



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

AufMod

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

18.07.2013

Dr.-Ing. Harro Heyer

Prof. Dr. Kerstin Schrottke

GEFÖRDERT VOM



**Bundesministerium
für Bildung
und Forschung**

Zusammenfassung

Das Gesamtvorhaben diente dem Aufbau von integrierten Modellsystemen (**AufMod**) zur Analyse der langfristigen Morphodynamik in der Deutschen Bucht. Auslöser für dieses Vorhaben war eine im Jahr 2008 durchgeführte Ausschreibung des KFKI mit einer detaillierten Anforderungsliste. Hervorzuheben ist, dass die Ausschreibung verschiedene Einzelaspekte der Sedimentbewegung formulierte, die über eine reine Analyse der Veränderungen in der Bathymetrie weit hinaus gehen. Das nunmehr abgeschlossene Gesamtvorhaben orientiert sich sehr eng an den damaligen Ausschreibungsdetails. Es wurden 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, war es notwendig alle verfügbaren Daten für die marine und küstennahe Bathymetrie (einschließlich lokal auftretender Bodenformen) und vor allem auch für die Sedimentcharakteristik zu akquirieren und für die Zwecke des Projekts aufzubereiten. Die Akquisition von Daten war fallweise schwierig und insgesamt aufwendig. Die Aufarbeitung des Altdatenbestandes ist nun weitestgehend abgeschlossen. 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 Sedimentbeschaffenheit geht, von der aus man mit Simulationsmodellen zeitliche Entwicklungen berechnen könnte. Es ist vielmehr gelungen für verschiedene Historien in Zeit und Raum konsistente Daten zu gewinnen. Vor diesem Hintergrund wurde im Projekt sehr frühzeitig die Entscheidung getroffen, ein umfassendes softwaregestütztes Bodenmodell zu generieren, das die Daten zur Bathymetrie und Sedimentbeschaffenheit gemeinsam verwaltet und funktional, d. h. nach spezifischen Vorgaben, verarbeiten und dem Anwender anforderungsgerecht zur Verfügung stellen kann (Funktionales Bodenmodell). Die Entscheidung für diese Vorgehensweise bedeutete zunächst einmal mehr Aufbauarbeit im Projekt. Diese zahlte sich aber im späteren Projektverlauf aus, zumal das Funktionale Bodenmodell mit Methoden für datenbasierte Analysen ausgestattet worden ist. Darüber hinaus wurde im Rahmen dieser Entscheidung auch daran gedacht, a priori Wege zu gehen, die zu einsatzfähigen Produkten in den am Projekt beteiligten Ressortforschungseinrichtungen führen können.

Die Betrachtung der Sedimentprozesse in der Deutschen Bucht kann nicht ohne die Berücksichtigung der Prozesse in der gesamten Nordsee erfolgen. Im Projekt **AufMod** 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, wurde im Gesamtvorhaben auch auf bestimmte Gebiete fokussiert. Hierzu gehörten Gebiete auf dem Schelf bzw. im Küstenvorfeld, im Vorstrandbereich, im Bereich von Inseln und im Wattenmeer. Von besonderem Interesse waren 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 Projektbeginn verteilt vorhandenen Daten wurden für das Vorhaben mit speziellen Messmethoden zusätzli-

che Daten erhoben, die insbesondere der datenorientierten Analyse dienen, um so das mit numerischen Modellen erzielbare Prozessverständnis nachhaltig zu verbessern. Die Auswertungen der aktuellen Messfahrten für das Projekt waren zeitaufwendig. Die Ergebnisse dienten primär der direkten Interpretation.

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

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

Es wurde eine abschließende Synthese erarbeitet, die alle relevanten Ergebnisse der Teilprojekte einbezieht und eine übergreifende, gemeinsame Bewertung zur Beantwortung der in der KFKI-Ausschreibung formulierten Ziele erstellt.

Inhaltsverzeichnis		Seite
1	Einführung	1
1.1	Bezug zur Ausschreibung des KFKI	1
1.2	Ziel des Gesamtprojekts	2
1.3	Projektorganisation	4
1.4	Einführung in das Arbeitsgebiet „Deutsche Bucht“	5
1.4.1	Quartäre Entwicklung der Deutschen Bucht	5
1.4.2	Schelfbereich	6
1.4.3	Küstenzone	8
2	Erstellung der notwendigen Grundlagen für die Analyse der langfristigen Morphodynamik in der Deutschen Bucht	9
2.1	Konzeptioneller Ansatz – Integriertes Modellsystem	9
2.1.1	Konzeptionelles Bodenmodell	9
2.1.2	Konzeptionelles Simulationsmodell	11
2.1.3	Verzahnung von Boden- und Simulationsmodell	12
2.2	Datengrundlagen	13
2.2.1	Bodenbezogene Daten	14
2.2.1.1	Bathymetrische Vermessungsdaten	15
2.2.1.2	Korngrößenverteilungen	16
2.2.1.3	Porosität	18
2.2.1.4	Bodenformen und Beschaffenheit des Oberflächensediments	18
2.2.1.5	Mächtigkeit der mobilen Deckschicht	19
2.2.2	Hydrodynamische Daten	20
2.2.3	Meteorologische Daten	20
2.3	Das Funktionale Bodenmodell	20
2.3.1	Zeitinvariantes Basis-Modell	21
2.3.2	Zeitvarianter Modellansatz	22
2.4	Methodenentwicklung 1: neuartige Multimethodenansätze zur künftigen flächenhaften Erfassung der Morpho- und Sedimentdynamik	22
2.4.1	Auswahl der Fokusgebiete	23
2.4.2	Geowissenschaftlicher Kenntnisstand in den Fokusgebieten	24
2.4.3	Vorgehensweise zur flächenhaften Erfassung der Sedimentbeschaffenheit	25
2.4.4	Erfassung von Bodenformen	30
2.5	Methodenentwicklung 2: der numerische Modellbaukasten	31

2.5.1	Eingesetzte mathematische Modelle	31
2.5.2	Modellvalidierung	31
3	Ergebnisse aus den Felduntersuchungen sowie der datenbasierten Modelle und deren Bewertung	33
3.1	Hochauflösende Sedimentkartierung in den Fokusgebieten	33
3.1.1	Ergebnisse der sedimentologischen Auswertungen in den Ästuaren von Elbe und Weser	33
3.1.2	Ergebnisse zum Dünenfeld bei Minsener Oog	51
3.1.3	Ergebnisse der Sedimentklassifikation „Watten“	55
3.1.4	Ergebnisse der Sedimentklassifikation „Vorstrand/ Schelf“	63
3.1.5	Ergebnisse zu den Zungenriffen vor der Insel Spiekeroog	67
3.2	Vergleich der <i>AufMod</i> -Ergebnisse mit bestehenden Kartierungen	70
3.2.1	Ästuar	72
3.2.2	Watten	78
3.2.3	Schelf	83
3.3	Mobilisierbarkeit oberflächennaher Sedimente	87
3.3.1	Mobilität subtidaler Wattsedimente	87
3.3.2	"Mobile Deckschicht" auf dem Schelf	90
3.3.3	Einfluss benthischer Organismen auf die Ausbildung der Meeresbodenoberfläche, dargestellt am Beispiel von <i>Lanice conchilega</i>	94
3.3.4	Analyse der Bodenformen	99
3.3.5	Stabilität von Bereichen mit Bodenformen	102
3.3.6	Gültigkeit von Prädiktoren	104
3.3.7	Zeitliche Variabilität von Bodenformen	105
3.3.8	Gleichgewichtsbeziehung	106
3.4	Produkte der flächendeckenden Sedimentkartierung	106
3.5	Datenbasierte Ergebnisse	109
3.5.1	Morphologische Produkte des Funktionalen Bodenmodells	109
3.5.2	Sedimentologische Produkte des Funktionalen Bodenmodells	116
3.5.3	Berechnung der Mächtigkeit der mobilen Deckschicht	118
3.5.4	Analysen aus Bathymetrieänderungen	118
3.5.4.1	Methode	120
3.5.4.2	Bewertung der Methode	120
3.5.4.3	Ergebnisse	120
3.5.4.4	Ausblick	123

3.6	Entwicklung eines konzeptionellen Morphodynamik-Modells der Deutschen Bucht	124
3.7	Datenbasierte Analyse der Sediment- und Morphodynamik auf dem Schelf, in Wassertiefen über 15m	128
4	Prozessbasierte Simulationsmodelle	133
4.1	Multi-Modell-Ansatz	133
4.1.1	Beschreibung der Modellverfahren	134
4.1.2	Modellausdehnungen und –auflösung	136
4.1.3	Gitternetze	136
4.1.4	Anfangsbedingungen	138
4.1.5	Randwerte	139
4.2	Validierung	140
4.2.1	Validierungsparameter	141
4.2.2	Plausibilisierung	142
4.2.3	Massenbilanz	143
4.2.4	Hydrodynamik	144
4.2.5	Seegang	145
4.2.6	Sedimenttransport	146
4.2.7	Morphodynamik	147
4.2.8	Volumenbilanz	148
4.2.9	Validierung des Langfristsimulationsmodells	153
4.3	Modellsystem UnTRIM/SediMorph/UnK	159
4.3.1	Sedimentologie	159
4.3.1.1	Einführung	159
4.3.1.2	Methodischer Ansatz	160
4.3.1.3	Ergebnisse	160
4.3.1.4	Diskussion	164
4.3.2	Sedimenttransport	165
4.3.2.1	Einführung	165
4.3.2.2	Methodischer Ansatz	167
4.3.2.3	Ergebnisse	167
4.3.2.4	Diskussion	175
4.3.3	Prozessbasierte Analyse der Morphodynamik	175
4.3.3.1	Einführung	175
4.3.3.2	Methodischer Ansatz	175
4.3.3.3	Ergebnisse	175

4.3.3.4	Diskussion	180
4.4	Modellsystem DELFT3D/MOR/SWAN	182
4.4.1	Hydrodynamik	182
4.4.2	Seegang	182
4.4.3	Sedimenttransport / Morphodynamik	183
4.4.4	Parameterstudien	185
4.5	Modellsystem MARINA	188
4.5.1	Modellkomponenten	188
4.5.2	Hydrodynamik	188
4.5.3	Morphodynamik	189
4.6	Entwicklung des Langfristsimulationsmodells	190
4.6.1	Modellkopplung	193
4.6.2	Gitternetz, Rand- und Anfangsbedingungen	193
4.6.3	Modellierung von Unterhaltungsmaßnahmen	195
4.6.4	Modellierung von Baggergutumlagerungen	198
4.6.5	Szenarien	205
4.6.5.1	Szenario Meteorologie 2006	205
4.6.5.2	Szenario Meteorologie 1998	210
4.6.5.3	Szenario Meeresspiegelanstieg	214
4.6.5.4	Szenario Unterhaltungsmaßnahmen	217
5	Synthese	220
5.1	Ziel	220
5.2	Konzepte zur Vorhersage	220
5.3	Fragen zur Sedimentverteilung und -zusammensetzung	223
5.4	Fragen zu kleinräumigen Bodenformen (Transportkörper)	230
5.5	Fragen zur Morphodynamik	232
5.6	Fragen zum Sedimenttransport	236
5.7	Fragen zu den Methoden und Verfahren für Analysen und Prognosen	238
5.8	Botschaften für die Öffentlichkeitsarbeit	241
5.9	Datenmanagement	242
6	<i>AufMod</i> -Produkte in der MDI-DE	244
6.1	Ergebnissicherung bei der BAW	245
6.2	Ergebnissicherung im BSH	247
6.3	Metadatenbeschreibung	248

6.4	Produktdarstellung und -Zugang	248
6.5	Datenverfügbarkeit	251
7	Literaturverzeichnis	252
8	Anhang	265
8.1	Leitung, Ziele und Inhalte der Teilprojekte	265
8.2	Im Rahmen von <i>AufMod</i> durchgeführte Veranstaltungen	271
8.3	Sedimentologische Auswertung anhand von Querprofilen	272
8.4	Satellitendaten zur Validierung des Schwebstofftransportes	276
8.4.1	Datengrundlage	276
8.4.2	Bearbeitungsmethode	277
8.4.2.1	Präprozessierung	277
8.4.2.2	Prozessierung	277
8.4.2.3	Plausibilisierung	278
8.4.2.4	Bewertung	278
8.4.3	Ergebnisse	279
8.4.3.1	Statistik	279
8.4.3.2	Sichttiefe	280
8.4.3.3	Charakterisierungen	281
8.4.3.4	Validierung mit Modelldaten	282
8.4.4	Ausblick	286
8.5	Das prozessorientierte Modellsystem	287

Abbildungsverzeichnis	Seite
Abbildung 1-1: Struktur der Organisation des Projekts <i>AufMod</i>	5
Abbildung 1-2: Mächtigkeit des Holozäns im Elbe-Urstromtal (Quelle: Figge 1980)	7
Abbildung 2-1: Konzeptioneller Ansatz des integrierten Modellsystems	10
Abbildung 2-2: Konzeptionelles Bodenmodell	11
Abbildung 2-3: Übersicht des konzeptionellen Simulationsmodells	12
Abbildung 2-4: Übersicht der <i>AufMod</i> -Fokusgebiete zur hochauflösenden Datenerhebung, bzw. Auswertung von Überwachungsberichten der Transitrohrleitungen	15
Abbildung 2-5: Lokationen der <i>AufMod</i> – Sedimentproben	17
Abbildung 2-6: Ablauf der Rekonstruktion der Daten von Ulrich (Ulrich, 1971) am Beispiel der Außenjade: (a) Rohdaten, (b) digitalisierte Punkte und Polygone, (c) rekonstruierte Höhen, (d) Darstellung der Höhen (Mittelwerte) im Gesamtbereich	18
Abbildung 2-7: Verteilung der Datengrundlage zur Modellierung des konsolidierten Horizonts	19
Abbildung 2-8: Ausdehnung des Funktionalen Bodenmodells	21
Abbildung 2-9: Beispiel für die Verteilung der extrahierten Bodenformparameter: a) Bodenformhöhen, b) Bodenformlängen im Gesamtgebiet	31
Abbildung 3-1: Fotos von Greiferproben aus dem Elbe-Ästuar. Die feinsandige Matrix ist unterschiedlich dicht von Schlickgeröllen überlagert bzw. durchsetzt. Auf dem Foto rechts wird zudem exemplarisch auf Schlickgerölle verwiesen, die sich insbesondere durch ihre Konsistenz (Typ 1: hart, Typ2: weich) und demnach auch durch ihre Materialherkunft unterscheiden	34
Abbildung 3-2: Prozentuale Bedeckung der Sedimentoberfläche mit Schlickgeröllen an den Probenlokationen entlang des Elbe-Ästuars, exemplarisch gezeigt für die Situation im August 2010	35
Abbildung 3-3: Prozentuale Bedeckung der Gewässersohle mit Schlickgeröllen entlang des Elbe-Ästuars im August 2010 mit Ausweisung der Typklasse 1 (obere Grafik) sowie der Zuweisung des Matrixtyps (untere Grafik)	35
Abbildung 3-4: Medemrinne mit Wattabbruchkante	37
Abbildung 3-5: Datenbasis (August und November 2010, April 2012), B: Sedimentverteilung, C: Medianwert der Korngrößenverteilung [Φ], D: Feinkorngehalt in Gew. %, dargestellt für den Bereich der Medemrinne im Elbe-Ästuar	38
Abbildung 3-6: Übersicht über die Wattgebiete im Bereich des äußeren Elbe-Ästuars	39
Abbildung 3-7: Räumliche Verteilung der Probenlokationen in der Medemrinne im Mai 2011 (Kreise) und April 2012 (Quadrate). Die Farbcodierung gibt Aufschluss über die Medianwerte [μ m] zugehöriger Korngrößenverteilungen	39
Abbildung 3-8: Differenztopographie für das Gebiet der Medemrinne, basierend auf Daten schiffsgestützter Vermessungen und Laserbefliegungen der Jahre 2001 und 2011, ausgegeben vom WSA Cuxhaven. Für das dunkel unterlegte Gebiet wurden cut-and-fill-Volumina errechnet, da nur für diesen Bereich Daten gleicher Aufnahmemethodik vorliegen.	40

Abbildung 3-9: Zeitliche Entwicklung von Sedimentakkumulation / -Erosion (rot) sowie Sedimenteintrag (schwarz) für den in Abbildung 3-8 dunkel unterlegten Bereich	41
Abbildung 3-10: Ausschnitt 1 der Sedimentkarte vom Weser-Ästuar A: Datenbasis (Februar 2011), B: Sedimentverteilung, C: Medianwert der Korngrößenverteilung [Phi], D: Feinkorngehalt in Gew.%	42
Abbildung 3-11: Ausschnitt 2 der Sedimentkarte vom Weser-Ästuar A: Datenbasis (Februar 2011), B: Sedimentverteilung, C: Medianwert der Korngrößenverteilung [Phi], D: Feinkorngehalt in Gew.%	43
Abbildung 3-12: Ausschnitt 3 der Sedimentkarte vom Weser-Ästuar A: Datenbasis (Februar 2011), B: Sedimentverteilung, C: Medianwert der Korngrößenverteilung [Phi], D: Feinkorngehalt in Gew.%	44
Abbildung 3-13: Ausschnitt 4 der Sedimentkarte vom Weser-Ästuar A: Datenbasis (Februar 2011), B: Sedimentverteilung, , C: Medianwert der Korngrößenverteilung [Phi], D: Feinkorngehalt in Gew.%	45
Abbildung 3-14: Porosität der im Elbe-Ästuar genommenen Sedimentproben, aufgetragen gegen die Flusskilometrierung. Cuxhaven liegt bei km 725	47
Abbildung 3-15: Porosität der im Weser-Ästuar genommenen Porositätsproben, aufgetragen gegen die Flusskilometrierung	47
Abbildung 3-16: Vergleich der Porosität von Sand im Elbe-Ästuar im August und November 2010, sowie der gleitende Mittelwert über jeweils 5 Werte	49
Abbildung 3-17: Oberwasserabfluss beim Pegel Neu Darchau sowie Tidehochwasserstände am Pegel Cuxhaven und Schulau. Die schwarzen Balken markieren die Beprobungszeiträume	50
Abbildung 3-18: Porosität aufgetragen gegen Feinkornanteil, Median und Sortierung - Ausfahrten „Weser 2011 02“, „Elbe 2010 08“ und „Elbe 2010 11“	51
Abbildung 3-19: Untersuchungsgebiet Minsener Oog a) Bathymetrie ; b) Sedimentverteilung bestehend aus Sanden und Kiesen; c) Verlagerung der Sohlformen auf der Basis der in der Bathymetrie ausgewiesenen Dünenkronen (crests) über einen Zeitraum von sechs Monaten	52
Abbildung 3-20 (links): Erweitertes Untersuchungsgebiet bei Minser Oog in <i>AufMod-G</i>	53
Abbildung 3-21 (rechts): Konvergenzzone (Zentralbereich Mitte rot gerahmt) von ebb- und flutdominanten Sohlformen; Basis: 37 bathymetrische Zeitserien (Januar 2006 bis Oktober 2010) – am Beispiel von fünf ausgewählten Transekten (s. Abbildung 3-19a – Gebiet A) mit ausgewählten Dünen (ganz rechts)	53
Abbildung 3-22 Vektoren des Reststromes einer Zwei-Wochen Simulation mit Wind-/ Wellenantrieb im Untersuchungsgebiet (zur Verfügung gestellt von <i>AufMod-C</i>) – Die weißen Pfeile zeigen die rotierende Bewegung am Weststrand, die für die stabilen Verhältnisse in der Konvergenzzone verantwortlich ist	54
Abbildung 3-23: Sedimentbilanz über einen 6-Monats-Zeitraum (10/2010 bis 04/2011) am Beispiel von zwei Rinnenquerschnitten. Auf Länge von 3 km mit einer Breite von 1 m wurden in einem halben Jahr ca. 7000 m ³ ebbstrom-exportiert, in Flutstromrichtung dagegen nur ca. 2000 m ³ (bezogen auf die zwei Rinnenquerschnitte)	54

Abbildung 3-24: Flachseismik-Aufzeichnung von drei Dünen mit Greiferproben von drei Stationen (s. Abbildung 3-19a Transekt B). Die rechte Greiferprobe zeigt den typischen Hartgrund innerhalb der Dünen, der sich als roter Reflektor in der Seismik darstellt	55
Abbildung 3-25: Übersicht über die in den Pieprinnen untersuchten Flächen sowie über die Lokationen der entnommenen Sedimentproben	56
Abbildung 3-26: Übersicht über die in der Norderhever untersuchten Flächen sowie über die Lokationen der entnommenen Sedimentproben	56
Abbildung 3-27: Karte der Sedimenttypenverteilung im System der Pieprinnen vor Büsum	57
Abbildung 3-28: Mittlere Korngrößen der Sedimente im System der Pieprinnen vor Büsum	58
Abbildung 3-29: Anteil der Fraktion < 63 µm (Schlick, Mud) an den Sohlsedimenten in den Pieprinnen vor Büsum	58
Abbildung 3-30: Beispiele für typische Sonar-Signaturen von Feinsand und Klei mit Fotografien von Sedimentproben aus diesen Faziesräumen	59
Abbildung 3-31: Übersicht über Flächen mit anstehendem Klei, wie sie 1999 / 2000 durch Seitensichtsonar-Untersuchungen detektiert wurden (verändert nach (Ricklefs, et al., 2005))	60
Abbildung 3-32: Karte der Sedimenttypen in der Norderhever. (Silt und Ton < 63 µm, Feinsand 63 - 200 µm, Mittelsand 200 - 630 µm, Grobsand 630 - 2000 µm.)	61
Abbildung 3-33: Mittlere Korngrößen (D_{50}) im Gezeitenstrom Norderhever. Die im Bereich von Geschiebemergelflächen (vgl. Abbildung 3-32) angegebenen Werte, beziehen sich auf mobile Sandauflagen, die über diesen älteren Ablagerungen zu finden sind	62
Abbildung 3-34: Verbreitung klassifizierter Sohltransportkörpern im inneren Bereich der Norderhever	63
Abbildung 3-35: Grobe Einteilung in Sedimentklassen auf der Basis der in 2010 - 2012 durchgeführten Seitensicht-Sonarkartierung (projiziert auf die BSH-Karte Nr. 2900; Kartenausschnitt: s. Übersichtsabbildung unten links)	65
Abbildung 3-36: Sedimentklassen auf der Basis der in 2010 - 2012 durchgeführten Seitensichtsonar Kartierung. Neben den Sedimentklassen sind auch die Gebiete eingetragen, in denen Sorted Bedforms beobachtet wurden	66
Abbildung 3-37: Verfügbare Datensätze aus der Zeit vor und während AufMod-G	67
Abbildung 3-38: Vergleich der Bathymetrie von 2003 und 2010 inkl. Änderungsvektoren der Isobathen (Abstand 1m) basierend auf Fächerecholot-Daten. Die verschiedenen Messzeiträume sind durch unterschiedliche Farben gekennzeichnet	67
Abbildung 3-39 (links): Sedimentverteilung auf den Zungenriffen seewärts der Insel Spiekeroog auf der Basis von Seitensichtsonardaten für das Jahr 2010	68
Abbildung 3-40 (rechts): 3D-Rekonstruktion der bis zu 3 m mächtigen Auflage von Lockersedimenten mit Hilfe von Seitensichtsonar- und Subbottom-Profiler-Daten (Lokalität siehe Rechteck Abbildung 3-39)	68
Abbildung 3-41: Sedimentverteilung vor Spiekeroog mit den überlagerten Raten von Erosion (blau) und Akkumulation (rot) entlang von Transekten auf der Basis der Volumenbilanz zwischen 2003 und 2010	69

Abbildung 3-42: Vektoren des bodennahen Sedimenttransports, basierend auf einer gezeitengetriebenen Simulation über ein Jahr (von <i>AufMod-D</i> zu Verfügung gestellt) - Die rote Spirale weist auf einen in Zellen organisierten Transport hin, der bisher im wieder zitierte Küstenlängstransport lässt sich auf Grund der gewonnenen Ergebnisse ausschliessen und wird vom Modell "bestätigt"	69
Abbildung 3-43 (links): Einfluss von Einzelereignissen (am Beispiel 31.03.2012) auf die Morphologie der Zungenriffe im Seitensichtsonarbild – überlagert sind Volumendifferenzen (Erosion in blau, Akkumulation in Rot)	70
Abbildung 3-44 (rechts): Sedimentbilanz über einen 6-Monats-Zeitraum (03-09/2010) am Beispiel eines Querprofils – Auf der Länge von 3 km mit einer Breite von 1 m wurden in einem halben Jahr 195 m ³ Volumen in östliche Richtung exportiert	70
Abbildung 3-45: Gegenüberstellung der Oberflächensedimentverteilung im äußeren Elbe-Ästuar, basierend auf den Daten der Figge-Karte (oben) und den in <i>AufMod-F</i> erarbeiteten Daten, hier der Kartierungen von August 2011, November 2011 und April 2012 (unten)	73
Abbildung 3-46: Gegenüberstellung der Oberflächensedimentverteilung im Elbe-Ästuar zwischen Cuxhaven und Brunsbüttel, basierend auf den Daten der Figge-Karte (oben) und den in <i>AufMod-F</i> erarbeiteten Daten aus den Kartierungen im August 2011 und April 2012 (unten)	76
Abbildung 3-47: Gegenüberstellung der Oberflächensedimentverteilung im äußeren Weser-Ästuar, basierend auf den Daten der Figge-Karte (oben) und den in <i>AufMod-F</i> erarbeiteten Daten vom Februar 2011 (unten)	77
Abbildung 3-48: Vergleich der in <i>AufMod-F</i> für das Gebiet der Pieprinnen entwickelten Sedimentkarte (2010/11) mit der Figge-Karte (Maßstab 1:100.000)	79
Abbildung 3-49: Vergleich der Sedimentverteilungsmuster in der Figge-Karte Figge-Karte (Maßstab 1:100.000) mit den eigenen Ergebnissen	80
Abbildung 3-50: Sedimentverteilung in der Norderhever nach Dechend (Dechend, 1950)	81
Abbildung 3-51: Grundlage und Ergebnisse der sedimentologischen Kartierung des seewärtigen Übergangsbereichs zwischen Norderpiep und Norderhever. Zur besseren Übersicht sind die Sonarstreifen breiter als tatsächlich aufgenommen dargestellt	82
Abbildung 3-52: Kartierarbeiten von Köster (Köster, 1979) zeigen, dass der Schelfbereich durch nah an die Meeresbodenoberfläche aufragende, pleistozäne Ablagerungen glazialen Ursprungs geprägt ist	84
Abbildung 3-53: Prinzipskizze zum morphologischen und sedimentologischen Erscheinungsbild von Sorted Bedforms aus dem Arbeitsgebiet westlich von Sylt	85
Abbildung 3-54: Auf die Figge-Karte projiziertes Seitensichtsonar Mosaik. Große Bereiche mit kleinräumiger Sedimentvariabilität, wie sie das Seitensichtsonar Mosaik zeigt (B), sind in der Figge-Karte nicht abgebildet	86
Abbildung 3-55: Ausschnitte aus dem Seitensichtsonar Mosaik mit einigen zusätzlich in E – W - Richtung aufgenommenen Profilen. Beispielhaft sind 5 Bereiche mit unterschiedlich aussehenden Sorted Bedforms gezeigt, die immer den abrupten Wechsel von einem hellen zu einem dunklen Rückstrommuster (hell = feines Material, dunkel = relativ dazu gröberes Material, weitere Erläuterungen im Text) aufweisen. Eine Ausnahme bildet der	

