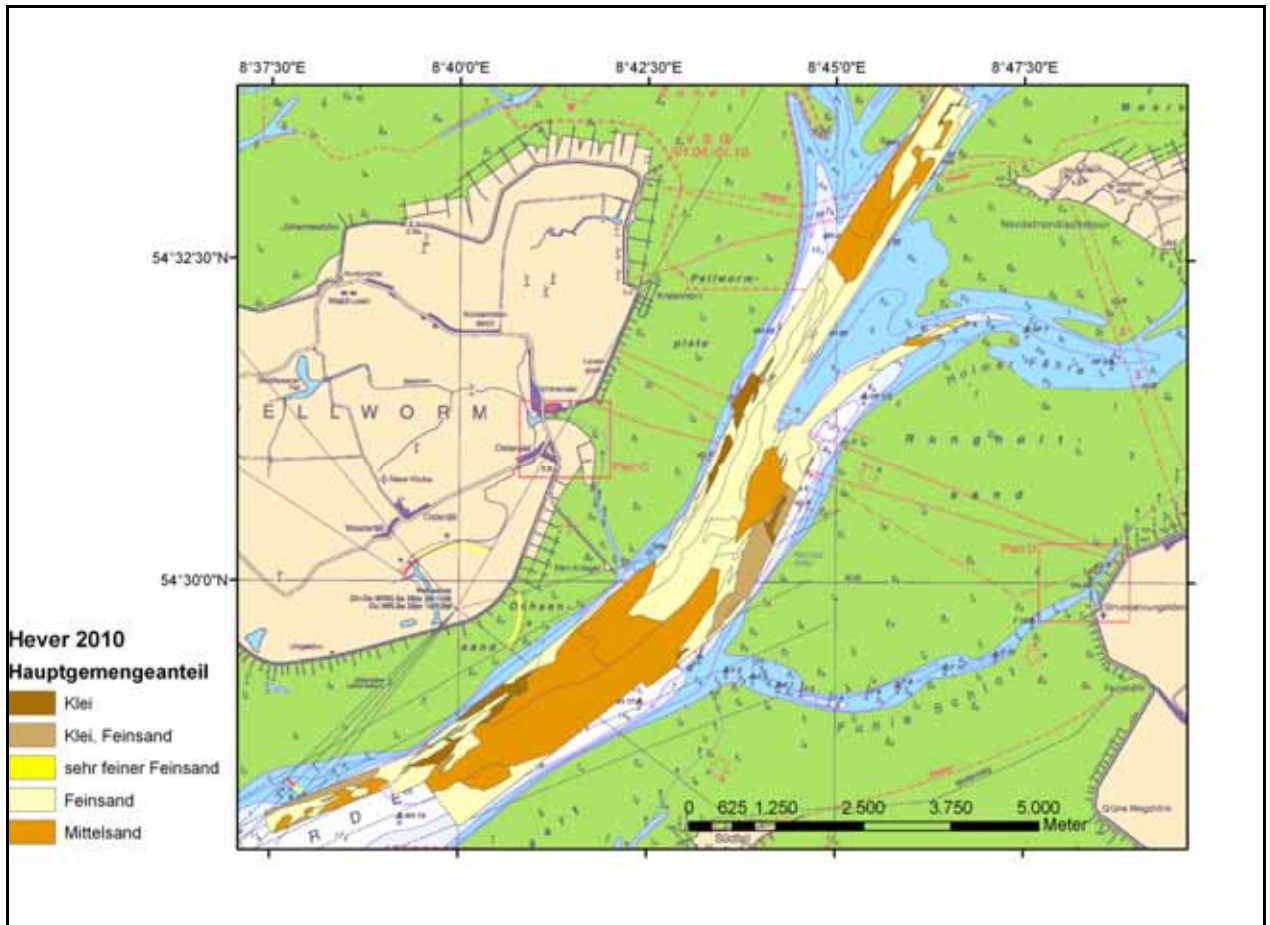


Abbildung 4-16: Sedimentverteilung in der Norderhever, Hintergrund Deutsche Seekarte 106\_1, Nautischer Verlag (BSH)

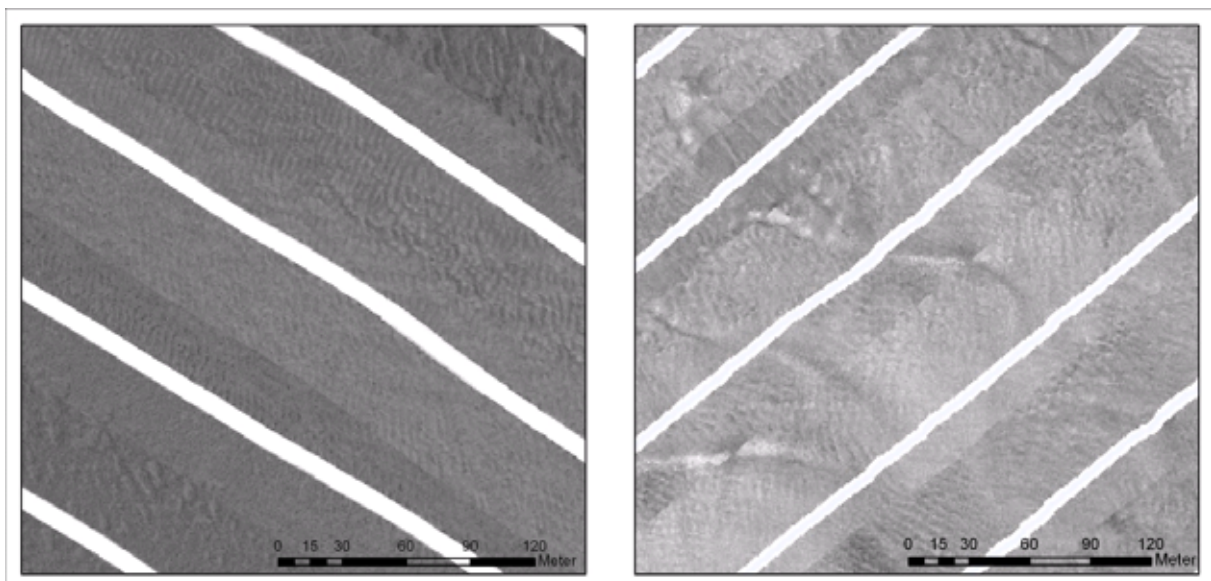


Abbildung 4-17: SSS Aufnahmen, aus denen die Lage und Geometrie von Sohlformen anhand unterschiedlich hoher Rückstreuwerte erkennbar wird. Links Ausschnitt Sohloberfläche Piep, rechts Norderhever im Jahr 2010

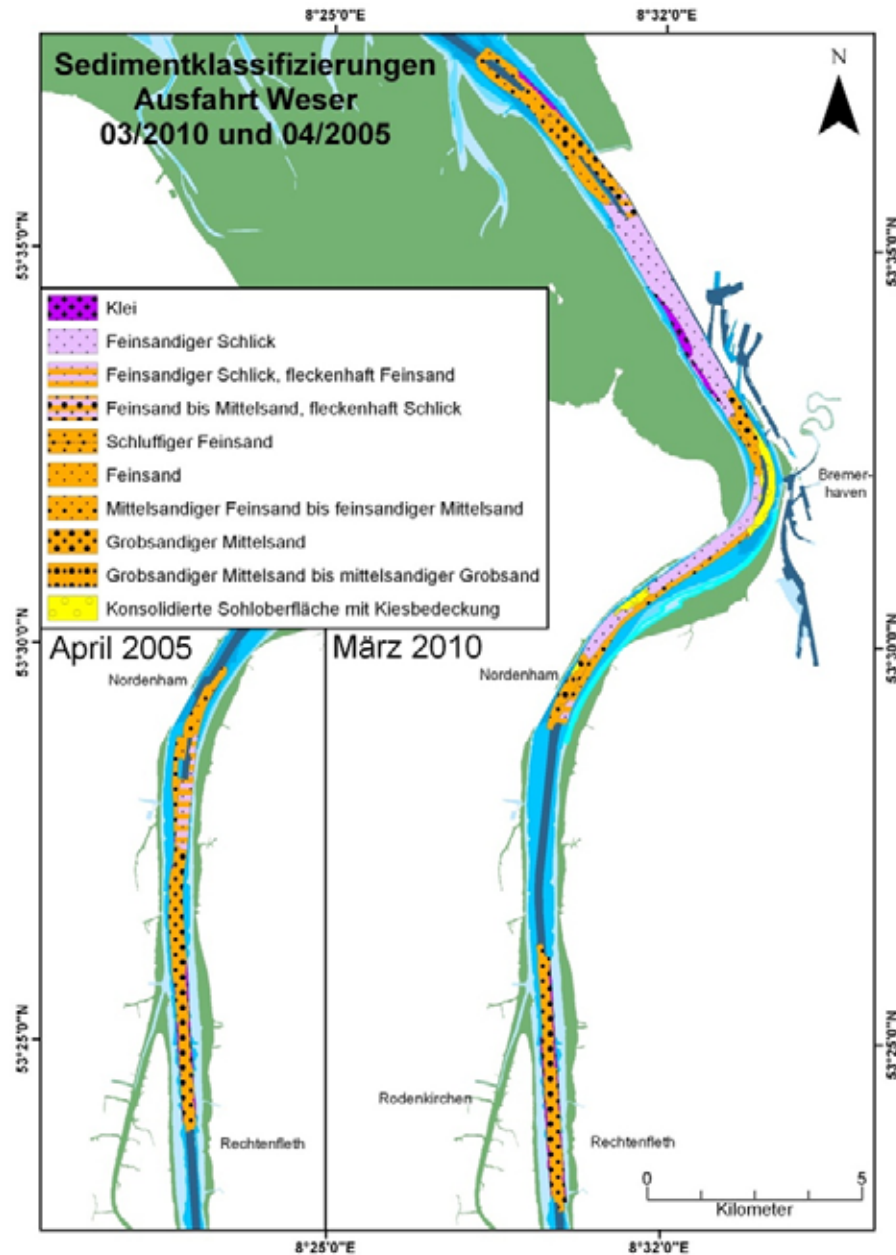
### 4.3 Ästuare

Insgesamt werden in **AufMod-F** alle drei großen Ästuare entlang der Deutschen Bucht, d.h. die der Elbe, Weser und Ems betrachtet, wobei im Folgenden zunächst auf die flächenhafte Verteilung insbesondere von Oberflächensedimenten im Fahrwasser des Weser - Ästuars exemplarisch näher eingegangen wird. Grund hierfür ist, dass für diesen Untersuchungsraum bereits Ergebnisse aus Vergleichskartierungen mit identischer Datenauswertung vorliegen. So sind in Abbildung 4-18 die aus den hydroakustischen Daten generierten Sedimentklassifizierungen für einen Teilbereich des Weser-Ästuars für März 2010 sowie für einen älteren Datensatz von April 2005 dargestellt. Aus diesen geht hervor, dass die Sedimentoberfläche im Fahrrinnenabschnitt bei Bremerhaven im März 2010 heterogen ausgebildet ist. Dort wechseln Abschnitte, die sich durch eine schlickreiche Sohle auszeichnen, mit jenen, in denen überwiegend gut sortierte Feinsande oder Mittel- und Grobsande anzutreffen sind, einander ab. Eine kiesreiche Sohloberfläche findet sich insbesondere im Bereich vor der Geestemündung. Kleiablagerungen stehen z. T. an den Fahrrinnenflanken an, was für den gesamten betrachteten Gewässerabschnitt zutrifft. Stromauf von Nordenham hingegen wird die Gewässersohle, soweit flächendeckend erfasst, insgesamt homogener. Es überwiegen Mittel- bis Grobsande. Bekannterweise wird dieser Gewässerabschnitt von mehrere Meter hohen, subaquatischen Dünen eingenommen (z.B. *Schrottke et al., 2006*). Hierbei gilt es zu beachten, dass sich die Korngrößenzusammensetzung über diesen Sohlformen kleinräumig ändert. Größere Fraktionen entfallen dabei auf die Dünentäler, während feinkörnigere Sande an den Dünenflanken bzw. auf den Dünenkuppen anzutreffen sind. Auf derartige Detailinformationen wird zugunsten der Übersicht in Abbildung 4-18 verzichtet.

Die vergleichende Gegenüberstellung der Aufnahmen von 2005 und 2010 veranschaulicht ähnliche Sedimentverteilungsmuster. Es überwiegen sandige Sohlsedimente, wobei sich das mittlere Korngrößenspektrum, wie in der Grafik gezeigt, nicht ändert. In 2005 wurden abschnittsweise schlickreiche Ablagerungen kartiert. Derartige Sedimente finden sich in der Aufnahme 2010 etwas weiter stromab sowie im Bereich des Blexer Bogens bis stromab von Bremerhaven. Abhängig von Oberwasserabfluss und Gezeitenphase befindet sich dort das Zentrum der Trübungszone (*Grabemann et al., 1997*), in der es bekanntermaßen regelmäßig zur Akkumulation von Schlickern kommt.

Es lässt sich folgern, dass die großen Faziesräume über längere Zeiträume erhalten bleiben, allerdings lassen sich bei genauerer Betrachtung bzw. bei höherer Detailauflösung Verschiebungen von Sedimentgrenzen erkennen, die das hochdynamische ästuarine System widerspiegeln.

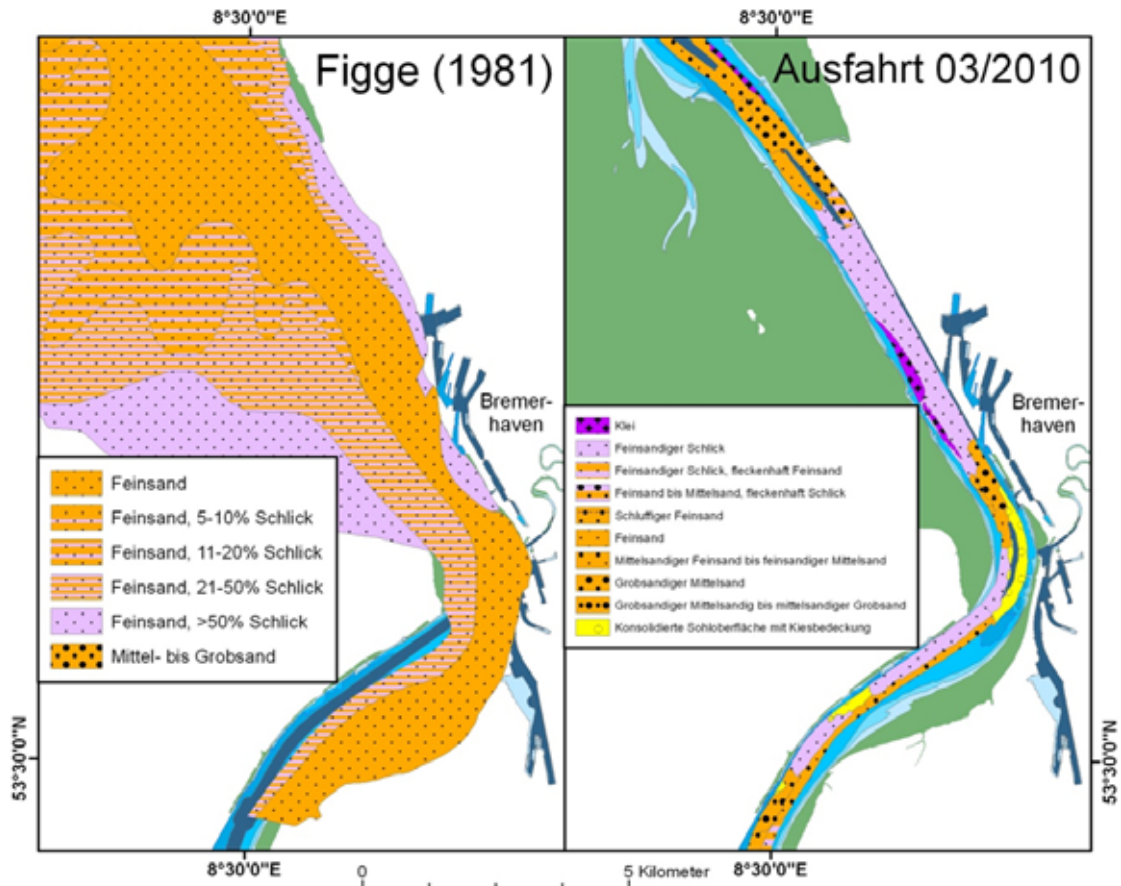




**Abbildung 4-18: Kartenausschnitte der 2005 und 2010 durchgeführten Sedimentklassifizierung im Weser-Ästuar**

Ein Vergleich der neuen Sedimentklassifizierung mit Informationen aus der Sedimentverteilungskarte des BSH Nr. 2900 von *Figge (1981)* verdeutlicht die wesentlich höhere räumliche Auflösung, die mit heutiger Methodik möglich wird (Abbildung 4-19). Nach den Angaben von *Figge (1981)* wird die Sohloberfläche im gezeigten Abschnitt im Wesentlichen von Feinsanden eingenommen, die insbesondere auf den angrenzenden Wattflächen auch höhere Anteile der Fraktion < 63 µm beinhalten. Größere Sandfraktionen bzw. Kiese sind nicht aufgeführt. Ebenso fehlen die in 2005 und 2010 kartierten Kleiablagerungen. Es ist möglich, dass diese Sedimente erst nach den Untersuchungen von *Figge, 1981*) freigelegt wurden, bzw. das Korngrößenspektrum über die Zeit zu den größeren

Fraktionen verschoben wurde. Es scheint aber plausibler anzunehmen, dass die Gitterauflösung, die der Sedimentverteilungskarte des BSH zu Grunde liegt, kleinräumige Sedimentverteilungsmuster nicht berücksichtigt.

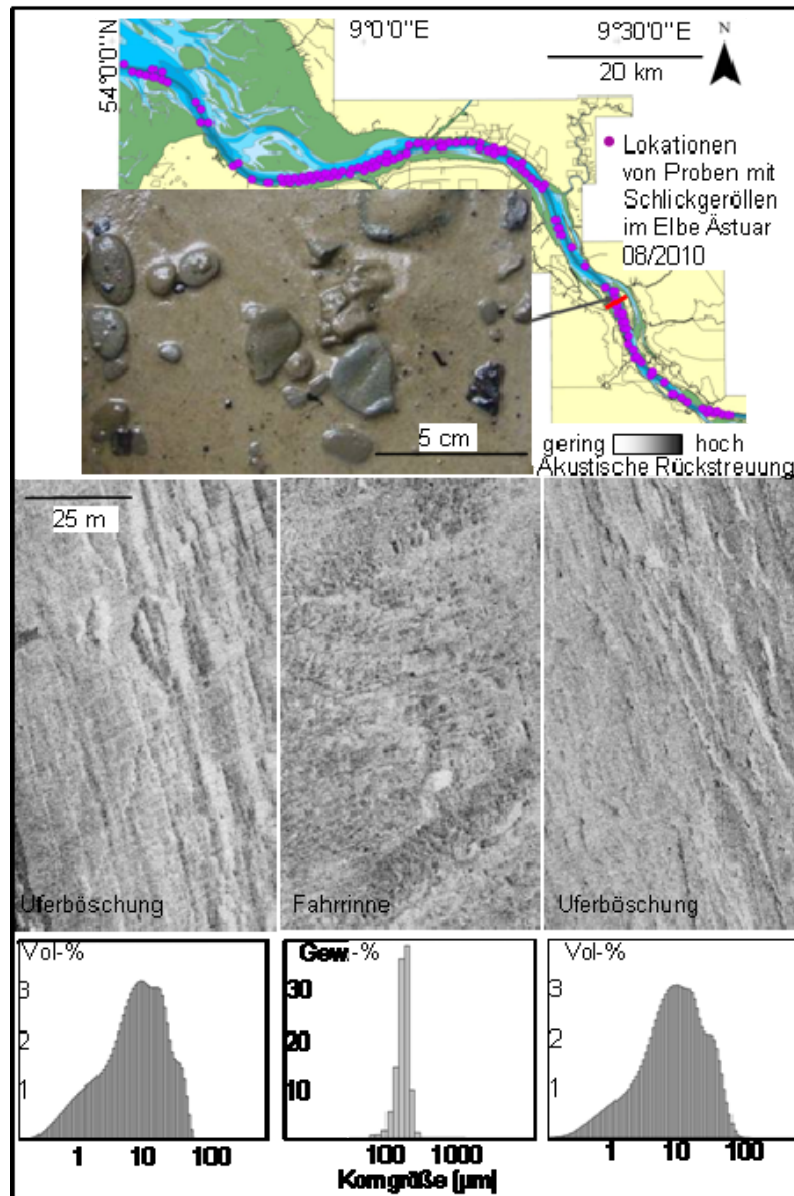


**Abbildung 4-19: Vergleichende Gegenüberstellung von Kartenausschnitten aus der Sedimentverteilungskarte BSH Nr. 2900 von Figge (1981) und der Sedimentklassifizierung des Weser-Ästuars vom März 2010**

Bei Betrachtung der ästuarinen Sohlsedimente und ihrer Korngrößenverteilungen ist auf die Präsenz von sogenannten Schlickgeröllen einzugehen (Abbildung 4-20). Es sind gerundete Bruchstücke aus kohäsiven Feinsedimenten bzw. organischen Ablagerungen wie z.B. Torfe, die Durchmesser von wenigen Millimetern bis mehreren 10er Zentimetern haben können. Auch die Konsistenz variiert je nach Matrix von sehr weich bei frischen Schlickablagerungen bis sehr hart bei altem Klei.

Schlickgerölle kommen in allen drei Ästuaren vor, wie in Abbildung 4-20 exemplarisch für einen Teilabschnitt des Elbe-Ästuars aufgezeigt ist. Dabei liegen sie nicht nur der Sedimentsohle auf, wie aus dem Bildausschnitt einer Greiferprobe ersichtlich wird (Abbildung 4-19), sondern sind auch in der oft sandigen Sohlmatrix eingebettet. Die Sohloberfläche kann sogar komplett überdeckt werden. Dieser Sachverhalt wirft einerseits die Frage auf, inwieweit Schlickgerölle die Oberflächenrauigkeit maßgeblich verändern, was letztlich für die Parametrisierung der Sedimentkenngrößen von Bedeutung sein kann. Andererseits entstammen sie

offensichtlich aus unterschiedlichen Ablagerungsräumen, die durch natürliche (Strömung, Wellen) bzw. anthropogen erzeugte (Baggerungen) Energieeinwirkungen aufgearbeitet werden. So können die an den Uferböschungen oft anstehenden Kleiablagerungen als potentielle Sedimentquelle angesehen werden (Abbildung 4-19). Des Weiteren ist bekannt, dass insbesondere im Bereich der Trübungszone Schlicke auch auf sandiger Sohle abgelagert werden, besonders in Sohldepressionen und Dünentälern (*Schrottke et al., 2006*). Kommt es zu Sohlumlagerungen, können diese Lagen aufgearbeitet und ihre Bruchstücke abtransportiert werden.

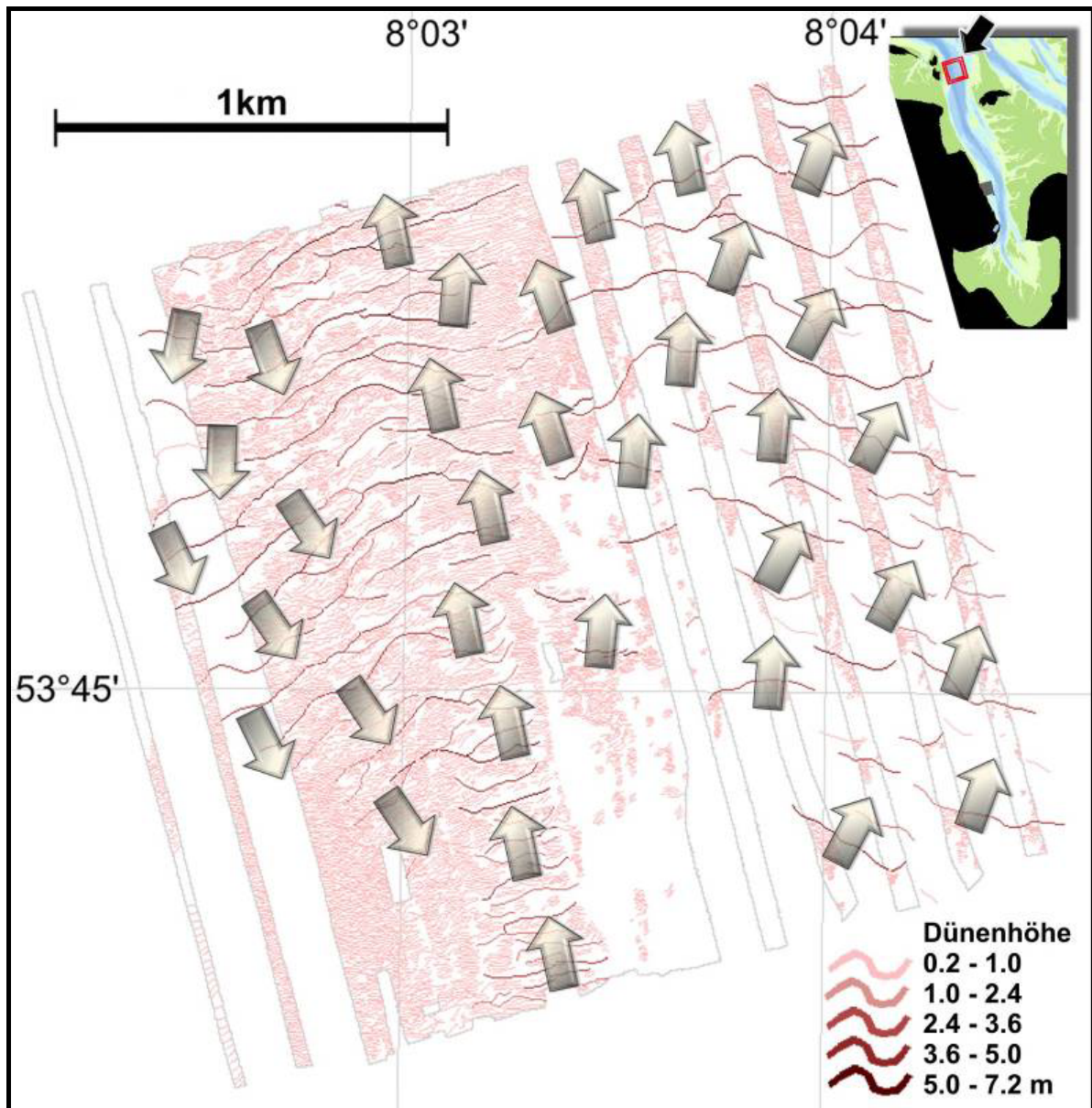


**Abbildung 4-20: Ausschnitt des Elbe-Ästuars mit Lokationen, an den Greiferproben Schlickgerölle enthielten, sowie Ausschnitte aus SSS-Aufnahmen, die konsolidierte Feinsedimente an den Uferböschungen sowie subaquatische Dünen im Fahrwasser mit sehr gut sortierten Sanden verbildlichen.**

Es lässt sich mit diesen Ergebnissen verdeutlichen, dass eine höhere Datendichte, gepaart mit Wiederholungsmessungen, vor allem dem Ziel, die Morpho- und Sedimentdynamik dieser Systeme besser erfassen zu können, einen Schritt näher kommt.

Die Jade stellt insbesondere auch im Vergleich mit Elbe, Weser und Ems ein weiteres wichtiges ästuarines Küstenelement dar. Hohe Tidedrömungen gestalten die überwiegend sandige Gewässersohle dynamisch und machen sie so zu einem außergewöhnlichen Umfeld für Beobachtungen der Dünendynamik. Der nördliche Bereich der Rinne wurde bisher noch nicht untersucht, aber über die Existenz der Dünen in der Jade-Rinne wurde bereits einige Male berichtet (*Dörjes et al., 1969; Svenson et al., 2009*). Die Messungen im Februar 2010 zeigten ein komplexes Bild 3-dimensionaler Dünen. Primäre Dünen, die bis zu 7,2 m hoch und 450 m lang werden können, werden von kleineren Dünen überlagert (Abbildung 4-21).

Die primären Dünen sind aus Mittel- bis Grobsand aufgebaut, wohingegen die sekundären Dünen aus Mittelsand bestehen. Größere Dünen waren größtenteils asymmetrisch aufgebaut, so dass eine Studie über die Ausrichtung der Leeseiten durchgeführt wurde. In dem Gebiet wurden 3 Hauptorientierungsrichtungen entdeckt. Dünen an der westlichen Flanke der Jade-Rinne waren in S-SSE-Richtung ausgerichtet, die Dünen im tiefsten Bereich der Rinne waren in Richtung NNW orientiert, und die Leeseiten der Dünen im östlichen Flankenbereich wiesen in Richtung N-NNE (Abbildung 4-21). Informationen zu den verwendeten hydroakustischen Methoden während der Messkampagne und weitere Details zur Sedimentmobilität in diesem Gebiet können der zukünftigen Publikation (*Kubicki & Bartholomä, inpress*) entnommen werden.



**Abbildung 4-21: Studie zur Dünenausrichtung anhand von MBES-Daten (Februar 2010)**

Um die Migrationsrichtungen bestätigen oder widerlegen zu können, wurden 3 Wochen später (März 2010) hydroakustische Messungen wiederholt. Es zeigte sich, dass die am weitesten westlich gelegenen Zungenriffe bis zu 12 m Richtung SSE migrierten. Dünen im tiefsten Teil der Rinne migrierten 5 m in Richtung NNW. Diese beiden Migrationsrichtungen konnten somit bewiesen werden. Die östlichen Flanken konnten, bedingt durch technische Probleme, im März 2010 nicht vermessen werden. Datensätze aus dem Oktober 2010 geben jedoch Hinweise auf die dritte Migrationsrichtung (NNE). Im Oktober wurde eine dreimal so große Fläche vermessen als im Februar. Es zeigte sich, dass sich das dargestellte Dünensystem um ca. 3 bis 4 km weiter nach Norden ausdehnt als bisher angenommen. Weiterhin ist es

möglich, dass die Dünenmigrationswege von der lokalen Rinnenarchitektur, die die Tideströme in diesem Gebiet steuert, beeinflusst werden. Es ist allerdings immer noch unklar, ob das Sediment das Gebiet verlässt oder lokal begrenzt in einer Art Zirkulationszelle zirkuliert. Zur Untersuchung dieses Sachverhaltes wurden zwei weitere hydroakustische Messkampagnen für 2011 geplant.

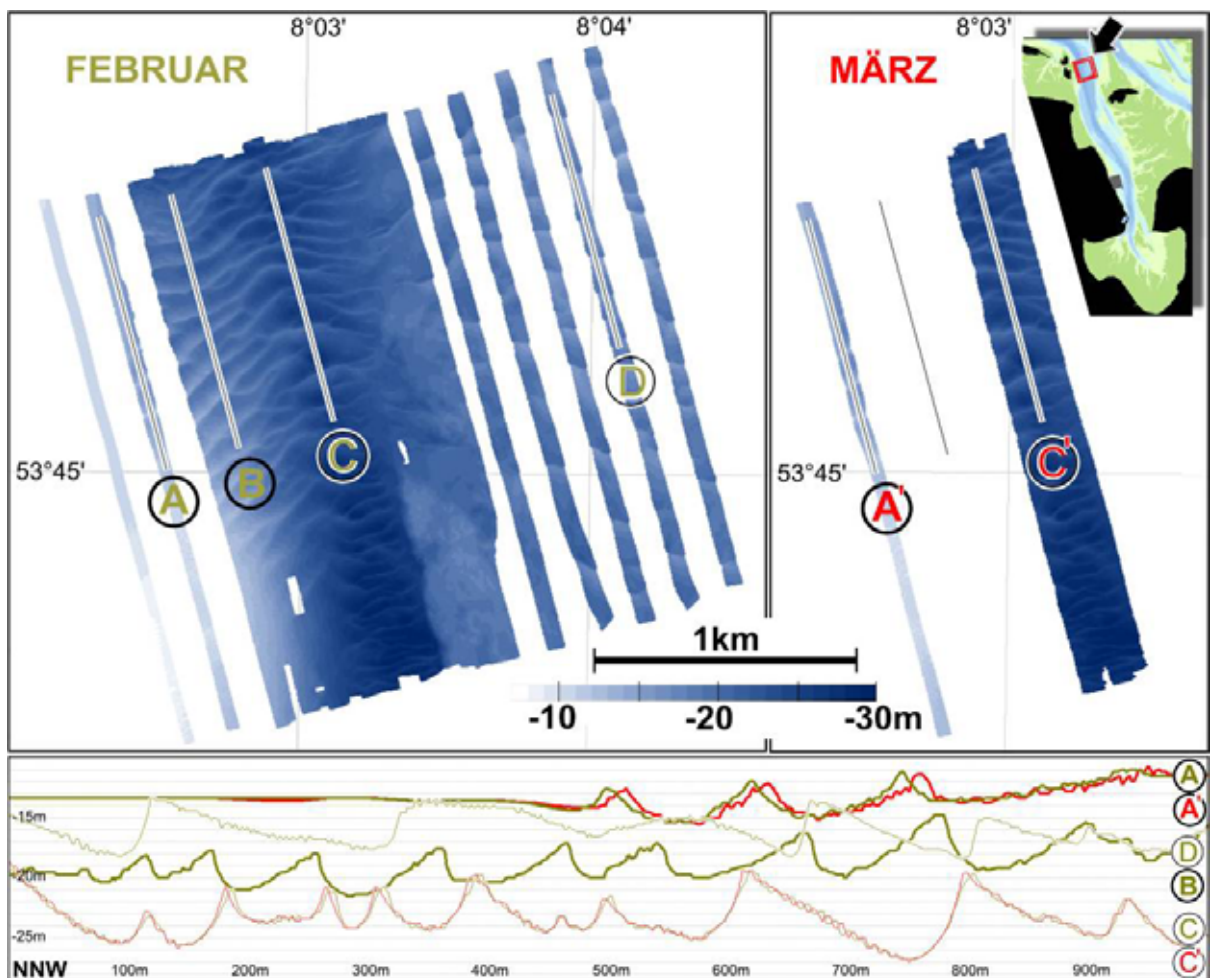


Abbildung 4-22: Vergleich der Bathymetrie im Februar und März 2010

## 5 Simulationsmodelle

Numerische Simulationsmodelle als mathematisches Modell\* bilden ein wichtiges Ingenieurwerkzeug zur Beurteilung von Veränderungen im tide- und meteorologieerzeugten Strömungsgeschehen, den Seegangsverhältnissen und auch verstärkt bei der Beurteilung von Transport und Umlagerungsprozessen. Im Verbundprojekt wird der Versuch unternommen durch den Einsatz unterschiedlicher Modellkonzepte, Modellausdehnungen und Betrachtungszeiträume sowohl die Qualität der Simulationsergebnisse zu verbessern als auch die Unschärfe und das Spektrum der Modellergebnisse zu beurteilen. Die eingesetzten Simulationsmodelle können als datenbasierte, prozessbasierte und prozessorientierte Modellansätze klassifiziert werden (Kapitel 5.1).

**Prozessbasierte** numerische Simulationsmodelle basieren auf der Analyse der physikalischen Gesetzmäßigkeiten und der zugehörigen mathematischen Gleichungen der zu beschreibenden Prozesse. Im Rahmen des konzeptionellen Simulationsmodells (Multi-Modell-Ansatz) werden folgende prozessbasierte numerische Modellkerne eingesetzt:

Hydrodynamik (HN) / Seegang (SG) / Morphodynamik (MD):

- |                  |        |                           |
|------------------|--------|---------------------------|
| • UnTRIM         | Unk    | SediMorph                 |
| • Delft3D (FLOW) | SWAN   | Delft3D (MOR)             |
| • MARINA         | MARINA | MARINA (zusammen mit TP5) |

Für die prozessbasierte Simulation von Tidedynamik, Seegang, Sedimenttransport und Morphodynamik wurden und werden unterschiedliche ortsspezifische Modelle (Gitternetze) für die Nordsee und die Deutsche Bucht aufgebaut, für die entsprechenden Rechenkerne angepasst und eingesetzt:

- Grobmodell (Parameterstudien = kleine Rechenzeiten),
- Feinmodell (detaillierte Auswerterechnungen)
- Teilmodelle (Gitternetzverfeinerungen) für detaillierte Untersuchungen in den sedimentologischen Fokusgebieten sowie
- Seegangsmoell

Die eingesetzten prozessbasierten Modelle (process-based) sind heute, je nach Komplexitätsgrad, in der Lage, Sedimenttransport und morphodynamische Veränderungen in Zeiträumen von Monaten bis zu mehreren Jahren zu simulieren. Um noch längere Zeiträume von Jahrzehnten zu simulieren, kommen Erweiterungen wie morphologische Faktoren zum Einsatz.

Für noch längere Zeiträume ist es notwendig weitere Abstraktionen und Vereinfachungen in den numerischen Simulationskernen vorzunehmen. Die so entstehenden Modelle werden im

Weiteren als **prozessorientierte** Simulationsmodelle (behaviour-oriented) bezeichnet. Im Rahmen des Verbundprojektes verfolgt die Uni-Bw München einen solchen Modellansatz (nsea100), um morphodynamische Simulationen über Zeitspannen von mehreren hundert Jahren durchführen zu können.

Primär auf bathymetrischen Daten basierende Simulationsmodelle werden als **datenbasiert** bezeichnet. Bei den datenbasierten Modellen wird nicht der Versuch unternommen, die physikalischen Gesetzmäßigkeiten auf Grundlage der Bewegungsgleichungen in einem Modell abzubilden, sondern es wird davon ausgegangen, dass Messdaten als Ergebnis der Wirkung physikalischer Prozesse im Hinblick auf morphodynamische Veränderungen interpretiert werden können. Auf der Basis des funktionalen Bodenmodells wurden solche Modellkonzepte untersucht und erste prototypische Umsetzungen eines datenbasierten HINDCAST\*-Simulationsmodells (DASIMO) für die morphodynamische Entwicklung der Deutschen Bucht realisiert (siehe Abschnitt 5.2.1).

Das folgende Kapitel gibt neben einer kurzen Klassifikation der Modelle (5.1) eine kompakte Übersicht über den Modellaufbau und –betrieb (5.2) sowie über den inneren Aufbau der verwendeten numerischen Modelle und der berücksichtigten Prozesse als auch deren Abstraktionen (5.3). Schließlich wird in Kapitel 5.4 auf die Validierung der Modelle eingegangen. Diese Validierung besteht aus direkten Vergleichen von Messungen mit Modellergebnissen; darüber hinaus werden höher aggregierte Kennwerte gebildet, die einen Vergleich von Messungen mit Modellergebnissen als auch einen Vergleich der Modellergebnisse untereinander erlauben.

## 5.1 Klassifizierung der Simulationsmodelle

Die im vorherigen Abschnitt definierten Simulationsmodelle können noch weitergehend nach den enthaltenen physikalischen Prozessen, der räumlichen Ausdehnung und dem betrachteten Zeitraum klassifiziert werden.

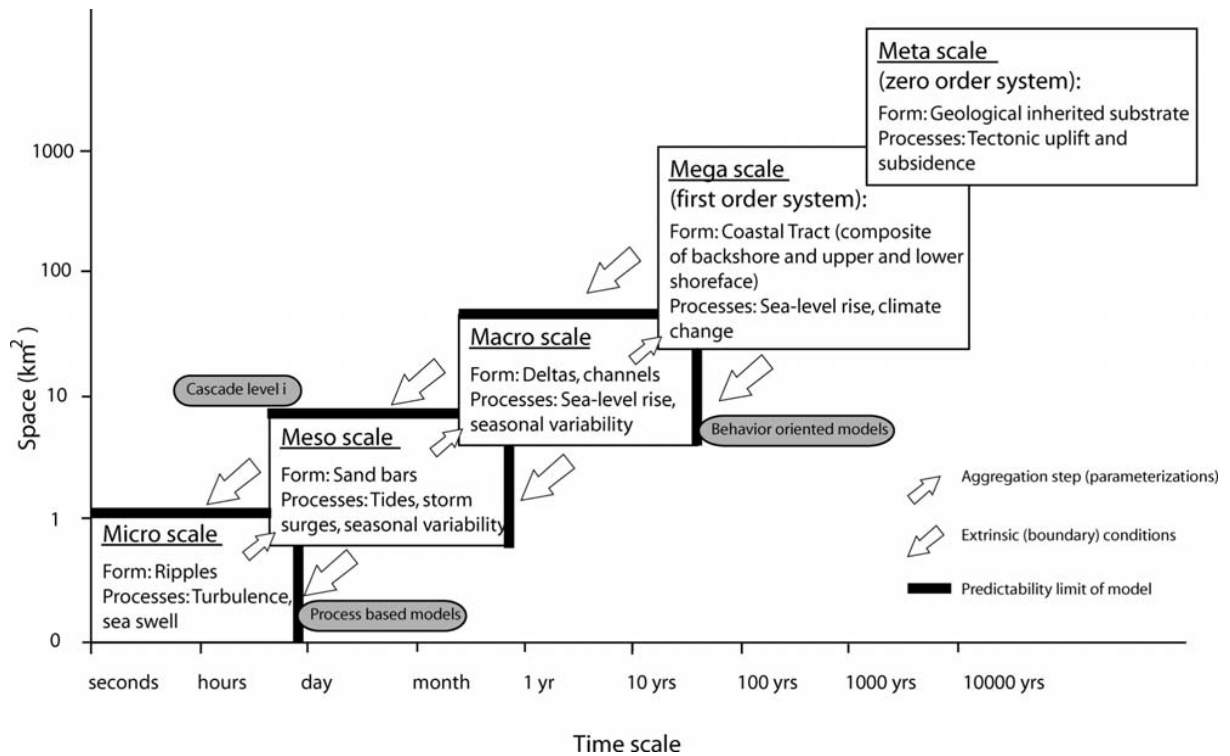
Das konzeptionelle Simulationsmodell beinhaltet mehrere Modellsysteme / -verfahren, denen unterschiedliche Prozesse zu Grunde liegen. Unterschieden werden muss hier zwischen natürlichen Prozessen (z.B. Tidedynamik, Mittelwasserschwankungen, Seegang, Sturmfluten, Oberwassereinträge) und Prozessen, die im numerischen Modell abgebildet werden (vgl. Tabelle 5-2).

Die räumliche Auflösung umfasst bei den hier verwendeten Simulationsmodellen generell das Gesamtgebiet der Nordsee (Megaskala). Um in Teilgebieten eine höhere Auflösung zu erreichen, können unterschiedliche Ansätze verfolgt werden. Beim Einsatz unstrukturierter Gitter im numerischen Verfahren können Teilgebiete, die von besonderem Interesse sind, höher aufgelöst werden. Für numerische Modelluntersuchungen in Teilgebieten können



alternativ hochauflösende Detailmodelle aufgebaut werden und in großräumige Modelle hierarchisch eingebettet werden.

Morphodynamische Entwicklungen finden auf unterschiedliche Zeit- und Raumskalen statt (Brommer et al., 2009). Eine Übersicht und Zuordnung zwischen Prozessen und Raumskalen gibt Abbildung 5-1.



**Abbildung 5-1: Skalenkaskade (Brommer et al. 2009)**

Eine möglichst umfassende Wiedergabe von Prozessen für großräumige Gebiete ist heute nur über mittlere Zeiträume (Jahre) möglich, für langfristige Betrachtungen sind Parametrisierungen notwendig. Diese betreffen die Vereinfachung der Dynamik von Prozessen oder auch die Vernachlässigung einzelner Prozesse. Die Einordnung nach der aufgelösten Zeitskala ist für die hier verwendeten Simulationsmodelle unterschiedlich. Die Angabe eines Modellnamens in Klammern bedeutet, dass die betrachtete Zeitskala durch Nutzung eines morphologischen Faktors\* > 1 erreicht wurde.

**Tabelle 5-1: Klassifizierung der Modelle nach betrachteten Zeiträumen**

Klassifizierung	Zeitraum	Modell
short term	Stunden / Jahre	UnTRIM / SediMorph, Delft3D
medium term	Jahr – Jahrzehnt	UnTRIM / SediMorph, Delft3D, MARINA
long term	10 – 100 Jahre	nsea100, (Delft3D), (MARINA)
very long term	100 – 1000 Jahre	nicht betrachtet

## 5.2 Beschreibung der Modellverfahren

Im Rahmen des Multimodellansatzes wird folgende Modellsoftware eingesetzt:

- UnTRIM - SediMorph - K-Modell (Simulation von Tagen bis Jahren)
- Delft3D - Delft3D-Mor - SWAN (Simulation von Tagen bis Jahren)
- MARINA2D (Holistisches Verfahren - Simulation von Tagen, Monaten bis Jahrzehnte)
- nsea100 (SediMorph stand alone + DredgeSim für Simulationen von 10 - 100 Jahre)
- DASIMO (datenbasiertes HINDCAST\*-Simulationsmodell) Zeitspanne 1989 bis 2010

Zu dem simulierten Prozess der

- Morphodynamik

berücksichtigen die prozessbasierten und prozessorientierten Modelle die:

- Hydrodynamik
  - Wasserstände,
  - Strömungen und
  - Seegang
- Advektion und turbulente Diffusion gelöster und partikulärer Stoffe
  - Salz,
  - verschiedene Fraktionen suspendierter Feststoffe (Sinkgeschwindigkeiten der Feststoffe)
  - Sedimenttransport an der Gewässersohle - residuelle Transporte, charakteristische Transportbänder, Erosions- und Sedimentationsgebiete
- Seegangswirkung

als die, die Morphodynamik wesentlich bestimmenden Einflussgrößen.

Eine Übersicht der verschiedenen Simulationsverfahren in *AufMod* gibt Tabelle 5-2.

Tabelle 5-2: Übersicht der verschiedenen Simulationsverfahren in *AufMod*

Allgemeines	UnTRIM <sup>2</sup>	DELFT3D	MARINA	nsea100	DASIMO
	prozessbasiert			p.-orientiert	datenbasiert
Dimension	2D / 3D	2D / 3D	2D	2D	2D
Typ	FDM / FVM	FDM / FVM	FEM	Reanalyse	
Gitter (horiz.)	Δ + □, U, O	C, U, O	Δ	Δ	variabel
Vertik. Strukt.	var. z-layer	var. z/σ layer	Nein	Nein	Nein
GUI	Nein	Ja	Nein	Nein	Nein
Code	Kosten	PD	Kosten	Research	Research
Ersteller	Casulli	Deltares	Milbradt	Uni Bw	Milbradt
Support	Gut	Gut	Gut	Nein	Nein
User-meeting	Ja	Ja	Nein	Nein	Nein
Validierungs-dokument	Ja	Ja	Ja	In Arbeit	In Arbeit

Mathematisches Verfahren: FDM = Finite Differenzen Methode / FEM = Finite Elemente Methode / FVM = Finite Volumen Methode

Gitternetztopologie: U = unstrukturiert / O = orthogonal / C = curvilinear

Hydrodynamik	UnTRIM <sup>2</sup>	DELFT3D	MARINA	nsea100
Druck	HS, NHS.	HS, NHS.	HS	HS
Dispersion <sup>3</sup>	Ja	Ja	Nein	Nein
Turbulenz <sup>4</sup>	C, A(P_UI), k-ε	C, A, k-ε, k-L	C, A	Nein
Large Eddy	Nein	2d:Ja/3d:Nein	Smagorinsky	Nein
ortsvar. Wind	Ja	Ja	Ja	Nein
ortsvar. Reibung	Ja	Ja	Ja	Ja
Strukturen	W, G	W, G, F, T	W, G	Nein
Sohle	zeitvariabel	zeitvariabel	zeitvariabel	zeitvariabel
Gezeitenkraft	Ja	Ja	Ja	Nein
Randbed.	H	H	H + V + Q	H
Nichtreflekt. Rdb	Ja	Ja	Ja	Nein
Stabilität	Sehr gut	Gut	Sehr gut	Sehr gut
num. Dämpfung	gering	gering	gering	
Zeitschritt	variabel	variabel	Intern Automatisch	
Diskretisierung	variabel	variabel	variabel	variabel

W = Wehr / G = Schwelle, Durchlass / F = Ponton / T = semipermeabel

HS = hydrostatisch / NHS = nicht hydrostatisch

<sup>2</sup> BAW-Version

<sup>3</sup> 2D

<sup>4</sup> C= konstant, A = algebraisch

Seegang	UnTRIM <sup>2</sup>	DELFT3D	MARINA	nsea100
Verfahren	Unk-Modell	SWAN	holistischer Ansatz	Parametrisiert
Typ	Spektral	Spektral	hyperbolisch	-
Kopplung	online	online	Vollständig	Online
Wechselwirkung	r, e(P_UI) <sup>5</sup>	r, s, m, i, w, e	r, m, w, e	e
Prozesse	S, R, D, G	S, R, D, G, B	S, R, D, B	B (in Arbeit)

r = Gradient der radiation stresses / s = Stokes'sche Drift / m = Massenfluss / i = streaming / w = Wellenturbulenz / e = Sohlschubspannungen / S = Shoaling (Aufsteilen) / R = Refraktion / D = Dissipation / B = Brechen

Transport	UnTRIM <sup>2</sup>	DELFT3D	MARINA	nsea100
Salz	Ja	Ja	Ja	Nein
Temperatur	Ja	Ja	Ja	Nein
Bed-load:	vRi, bag, mpm, hun	vRi, mpm, ein, e&h	vRi, mpm, w&s	vRi, mpm, ein, bag, hun, a&m
Formel				
Fraktionen	Fraktioniert	Fraktioniert	parametrisiert	Fraktioniert
Schwebstoff	Fraktioniert	Fraktioniert	Ja	Nein
Wasserqualität	Nein	DELWAQ	Nein	Nein
Sinkgeschwind.	n+c (P_UI) <sup>5</sup>	h, c, n	Oseen	Nein
Dichte	Ja (P_UI) <sup>4</sup>	Ja	Ja	Nein
Atmosphäre	Ja	Ja	Nein	Nein
Baggern/Umlagern	Ja	Ja	Nein	Ja

h = hindered settling / c = kohäsiv / n = nicht kohäsiv Bed-load

Transportformeln: vRi = van Rijn, mpm = Meyer-Peter und Müller, ein = Einstein, bag = Bagnold, e&h = Engelund / Hansen, hun=Hunziger, a&m=Ashida-Michiue

Morphodynamik	UnTRIM <sup>2</sup>	DELFT3D	MARINA	nsea100
Verfahren	SediMorph	Integriert	Integral	SediMorph
Typ	FV	FV	FEM	FV
Kopplung	Online	Online	Vollständig	Online
Fraktionen	Ja	Ja	Ja	Ja
Morpholog. Faktor	Ja	Ja	Ja	Ja
Sohlformen	Ja	Nein	Nein	Ja
Vorgabe				
Sohlfomen/Berechnung	Ja	?	In Arbeit	Ja
Baggern/Umlagern	Ja	Ja	In Arbeit	Ja
unerodierbarer Boden	Ja	Ja	Ja	Ja
3D-Bodenaufbau	In Arbeit	Ja	Nein	Nein
Fluid-Mud	In Arbeit	Ja	Nein	Nein

<sup>5</sup> Eigenleistung der BAW als vorzugebende, variable Größe (P\_UI)

### 5.2.1 Datenbasiertes Simulationsmodell

Mit dem funktionalen Bodenmodell stehen strukturiert archivierte Messdaten und zugehörige Methoden zur Verfügung, um die Entwicklung der Gewässersohle nicht nur als einen dynamischen Prozess aufzufassen, sondern diesen auch als numerisches Simulationsmodell zu formulieren. Die Entwicklung des datenbasierten HINDCAST\*-Simulationsmodells (DASIMO) für die morphodynamische Entwicklung der Deutschen Bucht baut auf den Daten und Methoden des funktionalen Bodenmodells auf. Im zurückliegenden Projektzeitraum wurde unter anderem ein Modul zu Bathymetriesimulation implementiert, welches sich nahtlos als Modul in das holistische Modellsystem MARINA integriert. Das Bathymetriemodul von DASIMO kann als eigenständiges Simulationsmodell betrieben werden und generiert auf der Basis eines Berechnungsnetzes in vorgegeben Zeitintervallen von einem Anfangszeitpunkt bis zu einem Enddatum Tiefenverteilungen, jährliche Sedimentations- und Erosionsraten sowie morphologische Geschwindigkeiten. Als HINDCAST\*-Simulationsmodell liefert DASIMO nur innerhalb einer Zeitspanne, für die entsprechende Vermessungsdaten, vorliegen, Ergebnisse. An einer Erweiterung zur Extrapolation der Tiefenverteilung für eine Zeitspanne von ein bis zwei Jahren auf der Basis von Polynominterpolationen wird derzeit gearbeitet.

Für die Erweiterung des datenbasierten Simulationsmodells auf die zeitliche und räumliche Simulation von Kornverteilungen müssen die Interpolations- und Approximationsverfahren, insbesondere unter dem Aspekt der wesentlich geringeren Datendichte, angepasst und optimiert werden.

### 5.2.2 Prozessbasierte Simulationsmodelle

Die prozessbasierte Simulation wird im **TP3** (BAW) durch die zwei Modellsysteme UnTRIM / SediMorph / UnK (Casulli, 2000) und DELFT3D / MOR / SWAN (Lesser et al., 2004) für eine Zeitspanne von 10 Jahren (1999 – 2008) betrieben. Im **TP5** (smile consult) wird das prozessbasierte holistische morphodynamische Simulationssystem MARINA für Zeiträume von Wochen bis zu einigen Jahren eingesetzt. Die prozessbasierte Simulation berücksichtigt für Zeitspannen von mehreren Monaten bis zu einigen Jahren folgende Prozesse:

- die Variabilität der Tide (verschiedene Verhältnisse von Spring- / Nippzyklen ),
- barokline Prozesse (dichteinduzierte Resttransporte in den Ästuaren)
- turbulente Vermischung (k-eps Modell und algebraische Approximation)
- die Veränderungen der Mittelwasserlagen (langperiodischen Schwankungen des Tidemittelwassers),
- die gemessenen (deutsche Ästuare) bzw. klimatologischen Oberwasserzuflüsse,
- die flächenhafte, zeitvariable Windverteilung über der gesamten Nordsee und

- orts- und zeitvariable Seegangsfelder.

Bei den morphodynamischen Simulationen werden zunächst keine Zeitstreckungsfaktoren für die Morphodynamik (morphologischer Faktor) genutzt. Durch den Vergleich von morphodynamischen Simulationen mit und ohne morphologische Faktoren lassen sich die Wirkungen dieses Zeitstreckungsfaktors abschätzen.

### **5.2.3 Prozessorientiertes Simulationsmodell**

#### **5.2.3.1 Zielsetzung**

In diesem Forschungsprojekt werden für eine skalenübergreifende Analyse der Transportprozesse in der Deutschen Bucht verschiedene numerische Simulationsmodelle eingesetzt, die sich entsprechend ihrer Zielsetzung grundlegend unterscheiden. Während für Zeitskalen von Monaten bis Jahren die prozessbasierten Simulationsmodelle und das datenbasierte Simulationsmodell eingesetzt werden, wird von der Uni-Bw (*TP4*) ein prozessorientiertes System entwickelt, dessen Fokus die Berechnung von großräumigen und langfristigen Sohländerungen ist.

Da eine numerische Simulation nur eine mögliche morphologische Entwicklung beschreibt, wird für eine fundierte Analyse der Morphodynamik eine hinreichende Anzahl an unterschiedlichen Simulationen durchgeführt. Hierbei werden bei identischen bathymetrischen und sedimentologischen Anfangsbedingungen unterschiedliche Ansätze zum Sedimenttransport angewendet und die wesentlichen treibenden Kräfte, z. B. der Seegang, variiert.

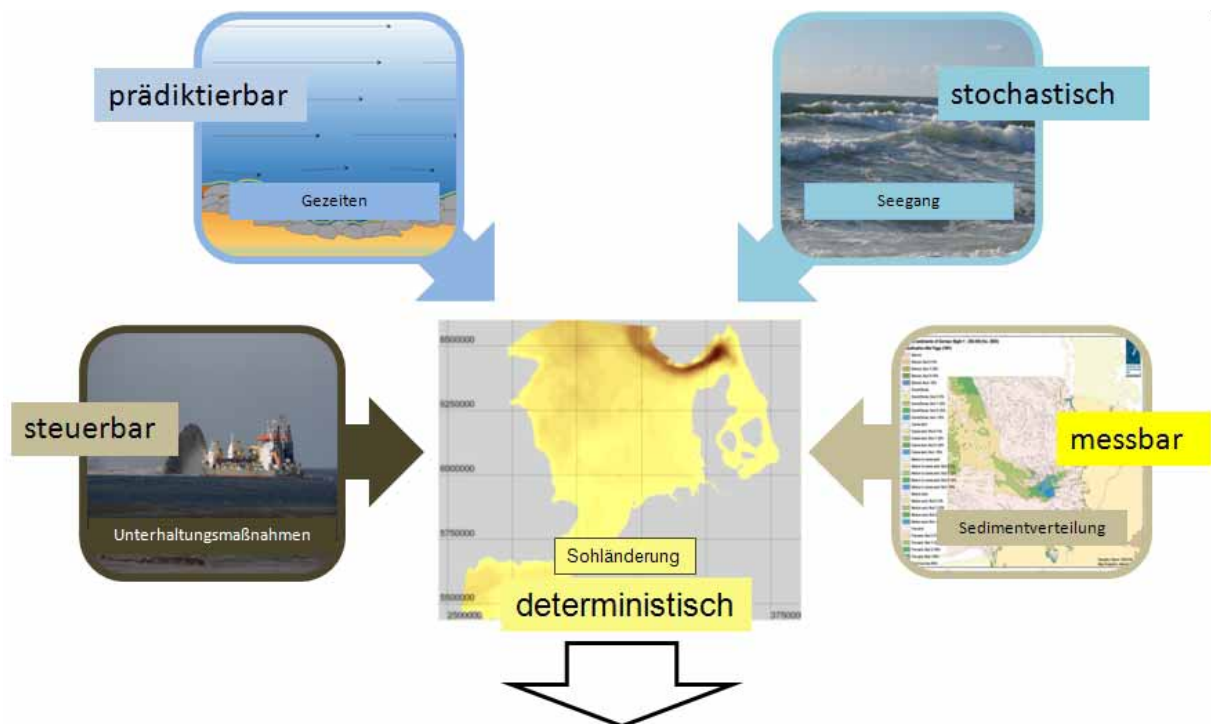
Ziel muss es somit sein, ein Simulationsmodell zu entwickeln, mit dem effiziente Berechnungen über einen Zeitraum von 100 Jahren auf einem hochaufgelösten Gitter durchgeführt werden können und in dem die Wirkung der treibenden hydromechanischen, meteorologischen und anthropogenen Prozesse berücksichtigt wird. Mit einem solchen Langfristsimulationsmodell können beispielsweise Trends in morphologischen Entwicklungen identifiziert oder der Einfluss von Seegang auf die langfristige Sohlentwicklung analysiert werden.

#### **5.2.3.2 Modellkonzept**

Zur langfristigen und großräumigen Simulation der Morphodynamik bietet es sich an, einen prozessorientierten Modellansatz zu benutzen. Einerseits sind die zu Grunde liegenden Prozesse noch nicht ausreichend beschrieben und andererseits sind solche Modelle robust, stabil und effizient. Prozessorientierte Modelle werden mit Hinblick auf die wesentlichen physikalischen Prozesse und Phänomene entwickelt und können einfache algebraische Zusammenhänge beschreiben, aber auch komplexe Differentialgleichungen darstellen. Eine Grenze zu prozessbasierten Modellen kann nicht generell definiert werden, sondern ist von den zu untersuchenden Raum- und Zeitskalen abhängig. Beispielsweise wird in (de Vriend, 1993) darauf hingewiesen, dass gerade prozessorientierte Modelle zum Verständnis

langfristiger Morphodynamik beitragen können, sie aber zukünftig physikalisch fundierter entwickelt werden sollten.

In Abbildung 5-2 sind die wesentlichen Faktoren des Systems Nordsee dargestellt, die in **TP4** für den prozessorientierten Modellansatz betrachtet werden. Sie lassen sich in prädiktierbar (Gezeiten), stochastisch (Seegang), steuerbar (Unterhaltungsmaßnahmen) und messbar (Sedimentverteilung) einteilen. Sie führen zu einer Sohländerung, die sich wiederum mathematisch in deterministischer Form als Sohlentwicklungs-gleichung beschreiben lässt.



### Modellierungsansatzes für langfristige Simulation

**Abbildung 5-2: Die in TP4 für die prozessorientierte Modellierung betrachteten Faktoren des Systems Nordsee**

Diese Betrachtungsweise bildet die Grundlage zum Aufbau des Simulationsmodells nsea100. Die genannten Faktoren werden wie folgt berücksichtigt:

- Gezeiten: Als grundlegende treibende Kraft (morphodynamischer Treiber) sollen sie in ihrer Wirkung modelliert werden. Dies kann erreicht werden, indem die Wasserspiegelauslenkung durch die Gezeiten im gesamten Modellgebiet für den Simulationszeitraum vorgegeben und daraus eine tiefen-gemittelte Strömung berechnet wird. Hierfür werden flächendeckend analy-sierte Partialtiden aus dem Modell der BAW übernommen. Im Rahmen dieses Forschungsprojektes muss die Sensitivität der Partialtidenkennwerte gegen-

über Sohlveränderungen abgeklärt werden. Die Berechnung wird in Abschnitt 5.2.3.5 näher erläutert.

- Seegang: Die Wirkung wird durch zu entwickelnde Szenarien berücksichtigt. Die dazu erforderlichen Datengrundlagen werden innerhalb von AufMod generiert oder aus abgeschlossenen Projekten (z. B. HIPOCAS) gewonnen.
- Unterhaltungsmaßnahmen: Für die im Modell abgebildeten Ästuarie Elbe, Ems und Weser werden vorhandene Bagger- und Verklappstrategien implementiert oder im Bedarfsfall entsprechend entwickelt. Zur numerischen Modellierung wird das Paket DredgeSim (*Maerker, 2006*) verwendet.
- Sedimentverteilung: Die initiale Sedimentverteilung wird aus dem funktionalen Bodenmodell übernommen. Die Bestandteile des anstehenden Bodens werden durch verschiedene Sedimentklassen fraktioniert und als IPDS\*-Datei bereitgestellt.
- Sohlevolution: Zur Berechnung des Sedimenttransportes und der Sohlevolution wird das numerische Verfahren SediMorph (Malcherek, 2003) verwendet, das die Entwicklung der Sohle durch die Lösung der allgemeinen Sohlevolutionsgleichung simuliert.

Die Umsetzung des Modellkonzeptes ist in Abbildung 5-3 schematisch dargestellt. Das Simulationssystem nsea100 (blaue Fläche) besteht aus einem Programmteil und aus den Simulationsdaten (grau).

Der Programmteil enthält das Hauptprogramm nsea100 (grün hinterlegt) zur Steuerung einer Simulation, das morphodynamisch - numerische Modell SediMorph und das Paket DredgeSim.

Die Simulationsdaten bestehen aus den Partialtidenkennwerten, den Seegangsdaten und der Sedimentbelegung. Nicht dargestellt ist das Gitter. Die morphodynamischen Langzeitszenarien werden sowohl mit Größen aus dem funktionalen Bodenmodell (Validierung und Kalibrierung) als auch mit den Simulationsergebnissen aus **TP3** und **TP5** (Validierung) verglichen.



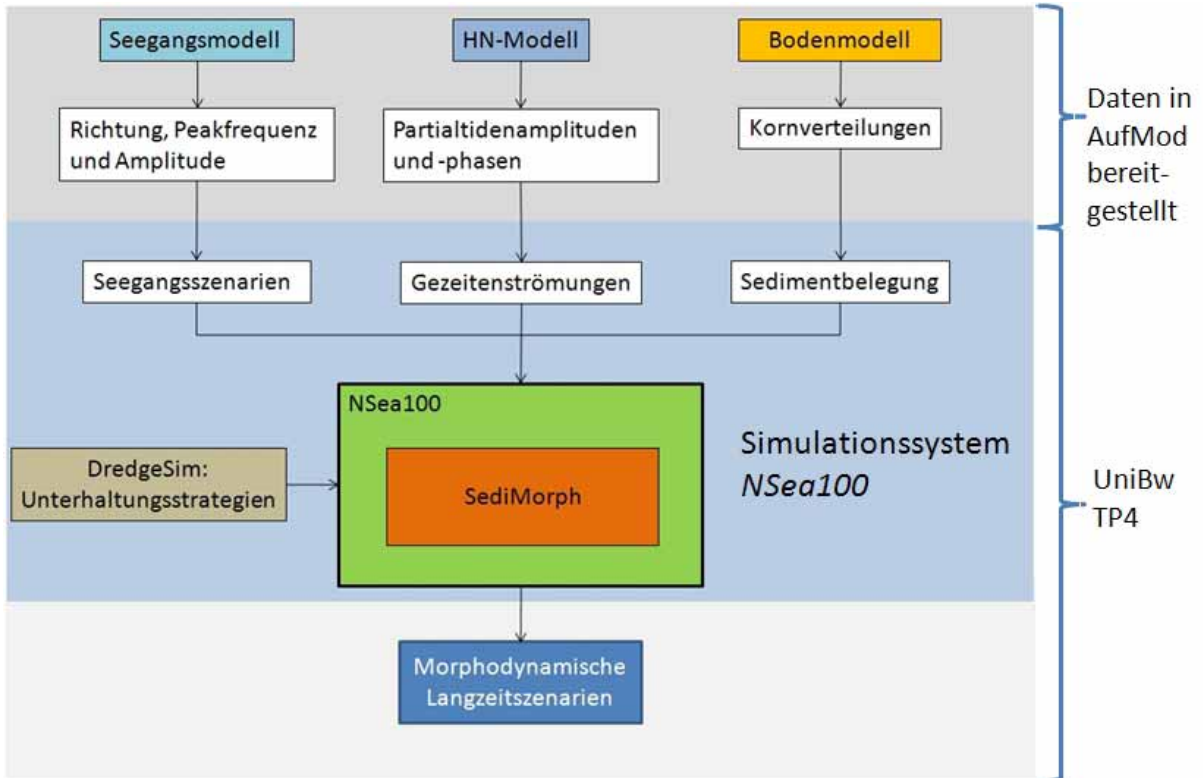


Abbildung 5-3: Schematischer Aufbau des Langzeitsimulationsmodells nsea100 (blau hinterlegt)

### 5.2.3.3 Programmaufbau

Die Steuerung des Simulationssystems erfolgt durch das Hauptprogramm nsea100. Neben grundlegenden Funktionen stellt es die Kopplung mit weiteren Programmpaketen her und führt die Berechnung von gezeiteninduzierten Strömungen aus. Momentan werden die folgenden Funktionalitäten unterstützt:

- 1 zeitliche Steuerung des gekoppelten Simulationssystems,
- 2 Einlesen der initialen Modelltopographie im selafin-Format\*,
- 3 Partialtidensynthese von beliebig vielen Partialtiden,
- 4 Prädiktion der Wassertiefenänderung aufgrund von Gezeiten,
- 5 Gezeitenströmungen aus tiefengemittelter Impulsbilanz,
- 6 Kopplung mit SediMorph zur Berechnung von Sedimenttransport und Morphodynamik,
- 7 wahlweise Kopplung mit DredgeSim zur Berücksichtigung von Unterhaltungsmaßnahmen und
- 8 Ergebnisausgabe im selafin-Format\*.

Der interne Ablauf einer Simulation mit der aktuellen Version von nsea100 ist in Abbildung 5-4 dargestellt. Die Seegangswirkung ist hierbei noch nicht berücksichtigt, da sie erst im weiteren Projektverlauf integriert wird. Nach dem Start von nsea100 und der Initialisierung

der Datenfelder werden die initiale Modelltopographie und die Partialtiden eingelesen. Anschließend folgt der Start der angekoppelten Programmpakete, die ihre paketspezifischen Anfangswerte zur Sedimentbelegung und zur Modelltopographie einlesen. Eine Simulation wird mit einem Zeitschritt über eine endliche Anzahl an Zeitschritten durchgeführt und die Ergebnisse in einer Datei gespeichert. Der Zeitschritt, die Anzahl der Zeitschritte und die Intervalle der Ergebnisausgabe können durch den Anwender vorgegeben werden. Am Ende einer Simulation werden zuerst die angekoppelten Programmpakete und anschließend das Hauptprogramm nsea100 selbst beendet.