- dunkle Bereich im rechten, unteren Bereich von Ausschnitt 4. Er hat seine Ursache im Auftreten von *Lanice Conchilega* (s. hierzu Kapitel 4.3.2). 86
- Abbildung 3-56: Sorted Bedforms auf dem Schelf westlich der Insel Sylt. Die Abbildung B zeigt den Bereich, in dem Sorted Bedforms vorkommen; C zeigt ein morphologisches und seismisches Profile über den in D gezeigten Bereich (Achtung: Inverse Darstellung. Die hellen Bereiche markieren hier eine hohe Rückstreuung). Im unteren Teil von C ist zu erkennen, dass sich das in den Sorted Bedforms exponierte Sediment unter den Transportkörpern weiter verfolgen lässt 87
- Abbildung 3-57: Grafische Umsetzung des konzeptionellen Modells zum Grad der Mobilisierbarkeit der Sedimente im Gebiet der Norderhever 89
- Abbildung 3-58: Residualer Sedimenttransport nach dem Modell SISYPHE mit Mobilitätseinstufung 89
- Abbildung 3-59: Vergleich der Sedimentzusammensetzung einer Backengreiferprobe aus einer Sorted Bedform mit der Kornverteilung der Grobsand / Kiesschicht aus Kern 16. Die Kurven zeigen nahezu identische Kornverteilungen (weitere Erläuterungen s. Text)90
- Abbildung 3-60: Zusammenstellung von seismischen Profilen, Seitensichtsonar Mosaiken und Fotos des Sedimentkerns Nr. 11, der auf einer Sandfläche entnommen wurde. Das am oberen Ende des Seitensichtsonar Mosaiks durch die dunkle Farbe des Rückstreusignals repräsentierte grobe Sediment findet in dem Sedimentkern in ca. 65 cm Tiefe seine Fortsetzung 91
- Abbildung 3-61: Mächtigkeit der mobilen Sandauflage über der den Sorted Bedforms entsprechenden Grosand- / Kiesschicht 92
- Abbildung 3-62: Linke Seite: Seitensichtsonar Mosaik. Die gelbe Linie zeigt die mit der BSH-Karte übereinstimmende Grenze zwischen feinem und grobem Sediment. Die roten Kreise markieren die Positionen der Sedimentkernentnahmen. Rechte Seite: Flächenhafte Darstellung der Mächtigkeit der mobilen Deckschicht projiziert über die Figge-Karte 93
- Abbildung 3-63: Lithologisches Profil von Kern 12 inkl. der Ergebnisse der C-14 Datierung sowie eines seismischen Profils an der Lokalität 94
- Abbildung 3-64: Die roten Rechtecke markieren Gebiete, in denen der Einfluss des Bäumchenröhrenwurmes (*Lanice conchilega*) auf das Rückstreuverhalten bei Seitensichtsonar Vermessungen, auf die Sedimentverteilungen und auf die Sedimentmobilität detaillierter untersucht wurde. Gebiet 1 umfasst ca. 0,5 km², Wassertiefe ca. 12 m; Gebiet 2 ist ca. 8,6 km² groß, die Wassertiefe reicht bis ca. 15 m (Bezug für die Wassertiefen ist SKN) (aus: Heinrich et al., 2013) 95
- Abbildung 3-65: Die Abbildung zeigt adulte Formen von *Lanice conchilega*, wie sie auf der Oberfläche eines Vibrocorerkerns (Oberfläche 15 x 15 cm) gefunden wurden. In der linken Abbildung zeigt der Maßstab cm-Einteilungen. Das rechte Bild zeigt, dass die Wohnröhren mehr als 10 cm tief in das Sediment reichen / Ausfahrt: AL – 378) 96
- Abbildung 3-66: Bilder von Sedimentoberflächen, die dicht mit *Lanice conchilega* besiedelt sind. Die Bilder **A** und **C** zeigen den Ausschnitt einer Sedimentoberfläche einer Großkastengreiferprobe (50 x 50 cm Oberfläche) mit juvenilen Formen von *Lanice conchilega*. **C** zeigt deutlich die Höhe der einzelnen Röhren, die in die Wassersäule ragen; im Hintergrund ist ein Probenzylinder zu sehen. **B** zeigt den Ausschnitt mit einer Vertiefung, wo das überstehende Wasser herausgelaufen ist. Deutlich ist zu erkennen,

dass ein Großteil der Röhren im Sediment steckt. D zeigt das filigrane Tentakelbäumchen, an dem viele Sedimentkörner kleben. E zeigt zum Vergleich eine adulte Form von 21 cm Länge.	97
Abbildung 3-67: Vergleich von Seitensichtsonar Mosaiken aus den Jahren 2011 und 2012 (Gebiet 1, vgl. Abbildung 3-64). a) Mosaik mit den Positionen der Sedimententnahmen in 2011 und 2012. Blaue Symbole repräsentieren die Wiederholungsbeprobungen in 2012, gleiche Positionen wie in 2011. Großkastengreifer (KG) wurden nur in 2012 entnommen. In a) im linken Bild sind die KG-Positionen nur fiktiv. b) Screenshots von Videoaufnahmen aus 2011. Die einzelnen Ziffern repräsentieren die Probenahmestationen (aus: (Heinrich, et al., 2013))	98
Abbildung 3-68: Das linke Diagramm zeigt das Verhältnis von Homogenitätswerten gegenüber Entropiewerten für ausgewählte Probenstationen aus dem Mosaik 2011. Groundtruthing erfolgte neben Greiferbeprobungen auch durch Videoaufnahmen. In der rechten Abbildung sind die Werte für einzelne Positionen aus 2011 und 2012 zusammen dargestellt. Es wurden identische Stationen beprobt. Die veränderten Naturbedingungen spiegeln sich in veränderten Texturparametern wider (aus: (Heinrich, et al., 2013).	99
Abbildung 3-69: Siebkurven, Fotoausschnitte der Sedimentoberfläche und die entsprechenden 20 x 20 m insets aus den jeweiligen Jahren (Erläuterung s. Text, für die Symbole vgl. Abbildung 3-67 u. Abbildung 3-68).	100
Abbildung 3-70: a) Empirischer Zusammenhang zwischen Bodenform Längen und Höhen und b) Anpassung einer Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion und Bestimmung der jeweiligen Maxima	101
Abbildung 3-71: Darstellung hydraulisch aktiver Bodenformen	102
Abbildung 3-72 Bereiche die sowohl von Ulrich (Ulrich, 1971) als auch von den neuen Datensätzen abgedeckt sind	103
Abbildung 3-73: Entwicklung der Arten der Bodenformen im Untersuchungsgebiet	103
Abbildung 3-74: Vergleich gemessener und berechneter Prädiktoren für die Höhe von Bodenformen	104
Abbildung 3-75: Abfluss Weser und Zeitreihen der mittleren Höhe, Länge, Leewinkel, Steilheit von Bodenformen im Gebiet 1 (Außenweser)	105
Abbildung 3-76: Abhängigkeit der Bodenformhöhe H von Strömungsgeschwindigkeit (U_{max}) und Korngröße D_{50}	106
Abbildung 3-77: Verschiedene Layer der SSS-Klassifikation am Beispiel des Fokusgebiets nördlich von Spiekeroog, nach der Darstellung im Fachinformationssystem „Shelf Geo-Explorer“ des BSH (Legende in Abbildung 3-78 dargestellt)	107
Abbildung 3-78: Legende der einzelnen Darstellungslayer aus Abbildung 3-77	108
Abbildung 3-79: In <i>AufMod</i> erfasste Messdaten im Fokusgebiet „Vorstrand/Schelf“ westlich von Sylt, nach der Darstellung im „Shelf Geo-Explorer“	109
Abbildung 3-80: Ausdehnung des Modellnetzes (50-m Raster) der bathymetrischen Zeitreihe über 31 Jahre	110
Abbildung 3-81: Bathymetrische Zeitreihe mit jährlichen Tiefenverteilungen über den Zeitraum 1982-2012, jeweils zum 01.06.2010. Rechts: Zeitscheibe vom 01.06.2010, nach der Klassifizierung im Fachinformationssystem „Shelf Geo-Explorer“ des BSH	111

Abbildung 3-82: Zu jeder Jahrestopographie der bathymetrischen Zeitreihe wurde ein Confidence-Layer generiert. Rechts: Zeitscheibe vom 01.06.2010, nach der Klassifizierung im Fachinformationssystem „Shelf Geo-Explorer“ des BSH	112
Abbildung 3-83: Zu jeder Jahrestopographie der bathymetrischen Zeitreihe wurde ein Layer mit dem minimalsten zeitlichen Abstand generiert. Rechts: Zeitscheibe vom 01.06.2010, nach der Klassifizierung im Fachinformationssystem „Shelf Geo-Explorer“ des BSH	112
Abbildung 3-84: Morphologischer Raum für den Betrachtungszeitraum 2000-2010	113
Abbildung 3-85: Morphologischer Drive für den Betrachtungszeitraum 1982-2012	114
Abbildung 3-86: räumliche Ausdehnung des Modellgitters (250m-Raster)	116
Abbildung 3-87: Median-Korndurchmesser (D_{50}), nach der Klassifizierung im Fachinformationssystem „Shelf Geo-Explorer“ des BSH	117
Abbildung 3-88: Sortierung σ_1 nach der Klassifizierung im Fachinformationssystem „Shelf Geo-Explorer“ des BSH	117
Abbildung 3-89: Beispielhaft dargestellt ist die Differenz aus der raum-zeitlich interpolierten Topographie von 2006 und der Tiefe des konsolidierten Horizonts; Mächtigkeit der mobilen Deckschicht im Jahr 2006	118
Abbildung 3-90: die Teilgebiete die Auswertung	119
Abbildung 3-91: Beispielhafte Differenzbathymetrie von 2003 (15.01. + 330Tage danach) aus der morphodynamischen Simulation	121
Abbildung 3-92: Bilanzvolumen für Teilbereiche und den Gesamtbereich in zeitlicher Auflösung	122
Abbildung 3-93: Anteil verschiedener Feinsandfraktionen [Gew.-%] im Oberflächensediment der Deutschen Bucht in $\frac{1}{2}$ Phi Intervallen, basierend auf triangulierten Probestationen. Die rote Linie zeigt grob die Umrandung des Elbeurstromtals (graue Linien: 10 und 20 m Isobathe)	125
Abbildung 3-94: Flächeneinteilung der Deutschen Bucht nach unterschiedlichen Sandfraktionen und deren Gewichtsanteilen	126
Abbildung 3-95: Vergleich der Sandverteilung in der Deutschen Bucht mit resultierenden Sedimenttransportvektoren ab Wassertiefen über 20m, die in MARINA für das Jahr 2006 berechnet wurden	128
Abbildung 3-96: Lage der Kilometerpunkte EUROPIPE I, KP 440 und EUROPIPE II, KP 510129	
Abbildung 3-97: Querprofile an KP 440 (EUROPIPE I) von 2011 und 2005. Im SW der Pipeline ist deutlich eine Sedimentakkumulation erkennbar, die sich im betrachteten Zeitraum von 6 Jahren weiter ausgeprägt hat	131
Abbildung 3-98: Querprofile an KP 510 (EUROPIPE II) von 2011, 2006 und 2000. Im SO der Pipeline ist eine leichte Sedimentanlagerung erkennbar, im NW eine Kolkbildung	131
Abbildung 3-99: Wassertiefen und Vektoren resultierender Sedimenttransporte für das Jahr 2006, berechnet mit Marina. Die Lage der oben betrachteten Kilometerpunkte ist rot eingekreist (EP I KP 440: links, EP II KP 510: rechts)	132
Abbildung 4-1: Modellausdehnung und Auflösung des Gesamtgebietes (links) und in der Deutschen Bucht (rechts)	137

Abbildung 4-2: Dreiecksgitternetz Nordsee / DB für UnTRIM, MARINA und TELEMAC	137
Abbildung 4-3: Gitternetze in DELFT3D: Nordsee und Deutsche Bucht (Nesting)	138
Abbildung 4-4: Übersicht der Randwerte	140
Abbildung 4-5: Datenverfügbarkeit der Bathymetrie; die Flächen markieren die Bereiche mit jeweils zwei Datensätzen (maximal 1/10 Jahr(e) vor dem 1.1.2006 und maximal 1/10 Jahr(e) nach dem 1.1.2007)	142
Abbildung 4-6: Teilgebiet für die Analyse der Profilflüsse und der Bathymetrieanalyse	143
Abbildung 4-7: Analysebereich zur Auswertung im Bereich der Helgoländer Schlicklinse; links: Sedimentverteilung D_{50} ; rechts: Tiefenänderung 2006	144
Abbildung 4-8: Vergleich der M2-Partialtide entlang der Nordseeküste aus den Simulationen und der Analyse aus den Pegelmessungen	145
Abbildung 4-9: Hsig: Helgoalnd Messung/Unk-Simulation (Links) – SWAN (Rechts) 02-2006	145
Abbildung 4-10: Hsig: Boje NSB Messung vs. MARINA	145
Abbildung 4-11: Sedimenttransportpfade aus Simulationen mit UnTRIM / MARINA / TELEMAC sowie als Mittel aus diesen Berechnungen	147
Abbildung 4-12: Vergleich der beiden Verfahren (Voronoi und 50m-Raster)	150
Abbildung 4-13: Flächen für die Bilanzanalyse (links: ca. 1450 km ² , rechts: ca. 7500 km ²)	150
Abbildung 4-14: Histogramm der Bodenevolution des prozessbasierten Elbe-/Wesermodells (voll gekoppelt) 2006/2007	152
Abbildung 4-15: Bilanz des Bodenvolumens im Analysebereich der Helgoländer Schlicklinse	152
Abbildung 4-16: M2-Amplitude ausgewählter Pegel für die Nordsee und Vergleich mit TELEMAC-Simulation	154
Abbildung 4-17: RMSE der Wasserspiegellage ausgewählter Pegel in der Nordsee	155
Abbildung 4-18: Vergleich gemessener zu simulierter signifikanter Wellenhöhe H_s [m], Peakperiode T_p [s] und der daraus berechneten Sohlschubspannung $\tau_{b,w}$ [N/m ²]: oberen 3 Grafiken: Pegel Elbe; mittleren 3 Grafiken: Pegel FINO1; unteren 3 Grafiken: Helgoland	156
Abbildung 4-19: Vergleich der normierten Sedimentvolumina aus der Langfristsimulation mit denen des Funktionalen Bodenmodells (FBM)	158
Abbildung 4-20: Gemessene Sedimentverteilung in der Deutschen Bucht als Median des Korndurchmessers (D_{50}) für a) das datenbasierte Modell und b) interpoliert auf das Berechnungsgitter des numerischen Modells. Die Ziffern kennzeichnen den Schelfbereich seewärts von Sylt (1), den Borkum Riffgrund (2), den westlichen Teil des nordfriesischen Schelfs (3), das Sylter Rückseitenwatt (4), das Ems-Ästuar (5), die Helgoländer Schlicklinse (6), das Elbeurstromtal (7), das Elbe-Ästuar (8) und das Seegatt Otzumer Balje zwischen Langeoog und Spiekeroog (9).	160
Abbildung 4-21: Berechneter D_{50} nach 30 Tagen Simulationszeit	162
Abbildung 4-22: Kritische Sohlschubspannung nach Soulsby (Soulsby, 1997)	163
Abbildung 4-23: Idealisierte Kornverteilung (D_{50}) auf Basis der hydrodynamischen Belastung	164

Abbildung 4-24: Transport von suspendierten Sedimenten (<20 µm) in der Deutschen Bucht auf Basis von Modelluntersuchungen für die Jahre 1990-1991 (Puls, et al., 1997)	165
Abbildung 4-25: Schematisches Modell des Geschiebetransportes in der Deutschen Bucht	166
Abbildung 4-26: Abschätzung des Sedimenttransports in Mt/a auf Basis veröffentlichter Daten	167
Abbildung 4-27: Sedimenttransport in der Deutschen Bucht aufgeteilt in a) Geschiebetransport und b) Suspensionstransport für das Jahr 2006 (logarithmische Skalierung)	168
Abbildung 4-28: Mittlerer Suspensionstransport für 1998 / 2006 (logarithmische Skalierung)	169
Abbildung 4-29: Mittlerer Geschiebetransport für 1998 / 2006 (logarithmische Skalierung)	169
Abbildung 4-30: Bilanzierungsprofile für die Deutsche Bucht	170
Abbildung 4-31: Sedimentbilanz für die Jahre a) 1998 und b) 2006. Der Sedimenttransport ist als Transport je Profilmeter und Jahr (schwarz, orange) und als absoluter Transport über das gesamte Profil (grau, rot) angegeben	171
Abbildung 4-32: Suspensionstransport am Bilanzierungsprofil „DB West“ für a) das gesamte Jahr 2006 und b) für zwei Spring-Nipp-Zyklen im August / September 2006	173
Abbildung 4-33: Suspensionstransport für die Varianten Tide (T), Tide und Wind (T, W) und Tide, Wind und Seegang (T, W, S) für das Jahr 2006	174
Abbildung 4-34: Morphologischer Raum BER auf Basis des datenbasierten <i>AufMod</i> -Modells (bereitgestellt durch <i>AufMod-E</i>)	176
Abbildung 4-35: Morphologischer Raum auf Basis der numerischen Modelluntersuchungen	177
Abbildung 4-36: 95% Perzentile der Sohlschubspannung gemittelt über den gesamten Untersuchungszeitraum (1996 - 2007) aus der Wirkung von a) Tide, b) Tide und Wind und c) Tide, Wind und Seegang	178
Abbildung 4-37: Differenz der 95% Perzentile der Sohlschubspannung für die Wirkung a) des Windeinflusses (Differenz aus Tide mit Wind zu nur Tide) und b) des Seegangs (Differenz aus Tide, Wind mit Seegang zu nur Tide mit Wind)	178
Abbildung 4-38: Anteil der Dauer hoher Sohlschubspannung (BSSI) gemittelt über den gesamten Untersuchungszeitraum (1996 - 2007) aus der Wirkung von a) Tide, b) Tide mit Wind und c) Tide, Wind mit Seegang. Der Grenzwert für die Definition hoher Sohlschubspannung beträgt 0,17 N/m ²	179
Abbildung 4-39: Differenz der Dauer hoher Sohlschubspannung für die Wirkung a) des Windeinflusses (Differenz aus Tide mit Wind und nur Tide) und b) des Seegangs (Differenz aus Tide, Wind mit Seegang und Tide mit Wind). Der Grenzwert für die Definition der hohen Sohlschubspannung beträgt 0,17 N/m ²	179
Abbildung 4-40: Korrelation von a) Dauer hoher Sohlschubspannung (BSSI) zu morphologischem Raum (BER) und b) Korrelation von 95% Perzentile der Bodenschubspannung mit BER	180
Abbildung 4-41: Wasserstand in der Nordsee zu Hoch- / Niedrigwasserzeiten	182
Abbildung 4-42: <i>Messung</i> / <i>SWAN-Simulation</i> Helgoland II-III 2006 (Wellenhöhe / Periode)	183
Abbildung 4-43: Hsig in der gesamten Nordsee (gm_nsee) am 24.02.2006-11:00 Uhr	183

Abbildung 4-44: Mittlerer bed-load Transport [$\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$] 21.08.15 ⁰⁰ – 22.08.21 ⁰⁰ 2006, Westwind (12 m/s) – Summe aller Fraktionen (gS, mS, fS, gU, fU)	184
Abbildung 4-45: Sohländerung nach rd. 80 Tagen: Tide + Wind + Seegang (MSL=0cm)	185
Abbildung 4-46: Sohländerung nach rd. 80 Tagen: Tide + Wind + Seegang (MSL=+80cm)	186
Abbildung 4-47: Änderung der morphologischen Bodenreaktion nach rd. 20 Tagen allein durch Anstieg des Meeresspiegels um 80 cm	186
Abbildung 4-48: Sedimentation und Erosion [m] in der Deutschen Bucht nach einem Jahr mit Porengehalt $\eta = 0,5$ (links) und $\eta = 0,6$ (rechts)	187
Abbildung 4-49: Änderung der Sedimentation und Erosion [m] in der Deutschen Bucht nach einem Jahr zwischen Porengehalt $\eta = 0,5$ und $\eta = 0,6$	187
Abbildung 4-50: Bereich der volumetrischen Analysen (-2 bis -2 m NHN)	190
Abbildung 4-51: Initiale Bathymetrie von 2006 im Bereich der Elbe-Weser-Mündung	194
Abbildung 4-52: Mittlerer Korndurchmesser der initialen Sedimentbelegung im Bereich der Elbe-Weser-Mündung auf Basis anisotrop interpolierter Sedimentdaten	194
Abbildung 4-53: Einteilung in Abschnitte der Tideelbe mit konstanten Solltiefen für DredgeSim	196
Abbildung 4-54: Einteilung in Abschnitte des Weser-Ästuars mit konstanten Solltiefen für DredgeSim	197
Abbildung 4-55: Solltiefen des Ems-Ästuars	198
Abbildung 4-56: Zugelassene Verbringstellen in der Tideelbe im Jahr 2010	199
Abbildung 4-57: Baggergutumlagerungen auf VS 738 in 2010 (Maerker, et al., 2011)	200
Abbildung 4-58: Baggergutumlagerungen auf VS 731 in 2010 (Maerker, et al., 2011)	201
Abbildung 4-59: Verbringstellen im Weser-Ästuar	203
Abbildung 4-60: Verbringstellen im Ems-Ästuar	205
Abbildung 4-61: Szenario 2006: Initiale Sohlage	206
Abbildung 4-62: Szenario 2006: Simulierte Sohlage nach 100 Jahren	206
Abbildung 4-63: Szenario 2006: Simulierte Sohlevolution nach 100 Jahren	207
Abbildung 4-64: Szenario 2006: Kumulierte Geschiebefracht nach 100 Jahren. Dargestellt sind auch die 40 m- und die 20 m-Isobathen bezogen auf NN	208
Abbildung 4-65: Szenario 2006: a) residuelle Strömungsgeschwindigkeit und b) Gesamtfracht -hier sind die Profile West und Nord (grüne Linien) eingezeichnet	209
Abbildung 4-66: Szenario 2006: residueller Sedimenttransport aufgeschlüsselt je nach Transportmodus a) Schwebstoff- und b) Geschiebefracht	209
Abbildung 4-67: Szenario Meteorologie 1998: Sohldifferenz der Simulationen mit der Meteorologie von 1998 und von 2006	211
Abbildung 4-68: Szenario Meteorologie 1998: Sohlentwicklungen nach 100 Jahren entlang des Profils in Abbildung 4-67 mit der Meteorologie von 1998 und 2006 sowie ihrer Differenz. Das Profil verläuft von der Küste ($x = 0$ km) bis in den tiefen Bereich der Deutschen Bucht ($x = 113$ km)	212

Abbildung 4-69: Szenario Meteorologie 1998: Vektoren der residualen Gesamtfracht mit Meteorologie 2006 (rot) und mit Meteorologie 1998 (grün)	213
Abbildung 4-70: Szenario Meeresspiegelanstieg (MSA): Sohlage nach 100 Jahren mit MSA und die für die Volumenbilanzen verwendete Maske (grünes Polygon)	215
Abbildung 4-71: Szenario Meeresspiegelanstieg: Differenz der Sohlage zwischen der Simulation mit und ohne MSA	215
Abbildung 4-72: Szenario Meeresspiegelanstieg: Vektoren der residuellen Gesamtfracht: grün ohne MSA; rot mit MSA	216
Abbildung 4-73: Szenario Meeresspiegelanstieg: Volumenbilanzen für den küstennahen residuellen Sedimenttransport	217
Abbildung 4-74: Szenario Unterhaltungsmaßnahmen: Vergleich zweier 100-jähriger Simulationen zur Wirkung von Unterhaltungsmaßnahmen. Dargestellt ist die Differenz zwischen der Sohlage ohne und mit Unterhaltungsmaßnahmen	218
Abbildung 4-75: Szenario Unterhaltungsmaßnahmen: Sohlage im Bereich der Elbmündung ohne und mit Baggern	219
Abbildung 6-1: Verteilte Struktur der AufMod-Produkte in der MDI-DE, aufgeteilt auf die Infrastrukturknoten BAW und BSH. Eine Zusammenführung der Daten findet über die MDI-DE statt, von wo aus auch eine Weitergabe an das Geoportal.DE und weitere Zielsysteme erfolgt	244
Abbildung 6-2: Die Einstiegsseite des MDI-DE Portals mit Suchoptionen für AufMod-Produkte: Die freie Suche und der Themeneinstieg	245
Abbildung 6-3: Struktur des Infrastrukturknotens der BAW mit dem Metadatenystem NOKIS und dem Web-Dienste-Server GeoServer	246
Abbildung 6-4: Die Struktur der GDI-BSH, mit dem hervorgehobenen „Shelf Geo-Explorer“ (SGE)	248
Abbildung 6-5: Tidekennwertatlas mit allen Funktionen. Neben dem Einblenden der Analysegrößen kann die Bathymetrie zugeschaltet werden und die Legende ein- oder ausgeklappt werden. Ein Download im CSV oder Shapeformat ist direkt möglich	250
Abbildung 8-1: Querprofile (Magenta) über den südwestlichen Teil der Deutschen Bucht	272
Abbildung 8-2: Querprofile mit aufgetragenen Wassertiefen, Sortierungen und Gewichtsanteilen der Sandfraktionen. Die Lage der Profile in der Deutschen Bucht ist aus Abbildung 8-1 ersichtlich	275
Abbildung 8-3: Beispiel für eine RawResolution-Szene mit höherer Ausdehnung aber geringer Auflösung	277
Abbildung 8-4: Datenvisualisierung mit Kontextinformationen der Station Helgoland	278
Abbildung 8-5: mittlere und maximale Sedimentkonzentration (TSM in g/m ³)	279
Abbildung 8-6: Standardabweichung (TSM in g/m ³) und Anzahl der Szenen pro Pixel	280
Abbildung 8-7: Sichttiefen bei Hoch- (links) und Niedrigwasser (rechts) mit Verteilungen	281
Abbildung 8-8: Charakteristische Szenen	282
Abbildung 8-9: Resttransport-Bahnlinien im Vergleich mit einer Satelliten-Szene	283

Abbildung 8-10: qualitativer Vergleich der Sedimentkonzentration eines Modellergebnisses (links, 2D tiefengemittelt) und einer Satellitenszene (rechts, variable Tiefen)	284
Abbildung 8-11: Analysepunkte für den Vergleich zwischen Konzentrationen aus Fernerkundungsdaten und dem Modell – für die rot markierten Punkte folgen die Diagramme	285
Abbildung 8-12: Vergleich Sedimentkonzentration aus FE-Daten (TSM) mit Modelldaten (SPM) - ausgewählte Positionen; die tiefste Schicht der Modellzeitreihe ist rot, die Höchste blau	285
Abbildung 8-13: Ablauf einer Simulation und schematischer Aufbau des prozessorientierten Simulationssystems NSea100	288
Abbildung 8-14: Exemplarische Ergebnisse für gezeiteninduzierte Geschwindigkeiten bei a) Flut und b) Ebbe	291
Abbildung 8-15: Tidegetriebene Entwicklung der Sohle im Gebiet um Baltrum und Langeoog	292

Tabellenverzeichnis	Seite
Tabelle 2-1: Übersicht der in <i>AufMod</i> vorhandenen Vermessungsdaten	16
Tabelle 2-2: Übersicht der in <i>AufMod</i> vorhandenen Sedimentdaten	16
Tabelle 2-3: Übersicht über die im Gesamtzeitraum durchgeführten schiffsgestützten Ausfahrten für <i>AufMod-F</i>	26
Tabelle 2-4: Übersicht über die Messkampagnen im <i>AufMod-G</i> Projekt mit FS Senckenberg27	
Tabelle 3-1: Statistische Parameter für alle erhobenen Porositätsdatensätze	48
Tabelle 3-2: Statistische Parameter für Porositätsdatensätze, für die Korngrößendaten vorliegen	49
Tabelle 3-3: Parametrisierung und verfügbare Web-Dienste (in Arbeit) der Ergebnisse aus der flächendeckenden Sedimentkartierung in den Fokusgebieten	107
Tabelle 3-4: Übersicht der betrachteten Zeiträume der morphologischen Parameter	114
Tabelle 3-5: Verfügbarkeit der morphologischen Parameter nach ihren Datenformaten	115
Tabelle 3-6: mittlere Volumenbilanzen aus der Bathymetrieanalyse der morphodynamischen Simulation	122
Tabelle 3-7: Bilanz der Bathymetrieanalyse	123
Tabelle 4-1: Klassifizierung der Modelle nach betrachteten Zeiträumen	134
Tabelle 4-2: Übersicht der verschiedenen Simulationsverfahren in <i>AufMod</i>	135
Tabelle 4-3: Volumenbilanzen der Modelle (Vertrauenswürdigkeit 10a)	151
Tabelle 4-4: Volumenbilanzen der Modelle (Vertrauenswürdigkeit 1a)	151
Tabelle 4-5: Zusammenfassung statistischer Kennwerte der Wasserspiegellage für die Jahre 2006 und 2001	154
Tabelle 4-6: Statistische Kennwerte von Seegangparameter und der daraus berechneten Sohlschubspannung für das Jahr 2006 (Hel. = Helgoland)	156
Tabelle 4-7: Kennwerte zur Sedimentdynamik für den Zeitraum 2006 bis 2012	157
Tabelle 4-8: Bilanz der Sedimenttransporte für die in Abbildung 4-30 gezeigten Profile	172
Tabelle 4-9: Zuordnung von Verbringstellen zu Baggerschwerpunkten im Bereich der Tidelbe in <i>AufMod</i>	202
Tabelle 4-10: Zuordnung von Verbringstellen zu Baggerschwerpunkten im Bereich des Weser-Ästuars in <i>AufMod</i>	204
Tabelle 4-11: Zuordnung von Verbringstellen zu Baggerschwerpunkten im Bereich des Ems-Ästuars in <i>AufMod</i>	204
Tabelle 4-12: Volumenbilanzen in Mio. m ³ nach Transportmodus und Profil. Ein negatives Vorzeichen bedeutet Austrag aus der Deutschen Bucht	210

Tabelle 4-13: Änderungen der Volumenbilanzen in Mio. m ³ und Prozentanteil je nach Transportmodus und Profil. Berechnet wurden die Differenzen zwischen Szenario 1998 und Szenario 2006	213
Tabelle 6-1: Von der BAW bereitgestellte Analysegrößen	246
Tabelle 8-1: Anzahl der Fernerkundungsszenen pro Jahr	276
Tabelle 8-2: Partialtiden des Simulationssystems NSea100 zur Berechnung der Wasserspiegelauslenkung <i>zs</i>	289

1 Einführung

1.1 Bezug zur Ausschreibung des KFKI

Veranlassung für das Gesamtprojekt ist die vom KFKI im Jahre 2008 veröffentlichte Rahmenausschreibung¹ 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 Seegangklimas) 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)

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

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

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

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, Wattenzugsgebieten und in Ästuaren mit ihren weit in die Deutsche Bucht reichenden Mündungsbereichen, Fahrrinnen, Fahrwassern und Häfen. Im Projekt **AufMod** wurde eine skalenübergreifende, langfristige Betrachtungsweise angestrebt, indem auch Prozesse zwischen der Nordsee und der Deutschen Bucht mit ihrer amphibischen Küstenzone und den Ästuaren berücksichtigt wurden.

Die für den Einsatz im Gesamtprojekt **AufMod** vorgesehenen Simulationsmodelle mussten 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, et al., 2006), (Kuiry, et al., 2009). Hingegen können Verhältnisse mit mittleren Belastungen zu schleichenden und damit langfristigen oder auch zyklischen Veränderungen der Morphologie, bzw. Sedimentzusammensetzung 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 waren.

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), (Hunke, et al., 2009) Ecofys). 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 sollte einerseits Datengrundlagen für datenbasierte Analysen der Morphodynamik liefern, sowie für die Anwendung und Validierung prozessbasierter Simulationsmodelle. Hierzu wurden 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 wurden in **AufMod** Untersuchungen zur Verteilung, Dynamik und Wirkung kleinskaliger Bodenformen (Transportkörper, subaquatische Dünen) durchgeführt.
- Mit dem Bodenmodell ließen sich verschiedene Produkte wie sedimentologische Anfangsbedingungen und die Bodenevolution erzeugen, die so als Elemente in die numerischen Modellsysteme einfließen und damit zur Verbesserung der Simulationsergebnisse beitragen. Die Projektpartner stellten plausibilisierte, konsistente Daten für Bathymetrie und Sedimenteigenschaften für Multi-Modellanwendungen zur Verfügung. Zur Untersuchung und Dokumentation der Streubreite verschiedener morphodynamischer Modelle wurden in der Bundesanstalt für Wasserbau, dem Institut für Wasserwesen der Universität der Bundeswehr München und der smile consult GmbH in Hannover umfassende Analysen mit vergleichbaren Grundlagen, aber verschiedenen Modellverfahren und Zielrichtungen durchgeführt. Die Untersuchungen wurden bezüglich Modellsteuerung und -aufbau aufeinander abgestimmt und ergänzten 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 wurde eine Basis für weitergehende Anforderungsdefinitionen für Forschung und Entwicklung im Küsteningenieurwesen vorgelegt.
- Die Einbindung der Entwickler und Anwender von
 - NOKIS (*Nord-Ostsee Küsteninformationssystem*) → <http://projekt.mdi-de.org/services/nokis.html> und
 - MDI-DE (*Marine Daten-Infrastruktur für Deutschland*) → <http://www.mdi-de.org>in das Verbundprojekt schaffte 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, wurde im Verbund mit den Projektpartnern bewältigt.
- Zu erwartende Änderungen des Meeresspiegels und des Seegangklimas wurden von verschiedenen Projektpartnern in anderen Projekten untersucht und flossen 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 in Anhang 8.1 zusammengefasst werden.

1.3 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**) wurde am 13.11.2009 vom PTJ mit einer Laufzeit von drei Jahren (01.11.2009 – 31.10.2012) genehmigt (**AufMod-A** bis **AufMod-F**: kostenneutrale Verlängerung bis 31.12.2012).