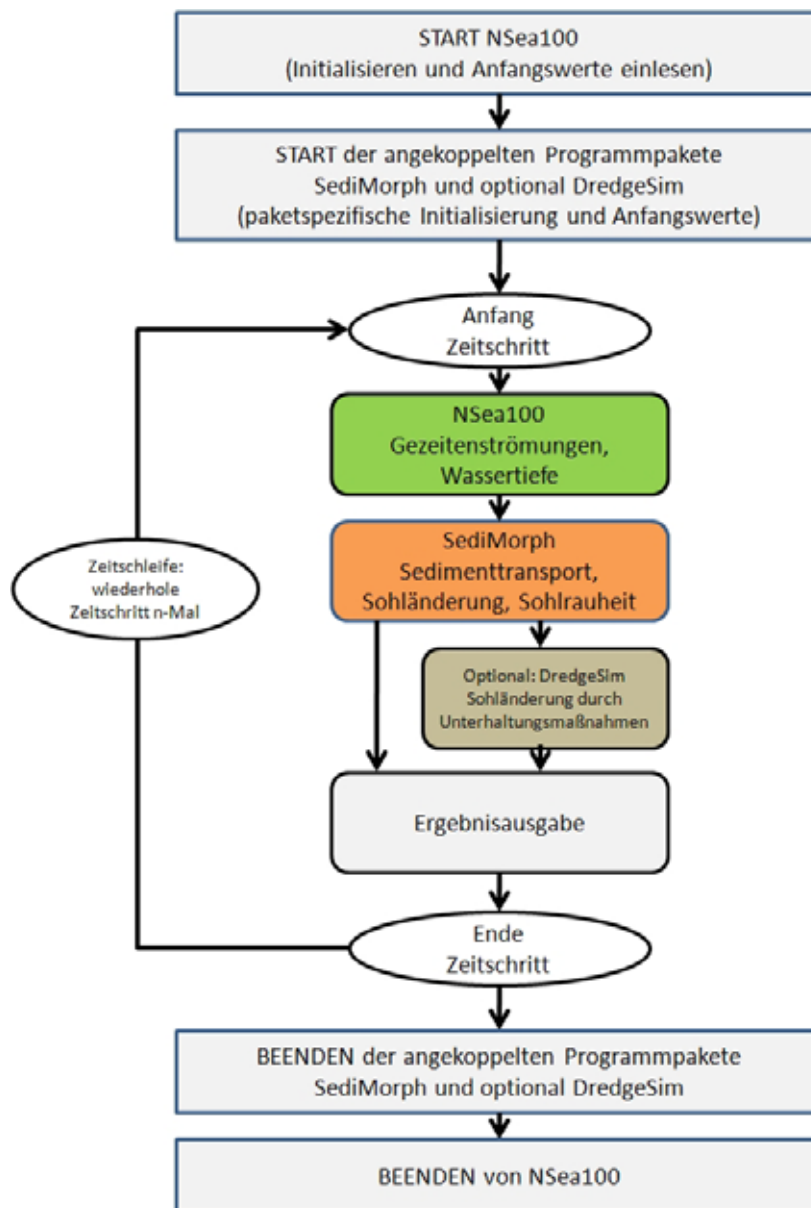


Abbildung 5-4: Interner Ablauf einer Simulation mit nsea100. Der Seegang wird im weiteren Projektverlauf integriert

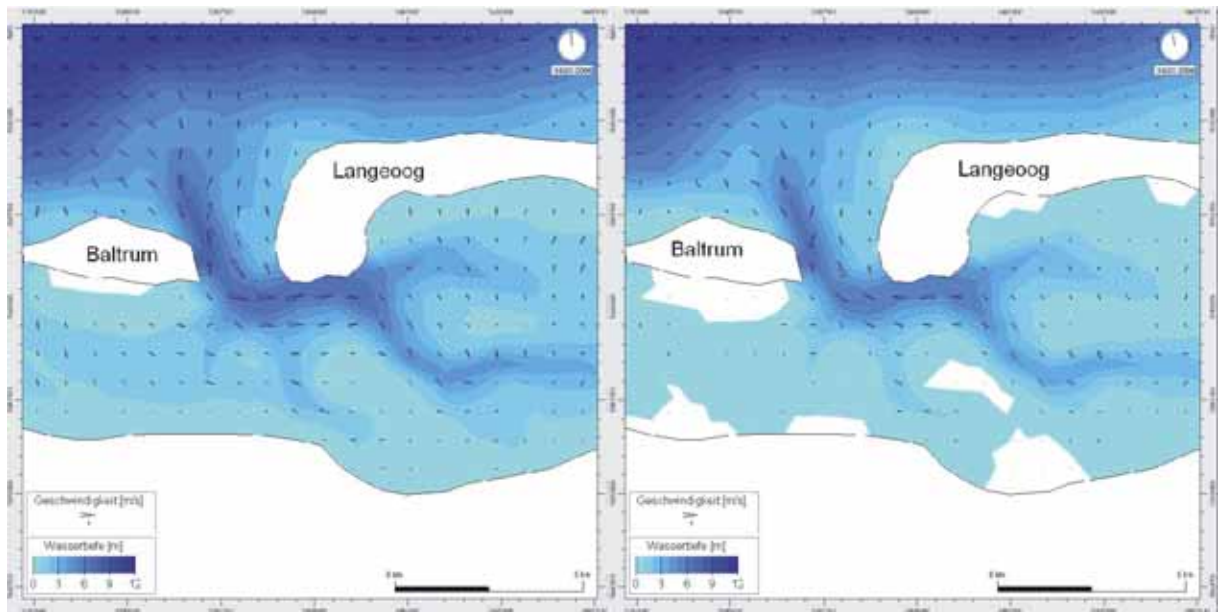
Der Berechnungsablauf während der Zeitschleife entspricht dem online-Konzept. Innerhalb eines Zeitschrittes übermittelt nsea100 dem morphodynamischen Modell SediMorph die tiefengemittelten Strömungsgeschwindigkeiten und die Wassertiefe. Daraufhin wird die neue Morphologie sowie die Sohlrauheit durch SediMorph berechnet. nsea100 greift im nächsten Zeitschritt wiederum auf diese Daten zu und aktualisiert die hydrodynamischen Parameter. Im Fall einer Kopplung mit DredgeSim wird dieses Programmpaket während einer Simulation von nsea100 lediglich gestartet, in jedem Zeitschritt aufgerufen und schließlich beendet. Der Datenaustausch, der für die Simulation von Bagger- und Verklappstrategien notwendig ist, wird zwischen DredgeSim und SediMorph geregelt.

#### **5.2.3.4 Gezeiteninduzierte Strömungen**

Im Simulationssystem nsea100 wird die Wirkung der Gezeitendynamik über die tiefengemittelten Impulsgleichungen berücksichtigt. Zu ihrer Lösung wird ein neuartiger Ansatz verwendet. Berechnungsgrundlage ist der Druckgradient als treibende Kraft, der in den tiefengemittelten Impulsgleichungen als Wasserspiegelgradient erscheint. Er wird aus der Wasserspiegelauslenkung durch die Gezeiten berechnet, der wiederum zu einem Simulationszeitpunkt in dem Modellgebiet aus der flächendeckenden Partialtidensynthese ermittelt wird. Der Wasserspiegelgradient stellt nun im Gegensatz zur klassischen Lösung der Impulsgleichung keine Größe mehr dar, die erst rechenintensiv ermittelt werden muss, sondern er kann direkt in die Impulsgleichung eingesetzt werden. Damit können die Gezeitenströmungen explizit berechnet werden.

In der aktuellen Version von nsea100 werden in den Impulsgleichungen neben dem Wasserspiegelgradienten die Coriolisbeschleunigung und die Sohlreibung berücksichtigt. Die letzte Größe sorgt dafür, dass die gezeitengetriebenen Strömungen in direkter Wechselwirkung mit der Sohländerung und der Sohlrauheit steht. Um ein effizientes und stabiles Simulationssystem zu erhalten, wird in der aktuellen Version von nsea100 auf die Advektion und Diffusion verzichtet. Eine spätere Implementierung ist bei Bedarf möglich. Die Impulsgleichungen können nun im Prinzip komplett explizit gelöst werden, was jedoch zu numerischen Instabilitäten führen würde. Daher wurde in nsea100 ein semi-implizites Verfahren implementiert. Damit können die Gezeitenströmungen auch bei großen Zeitschritten schnell und stabil berechnet werden.

Exemplarische Strömungsgeschwindigkeiten sind in Abbildung 5-5 für das Gebiet um Baltrum und Langeoog dargestellt. Für die Berechnung wurden die sieben momentan verfügbaren Partialtiden verwendet. Bei Flut (Abbildung 5-5 links) treten die höchsten Geschwindigkeiten im Seegatt auf und erreichen Werte von etwa 2 m/s. Die Strömung folgt hier dem Verlauf der Rinne. Im Bereich des Ebbdeltas sind die Geschwindigkeiten wesentlich geringer und zeigen tendenziell in Richtung Seegatt. Im größeren Abstand zum seeseitigen Rand der Insel richtet sich die Strömung parallel zur Küstenlinie aus und erreicht Werte von etwa 0.5 m/s. Bei Ebbe (Abbildung 5-5 rechts) ergibt sich ein ähnliches Geschwindigkeitsfeld, nur in umgekehrter Strömungsrichtung.



**Abbildung 5-5: Exemplarische Ergebnisse für Geschwindigkeiten bei Flut (links) und Ebbe (rechts)**

### 5.2.3.5 Verfahren für Kennwerte von Partialtiden über Wattflächen

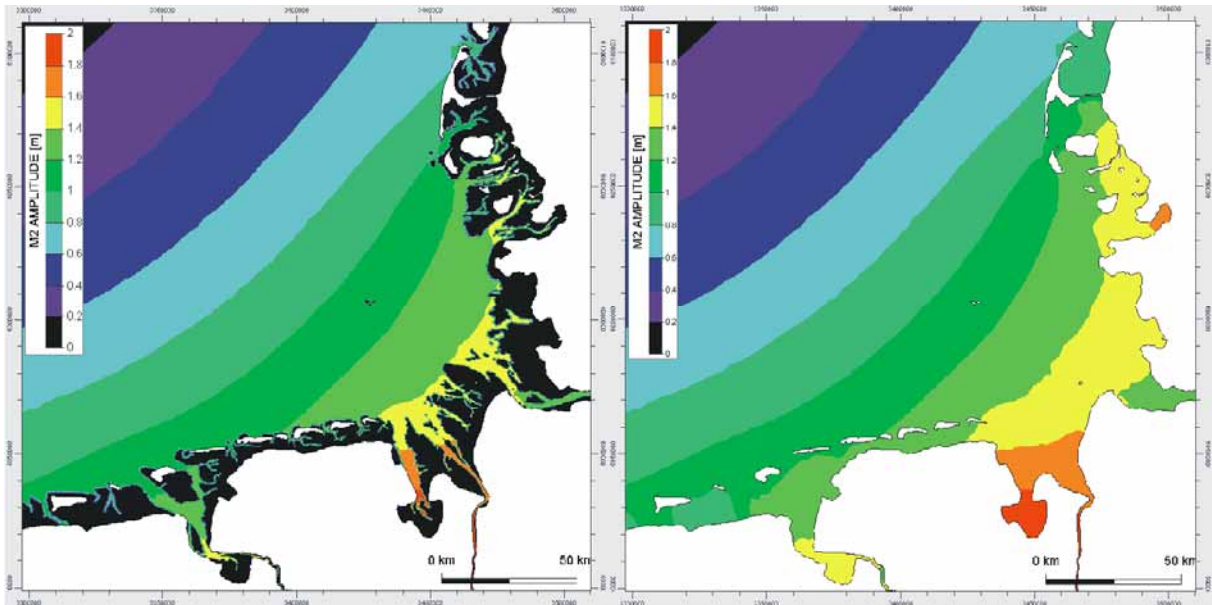
Zur Berechnung der Wasserspiegelauslenkung wurden die Partialtiden M2, M4, M6, M8, K1, O1 und S2 durch die BAW für das Grobmodell flächenhaft bereitgestellt. Um daraus an jedem Ort des Modellgebietes die Gezeitenströmungen mit nsea100 zu ermitteln, ist eine Ergänzung der Daten notwendig. Das dafür im Rahmen dieses Forschungsprojektes entwickelte Verfahren wird im Folgenden kurz beschrieben.

Die von der BAW angewendete Partialtidenanalyse liefert nur für ständig mit Wasser bedeckte Gebiete plausible Kennwerte. Dadurch liegen auf Wattflächen keine Amplituden und Phasen vor bzw. haben den Wert Null. In der linken Grafik in Abbildung 5-6 ist dies am Beispiel der M2-Amplitude dargestellt. Mit dieser Datengrundlage kann deshalb keine Gezeitenströmungen auf Grundlage des Wasserspiegelgradienten für Wattflächen berechnet werden.

Daher wurde ein automatisiertes Verfahren entwickelt, um Partialtidenkennwerte über Wattflächen zu erzeugen. Mit einem kombinierten Verfahren aus der Extrapolation in einer Ebene und der Shepard-Interpolation werden die Amplitude und die Phase für nicht benetzte Gitterknoten berechnet. Die Berechnung berücksichtigt dadurch den lokalen Gradienten von Partialtidenkennwerten um einen Gitterknoten. Abschließend werden die ursprünglichen BAW-Werte mit den extrapolierten Werten zusammengeführt und ein Datensatz an Partialtidekennwerten für das gesamte Modellgebiet erzeugt.

Beispielhaft ist das Ergebnis dieses Verfahrens für die Amplitude der M2-Partialtide in Abbildung 5-6 links dargestellt, die schwarzen Flächen entsprechen den trockenfallenden

Gebieten, auf denen die Amplitude Null ist. Die rechte Grafik zeigt die extrapolierten Werte. Auf diese Weise wurden die aus dem **TP3** bereitgestellten Partialtiden bearbeitet.



**Abbildung 5-6: M2-Amplitude – links: Werte aus dem BAW-Modell; rechts extrapolierte Werte für das Simulationssystem nsea100**

### 5.2.3.6 Entwicklungsstand des Simulationssystems

Zum derzeitigen Zeitpunkt wurde das Simulationssystem nsea100 in einer ersten Version aufgebaut. Damit ist es möglich, die gezeiteninduzierte Morphodynamik für einen Zeitraum von 100 Jahren stabil zu rechnen. Die Rechenzeit beträgt auf einem durchschnittlichen Bürorechner für das Grobmodell mit einer Sedimentfraktion etwa eine Woche.

Im weiteren Projektverlauf werden Seegangsszenarien, die den meteorologischen Einfluss repräsentieren, entwickelt und implementiert. Parallel dazu werden dem Simulationsmodell Unterhaltungsstrategien in den Ästuaren von Elbe, Ems und Weser hinzugefügt. In einem letzten Schritt des Modellaufbaus wird Wellenbrechen in der Brandungszone modelliert.

## 5.3 Modellsteuerung

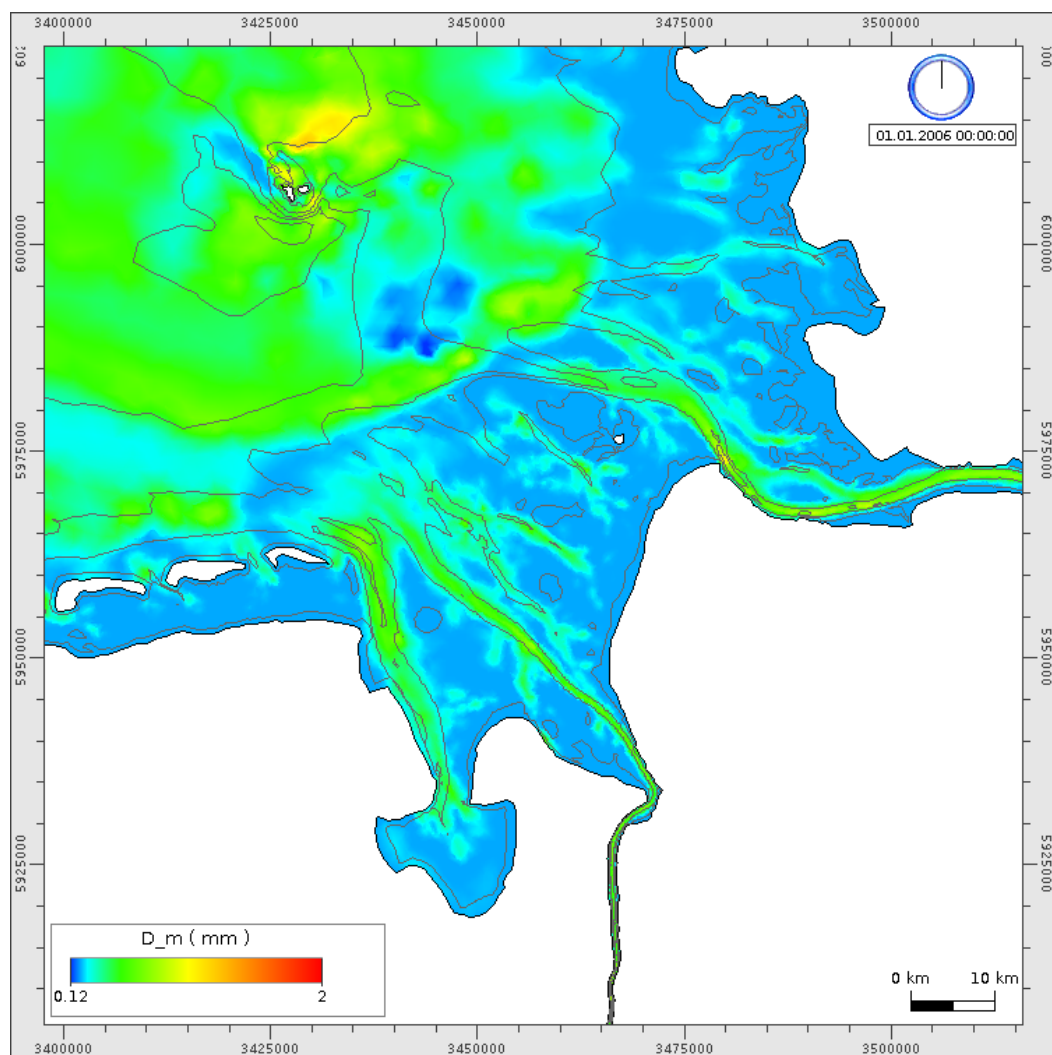
### 5.3.1 Rand- und Anfangsbedingungen

Die numerischen Simulationsmodelle werden mit vorgegebenen Anfangsbedingungen initialisiert und über Randwerte angetrieben. Um die Hydrodynamik des Wasserkörpers vollständig zu beschreiben, wäre ein globales Modell notwendig. Wird nur ein Teilgebiet betrachtet, so wird die Steuerung über Randbedingungen realisiert. An solchen offenen (see-

seitigen) Rändern müssen zeitvariable Werte vorgegeben werden. Die wesentlichen treibenden Kräfte für die Dynamik des Wasserkörpers in der Nordsee sind die Mitschwingungszeiten aus dem Nordatlantik und die meteorologischen Antriebe wie Wind und Luftdruck. Für die hydrodynamischen Größen entstammen die hier verwendeten Werte im Wesentlichen Klimatologien oder übergeordneten Modellen, nur bei der Modellierung von Projektionen der Klimaänderung werden zukünftig Ergebnisse der Forschungsprojekte KLIWAS / KLIMZUG Nord genutzt.

Für den Aufbau von Detailmodellen, werden Seegangsfelder, Strömungsgeschwindigkeiten, Wasserspiegellagen, Salzgehalt und Sedimentkonzentrationen aus dem übergeordneten Modell interpoliert und als Startbedingungen genutzt.

Die Rand- und Anfangswerte für die morphodynamischen Größen (Bathymetrie, Sedimentologie und Bodenformen) werden aus dem Bodenmodell erzeugt. Als Beispiel ist in Abbildung 5-7 der berechnete mittlere Korndurchmesser dargestellt.



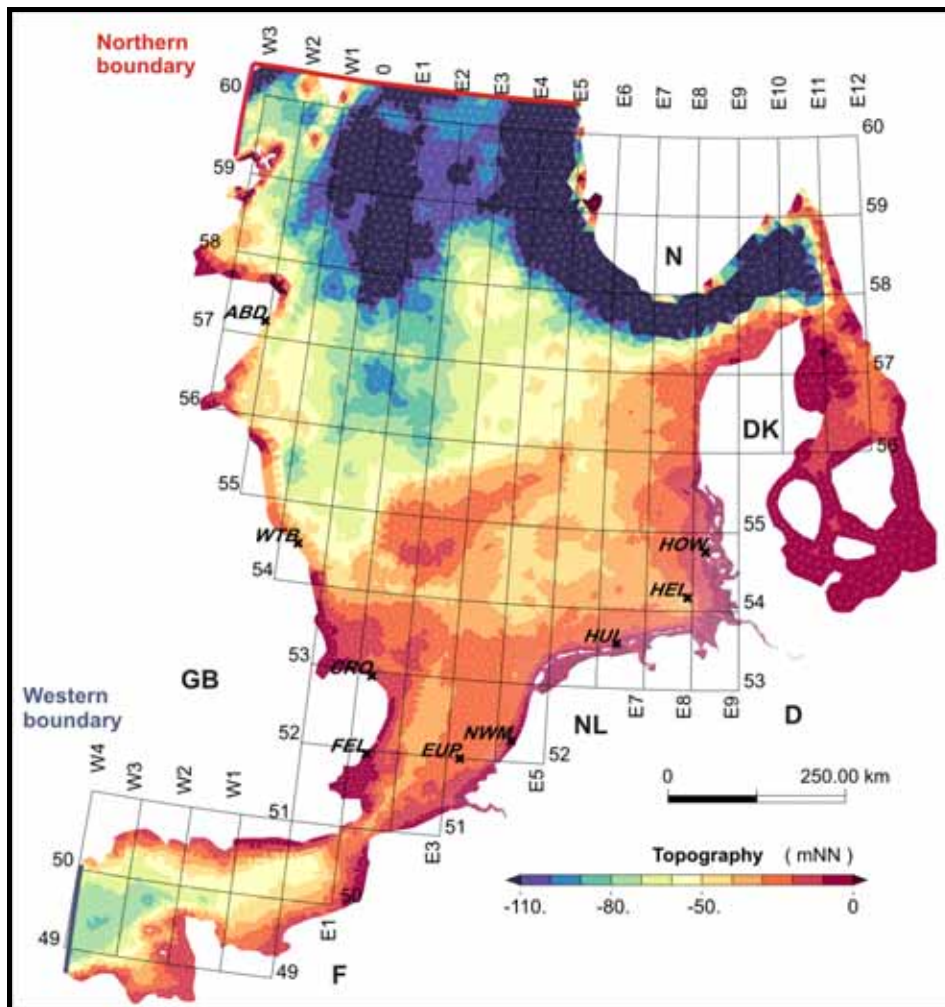
**Abbildung 5-7: Aus den sedimentologischen Eingangsdaten berechneter mittlerer Korndurchmesser**

Details zu den Rand- und Anfangswerten werden im Anhang (Abschnitt 11.2.1) gegeben.

### 5.3.2 Modellausdehnungen und –auflösung

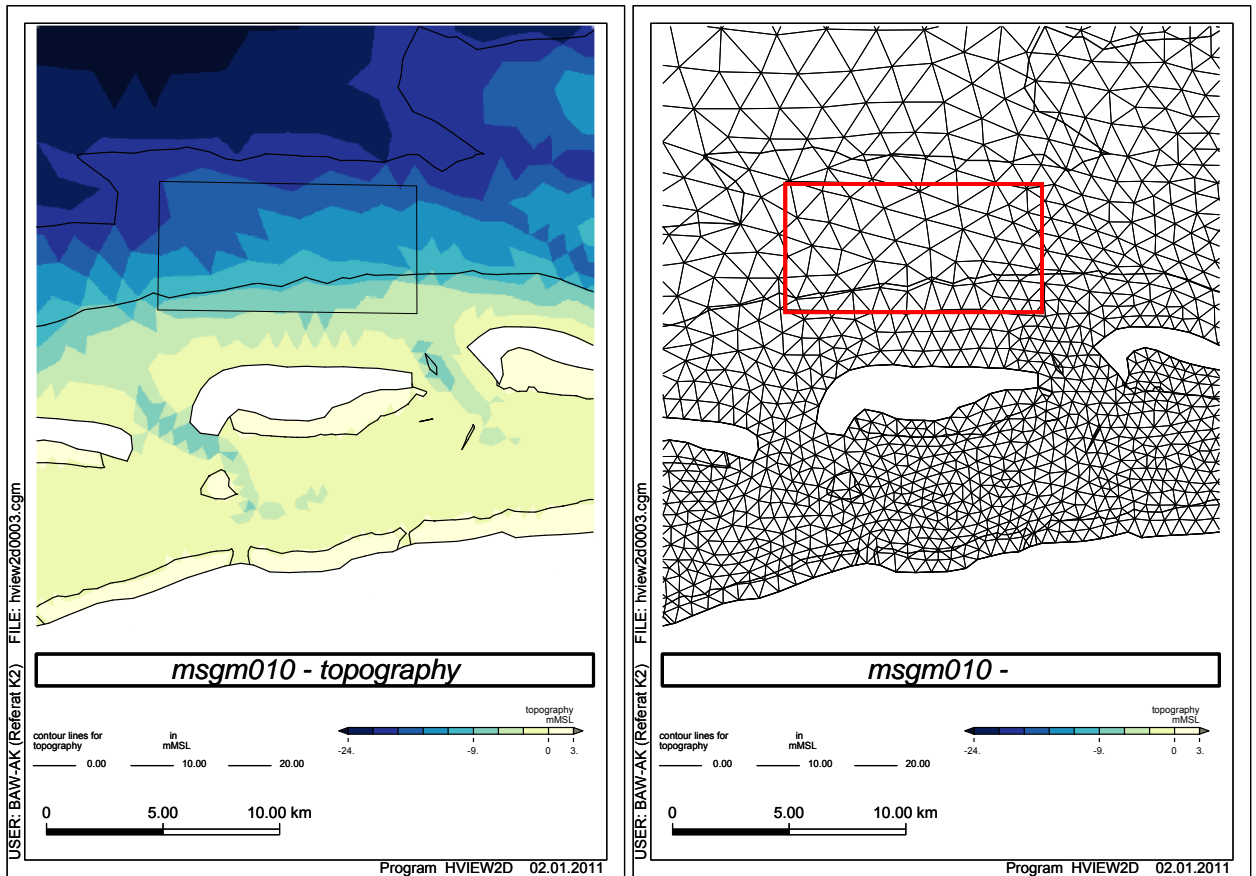
#### 5.3.2.1 Nordseemodell

Das Modellgebiet umfasst sowohl die Nordsee als auch den Englischen Kanal und die westliche Ostsee (Abbildung 5-8).



**Abbildung 5-8 Darstellung des gesamten Modellgebiets**

Das von der BAW erstellte Gitternetz liegt als Grob- und als Feinmodell vor. In der ersten Phase des Projekts wurde von den Projektpartnern und der BAW zunächst vornehmlich das Grobmodell genutzt. Dieses besteht aus 39.651 Knoten, die insgesamt 74.446 Dreieckselemente mit einer Kantenlänge von ca. 90 m bis ca. 18 km bilden. Die damit erreichte Auflösung ist in Abbildung 5-9 exemplarisch für den Bereich Ostfrieslands dargestellt.



**Abbildung 5-9 Gitternetzauflösung des Grobmodells im Bereich Ostfriesland (links: Bathymetrie, rechts: Gitternetz)**

Die Priele, Rinnen und Ästuar des Modellgebietes sind in diesem Modell somit verhältnismäßig grob diskretisiert. Eine höhere Auflösung soll durch die Verwendung des Feinmodells in der zweiten Projektphase erreicht werden.

### 5.3.2.2 Detailmodelle

Besonders ausgewählte Bereiche innerhalb der Deutschen Bucht (z. B. sedimentologische Teilgebiete\*) lassen sich im Prinzip berechnen durch:

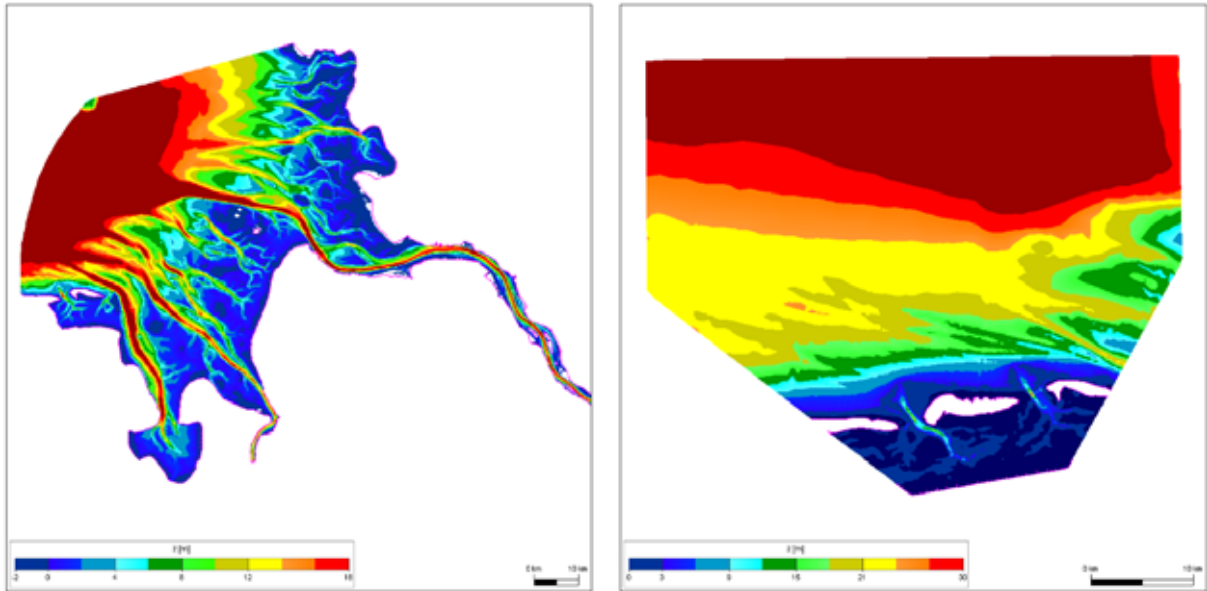
- eine Gebietsverfeinerungen innerhalb des Nordseemodells oder
- Aufbau und Betrieb separater Detailmodelle

Die sehr unterschiedlichen räumlichen Skalen der zu betrachtenden morphodynamischen Prozesse erfordern entsprechende Anpassungen der räumlichen Auflösung der numerischen Simulationsmodelle. Solche Verfeinerungen lassen sich auf der Basis unstrukturierter Berechnungsnetze innerhalb des gesamten Nordseemodells oder durch den Aufbau von Modellhierarchien realisieren.

Detailmodelle werden im Umfeld der Fokusgebiete für die Analyse besonderer morphodynamischer Zusammenhänge als Teil einer zugehörigen Modellhierarchie



aufgebaut. Im zurückliegenden Zeitraum sind die Detailmodelle für den Bereich der Elbmündung und vor Spiekeroog mit einer deutlich höheren Elementauflösung als das Nordseemodell aufgebaut worden.



**Abbildung 5-10: Tiefenverteilung der Detailmodelle Elbmündung und Spiekeroog**

Das Modell der Elbmündung hat 45.123 Knoten mit einer Elementgröße von ca. 50 m in den Rinnen und 1000 m im Tiefwasser (Abbildung 5-10). Es soll modellgestützte morphodynamische Veränderungen in der Außenelbe analysieren.

Das Detailmodell um Spiekeroog hat 93566 Knoten mit einer Elementgröße von ca. 2000 m im Tiefwasser und bis zu 15 m im Küstenbereich.

#### 5.4 Validierung der Simulationsergebnisse

Zur Beurteilung der Güte numerischer Simulationsergebnisse werden diese auf der Basis von Messwerten validiert. Ausgehend von der Quantifizierung der Unschärfe der Eingangsdaten über die Abschätzung der Fortpflanzung dieser Unsicherheiten im Rahmen der Simulation, werden aggregierte Kennwerte zur Modellvalidierung herangezogen.

Die Validierung der Modelle berücksichtigt auf der einen Seite den Modellcharakter selbst und ist in der Regel mehrstufig aufgebaut. Insbesondere bei den prozessbasierten Simulationsmodellen müssen alle Teilkomponenten, Hydrodynamik, Transport und Bodenevolution schrittweise validiert werden.

Mit der Validierung soll gezeigt werden, wie gut die verwendeten Modelle die Natur nachbilden können. Durch die Validierung, bzw. die Kenntnis über die Güte des Modells, können die Ergebnisse mit deren Unsicherheiten erst eingeschätzt werden und geben Hinweise über die Prognosefähigkeit der Modelle.

### 5.4.1 Gemeinsame Validierungsstrategie

Eine gemeinsame Validierungsstrategie beinhaltet die Parameter, zu denen auch Messdaten zur Verfügung stehen. Diese sind Wasserstand, Strömung, Salzgehalt, Sedimentkonzentration und Seegang. Eine Validierung der morphodynamischen Parameter, die Kernziel des Projektes sind, wird im Kapitel 6 vorgenommen.

#### Wasserstand:

Der Wasserstand spielt eine Schlüsselrolle in den in diesem Projekt durchgeführten Modellsimulationen: er stellt die treibende Kraft dar (Potenzial) und ist gegenüber den anderen Parametern einfacher zu kalibrieren. Tatsächlich ist er bis zu diesem Zeitpunkt der einzige Parameter, auf den kalibriert wird.

Die Validierung erfolgte an ausgewählten Pegelpositionen. Dazu wurden die Daten von 92 Pegelstationen aus sechs Nordseeanrainerstaaten zusammengetragen und homogenisiert (weitere Informationen siehe Kapitel 5 des Dokumentes „Validierung Nordseemodell – Teil 1: Allgemeines“ im Anhang 11.2). Nach einer Sichtung und Plausibilisierung der etwa 2000 zur Verfügung stehenden Pegeljahre an Wasserstandsaufzeichnungen, wurde eine Auswahl aufgrund der Qualität der Zeitreihen getroffen. Das wesentliche Kriterium für die Auswahl war ein möglichst störungsfreier Betrieb sowie die Bedingung, dass der Pegel nicht oder nur extrem selten Trocken fallen darf.

Folgende Kennwerte wurden aus den Messungen und den betriebenen Simulationsmodellen errechnet:

- Statistische Kennwerte, die den gesamten Wasserstandsverlauf beinhalten:
  - mittlerer Fehler\* (ME)
  - Standardabweichung des Fehlers\*
  - Maximaler Fehler\* (max E)
  - Mittlerer Betragsfehler\* (MAE)
  - Wurzel aus mittlerem quadrierten Fehler\* (RMSE)
  - Mittlere Laufzeitverschiebung der Tidewelle
- Tidekennwerte:
  - Mittlere Differenz des Tideniedrigwassers
  - Mittlere Differenz des Tidehochwassers
  - Mittlere Differenz des Tidehubs
  - Mittlere Differenz des Tidemittelwassers

Zusätzlich werden Partialtiden (Amplituden und Phasen) und deren Differenzen aus Messung und Modellsimulation ermittelt. Sortiert nach der mittleren Amplitude (Betrag in cm in Klammern) über die verwendeten Pegel und damit sortiert nach ihrer Bedeutung sind diese: M\_2(120 cm), S\_2 (37 cm), N\_2 (21 cm), K\_2 (14 cm), O\_1 (11 cm), M\_4 (10 cm),

L\_2 (9 cm), Mu\_2 (9 cm); K\_1 (8 cm), MS\_4 (7 cm), Nu\_2 (7cm),  $\lambda_2$  (4 cm), Q\_1 (4 cm), MK\_4 (3 cm), MN\_4 (3 cm), 2N\_2 (3 cm) und P\_1 (3 cm).

Die Darstellung all dieser Kennwerte für alle Pegelstationen und den entsprechenden Stationen der Simulationsmodelle würde sehr viele Seiten umfassen. Da es sich hier nicht um ein hydrodynamisches Projekt handelt, diese Analysen aber unverzichtbar zur Beurteilung der Qualität der Simulationsergebnisse sind, soll der Versuch gemacht werden, diese Abbildungen / Diagramme interaktiv über das Internet verfügbar zu machen. Die wichtigsten Kenngrößen werden über Modellkennblätter (Anhang 11.2) dargestellt.

Beurteilung der Ergebnisse aus der Wasserstandsvalidierung:

Siehe gesondertes Validierungsdokument [Nordsee-Modellvalidierung Teil1 2011-03-24.pdf](#)

Strömung, Salzgehalt, Sedimentkonzentration, Seegang:

Für diese Parameter liegen bereits einige Messdatensätze vor. Diese müssen jedoch noch homogenisiert und aufbereitet sowie weitere Messdatensätze angefordert werden. Schließlich muss im weiteren Projektverlauf noch eine gemeinsame Auswertestrategie aufgestellt, die Auswertung durchgeführt und dokumentiert werden.

Gemeinsame Besprechung der Modellierer am 14.1.2011 zur methodisch einheitlichen Auswertung. Vergleich der Ergebnisse mit Naturdaten sowie der MD-Modellergebnisse untereinander (MD-Multi-Modell-Ansatz). Erste Version eines gemeinsamen Validierungs- / Kalibrierungsdokumentes.

#### **5.4.2 Spezifische Validierungsstrategie der datenbasierten Simulation**

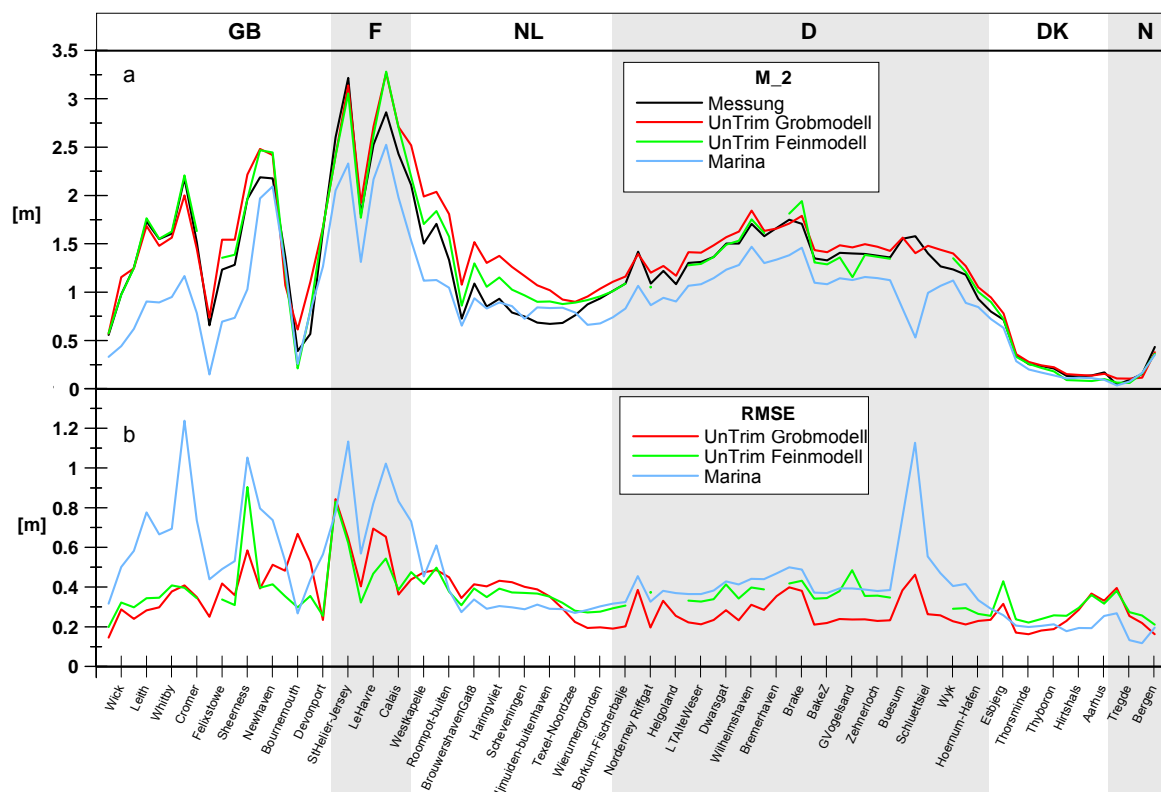
Das datenbasierte HINDCAST<sup>\*</sup>-Simulationsmodell DASIMO basiert auf den Daten und Methoden des funktionalen Bodenmodells. Da im Prinzip alle zur Verfügung stehenden Daten Grundlage des Modells sind, fehlen unabhängige Validierungsdaten. Sollen neue Daten, z.B. Vermessungsdaten, in das funktionale Bodenmodell aufgenommen werden, so wird deren Plausibilität bzgl. des aktuellen Datenbestandes geprüft. Liegt der Datensatz räumlich und zeitlich so, dass in der Vergangenheit und der Zukunft bzgl. des einzupflegenden Datensatzes Daten verfügbar sind, so werden zunächst an den Stützstellen der hinzuzunehmenden Daten ein interpolierter Wert bestimmt und zur Plausibilisierung der gemessenen herangezogen. Liegen nur Datenwerte in der Vergangenheit, ist also der einzupflegende Datensatz der Neueste, so wird eine Ausgleichsfunktion auf der Basis aller Daten generiert und mit dieser der neue Datenpunkt extrapoliert. Liegt die Differenz zwischen extrapoliertem und gemessener Größe im Rahmen der beobachteten Varianz, so kann der Messwert als plausibel eingestuft werden.

Die bestimmten morphologischen Geschwindigkeiten können auf der Grundlage von Stichproben manuell geprüft werden.

Für komplexere Parameter, wie mittlere Korndurchmesser, Kornverteilungen oder Bodenparameter, wird erwartet, dass prozessbasierte Simulationsergebnisse und daraus abgeleitete Indikatoren eine entsprechende Plausibilisierung bzw. Validierung ermöglichen.

### 5.4.3 Spezifische Validierung der prozessbasierten Simulationen

Eine spezifische Validierung der prozessbasierten Modelluntersuchungen erfolgt in einem gesonderten Dokument [Nordsee-Modellvalidierung Teil1 2011-03-24.pdf](#).



**Abbildung 5-11: Vergleich der M2-Partialtide / mittlerer Fehler: Messung, UnTRIM (Grobmodell / Feinmodell) und MARINA**

Beispielhaft wird in Abbildung 5-11 der Vergleich der M2-Partialtide und des mittleren Fehlers zwischen den Analysen aus Pegelaufzeichnungen und zwei UnTRIM - Simulationen (Grobmodell, Feinmodell) sowie Ergebnissen aus dem Simulationsmodell MARINA dokumentiert.

Neben den Strömungsgeschwindigkeiten, die aus Tide und Windschub entstehen, hat insbesondere das Seegangsgeschehen eine starke Wirkung auf die Mobilisierung von Sedimenten. Zur Validierung der Seegangsmodelle standen für das Jahr 2006 Seegangsmessungen an den Bojen WSB, NSB, Helgoland, FINO und Elbe zur Verfügung. In der Abbildung 5-12 sind die Lage der Bojen sowie die simulierte Wellenhöhenverteilung in der Deutschen Bucht am 1. Januar 2006 dargestellt. Der Wind kam zu diesem Zeitpunkt ungefähr aus westlicher Richtung bei einer Windstärke von ca. 10 m/s (Pfeile).

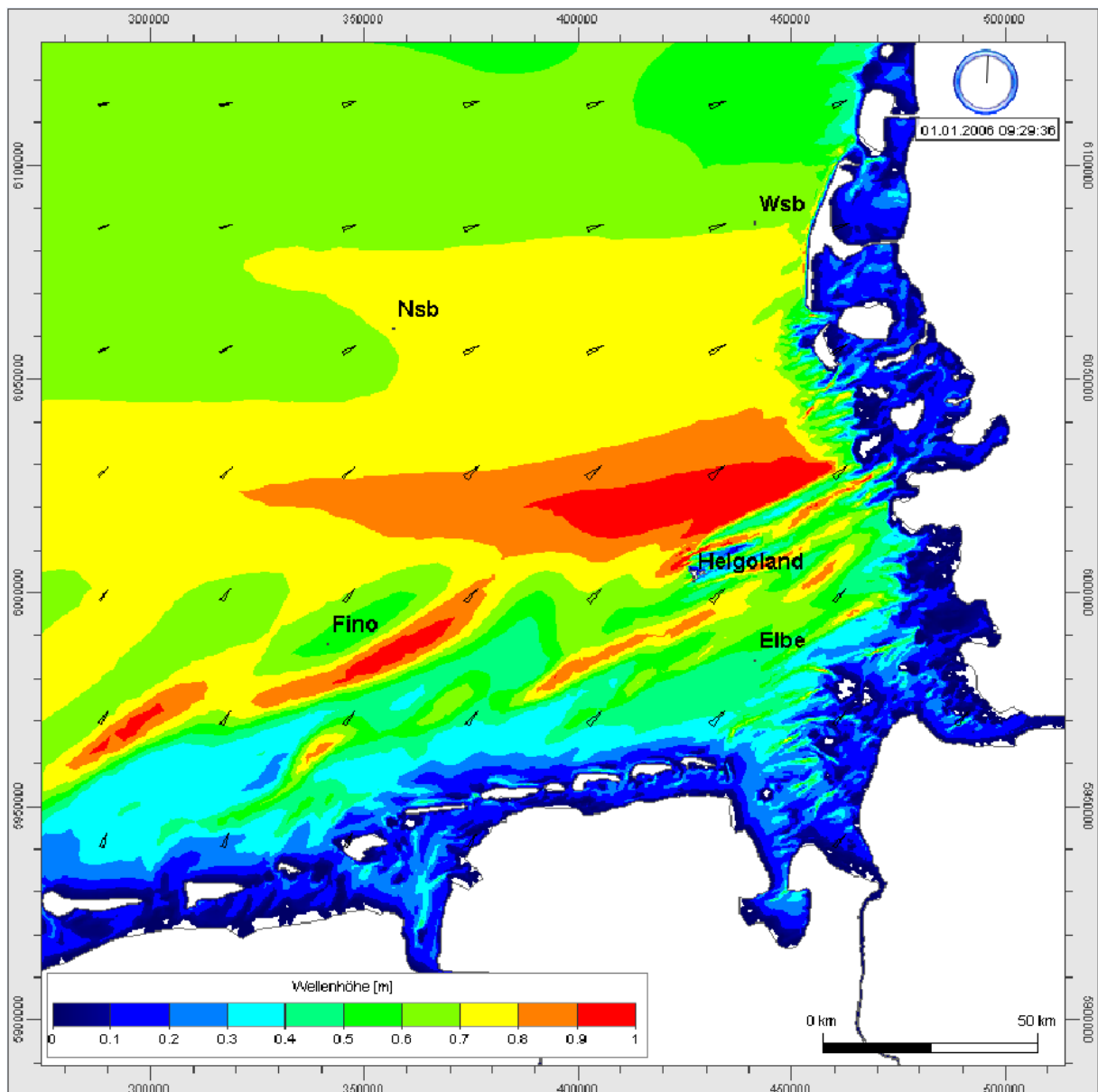
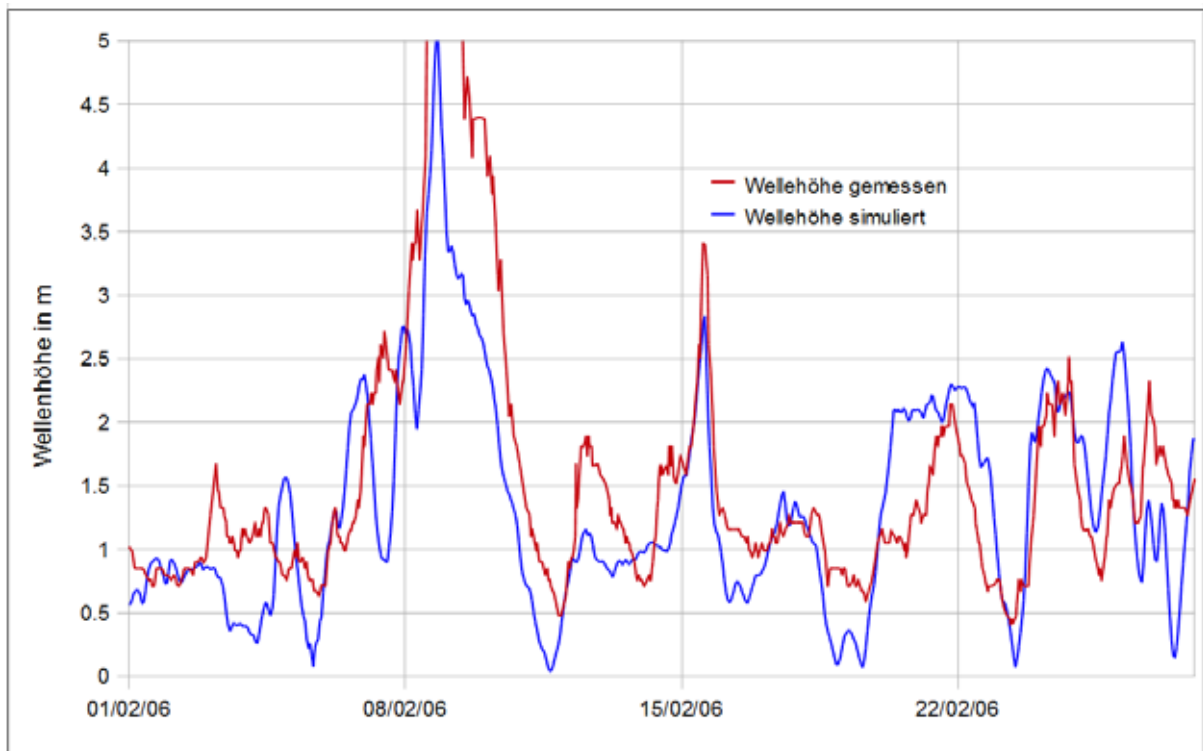


Abbildung 5-12: Lage der Bojen zur Seegangsmessung (Seegang: 1.1.2006-09:28), Windfeld und resultierende Wellenhöhenverteilung (MARINA)

Die Analyse der Unterschiede zwischen den punktuell gemessenen und simulierten Wellenparametern erfolgte auf der Basis der Zeitreihen. Die in der Abbildung 5-13 exemplarisch gegenübergestellte gemessene und berechnete Wellenhöhe an der Boje NSB zeigt, im Rahmen der Genauigkeit der Eingangsgrößen wie z.B. dem Windfeld, eine gute Übereinstimmung.



**Abbildung 5-13: Vergleich berechneter zu gemessener Wellenhöhen an der Boje NSB**

Die Plausibilisierung und Validierung morphodynamischer Simulationsmodelle erfolgt in der Regel in einem mehrstufigen Prozess. Hierzu gehört zum einen die Analyse der Güte der Modelleingangsdaten, aber auch funktionale Modelltest, der Vergleich zu Laboruntersuchungen und nicht zu letzt die Plausibilisierung auf der Basis von Naturdaten. Als Indikatoren für die Modellplausibilisierung werden unter anderem simulierte und gemessene

- Bodenformparameter
- Kornverteilungen
- Morphologischer Raum
- Hypsometrie

verwendet.

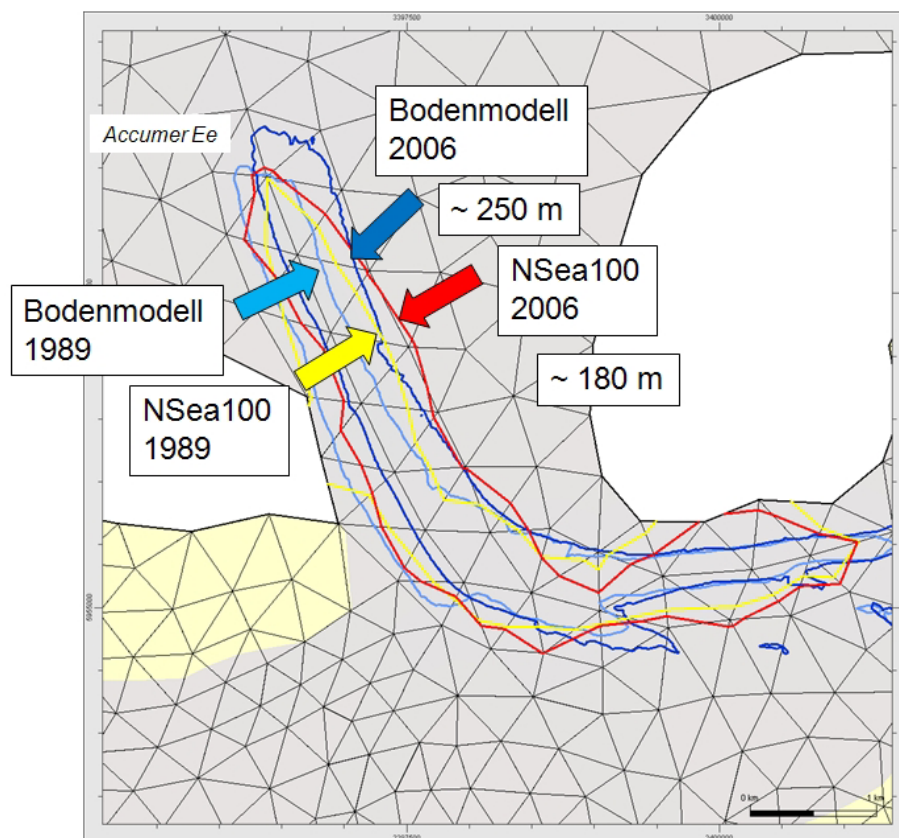
#### 5.4.4 Spezifische Validierung der prozessorientierten Simulation

Das Langfristsimulationsmodell nsea100 ist als prozessorientiertes Modell speziell dafür konzipiert, eine morphodynamische Entwicklung über einen langen Zeitraum zu berechnen. Da bei einem solchen Modell vorrangig die Wirkung der treibenden Kräfte modelliert wird,

baut die Validierungsstrategie auf dem Vergleich und der Analyse zwischen gemessener und berechneter Morphodynamik auf.

Ein wichtiger Bestandteil der Verifikation ist die Fortsetzung der Partialtidensynthese in die Zukunft. Zunächst wird angenommen, dass die zur Berechnung der Gezeitenströmungen verwendeten Partialtiden über den angestrebten Simulationszeitraum von 100 Jahren konstant bleiben. Dagegen kann eingewendet werden, dass Veränderungen der Gewässersohle und der Klimawandel zu einer Änderung der Werte führen. Es muss daher untersucht werden, ob und inwieweit die Partialtidenkennwerte Änderungen unterworfen sind.

Die Strategie zur Validierung wird im weiteren Projektverlauf konkretisiert und mit dem gemeinsamen Validierungs- und Kalibrierungsdokument abgestimmt. Ein Beispiel zu einer ersten Plausibilisierung ist in Abbildung 5-14 für die Accumer Ee dargestellt. Hier wird die Verlagerung der Rinne anhand der 8-m-Tiefenlinie, die aus dem funktionalen Bodenmodell gewonnen wurde, mit einem Simulationsergebnis von nsea100 verglichen. Der Vergleichszeitraum von 1989 bis 2006 zeigt zunächst eine tendenzielle Übereinstimmung zwischen Modell und Messung. Allerdings ist die Geschwindigkeit im Modell noch zu gering und mit dem hier verwendeten Gitternetz des Grobmodells können die Prozesse nur unzureichend abgebildet werden.



**Abbildung 5-14: Vergleich gemessener (Bodenmodell) zu berechneter (nsea100) Sohlentwicklung anhand der 8-m-Tiefenlinie**

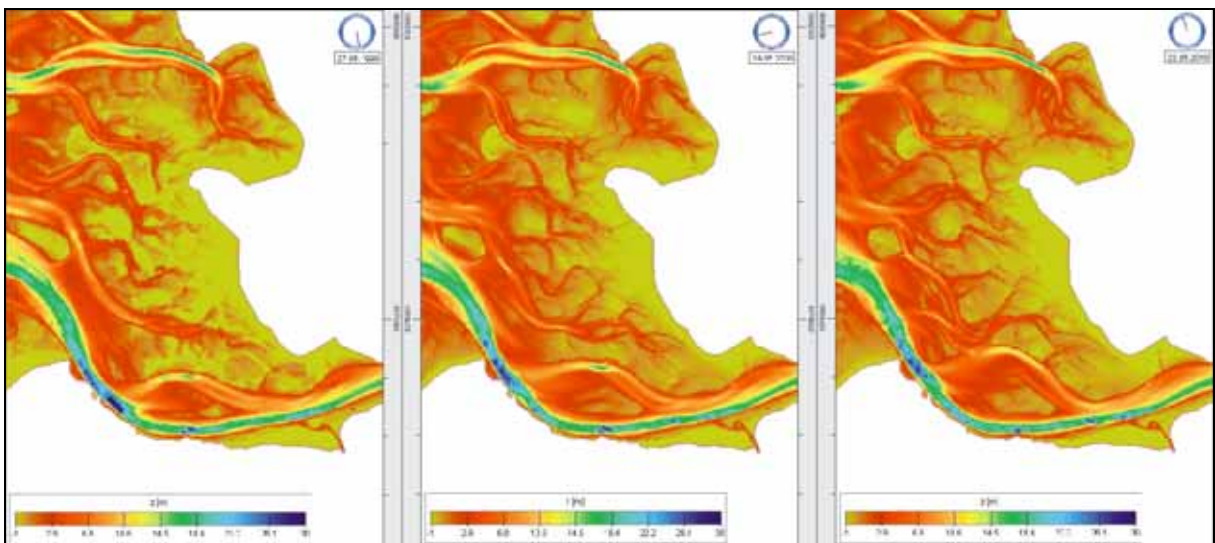
## 6 Ergebnisse der morphodynamischen Simulationen

Unterteilung der morphodynamischen Simulationen in:

- datenbasierte Modellierung
- prozessbasierte Modellierung und
- prozessorientierte Modellierung

### 6.1 Datenbasierte Simulation

Die datenbasierte HINDCAST\*-Simulation der morphodynamischen Entwicklung in der Deutschen Bucht kann in großen Bereichen für den Zeitraum von 1980 bis 2010 erfolgen. Für Gebiete, in denen auch noch ältere Vermessungsdaten vorlagen, lassen sich auch längere Zeiträume betrachten. Beispielsweise lagen für das Elbeästuar Tiefenverteilungen ab 1972 vor. Die Tiefenentwicklung im Bereich der Elbmündung (Medemrinne - Klotzenloch) ist exemplarisch für die Jahre 1990, 2000 und 2010 in der Abbildung 6-1 dargestellt.



**Abbildung 6-1: Bathymetrieentwicklung in der Elbmündung (1990, 2000, 2010)**

Sehr gut erkennbar ist die Entwicklung der Medemrinne in den letzten 20 Jahren, die zu großräumigen Veränderungen der Strömungs- und Sedimenttransportverhältnisse geführt hat.



## 6.2 Prozessbasierte Simulation

### 6.2.1 Sensitivitätsstudien

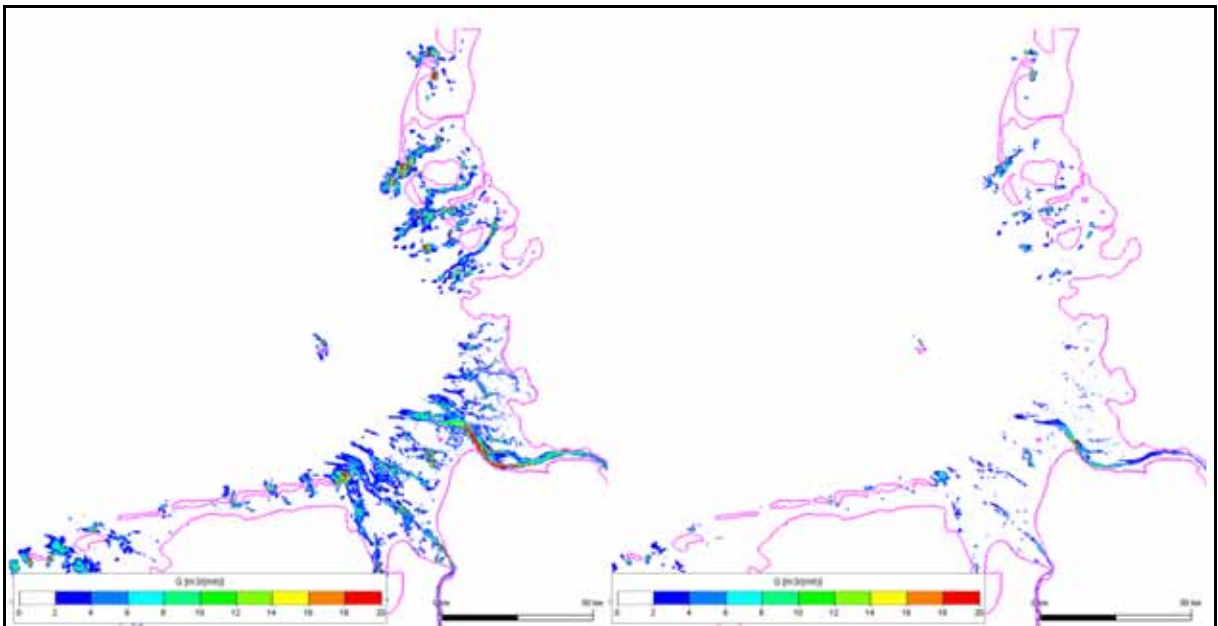
Sensitivitätsstudien dienen zur Darstellung der Abhängigkeiten der Simulationsergebnisse von den vorgegebenen Parametern (z. B. Randwerte, Bathymetrie, Reibung, Sedimentzusammensetzung). Diese (Vor-)Untersuchungen sind wichtig zur Einordnung der Ergebnisse bezüglich ihrer Aussagegenauigkeit in Abhängigkeit zu den Eingangsdaten / Parametereinstellungen.

Sensitivitätsstudien wurden sowohl an den realen Modellen der Nordsee und den Detailmodellen als auch an idealisierten Modellen durchgeführt. Die komplexe Geometrie sowie die hydro- und sedimentologischen Parameter der realen Modellkonfigurationen erlauben in der Regel eine grobe Abschätzung der örtlichen Variation geänderter Modellparameter und Randbedingungen. Eine konkrete Zuordnung der variierten Parameter zu deren Wirkung fällt bei realen Konfigurationen häufig schwer.

Für die morphodynamischen Sensitivitätsuntersuchungen wurden

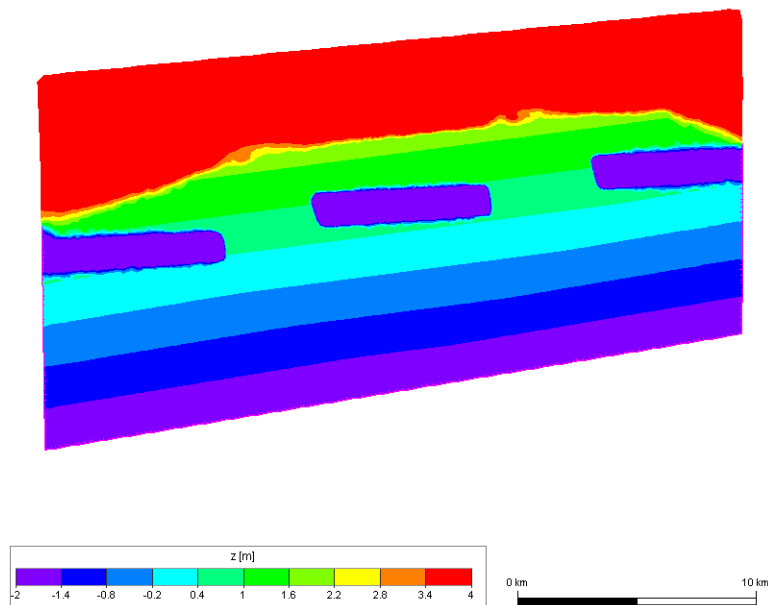
- die Bathymetrie der deutschen Bucht und
- die globalen Kornparameter variiert.

Analysiert wurden zunächst die Veränderungen in den resultierenden Transporten, um in einem zweiten Schritt die Wirkung auf die Sedimentations- und Erosionsraten abzuschätzen.



**Abbildung 6-2: Resultierende tideinduzierte Sedimenttransportraten bei konstantem mittleren Korndurchmesser von 0.25mm und 2mm (MARINA)**

In der Abbildung 6-2 lassen sich beispielsweise die Veränderungen der resultierenden tideinduzierten Sedimenttransportraten bei einer Verachtfachung des mittleren Korndurchmessers ablesen. Hierbei fällt auf, dass die resultierenden Transporte bei einem relativ groben Material im Elbeästuar im Vergleich zu Weser und Ems immer noch sehr groß sind. Um eine bessere Zuordnung von Ursache und Wirkung bei den Sensitivitätsuntersuchungen zu erreichen wurde zusätzlich eine idealisierte Modellbathymetrie für den Bereich der ostfriesischen Insel Spiekeroog aufgebaut. Das Modell hat 31.223 Knoten mit einer mittleren Elementgröße von ca. 50 m zwischen den Inseln. Die Küstenlinie von Spiekeroog und den Nachbarinseln ist idealisiert. Der Meeresboden ist eine Ebene vom Festland bei +2 m ü. NN, linear abfallend mit einer Steigung von ca. 0.035%.



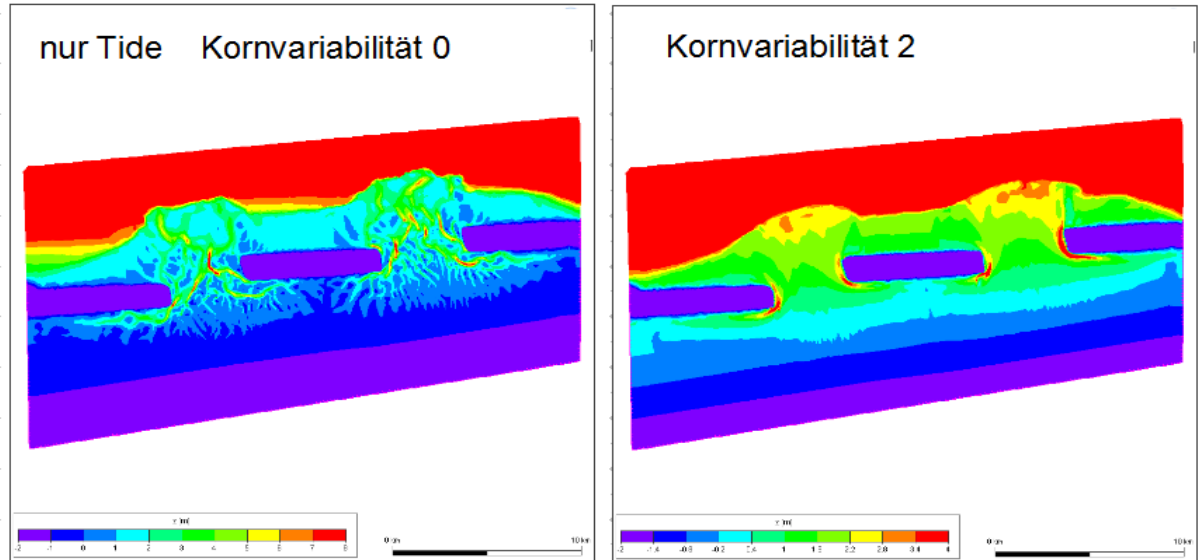
**Abbildung 6-3 Bathymetrie und Ausdehnung des idealisierten Detailmodells Spiekeroog**

Unter anderem wurden Sensitivitätsuntersuchungen der morphologischen Entwicklung, insbesondere unter dem Aspekt der Ausprägung von Verästelungen der Tiderinnen zwischen den Inseln, bezüglich folgender Parametervariationen durchgeführt:

- Einfluss des Windes und Seegangs
- Einfluss der Randbedingungen: Verschiebung des Mittelwassers +/- 1 m
- Einfluss der Randbedingungen: Vergrößerung der Amplitude um +/- 50%
- Einfluss der Kornvariabilität
- Einfluss der Bodenrauheit nach Strickler um  $k_{St} = +/- 5 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$

Für die Modellsteuerung wurden die hydrodynamischen Randbedingungen aus dem Nordseemodell übernommen. Exemplarisch ist in der folgenden Abbildung 6-4 der Einfluss der Kornvariabilität auf die Stärke der Verästelung der entstehenden Tiderinnen zwischen den Inseln dargestellt. Eine Kornvariabilität von 0 bedeutet hierbei ein Einkornmaterial von

1,5 mm und eine Variabilität von 2 die Verfügbarkeit von Körnern sehr unterschiedlicher Größe.



**Abbildung 6-4: Einfluss der Kornvariabilität auf die Bildung von Rinnen im Modell (Simulierte Bathymetrie nach 10 Jahren mit MARINA)**

### 6.2.2 Entmischung

Für kleinere Untersuchungsgebiete konnte gezeigt werden, dass mit einem morphodynamischen Modellsystem beobachtete sedimentologische Strukturen, ausgehend von einer mittleren Verteilung berechnet werden können (Abbildung 6-5). Daher wird auch für die Nordsee zumindest eine tendenziell richtige Entwicklung erwartet und in einer Systemstudie untersucht.