Das Gesamtprojekt wurde von der BAW (Dr. Heyer) koordiniert und bestand 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 wurde von Frau Prof. Dr. Schrottke geleitet und umfasste 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 wurden, bestand das Projekt **AufMod** aus dem Verbund und den assoziierten Partnern. Ferner waren danach der Koordinator und die 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. Die Verbundkoordinatorin hatte darüber hinaus sicherzustellen, dass den Berichtspflichten innerhalb des Verbundes nachgekommen wurde. Der Verbund fügte sich der Gesamtleitung durch den Koordinator. So wurde eine einheitliche Projektorganisation möglich.

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

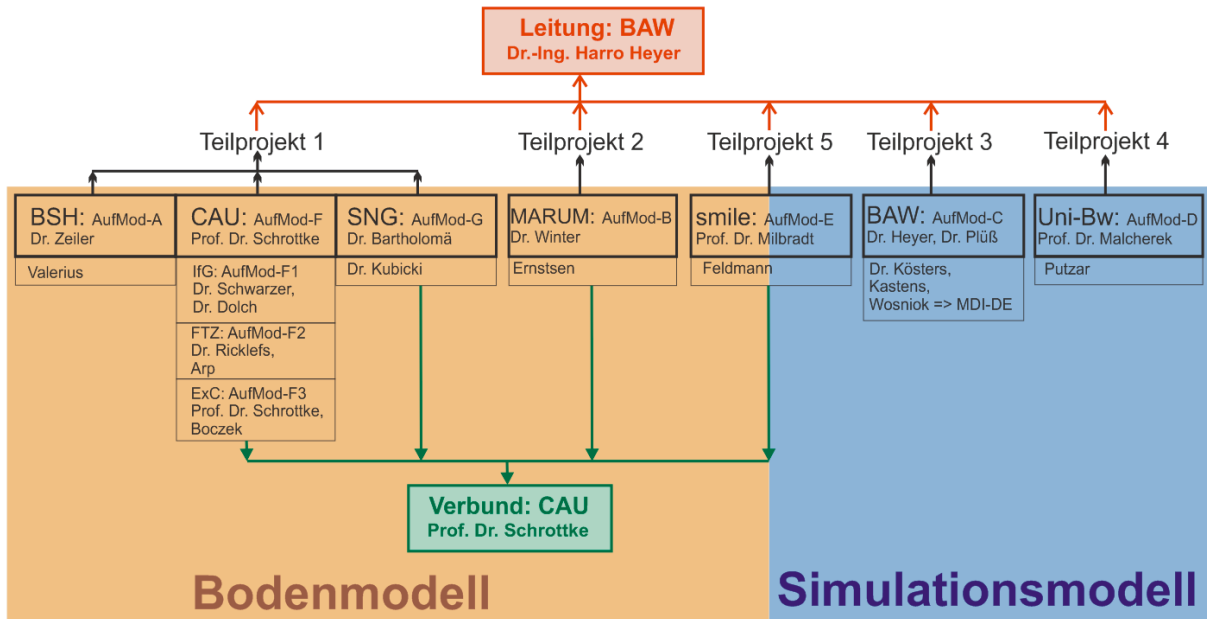


Abbildung 1-1: Struktur der Organisation des Projekts *AufMod*

Die praktische interdisziplinäre Zusammenarbeit wurde durch wiederholte Treffen auf unterschiedlichen Sachebenen realisiert. Es fanden in einem regelmäßigen Turnus Sitzungen des gesamten Projektverbunds statt, innerhalb derer der Arbeitsstand der einzelnen Teilprojekte vorgestellt wurde und fachübergreifende Sachthemen, sowie Organisatorisches diskutiert wurde. Daneben trafen sich laufend, über den Projektzeitraum verteilt, kleinere Arbeitsgruppen um Vorgehen oder Antworten auf fachspezifische Fragestellungen zu erarbeiten, wobei sich die Zusammensetzung der Beteiligten nach den jeweiligen thematischen Anliegen richtete. Auch hier wurde darauf geachtet fachfremde Kollegen aus anderen Teilprojekten mit einzubeziehen, um dem interdisziplinären Ansatz nachzukommen. Zur Entwicklung eines gegenseitigen Verständnisses für die andere Fachdisziplin wurden darüber hinaus Workshops und Doktoranden-Seminare durchgeführt (s. Ausführung in Anhang 8.2).

1.4 Einführung in das Arbeitsgebiet „Deutsche Bucht“

Die Deutsche Bucht liegt im südöstlichen Teil der Nordsee. Sie wird landwärts von den West- über die Ost- und Nordfriesische Küstenzone eingefasst. Seewärts wird sie im Nordwesten von der Doggerbank begrenzt.

Die Küstenzone ist durch das Wattenmeer geprägt, welches sich durch den Gezeiteneinfluss und dem großen Sedimentangebot während des Holozäns entwickeln konnte und ständigen morphologischen Änderungen unterworfen ist.

Die Wassertiefen liegen weitgehend bei 20-30 m und erreichen im Norden maximal 60 m.

1.4.1 Quartäre Entwicklung der Deutschen Bucht

Die heutige Oberflächenstruktur der Deutschen Bucht wurde vorwiegend im Quartär geprägt. Im Pleistozän war das Relief durch den Wechsel von Kalt- und Warmzeiten ständig variierenden Formgebungsprozessen unterworfen. Die glaziale Landformung während der Eisvorstöße war geprägt von sehr großen Sedimentumlagerungen. Beim Abschmelzen der Gletschermassen fanden glazifluviale und äolische Gestaltungsvorgänge statt, die die zunächst vegetationsarme Landschaft wiederum stark umformten. Schließlich wurde die Landoberfläche mit steigendem Meeresspiegel in den Warmzeiten marinen Bedingungen unterworfen. Mit erneutem Temperaturrückgang wiederholte sich der geschilderte Ablauf,

wobei die Eisrandlagen der verschiedenen Kaltzeiten und die Küstenlinien der marinen Transgressionen stark variierten und durch Temperaturschwankungen ständigen Änderungen unterlagen.

Der Gletschervorstoß der letzten Kaltzeit (Weichsel-Kalteiszeit), der nicht mehr bis in die Deutsche Bucht hineinreichte, bildete im zentralen Teil der Deutschen Bucht ein gewaltiges Flusssystem aus, das Elbe-Urstromtal. Die Lage des ehemaligen Elbe-Urstromtals wurde von (Figge, 1981) zwischen Helgoland und der Weißen Bank rekonstruiert. Im Süden mündeten Flüsse aus dem heutigen Elbe- und Weserverlauf in das Elbe-Urstromtal (Ricklefs, et al., 2005)

Mit dem Holozän begann sich die heutige Nordsee auszubilden. In der Deutschen Bucht startete die marine Transgression ca. 8600 ¹⁴C-Jahre BP², als die Küstenlinie der Nordsee etwa bis zur -45m Linie reichte. Um 8300 ¹⁴C-Jahre BP öffnete sich der Ärmelkanal, was eine Vergrößerung des Tidenhubs und verstärkte Tideströmungen zur Folge hatte (Cameron, et al., 1992). Seit 2000 ¹⁴C-Jahre BP schwankt der Meeresspiegel um das heutige Niveau (Streif, 1996).

Der Vorstoß der Nordsee bedingte im Wesentlichen zwei Entwicklungen. Zum einen wurde durch das Vorrücken der Brandungszone der pleistozäne Untergrund angegriffen und umgelagert. Daher ist die Rekonstruktion der pleistozänen Geländeoberfläche stellenweise nicht möglich. Zum anderen wurden aus Lockermaterial morphologische Strukturen wie Barriereinseln, Zungenriffe und Wattenmeer geschaffen, die das heutige Landschaftsbild prägen.

Die Tiefenlage in der Sedimentsäule, die den Wechsel von unveränderten pleistozänen Sedimenten zu den im Holozän überarbeiteten oder abgelagerten Sedimenten darstellt, wird als holozäne Basis bezeichnet. Davon unterscheidet sich der Begriff der Basis nordseezeitlicher Sande (Zeiler, et al., 2000a), der die Tiefe der marinen Fazies des Holozäns angibt.

1.4.2 Schelfbereich

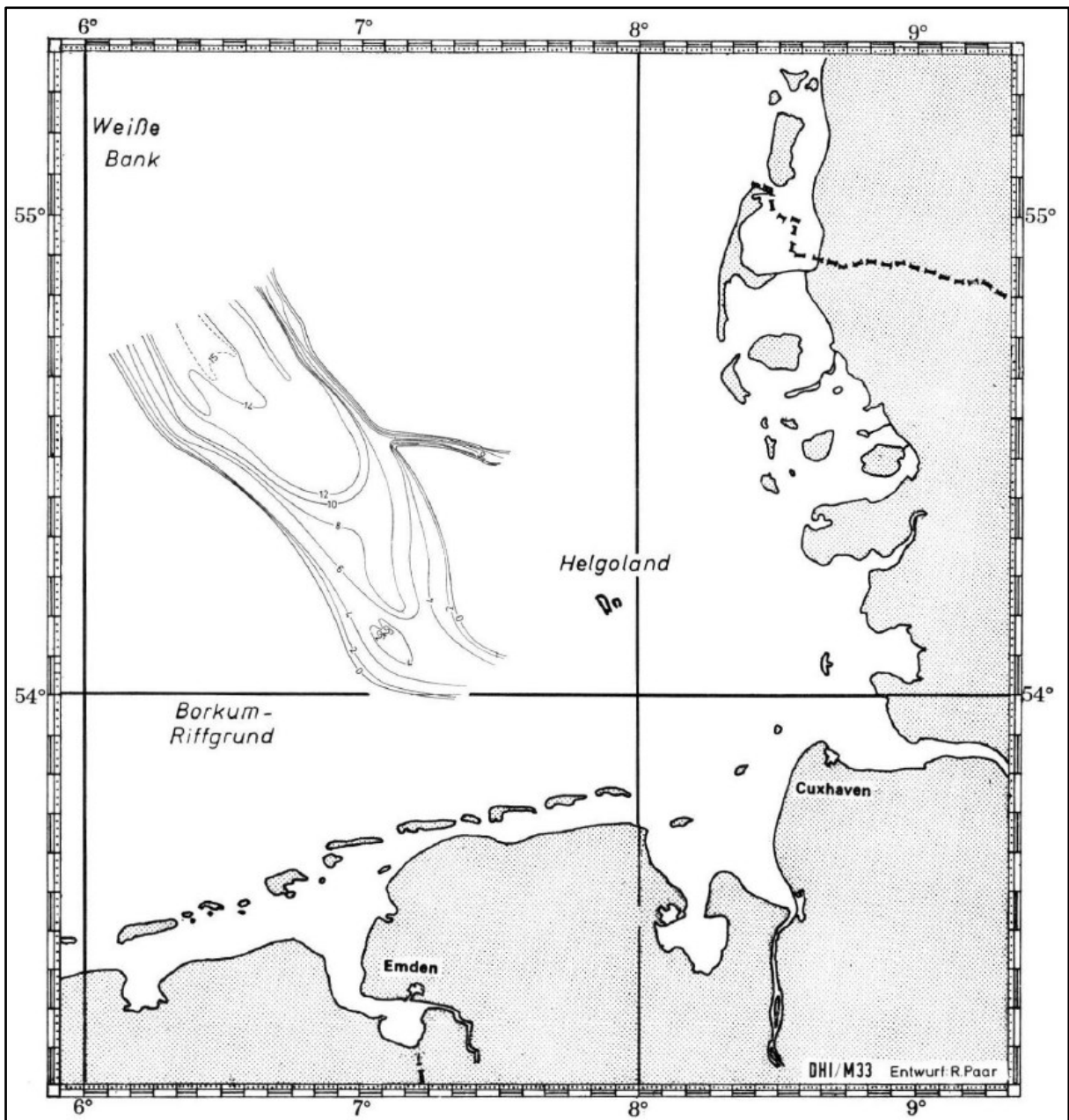
Der pleistozäne Untergrund der Deutschen Bucht prägt jedoch nach wie vor die Morphologie der Gewässersohle und einen Teil des Sedimentbestandes, der durch Strömungen umgelagert werden kann. Der Schelf kann in zwei großräumige morphologische Einheiten untergliedert werden:

- Vor der schleswig-holsteinischen Küste und am Borkum und Norderneyer Riffgrund befinden sich Bereiche, in denen der pleistozäne Untergrund am oder nahe am Meeresboden ansteht und i. d. R. durch ein Sedimentdefizit gekennzeichnet ist (im Folgenden auch als *ehemalige Geest* bezeichnet).
- Dazwischen liegt ein verhältnismäßig unstrukturierter Meeresboden mit großen zusammenhängenden Flächen aus gleichförmigem gut sortiertem Feinsand. Hier hat sich in ausreichender Tiefe (ab etwa 20m) ein großflächiger holozäner Ablagerungsraum entwickelt.

Der holozäne Ablagerungsraum schließt auch das ehemalige Elbe-Urstromtal ein, welches bis über 15m von holozänem Sediment überlagert wurde (vgl. Abbildung 1-2). Westlich des Tals grenzt eine Ebene an, die schließlich im Süden zum Borkum Riffgrund aufwächst. Weite

² Durch die Radiokarbonmethode bestimmtes Alter, BP (*Before Present*, engl. für *vor heute*): „heute“ bezieht sich nach internationaler Übereinkunft auf das Jahr 1950.

Gebiete des Ablagerungsraums weisen, wie Untersuchungen in der Projektlaufzeit zeigten, eine strömungsbedingte Fraktionierung der Sedimente auf. Die Verteilung einzelner Sandfraktionen zeigt eine Vergröberung des Sediments von Nordost nach Südwest, parallel zum Verlauf des Elbe-Urstromtals (vgl. Kapitel 3.6). Im Gegensatz hierzu ist die Oberflächenbeschaffenheit der ehemaligen Geest vielfältiger. Hier wechseln sich kleinräumig Sande unterschiedlicher Körnung von fein bis grob und voneinander abweichendem Sortierungsgrad ab. Stellenweise sind hier auch Kiese und Steine, bis hin zu Findlingen anzutreffen. Dies ist ein Anzeichen für die erhebliche Abhängigkeit der Sedimentverteilung vom vorhandenen Untergrund. Die Grobanteile können als Restsedimente des pleistozänen Geschiebelehms interpretiert werden, während die Feianteile ausgewaschen wurden. Hier wurde also das vorhandene Material im Holozän umgelagert, was im Kontrast zum reinen Ablagerungsraum steht.



keiten über 20m erreichen (Irion, et al., 1987). Die Entstehungsgeschichte der Schlicklinse ist bis heute nicht abschließend geklärt.

1.4.3 Küstenzone

Die Küstenregion unterliegt weitgehend einem mesotidalem Regime mit einem Tidenhub von 2-4 m. Der Tidenhub ist entscheidend für die morphologische Entwicklung einer Küstenregion. An der Nordseeküste entwickelte sich bei einem Tidenhub zwischen 1,35m und 2,90m das Wattenmeer mit den vorgelagerten Barriereinseln. Bei einem höheren Tidenhub entstand eine offene Wattenküste ohne größere Inseln, wie es im Inneren der Deutschen Bucht zwischen Wangerooge und Eiderstedt der Fall ist (Ehlers, 1994). Das System der Inselbarriere passt sich unter natürlichen Umständen ständig Änderungen des Meeresspiegels an, wobei ein steigender Meeresspiegel zu einer landwärts gerichteten Verlagerung führt. Die künstliche Befestigung der Küsten wirkt dieser natürlichen Entwicklung entgegen und bedingt mit steigendem Meeresspiegel einen stetig wachsenden Aufwand (Ehlers, 1988).

Jedoch spielt auch entlang des Küstenbereichs der geologische Untergrund eine entscheidende Rolle. So unterscheiden sich die Inseln Nordfrieslands von den west- und ostfriesischen Barriereinseln. Die Inseln Föhr, Sylt und Amrum bestehen aus einem Geestkern, also aus pleistozänem Material, um den sich während der holozänen Entwicklung Sande angelegt haben.

Das Wattenmeer zwischen der offenen Nordsee und dem Festland mit seinen intertidalen Flächen, Gezeitenrinnen und Prielsystemen bildet morphologisch und sedimentologisch einen Raum, der durch intensive Sedimentumlagerungen und morphologische Veränderungen gekennzeichnet ist. Innerhalb dieses Systems fungieren die Gezeitenrinnen als wichtige Transportbahnen für Wasser und Sediment.

Die Ästuarie von Ems, Weser und Elbe stellen ein weiteres wichtiges Element der Nordseeküste dar. Tidedominierte Flussmündungen (Ästuarie) zählen zu den komplexen Küstensystemen der Erde, nicht zuletzt, da sie die Schnittstelle zwischen Flusssystem und der offenen See darstellen. Steuergrößen wie Tide, Oberwasserabfluss und Seegang führen zu ständigen Sedimentbewegungen in den Systemen, in denen die Gewässersohle aus Meter bis Zehnermeter mächtigen, mobilisierbaren Sedimenten zusammengesetzt ist. Meist prägen große Sohlformen, vor allem subaquatische Dünen das Relief der Gewässersohle und nehmen dabei auch Einfluss auf die Oberflächensedimentverteilung. Insbesondere in Bereichen, in denen die Wassermassen der Flüsse mit denen des Meeres interagieren (Trübungszone), kommt es oft zur Anreicherung hoher Schwebstoffmengen und entsprechenden Sedimentumlagerungen. Ästuarie sind zudem wichtige Transportwege für Schwebstoffe in das Meer (u. a. (Puls, et al., 1997)).

2 Erstellung der notwendigen Grundlagen für die Analyse der langfristigen Morphodynamik in der Deutschen Bucht

2.1 Konzeptioneller Ansatz – Integriertes Modellsystem

Die Grundlage für die Beurteilung der morphodynamischen Entwicklung in der Deutschen Bucht bilden meteorologische und hydrodynamische Messdaten, insbesondere bathymetrische Vermessungen sowie sedimentologische Analysen. Diese Beobachtungsdaten wurden durch die Projektpartner zusammengetragen, gesichtet, plausibilisiert und um projektrelevante Metadaten vervollständigt. In den Fokusgebieten (Kerngebiete) wurden diese Daten durch zusätzliche Naturmessungen ergänzt. Diese Basisdaten bildeten 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 (siehe 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 wurden auf der Basis von Beobachtungsdaten im Bodenmodell zusammengefasst (braune Säule). Diese Informationen wurden 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 flossen wiederum in das Funktionale Bodenmodell zur verbesserten Interpretation der Messdaten ein.

Die Informationen und Daten aus dem Bodenmodell sowie die Ergebnisse und Analysen der morphodynamischen Simulationsmodelle wurden in einem Informationsmodell gespeichert (siehe Kapitel 6). Kombiniert mit Metadaten stehen sie so allen Projektteilnehmern und durch die Einbindung in das KFKI-Projekt Marine Daten-Infrastruktur für Deutschland (MDI-DE) der interessierten Fachöffentlichkeit nach Abschluss von **AufMod** zur Verfügung. Die Verzahnung mit dem KFKI-Projekt Marine Daten-Infrastruktur für Deutschland (MDI-DE) wird in Kapitel 6 verdeutlicht.

2.1.1 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 wurde in **AufMod** ein Multi-Methodenansatz verwendet, um diesen unterschiedlichen räumlichen und zeitlichen Skalen gerecht zu werden.

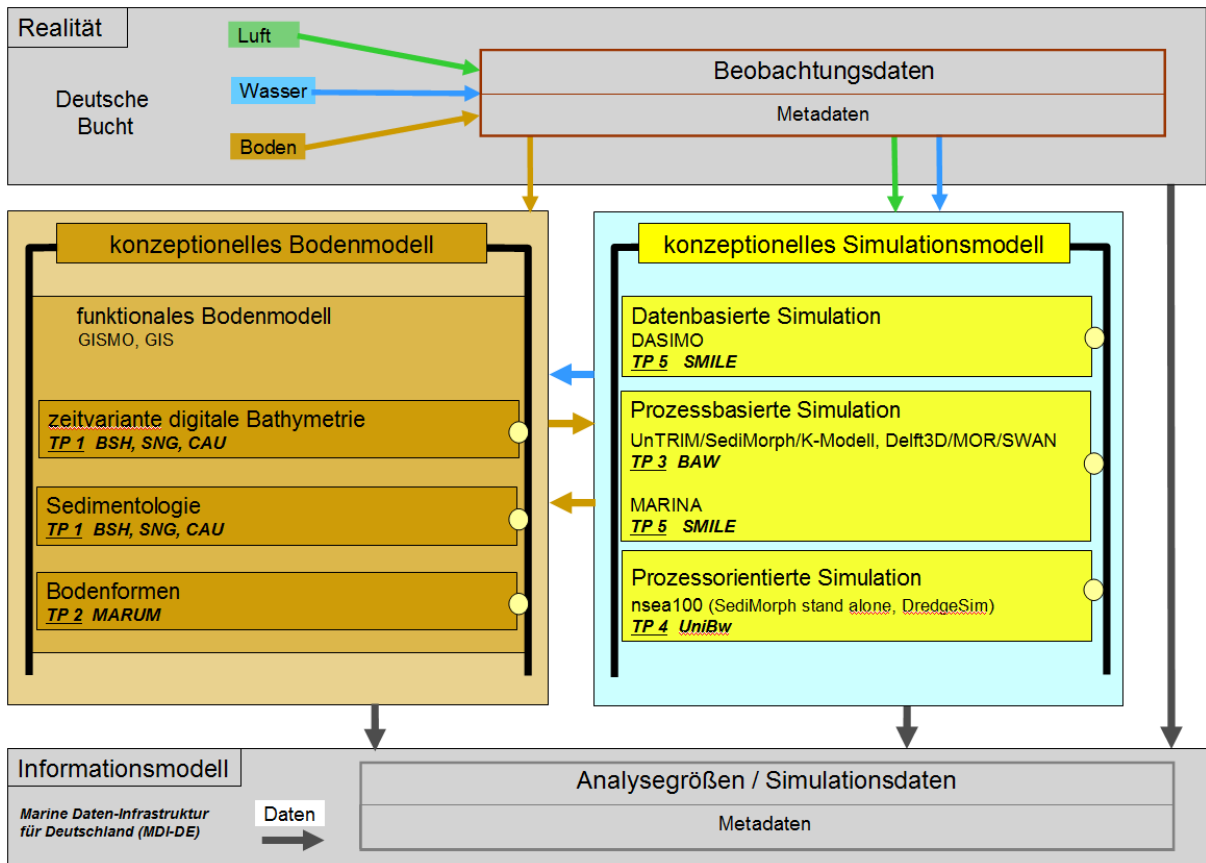


Abbildung 2-1: Konzeptioneller Ansatz des integrierten Modellsystems

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

Die Modellierung der Entstehung und Entwicklung von Bodenformen, wie beispielsweise von subaquatischen Dünen (Unterwasserdünen), erfolgte auf der Basis von Analysen hochauflösender bathymetrischer Vermessungsdaten. Bodenformen fließen in parametrisierter Form im Modul Bathymetrie des Funktionalen Bodenmodells ein.

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

Für den sedimentologischen Aufbau wurden Modelle auf der Basis von Sedimentproben (z. B. Korngrößenverteilungen aus Datenbanken wie z. B. MUDAB, Sedimentkataster der WSV u. a.) mit Daten hochauflösender Messtechniken (Seitensichtsonar), verknüpft, um sowohl großräumig als auch insbesondere in den Fokusgebieten kleinräumig die Sedimentverteilung und Bodenbeschaffenheit zu verstehen und mit den gestaltenden hydrodynamischen Prozessen in Verbindung zu bringen.

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, fanden im Rahmen des Projektes ökologische Parameter im konzeptionellen Bodenmodell zunächst keine Berücksichtigung. Im Aufbau des Funktionalen Bodenmodells ist jedoch eine Erweiterung zur Integration ökologischer Parameter möglich.

Die im Rahmen des konzeptionellen Bodenmodells zusammengetragenen und um projekt-spezifische 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 wurden.

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.

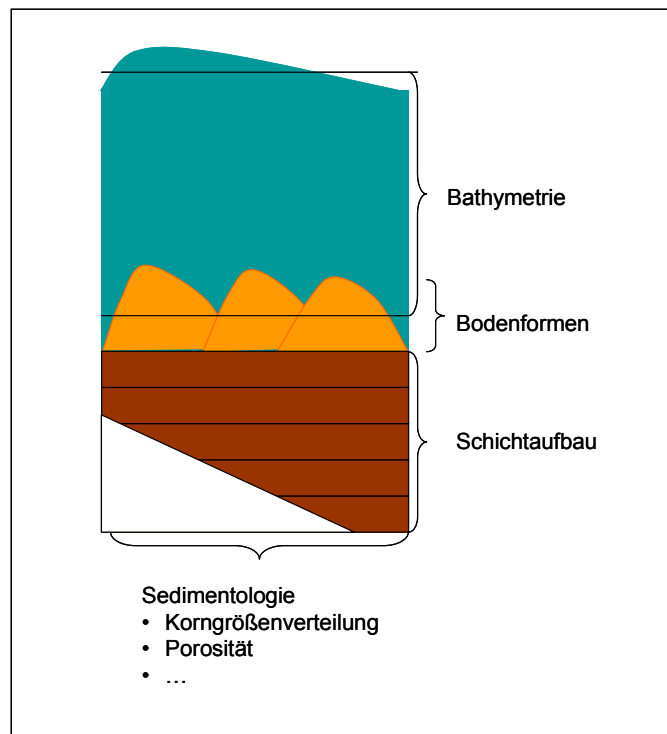


Abbildung 2-2: Konzeptionelles Bodenmodell

2.1.2 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 Multi-Modellansatz (Plüß, et al., 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 Simulationsmodelle beschreibbaren Zeitspannen morphodynamischer Entwicklungen lassen sich die Modelle unterteilen in

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

Weitere Unterteilungen ergeben sich bezüglich der berücksichtigten physikalischen Phänomene sowie deren Granularität (Auflösung im Modell). Eine weitergehende Beschreibung der einzelnen Simulationssysteme wird in Kapitel 4 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 erlaubten eine Abschätzung der Modellunsicherheiten morphodynamischer Simulationsmodelle, insbesondere auch bezüglich der unterschiedlichen Modellapproximationen und Vereinfachungen.

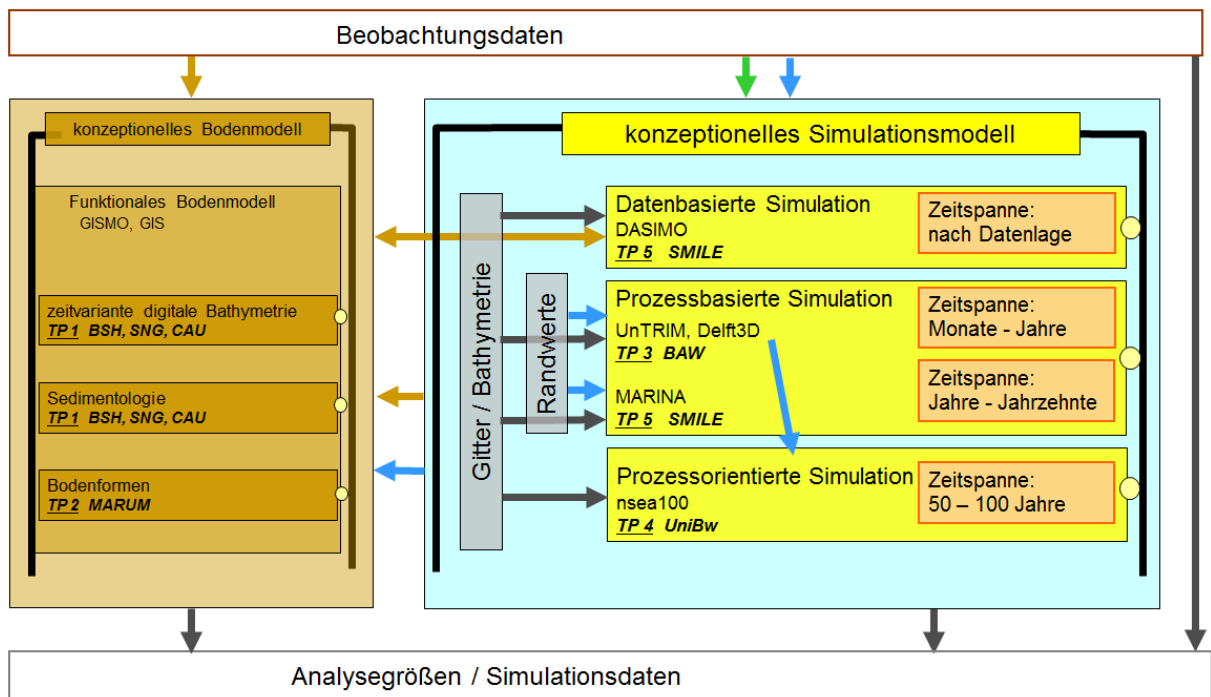


Abbildung 2-3: Übersicht des konzeptionellen Simulationsmodells

2.1.3 Verzahnung von Boden- und Simulationsmodell

Die Beschreibung der Gewässersohle im konzeptionellen Bodenmodell in seinen unterschiedlichen Ausprägungen bildete 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 wurden Hindcast-Rechnungen durchgeführt, welche mit Ergebnissen aus dem Bodenmodell verglichen und validiert wurden. Hierzu gehörten, die aus dem Bodenmodell abgeleiteten Analysen zu:

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

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

Die Datengrundlage war für eine morphodynamische Analyse in der Deutschen Bucht hinsichtlich ihrer raumzeitlichen Abdeckung lückenhaft. Die Übertragung der häufig nur punktuell vorliegenden Messdaten in die Ebene erforderte deshalb für die Fragestellung geeignete Interpolations- und Approximationsmethoden. Eine Verbesserung dieser Interpretationsvorschriften konnte durch die Hinzunahme weiterer physikalischer Parameter erfolgen. Hierzu gehörten 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 ließen sich Datenlücken in den Daten des Bodenmodells durch Ergebnisse aus morphodynamischen Modellen auffüllen.

Die Analysen im Bodenmodell sowie die Methoden des Funktionalen Bodenmodells ließen sich durch Hinzunahme von Auswertungen aus den Simulationsmodellen verbessern. Insbesondere die datenbasierte Simulation profitierte so von Bodeninformationen und prozessbasierten Simulationsanalysen gleichermaßen.

2.2 Datengrundlagen

Um die Vergleichbarkeit der Analysen mit unterschiedlichen Modellansätzen sicher zu stellen, war eine gemeinsame konsistente Datenbasis unerlässlich. Hierzu mussten Verfahren entwickelt werden, die Vielzahl an hydrodynamischen, atmosphärischen und bodenphysikalischen Kenngrößen zu plausibilisieren und für die verschiedenen Nutzergruppen in **AufMod** verfügbar zu machen.

Dies wurde zum einen durch den Aufbau eines Bodenmodells realisiert. Hier wurde zwischen Mess- und Modellgruppe eine Auswahl an relevanten Bodenparametern abgestimmt. Das Bodenmodell bot die Möglichkeit durch unterschiedliche Abstraktionsebenen Rand- und Anfangswerte morphodynamischer Größen für die Steuerung der prozessbasierten Modelle, sowie detaillierte Informationen für geowissenschaftliche Fragestellungen in den Fokusgebieten bereitzustellen.

Hydrodynamische und atmosphärische Parameter fanden allein in den numerischen Verfahren Verwendung.

2.2.1 Bodenbezogene Daten

Das **AufMod** - Bodenmodell bildet den Rahmen für alle Parameter die den Meeresboden betreffen. Es basiert auf Naturdaten in Verbindung mit fachspezifischen geologischen Interpretationen, um eine dreidimensionale Beschreibung des Gewässerbodens und insbesondere der oberen Sedimentschichten an der Gewässersohle zu erhalten. Für den Aufbau des Bodenmodells wurden Daten aus verschiedenen Quellen zusammengeführt sowie neue Daten erhoben.

Folgende Parameter und Eigenschaften wurden hierbei betrachtet:

- Bathymetrie = Höhenlage der Gewässersohle
- Bodenformen
- Beschaffenheit des Oberflächensediments (anhand von Seitensichtsonar auswertungen)
- Korngrößenverteilung der Oberflächensedimente
- Porosität
- Prozentualer Anteil organischer Komponenten bei kohäsiven Feinsedimenten
- Mächtigkeit der mobilen Deckschicht = Sedimentmächtigkeit

Es wurden bathymetrische Vermessungsdaten zusammengetragen, die zeitlich bis in die 1940er Jahre zurückreichen, räumlich reichen sie über die Deutsche Bucht hinaus. Korngrößenverteilungen liegen fast flächendeckend für das gesamte Nordseegebiet vor. Für andere Bodenparameter wie Porosität, organischer Anteil und Bodenformen wurde sich besonders auf repräsentative Teilgebiete (Fokusgebiete) konzentriert.

Die Fokusgebiete wurden so ausgewählt, dass die Systeme Schelf/Vorstrand, Wattenmeer und Ästuar repräsentativ abgebildet werden (Abbildung 2-4). In diesen wurden flächenhaft hochauflösende Datensätze erhoben (CAU und SaM). Zudem wurden durch Wiederholungsmessungen erste sedimentologische großflächige Zeitreihen erstellt oder fortgeführt. Für die drei dargestellten Transitrohrleitungen lagen dem BSH Überwachungsberichte vor, die bis in die Planungsphase der jeweiligen Rohrleitungen zurück reichten und somit für **AufMod** nutzbare Daten-Zeitserien beinhalteten.

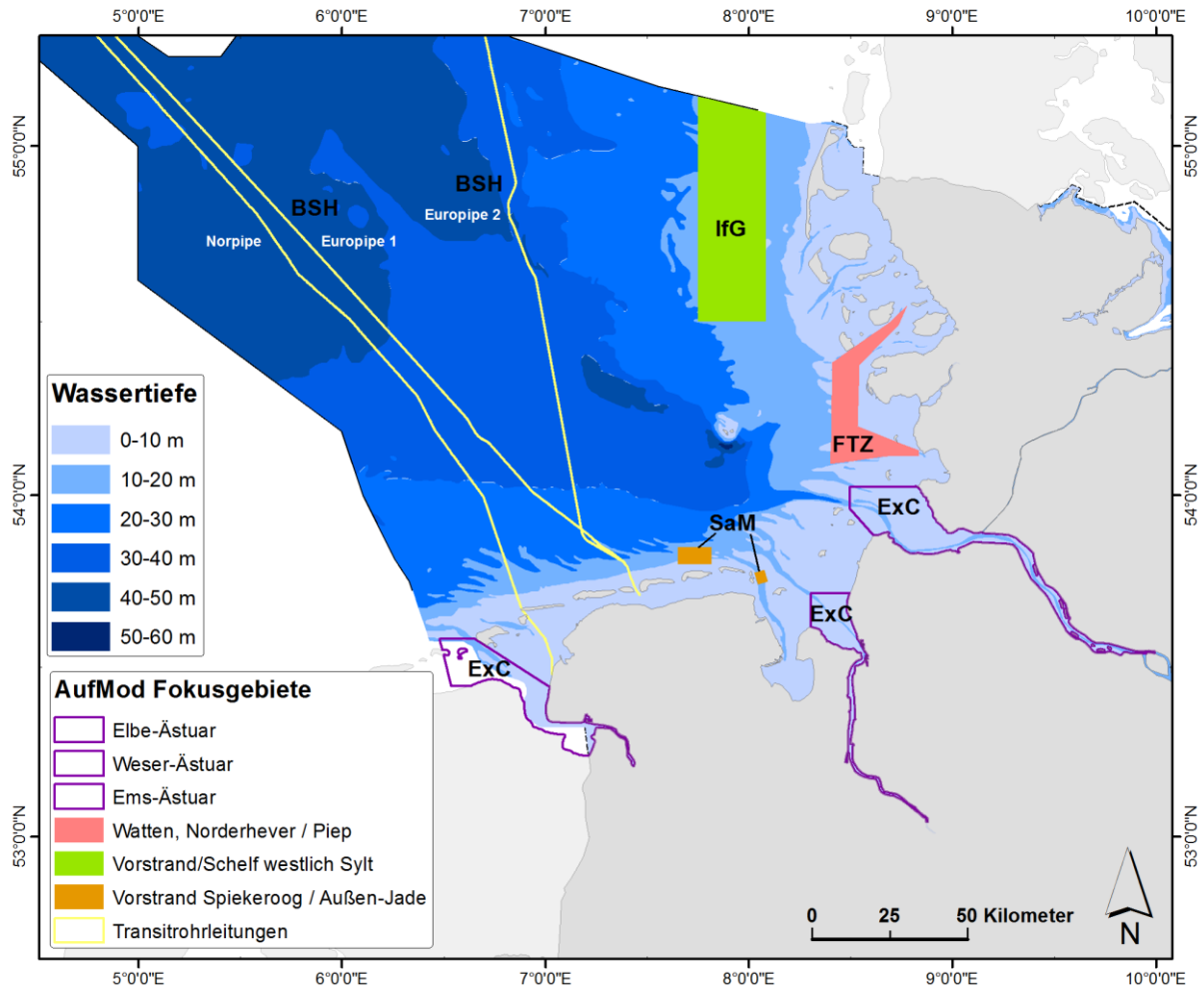


Abbildung 2-4: Übersicht der **AufMod**-Fokusgebiete zur hochauflösenden Datenerhebung, bzw. Auswertung von Überwachungsberichten der Transitrohrleitungen

2.2.1.1 Bathymetrische Vermessungsdaten

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

Im nächsten Schritt wurden die Daten um projektspezifische Metadaten erweitert. Die so zusammengetragenen Vermessungsdaten wurden in eine digitale Bathymetrie übernommen und bildeten die Grundlage für die Erstellung quasikonsistenter digitaler Geländemodelle.

Insgesamt wurden mehr als 16.000 Vermessungen (~1,7 Mrd. Punkte) zusammengetragen. Der Zeitraum umfasst die Jahre von 1948 bis 2012. Neben den Vermessungsdaten von deutschen Verwaltungen und Institutionen und den Daten aus der Überwachung der Gasrohrleitungen EUROPIPE I und II sowie NORPIPE wurden dem Projekt auch bathymetrische Daten vom Britischen Oceanographic Data Center (BODC) und der dänischen Küstendirektion zur Verfügung gestellt (Tabelle 2-1).

Tabelle 2-1: Übersicht der in **AufMod** vorhandenen Vermessungsdaten

Herkunft der Vermessungsdaten	Räumliche Ausdehnung	Zeitliche Ausdehnung
BSH	Deutsche Bucht in jahresweise unterschiedlicher Flächenabdeckung	1983-2012
BSH	Digitalisierte Arbeitskarten der Seevermessung, unterschiedliche Flächenabdeckung	1974-1979
KFKI-Projekt 03KIS308	Digitalisierte Arbeitskarten der Seevermessung, unterschiedliche Flächenabdeckung	1948-1982
WSA Bremen	Weser	2008-2009
WSA Bremerhaven	Weser-Ästuar, teilweise Jadebusen	1996-2009
WSA Cuxhaven	Elbmündung bis Nordwesten von Helgoland	1990-2012
WSA Emden	Ems-Ästuar	1990-2011
WSA Tönning	Rinnen Nordfriesisches Wattenmeer	1990-2010
WSA Wilhelmshaven	Jadefahrwasser, Gebiet um Spiekeroog und Wangerooge	1996-2012
NLWKN	Nördlicher Strandbereich Juist und Langeoog	1983-2007
LKN-SH	Wattgrundkarten	1935-2012
Landesvermessungsamt Schleswig-Holstein	ALS-Daten der SH-Watten	2005/06
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
JadeWeserPort Logistics Zone GmbH & Co.KG	Jade	2010

2.2.1.2 Korngrößenverteilungen

Im Gegensatz zu den bathymetrischen Vermessungsdaten, für die bereits flächendeckende Zeitreihen existieren, lagen die Korngrößenverteilungen bei weitem nicht in einer vergleichbaren zeitlichen Auflösung vor; vielmehr galt es hierfür möglichst die gesamte Fläche der Deutschen Bucht abzudecken. Mit Unterstützung der geologischen Dienste der Nordseerainerstaaten konnte für die gesamte Nordsee eine recht gute Abdeckung zusammengetragen werden, um u. a. für die numerischen Modelle eine belastbare Eingangsinformation zur Verfügung zu stellen. Insgesamt wurden rd. 80.000 Korngrößenverteilungen aufgenommen. Tabelle 2-2 gibt eine Übersicht über deren Herkunft sowie der räumlichen und zeitlichen Ausdehnung. In Abbildung 2-5 ist die Verteilung der Probenstationen grafisch dargestellt.

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

Titel	Herkunft	Probenpunktmenge	Räumliche Ausdehnung	Zeitliche Ausdehnung
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	
Oberflächensedimentproben Belgien	Royal Belgian Institute of Natural Sciences, Brüssel, Belgien	3468	AWZ Belgien	1984-2009
Oberflächensedimentproben Dänemark	GEUS, Kopenhagen, Dänemark	215	Nordsee	2000-2008
Oberflächensedimentproben Dänemark	Danish Coastal Authority, Ministry of Transport and Energy	215	AWZ Dänemark	2010
Oberflächensedimentproben	Geopotential Deutsche Nordsee (BSH, BGR, LBEG)	1363	AWZ Deutschland	2008-2011
SedDB (Küste) – Korngrößenverteilungen	BfG, Koblenz	4949	Elbe-, Jade-, Weser-, Ems-Ästuar	1982-2009
Korngrößenverteilungen Sedimentatlas Waddenzee	Waterdienst (Rikswaterstaat, Ministerie van Infrastructuur en Milieu), Lelystad, NL	7502	Niederländisches Wattenmeer	1989-1997
Oberflächensedimentproben Windparkgenehmigungsverfahren	BSH (nur intern)	4383	AWZ Deutschland	2000-2008
FeDaBa-Kornverteilungen	BfG, Koblenz	3163	Elbe-, Jade-, Weser-, Ems-Ästuar	1980-2012
GROBEKART Sedimentdaten	AWI	4373	Schelf Schleswig-Holstein	2004-2011

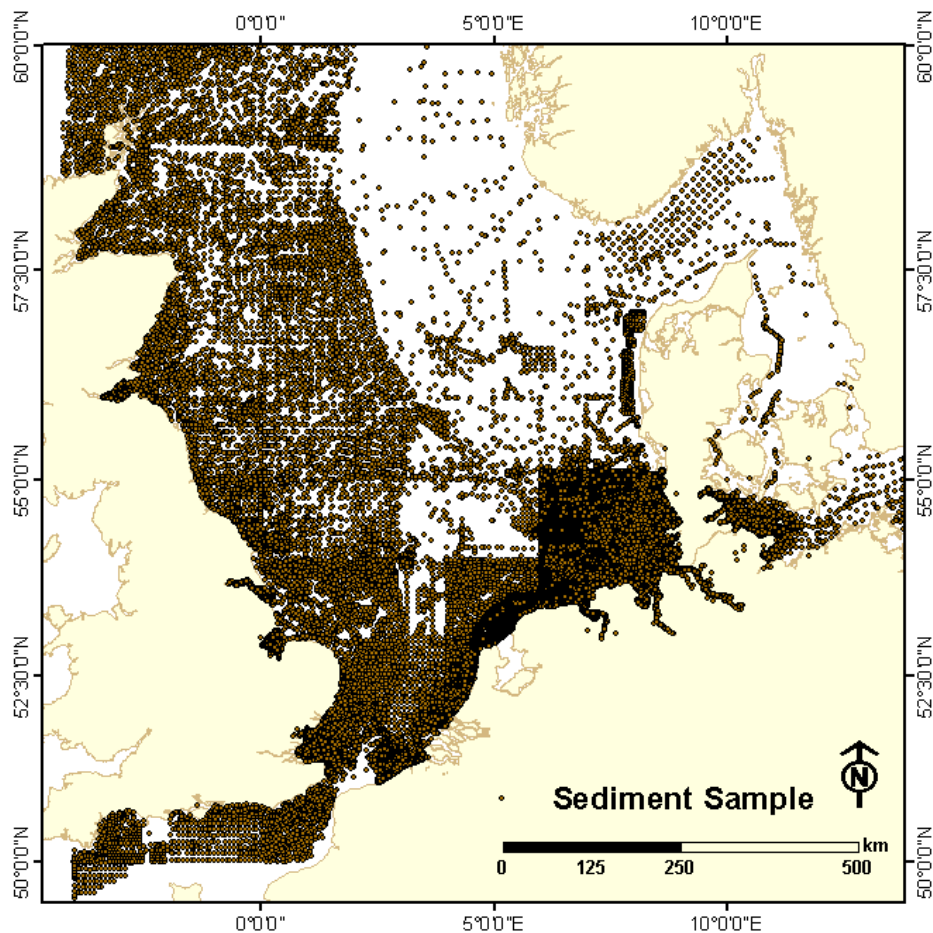


Abbildung 2-5: Lokationen der *AufMod* – Sedimentproben

2.2.1.3 Porosität

Da für die Messung der Porosität in rolligen Sedimenten bislang keine belastbare Methodik existiert, sind für diesen Parameter keine großen Datensätze für den Bereich der Deutschen Bucht erhältlich. Da die Sensitivität der in **AufMod** eingesetzten numerischen Verfahren jedoch sehr hoch ist wurden im Projekt Studien zur Porosität in den Ästuaren durchgeführt (zur Methodik vgl. Kapitel 2.4.3, Ergebnisse in Kapitel 3.1.1).

2.2.1.4 Bodenformen und Beschaffenheit des Oberflächensediments

Im Rahmen des Projekts wurden sowohl historische Analysen zur Verteilung von Bodenformen zusammengestellt als auch aktuelle Messdaten analysiert. Analoge Karten der Untersuchung von Ulrich (Ulrich, 1975) wurden digitalisiert und dekodiert (Abbildung 2-6). Die Rekonstruktion dieser Daten wurde als Publikation zeitnah eingereicht, den Projektpartnern zur Verfügung gestellt und im Shelf Geo-Explorer, bzw. im Datenbanksystem Pangaea veröffentlicht.

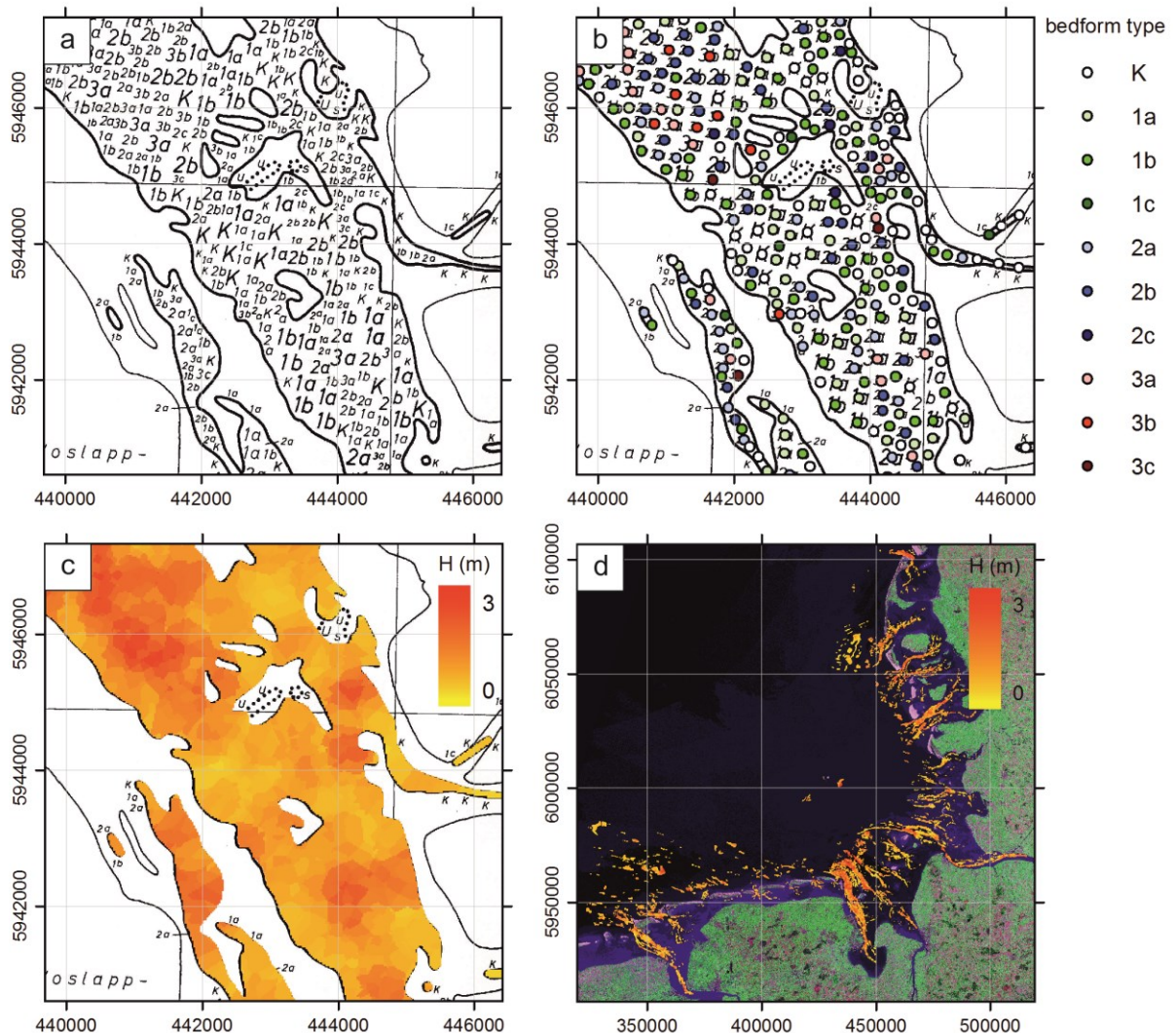


Abbildung 2-6: Ablauf der Rekonstruktion der Daten von Ulrich (Ulrich, 1971) am Beispiel der Außenjade: (a) Rohdaten, (b) digitalisierte Punkte und Polygone, (c) rekonstruierte Höhen, (d) Darstellung der Höhen (Mittelwerte) im Gesamtbereich

Für die Auswertung des heutigen Zustands wurden hochauflösende bathymetrische Daten verwendet. Die folgenden Datensätze aus Vermessungen mit Fächerecholot sind von den zuständigen Wasser- und Schifffahrtsämtern bezogen worden:

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

2.2.1.5 Mächtigkeit der mobilen Deckschicht

Zur Modellierung der Mächtigkeit der mobilen Deckschicht standen verschiedene Quellen zur Verfügung. Zum einen aus vorangegangenen KFKI- Forschungsprojekten für den Bereich der Nord- und Ostfriesischen Inseln (KFKI-Forschungsprojekt „Materialinventur an der deutschen Nordseeküste“ (Zeiler, et al., 2000a) und „Sedimentinventar Nordfriesisches Wattenmeer“ (Ahrendt, 2006). Außerdem wurden vorhandene Modelle der Holozänbasis herangezogen (Ricklefs, et al., 2005) und aus der „Geologische Küstenkarte“ des LBEG). Abbildung 2-7 zeigt die räumliche Verbreitung der verwendeten Daten, markiert nach deren Urhebern.

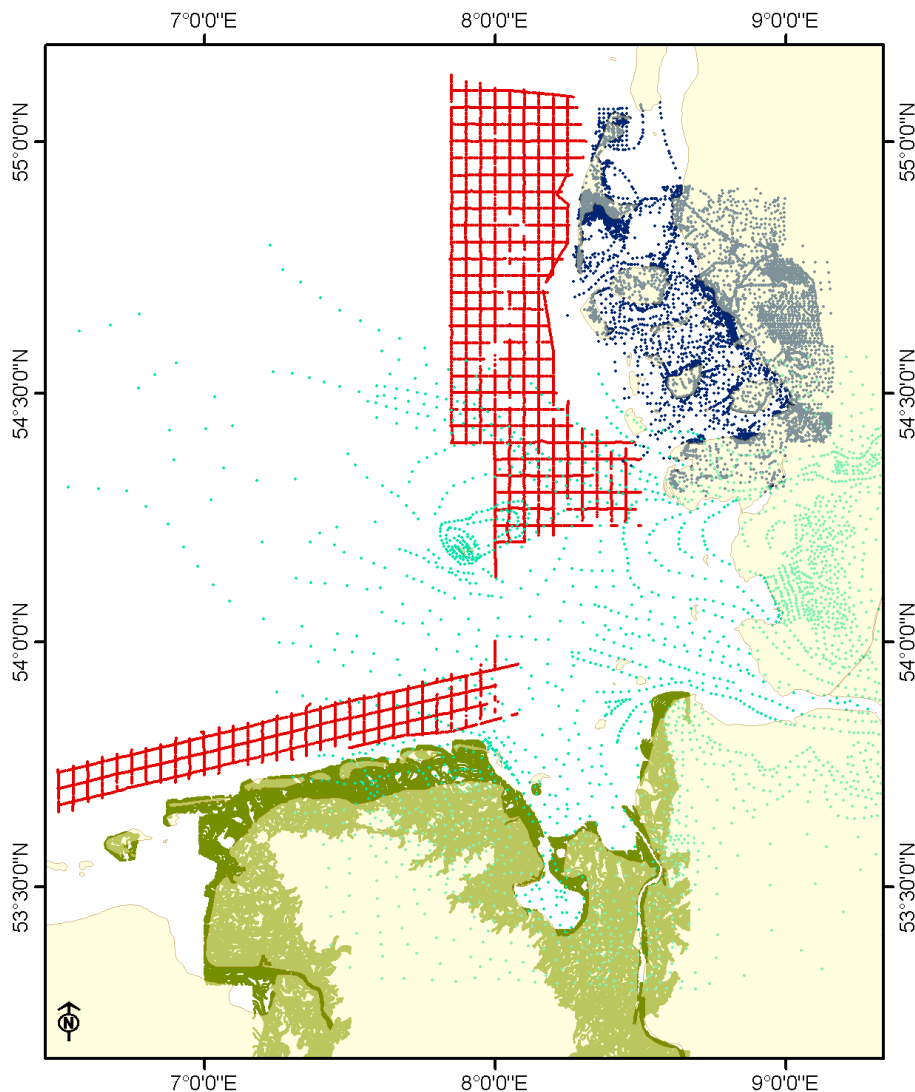


Abbildung 2-7: Verteilung der Datengrundlage zur Modellierung des konsolidierten Horizonts

Wichtige Anmerkung zu Abbildung 2-7:

Blau: Bohrungen zur Erfassung der Holozänbasis („Sedimentinventar Nordfriesisches Wattenmeer“ (Ahrendt, 2006); Rot: hydroakustisches Messnetzes zur Erfassung der Mächtigkeit nordseezeitlicher Sande („Materialinventur an der deutschen Nordseeküste“ (Zeiler, et al., 2000a)); Türkis: Modell der Holozänbasis nach (Ricklefs, et al., 2005); Grün: Isolinien des Reliefs der Holozänbasis („Geologische Küstenkarte“ des LBEG)

2.2.2 Hydrodynamische Daten

Die Randwerte des Wasserstandes wurden aus übergeordneten Modellen erzeugt:

- Einsteuerung von Wasserstandszeitreihen am Modellrand generiert aus den Ergebnissen des globalen Gezeitenmodells FES 2004 (Lyard, et al., 2006).
- Steuerung der Mittelwasserlage aus dem operationellen Windstaumodell des BSH basierend auf dem Nordatlantikmodell BSHcmod.na (Komo, pers. com.)

Für die Strömungsgeschwindigkeit wird abgenommen, dass kein Impulseintrag über die Ränder erfolgt.

Als Oberwasserabflüsse wurden im Bereich der Deutschen Bucht Zeitreihen der täglichen Abflüsse aus Messungen eingesteuert, im übrigen Gebiet wurden klimatologische Werte nach Gayer (Gayer, et al., 2004) angenommen.

Siehe hierzu auch die BAW-Dokumentationen im Rahmen der Validierungsstudien <http://www.baw.de/methoden/index.php5/Validierungsstudien>.

2.2.3 Meteorologische Daten

Die verwendeten meteorologischen Daten werden im Kapitel 4.1.5 benannt.

2.3 Das Funktionale Bodenmodell

Das Funktionale Bodenmodell ist ein datenbasiertes Modell der Oberfläche des Gewässerbodens der Deutschen Bucht (Nordsee). Es besteht aus Modulen für die Komponenten:

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

Diese Funktionalität kann um weitere Modellaspekte erweitert werden.

Das Funktionale Bodenmodell basiert auf Mengen von Messdaten, zugehörigen Metadaten und Interpretationsvorschriften (Interpolations- und Approximationsmethoden).

Die örtliche Ausdehnung des Funktionale Bodenmodells umfasst die gesamte Nordsee und entspricht in der Ausdehnung dem im Forschungsvorhaben **AufMod** betriebenen Nordsee-modell (siehe Abbildung 2-8). Als Basiskoordinatensystem wurde DHDN92 und WGS84 UTM32 zu Projektbeginn festgelegt.

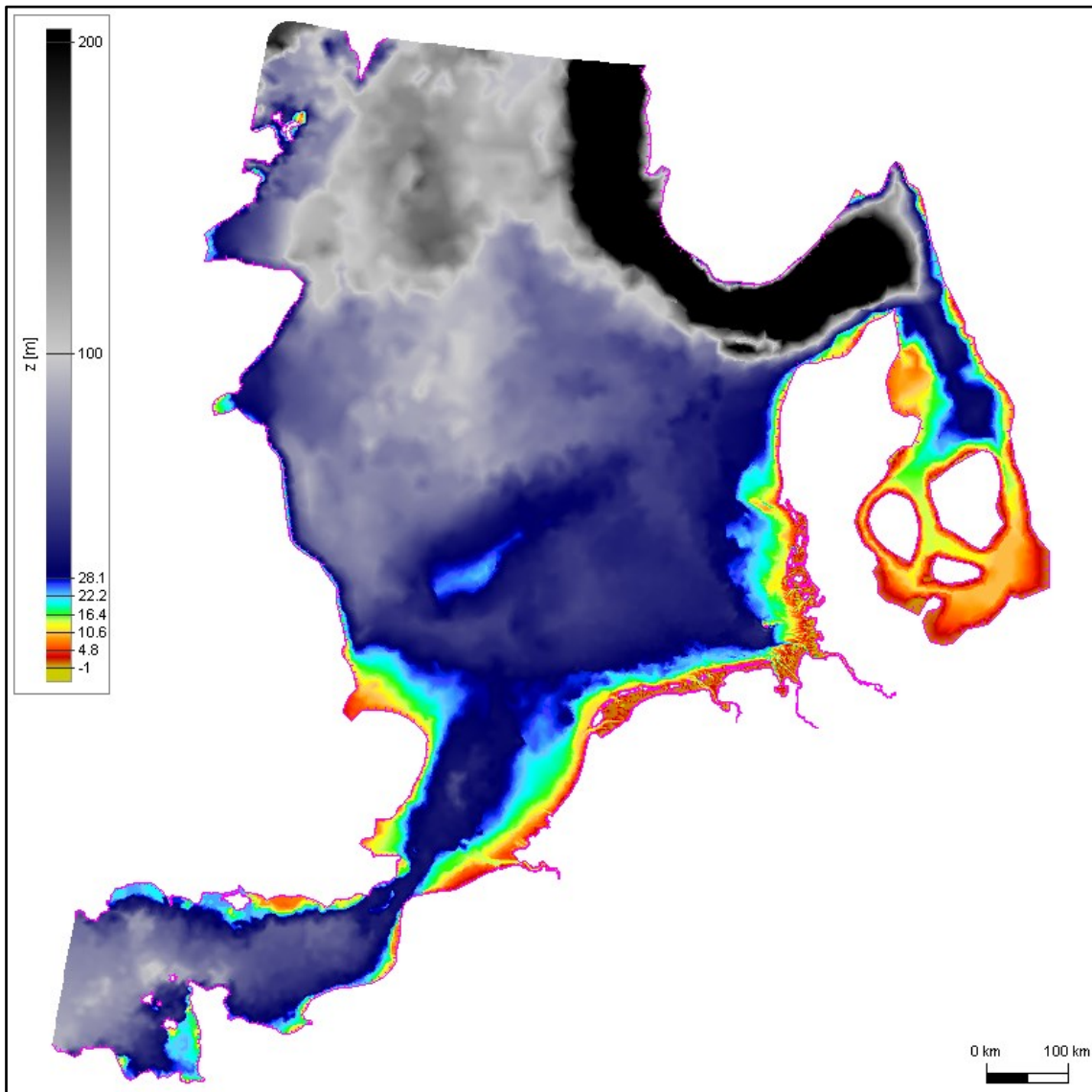


Abbildung 2-8: Ausdehnung des Funktionalen Bodenmodells

Die Datendichte und -abdeckung ist für die einzelnen Modellkomponenten sehr unterschiedlich. Der Fokus im Verbundprojekt **AufMod** lag jedoch in der Deutschen Bucht bzw. der deutschen ausschließlichen Wirtschaftszone (AWZ) und dem deutschen Küstenmeer.

Jede Komponente des Funktionalen Bodenmodells ist für zukünftige Nutzungen als zeitvariantes Modell entworfen. Die Möglichkeiten zeitvariable Modellergebnisse zu erhalten hängt ganz wesentlich von den zugrundeliegenden Daten ab. Die derzeit verfügbare Datenbasis erlaubt noch nicht für alle Komponenten zeitvariable Ergebnisse. Deshalb bestehen alle Modellkomponenten aus einem zeitinvarianten Basis-Modell und den eigentlichen Messdaten mit zugehörigen Metadaten, inklusive Angaben zu den empfohlenen Interpolationsmethoden.