Ausgehend von einer aus 9 Fraktionen zusammengesetzten mittleren Kornverteilung ( $D_m = 0,28$  mm) wurde die Veränderung der Sedimentzusammensetzung berechnet, ohne eine Veränderung der Sohle zu berücksichtigen. Die Ergebnisse dieser Entmischung sind in Abbildung 6-5 dargestellt.

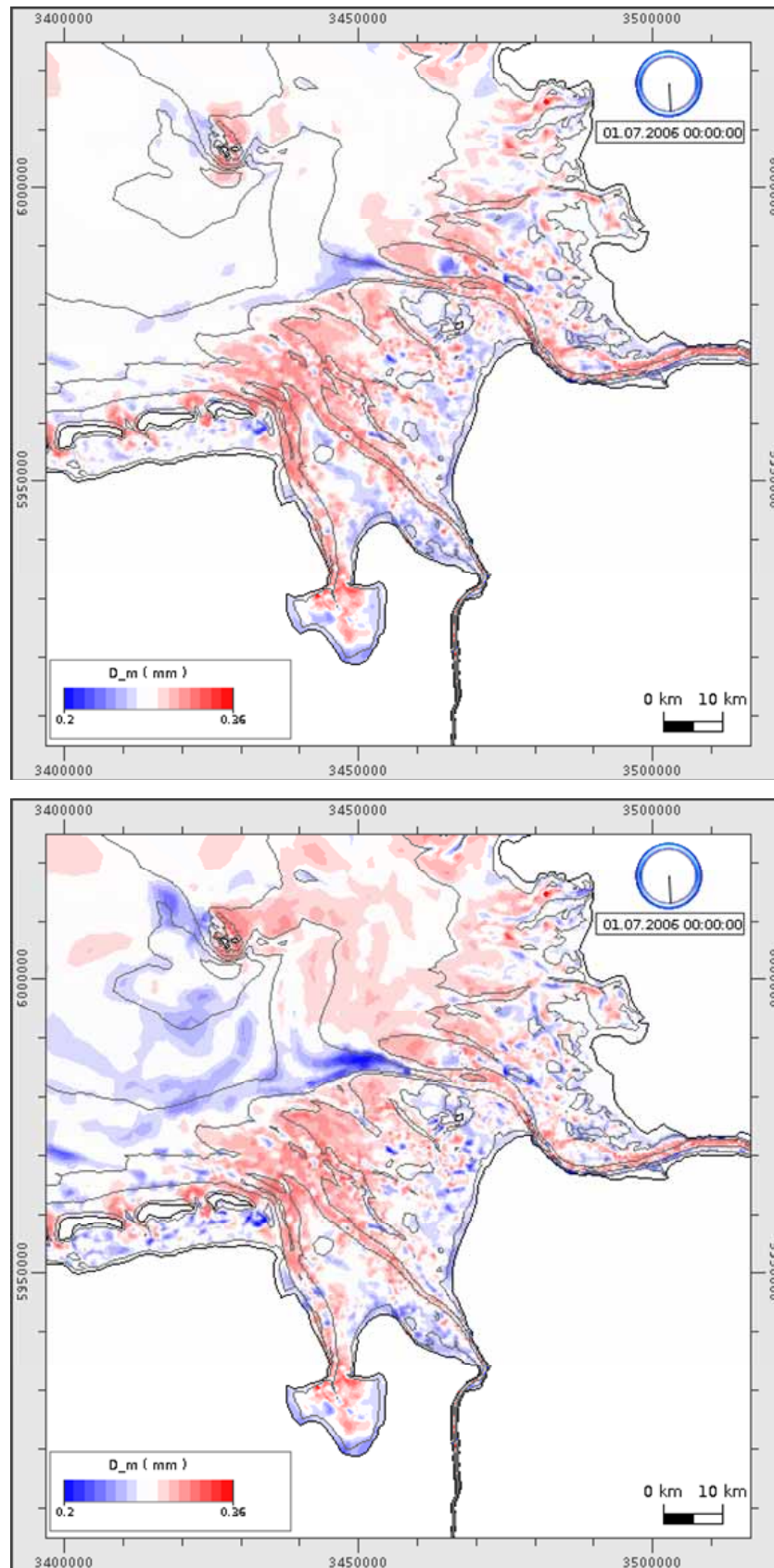
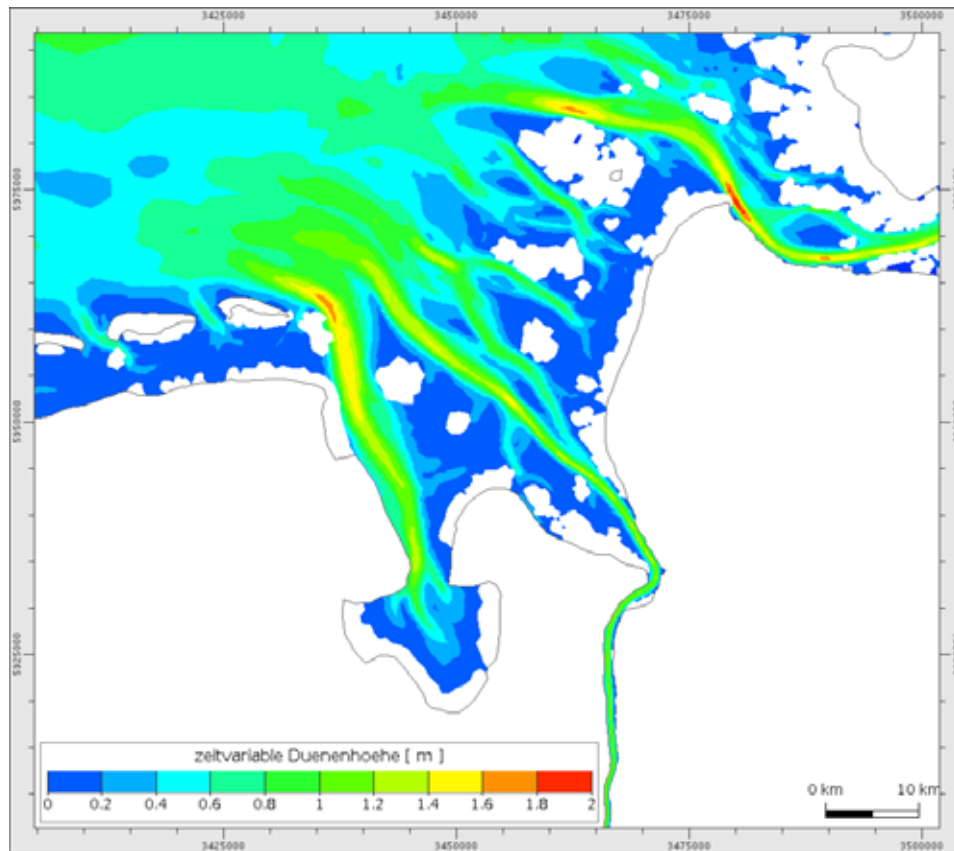


Abbildung 6-5 Entmischung eines mittleren Sedimentinventars ohne Seegang (oben) und mit Seegang (unten) mit UnTRIM-SediMorph

Der Vergleich mit den auf Basis des Bodenmodells berechneten mittleren Korndurchmessers (Abbildung 5-7) zeigt eine ähnliche räumliche Strukturierung. Es kommt zu einer erwarteten Akkumulation feineren Materials in den flacheren Bereichen (Jade, Außenweser, Nordfriesland), aber auch südlich von Helgoland findet eine Vorrangige Deposition feineren Materials statt. Der Vergleich zwischen den Modellläufen mit und ohne Seegang erlaubt auch eine Plausibilisierung der Seegangswirkung. Es kommt zur Änderung der großräumigen Strukturen, da durch die zusätzliche welleninduzierte Bodenschubspannung mehr Material umgelagert wird. So zeigen die Wattbereiche im ostfriesischen Bereich eine Zunahme feinen Materials, es sind jedoch auch Veränderungen im tieferen Bereich zu beobachten. Zu erwartende Effekte im Strandbereich („surf zone“) sind nicht zu beobachten und zeigen das Fehlen von brechenden Wellen im Modell auf.

### **6.2.3 Vorhersage von Bodenformen**

Basierend auf der Sedimentverteilung des Bodenmodells V.1 wurde die Möglichkeit zur Vorhersage von Dünenhöhen im Modellsystem UnTRIM-SediMorph erprobt. Abbildung 6-6 zeigt die Ergebnisse dieses ersten Anwendungsversuchs. Verglichen mit den von AufMod-B aufbereiteten Messungen werden die Dünenhöhen generell noch unterschätzt. Kleinskalige Strukturen können in der verwendeten groben Gitterdiskretisierung auch nur unzureichend wiedergegeben werden. Die Verteilung der Dünen zeigt jedoch bereits gute Übereinstimmung und die generelle Anwendbarkeit des Verfahrens.



**Abbildung 6-6 Vorhersage von Dünenhöhen (UnTRIM-SediMorph)**

#### **6.2.4 Transport von Schwebstoffen**

Bei der Betrachtung langfristiger morphodynamischer Entwicklungen ist der Suspensionstransport von geringerer Bedeutung im Vergleich zum Transport durch Geschiebe. Signifikante Tiefenänderungen auf Grund von Umlagerung schluffiger Sedimente werden nur im inneren der Ästuarer erwartet. Da jedoch auch die Ästuararmündungen als Fokusgebiete von Interesse sind, wurde im Rahmen einer Systemstudie die Verteilung der Suspensionsfracht der Ästuarer Ems, Weser und Elbe untersucht.

Es wurden die gemessenen Oberwasserabflüsse aus 2006 und mittlere Schwebstoffkonzentrationen von 20 mg/l für die Ems, 35 mg/l für die Weser und 38 mg/l für die Elbe vorgegeben (nach Gayer *et al.*, 2004) eingesteuert und das Modell über ein Jahr integriert. Die Schwebstoffkonzentration setzt sich dabei aus den drei Fraktionen Grobton, Feinschluff und Grobschluff zusammen. Die Wirkung des Seegangs wurde zunächst nicht berücksichtigt.

In Abbildung 6-7 ist die resultierende Verteilung der Schwebstoffe in der Wassersäule (linke Spalte) und am Boden (rechte Spalte) für die drei Ästuarer dargestellt. Die Verteilung in der Wassersäule wurde über einen Spring-Nipp-Zyklus am Ende der Rechnung gemittelt, die Verteilung am Boden der Schwebstoffe ist am Beispiel des Feinschluffanteils in der Austauschschicht zwischen Wasser und Boden am Ende der Simulation dargestellt. Der Anteil

an der Austauschschicht kann qualitative Hinweise zur Sedimentverteilung geben, jedoch nicht in absolut deponiertes Material umgerechnet werden.

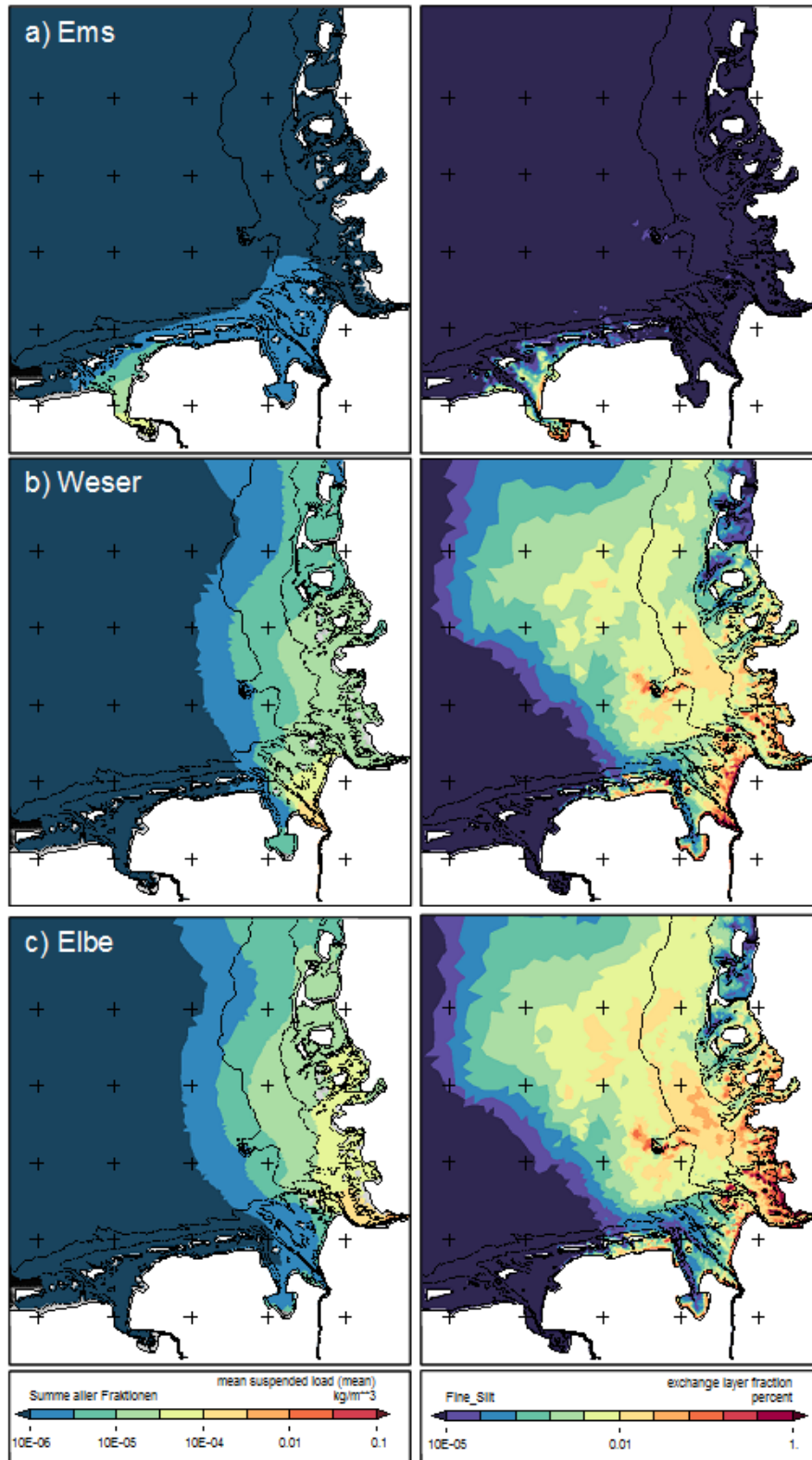
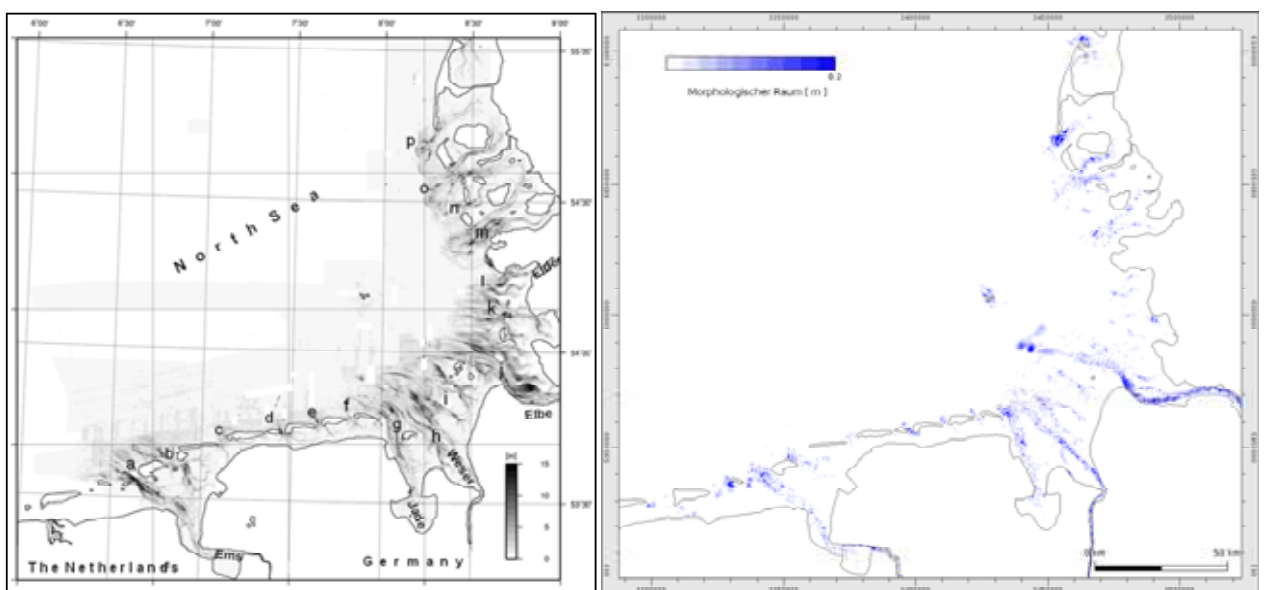


Abbildung 6-7 Schwebstoffexport der deutschen Nordseeästuare (UnTRIM-SediMorph)

Die Ausbreitung des suspendierten Materials zeigt das Systemverhalten im Sinne einer Traceranalyse auf. Die Verteilung mit der Wassersäule zeigt in Übereinstimmung mit Beobachtungen (vgl. Übersicht von *Kappenberg & Fanger, 2007*) die zyklonal gerichtete Restzirkulation auf. Elbe und Weser haben sehr ähnliche Verteilungsmuster, die Ems hat durch den typischerweise geringeren Oberwasserabfluss jedoch nur einen kleineren Einflussbereich. Die Verteilung des Feinschluffanteils in der Austauschschicht zeigt dagegen die Verteilung als Resultat aller in 2006 wirkenden Oberwasserabflüsse. Auffällig sind auch hier ähnliche Depositionsmuster von Weser und Elbe, mit jeweils verstärkter Ablagerung im Bereich des äußeren Ästuars und der Bereiche entlang der Restzirkulationsrichtung. Bemerkenswert ist die verstärkte Ablagerung von Feinsedimenten im Bereich Helgolands. Ein Zusammenhang mit in der Natur beobachteten großräumige Schlickablagerung südöstlich von Helgoland (z.B. *Irion et al., 1987*) soll im weiteren Projektverlauf noch genauer untersucht werden. Im Gegensatz zu Weser und Elbe ist der Export von Schwebstoffen aus der Ems nur gering, mit vorrangiger Ablagerung im Dollart und in der Außenems.

### 6.2.5 Vorhersage der Bodenevolution

Im ersten Schritt zur Berechnung der Bodenevolution wurden morphologisch aktive Bereiche identifiziert. Auf Basis von Peildaten der Jahre 1982 - 2008 hat *Winter (2011)* die maximalen Änderung der Sohlentiefe berechnet und als morphologisch aktiven Raum dargestellt (Abbildung 6-8, links). Wie zu erwarten war zeichnen sich insbesondere die stark durchströmten tiefen Rinnen (Fahrwasser, Seegatten) durch erhöhte Variabilität aus. Zum Vergleich wurde für einen dreimonatigen Simulationslauf die entsprechende Auswertung durchgeführt (Abbildung 6-8, rechts).

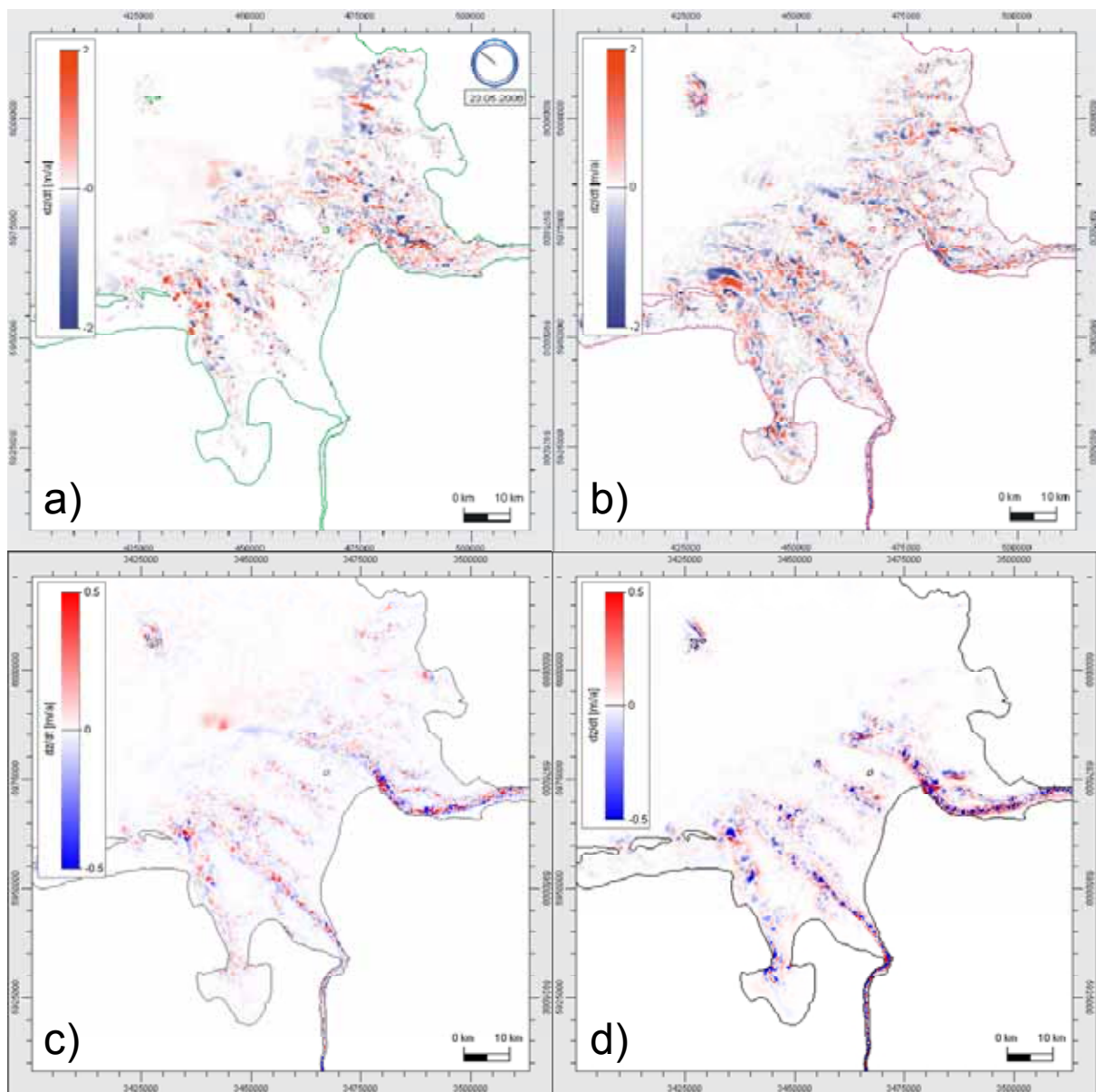


**Abbildung 6-8 Morphologisch aktive Bereiche aus Messungen Winter (2011) (links) und Modell UnTRIM-SediMorph (rechts)**



Der Vergleich von Messung und Rechnung zeigt, dass sich das prinzipielle Verhalten auch im Modell ergibt, jedoch durch den kürzeren Zeitraum mit geringerer Amplitude. Es wird jedoch auch deutlich, dass die in den Messungen fein aufgelösten Strukturen z.B. kleiner Priele im Modell nicht wiedergegeben werden.

Darüber hinausgehend, lässt sich, basierend auf den Vermessungsdaten des funktionalen Bodenmodells, die jährliche Bodenevolution bestimmen. Diese datenbasierte Größe wird der Bodenevolution, die aus den prozessbasierten und -orientierten Simulationsmodellen bestimmt worden sind gegenübergestellt (Abbildung 6-9).



**Abbildung 6-9 Bodenevolution für das Jahr 2006: a) funktionales Bodenmodell, b) MARINA, c) UnTRIM-SediMorph und d) nsea100**

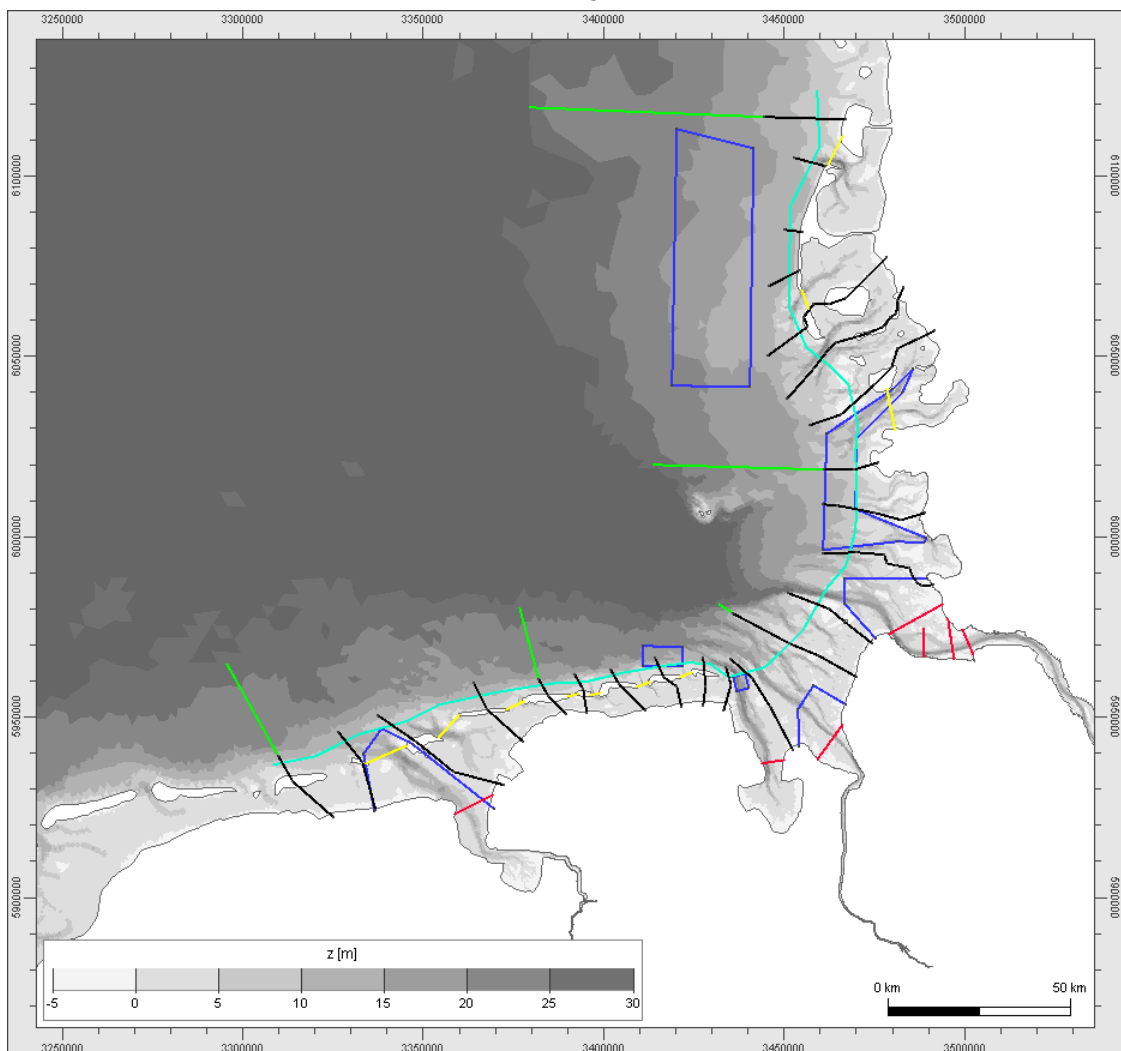
Diese ersten daten- als auch prozessbasierten Simulationsergebnisse zeigen noch keine klaren Tendenzen der morphodynamischen Entwicklung in der Deutschen Bucht und lassen

darauf schließen, dass für eine Plausibilisierung morphodynamischer Simulationsmodelle längere Zeiträume betrachtet werden müssen.

### 6.2.6 Strategien zur methodisch einheitlichen Auswertung

Die Strategien zur methodisch einheitlichen Auswertung werden zurzeit in einer gesonderten Arbeitsgruppe innerhalb von **AufMod** definiert und in einem Validierungsdokument beschrieben (noch in Bearbeitung).

Ein Bestandteil dieser morphodynamischen Validierung ist zum Beispiel die Auswertung der querschnittsintegrierten Sedimenttransporte zur Bilanzierung der ein- und ausgetragenen Sedimentmenge bei Flut und Ebbe. Hierzu wurden Polygone (Querschnitte) im gesamten Bereich der Deutschen Bucht definiert (Abbildung 6-10).



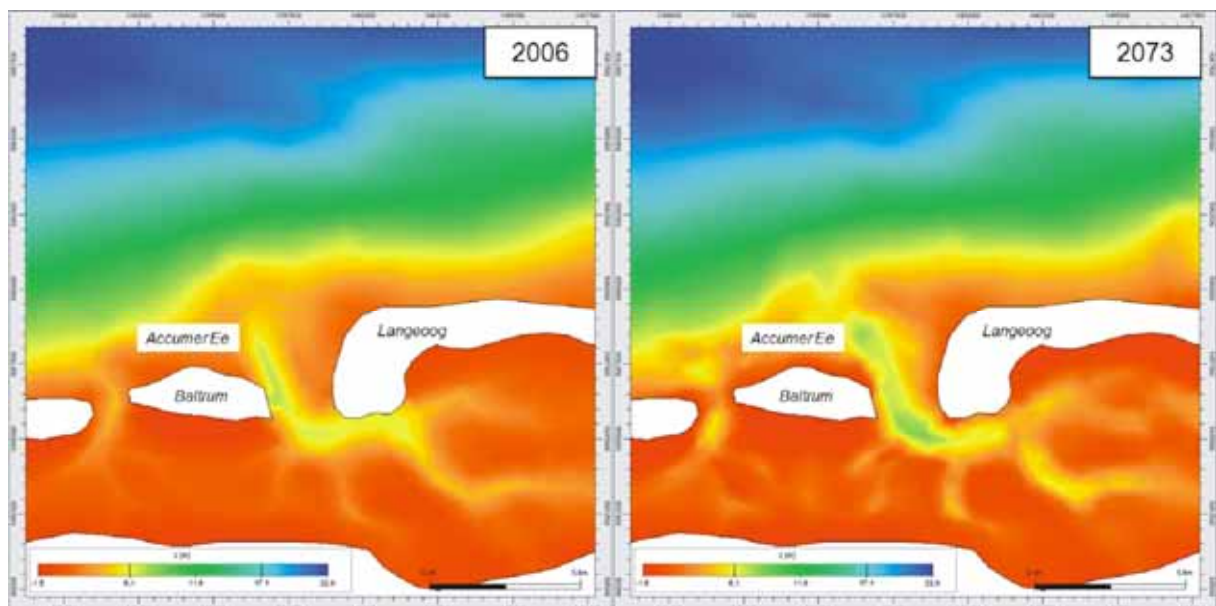
**Abbildung 6-10 Querschnittsdefinition zur Bilanzierung der Sedimenttransporte**

### 6.3 Prozessorientierte Simulation

Mit dem derzeitigen Langfristsimulationsmodell nsea100 wurden erste Simulationen zur zeitengetriebenen langfristigen Morphodynamik mit fraktioniertem Sedimenttransport gerechnet. Obwohl die Validierung des Modells erst im Verlauf dieses Forschungsprojektes durchgeführt wird und der Einfluss des Seegangs momentan noch gänzlich unberücksichtigt ist, sollen in den folgenden Abschnitten exemplarische Ergebnisse gezeigt werden. Sie geben daher nicht zwangsläufig reale morphologische Entwicklungen wieder, sondern vermitteln einen Eindruck der Anwendungsmöglichkeiten eines Langfristsimulationsmodells.

#### 6.3.1 Langfristige Sohlevolution

In Abbildung 6-11 ist die Sohlentwicklung im Gebiet um Baltrum und Langeoog nach 67 Jahren dargestellt. Der Vergleich der Sohlenlagen zwischen 2006 und 2073 zeigt, dass es Bereiche mit sehr unterschiedlicher morphodynamischer Aktivität gibt. So verlagert sich die Accumer Ee weiter ostwärts und vertieft sich dabei. Damit setzt sich der vor 2006 beobachtete Trend fort. Im Bereich des Ebbdeltas der Accumer Ee tritt eine verhältnismäßig starke Erosion auf, die eine Abtragung des Riffbogens zur Folge hat und dadurch eine Verbindung zwischen Accumer Ee und dem angrenzenden Küstenvorfeld herbeiführt. Ab einer Tiefenlinie von etwa 10 m ist die Veränderung der Gewässersohle sehr gering. Die im weiteren Projektverlauf durchzuführenden Simulationen mit Seegang lassen erwarten, dass sich sowohl hier, wie auch im Bereich des Riffbogens, eine andere Morphodynamik entwickeln wird.



**Abbildung 6-11 Exemplarische Entwicklung der Sohle im Gebiet um Baltrum und Langeoog nach 67 Jahren (nsea100)**

### 6.3.2 Sedimentverteilungsmuster

Die zeitliche Entwicklung der Sedimentverteilung durch gezeitengetriebenen Sedimenttransport ist in Abbildung 6-12 und Abbildung 6-13 gezeigt. Dargestellt ist der mittlere Korngrößendurchmesser für die letzten drei Jahrzehnte der Simulation. Eine Animation würde an dieser Stelle zeigen, dass die Sedimente in der Deutschen Bucht periodisch verlagert werden und nach etwa 20 Jahren wieder an ihren ursprünglichen Ort gelangen. Das kann in den Abbildungen im Gebiet A beobachtet werden, in dem eine Ost-West-Bewegung stattfindet. Dass dieser Effekt nicht überall in gleicher Stärke auftritt, zeigt das Gebiet B. Eine Verlagerung ist nur minimal feststellbar. Weitere Simulationen werden zeigen, ob mit anderen Sedimenttransportformeln und unter dem Einfluss von seegangsinduziertem Sedimenttransport ähnliche Entwicklungen feststellbar sind.