2.3.1 Zeitinvariantes Basis-Modell

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

Als Modellgröße werden plausible Informationen gewählt:

- für die örtliche **mittlere Höhenlage** des Bodens wird der Mittelwert aller gemessenen z-Werte an einem Ort verwendet und bekommt in der aktuellen bathymetrischen Modellkomponente das Datum 01.01.1900 (da die Höhenlage nicht bekannt ist, entspricht diese Vorgehensweise einer zeitlichen Extrapolation auf der Basis der Shepard-Interpolation). Für die Höhenunschärfe kann im Weiteren dann die Varianz der z-Werte am Ort verwendet werden.
- Für **Bodenformen** wird die Bodenformkarte von Ullrich herangezogen, mit dem Zeitstempel 01.01.1970. Die fehlende Richtungsinformation der Bodenformvektoren wurde auf der Basis resultierender Strömungen auf der Bathymetrie von 1970 abgeschätzt.
- Für die **Kornverteilung** wird auf der Basis eines mittleren D_{50} eine lognormale Kornverteilung verwendet, die den Zeitstempel 01.01.1900 bekommt.
- die **Porosität** wird aus dem mittleren D_{50} bestimmt und bekommt den Zeitstempel 01.01.1900
- der **organische Anteil** wird als konstant 5% gesetzt und bekommt den Zeitstempel 01.01.1900
- Der **konsolidierte Horizont** entsteht aus der Verknüpfung der in Kapitel 2.2.1.5 aufgeführten Datenquellen. Ergänzt wurden diese Daten durch digitalisierte Isolinien des Elbeurstromtals (Figge, 1981). Um die gesamte Fläche der deutschen Bucht abzudecken, wurde in Bereichen ohne Informationen die größte Tiefe, die in allen bathymetrischen Vermessungsdaten zu beobachten war herangezogen. Der konsolidierte Horizont bekommt den Zeitstempel 01.01.1900.

2.3.2 Zeitvarianter Modellansatz

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

2.4 Methodenentwicklung 1: neuartige Multimethodenansätze zur künftigen flächenhaften Erfassung der Morpho- und Sedimentdynamik

Die Art der verfügbaren Felddaten bestimmt die Güte der Eingangsparameter und die der numerischen Modellergebnisse also der Hydrodynamik und Morphologie. Modelle mit großen Raumskalen benötigen große Datensätze und Zeitreihensimulationen benötigen kontinuierliche Zeitseriendaten für die Modell-Kalibrierung und -validierung sowie deren Weiterentwicklung. Während großskalige Modelle mit grober Ortsdiskretisierung für den offenen Ozean ausreichend sind, können im Küstenbereich aufgrund der hohen durch topografische Strukturen geprägten Dynamik nur sehr hochauflösende Modelle genutzt werden. Um diesen Ansprüchen gerecht zu werden wurden in den Fokusgebieten Sedimentstrukturen hochauflösend erfasst um so Rückschlüsse auf langfristige sediment- und morphodynamische Prozesse ziehen zu können.

Ein zentraler Aspekt war daher lokal gültige Modellparameter auf ihre Übertragbarkeit auf die gesamte Deutsche Bucht hin zu überprüfen. Weiterhin erbrachten die Modelle Aussagen

über die großräumige und langzeitliche Veränderung der Morphodynamik in den lokalen Gebieten, welche dann auch für die Ausrichtung weitergehender Untersuchungen heran gezogen wurden.

2.4.1 Auswahl der Fokusgebiete

Die Fokusgebiete wurden nach ihrer Repräsentativität für typische Ablagerungsräume des gesamten Systems Deutsche Bucht ausgewählt. Abbildung 2-4 zeigt eine Übersichtskarte zur Lage der Fokusgebiete.

Fokusgebiet „Ästuare“

Die Flussmündungen von Elbe und Weser sowie die Jade-Rinne stellen innerhalb der inneren Deutschen Bucht wichtige Ablagerungsräume und Transportwege für Sedimente dar. Hier interagieren nicht nur die hydrodynamischen Krafteinwirkungen der offenen Nordsee wie Seegang (Wellen) und Gezeitenströmungen, sondern es kommen auch terrestrische Einflüsse wie der Abfluss von Oberwasser (Jade ausgenommen) und die damit verbundenen Auswirkungen auf das Sedimentationsgeschehen zum Tragen. Schließlich haben Jade, Weser und Elbe auch eine herausragende Bedeutung als Schifffahrtswege, was zahlreiche und weitreichende Beeinflussungen des Ablagerungsraums durch den Menschen zeigt und auch in Zukunft Folgen haben wird.

Die Betrachtungen in der Jade (**AufMod-G**, Senckenberg Institut) konzentrieren sich auf das vor Seegang geschütztere Gebiet bei Minsener Oog (Außen-Jade), das von subaquatischen Dünen geprägt ist. Grund hierfür war u.a. die Möglichkeit die zeitliche Veränderlichkeit der Gewässersohle, durch Hinzunahme von Fächerlotungen des WSA Wilhelmshaven zu erfassen. In der Weser reicht das Arbeitsgebiet von Bremen bis weit stromab von Bremerhaven und schließt damit den gesamten Bereich der ästuarinen Trübungszone ein. Im Elbe-Ästuar wurde der Bereich zwischen Hamburg und seewärts von Cuxhaven bearbeitet. Die Auswertungen konzentrieren sich auf den äußeren Mündungsabschnitt und die Verhältnisse im Bereich der Medemrinne. Elbe und Weser wurden durch **AufMod-F** bearbeitet.

Fokusgebiet „Watten“

Die Untersuchungsgebiete des Teilprojektes „Watten“ wurden unter Berücksichtigung der geologischen Entwicklungsgeschichte sowie der bekannten bzw. aus geologischen Befunden abgeleiteten Sedimentverbreitung ausgewählt. Dabei wird das Untersuchungsgebiet der Pieprinnen vor Büsum als repräsentativ für das Gebiet des Dithmarscher Wattenmeers von der Elbemündung im Süden bis zur Halbinsel Eiderstedt im Norden angesehen. In diesem Bereich liegen die präholozänen Sedimente so tief (Dittmer, 1952), (Ricklefs, et al., 2005), dass am heutigen Sedimenttransportgeschehen fast ausschließlich feinkörnige junge Ablagerungen („moderne Wattsedimente“) beteiligt sind. Im Gegensatz dazu sind die Rinnen der Norderhever in Nordfriesischen Wattenmeer zumindest partiell in ältere eiszeitliche Sedimente eingeschnitten (Ahrendt, 2006). Es ist davon auszugehen, dass hier das Sedimenttransportgeschehen durch diese älteren, meist gröberen Ablagerungen beeinflusst wird. Aufgrund der von Norden nach Süden abnehmenden Tiefenlage der Holozänbasis, wird die etwa in der Mitte gelegene Norderhever als charakteristisch für das gesamte Nordfriesische Wattenmeer angesehen.

Fokusgebiet „Vorstrand/Schelf“

Der hinsichtlich der Hydrodynamik hochenergetische Bereich westlich der Insel Sylt hat im Nordseeküstenraum in vielerlei Hinsicht eine überragende Bedeutung. Aus kleinräumigen Einzelstudien sowie durch die Programme „Sandbewegung im Deutschen Küstenraum“

(Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) , 1979), das Lagerstättenprojekt „Steine und Erden im Nordsee-Schelfbereich“ (Uffenrode, 1982) und das BMBF-Programm „Sedimentinventar“ (Zeiler, et al., 2000a) liegen Informationen verschiedener Auflösung über den sedimentologischen Aufbau vor. Flächendeckende Informationen über die Verteilung der Oberflächensedimente sind neben der Karte der *Sedimentverteilung in der Deutschen Bucht* (Nr. 2900) nach (Figge, 1981), im Folgenden kurz als „Figge-Karte“ bezeichnet, lokal ausschließlich aus einem groben Raster von Beprobungen mit dem Backengreifer bekannt (Köster, 1979). Diese Daten sind nicht in die Figge-Karte integriert. Für den nördlich der Elbe liegenden Bereich enden, mit Ausnahme der Figge-Karte von Osten kommend bei 7°50' östl. Länge (entspricht ~ -20 m SKN), fast alle frei verfügbaren Untersuchungen zu den Oberflächensedimenten. Die nur geringe Verfüllung der bis zu 20 m tiefen Sandentnahmestrichter westlich der Insel Sylt (Zeiler, et al., 2004) geben einen ersten Hinweis auf die geringe Verfügbarkeit mobiler Sande auf dem Schelfbereich „Sylter Außenriff“.

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, et al., 1987), (van de Meene, et al., 2000). Im Gegensatz zum Vorstrand/Schelf Gebiet vor Nordfriesland ist dieser Bereich durch eine ausreichende Verfügbarkeit von mobilem Sand gekennzeichnet.

2.4.2 Geowissenschaftlicher Kenntnisstand in den Fokusgebieten

Die Figge-Karte deckt trotz ihres Alters immer noch die Oberflächensedimentverteilung im Seegebiet der Deutschen Bucht am umfassendsten ab. Die Karte basiert dabei auf vielen punktuellen Messdaten, die zu unterschiedlichen Zeitpunkten erhoben wurden. Aussagen zur Sedimentdynamik lassen sich daraus nur schwerlich ableiten. Für einige Bereiche der Deutschen Bucht gibt es darüber hinaus Zeitreihen aus Bodenbeprobungen und hydroakustisch basierten Meeresbodenklassifizierungen (Bartholomä, 2006), (Diesing, et al., 2006b), (Diesing, et al., 2006a), (Werner, 2004), Daten zur Mächtigkeit der mobilen Decksande (Zeiler, et al., 2000a), (Ricklefs, et al., 2005) und Abschätzungen zu Transportraten (z. B. (Zeiler, et al., 2004) sowie detaillierte Aufnahmen der Sedimentverteilung und des sedimentologischen Aufbaus in Teilgebieten (Köster, 1979), (Tabat, 1979), (Uffenrode, 1982). Diese Informationen können für die Festlegung von repräsentativen Teilflächen zur Erfassung der Meeresbodendynamik herangezogen werden.

Informationen zur Oberflächensedimentverteilung in den Ästuaren sind bislang von unterschiedlichen Institutionen wie Behörden, Firmen und Universitäten erhoben worden, wobei meist nur Teilbereiche sedimentologisch untersucht wurden. Ergebnisse umfangreicherer Oberflächensedimentkartierungen im Weser-Ästuar finden sich zudem bei Schrottke (Schrottke, et al., 2005). Jüngere Untersuchungen in Weser und Ems mit akustischen Messgeräten und Probennahmen erfassten die Sedimentdynamik vor allem im Übergangsbereich Wassersäule und fester Sohle und haben aussagekräftige Zeitreihen hervorgebracht (Schrottke ((Schrottke, et al., 2005), (Schrottke, et al., 2006)).

Für die Wattgebiete liegen regional flächendeckende Daten zur Sedimentverteilung und Sedimentbeschaffenheit vor. Dies gilt z.B. für die Watteinzugsgebiete der Inseln Langeoog und Spiekeroog, für die Untersuchungsergebnisse über einen Zeitraum von ca. 30 Jahren (Chang, et al., 2006) existieren. Flächendeckende Informationen liegen ebenfalls für größere

Bereiche des Intertidals im Nordfriesischen ((Bayerle, et al., 1998), (Berner, et al., 1986), (Dechend, 1950)) und Dithmarscher Wattenmeer ((Gast, et al., 1984), (Reimers, 2003)) vor. Informationen zu subtidalen Sedimenten finden sich für die nordfriesischen Gezeitenrinnen bei Ahrendt (Ahrendt, 2006) und Dechend (Dechend, 1950) sowie für kleinere Teilbereiche bei (Nommensen, 1982). Die Sedimente im System der Pieprinnen im Dithmarscher Wattenmeer werden in grober Klassifikation bei Ricklefs (Ricklefs, et al., 2005) und Poerbandono (Poerbandono, et al., 2005) beschrieben.

Die rezente Verteilung der Oberflächensedimente auf dem Nordseeschelf wird durch verschiedene Faktoren bestimmt. Neben den hydrologischen Kräften von tide- und welleninduzierten Strömungen sind es die teilweise bis dicht unter die Oberfläche reichenden glazialen Ablagerungen, die, wie z.B. am Borkum Riffgrund, am Sylter Außenriff oder östlich von Helgoland, teilweise sogar an der Oberfläche ausstreichen. Sie stellen dort das Material zur Restsedimentbildung bereit. Im Bereich nördlich des Elbe-Urstromtals reichen zudem fluvio-glaziale Ablagerungen des ausgehenden Weichselglazials bis dicht an die Oberfläche ((Köster, 1979), (Zeiler, et al., 2000a), (Zeiler, et al., 2000b)). Weite Bereiche des Schelfs nördlich der Elbe werden als Sedimentmangelgebiet ausgewiesen, während vor der ostfriesischen Küste Akkumulation vorherrscht. Vor der nordfriesischen Küste weist der Bereich zwischen 10 – 15 m Wassertiefe mit 0,4 – 1,5 m die geringsten Mächtigkeiten junger, nordseezeitlicher (jünger als 7.500 vor heute), mariner Sande auf. Sowohl in den flacheren als auch in den tieferen Bereichen wird eine etwas mächtigere Sandauflage angenommen. Über die Dynamik dieser Ablagerungen gibt es bisher nur geringe Kenntnisse. Diese stammen aus a) Wiederholungsvermessungen ((Diesing, et al., 2006a), (Diesing, et al., 2006b), (Werner, 2004)) und b) aus der Sedimentanalyse der nur äußerst geringen Verfüllung von Sandentnahmetrichtern westlich der Insel Sylt (Zeiler, et al., 2004).

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). Zungenriffe wurden bereits mehrfach untersucht ((z.B. (Chowdhuri, et al., 1978), (Antia, 1993), (Flemming, et al., 1994) und (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).

2.4.3 Vorgehensweise zur flächenhaften Erfassung der Sedimentbeschaffenheit

Zur Erreichung der Projektziele wurde ein multimethodischer Forschungsansatz gewählt, der über die Projektlaufzeit hinweg weiter entwickelt wurde. Hierbei wurde bereits zu Beginn des Projektes die methodische Herangehensweise der Felddatenerfassung und –Analyse mit den Projektpartnern abgestimmt und soweit möglich vereinheitlicht. Folgende Geräte wurden bei den Geländearbeiten eingesetzt:

- verschiedene Seitensichtsonare (SSS) zur flächenhaften Erfassung mikro- und makroskaliger Sohlrauhigkeiten, über die Aussagen zur Beschaffenheit und Verteilung von Oberflächensedimenten sowie über Sohlformen möglich werden
- Verschiedene Subbottom Profiler (SBP) zur Erkundung des geologisch-sedimentologischen Aufbaus der Gewässersohle in den oberen Metern

- Fächerecholot (MBES) zur dreidimensionalen Erfassung der Topographie der Gewässersohle
- Einstrahlecholote (SBES) mit nachgeschalteten Sedimentklassifizierungssystemen Quester Tangent (QTC) oder RoxAnn zur Bestimmung der Wassertiefe und der Rückstreuungseigenschaften der Gewässersohle
- Conductivity-Temperature-Depth-Sonden (CTD) zur Ermittlung der physikalischen Eigenschaften des Wassers
- Backen- oder Shipek Greifer- (BG) bzw. Großkasten-Greifer (GK) zur Entnahme von Sedimentproben
- Vibro-Corer (VC) VK300 und VC600 zur Entnahme von Sedimentkernen bis zu 6 m Länge
- Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP) zur profilierenden Erfassung von Strömungsgeschwindigkeiten und -richtungen, sowie zur Abschätzung von Schwebstoffkonzentrationen
- Laser In-Situ Scattering & Transmissometry System (LISST) zur in situ Messung von Partikelgrößen suspendierter Sedimente,
- Unterwasservideokamera (UV) zur visuellen Beobachtung des Meeresbodens zwecks Abgleich mit den SSS-Aufnahmen
- Horizontaler Wasserschöpfer (HWS) zur Entnahme von Schwebstoffproben zur anschließenden Konzentrationsbestimmung mittels Vakuumfiltration.

Tabelle 2-3 und Tabelle 2-4 listet die in den Untersuchungsräumen von **AufMod-F** und **AufMod-G** eingesetzten Geräte und Schiffe auf. Sie gibt zudem einen Überblick über den zeitlichen und räumlichen Umfang der Feldarbeiten.

Tabelle 2-3: Übersicht über die im Gesamtzeitraum durchgeführten schiffsgestützten Ausfahrten für **AufMod-F**

Ausfahrten	Ästuare	Watten	Schelf / Vorstrand
Schiffe	"Littorina", "Südfall"	"Südfall", "Seston"	"Littorina", "Alkor"
Schiffstage	69	72	63
Verwendete Geräte	SSS, MBES, SES, CTD, BG, ADCP	SSS, SBP, BES, BG, CTD	SSS, MBES, SBP, BG, CTD, SBP, SES, Boomer, VC, KG
Länge [sm] aller Messprofile	2383	967	3200
Sedimentproben [n]	1055	483	176
Großkastengreifer [n]	-	-	25
Sedimentkerne [n]	-	-	19
Beprobungsgebiet [km ²]	160,8	141	535

Der Einsatz der in Tabelle 2-3 und Tabelle 2-4 aufgelisteten Messverfahren, mit denen synoptisch Bathymetrie, Sedimentbeschaffenheit und Sedimentaufbau des oberen Meeresbodens teilweise flächendeckend erfasst werden, ist heute Standard (Kenny, et al., 2002), (Hamilton, 2005), (Wille, 2005), (Boyed, et al., 2007), (Blondel, 2006) und (Blondel, 2009). Die Messtechniken und Interpretationsansätze werden aber weiterhin optimiert (vgl. dazu

das BMBF-Forschungsvorhaben „WIMO – wissenschaftliche Monitoring-Konzepte für die Deutsche Bucht“, LLUR-Vorhaben „Seegrundklassifizierung“ für die Ostsee).

Tabelle 2-4: Übersicht über die Messkampagnen im **AufMod-G** Projekt mit FS Senckenberg

Jahr	Datum	Gebiet	Mess-tage	Stand by Tage	Tage gesamt	SSS-Transekt-längen	MBES-transektlängen	Anzahl Sediment-proben	SBP-Transekt-längen
2010	08 - 18 FEB	Minsener Oog	4	7	11	~ 30 km	~ 70 km	36	-
2010	01 - 05 MAR	Spiekeroog Minsener Oog	4	1	5	~ 85 km ~ 10 km	~ 85 km ~ 10 km	-	-
2010	27 SEP - 01 OCT	Spiekeroog	4	1	5	~ 45 km	~ 110 km	27	-
2010	18 - 27 OCT	Minsener Oog	8	2	10	~ 85 km	~ 220 km	51	-
2011	18 - 21 APR	Minsener Oog	4	0	4	~ 75 km	~ 180 km	31	-
2011	14 - 16 JUN	Spiekeroog Minsener Oog	3	0	3	~ 105 km -	~ 130 km ~ 25 km	-	-
2011	16 - 24 AUG	Ostfriesische Inseln	6	1	7	-	-	-	~ 285 km
2011	26 SEP - 07 OCT	Minsener Oog	7	3	10	~ 80 km	~ 140 km	-	-
2012	26 - 30 MAR	Spiekeroog	5	0	5	~ 185 km	~ 185 km	-	-
2012	02 - 05 APR	Spiekeroog Minsener Oog	4	0	4	- ~ 70 km	~ 50 km ~ 125 km	-	-
2012	23 - 27 APR	Spiekeroog	5	0	5	~ 180 km	~ 120 km	-	-
	Summe der Kampagnen		54	15	69	~ 950 km	~ 1450 km	145	~ 285 km

Mit diesen Messmethoden werden Daten generiert, die neue und äußerst detaillierte Einblicke in die Struktur des Meeresbodens und vor allem die Sedimentbeschaffenheit erlauben ((Diesing, et al., 2006b), (Schwarzer, et al., 2003), (Schwarzer, et al., 2004), (Feldens, et al., 2010), (Feldens, et al., 2012) und viele andere) Aussagen zur rezenten Sedimentdynamik zulassen ((Bartholomä, 2006), (Chang, et al., 2006), (Zeiler, et al., 2000a)) und in Kombination mit Sedimentklassifizierungssystemen und Unterwasser-Videoaufnahmen in jüngster Zeit zur Kartierung von Habitaten und benthischen Lebensgemeinschaften genutzt werden ((Cochrane, et al., 2002), (Ehrhold, et al., 2006), (Rooper, et al., 2007), (Degraer, et al., 2008a) + (Degraer, et al., 2008b), (Le Bas, et al., 2009), (Van Overmeeren, et al., 2009), (Van Rein, et al., 2011)).

Durch den Vergleich mit älteren Daten besteht zudem die Möglichkeit, mittels Anwendung dieser Techniken die Stabilität von Sedimentverteilungsmustern auf einer Zeitskala von mehreren Dekaden zu vergleichen und eventuelle, mesoskalige Veränderungen, aber auch Stabilitäten herauszuarbeiten ((Diesing, et al., 2006a), (Van Rein, et al., 2011)).

Zur Erfassung der Sedimentverteilungsmuster wurden in allen Gebieten und von allen beteiligten Arbeitsgruppen gleichermaßen Seitensichtsonare eingesetzt. Diese Geräte liefern in erster Linie ein Abbild der Ausbildung der Meeresbodenoberfläche, aus der Intensität des zurückgestreuten akustischen Signals kann auf die Zusammensetzung der vorkommenden Sedimente geschlossen werden. Die diesbezüglich zugrundeliegenden Zusammenhänge ebenso wie ausführliche Informationen zur Funktionsweise von Seitensichtsonaren und zum weiteren Umgang mit Sonardaten werden ausführlich in (Lurton, 2002), (Wille, 2005) oder (Blondel, 2009) dargelegt und sollen daher an dieser Stelle nicht weiter ausgeführt werden.

Klar formuliert werden soll hingegen die Tatsache, dass Analyse und Bewertung der Sonar-aufzeichnungen im Hinblick auf eine sedimentologische Differenzierung der Oberflächen-sedimente in allen Arbeitsgebieten und von allen Arbeitsgruppen auf der Basis von Expertenwissen durchgeführt worden ist. Hierbei gehen neben der eigentlichen Intensitätsverteilung der Rückstreusignale eine Vielzahl weiterer Informationen wie geologische Gegebenheiten, Verbreitung von Sohlformen, Vorkommen von Schichtausbissen, Wassertiefe, Ergebnisse zusätzlicher Messungen, Videoaufnahmen, Fotos der Sedimente etc. in die Betrachtung ein. Neben dieser manuellen Sedimentklassifizierung sind in einigen Fällen, dort wo relativ eindeutige Rückstreuverteilungen vorkamen, zusätzlich auf statistischen Methoden basierte Analyseverfahren der Rückstreumuster zur Sedimentklassifizierung zum Einsatz gekommen.

Die Verifizierung aller Klassifikationsergebnisse sowie eine Zuordnung von Korngrößeninformationen zu den ausgewiesenen Klassen erfolgten mit Hilfe von Kornverteilungsdaten gezielt entnommener Sedimentproben. Die Kornverteilung der beprobten Sedimente der verschiedenen Institute der Universität, wurde durch Trockensiebung (63 µm – 6300 µm) mit 1/4 Phi gestuften Sieben nach ASTM-Standard bestimmt. Proben mit Feinanteilen (< 63 µm) von mehr als etwa 30 % wurden mittels Laserbeugungsverfahren, das für einen Korngrößenbereich von 0,04 bis 2000 µm eingesetzt werden kann, analysiert. Die Proben des Instituts Senckenberg am Meer wurden granulometrisch aufbereitet, die Kiesfraktion mechanisch gesiebt, die Sandfraktion mit der MacroGranometer Sinkgeschwindigkeitsröhre und die Schlickfraktion mit dem Sedigraphen analysiert. Die Darstellung der Ergebnisse erfolgte ebenfalls in 1/4 Phi-Schritten.

Zur Klassifikation der Sedimente gemäß ihrer Korngrößenverteilung wurde die Skala von Udden-Wentworth verwandt. Zur Bestimmung des Anteils organischer Komponenten wurden an verschiedenen Proben Messungen des Glühverlustes (in Anlehnung an DIN 18128) bzw. des tatsächlichen Anteils an partikulärem organischem Kohlenstoff durchgeführt.

Zudem wurden vor allem im Fokusgebiet „Ästuar“ Porositätsanalysen durchgeführt. Kohäsive Feinsedimente wurden mit einer Spritze beprobt, bei sandigem Material kam ein dünnwandiger 100 ml-Nunc-Becher zum Einsatz. Der Becherboden war zum besseren Entweichen der Luft angebohrt. Die Proben wurden getrocknet und bei Bedarf gemörsert. Aus dem bekannten Probenvolumen und dem Wassergehalt wurde die Porosität errechnet, Wassersättigung des Probenmaterials vorausgesetzt. Die Salinität des Porenwassers, wenn vorhanden, konnte nicht berücksichtigt werden. Bei der genutzten Methodik können, wie auch bei anderen Verfahren zur Bestimmung der Porosität, Unschärfen in den Messwerten auftreten. Insbesondere bei der Beprobung sandiger Sedimente lässt sich eine entnahmebedingte Veränderung des Porenwasservolumens bzw. des Lagerungsgefüges nicht immer verhindern, was meist zu einer Erhöhung der realen Porositätswerte führt.

In allen Arbeitsgebieten ist zudem versucht worden, die Mächtigkeit der sogenannten mobilen Deckschicht durch entsprechende Echolotsysteme und Sedimentkernentnahmen zu ermitteln.

In den Gebieten nördlich von Spiekeroog und in der Jaderinne bei Minsener Oog (**AufMod-G**) wurden Wiederholungsmessungen durchgeführt. Die für diese Gebiete generierten digitalen Geländemodelle basieren auf dem Vergleich neuerer, selbst durchgeführter, hochauflösender Fächerlot-Tiefenmessungen, kombiniert mit älteren Einstrahl-Echolotvermessungen vorausgegangener Projekte. Zu den eigenen akustischen Daten wurden zwei ältere Fächer-echolot-Befahrungen vor Spiekeroog und 37 Befahrungen durch das WSA Wilhelmshaven querab der Minsener Oog zur Beurteilung der morphologischen Veränderungen hinzuge-

zogen. Anhand der Veränderungen wurden Sedimentbilanzen, Transportrichtungen und deren Dynamik ermittelt.

Die Aufnahme von Seitensichtsonardaten und deren Analyse, die Entnahme von Sedimentproben einschließlich ihrer Auswertung im Labor sowie flachseismische Messungen stellen in **AufMod** somit den „größten gemeinsamen Nenner“ der Forschungsarbeiten der sedimentologischen Arbeitsgruppen dar. Darüber hinaus sind aber auch eine ganze Reihe weiterer Verfahren (z.B. Messung suspendierter Sedimente, Strömungsmessungen, Radiokarbon-datierungen etc.) mit dem Ziel zum Einsatz gekommen, die Gegebenheiten eines speziellen Ablagerungsraums bestmöglich zu detektieren und beschreiben zu können. Die wesentlichen Ergebnisse aus den einzelnen Fokusgebieten werden in Kapitel 3.1 wiedergegeben.

Überführung der Kartierungen in numerische Datenformate

Zur Überführung der Kartiererergebnisse in zahlencodierte Datensätze wurden Gebiete mit gleichen oder sehr ähnlichen Rückstreumustern als Areale mit hinreichend ähnlichen Sedimenteigenschaften gewertet und durch die Ausweisung von Polygonen voneinander abgegrenzt. Mit Hilfe der Informationen aus den Sedimentproben wurden diesen Polygonen anschließend Sedimentklassen zugeordnet. Die Belegung der einzelnen Polygone mit beschreibenden Sedimentparametern basierte auf den in dem jeweiligen Polygon erhobenen Probeninformationen. Bei Flächen, die durch mehr als einer Probe beschrieben werden können, wurde das arithmetische Mittel aus den vorhandenen Proben gebildet. Auf Flächen, denen keine Sedimentprobe zugeordnet ist, wurde der Mittelwert aus allen repräsentativen Einzelproben der gleichen Sediment / Rückstreckklasse errechnet und zugewiesen oder mit Werten gleichartiger Polygone belegt.

Die Polygone wurden durch folgende Sedimentparameter beschrieben: Prozentuale Anteile $< 63 \mu\text{m}$ (Ton-Schluff), $> 63 - 2000 \mu\text{m}$ (Sand), $> 2000 \mu\text{m}$ (\geq Kies) sowie dort, wo es relevant war, auch Schill $> 2\text{mm}$. Die Verteilung der Sandfraktion wurde durch die Angabe der Gewichtsanteile der einzelnen Siebstufen (gemittelt bei mehr als einer Probe pro Polygon) sowie durch die berechneten Zentralmaße Haupt-Modus und Medianwert D_{50} beschrieben. Wo Werte des Glühverlustes und der Porosität vorhanden waren, wurden auch diese zugeordnet. Angaben zur Standardabweichung sind, wo es möglich ist, angegeben.

Weiterhin wurde jedem Polygon ein Wert zugeordnet, der grob die potenzielle Mobilität der entsprechenden Ablagerung beschreibt. Schließlich gab es Informationen zum Vorhandensein von Bodenstrukturen (z.B. Kleikanten) bzw. Sohlformen wie Rippeln, Dünen oder auch Sorted Bedforms ((Ferrini, et al., 2005), (Goff, et al., 2005), (Diesing, et al., 2006a), (Coco, et al., 2007), (Holland, et al., 2008)). Die derart erhobenen Datensätze wurden in standardisierter Weise in das vernetzte Datenbanksystem Shelf Geo-Explorer (SGE) überführt und stehen damit als "Datenprodukte" zukünftig weiteren Nutzern zur Verfügung (zum Aufbau der Daten s. Kapitel 3.4).

Eine große Herausforderung in **AufMod** bestand darin, die Ergebnisse der Seitensichtsonar Kartierung für die Verarbeitung in numerischen Modellen aufzubereiten. Die gängige Praxis in der marinen Geologie ist die zusammenhängende Interpretation von Sedimentansprache, Laborergebnissen und der flächenhaften Rückstreuungseigenschaften. Das Ergebnis hat beschreibenden Charakter. Die Bildung des arithmetischen Mittels der Kornverteilungen stellte einen ersten Ansatz dar die Daten fachübergreifend nutzbar zu machen.

2.4.4 Erfassung von Bodenformen

Das Verständnis und 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 Simulations-szenarien voraus. Neben der Bathymetrie und Sedimentzusammensetzung ist die korrekte Vorgabe der Bodenrauigkeiten 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 wurden deshalb empirische Beziehungen unterschiedlicher Komplexität und Datengrundlage verwendet. Dabei wurden 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 Experimenten im Strömungskanal und nur auf wenigen Felddaten.

Vorläufige Untersuchungen in Tidekanälen an der deutschen und dänischen Küste ((Ernstsen, et al., 2010), (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 kleinere (Dünen) und Kleinstformen (Rippel) widerspricht schon der Gültigkeit einer einfachen Gleichgewichtsbeziehung zwischen Strömung und Bodenform.

Durch die Verschneidung und gemeinsame Analyse flächenhafter hochaufgelöster bathymetrischer Messdaten mit sedimentologischen Daten sowie mit zeitaufgelösten und repräsentativen hydrodynamischen Informationen wurde ein vertieftes Verständnis für das Auftreten und die Entwicklung von Bodenformen möglich. Damit wurde die quantitative Evaluation bestehender empirischer Gleichungen zur Prognose von Bodenformen in Modellverfahren durch die Analyse der Wirkung auf die simulierte Hydro- und Sedimentdynamik angestrebt.

Die Datensätze (Tripelwerte) aus Vermessungen wurden mit der Bed Elevation Profile (BEP) Methode ausgewertet (Ernstsen, et al., 2010). Diese Methode ermittelt individuelle strömungsnormale Bodenformen aus Digitalen Geländemodellen (DGM). Dabei werden Höhenprofile in Strömungsrichtung definiert und in mehreren Stufen ausgewertet. Diese Methode wurde auf alle verfügbaren bathymetrischen Daten angewendet. Höhenprofile wurden im seitlichen Abstand von 10 - 20 m gewählt. Ergebnisdatensätze von Längen, Höhen, Steilheiten, etc. wurden als 20 m Rasterdaten exportiert und den Projektpartnern zur Verfügung gestellt (Abbildung 2-9).

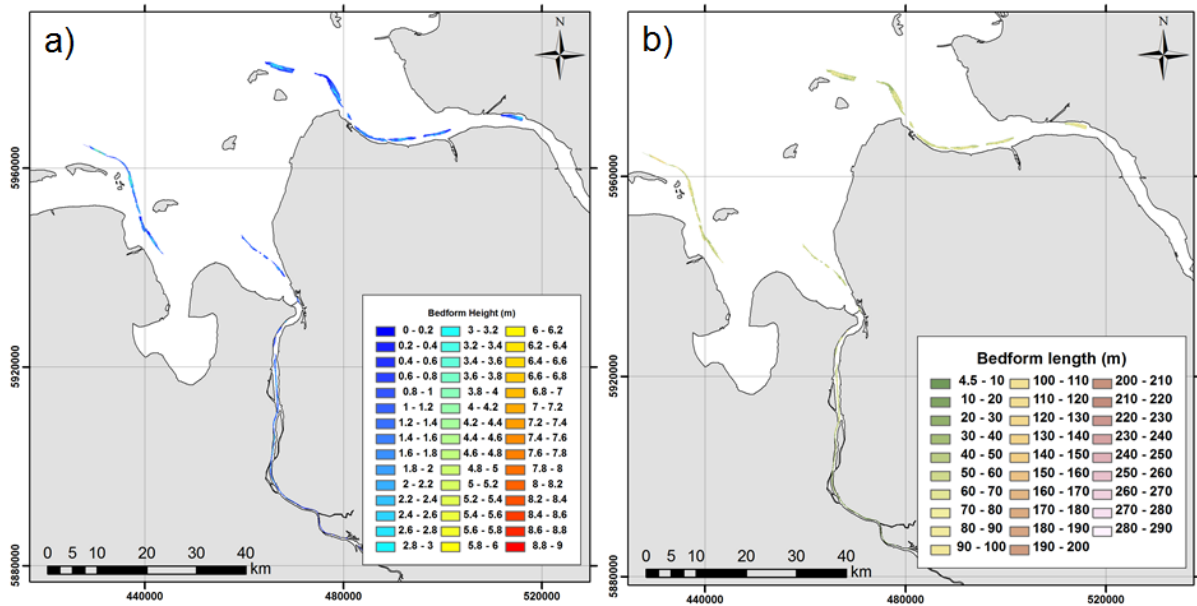


Abbildung 2-9: Beispiel für die Verteilung der extrahierten Bodenformparameter: a) Bodenformhöhen, b) Bodenformlängen im Gesamtgebiet

2.5 Methodenentwicklung 2: der numerische Modellbaukasten

Als numerischer Modellbaukasten wird hier der Einsatz unterschiedlicher Modellsysteme verstanden. Im Sinne eines Multi-Modell-Ansatzes wurde die Variabilität der Simulationsergebnisse durch unterschiedliche physikalische Approximationen und numerischer Umsetzungen ermittelt → weitere Einzelheiten werden im Kapitel 4.1 dokumentiert.

Neben den prozessbasierten Modellen wurden im Funktionalen Bodenmodell auch daten- und prozessbasierte Modelle eingesetzt.

2.5.1 Eingesetzte mathematische Modelle

Im Rahmen von **AufMod** wurden prozessbasierte numerische Modellkerne eingesetzt:

[Hydrodynamik \(HN\)](#) / [Seegang \(SG\)](#) / [Morphodynamik \(MD\)](#):

- | | | |
|------------------|---------|---------------|
| • UnTRIM | Unk | SediMorph |
| • Delft3D (FLOW) | SWAN | Delft3D (MOR) |
| • MARINA | MARINA | MARINA |
| • TELEMAC | TOMAWAC | SISYPHE |

Als datenbasiertes Hindcast-Modellsystem wurde DASIMO verwendet. Eine ausführliche Beschreibung der Modellverfahren erfolgt in Kapitel 4.1.1.

2.5.2 Modellvalidierung

Morphodynamische Simulationsmodelle beschreiben die Veränderung der Lage des Gewässerbodens und die zugehörigen Transportvorgänge. Zusätzlich liefern diese numerischen Modelle auch häufig Informationen über Veränderungen der Zusammensetzung und Ausprägung des Gewässerbodens.

Die Beurteilung der Güte der (morphodynamischen) Simulationsmodelle, das heißt der Grad der Übereinstimmung der berechneten Ergebnisse mit den Prozessen in der Natur, wird anhand von Vergleichen mit Naturmessungen erbracht und ist immer abhängig von der Problemstellung, zu deren Beantwortung diese herangezogen werden sollen. Dieser Prozess der Modellvalidierung ist der letzte Schritt im Prozess des Modellaufbaus.

Die Sedimenttransportvorgänge und die morphologischen Veränderungen des Gewässerbodens werden im Wesentlichen durch die hydrodynamischen Kräfte auf den Boden verursacht. Die Variabilität der Hydrodynamik wird ihrerseits wiederum ganz wesentlich durch die Meteorologie beeinflusst. Aus diesem Grunde wurde eine stufenweise Validierung der Modelle, beginnend bei der Analyse der Meteorologischen Randwerte über die hydrodynamischen Modellkomponenten bis hin zu den Transport- und Umlagerungsprozessen der eigentlichen morphodynamischen Modellkomponenten durchgeführt.

3 Ergebnisse aus den Felduntersuchungen sowie der datenbasierten Modelle und deren Bewertung

3.1 Hochauflösende Sedimentkartierung in den Fokusgebieten

In Kapitel 2.4.3 wurde die Vorgehensweise zur flächenhaften Erfassung der Sedimentbeschaffenheit in den AufMod-Fokusgebieten beschrieben. Im Folgenden werden die Ergebnisse der Kartierungen vorgestellt.

3.1.1 Ergebnisse der sedimentologischen Auswertungen in den Ästuaren von Elbe und Weser

Die Gewässersohlen der großen Ästuare entlang der Deutschen Bucht unterliegen einer nahezu ständigen Energiebeeinflussung durch Tide und Oberwasserabfluss. Die Oberflächensedimentbedeckung zum Zeitpunkt einer Datenerfassung spiegelt somit jeweils eine Momentaufnahme wider. Insbesondere in den Bereichen, innerhalb derer die Trübungszone auftritt, kann sich die Oberflächensedimentzusammensetzung kurzzeitig gravierend ändern. So ist es beispielsweise durchaus möglich, dass die meist mittelsandigen Sohlsedimente, die insbesondere in den Fahrrinnen von Elbe und Weser anzutreffen sind, im Zuge stauwasserbedingter Schlickablagerungen komplett überdeckt werden (vgl. (Schrottke, et al., 2006)). Auch wenn mit wiederkehrendem Tidenstrom und damit einsetzenden Resuspensionsprozessen ein Großteil dieser meist fluiden Schlicke wieder abtransportiert wird, so können die Überreste dieser Ablagerungen die Oberflächensedimentzusammensetzung verändern. Wiederholungsmessungen zu verschiedenen Tide- und Oberwassersituationen sind damit notwendig gewesen, um Informationen zur Beständigkeit der jeweils angetroffenen Ablagerungsverhältnisse zu erhalten.

Im Zuge der durchgeführten Wiederholungsaufnahmen zeigte sich auch, dass das häufige Vorkommen sogenannter Schlickgerölle auf der Sedimentoberfläche und in der Sedimentmatrix als durchaus typisch auch für den Ablagerungsraum bezeichnet werden kann (vgl. Abbildung 3-1). Die Präsenz von Schlickgeröllen im Weser-Ästuar wurde bereits bei Schrottke (Schrottke, et al., 2006) erwähnt.

Schlickgerölle bestehen aus kohäsiven Feinsedimenten, darunter schwach bis stark konsolidierte Schlicke, wie Klei, sowie Geschiebemergel oder organogene Sedimente wie Torf oder Mudde. Nach Reineck (Reineck, 1984) entstehen Schlickgerölle in humiden, marinen Bereichen in Folge lateraler Erosion in Prielen oder im Zuge von Kolkbildungen auf Flächen. Danach werden kantige Bruchstücke aus dem Schichtverband herausgelöst und bei Verlagerung als Sohlfracht kantengerundet.



Abbildung 3-1: Fotos von Greiferproben aus dem Elbe-Ästuar. Die feinsandige Matrix ist unterschiedlich dicht von Schlickgeröllen überlagert bzw. durchsetzt. Auf dem Foto rechts wird zudem exemplarisch auf Schlickgerölle verwiesen, die sich insbesondere durch ihre Konsistenz (Typ 1: hart, Typ2: weich) und demnach auch durch ihre Materialherkunft unterscheiden

Je nach Konsolidierungsgrad und Materialherkunft können die in den Untersuchungsgebieten angetroffenen Schlickgerölle in zwei Typklassen eingeteilt werden. Typ 1 umfasst jene aus stark verfestigtem Material (konsolidiertem Schlick, Klei, Geschiebemergel, Torf, Mudde), während schwach konsolidierte Feinsedimente, die aus der Aufarbeitung kürzlich gebildeter Schlickablagerungen stammen, dem Typ 2 zugeordnet werden (Abbildung 3-1). Schlickgerölle des Typs 2 können dabei derart weich sein, dass diese bei einer Greiferbeprobung nach dem Hieven des Greifers und dem Abfließen des überstehenden Wassers auf der Sedimentoberfläche zerfließen.

In den Untersuchungsgebieten wurden Schlickgerölle oft in großen Mengen angetroffen, so dass das Oberflächensediment in den Greiferproben streng genommen als Konglomerat mit sandiger Matrix hätte angesprochen werden müssen. Sie bilden teils eine nahezu geschlossene Deckschicht, so dass davon auszugehen ist, dass der Abtransport des darunter befindlichen meist sandigen Sediments dadurch verzögert wird. Es ist auch davon auszugehen, dass Schlickgerölle die Sohlrauigkeit maßgeblich verändern.

Für detailliertere Aussagen zum regionalen Vorkommen und zum prozentualen Bedeckungsgrad wurden Fotos von Greiferproben mittels softwaregestützter Bildanalyse ausgewertet und die Ergebnisse visualisiert, wie beispielhaft in Abbildung 3-2 und Abbildung 3-3 gezeigt.

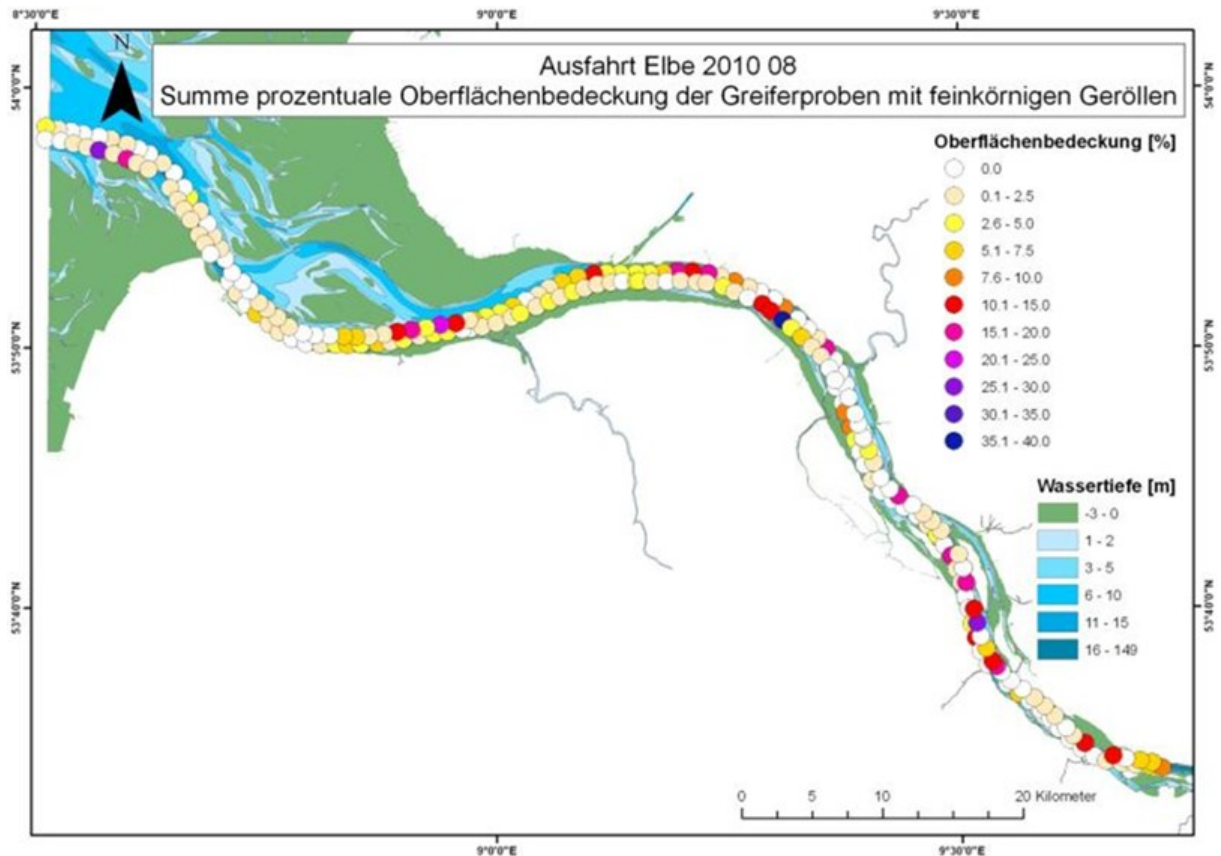


Abbildung 3-2: Prozentuale Bedeckung der Sedimentoberfläche mit Schlickgeröllen an den Probenlokationen entlang des Elbe-Ästuars, exemplarisch gezeigt für die Situation im August 2010

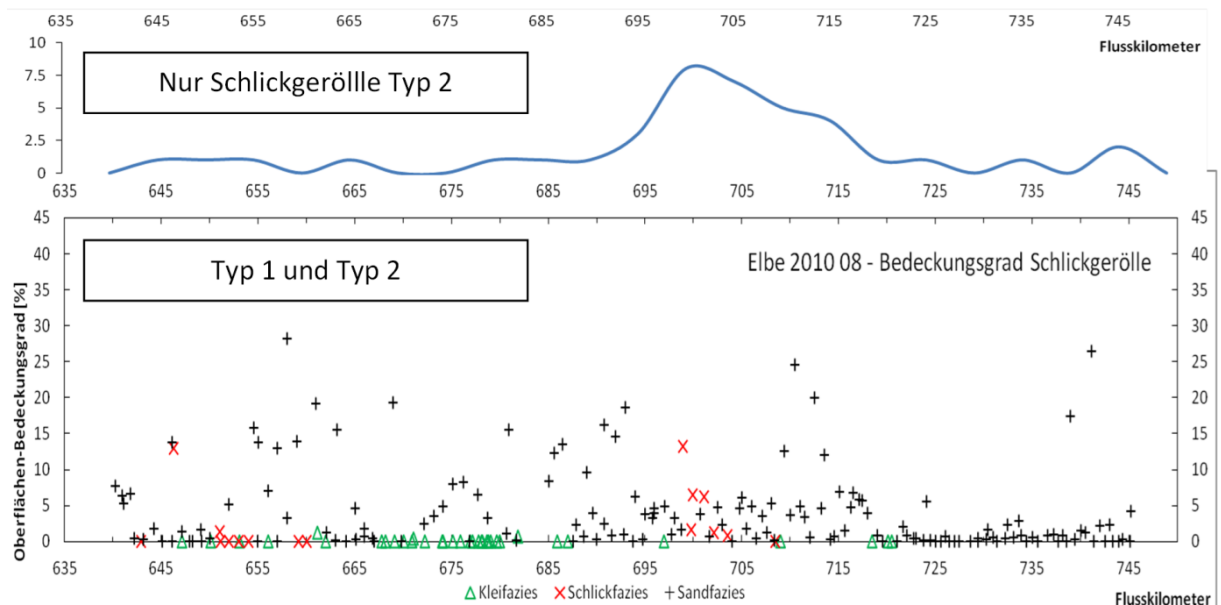


Abbildung 3-3: Prozentuale Bedeckung der Gewässersohle mit Schlickgeröllen entlang des Elbe-Ästuars im August 2010 mit Ausweisung der Typklasse 1 (obere Grafik) sowie der Zuweisung des Matrixtyps (untere Grafik)

Aus den Daten kann entnommen werden, dass Schlickgerölle in den untersuchten Gewässerabschnitten großflächig auftreten, wobei der Bedeckungsgrad beispielsweise im Elbe-Ästuar stromab des Flusskilometers 720 deutlich abnimmt. Der Bedeckungsgrad in Bereichen mit anstehendem Klei (Abbildung 3-3, „Kleifazies“) ist ebenfalls gering, woraus sich ableiten lässt, dass das anstehende Sediment zwar als Materialquelle fungiert, gleichzeitig

aber nicht auch Depositionsraum für Schlickgerölle ist. Werden die Vorkommen der Schlickgerölle nach Typklassen verglichen, so fällt auf, dass Schlickgerölle vom Typ 2 vornehmlich auf den Bereich der Trübungszone beschränkt sind. Es kann davon ausgegangen werden, dass sie dort generiert werden, da ein Transport über weitere Entfernungen auf Grund ihrer Konsistenz auszuschließen ist.

Auf Basis dieser neuen Erkenntnisse bleibt zu überdenken, inwieweit Schlickgerölle, die bislang in den Modellsimulationen keine Berücksichtigung fanden zukünftig einbezogen werden sollten.

Insbesondere in Ästuaren kann es bei dem Einsatz von Seitensichtsonaren, die zur Erstellung flächendeckender Oberflächensedimentkartierungen verwendet wurden (vgl. Kapitel 2.4.3), zur Beeinflussung der Datenqualität durch äußere Umstände kommen. Hierbei seien die zeitweilig komplexe Wassermassenschichtung durch Dichteunterschiede, die hohe Schwebstoffdichte in der Wassersäule, die zeitweilige Präsenz von Flüssigschlickablagerungen sowie das hohe Verkehrsaufkommen, das Daten-Artefakte z.B. durch Schraubwasser verursacht, genannt. Auch das Schleppen des SSS-Fisches mit dem bzw. gegen den Strom beeinflusst insbesondere die Vergleichbarkeit der Aufnahmen. Hinzu kommt, dass das hohe Verkehrsaufkommen auf den intensiv als Wasserstraßen genutzten Ästuaren im Zusammenspiel mit der Tide, eine Umsetzung der geplanten Messprofile praktisch unmöglich macht. Flächendeckende Datenerhebungen ließen sich so nicht überall realisieren. Bereiche, die größere Datenlücken aufweisen, wurden in den Kartierungen ausgespart. Interpoliert wurde nur dann über kurze Strecken, wenn sich die Wassertiefe nicht geändert hatte und auch sonst nichts dafür sprach, dass sich die Oberflächensedimentcharakteristik in den betreffenden Bereichen maßgeblich geändert hatte. Schließlich sei angemerkt, dass selbst bei optimalen Aufnahmebedingungen nicht immer alle Sedimentgrenzen auf SSS-Aufzeichnungen dargestellt sind, insbesondere bei Präsenz von „fließenden“ Sedimentänderungen. In solchen Fällen wurden Polygongrenzen geradlinig durch die Übergangsbereiche gelegt.

Wie in Kapitel 2.4.3 ausgeführt, wurden Sedimentparameter (u.a. Korngröße, Porosität) der Proben, die innerhalb der, auf Basis der SSS-Daten auskartierten, Polygone liegen, zu deren detaillierten Dokumentation herangezogen. Teils repräsentieren die Sedimentproben das zugehörige Polygon jedoch nicht z.B., wenn großflächig anstehende Kleiablagerungen partiell von Sandschleiern bedeckt waren, die Sedimentprobe jedoch nur Sand enthielt. In einem solchen Fall wurden Sedimentparameter benachbarter Polygone mit gleicher Sedimentbeschaffenheit oder aber Mittelwerte genutzt. Oft ließen sich hoch konsolidierte Feinsedimente mittels Greifer nicht erfassen. Wenn nicht eindeutig feststellbar war, ob es sich um Geschiebelehm, Klei, oder stark verfestigten Schlick handelte, wurde es als „konsolidierte Sohl-oberfläche“ ausgewiesen.

Zum Sedimenttransport im Gebiet der Medemrinne (Elbe)

Die Ergebnispräsentation in Form einer aus Daten verschiedener Ausfahrten erstellten Sedimentkarte soll für das Elbe-Ästuar der Übersicht halber auf den Abschnitt bei Cuxhaven, insbesondere der Medemrinne beschränkt werden (vgl. Abbildung 3-5). In der Medemrinne setzt sich die Sedimentoberfläche aus Fein- und Mittelsanden zusammen. Insbesondere im östlichen Rinnenabschnitt der mittelsandigen Bereiche prägen Dezimeter hohe, NW gerichtete subaquatische Dünen die Morphologie. Im zentralen und westlichen Rinnenbereich haben die Sedimenttransportkörper hingegen keine eindeutige Ausrichtung, die Dünenkämme verlaufen jedoch auch hier quer zum Rinne.

Die Sedimente im Hauptfahrwasser zeigen eine höhere Variabilität, wobei das gesamte Korngrößenspektrum im Sandbereich vertreten ist. Grobkörnigere Abschnitte sind u. a durch

mehrere Meter hohe, überlagerte subaquatische Dünen gekennzeichnet. In feinsandigen Bereichen kommen dagegen, wenn überhaupt, lediglich dezimeterhohe Transportkörper vor. Die Ränder des Fahrwasserbereichs sind regelmäßig durch ausbeißende konsolidierte, feinkörnige Sedimente eingegrenzt.

Der Feinkorngehalt der Oberflächensedimente in der Medemrinne ist im Vergleich zum Hauptfahrwasser mit 10-20 % relativ hoch. Dies dürfte mit den hier sehr häufig auftretenden Schlickgeröllen zusammenhängen, die wiederum auch auf die Erosion der Wattkanten im nördlichen und östlichen Bereich der Rinne zurückgehen (s. Abbildung 3-4).



Abbildung 3-4: Medemrinne mit Wattabbruchkante

Die Medemrinne bei Cuxhaven (vgl. Abbildung 3-6) gehört bekanntermaßen zu den Bereichen des Elbe-Ästuars, die einer hohen Morphodynamik unterliegen. Dies zeigt sich an der schnellen Rinnenverlagerung, die durch langfristige Zyklen geprägt ist (Albers, 2012).

2008 bildet sich eine Verbindungsrinne zwischen Klotzenloch und Medemrinne, welche die komplexen Strömungsprozesse signifikant verändert (Hansen, 2008).

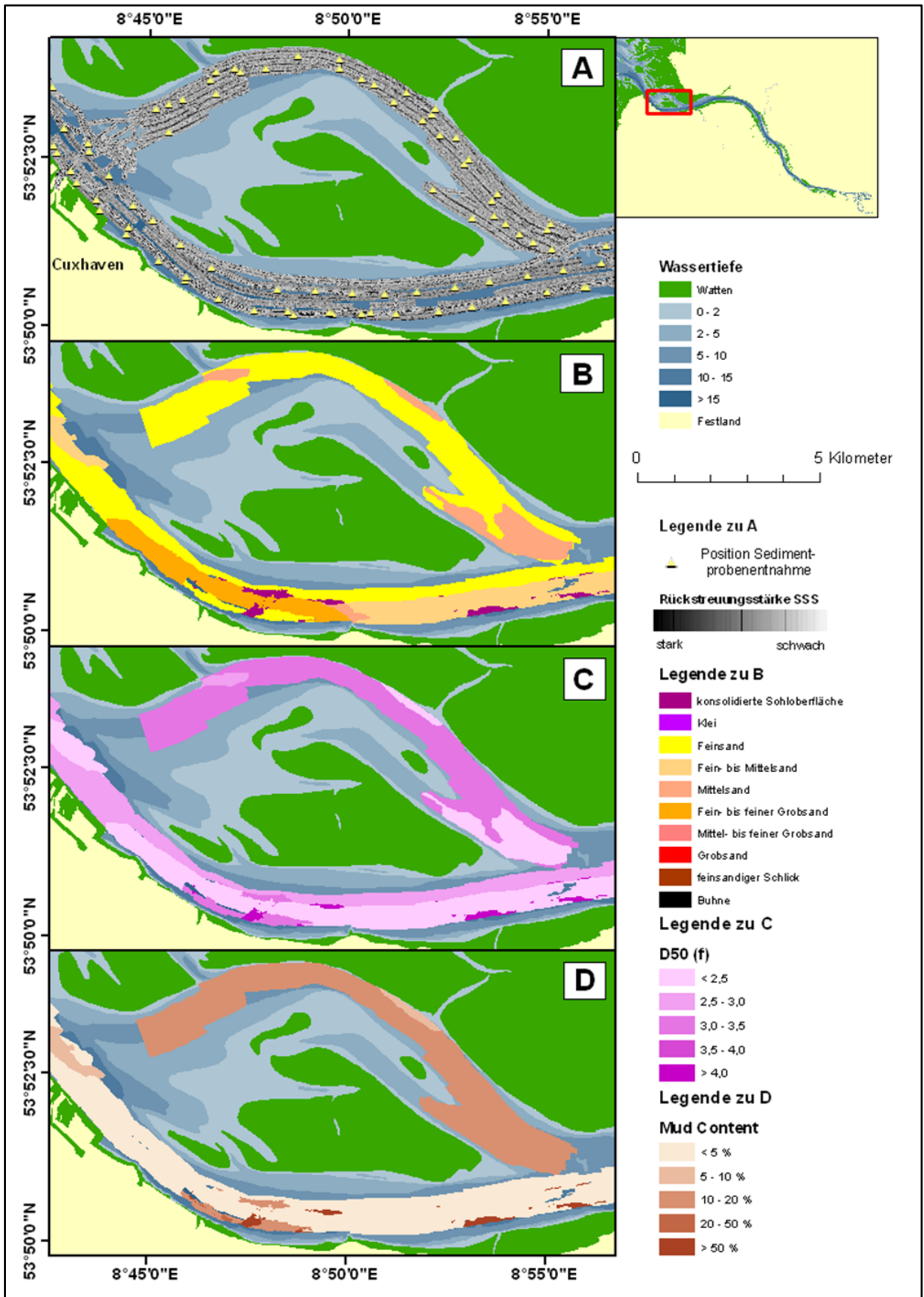


Abbildung 3-5: Datenbasis (August und November 2010, April 2012), B: Sedimentverteilung, C: Medianwert der Korngrößenverteilung [Phi], D: Feinkorngehalt in Gew. %, dargestellt für den Bereich der Medemrinne im Elbe-Ästuar

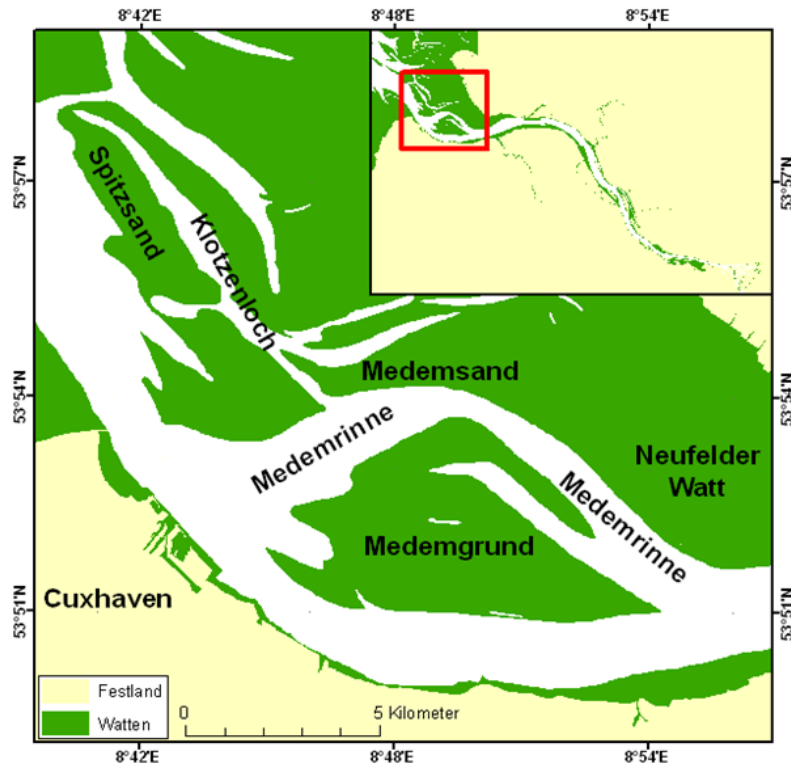


Abbildung 3-6: Übersicht über die Wattgebiete im Bereich des äußeren Elbe-Ästuars

Zur Erfassung möglicher sedimentologischer Änderungen wurden Oberflächensedimentkartierungen im Mai 2011 und April 2012 durchgeführt und mit zeitlich zugehörigen Vermessungsdaten des WSA Cuxhaven gekoppelt. Es lässt sich u.a. anhand von Medianwertänderungen zeigen, dass sich die Oberflächensedimentzusammensetzung im Bereich der neu gebildeten Medemsandrinne sowie im Bereich der östlichen Öffnung der Medemrinne vergrößert hat (Abbildung 3-7).