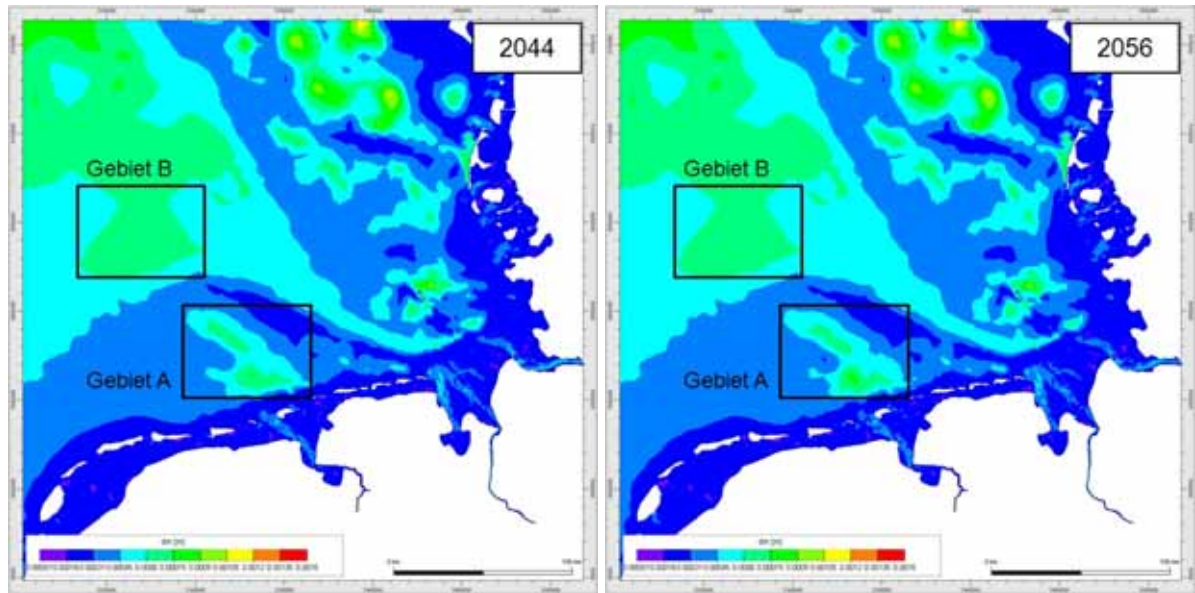


Abbildung 6-12 Beispiel zur zeitlichen Änderung von Sedimentverteilungsmustern nach 38 (2044) und 50 (2056) Jahren (nsea100).

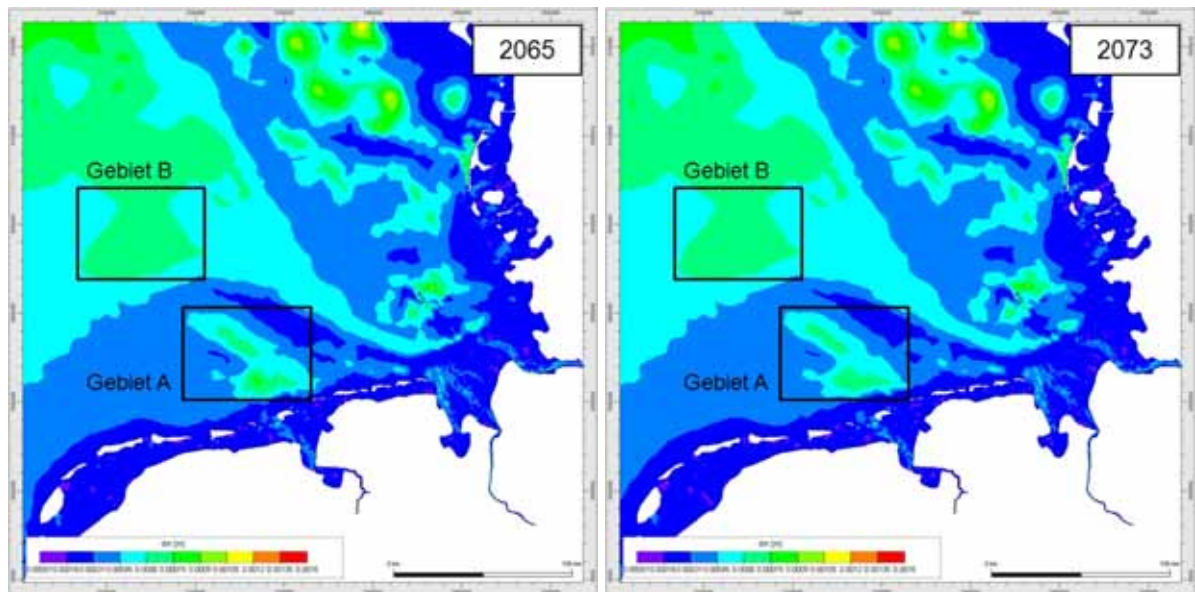
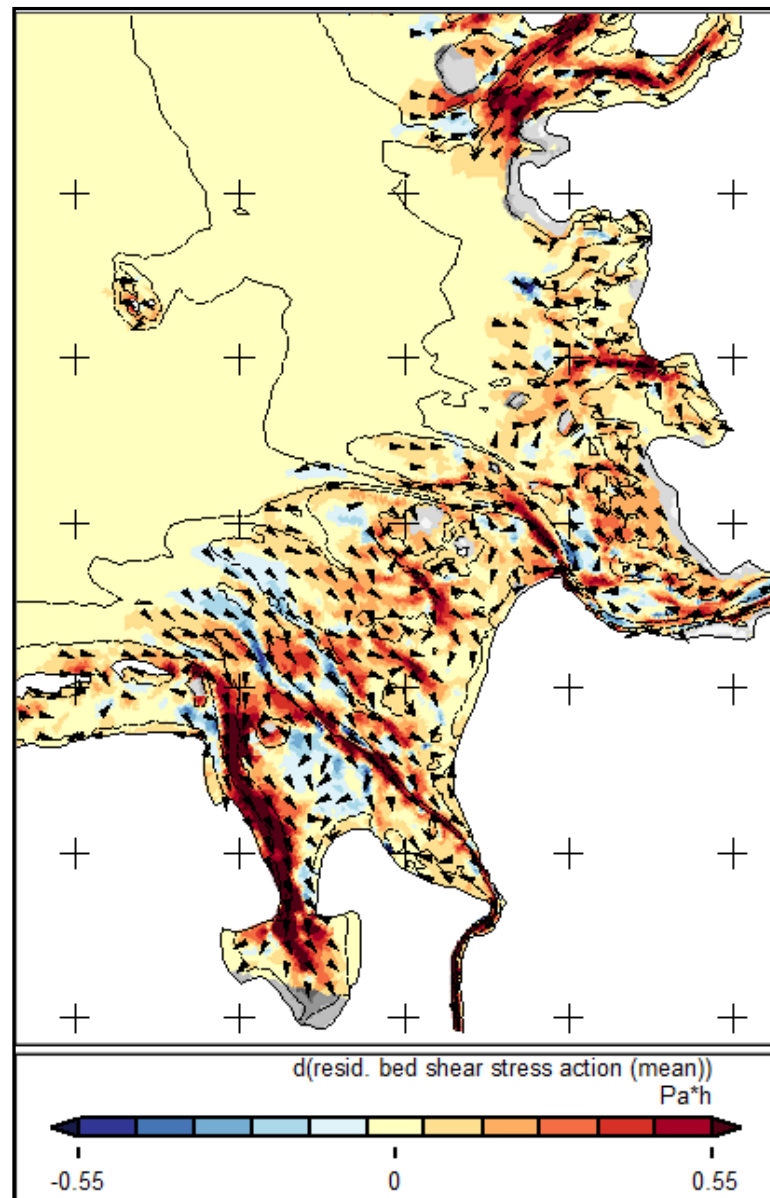


Abbildung 6-13 Beispiel zur zeitlichen Änderung von Sedimentverteilungsmustern nach 59 (2065) und 67 (2073) Jahren (nsea100).

#### 6.4 Klimaänderungsszenarien

Die Berechnung der morphodynamischen Entwicklung für Klimaänderungsszenarien sind erst für das dritte Jahr der Projektlaufzeit vorgesehen. Als Vorstudie wurde hier jedoch bereits das BAW Grobmodell mit Randwerten für einen angenommenen Meeresspiegelanstiegs von +80 cm betrieben. Exemplarisch ist in Abbildung 6-14 die Differenz der residu-

ellen Bodenschubspannungswirkung zwischen den Szenarien Meeresspiegelanstieg und Referenzzustand für das Jade-Weser und Elbemündungsgebiet dargestellt.



**Abbildung 6-14 Differenz der residuellen Bodenschubspannungswirkung (+80 cm)**

Nur durch den Anstieg des mittleren Meeresspiegels kommt es zu einer Erhöhung der residuellen Bodenschubspannungswirkung in Richtung der Küstenbereiche. Am deutlichsten sind die Änderungen im Bereich der tieferen Rinnen zu beobachten aber auch in den flacheren Bereichen, was zu einem Anwachsen der Wattbereiche führen würde.

In dieser ersten Untersuchung fehlen die Einflüsse durch Änderungen von Wind, Gezeiten und Oberwasserabflüssen unter geänderten klimatischen Bedingungen. Ebenso ist die zeitliche Entwicklung zu dem Zustand mit einem um 80 cm erhöhten Meeresspiegel nicht enthalten, der bereits morphologische Veränderungen bewirken muss.

## 7 Zusammenfassung

### 7.1 Stand der Bearbeitung

Nachfolgend wird der Stand der Bearbeitung durch die jeweiligen Teilprojekte und den beteiligten Forschungsinstitutionen gesondert aufgeführt. Für eine zusammenfassende Synthese siehe Kapitel 7.2.

#### **TP1: AufMod-A** (BSH):

In der ersten Phase von AufMod wurden in enger Abstimmung zwischen den Geowissenschaftlern und Modellierern die Parameter zur morphodynamischen Modellierung (Bathymetrie, Korngrößenverteilung, Porosität, Mächtigkeit der beweglichen Sohle) für das funktionale Bodenmodell festgelegt.

Über 13.500 bathymetrische Datensätze des BSH und der WSV aus den Jahren 1983 bis 2010 wurden für die gesamte deutsche Nordsee zusammengestellt sowie rund 50.000 Korngrößenverteilungen von nationalen (BSH, WSV, HZG, SaM, ...) und internationalen Institutionen (d. h. der geologischen Dienste von Großbritannien, Belgien, Niederlande und Norwegen) und in das funktionale Bodenmodell überführt.

Die erste Auswertung der jährlichen Überdeckungshöhen der Transitrohrleitungen Europipe 1 und 2 ergab eine sehr gute Übereinstimmung des Sedimentations-/Erosionsmusters im morphologisch hochvariablen Bereich des Seegatts „Accumer Ee“ zwischen Langeoog und Baltrum, verglichen zu den entsprechenden Mustern auf Grundlage der flächenhaften, zeitvarianten Bathymetrien aus der Seevermessung. Die Änderungen zeigen eine ostwärts gerichtete Verlagerung des Seegatts über den gesamten betrachteten Zeitraum der Vermessungsdaten von 1983 bis 2008, die in erster Linie auf Veränderungen der östlichen Wateinzugsfläche zurückgeführt wird und auch in den Datensätzen von Europipe 1 und 2 von 2001 bis 2009 ersichtlich ist.

#### **TP1: AufMod-F** (CAU):

Im Zuge der Projektarbeiten sind vorhandene Datenbestände aufgearbeitet worden und stehen u. a. für den Vergleich mit neuen Daten zur Verfügung. Die Erfassung neuer sedimentologischer Daten in den Teilgebieten Schelf / Vorstrand, Watten und Ästuar ist entsprechend der Arbeitsplanung im Rahmen mehrerer schiffsgestützter Messkampagnen durchgeführt worden. Die auf Basis der SSS-Daten und Sedimentanalysen durchgeführten flächenhaften Sedimentklassifizierungen sind in allen Teilgebieten weit vorangeschritten, wobei ein höherer als der erwartete Auflösungsgrad erreicht werden konnte. Damit lassen sich auch komplexe Sedimentverteilungsmuster bezüglich ihrer Genese und Dynamik analysieren. Trotz der unterschiedlichen Rahmenbedingungen (u. a. Hydrodynamik, geologischer Aufbau), die in den einzelnen Teilgebieten vorliegen, scheinen in allen Gebieten die

großräumigen Faziesbereiche langfristig erhalten zu bleiben, bei räumlicher und zeitlicher Variabilität der Sedimentgrenzen.

Die Wege zur Überführung der Daten sowie der daraus abgeleiteten Interpretationen der sedimentologischen Verhältnisse in das funktionale Bodenmodell sind bereitet worden, und der Datentransfer hat begonnen.

**TP1: AufMod-G (SNG):**

Zwei Vermessungen bei Spiekeroog zeigen die hohe Stabilität der Zungenriffe im unteren Küstenvorfeld. Der Vergleich der Zeitserien (2003 – 2010) zeigt bei den kleinen Zungenriffen im oberen Küstenvorfeld eine räumliche Verlagerung der Riffe um etwa 300 m in sieben Jahren. Der Grund dafür scheint bisher nicht eindeutig geklärt, aber mit Hilfe der Untergrundsedimentgefüge lässt sich die Sedimentverfügbarkeit entsprechend herausarbeiten. Die Strömung allein reicht dafür nicht aus.

Die drei Messungen in der nördlichen Jade-Rinne zeigen deutlich drei Wanderungsrichtungen der großen Unterwasserdünen. Die Dünen im westlichen Bereich wandern in drei Wochen etwa 12 m in südliche bis südwestliche Richtung, während im tiefen Teil der Rinne die Dünen fünf Meter in Nord-Nordwestliche Richtungen wandern. Die Studie ist vermutlich die Erste weltweit, die unterschiedliche Wanderungsrichtungen von Dünen während eines Gezeitenzyklus zeigt. Die Sedimentbilanz in diesem Gebiet ist derzeit noch offen.

**TP2: AufMod-B (MARUM):**

Im Rahmen des Teilprojekts **AufMod-B** "Bodenformen" wurden aus analogen Datensätzen einer Studie von (Ulrich, 1973) Kenngrößen digitalisiert und aufbereitet. Diese Rekonstruktion der Verteilung und Dimensionen von Bodenformen in den 1960er und 1970er dient im Gesamtprojekt als Grundlage für den Vergleich mit heutigen Zuständen, als große Datenbasis für die Definition von empirischen Zusammenhängen zwischen Kenngrößen und zur Initialisierung numerischer Modelle.

Aktuelle Fächerecholotmessungen der zuständigen Behörden wurden hinsichtlich des Auftretens von Bodenformen am Gewässerboden ausgewertet. Die automatische Detektion einzelner Bodenformen und Ausweisung von Flächen ähnlicher Parametrisierung wurden in einem Geoinformationssystem automatisiert.

**TP3: AufMod-C (BAW):**

Das prozessbasierte Modellsystem wurde für den Gesamtbereich der Nordsee aufgebaut. Die Gitternetzerstellung für das Grobmodell ist abgeschlossen und konnte für die Untersuchungen von BAW und Projektpartnern erfolgreich eingesetzt werden. Durch die Verwendung eines einheitlichen Modellgitters konnten Synergien geschaffen und eine einfachere Vergleichbarkeit der Ergebnisse erreicht werden. Im Rahmen der Modell-



kalibrierung wurde eine umfangreiche Datenbasis von Wasserstandspegeln aufbereitet, genutzt und den Projektpartnern zur Verfügung gestellt.

Das numerische Verfahren UnTRIM-SediMorph konnte in einer Grobmodell Version für eine naturähnliche Wiedergabe der Hydrodynamik validiert werden. In Systemstudien wurden Schwebstofftransport, Seegangseffekte, die Prädiktion von Bodenformen und die morphodynamische Entwicklung untersucht. Für die ersten morphodynamischen Untersuchungen konnte das von der Bodengruppe zur Verfügung gestellte Bodenmodell mit vielversprechenden Ergebnissen eingesetzt werden.

Die Erstellung des feineren Modellgitters ist zunächst erst prototypisch realisiert und muss fortgesetzt werden. Das Modellverfahren Delft3D befindet sich ebenfalls noch im Aufbau. Insgesamt musste für den Modellaufbau mehr Zeit investiert werden, als zunächst angenommen.

Die Ergebnisse von AufMod werden über die Marine Dateninfrastruktur Deutschland (MDI-DE) langfristig der Öffentlichkeit zugänglich gemacht. Die Ergebnisse werden vom BSH und der BAW der MDI-DE zur Verfügung gestellt und umfassen geowissenschaftlichen Messdaten sowie hydro- und morphodynamischen Modelldaten. Letztere sind zu unterteilen in datenbasierte Modellergebnisse aus dem funktionalen Bodenmodell und in prozessorientierte Modellergebnisse aus den morphodynamischen Simulationen.

**TP4: AufMod-D (Uni-Bw):**

Wesentlicher Bestandteil der ersten Projektphase war der Aufbau des Simulationssystems nsea100, welches einen prozessorientierten Modellansatz verfolgt. Die neu entwickelte Programmschale umfasst neben den grundlegenden Steuerfunktionen und der Berechnung von gezeiteninduzierten Strömungen die Kopplung mit Programmpaketen zur Sohlevolution (SediMorph) und für Unterhaltungsmaßnahmen (DredgeSim).

Mit dem aktuellen Simulationssystem ist es möglich, eine gezeiteninduzierte Morphodynamik für einen Zeitraum von 100 Jahren stabil zu berechnen (Meilenstein 1). Die Rechenzeit beträgt auf einem durchschnittlichen Bürorechner für das Grobmodell mit einer Sedimentfraktion etwa eine Woche. Am Beispiel der Accumer Ee wurden plausible Sohlveränderungen über einen Zeitraum von 1989 bis 2008 gezeigt.

Im weiteren Verlauf dieses Forschungsprojektes werden Seegangsszenarien, die den meteorologischen Einfluss repräsentieren, entwickelt und implementiert. Parallel dazu werden dem Simulationsmodell Unterhaltungsstrategien in den Ästuaren von Elbe, Ems und Weser hinzugefügt. In einem letzten Schritt des Modellaufbaus wird Wellenbrechen in der Brandungszone modelliert.

**TP5: AufMod-E (smile):**

Das funktionale Bodenmodell hat sich zu einem zentralen Element des Verbundprojektes entwickelt. Das funktionale Bodenmodell liefert nicht nur Anfangsbedingungen, Modellparameter und Validierungsdaten für die morphodynamischen Simulationsmodelle, sondern bildet auch die Daten- und Methodenbasis für das im Rahmen des Projektes entwickelte

datenbasierte HINDCAST<sup>\*</sup> - Simulationsmodell (DASIMO). Wesentliche Herausforderungen ergeben sich aus der Quantifizierung der Unschärfe der Messdaten und deren Berücksichtigung bei den eingesetzten und noch zu entwickelnden Interpolations- und Approximationsverfahren sowie den darauf basierenden morphologischen und sedimentologischen Analysen.

Mit dem Aufbau und der Validierung der prozessbasierten Simulationsmodelle für die gesamte Nordsee und die Fokusgebiete wurden die Grundlagen geschaffen für die Nutzung im Rahmen eines Multi-Modellansatzes mit den Projektpartnern. Es stehen so verschiedene verifizierte hydrodynamische Modelle zur Verfügung.

Für die Plausibilisierung der morphodynamischen Modellkomponenten werden in enger Zusammenarbeit mit den Projektpartnern gemeinsame Validierungsstrategien entwickelt und erprobt. Die bereits durchgeführten morphodynamischen Sensitivitätsuntersuchungen zeigen eine starke Abhängigkeit der Modellapproximationen von der zugrunde gelegten initialen Korngrößenverteilung. Hier müssen neue Strategien zur Modellkalibrierung unter Berücksichtigung der Messunsicherheiten bei der Bestimmung der Kornverteilungen entwickelt werden.

## 7.2 Synthese (erster Versuch)

Die Beschreibung, Analyse und Prognose der Sediment- und Morphodynamik in der Deutschen Bucht erfolgt im Projekt **AufMod** auf Grundlage eines integrierten Modellsystems. Am Aufbau und der Pflege sind verschiedene Fachdisziplinen in sieben Teilprojekten beteiligt, die Produkte erarbeiten und für das gemeinsame Modellsystem bereit stellen. Beteiligt am Gesamtprojekt sind Fachleute aus der Küsten- und Schelfgeologie, aus der Ozeanographie, aus dem Küsteningenieurwesen und Verkehrswasserbau sowie der Informatik. In den genannten wissenschaftlichen Disziplinen werden traditionell verschiedene Methoden und Verfahren eingesetzt. Dennoch wird im Projekt **AufMod** angestrebt, dass die Ergebnisse aller Teilprojekte einschließlich der verschiedenen Fachsichten in einer Synthese - im Sinne einer Vereinigung der relevanten Erkenntnisse zu einem verbesserten, universellen Systemverständnis – funktional zusammengeführt werden. Die Synthese zielt damit zunächst einmal auf die Erweiterung des Wissens.

Ein zweiter Aspekt der Synthese ist die Erstellung, Erprobung und Bestätigung des integrierten Modellsystems, das nach Abschluss des Projekts von allen genannten wissenschaftlichen Disziplinen weiter genutzt werden kann. Das Modellsystem liefert eine gemeinsame methodische, funktionale und modellbasierte Basis, auf der verschiedene Fachsichten miteinander kommunizieren können. Grundlage dieser Kommunikation muss wiederkehrend die Betrachtung und Bewertung von Unschärfen und Unsicherheiten sein, die sich sowohl in den Messdaten, aufbereiteten Modelleingangsdaten und auch in den Parametrisierungen und Annahmen der Simulationsmodelle befinden.

*Brommer et al., 2009* stellen Konzepte zur Vorhersage langfristiger und großräumiger Küstenentwicklungen, insbesondere in Bezug auf die Sedimentdynamik, dar. Die Autoren beschreiben zunächst die Sichtweisen und Erklärungsmechanismen verschiedener wissenschaftlicher Gruppen:

- Geologen, die sich mit den Schichten, dem Alter und der Dynamik der Erde beschäftigen sowie, kleinskaliger betrachtet, Sedimenttransportprozesse analysieren, aber auch Klimaentwicklungen und Meeresspiegeländerungen ermitteln.
- Geomorphologen, die sich mit der Formenvielfalt des Bodens und mit der Verteilung von Sedimenten an der Oberfläche des Bodens im betrachteten System beschäftigen.
- Küsteningenieure, die auf Messung und Simulation räumlich und zeitlich kleinskaliger Prozesse setzen (prozessbasierte Modellierung) oder verhaltensorientierte Modelle ohne Berücksichtigung des gesamten prozessbasierten Wissens für großräumige Phänomene entwickeln.

Die Autoren kommen schließlich zu dem wichtigen Erkenntnis, dass die von diesen Gruppen erzielten wissenschaftlichen Informationen in Vorhersagesysteme für langfristige küstendynamische Entwicklungen integriert werden müssen. Dieses ist auch das Hauptziel von **AufMod**, insbesondere weil alle genannten wissenschaftlichen Gruppen im Projekt vertreten sind und weil das gemeinsame Ziel allgemein anerkannt wird. Neben der Integration vorhandener wissenschaftlicher Informationen wird in **AufMod** eine Erweiterung und Verbesserung der bisher eingesetzten Methoden und Verfahren angestrebt.

Der angesprochene zweite Aspekt der Synthese (die Erstellung, Erprobung und Bestätigung des integrierten Modellsystems) ist im Projekt die wesentliche Grundlage für eine nachvollziehbare und reproduzierbare Erweiterung des Wissens für ein verbessertes Systemverständnis. Das integrierte Modellsystem ist zum derzeitigen Projektstand weitgehend aufgebaut und funktionsfähig. Tragende Säule ist das funktionale Bodenmodell, das als Bindeglied zwischen den Küsten- und Schelfgeologen, Ozeanographen und Küsteningenieurern fungiert und von allen Beteiligten in jeweils fachspezifischer Ausrichtung genutzt werden kann. Soweit vorhandene und im Projekt erhobene Daten es ermöglichen, liefert das funktionale Bodenmodell ein detailliertes Abbild der Gewässersohle hinsichtlich Bathymetrie, Sedimentzusammensetzung und -verteilung, Sedimentmächtigkeit, Bodenschubspannung und Sedimentmobilität, Formenvielfalt und Ausprägung der Sohlformen auf der Grundlage konsistenter Feld- und Simulationsdaten in Raum und Zeit. Dabei steht die quantitative Erfassung der Dynamik der Modellparameter in repräsentativen Teilflächen von Schelf / Vorstrand, Watten und Ästuaren im Mittelpunkt des Projektinteresses. Die Synthese bezieht damit die geologischen, sedimentologischen und morphodynamischen Analysen sowie die Ergebnisse aus Modellsimulationen gleichgewichtig ein.

Zur Verbesserung des Systemverständnisses müssen Fragen (allgemein für die gesamte Deutschen Bucht, speziell für Teilgebiete) beantwortet werden. Im ersten Ansatz zur Synthese werden sechs wichtige Fragestellungen formuliert, die es in der Bearbeitung erforderlich machen, vielfältige Zustände und Prozesse zu betrachten.

1. Wie ist die hydrodynamische Belastung des Bodens in allen Teilgebieten einzustufen?
2. In welchen Gebieten besteht eine starke, mittlere oder schwache Sediment- bzw. Morphodynamik?
3. Welche morphodynamischen Phänomene treten auf (flächenhafte oder linienorientierte Erosion oder Sedimentation, Transportkörperdynamik, Rinnendynamik,...)
4. Wo treten signifikante, über charakteristische Zeitspannen resultierende Transporte auf?
5. Welche Richtungen (ggf. auch Massen) haben die resultierenden Transporte?
6. Welche Sedimentbilanzen prägen das Gesamtsystem?

Die Beantwortung dieser Fragen ist komplex, weil die Variabilität des Gesamtsystems nicht nur vom deterministischen Gezeitengeschehen, sondern in hohem Maße vom stochastischen Wettergeschehen abhängig ist. Die hinreichende Beantwortung der Fragen liefert ein Grundgerüst im Sinne abgesicherter Methoden, auf dem in **AufMod** Strategien für

langfristige Prognosen der Sediment- und Morphodynamik in der Deutschen Bucht erarbeitet werden.

In Bezug auf den derzeitigen Stand im Projekt **AufMod** ist festzustellen, dass fünf der sechs aufgestellten Fragen bereits exemplarisch (zum Teil noch räumlich begrenzt) bearbeitet wurden.

Die bereits zusammengetragenen Informationen zur Sedimentzusammensetzung und –verteilung, sowie zur Formenvielfalt und Ausprägung der Sohlformen lassen wichtige Rückschlüsse auf die hydrodynamische Belastung des Bodens in allen Teilgebieten der Deutschen Bucht zu. Vergleichende Gegenüberstellungen alter und neuer sedimentologischer Datensätze deuten auf eine langfristige Präsenz großräumiger Faziesbereiche hin, deren Sedimentgrenzen über Raum und Zeit variieren. Auffällig ist die Akkumulation feiner Sedimente im Küstensaum der Deutschen Bucht außerhalb der stark durchströmten Wattströme und Fahrrinnen. Das gröbere Sedimentinventar in den ausgedehnten tieferen Gebieten der Deutschen Bucht zeigt, dass hier die seegangsinduzierte Bodenschubspannung dominiert, die feines Material resuspendieren kann und mit dem Gezeitenstrom abtransportieren lässt. Auch die bisher erfasste räumliche Verteilung der Transportkörper gibt wichtige Hinweise für eine vorhandene Belastung der Gewässersohle. Sowohl die Verteilung der Korngrößen als auch die der Transportkörper (Vorhersage der Dünenhöhe) konnten mit prozessbasierten Simulationsmodellen in ersten Ansätzen nachvollzogen werden.

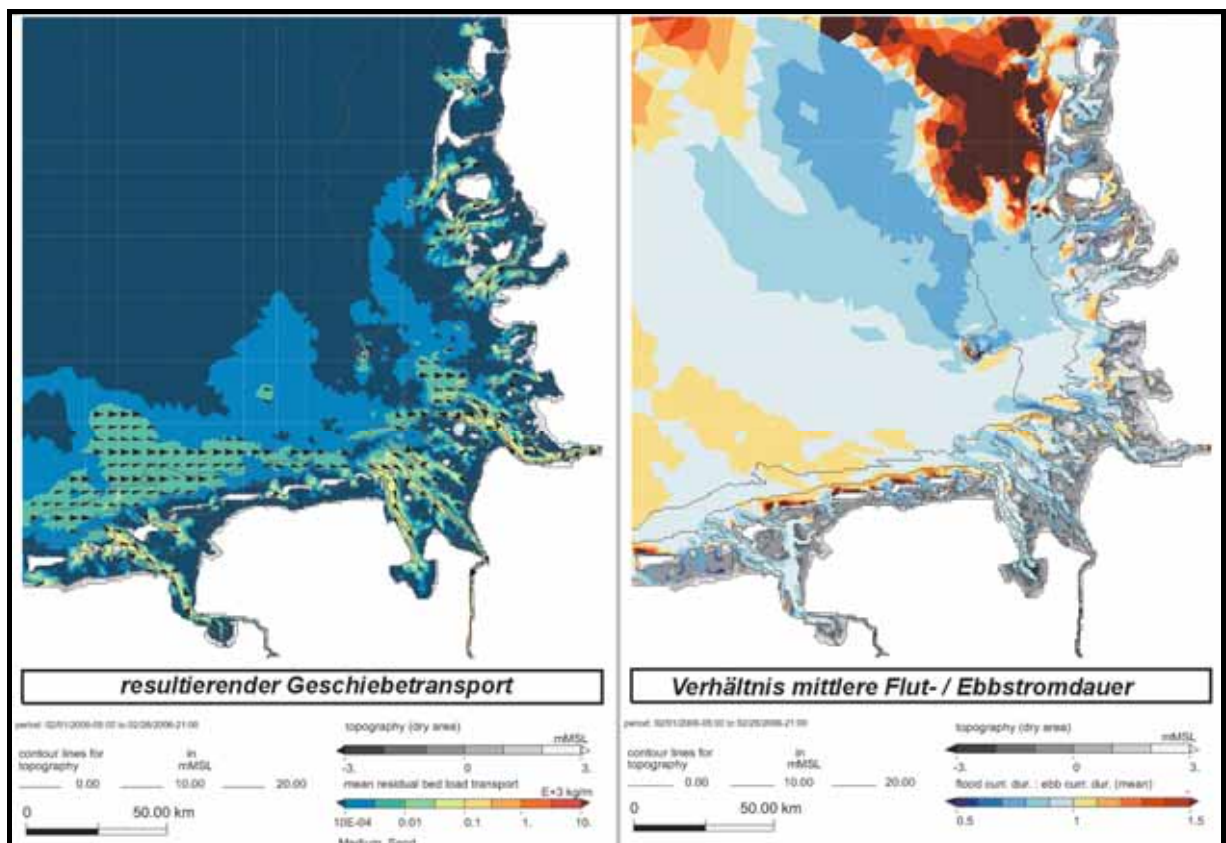
Gebiete mit einer starken morphodynamischen Aktivität können aus dem Bodenmodell für verschiedene Zeitspannen extrahiert werden. Erste Untersuchungen für das ausgewählte Jahr 2006 zeigen sowohl für die Auswertung der Daten aus der Seevermessung als auch für die Ergebnisse aus drei verschiedenen Simulationsmodellen einen Flickenteppich abwechselnder Erosions- und Sedimentationsflächen. Dies zeigt, dass der die Bathymetrie verändernde mesoskalige (über Monate stattfindende) Sedimenttransport überwiegend intern, d. h. innerhalb der Deutschen Bucht stattfindet. Der makroskalige (über viele Jahre stattfindende) Sedimenttransport muss noch eingehend untersucht werden. Hohe Strömungsgeschwindigkeiten in den Rinnensystemen (Seegatten und Wattrinnen) können zu deren Verlagerung durch Veränderungen im Wattenzugsgebiet oder durch lokale Prallhangsituationen führen. Entwicklungen z. B. in der Elbemündung wurden auf der Grundlage von Bathymetriesimulationen (datenbasiertes Modellverfahren) im Hindcast\* untersucht. Das gesamte Nordseemodell ist zur Prognose dieser eher lokalen Entwicklungen weniger gut geeignet. In Ausschnittsmodellen können mit lokal hohen Gitternetzauflösungen bessere Prognosen realisiert werden. Dennoch ist es gelungen, im Bereich der Accumer Ee mit einem groben Gitternetz natürliche morphologische Tendenzen zu berechnen.

Eine Analyse der (über die Zeitspanne von einem Jahr) auftretenden resultierenden Transporte wurde auf Grundlage einer Systemstudie exemplarisch gezeigt. Die mit dem Oberwasser der Elbe und Weser in die Deutsche Bucht gespülten Schwebstoffe werden über ca. 4/5 der Gesamtfläche der Deutschen Bucht verteilt und gelangen ins Wattenmeer Schleswig Holsteins und in die Gewässer Dänemarks. Hingegen exportiert die Ems nur

geringe Schwebstoffmengen, die sich küstennah nach Osten ausbreiten. Hiermit kann einerseits die besondere Schlicksituation im Ems-Ästuar erklärt werden. Andererseits zeigt die ausschließlich küstennahe Ausbreitung geringer Schwebstoffmassen auch die vorherrschende Ausbreitungsrichtung im Bereich der Barriereinseln Niedersachsens.

Die bisher dargestellten Ergebnisse und Phänomene werden als Einzelbausteine begriffen, mit denen zum Abschluss des Projekts ein Gesamtbild für die abschließende Synthese zum Systemverständnis einschließlich der Ausweisung von Quantitäten (Sedimentbilanz) dargestellt werden soll. Hierzu ist es erforderlich, ein Kennwertsystem zu installieren, das geeignet ist, die Zusammenhänge zwischen den Einzelbausteinen zu erklären. Ein wichtiger Aspekt ist die Aufdeckung und Bewertung aller bekannten Asymmetrien der Tidedynamik, der Transportdynamik und der Sohlformen.

Zur Veranschaulichung wird hier folgendes Beispiel gegeben: Die Differenz zwischen den mit dem Flut- und dem Ebbestrom am Boden transportierten Sedimentmassen kann auf der Grundlage eines flächendeckenden Simulationsmodells sowohl nach Richtung und Betrag ausgewertet werden. Hieraus ergibt sich der residuelle Geschiebetransport (Bild links für Mittelsand). Diese Information gewinnt schon einen erheblichen Mehrwert, wenn man gleichzeitig das Verhältnis der mittleren Flut- zur Ebbestromdauer betrachtet (Bild rechts). Auf die physikalische Interpretation dieser Kennwerte soll an dieser Stelle noch nicht eingegangen werden. Zum Ende des Projekts ist eine ausführliche Veröffentlichung allein zur Synthese vorgesehen.



### 7.3 Botschaften für die Öffentlichkeitsarbeit

Das Gesamtvorhaben formuliert die folgenden strategisch orientierten Botschaften in der Öffentlichkeit:

1. Ziel des Vorhabens ist die Beschreibung, Analyse und Prognose der Morphodynamik in der Deutschen Bucht auf Grundlage eines integrierten Modellsystems.
2. Zur Entwicklung des integrierten Modellsystems tragen in interdisziplinärer Zusammenarbeit sieben Teilprojekte zu einem Gesamtprojekt bei.
3. Das integrierte Modellsystem wird durch folgende Fachdisziplinen entwickelt: Küsten- und Schelfgeologie, Ozeanographie, Küsteningenieurwesen, Verkehrswasserbau und Informatik
4. Das Modellsystem ermöglicht die Synthese der wissenschaftlichen Analyse der Beobachtungsdaten mit umfassenden Ergebnissen aus Simulationsmodellen.
5. In der laufenden Projektphase werden ausschließlich abiotische Prozesse behandelt (das konzeptionelle Modell erlaubt später die Integration biotischer Parameter).
6. Das integrierte Modellsystem ist als ein gemeinsames Produkt des Gesamtprojekts zu verstehen.
7. Die Teilprojekte entwickeln und benutzen gemeinsame Grundlagen (z. B. ein gemeinsames Bodenmodell, Wasserstandsrandwerte und Windfelder, gemeinsam verwendbare Modellgitternetze für verschiedene Modellverfahren, Analysewerkzeuge, ...)
8. Nach dem Aufbau des integrierten Modellsystems soll es zur weiteren Nutzung verfügbar gehalten werden. Es trägt damit zu den in Deutschland im Aufbau befindlichen *coastal services* bei.

Die wichtigsten fachlich orientierten Botschaften lauten derzeit:

1. Für das Bodenmodell werden verfügbare Daten aus dem In- und Ausland angefragt, homogenisiert und integriert. Ziel ist es, ein Bodenmodell – soweit möglich - für die gesamte Nordsee mit Schwerpunkt Deutsche Bucht / Ästuare zu erstellen und zu pflegen.
2. Das Bodenmodell enthält die zeitvariable Bathymetrie, Sedimentologie und die kleinskaligen Bodenformen einschließlich ihrer hydraulischen Wirksamkeit.
3. Das Bodenmodell kann mit Hilfe von IT-Funktionen genutzt werden (z. B. zur Berechnung von morphologischen Geschwindigkeiten). Mit diesen Funktionen werden Produkte für die verschiedenen Teilprojekte erzeugt.
4. Das funktionale Bodenmodell bietet darüber hinaus die Basis für datenbasierte Modellierungen (retrospektiv und prospektiv für kurzfristige Zukünfte).

5. Da die morphodynamische Prognose für mittlere und langfristige Zukünfte mit großen Unsicherheiten behaftet ist, nutzt das integrierte Modellsystem verschiedene prozessbasierte Modellverfahren (Multi-Modell-Ansatz).
6. Die prozessbasierte Modellierung ermöglicht die prozessbasierte Analyse der Sedimentbewegung im Wasserkörper und an der Gewässersohle. Diese Analyse ist ein wichtiges Bindeglied zur Herstellung der übergreifenden fachwissenschaftlichen Synthese.
7. Es wird angestrebt, die modellübergreifende, prozessbasierte Analyse mit einheitlichen Methoden und Verfahren für die Ergebnisse aus den verschiedenen Modellen durchzuführen.



## 8 Dokumentation und Verfügbarkeit der **AufMod**-Ergebnisse und Produkte

Die Ergebnisse und Produkte von **AufMod** werden über geeignete IT- und Geodateninfrastrukturen beim BSH und bei der BAW gesichert und Dritten zur Verfügung gestellt. Hierfür erfolgt eine Abstimmung mit dem laufenden KFKI-Projekt MDI-DE, dass im Herbst 2010 unter der gemeinsamen Projektleitung von BSH und BAW gestartet wurde.

Folgende Ergebnisse und Produkte sind im Rahmen von **AufMod** zu erwarten:

- Flächendeckende Informationen über die Beschaffenheit der Gewässersohle und deren Veränderlichkeit anhand von Sedimentklassifizierungen unter Nutzung geowissenschaftlicher Messdaten in Form von Korngrößenanalysen, Seismo- und Sonogrammen sowie ADCP-Daten.
- Hydro- und morphodynamische Modelldaten, die wiederum in (1) datenbasierte Modellergebnisse aus dem funktionalen Bodenmodell und (2) prozessorientierten Modellergebnissen aus den ersten morphodynamischen Simulationstests der jeweiligen Teilprojekte zu untergliedern sind.

Für die Speicherung und Bereitstellung der geowissenschaftlichen Messdaten wird das operationell betriebene, meeresgeologische Fachinformationssystem Shelf Geo Explorer\* des BSH genutzt ([BSH-SGE](#)), in dem die Stationen und hydroakustische Profillinien sowie Auswertungen zur flächenhaften und zeitvarianten Sedimentverteilung in den repräsentativen Teilgebieten\* (Fokusgebieten) erfasst und dargestellt werden können. Das über ISO 9001 zertifizierte Qualitätsmanagement des BSH stellt sicher, dass diese Geodaten mit den erforderlichen Metainformationen versehen werden.

Zusätzlich wird das BSH im Rahmen von **AufMod** die Geodatenbank des Shelf Geo Explorer\* um die Rasterdatenverwaltung erweitern, so dass z. B. die der Sedimentverteilung zugrunde liegenden Seitensichtsonar-Mosaik als sogenannte „GeoTIFFs“ gespeichert werden können, um dadurch die Nachvollziehbarkeit der Auswertungen zu erhöhen. Im Zuge dieser Entwicklungsarbeiten wird in einem ersten Schritt eine projektinterne Rasterdatenbank entwickelt, die nach erfolgreichem Testlauf in den Shelf Geo Explorer\* gegen Ende der Projektlaufzeit übernommen wird.

Es ist vorgesehen, dass neben den geowissenschaftlichen Messdaten auch noch festzulegende GIS-Produkte aus der datenbasierten Modellierung, d. h. dem funktionalen Bodenmodell (siehe Kapitel 3.3) für einen breiten Anwenderkreis über den Shelf Geo Explorer\* zur Verfügung gestellt werden. Hierunter sind beispielsweise die aktuelle Bodentopographie, die flächenhafte Porositätsverteilung u. a. vorgesehen.

Im Hinblick auf die prozessbasierten Modellergebnisse wird ein eigenständiges Fachinformationssystem für die MDI-DE\* bei der BAW entwickelt. Dieses wird an die umfangreichen hydro- und morphodynamischen Modellergebnisse angepasst. Die Entwicklung in und der

Betrieb bei der BAW begründet sich durch ihre Kompetenz für den Bereich der Sedimenttransportmodellierung.

Im Zuge der MDI-DE\* werden die beiden Fachinformationssysteme als eigene Knoten im geplanten Portal MDI-DE\* eingebunden, so dass Dritte künftig über einen zentralen Zugang auf die Ergebnisse und Produkte von **AufMod** zugreifen werden können.

Abbildung 8-1 zeigt in einem Entwurf die Unterschiede im Datenfluss der beiden Fachinformationssysteme. Die Nutzung des Shelf Geo Explorers\* bzw. des NOKIS\* (Nord-Ostsee-Küsteninformationssystem) Metadateneditors sowie die inhaltlich vielfältigen Daten zeigen, dass verschiedene Vorgehensweisen bei der Behandlung und Verarbeitung der Daten notwendig sind. Gleichartige Metadaten sowie standardisierte Webdienste ermöglichen anschließend eine Zusammenführung der Ergebnisdaten und stellen die allgemeine Weitergabe und Bereitstellung im Portal der MDI-DE\* sicher (Abbildung 8-2).

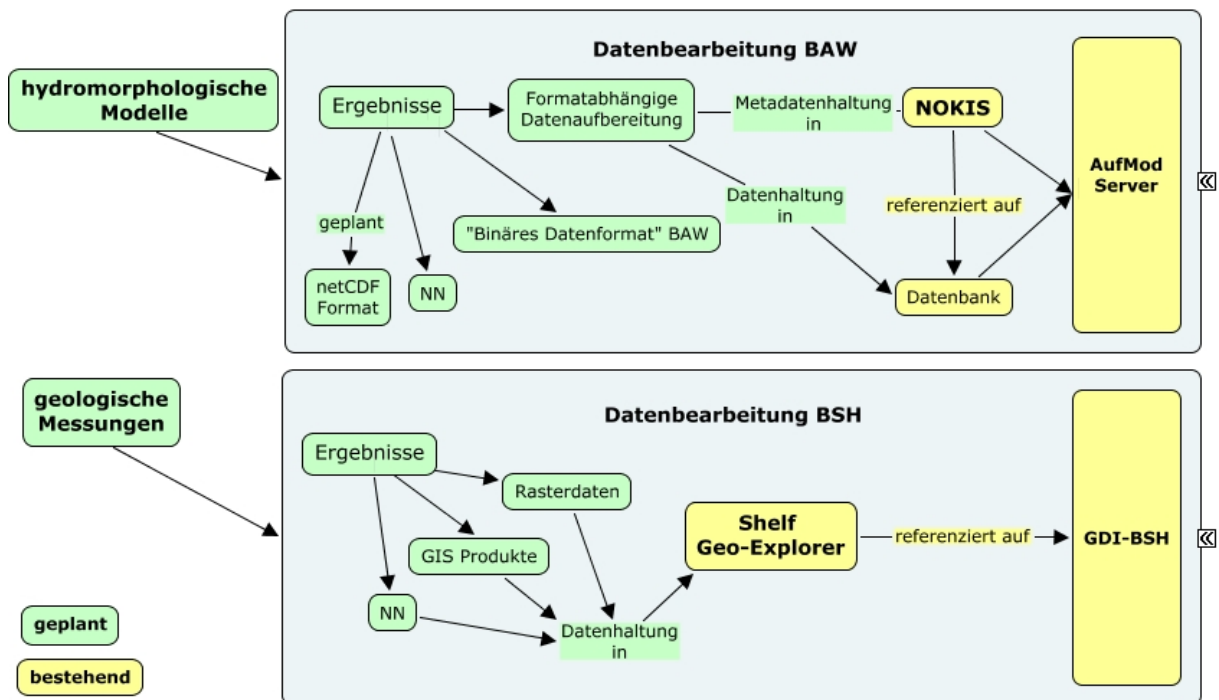


Abbildung 8-1: Entwurf der Datenströme der verschiedenen Modelle von BAW und BSH. Grün ist geplant, Gelb besteht schon

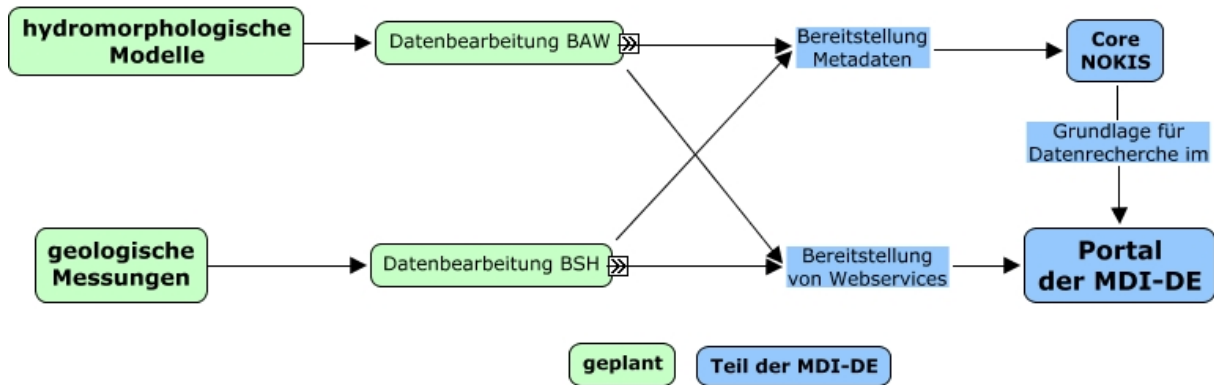


Abbildung 8-2: Entwurf der Gesamtdatenströme durch BAW u. BSH in die MDI-DE. grün ist der geplante Teil von AufMod, blau Teil der MDI-DE

Neben diesen Fachinformationssystemen wird ein weiteres, speziell für die morphodynamische Modellierung entwickeltes (Daten-)Werkzeug, das funktionale Bodenmodell\*, erstellt, das nach Abschluss des Projekts bei den Bundesoberbehörden operationell betrieben werden soll. Das funktionale Bodenmodell\* beinhaltet die flächenhaften und zeitvarianten Parameter (zunächst Wassertiefe, Korngrößenverteilung, Porosität, Mächtigkeit der umlagerungsfähigen Sedimente und evtl. Glühverluste als Anzeiger des organischen Gehalts im Sediment) in der geforderten quasi-konsistenten und plausibilisierten Weise.

Im Zuge der weiteren Abstimmung zwischen den Projekten **AufMod** und MDI-DE\* ist festzulegen, in welcher Weise externen Anwendern die Daten aus dem funktionalen Bodenmodell\* für die numerische Modellierung bereitgestellt werden können.

## 9 Literaturverzeichnis

- [Ahrendt 1988] Ahrendt, K.:  
Sedimentdynamik im gezeitenbeeinflussten Bereich der sandigen Brandungsküste Sylts (Deutsche Bucht). Dissertation, Christian-Albrechts-Universität Kiel, 1988.
- [Ahrendt 1994] Ahrendt, K.:  
Geologie und Küstenschutz am Beispiel Sylt. In: Berichte aus dem Forschungs- und Technologiezentrum Westküste der Universität Kiel, Nr. 4, 1994.
- [Allen 1980] Allen:  
Sand waves: A model of origin and internal structure. *Sedimentary Geology*, 26, pp. 281-328, 1980
- [Antia 1993] Antia, E.E.:  
Surficial grain-size statistical parameters of a North Sea shoreface-connected ridges: patterns and process implications: *Geo-Marine Letters*, 13, pp. 172-181, 1993
- [Antia 1994] Antia, E.E., Flemming, B.W., Wefer, G.:  
Transgressive facies sequence of a high energy, wave-tide storm-influenced shoreface: a case study of the East Frisian barrier islands (southern North Sea): *Facies*, 30, pp. 15-24, 1994
- [Ashley 1990] Classification of large-scale subaqueous bedforms: a new look at an old problem. *Journal of Sedimentary Petrology*, 60, pp. 160-172, 1990
- [Barckhausen 1970] Barckhausen, J.:  
Geologische Karte von Niedersachsen 1:25000, Erläuterungen zu Blatt Baltrum Nr. 2210. Hannover, 1970.
- [Bartholomä 2006] Bartholomä, A.:  
Acoustic bottom detection and seabed classification in the German Bight, southern North Sea. – *GeoMarine Letters* 26: pp. 177-184, 2006.
- [Bartholomä 2009] Bartholomä, A., Kubicki, A., Badewien, T. H., und Flemming, B. W.:  
Suspended sediment transport in the German Wadden Sea - seasonal variations and extreme events *Ocean Dynamics*. In: *Ocean Dynamics, Theoretical, Computational and Observational Oceanography*, Springer-Verlag, Vol 59, Nr 2, pp. 213-225, 2009
- [Blondel 1997] Blondel, P, Murton, B.J.:  
Handbook of Seafloor sonar imagery. 314 S.; Chichester, 1997.
- [BMFT 1991] Bundesministerium für Forschung und Technologie:  
Optimierung des Küstenschutzes auf Sylt, Phase I 1985-1990, Statusseminar 1991.
- [BMFT 1994] Bundesministerium für Forschung und Technologie:  
Optimierung des Küstenschutzes auf Sylt – Phase II 1991-1993, Statusseminar 1994.
- [Brommer 2009] Brommer, M.B. and Bochev-van der Burgh, L.M.:  
Sustainable Coastal Zone Management: A Concept for Forecasting Long-Term and Large-Scale Coastal Evolution. *Journal of Coastal Research*, 25(1), pp. 181-188, 2009
- [Casulli 2000] Casulli, V., Walters, R. A.:  
An unstructured three-dimensional model based on the shallow water equations, *International Journal for Numerical Methods in Fluids* 32, pp. 331-348, 2000.
- [Cacchione 1984] Rippled scour depressions on the inner continental shelf off central California. *Journal of Sedimentary Petrology*, 54, pp. 1280–1291, 1984
- [Chowdhuri 1978] Chowdhuri, K.R., Reineck, H-E.:  
Primary Sedimentary Structures and their Sequence in the Shoreface of Barrier Island Wangerooge (North Sea): *Senckenbergiana maritime* 10, pp. 15-29, 1978
- [Deines 1999] Deines, ML.:  
Backscatter Estimation Using Broadband Acoustic Doppler Profilers. – Proceedings of IEEE Sixth Working Conference on Current Measurements: pp. 249 – 253, 1999.
- [Deutsche-Rück 2006] Deutsche Rückversicherungs AG:  
Sturmdokumentation 2006, Deutschland. [http://Sturmdokumentation\\_2006.pdf](http://Sturmdokumentation_2006.pdf)
- [DFG 1979] Deutsche Forschungsgemeinschaft:

- Sandbewegung im Küstenraum - Rückschau, Ergebnisse und Ausblick. Weinheim, 1979.
- [De Vriend 1993] De Vriend ,HJ., Capobianco, M., Latteux, B., Checher, T., Stive, MJF:  
Long-Term Modelling of Coastal Morphology in Coastal Morphodynamics: Processes and Modelling, Coastal Engineering 21, pp. 225-269, 1993.
- [De Vriend 1993b] De Vriend, HJ., Capobianco, M., Checher, T., de Swart, HE., Latteux, B., Stive, MJF.:  
Approaches to long-term modelling of coastal morphology: a review, Coastal Engineering 21, pp. 225-269, 1993.
- [Dobrynin 2009] Dobrynin, M.:  
Investigating the Dynamics of Suspended Particulate Matter in the North Sea using a Hydrodynamic Transport Model and Satellite Data Assimilation. Technical report, GKSS-Forschungszentrum Geesthacht, 2009.
- [Dörjes 1969] Dörjes, J., Gadow, S., Reineck, S., H.-E., Bir Singh, I.:  
Die Rinnen der Jade (Südliche Nordsee). Sedimente und Makrobenthos. Senckenbergiana maritima, (1)50, pp. 5-62, 1969.
- [Ecofys 2009] Hunke, D., Schüler, V., Winter, C.:  
Morphologische Stabilitätskarte für die Kabelanbindung von Offshore-Windparks in den Flussmündungsbereichen von Elbe, Weser, Jade und Ems. ,Endbericht, Ecofys, 2009.
- [Ernstsen 2006] Ernstsen, V.B., Noormets R., Winter, C., Hebbeln, D, Bartholomä, A., Flemming, BW, Bartholdy, J. :  
Quantification of dune dynamics during a tidal cycle in an inlet channel of the Danish Wadden Sea: Geo-Marine Letters, Vol. 26, pp. 151-163, 2006.
- [Etri 2006] Etri, T., Mayerle, R.:  
Effect of Storm Events on the Morphodynamics of a Tidally-dominated Coastal Environment, Proc. 7th Int. Conf. on HydroScience and Engineering, Philadelphia, ICHE2006, ISBN 0977447405, 2006.
- [Figge 1981] Figge, K.:  
Begleitheft zur Karte der Sedimentverteilung in der Deutschen Bucht 1:250000 (Nr. 2900) – DHI, 1981.
- [FitzGerald 1984] FitzGerald, D.M. et al.:  
Control of Barrier Island Shape by Inlet Sediment Bypassing: East Frisian Islands, West Germany. In: Marine Geology, 60, pp. 355-376, 1984
- [Flemming 1994] Flemming, B.W., Davies, R.A.Jr.:  
Holocene evolution, morphodynamics, and sedimentology of the Spiekeroog barrier island system (southern North Sea): Senckenbergiana maritima, 24, pp. 117-155, 1994
- [Gayer 2004] Gayer, G., Dick, S., Pleskachevsky, A. Rosenthal, W.:  
Modellierung von Schwebstofftransporten in Nordsee und Ostsee. Berichte des BSH, 2004.
- [Gayer et al. 2006] Gayer, G., Dick, S., Pleskachevsky, A. and Rosenthal, W.:  
Numerical modeling of suspended matter transport in the North Sea. Ocean Dynamics, 56, pp. 62–77, 2006.
- [Gill 1971] Gill, M.A.:  
Height of sand dunes in open channel flows: Journal of the Hydraulics Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, 97, pp. 2067-2074, 1971.
- [Goff 2005] Detailed investigation of sorted bedforms, or “rippled scour depressions”, within the Martha’s Vineyard Coastal Observatory, Massachusetts. Continental Shelf Research, 25 (4), pp. 461–484, 2005
- [Grabemann 1997] Grabemann, I., Uncles, R.J., Krause, G., Stephens, J.A.:  
Behaviour of turbidity maxima in the Tamar (U.K.) and Weser (F.R.G.) estuaries. Estuarine Coastal Shelf Sci 45, pp. 235–246, 1997.
- [Irion 1987] Irion, G., Wunderlich, F., Schwedhelm, E.:  
Transport of clay minerals and anthropogenic compounds into the German Bight and the provenance of fine-grained sediments SE of Helgoland. Journal of the Geological Society, 144, pp. 153–160, 1987.
- [Janssen 1999] Janssen, F., Schrum, C., Backhaus, J.O.:  
A Climatological Data Set of Temperature and Salinity for the Baltic Sea and the North Sea. German Journal of Hydrography, Supplement 9, 1999.

- [Kachholz 1982] Kachholz, K.-H.:  
Statistische Bearbeitung von Probandaten aus Vorstrandbereichen sandiger Brandungsküsten mit verschiedener Intensität der Energieumwandlung. Dissertation, Christian-Albrechts-Universität Kiel, 1982
- [Kappenberg 2007] Kappenberg, J., Fanger H.-U.:  
Sedimenttransportgeschehen in der tidebeeinflussten Elbe, der Deutschen Bucht und in der Nordsee. Technical Report 20, GKSS, 2007.
- [Knaapen 2005] Knaapen, MAF.:  
Sandwave migration predictor based on shape information: Journal of Geophysical Research, Vol. 110, pp. 9, 2005.
- [Köster 1979] Dreidimensionale Kartierung des Seegrundes vor den Nordfriesischen Inseln. In Deutsche Forschungsgemeinschaft (Ed): Sandbewegung im Küstenraum - Rückschau, Ergebnisse und Ausblick. Weinheim, pp. 146–168, 1979
- [Kubicki in press] Kubicki, A., Bartholomä, A.:  
Sediment dynamics in the Jade tidal channel prior to port construction, southeastern North Sea. Journal of Coastal Research, SI 64 (Proceedings of the 11th International Coastal Symposium)
- [Kuiry 2009] Kuiry, SN., Ding, Y., Wang, SSY.:  
Numerical Model Study of Morphodynamics of a Coastal Inlet due to Storm Surge and Wave, Proceedings of MAESC Conference 2009, University of Memphis, 2009
- [Ladage 2002] Ladage, F.:  
Vorarbeiten zu Schutzkonzepten für die Ostfriesischen Inseln. Morphologische Entwicklung um Langeoog im Hinblick auf die verstärkten Dünenabbrüche vor dem Piroltal. Niedersächsisches Landesamt für Ökologie (NLÖ) – Forschungsstelle Küste.
- [Latteux 1995] Latteux, B.:  
Techniques for long-term morphological simulation under tidal action. Marine Geology 126, pp.129–141, 1995
- [Lesser 2004] Lesser, G.R., Roelvink, J. A., van Kester, ATM., Stelling, GS.:  
Development and validation of a three-dimensional morphological model. *Coastal Engineering*, 51, pp. 883–915, 2004.
- [Lüders 1972] Lüders, K., Führböter, A., Rodloff, W.:  
Neuartige Dünen- und Strandsicherung im Nordwesten der Insel Langeoog. Die Küste, H. 23: pp. 63-111, 1972
- [Lurton 2002] Lurton, X.:  
An introduction to underwater acoustics. Principles and applications. - 347 p.; London (Springer), 2002
- [Lyard 2006] Lyard, F., Lefevre, F., Letellier, T. Francis. O.:  
Modelling the global ocean tides: modern insights from FES2004. *Ocean Dynamics*, 53, pp. 394–415, 2006.
- [Maerker 2006] Maerker, C., Deußfeld, N., Malcherek, A.:  
Simulation von Bagger- und Verklappstrategien mit morphodynamisch-numerischen Modellen. Proceedings zum 4. Rostocker Baggergutseminar, pp. 103-112, 2006.
- [Malcherek 2003] Malcherek, A., Piechotta, F., Knoch, D.:  
Mathematical Module SediMorph – Standard Validation Document Version 1.0, Technical Report, Bundesanstalt für Wasserbau, 2003
- [Milbradt 2005] Milbradt, P., Sellerhoff, F., Krönert, N.:  
KODIBA -Abschlussbericht, smile consult GmbH, 2005
- [Milbradt 2009] Milbradt, P., Dorow, C., Asche, Ch.:  
ImTG – Abschlußbericht, Leibniz Universität Hannover, 2009.
- [Nommensen 1982] Nommensen, B.:  
Die Sedimente des südlichen Nordfriesischen Wattenmeeres (Deutsche Bucht). Diss.Univ. Kiel, 268 p, 1982.
- [Paarlberg 2009] Paarlberg, AJ, Dohmen-Janssen CM, Hulscher SJMH, Termes P.:  
Modelling river dune evolution using a parameterization of flow separation. *Journal of Geophysical Research* 114, F01014, 17 pp.
- [Plüß 2007] Plüß, A., Heyer, H.:  
Morphodynamic Multi-Model approach for the Elbe estuary. Proceedings of the 5<sup>th</sup> IAHR Symposium on River, Coastal and Estuarine Morphodynamics (RCEM), EnschedeNL, pp.113-117, 2007.

- [Poerbandono 2005] Poerbandono, Mayerle, R.:  
Composition and Dynamics of Sediments in Tidal Channels of the German North Sea Coast, *Die Küste*, 69, pp. 63–77, 2005.
- [Puls et al. 1997] W. Puls, H. Heinrich, and B. Mayer. Suspended Particulate Matter Budget for the German Bight. *Marine Pollution Bulletin*, 34, pp. 398–409, 1997.
- [Putzar 2003] Putzar, B.:  
Prognose von Dünenstrecken mit Tidekennwerten: Hamburg, TU Hamburg-Harburg, 2003.
- [Reineck 1975] Reineck, H.-E.:  
Die Größe der Umlagerungen im Neuwerk / Scharhörner Watt. *Hamburger Küstenforschung*, Heft 33, 1975.
- [Ricklefs 2005] Ricklefs, K., Asp, N.E.:  
Geology and morphodynamics of a low macrotidal environment along the German North Sea coast. *Die Küste*, 69, pp. 93–127, 2005.
- [Riesen 2008] Riesen, D., Much, D.:  
Modellierung der morphodynamischen Prozesse im Strand- und Vorstrandbereich sandiger Brandungsküsten – Schlussbericht zum KFKI-Projekt 94 “MorphoSylt”, 2008.
- [Roelvink 2006] Roelvink, J.A.:  
Coastal morphodynamic evolution techniques. *Coastal Engineering* 53, pp. 277–287, 2006.
- [Schrottke 2005] Schrottke, K., Bartholomä, A., Stegmann, S.:  
Sediment mapping of the Weser estuary, based on hydro-acoustics. – Journal series of the DVW e. V. Society of Geodesy, geo-information and land management, Vol. 47: pp. 45–52, 2005.
- [Schrottke 2006] Schrottke, K., Becker, M., Bartholomä, A., Flemming, B. W., Hebbeln, D.:  
Fluid mud dynamics in the Weser estuary turbidity zone tracked by high-resolution side-scan sonar and parametric sub-bottom profiler. – *GeoMarine Letters* 26: pp. 185–198, 2006.
- [Son 2009] Son, C.S.:  
Sediment dynamic processes and products on the shoreface of the East Frisian barrier-island system, southern North Sea: 109pp. dissertation, University of Bremen, 2009.
- [Soulsby 2005] Soulsby, R.L., Whitehouse, R.J.S.:  
Prediction of ripple properties in shelf seas, HR Wallingford, 2005.
- [Streif 1990] Streif, H.:  
Das ostfriesische Küstengebiet. Gebrüder Bornträger, Berlin.
- [Svenson 2009] Svenson, C., Ernstsen, V.B., Winter, C., Bartholomä, A., Hebbeln, D.:  
Tide-driven sediment variations on a large compound dune in the Jade tidal inlet channel, southeastern North Sea. *Journal of Coastal Research*, SI 56, pp. 361–365, 2009.
- [Swift 1978] Swift, D.J.P., Parker, P., Lanfredi, N.W., Perillo, G., Figge, K.:  
Shoreface-connected sand ridges on American and European shelves, a comparison, *Estuarine and Coastal Marine Sciences* 7, pp 257–273, 1978
- [Tiniakos 1978] Tiniakos, L.:  
Transportdifferentiation von Korngrößenspektren klastischer Sedimentgesteine aus der Westküste Schleswig-Holsteins. Diss., Christian-Albrechts-Universität Kiel, 1978.
- [Ulrich 1973] Ulrich, J.:  
Die Verbreitung submariner Riesen- und Großrippeln in der Deutschen Bucht: Ergänzungsheft zur Deutschen Hydrographischen Zeitschrift, Nr. 4, pp. 7–31, 1973.
- [Ulrich 1979] Ulrich, J.:  
Bodenrippeln als Indikatoren für Sandbewegungen: Sandbewegung im Küstenraum: Rückschau, Ergebnisse, Ausblick; Abschlussbericht / DFG, pp. 333 – 350, 1979.
- [Van der Molen 2002] Van der Molen, J.:  
The influence of tides, wind and waves on the net sand transport in the North Sea. *Continental Shelf Research* 22, pp. 2739–2762, 2002.
- [Van der Molen 2004] Van der Molen, J., Gerrits, J. De Swart, H.:  
Modelling the morphodynamics of a tidal shelf sea, *Continental Shelf Research* 24, pp. 483–507, 2004.
- [Van Rijn 1984] Van Rijn, L.C.:

- [Van Rijn 2007] Sediment transport, Part III: Bed forms and alluvial roughness: Journal of hydraulic engineering, Vol. 110, pp. 1733-1754, 1984  
Van Rijn, L.C.:  
Unified View of Sediment Transport by Currents and Waves. I: Initiation of Motion, Bed Roughness, and Bed-Load Transport: Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 133, pp. 649-667, 2007.
- [Van der Wegen, 2010] Mick van der Wegen, Ali Dastgheib, Bruce Jaffe, and Dano Roelvink: Bed composition generation for morphodynamic modeling: case study of San Pablo Bay in California, USA. *Ocean Dynamics*, pp. 1–14, 2010.
- [Winter 2003] Winter, C., Mayerle, R.:  
Calibration and Validation of a Sediment Transport Model with extensive data-sets for a tidal channel system in the German Wadden Sea, Coastal Sediments 2003, Clearwater Beach, Florida, 2003.
- [Winter 2006] Winter, C., Riethmüller, R., Ernstsen, VB., Noormets, R.:  
Observed Storm Surge Morphodynamics and Implications to Numerical Modelling Schemes, ASCE Conference Proceedings, Coastal Dynamics 2005.
- [Wunderlich 2003] Wunderlich, J., Müller, S.:  
High-resolution sub-bottom profiling using parametric acoustics. – *International Ocean Systems* 7(4): pp. 6-11, 2003.
- [Yalin 1964] Yalin, MS.:  
Geometrical properties of sand waves: *Journal of the Hydraulics Division*, Vol. 90, pp. 105-119, 1964.
- [Yalin 1977] Yalin, MS.:  
*Mechanics of Sediment Transport*: Oxford, Pergamon Press. 1977.
- [Zeiler 2000] Zeiler, M., Schulz-Ohlberg, J., Figge, K.:  
Mobile sand deposits and shoreface sediment dynamics in the inner German Bight (North Sea). *Marine Geology* 170 (3-4): pp. 363-380, 2000.