Die Präsenz von Erosionsrinnen nahe der Öffnung der Medemsandrinne lässt schließen, dass sich die Medemsandrinne nicht nur in den Medemsand, sondern zum Teil auch in die Medemrinne einschneidet (s. Abbildung 3-8).

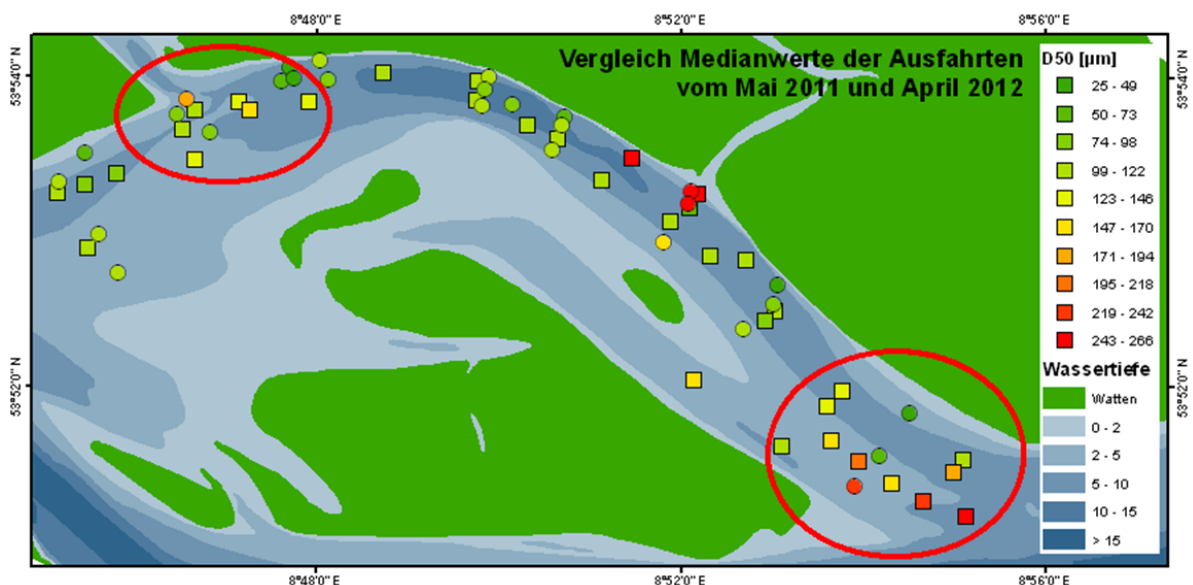


Abbildung 3-7: Räumliche Verteilung der Probenlokationen in der Medemrinne im Mai 2011 (Kreise) und April 2012 (Quadrate). Die Farbcodierung gibt Aufschluss über die Medianwerte [μm] zugehöriger Korngrößenverteilungen

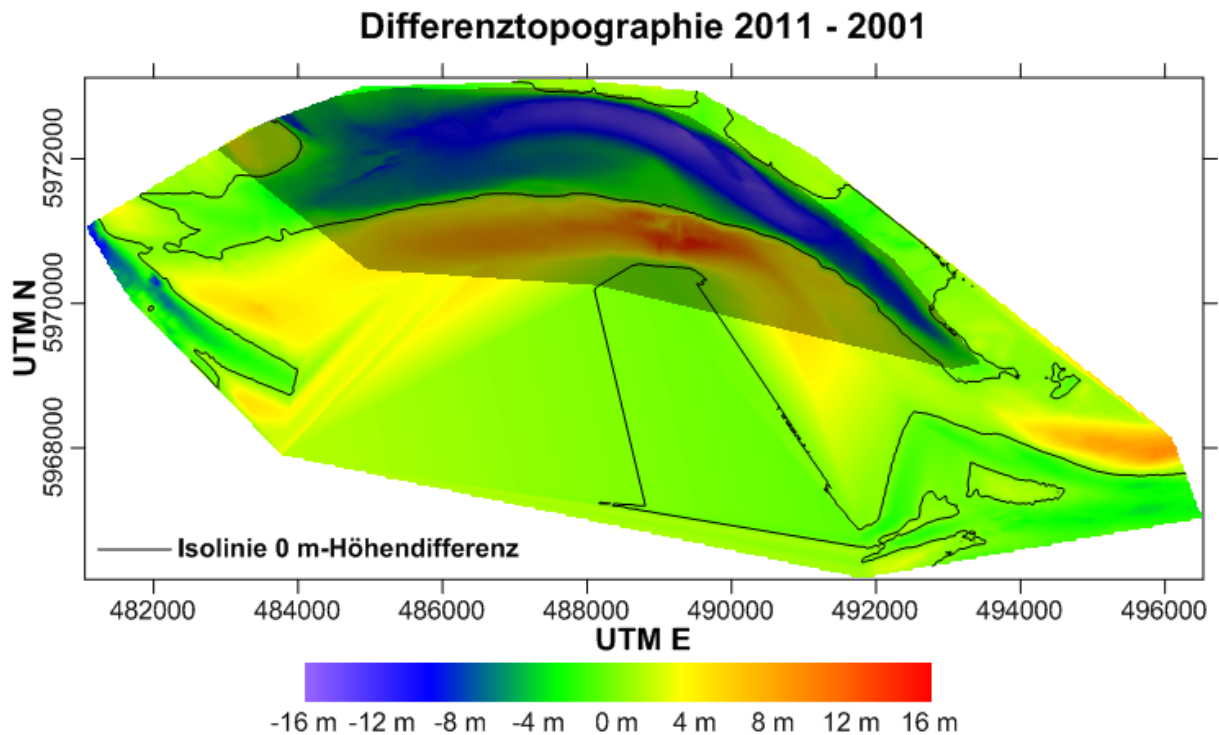


Abbildung 3-8: Differenztopographie für das Gebiet der Medemrinne, basierend auf Daten schiffsgestützter Vermessungen und Laserbefliegungen der Jahre 2001 und 2011, ausgegeben vom WSA Cuxhaven. Für das dunkel unterlegte Gebiet wurden cut-and-fill-Volumina errechnet, da nur für diesen Bereich Daten gleicher Aufnahmemethodik vorliegen.

Nach Berechnung der im Zeitraum zwischen 2001 und 2011 verlagerten Sedimentmengen wird deutlich, dass sich ein Großteil der an der nördlichen Rinnenböschung erodierten Sedimente ($\sim 133 \cdot 10^6 \text{ m}^3$) im Gleithangbereich wiederfinden ($\sim 93 \cdot 10^6 \text{ m}^3$). Geringere Mengen dürften sich im Gebiet des Neufelder Watts abgelagert haben ($\sim 7 \cdot 10^6 \text{ m}^3$), was sich auch mit Angaben von Lieberman (Lieberman, et al., 2007) deckt. Zudem ist von einem Sedimentaustrag in die Hauptfahrinne der Elbe auszugehen.

Weitverbreitete, vergleichsweise homogene Feinsandablagerungen, die an beiden Schnittstellen zwischen Hauptfahrwasser und Medemrinne anzutreffen sind, legen nahe, dass diese zumindest teilweise der überwiegend feinsandigen Medemrinne entstammen.

Anzumerken ist weiterhin, dass sich die Sedimentumlagerung bis etwa 2007 größtenteils auf den zentralen Prallhangbereich der Medemrinne beschränkte und erst ab 2008 auch größere Mengen nahe des Übergangs zur Medemsandrinne umgelagert wurden.

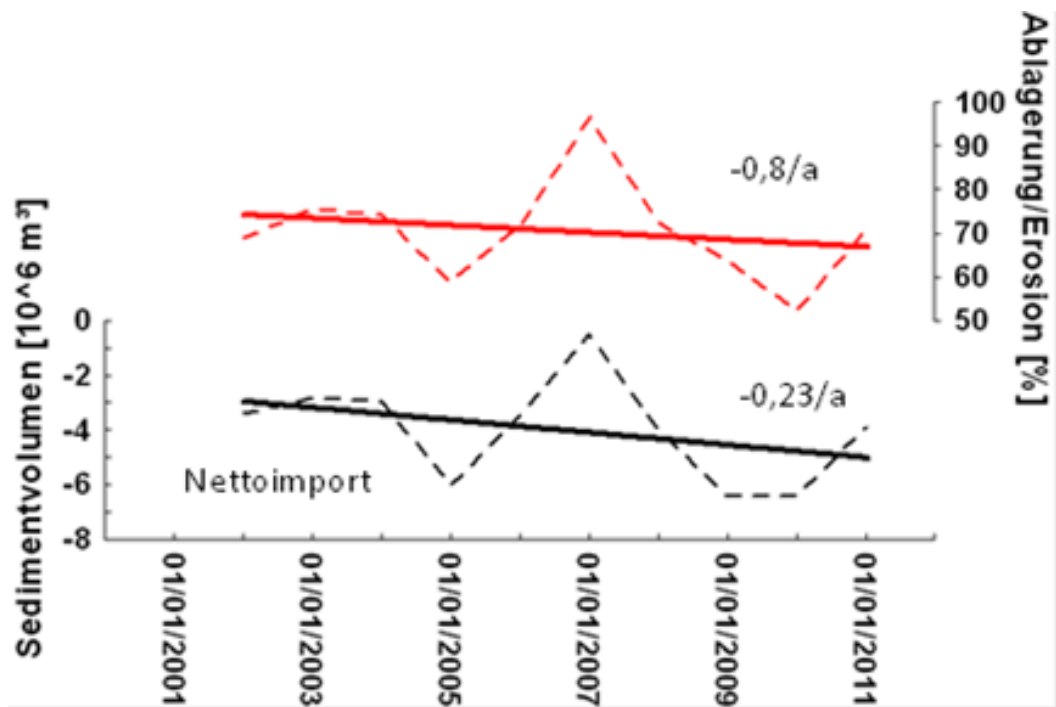


Abbildung 3-9: Zeitliche Entwicklung von Sedimentakkumulation / -Erosion (rot) sowie Sedimenteintrag (schwarz) für den in Abbildung 3-8 dunkel unterlegten Bereich

„Cut-and-fill-Volumina“ wurden auch für einzelne Jahre errechnet, um damit mögliche Trends zu dokumentieren. Hierzu wurde das Verhältnis zwischen Sedimentakkumulation zu Erosion aufgetragen (vgl. Abbildung 3-9). Dieses ist seit mindestens 2002 negativ und verschiebt sich weiter in Richtung Erosion. Demnach würde der Sedimentaustag aus der Rinne also in den nächsten Jahren weiter zunehmen. Dem unteren Graph (schwarz) in Abbildung 3-9 ist die jährlich exportierte Sedimentmenge zu entnehmen, die im Mittel um $0,23 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ zunimmt.

Weser

Die in *AufMod-F* erstellte Sedimentkarte ist hier zur besseren Übersicht in 4 Abschnitte unterteilt. Auf eine detaillierte Beschreibung sei an dieser Stelle verzichtet und auf Abbildung 3-10 bis Abbildung 3-13 verwiesen. Generell lässt sich sagen, dass die Sedimentoberfläche im Hauptfahrwasser des Weser-Ästuars hauptsächlich aus Fein- und Mittelsanden, stromauf von Nordenham auch teils von Grobsanden, dominiert wird. An den Rinnenflanken sind im gesamten untersuchten Gebiet immer wieder kohäsive Feinsedimente anstehend, meist Klei, die dort teils steil angeschnitten sind. Großflächige Schlickablagerungen entfallen auf das Gebiet von Bremerhaven stromauf bis Nordenham.

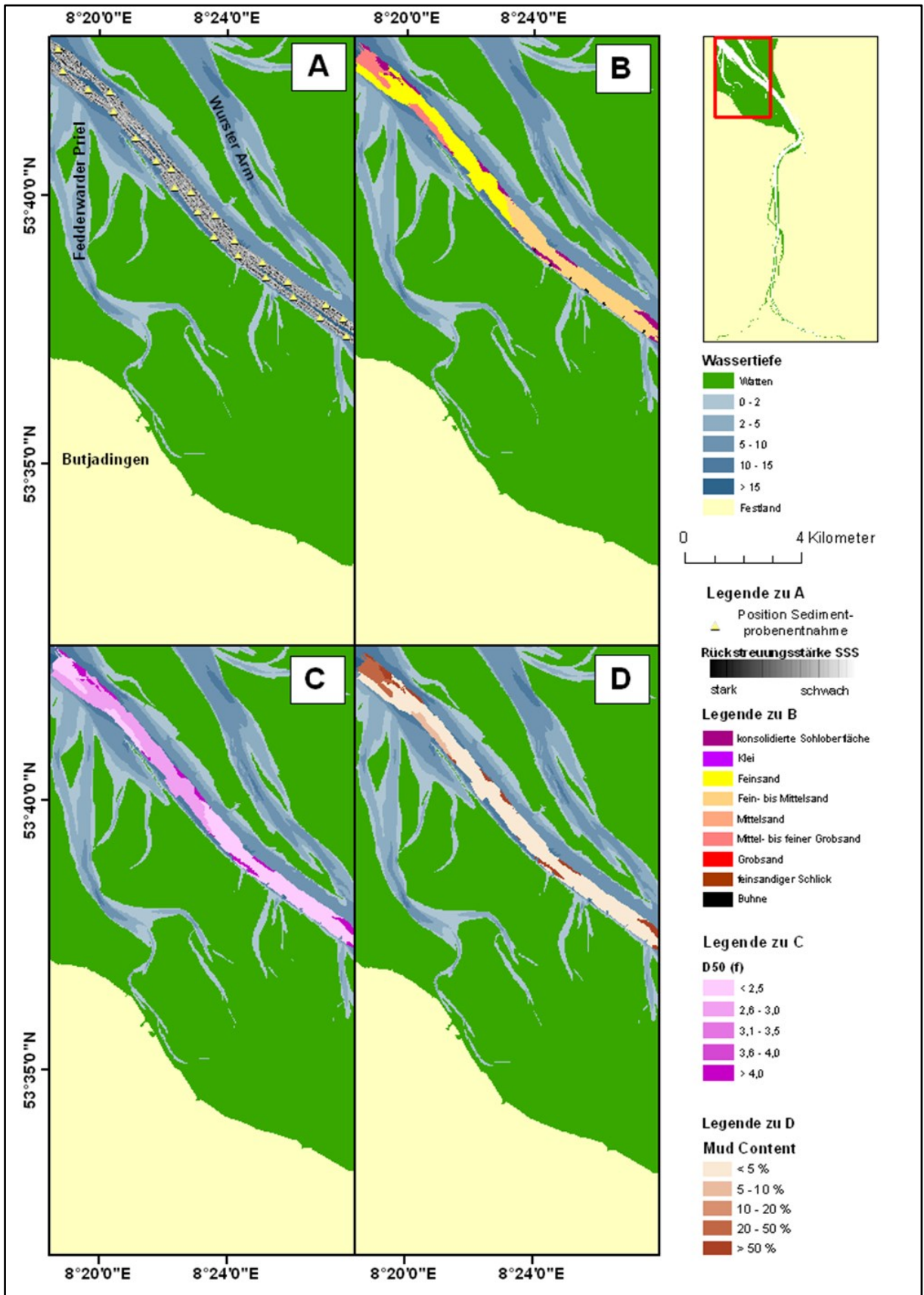


Abbildung 3-10: Ausschnitt 1 der Sedimentkarte vom Weser-Ästuar A: Datenbasis (Februar 2011), B: Sedimentverteilung, C: Medianwert der Korngrößenverteilung [Phi], D: Feinkorngehalt in Gew.%

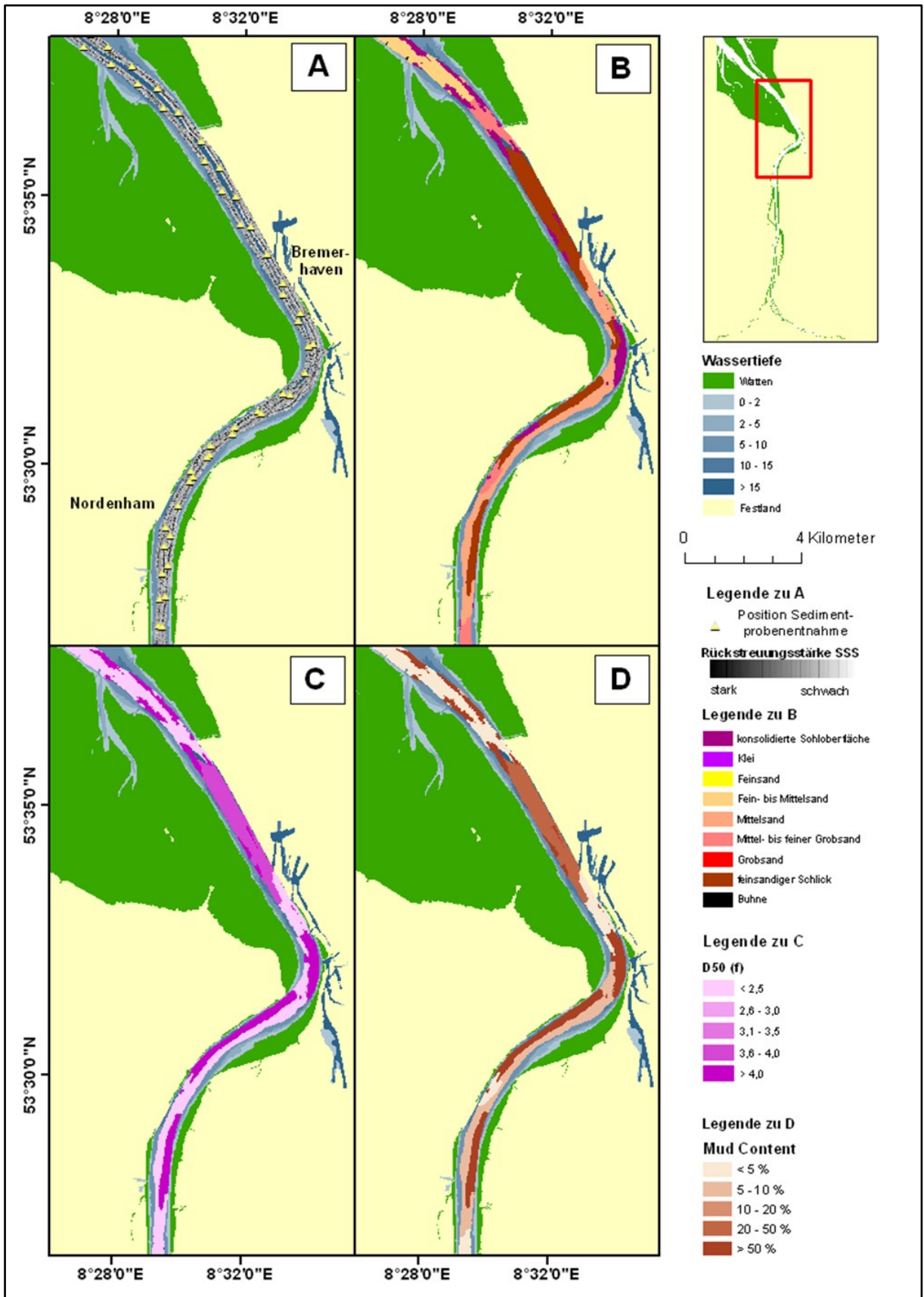


Abbildung 3-11: Ausschnitt 2 der Sedimentkarte vom Weser-Ästuar A: Datenbasis (Februar 2011), B: Sedimentverteilung, C: Medianwert der Korngrößenverteilung [Phi], D: Feinkorngehalt in Gew.%

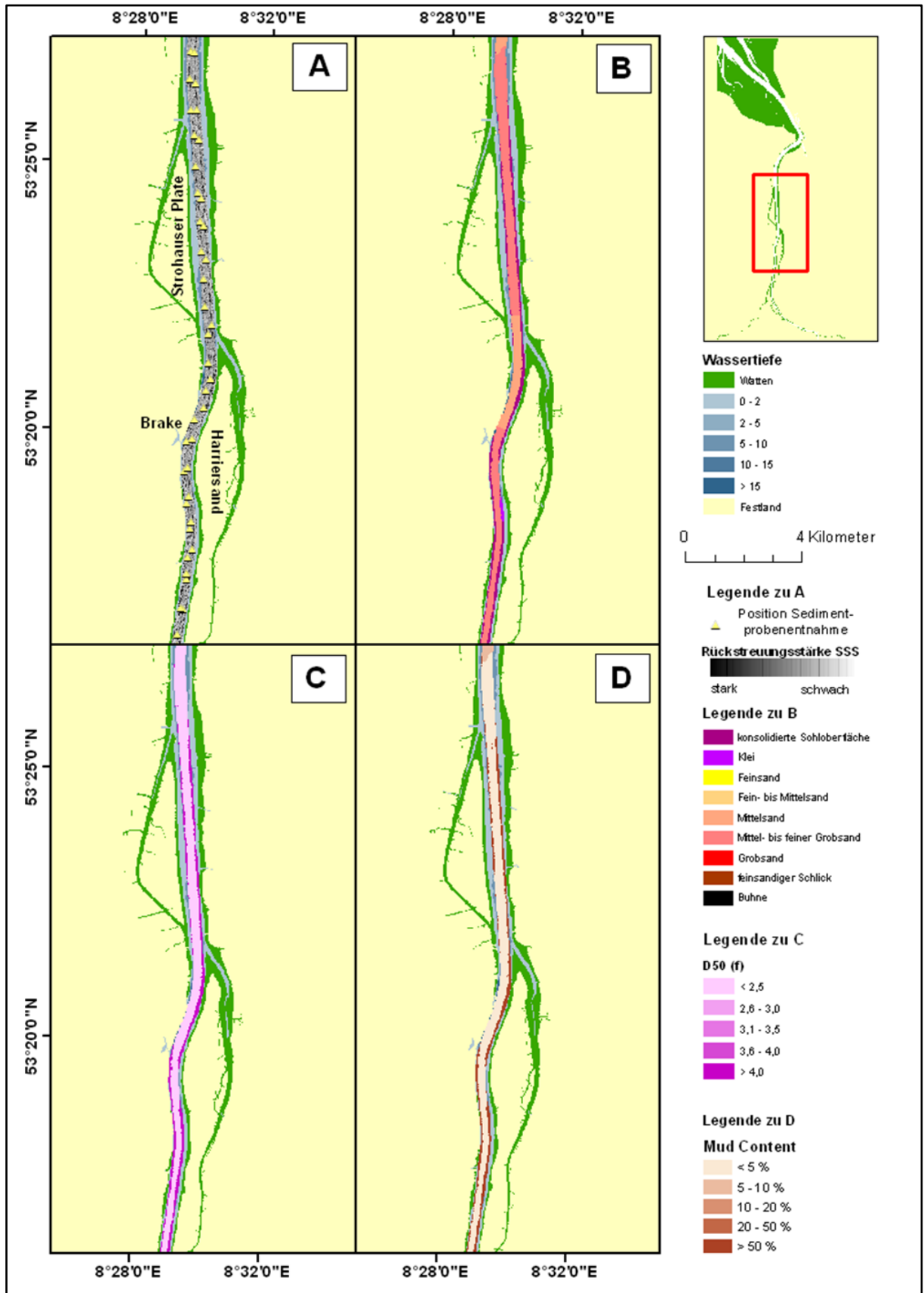


Abbildung 3-12: Ausschnitt 3 der Sedimentkarte vom Weser-Ästuar A: Datenbasis (Februar 2011), B: Sedimentverteilung, C: Medianwert der Korngrößenverteilung [Phi], D: Feinkorngehalt in Gew. %

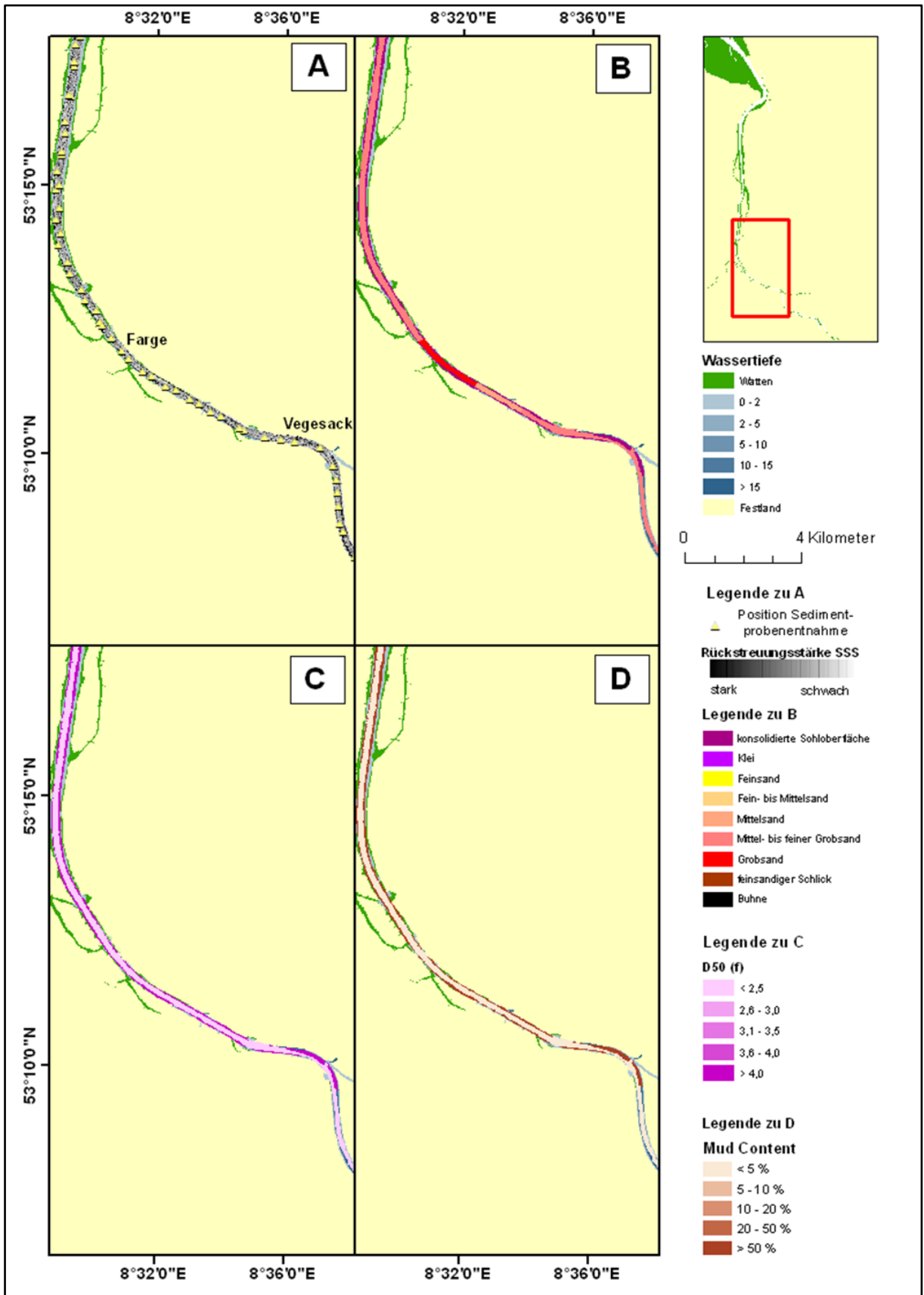


Abbildung 3-13: Ausschnitt 4 der Sedimentkarte vom Weser-Ästuar A: Datenbasis (Februar 2011), B: Sedimentverteilung, C: Medianwert der Korngrößenverteilung [Phi], D: Feinkorngehalt in Gew.%

Porositätsmessung in Weser und Elbe

Die Porosität mariner Lockersedimente wird u.a. von Korngröße und -Form, Sortierung, Sedimentauflast, Packungsdichte und Mineralogie beeinflusst (Wheatcroft, 2002). In der Literatur sind verschiedene Angaben bekannt. So liegt beispielsweise die Porosität für Sande aus der südlichen Nordsee im Mittel zwischen 37 und 42 % (Füchtbauer, et al., 1963). Höhere Werte zwischen 50 bis über 80 % ergeben sich für Proben aus Schlick- bzw. Mischwatt sowie aus Hafengebieten. Hamilton und Menard (Hamilton, et al., 1956), die Porositätsproben aus bis zu 30 m Wassertiefe auswerten, geben für Sande mittlere Werte von 38,3 % (Grobsand) bis 47,7 % (sehr feiner Sand) an. Für Schluffe und Tone liegen sie im Mittel bei 51,2 bis über 70 %. Wheatcroft (Wheatcroft, 2002) gibt für Sande aus ~19 m Wassertiefe Porositätswerte von 36 bis 49 % an, wobei sich die Porosität ausgehend von den obersten Millimetern der Sedimentsäule mit zunehmender Tiefe exponentiell verringert. Das führt dazu, dass die Porosität in den obersten Millimetern überschätzt und entsprechend in tieferen Bereichen der Sedimentsäule unterschätzt wird.

Die in **AufMod-F** erhobenen Porositätsdaten (zur Methodik vgl. Kapitel 2.4.3) sind in Abbildung 3-14 für das Elbe-Ästuar und in Abbildung 3-15 für das Weser-Ästuar mit jeweils räumlicher Zuordnung aufgetragen. Zugehörige Mittelwerte, Standardabweichungen sowie die Anzahl der Stichproben sind in

Tabelle 3-1 zu finden.

Es sei an dieser Stelle erwähnt, dass sandige Proben häufig von feinkörnigen Komponenten z.B. Schlickgeröllen, Fluid Mud oder auch biogenen, feinkörnigen Rückständen durchsetzt sind, die bei einer ungestörten Probennahme zwangsläufig mitbeprobte wurden. So ist möglich, dass als „sandig“ beschriebene Sedimentproben Porositätswerte zeigen die über denen liegen, die gemeinhin in Sanden vorgefunden werden (vgl. Kapitel 2.4.3).

Die Porositätsdaten aus dem Elbe-Ästuar sind grundsätzlich mit denen aus der weiter oben aufgeführten Literatur vergleichbar (vgl. Abbildung 3-14). Im Gegensatz zu den Werten aus dem Weser-Ästuar (s. Abbildung 3-15) sind die Proben mit höheren Porositätswerten nicht auf eine bestimmte Lokation beschränkt, sondern kommen zumindest bis km 720 im gesamten Elbe-Ästuar vor. Die Abnahme ab km 720 dürfte mit den ab hier großflächig vorkommenden, vergleichsweise homogenen Sanden und den fast vollständig fehlenden Schlickgeröllen zusammenhängen (vgl. Kapitel 3.1.1). Eine vornehmliche Beschränkung auf den Bereich der Trübungszone ist ebenso nicht zu beobachten. Dies könnte auf die, im Vergleich zur Weser, weniger ortstreu ausgeprägte Lage der Trübungszone zurückzuführen sein ((Bergemann, 2004), (Grabemann, et al., 2001)). Schlickablagerungen in Stillwasserbereichen sowie hohe Schillgehalte im Bereich bspw. der Fahrrinne stromab von Cuxhaven haben ebenfalls einen Einfluss auf die jeweiligen Porositätswerte.