## 10 Glossar

ADCP	Acoustic Doppler Current Profiler: Akustisch basiertes Messgerät zur profilierenden Erfassung von Strömungsrichtung- und Geschwindigkeiten in der Wassersäule bzw. des Seegangs unter Nutzung des Doppler-Effekts. Die akustische Rückstreustärke wird auch zur Abschätzung von Schwebstoffgehalten genutzt.
Akkumulation	Ablagerung von Bodensediment – Erniedrigung der Wassertiefe
Bathymetrie	Tiefe der Gewässersohle unter dem mittleren Meeresspiegel
Bodenmodell	Zusammenfassung von Bathymetriedaten, Bodenformen und Sedimentologie einschließlich Stratigraphie der oberen Schicht der Gewässersohle
Datenbasierte Simulation	Berechnungsvorschrift auf der Grundlage von Daten → hier sedimentologische Daten
Ebbdelta	Seewärtige Ausbildung von Bodenformationen in Ästuarmündungen und Seegatten
Erosion	Abtrag von Bodensedimenten – Erhöhung der Wassertiefe
Fächerecholot	Dient der bathymetrischen Erfassung der Gewässersohle. Von einer fest eingebauten Schallquelle unter dem Schiff werden bis zu mehrere hundert Schallstrahlen eng gebündelt quer zur Fahrtrichtung ausgesandt. Aus der Messung von Laufzeit und Ankwunftswinkel der von der Gewässersohle zurückgestreuten Schallwellen erfolgt die flächenhafte Erfassung von Wassertiefen. Die Breite des Messstreifens hängt von der Wassertiefe ab. Sie liegt bei den gängigen Systemen bei dem 6 – 8fachen der Wassertiefe. Die verwendeten Frequenzen liegen zwischen etwa 30 und mehreren hundert kHz
Fehler	Fehler = Messung – Modellergebnis
Fokusgebiet	Fokusgebiet (Teilgebiet) ist ein Teilraum eines Modellgebietes mit größerem Maßstab zur kleinteiligen Erfassung sedimentologischer und hydrodynamischer Prozesse
Formänderungsprozess	Veränderung der Grenzschicht zwischen Wasser und Boden, beinhaltet sowohl die Entwicklung von Rippeln und Dünen als auch großräumige Erosion und Sedimentation.
Funktionales Bodenmodell	Werkzeug (Software mit geeigneten Interpretationsvorschriften) zur Erstellung eines flächenhaften, zeitvarianten Modells der Gewässersohle basierend auf Messdaten.
Gewässersohle	Gewässersohle = Gewässerboden = Meeresboden
HINDCAST	Nachhersage – Berechnung von Zustandsgrößen aus der Vergangenheit .
Hydraulische Kräfte	Unter hydraulischen Kräften werden Orbital- und Brandungsströmungen, Tide-, Trift-, Gefälle- und Dichteströmungen zusammengefasst. (Reineck, 1975)

IPDS-Format	Initial Physical Data-Set (IPDS) – BAW-Format zur Definition einer flächenhaften, fraktionierten Sedimentverteilung ( <a href="http://www.BAW-IPDS">www.BAW-IPDS</a> )
Konzept	Ein Konzept beschreibt eine Grundvorstellung, Skizze, Entwurf oder die erste Fassung. In der Regel wird ein Konzept als eine Sammlung von Leitgedanken verstanden.
LISST	Laser In-Situ Scattering & Transmissometry: Gerät das mittels Laserbeugung Partikelgrößenverteilungen in der Wassersäule in-situ erfasst.
Mathematisches Modell	Mathematische Modelle sind in mathematischen Formeln beschriebene Modelle. Sie versuchen, die wesentlichen Parameter der meist natürlichen Phänomenen zu erfassen. Durch die formelle Beschreibung kann ein Modell berechnet und wissenschaftlich geprüft werden. <a href="#">Wikipedia Modell</a>
MBES	Multi-Beam-Echo-Sounder: Fächerecholotsystem mit binärem Datenformat der WSÄ (seit 2002) einschließlich Metainformationen . ( <a href="#">KFKI-KODIBA Bericht</a> )
MDI-DE	KFKI-Forschungsprojekt <i>Marine Daten-Infrastruktur für Deutschland</i> ( <a href="http://www.kfki.MDI-DE">www.kfki.MDI-DE</a> )
Modell (Allgemein)	Ein vereinfachtes, abstraktes Abbild der Realität. <a href="#">Wikipedia Modell</a>
Modellgebiet	Modellgebiet ist ein räumlicher Rahmen / Raumtyp in dem physikalische Fragestellungen behandelt / simuliert werden.
MORAN	KFKI-Forschungsprojekt <i>Morphologische Analyse der Nordsee</i> (MORAN)
Morphodynamik	Evolution der Gewässersohle in Wechselwirkung mit der hydraulischen Belastung.
morphologische Geschwindigkeiten	Geschwindigkeit mit der sich morphologische Strukturen bewegen, Berechnung basiert auf der Geschwindigkeit mit der sich Isolinien bewegen.
morphologische Veränderungen	Raum- und zeitvariable Gestaltänderung (Morphologische Änderung = Morphodynamik) der Gewässersohle.
morphologischer Faktor	Technik zur Extrapolation von Modellergebnissen über längere Zeiträume, in dem die berechneten Änderungen der Gewässersohle (z.B. nach jeder vollständigen Tide) in der Zeit linear extrapoliert werden.
MUDAB	Die Meeres-Umwelt-Datenbank (MUDAB) ist die zentrale Datenbank des Bund/Länder-Messprogramms (BLMP) für die Meeresumwelt von Nord- und Ostsee ( <a href="http://www.BSH-MUDAB-Datenbank">www.BSH-MUDAB-Datenbank</a> ).
NOKIS	Nord-Ostsee Küsteninformationssystem ( <a href="http://www.nokis.org">www.nokis.org</a> )
Partialtiden	Analyse der Tidewasserstände ihrer harmonischen Komponenten (Amplitude und Phase einer Sinusschwingung).
Prozessbasierte Simulation	Numerischen Verfahren auf der Basis der zugrundeliegenden physikalischen Gesetzmäßigkeiten die im mathematischen System formuliert und approximiert werden.
Prozessorientierte Simulation	Numerischen Verfahren auf der Basis von eingeschränkten physikalischen Gesetzmäßigkeiten die im mathematischen System formuliert und approximiert werden.

Riffbogen	Seewärtige Ausbildung von Bodenformationen in Seegatten, die bogenförmig vom Westende einer zum Ostende der benachbarten Insel verläuft
Riffel	kleinskalige Sohlformen (auch: Rippel)
Sandwelle	Von der Gewässersohle aufragende Bodenform, die quer zur Hauptströmungsrichtung ausgerichtet ist und im Querprofil eine asymmetrische Form aufweist. Sie werden durch wechselnde Strömungsrichtungen und –stärken geformt und sind typischerweise aus Fein- und Mittelsand aufgebaut, wobei eine zunehmende Größe mit gröber werdendem Material einhergeht.
Seegatt	Zwischen Barriereinseln gelegene Verbindung des Rückseitenwatts mit der offenen See. Aufbau in Richtung See: Flutdelta, Gezeitenrinnen zwischen den Inseln, Ebbdelta
SBES	Single-Beam-Echo-Sounder = Einstrahlecholot
SBP	Sub-Bottom Profiler is effectively an echosounder that transmits a relatively low-frequency acoustic pulse that can penetrate the seabed.
Sedimentation	Anlagerung von Sedimenten am Boden – Verringerung der Wassertiefe.
Sedimentologie	Lehre der Sedimente; umfasst die Beschreibung, Klassifizierung von Sedimenten und Sedimentgesteinen sowie deren Eigenschaften (Sedimentzusammensetzung, Sedimentmächtigkeit)
SES	Sediment-Echo-Sounder: Sedimentecholot ist ein akustisch basiertes Messsystem, das unter Aussendung von Schallsignalen um 100kHz mit hohem Schalldruck niederfrequente Sekundärsignale erzeugt (parametrischer Effekt), die in die obere Gewässersohle eindringen und an Grenzflächen rückgestreut werden.
Seitensichtsonar	Dient der flächenhaften Erfassung der Rückstreuereigenschaften der Sedimentoberfläche der Gewässersohle mittels hochfrequenter Schallwellen (Frequenzbereiche zwischen 100 und 1000 kHz). Die Schallquelle wird in der Regel in der Wassersäule dicht über dem Meeresboden hinter dem Schiff geschleppt. Die Breite des zu kartierenden Streifens ist unabhängig von der Wassertiefe.
Shelf Geo Explorer (SGE)	Das Fachsystem beinhaltet Geodaten über Sedimentverteilung, -mächtigkeiten, Kernpositionen, Positionen von Drucksondierungen sowie Lage von Profilen zur Hydroakustik, Magnetik und Videoaufnahmen in Nord- und Ostsee ( <a href="http://www.BSH-SGE">www.BSH-SGE</a> ).
Selafin-Format	Binäres Standard-Format von TELEMAC, auch genutzt von nsea100
Sohlformen	Sohlformen = Bodenformen = Oberfläche der Gewässersohle
Sorted bedform	Langgestreckte, ausgeräumte Bodenform, die durch Turbulenzen in der Wassersäule erzeugt wird. Die Turbulenzen sorgen für eine lokale Vertiefung des Meeresbodens und für eine Sedimentsortierung mit scharfen Sedimentverteilungsgrenzen, wobei sich gröberes Material innerhalb und feineres Material außerhalb der Bodenform befindet. Sorted bedforms kommen oft parallel-liegend in größerer Anzahl von bis zu mehreren hundert vor und bilden so Felder aus.
SSS	Side-Scan-Sonar = Seitensichtsonar

Stratigraphie	Sedimentologischer Aufbau / vertikale Zusammensetzung der Gewässersohle – vertikale Schichtung.
Streubreite	Die Streubreite ist die Differenz zwischen dem höchsten und dem niedrigsten Messwert / Simulationsergebnis ( <a href="#">statista</a> ).
Subbottom Profiler	Dient der Erkundung des geologischen Aufbaus der Gewässersohle. Grundlage ist die partielle Reflektion von Schallwellen an Grenzflächen zwischen geologischen Einheiten mit unterschiedlichen Impedanzeigenschaften. Typischerweise werden akustische Signale mit Frequenzen zwischen 2 bis 30 kHz verwendet. Die Schallquelle ist entweder fest am Schiffsboden angebracht oder wird zusammen mit der Empfangseinheit an der Wasseroberfläche geschleppt.
Teilgebiet	Teilgebiet → Fokusgebiet
WADABA	Die WADABA ist die zentrale Datenbank des Wattenmeerinformations-systems WATIS, Halter: Helmholtzzentrum Geesthacht
Watteinzugsgebiet	Wattfläche deren Rinnensystem geschlossen durch ein Seegatt entwässert



## 11 Anhang

Im Anhang sind detaillierte Untersuchungen enthalten, die aus Platzgründen nicht im Hauptdokument enthalten sein können.

### 11.1 Liste der projektbezogenen Veröffentlichungen / Vorträge

#### 11.1.1 AufMod-B

2010

- Lefebvre A, Ernstsens VB and Winter C, 2010. Influence of compound bedforms on hydraulic roughness in a tidal environment. *Physics of Estuaries and Coastal Seas (PECS) 2010*, 14-17 September 2010, Colombo, Sri Lanka.
- Lefebvre A, Ernstsens VB and Winter C, 2010. Bedform characterization through 2D spectral analysis. *Journal of Coastal Research, SI 64, International Coastal Symposium (ICS) 2011*, 9-14 May 2011, Szczecin, Poland (accepted).
- Ernstsens VB, Winter C, Becker M and Bartholdy J, 2010. On the dynamics of compound bedforms in high-energy tidal channels: field observations in the German Bight and the Danish Wadden Sea. *European Geosciences Union (EGU) General Assembly 2010*, 2-7 May 2010, Vienna, Austria.

2011

- Ernstsens VB, Lefebvre A, Bartholdy J, Bartholomä A and Winter C, 2011. Spatiotemporal height variations of large-scale bedforms in the Grådyb tidal inlet channel (Denmark): a case study on coastal system impact. *Journal of Coastal Research, SI 64, International Coastal Symposium (ICS) 2011*, 9-14 May 2011, Szczecin, Poland (accepted).
- Winter C, 2011. Macro scale morphodynamics of the German North Sea coast. *Journal of Coastal Research, SI 64, International Coastal Symposium (ICS) 2011*, 9-14 May 2011, Szczecin, Poland (accepted).
- Ernstsens VB, 2010. Tidal inlets: dynamic and sensitive systems. *DANCORE Young Professionals Day 2011*, 25 February 2011, Copenhagen, Denmark.

#### 11.1.2 AufMod-C

2010

- F. Kösters, A. Plüß, H. Heyer, K. Kastens, and A. Sehili. AufMod-C Validating a hydrodynamic framework for long-term modelling of the German Bight. In *Geophysical Research Abstracts*, volume 12 of EGU. EGU General Assembly, 2010.

2011

- M. Kastens. Präsentation in der WSV AG IT-GeKü: Verfahren zur automatischen Plausibilisierung von Wasserstandszeitreihen

### **11.1.3 AufMod-F**

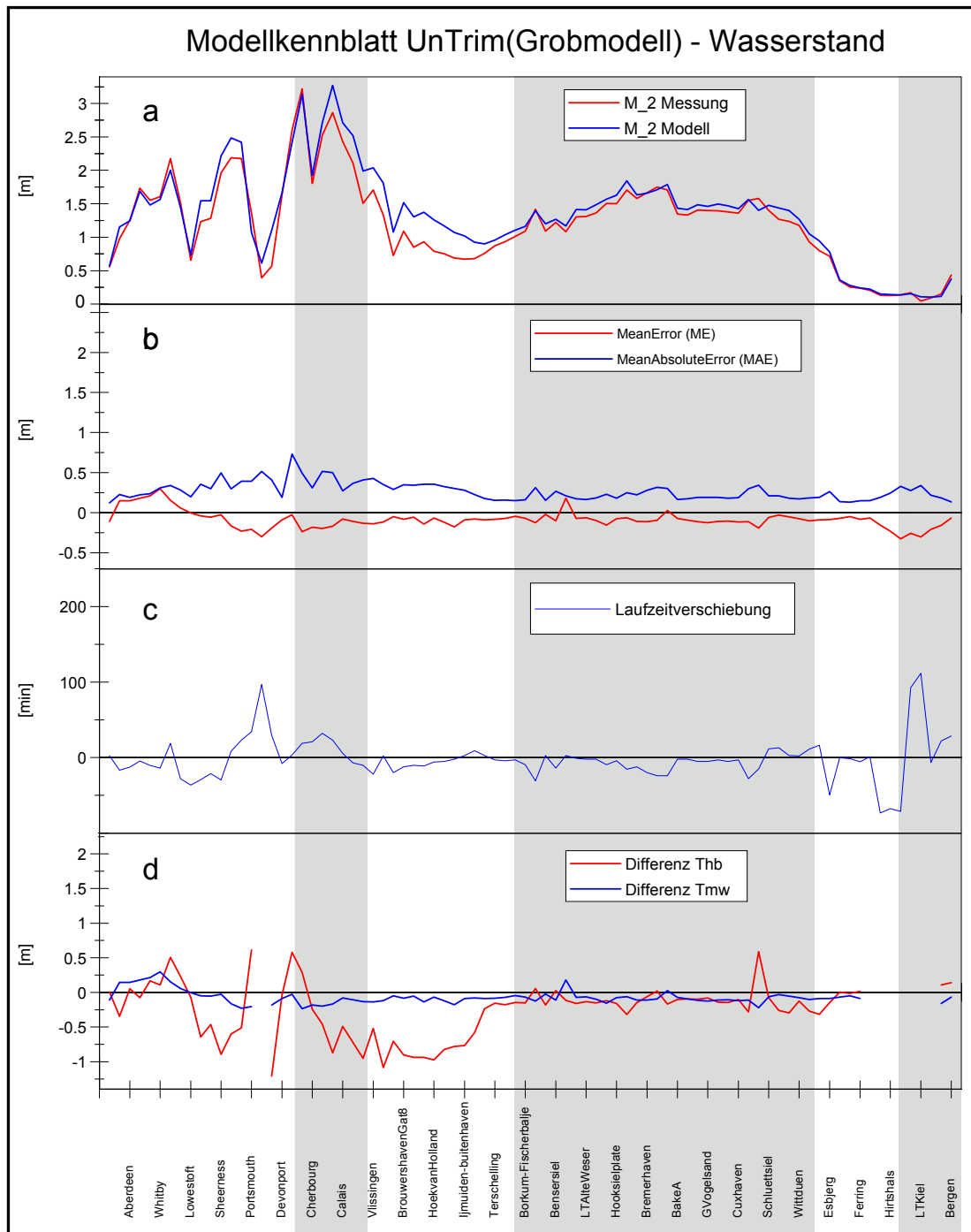
Schwarzer, K., Feldens, P., Dolch, T.: *Preparing for coastal change - what do we need to know about sandy shores*. IGCP 588 / INQUA Coastal and Marine Processes Commission - Preparing for coastal Change: A detailed process-response framework for coastal change at different timescales, Hong Kong, 30.11. - 04.12.2010, Hong Kong SAR

### **11.1.4 AufMod-G**

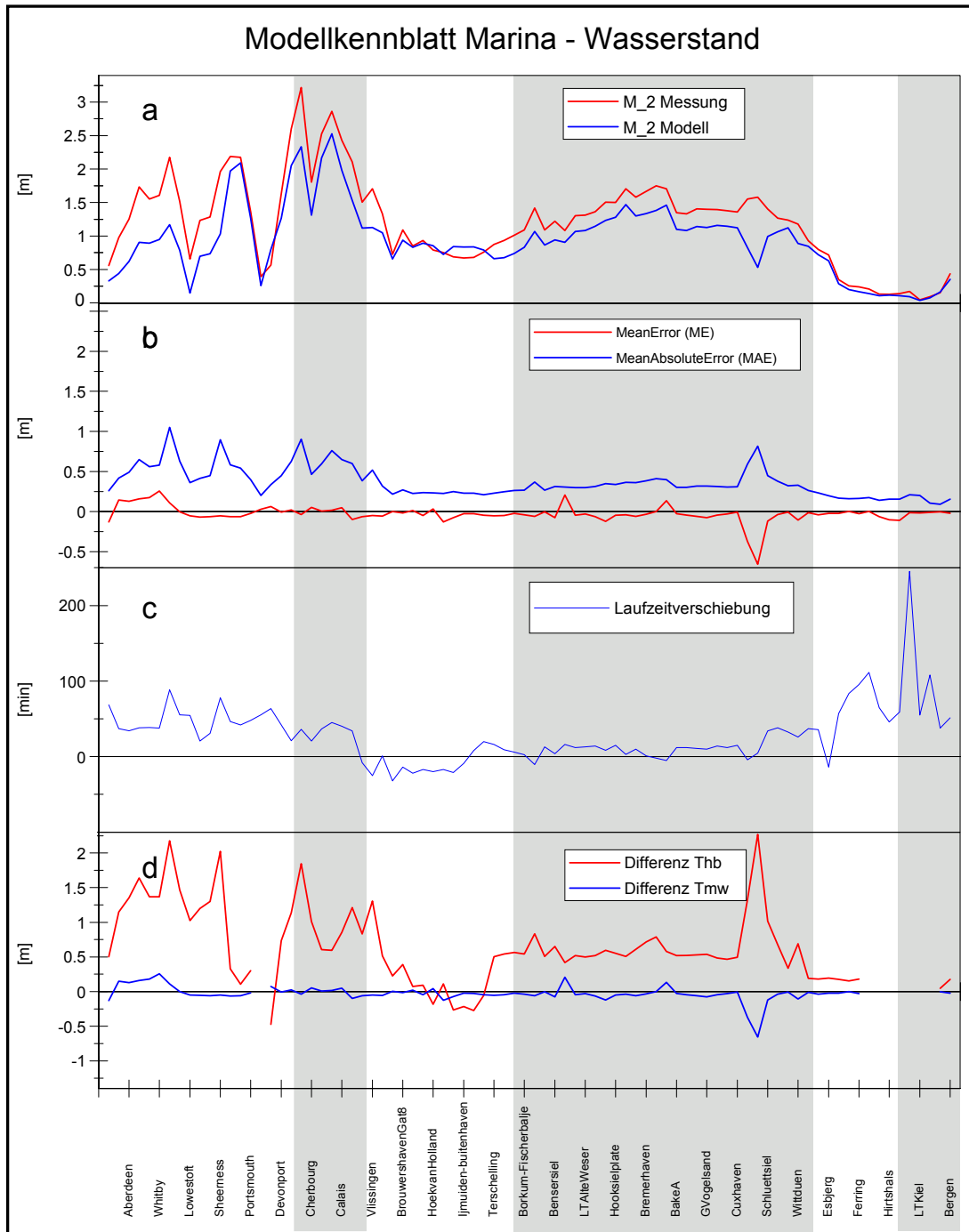
Kubicki, A. and Bartholomä, A., 2011. *Sediment dynamics in the Jade tidal channel prior to port construction, southeastern North Sea*. Journal of Coastal Research, SI 64 (Proceedings of the 11th International Coastal Symposium), ? – ?. Szczecin, Poland, ISSN 0749-0208

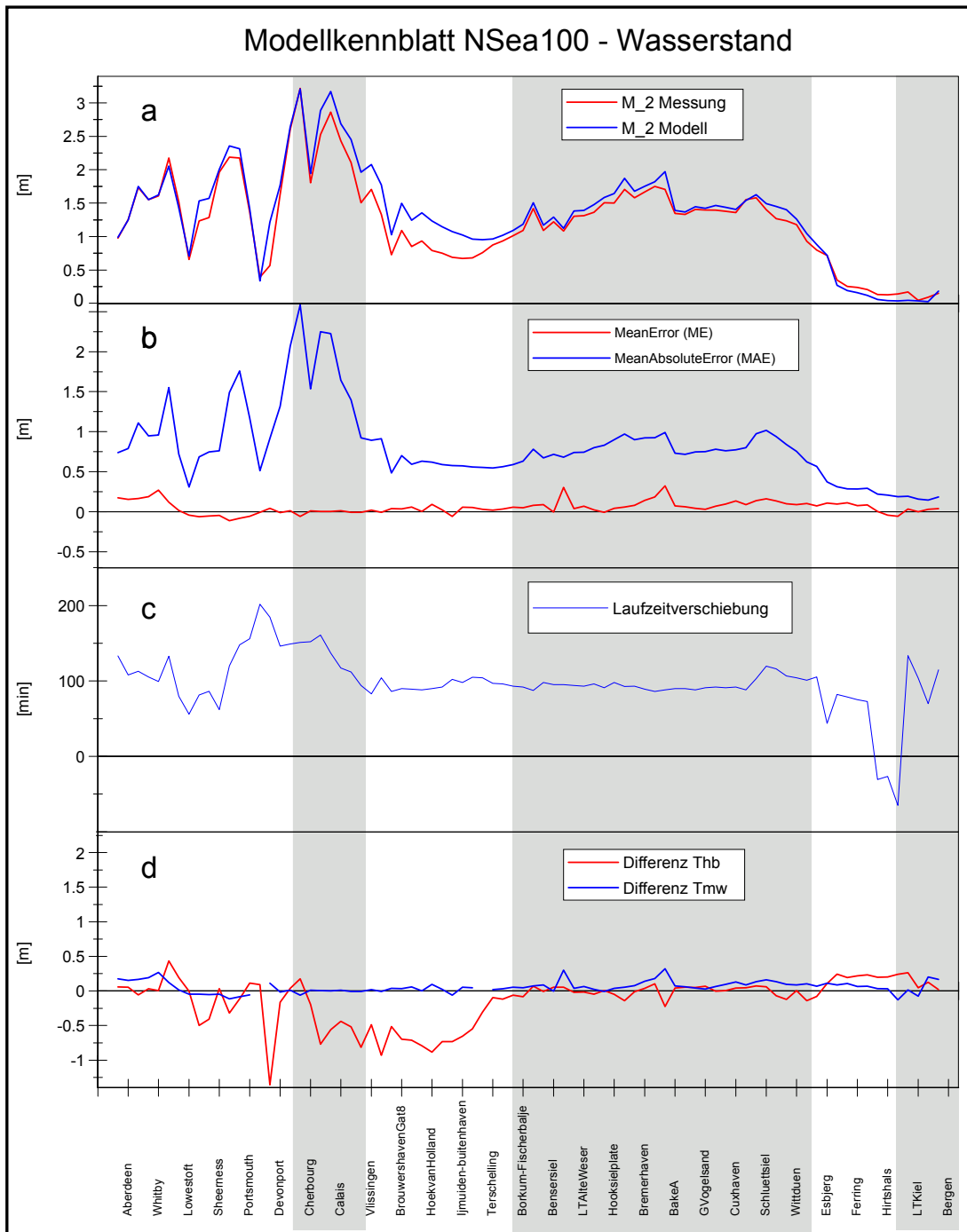
## 11.2 Validierungsdokumente Hydrodynamik und Transport

Vergleich der Modellkennblätter der Analyse des Wasserstandes für die prozessbasierten Modelle (UnTRIM, MARINA) und das prozessorientierte Simulationsmodell (nsea100).









Weitergehende Informationen enthält das Validierungsdokument:

[Nordsee-Modellvalidierung Teil1\\_2011-03-24.pdf](#)

### 11.2.1 Rand- und Anfangsbedingungen

Zu Beginn der Simulation müssen die verwendeten Berechnungsgrößen mit Anfangsbedingungen initialisiert werden. Bei der Initialisierung der numerischen Simulationsmodelle ist zwischen den hydrodynamischen und den sedimentspezifischen, morphodynamischen Anfangsbedingungen zu unterscheiden.

Für die hydrodynamischen Anfangsbedingungen gelten folgende Vorgaben:

- Wasserstand: keine Wasserspiegelauslenkung
- Strömungsgeschwindigkeit: Start aus der Ruhe
- 2d-Salzgehaltsverteilung aus einer Salzgehaltsklimatologie der Nord- und Ostsee (*Janssen et al., 1999*)
- Sedimentkonzentration: Keine oder approximierter Schwebstoffgehalt in der Wassersäule
- Seegang: Keine oder aus dem Windfeld approximiert

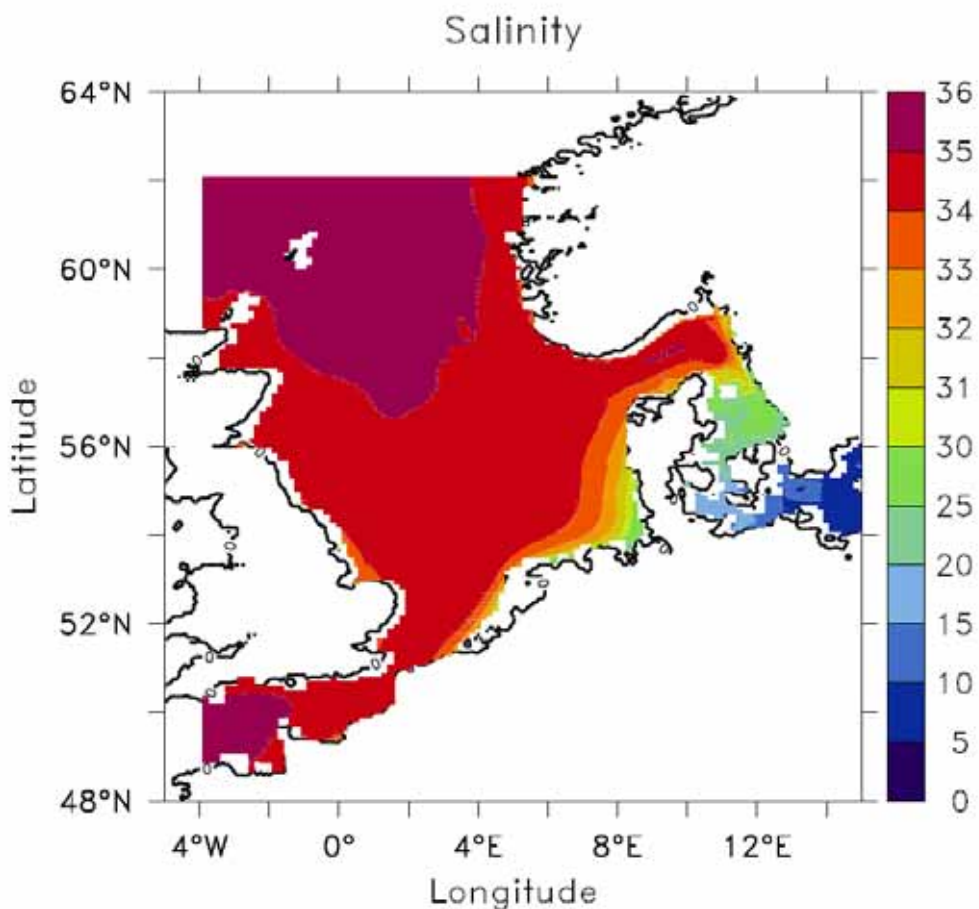


Abbildung 11-1 Darstellung der mittleren Salzgehalte aus der Klimatologie von Janssen et al. (1999)

Basierend auf diesen Anfangsbedingungen werden für die unterschiedlichen Größen verschiedene Einschwingzeiten benötigt. Der Seegang ist sehr stark durch das vorherrschende Windfeld dominiert, die Wasserstände sind bereits nach wenigen Tiden realistisch, Salzgehalte benötigen dagegen mehrere Wochen und Schwebstoffe ein Jahr um realistisch verteilt zu sein. Daher wird für jedes Modell zunächst ein Vorlauf von 1 Jahr gestartet und diese Ergebnisse dann als Startbedingungen genutzt.

Für die Erzeugung konsistenter morphologischer Anfangsbedingungen bestehen verschiedene Ansätze. Bei nur ungenauer Kenntnis des Untersuchungsgebietes kann versucht werden eine konsistente Korngrößenverteilung berechnen zu lassen (*van der Wegen (2010)*). Hierzu wird von einer mittleren Verteilung ausgegangen, die dann durch eine morphostatische Berechnung mit dem Modell umverteilt wird. *van der Wegen (2010)* wendet diesen Ansatz auf die San Pablo Bay erfolgreich an. Nach fünf Simulationsjahren ist ein Gleichgewichtszustand erreicht. Die Anwendbarkeit auf große Modellgebiete wie die Nordsee ist jedoch nicht gegeben, da die zu erwartenden Berechnungszeiten zur Umverteilung hier nicht realisierbar sind. Stattdessen wird versucht das vorhandene Sedimentinventar möglichst genau zu beschreiben. Anpassungen der vorgegeben Morphologie an die berechnete Belastung der Sohle können dann über einen kürzeren Modellvorlauf realisiert werden.

Für die morphodynamischen Simulationen werden folgende Anfangsbedingungen verwendet:

- **Initiale Bathymetrie:**  
Für die Tiefenverteilung wurden die Werte zum 1. Januar 2006 aus dem funktionalen Bodenmodell abgeleitet.
- **Bodenformen:**  
An der Gewässersohle muss die Oberflächenbeschaffenheit (Rauhigkeit) flächendeckend vorgegeben werden. Die Rauhigkeit setzt sich aus der Form des Bodens (Dünen, Riffel\*) sowie der Kornrauheit (Sedimentbeschaffenheit) zusammen. Die initiale Formrauheit kann als Konstant angenommen oder aus dem funktionalen Bodenmodell abgeleitet werden.
- **Sedimentverteilung:**  
Das funktionale Bodenmodell enthält alle verfügbaren Summenkurven für die Korngrößenverteilungen verschiedener Epochen. Hieraus können für die Modelle, die fraktionierten Sedimenttransport berechnen, entsprechende Kornklassen z. B. nach der Udden-Wentworth-Skala extrahiert werden. Eine alternative Methode besteht darin, d50-Verteilungen und Korngrößenvarianzen abzuleiten. Die Verwendung der Kornklassen unterscheidet sich in den einzelnen Modellverfahren (vergleiche Tabelle 5-2).
- **Dicke der mobilen Deckschicht:**  
Im ersten Ansatz wird von einer einheitlichen Mächtigkeit der mobilen Deckschicht von

20 m oder einer Tiefe, die aus dem funktionalen Bodenmodell abgeleitet wird ausgegangen.

Modelluntersuchungen in der Vergangenheit haben gezeigt, dass der Einfluss ungenügender oder falscher Anfangsbedingungen für die Hydrodynamik nach einer angemessenen Einschwingzeit, aufgrund des starken dissipativen Systemverhaltens, vollkommen abklingt. Das Verhalten ungenügender Anfangsbedingungen in morphodynamischen Modellen ist noch nicht vollständig untersucht.

Randbedingungen für die Hydrodynamik sind:

- Wasserstand:
  - UnTRIM, DELFT3D, MARINA: Einsteuerung von Wasserstandszeitreihen am Modellrand generiert aus den Ergebnissen des globalen Gezeitenmodells FES 2004 (*Lyard et al., 2006*)
  - nsea100: Wasserstände aus Partialtiden synthetisiert
- Mittelwasserschwankung
  - UnTRIM, DELFT3D, MARINA: Steuerung der Mittelwasserlage aus dem Windstaumodell des BSH basierend auf dem Nordatlantikmodell BSHcmod.na
  - nsea100: nicht enthalten
- Strömungsgeschwindigkeit:
  - UnTRIM, Delft3D: kein Impulseintrag
  - MARINA: Impulseintrag
  - nsea100: kein Impulseintrag
- Salzgehalt:
  - UnTRIM, Delft3D, MARINA: Relaxation des vertikal gemittelten Salzgehaltes am Modellrand zu klimatologischen Werten der Salzgehaltsklimatologie von *Jansen et al. (1999)*, Eintrag durch das Oberwasser der deutschen Ästuare aus Messungen, restl. Zuflüsse mit konstantem Salzgehalt von 0,5 PSU
  - nsea100: nicht enthalten
- Oberwasserabfluss:
  - UnTRIM, DELFT3D, MARINA: Deutsche Ästuare aus Messungen, restl. Zuflüsse: langjährige Monatsmittelwerte
  - nsea100: nicht enthalten
- Wind:
  - UnTRIM, DELFT3D, MARINA: Windgeschwindigkeit und Luftdruck aus dem Prognosemodell des DWD
  - nsea100: nicht enthalten

Randbedingungen des Seegangs sind:

- Windgeschwindigkeit:

- UnK, MARINA: Windgeschwindigkeit u. Luftdruck aus dem Prognosemodell des DWD
- DELFT3D (SWAN): Nach Umformung in das Delft-Format Windfelder wie oben
- Wellenhöhe / Peakfrequenz
  - UnK: abgeleitet aus dem Windfeld und angenommener Fetchlänge
  - DELFT3D (SWAN): Nach Vorgabe der Richtungssektoren
  - MARINA: abgeleitet aus dem Windfeld oder aus übergeordnetem Modell

Randbedingungen der Morphodynamik sind:

- Schwebstoffgehalt:
  - SediMorph: Eintrag von Schwebstoffen über die offenen Ränder im Norden und Westen, mit dem Oberwasser und aus Küstenabbrüchen an der englischen Küste, der Aufbau der Randbedingungen für den Schwebstofftransport folgt Gayer et al., 2006 and *Dobrynin (2009)*) ist jedoch hier in vier Schwebstoffklassen eingeteilt.
  - DELFT3D:
  - MARINA: Entsprechend der Transportformel gesättigte Konzentration oder aus übergeordnetem Modell
  - nsea100: nicht enthalten
- Geschiebetransport:
  - SediMorph, MARINA: Gleichgewichtsformulierung (zero gradient) an den offenen Rändern.
  - nsea100: nicht enthalten

**Tabelle 11-1: Randwerte / Daten für die Simulationsmodelle in *AufMod***

<b>Randwerte</b>	<b>UnTRIM</b>	<b>DELFT3D</b>	<b>MARINA</b>	<b>nsea100</b>
Bathymetrie	Bodenmodell	Bodenmodell	Bodenmodell	Bodenmodell
H-Randwerte	FES-Modell	FES-Modell	FES-Modell	. / .
Oberwasser	Messungen	Messungen	Messungen	. / .
external surge	BSH-Modell	BSH-Modell	BSH-Modell	. / .
Partialtiden	. / .	. / .	. / .	UnTRIM
Wind	DWD	DWD	DWD	?
Sediment	Bodenmodell	Bodenmodell	Bodenmodell	Bodenmodell
Bodenformen	Bodenmodell	Bodenmodell	Bodenmodell	. / . ?
Seegang	Fetch / Wind	Fetch / Wind	Fetch / Wind	?

Die Variation dieser, das numerische Modell steuernden, Größen im Rahmen von Sensitivitätsuntersuchungen gibt Aufschluss über die zu erwartenden Unsicherheiten in den Simulationsergebnissen.

### **11.2.2 Prozessbasierte Modellierung – UnTRIM Grobmodell**

Das Dokument zur Kalibrierung und Validierung des Grobmodells mit dem Verfahren UnTRIM-SediMorph liegt in zwei separaten Dokumenten vor:

- Modellvalidierung\_Teil1\_Allgemein.doc
- Modellvalidierung\_Teil2\_UnTRIM-GM.doc