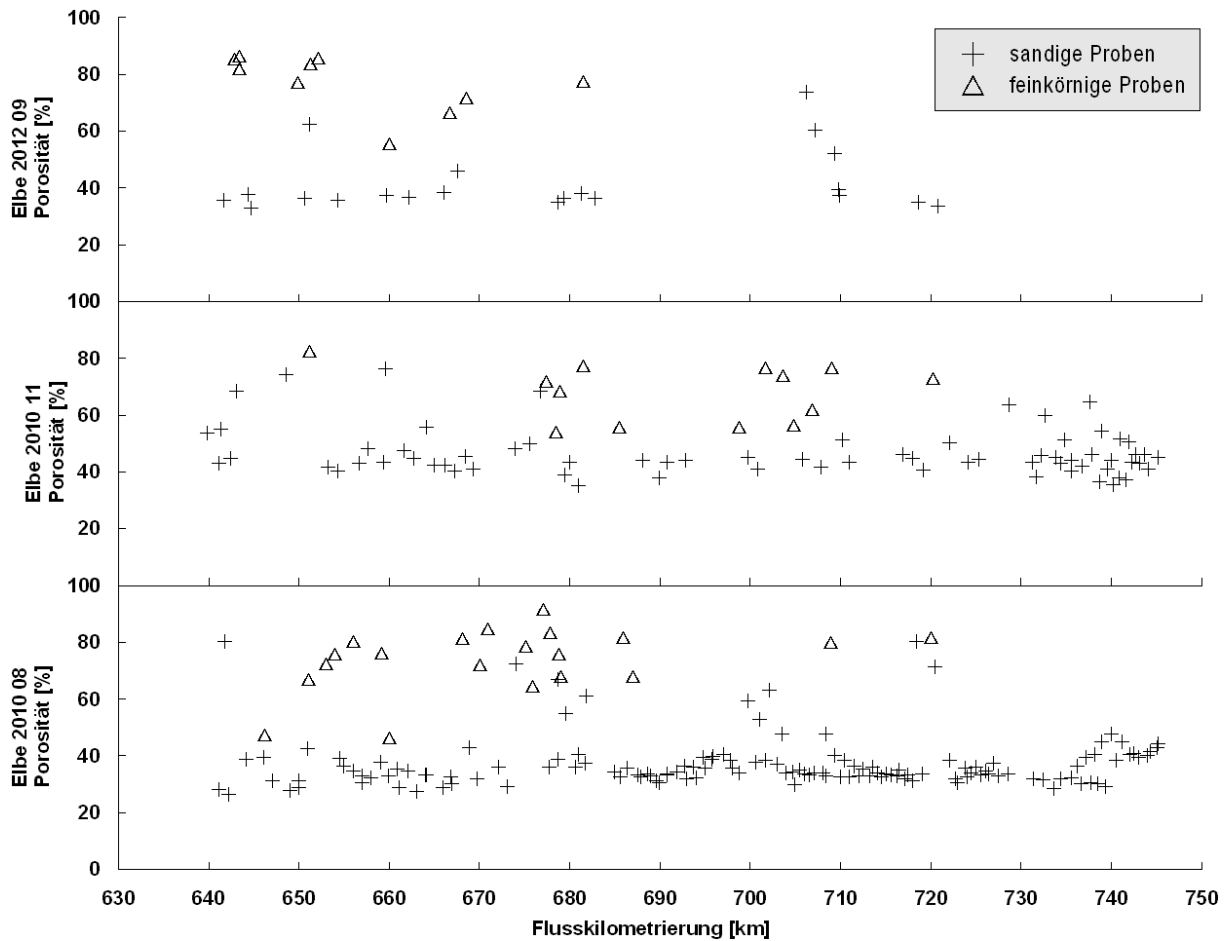


Abbildung 3-14: Porosität der im Elbe-Ästuar genommenen Sedimentproben, aufgetragen gegen die Flusskilometrierung. Cuxhaven liegt bei km 725

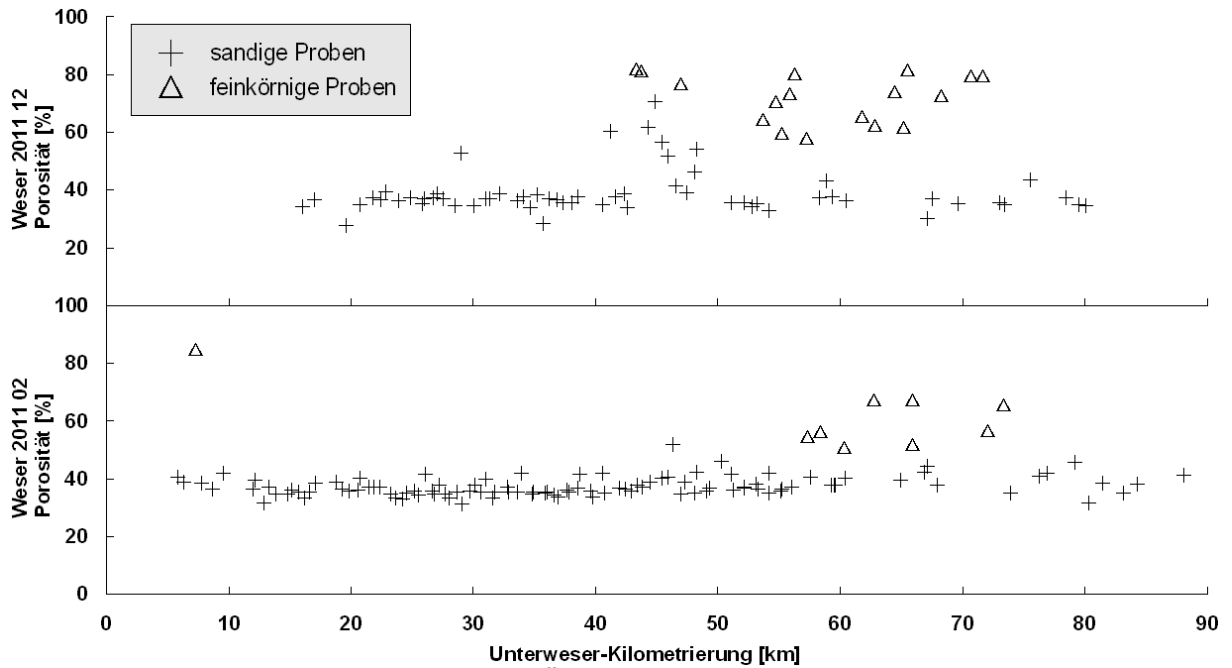


Abbildung 3-15: Porosität der im Weser-Ästuar genommenen Porositätsproben, aufgetragen gegen die Flusskilometrierung

Tabelle 3-1: Statistische Parameter für alle erhobenen Porositätsdatensätze

Datensatz	Lithologie	Mittelwert	Stabw	Stichproben
Elbe August 2010	sandig	37.3	9.4	138
	feinkörnig	73.8	11.4	20
Elbe November 2010	sandig	46.6	8.6	70
	feinkörnig	68	9.9	13
Elbe September 2012	sandig	41.8	11	21
	feinkörnig	77.1	10	10
Weser Februar 2011	sandig	37.4	3.2	107
	feinkörnig	61.7	10.8	9
Weser Dezember 2011	sandig	39	7.9	61
	feinkörnig	72	8.5	17

Die im Weser-Ästuar genommenen sandigen Porositätsproben der Ausfahrten im Februar und Dezember 2010 ergeben ähnliche Ergebnisse. Die als „sandig“ eingestuft Proben liegen im Mittel bei 37 bzw. 39 % mit jeweils überlappenden Standardabweichungen. Feinkörnige Proben konzentrieren sich im Februar 2011 auf den Bereich Weser-Flusskilometer (im Folgenden „Wkm“) 58 bis 74, abgesehen von einer Probe bei Wkm 7, deren hohe Porositätswerte vermutlich auf Hafenschlick zurückzuführen ist. Im Dezember 2011 beschränken sich die Proben mit höheren Porositätswerten auf den Bereich Wkm 43 bis 72 und setzen damit im Vergleich zur Beprobung im Februar 2011 bereits Wkm 15 weiter stromauf ein. Die höheren Porositätswerte im Weser-Ästuar, zugeordnet den feinkörnigen Proben, lassen somit dem räumlich variierenden Bereich der Trübungszone, gekennzeichnet durch vermehrte Schlickbildung, zuordnen. Dieses Ergebnis passt mit den zugehörigen Oberwasserabflussdaten, da bekanntermaßen die Lage der Trübungszone stark vom Oberwasserabfluss kontrolliert wird (Grabemann, et al., 2001).

Die Porositätsdaten wurden für vergleichende Gegenüberstellungen mit Korngrößenparametern insgesamt 4 Sedimentklassen (Sand, Schlick, Klei, konsolidierte Sohle) zugeordnet unter Einbeziehung von Informationen zu Probenlokationen, der Probenansprache im Feld und den Probenfotos (vgl. Tabelle 3-2). Die vierte Klasse war nötig, da im Feld nicht immer zweifelsfrei feststellbar war, ob die vorgefundenen Sohlsedimente aus Klei, Geschiebelehm oder verfestigtem Schlick bestehen.

Danach waren die Porositätswerte von Sand im August 2010 (Elbe-Ästuar) und Februar 2011 (Weser-Ästuar) im Mittel niedriger als jene aus dem Elbe-Ästuar im November 2010 (vgl. Tabelle 3-2). Werden die Daten zeitlich differenziert und räumlich zugeordnet gezeigt, so wird erkennbar, dass sich die zu unterschiedlichen Jahreszeiten erhobenen Porositätswerte von Sand über den betrachteten Abschnitt des Elbe-Ästuars um 5 bis über 10 % voneinander unterscheiden und sich erst deutlich stromab von Cuxhaven, ab km 735 wieder einander annähern.

Tabelle 3-2: Statistische Parameter für Porositätsdatensätze, für die Korngrößendaten vorliegen

Datensatz	Lithologie	Mittelwert	Stabw	Stichproben
Elbe August 2010	Sand	34.8	3.9	120
	Schlick	58.3	12.3	12
	Klei	76.9	8.1	12
	konsolidierte Sohle	80.5	0.7	4
Elbe November 2010	Sand	44.1	4.6	57
	Schlick	70.1	8.7	8
	Klei	65.4	10.2	5
	konsolidierte Sohle	74.8	2.6	2
Weser Februar 2011	Sand	37.4	3.2	107
	Schlick	63.1	10.6	8

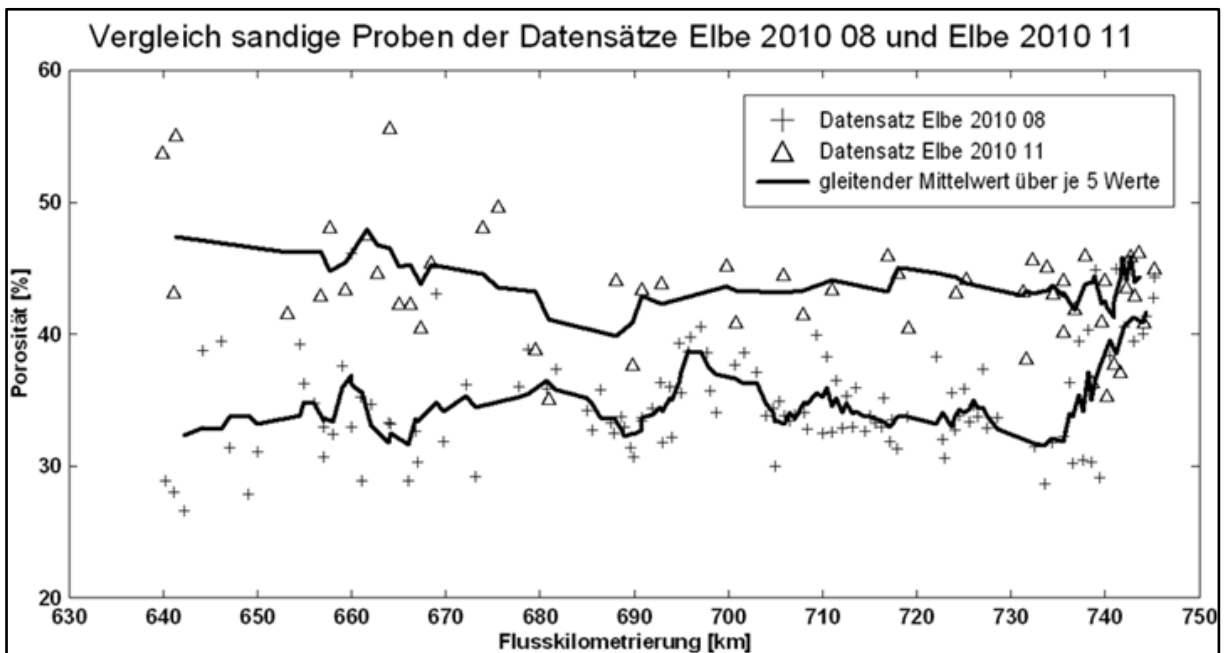


Abbildung 3-16: Vergleich der Porosität von Sand im Elbe-Ästuar im August und November 2010, sowie der gleitende Mittelwert über jeweils 5 Werte

Da methodisch bedingte Ursachen für diese Werteabweichungen auszuschließen sind, bleibt die Rahmenbedingungen vor bzw. während der Ausfahrten, die Einfluss auf die Sedimentcharakteristik z.B. Lagerungsgefüge haben, näher zu beleuchten. Hierzu zählt u.a. eine mögliche Beeinflussung durch veränderlichen Oberwasserabfluss bzw. windinduzierte Wasserstandserhöhungen (vgl. Abbildung 3-17). Ein Vergleich der Oberwassersituation zu den entsprechenden Ausfahrtszeiträumen ergibt, dass im August 2010 ein erhöhter Oberwasserabfluss vor, im November 2010 jedoch während der Ausfahrt vorlag. Ferner wurde am 08.10.2010 ein vergleichsweise hoher Oberwasserabfluss mit 2142 m³/s erfasst.

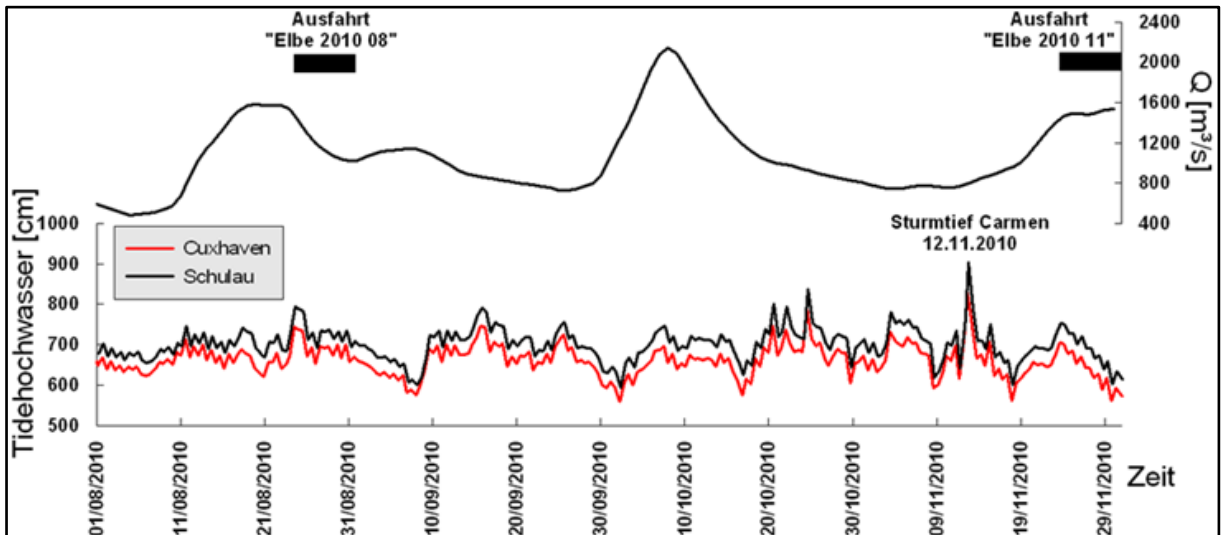


Abbildung 3-17: Oberwasserabfluss beim Pegel Neu Darchau sowie Tidehochwasserstände am Pegel Cuxhaven und Schulau. Die schwarzen Balken markieren die Beprobungszeiträume

Dass erhöhte Abflussmengen zur Verformung und Verlagerung von Sohlkörpern und damit zu einer erhöhten Sedimentumlagerung führen, ist aus der Literatur bekannt und auch für die Elbe nachgewiesen (z.B. (Zorndt, et al., 2010)). Möglich scheint auch, dass eine Beeinflussung der Porositätswerte auf das am 12.11.2010 aufgetretene Sturmtief Carmen zurückzuführen ist. Die in Abbildung 3-17 dargestellten Tidehochwasserwerte belegen, dass sich das Sturmtief auf das gesamte Elbe-Ästuar auswirkte. Schließlich könnten jahreszeitlich bedingte Unterschiede eine Rolle spielen. Es lassen sich an dieser Stelle nur Annahmen treffen, da für gesicherte Zuordnungen weitere Zeitreihen notwendig wären. Entsprechende Hinweise in der Literatur wurden bis dato nicht gefunden.

Aus der gemeinsamen Betrachtung von Korngrößenparametern und Porosität sowie der einer verfeinerten lithologischen Einteilung (Abbildung 3-18) ergeben sich weitere Erkenntnisse, die wie folgt zusammengefasst werden können. Höchste Porositätswerte entfallen auf Schlick, auf frühdiagenetisch verfestigten Schlick (Klei) sowie auf weitere konsolidierte Sedimente (z.B. Geschiebelehm), die in Bereichen mit verfestigter Sohle anstehen (s. Tabelle 3-2). Die Werte der Porosität weichen je nach Datensatz recht stark voneinander ab und zeigen dementsprechend auch vergleichsweise hohe Standardabweichungen. Dies dürfte zumindest zum Teil daran liegen, dass Schlick unterschiedlich kompaktiert sein können und die Stichprobenanzahl nur gering ist. Interessant ist auch, dass der Feinkornanteil sandiger Proben der Datensätze „Elbe 2010 08“ und „Elbe 2010 11“ in letzterem deutlich niedriger ist. Anzumerken ist hier, dass es sich bei den Proben für die Porositätsmessungen und die Korngrößenmessungen um zwei verschiedene Teilproben der mit dem Probengreifer entnommenen Sedimentprobe handelt. Dies ist insbesondere in Bezug auf die häufig inhomogene Verteilung von feinkörnigen Komponenten zu beachten.

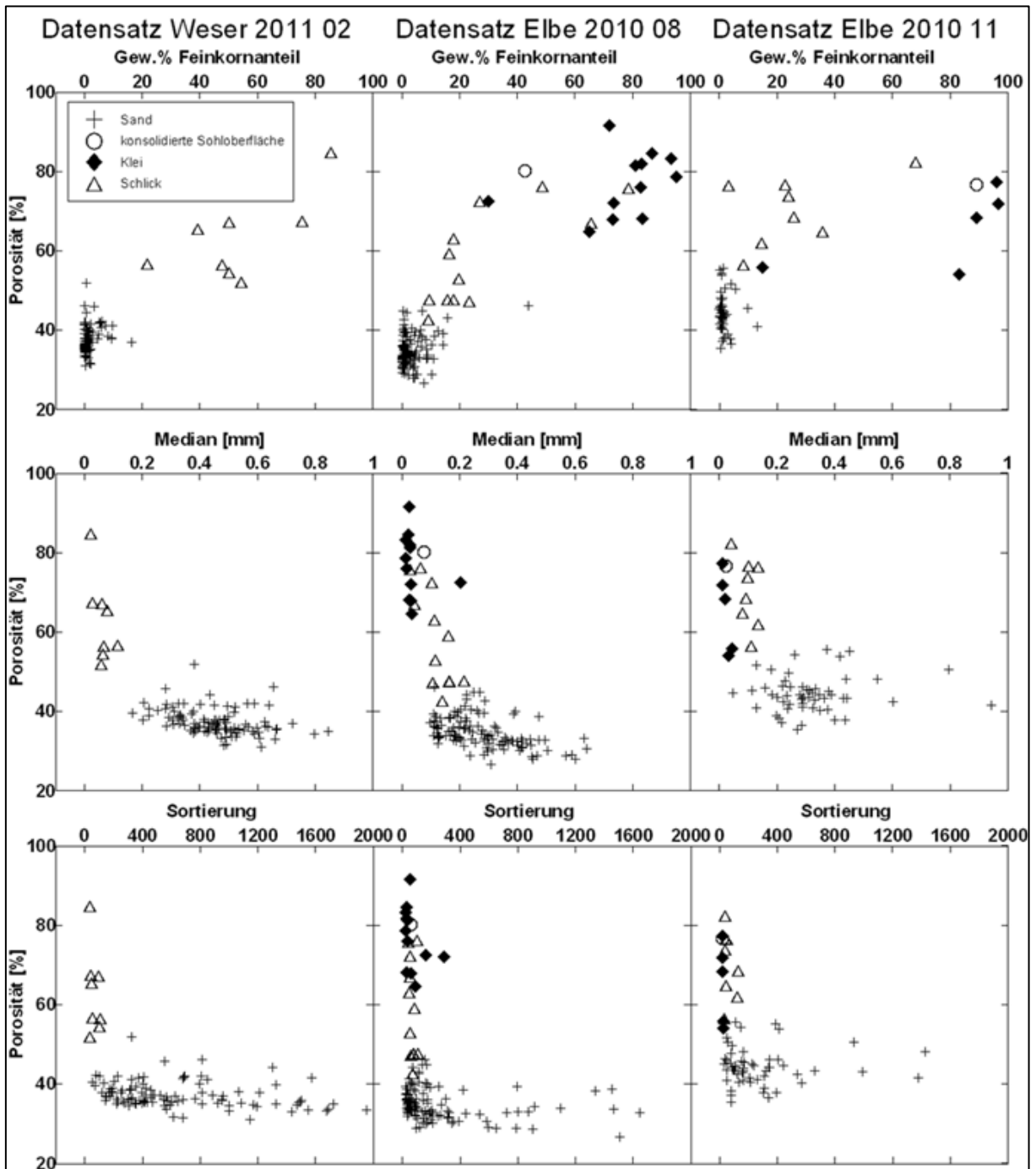


Abbildung 3-18: Porosität aufgetragen gegen Feinkornanteil, Median und Sortierung - Ausfahrten „Weser 2011 02“, „Elbe 2010 08“ und „Elbe 2010 11“

3.1.2 Ergebnisse zum Dünenfeld bei Minsener Oog

Der nördliche Teil der Innenjade querab Minsener Oog wurde das erste Mal im Februar 2010 untersucht. In diesem Gebiet kommen subaquatischen Dünen mit einer Länge von bis 450 m und einer Höhe von bis 7,2 m vor. Auf diese großen Dünen befinden sich Felder von großen Rippeln und kleineren Dünen (Abbildung 3-19a). Die Sedimente der großen Dünen bestehen aus Mittelsand an der Dünenbasis und aus Grobsand im Bereich der Dünenkrone (Abbildung 3-19b). Das Dünenfeld füllt fast die gesamte Jaderinne aus, nur im Westteil gibt es feinkörnige strukturalarme Bereiche sowie Hartgründe am südöstlichen Ende der Fahrrinne. Kleine bis mittelgroße Sohlformen kennzeichnen den südwestlichen Teil des Untersuchungsgebietes, sie bestehen aus Feinsand und zeigen eine deutliche Ausgrenzung der einzelnen

Sohlformgenerationen. Generell ist das Dünenfeld ebb-orientiert, nur im Westteil gibt es flutorientierte Formen (Abbildung 3-19c).

Eine zweite bathymetrische Aufnahme drei Wochen später (Anfang März 2010) erlaubt einen Zeitscheibenvergleich der Morphologie. Danach bewegen sich die ebbdominierten Dünen etwa 5 m pro Monat seewärts, die flutdominierten hingegen 15 m pro Monat jadedeinwärts, im weltweiten Vergleich also ein sehr dynamisches System. Um das Gebiet besser interpretieren zu können, wurde es für die nächsten drei Vermessungen nach Nordosten hin ausgedehnt (Abbildung 3-20).

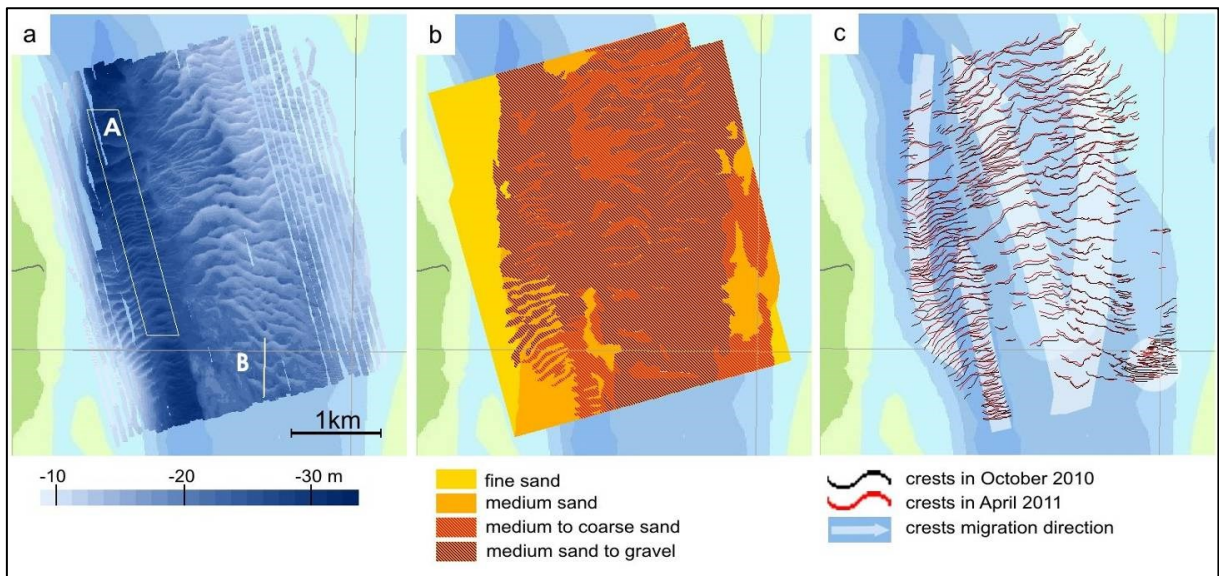


Abbildung 3-19: Untersuchungsgebiet Minsener Oog a) Bathymetrie ; b) Sedimentverteilung bestehend aus Sanden und Kiesen; c) Verlagerung der Sohlformen auf der Basis der in der Bathymetrie ausgewiesenen Dünenkronen (crests) über einen Zeitraum von sechs Monaten

Damit wurden die Sedimenttransportwege besser sichtbar, vermutete Zirkulationspfade konnten jedoch nicht nachgewiesen werden. Jedoch erlaubte die Erweiterung des Untersuchungsgebietes (vgl. Abbildung 3-20) die Ausweisung einer klar erkennbaren Konvergenzzone zwischen beiden Strömungsregimen, die zufälligerweise im tiefsten Teil der Jaderinne im Bereich des Fahrwassers liegt (Abbildung 3-21). Das Fahrwasser wird monatlich vom WSA-WHV im Hinblick auf die Navigationstiefen überprüft. Dieser Sachverhalt ergab bei einer Recherche im Archiv des WSA eine Zeitserie verfügbarer Bathymetrien von 01/2006 bis 10/2010.

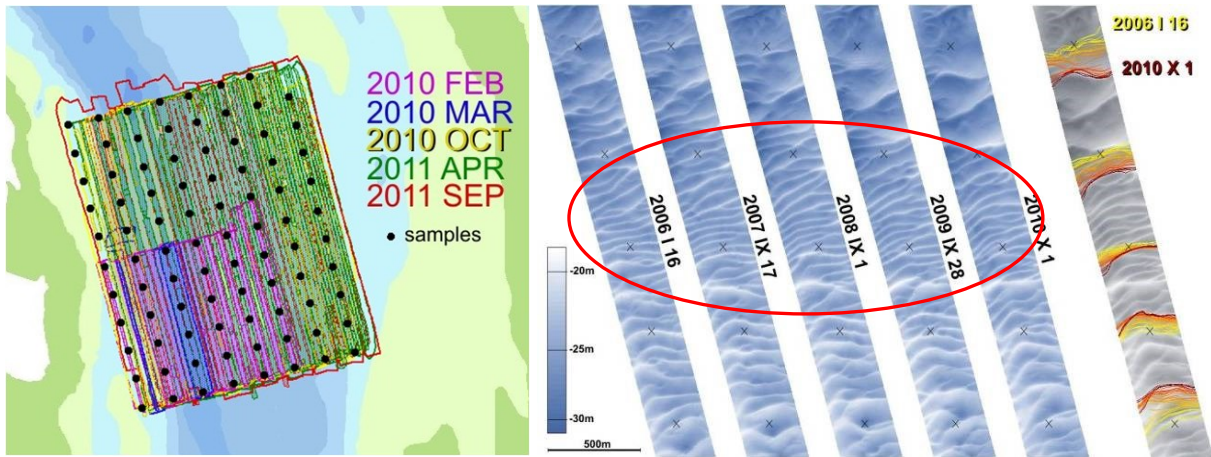


Abbildung 3-20 (links): Erweitertes Untersuchungsgebiet bei Minser Oog in **AufMod-G**

Abbildung 3-21 (rechts): Konvergenzzone (Zentralbereich Mitte rot gerahmt) von ebb- und flutdominanten Sohlformen; Basis: 37 bathymetrische Zeitserien (Januar 2006 bis Oktober 2010) – am Beispiel von fünf ausgewählten Transekten (s. Abbildung 3-19a – Gebiet A) mit ausgewählten Dünen (ganz rechts)

Mit einem Atlas Fan-Sweep 200 Fächerecholot wurden insgesamt 37 hoch aufgelöste Vermessungen durchgeführt. Über diesen Zeitraum zeigen die Sohlformen sehr konstante Migrationsraten und erscheinen unabhängig von Extremereignissen, was insgesamt auf einen rein Gezeiten getriebenen Transportprozess hinweist. Die oben angeführte Konvergenz zwischen beiden Regimen ist ebenfalls gut abgebildet (Abbildung 3-21). Es erweckt den Eindruck, das Sand von beiden Richtungen auf den Konvergenzmittelpunkt hin bewegt wird, jedoch zeigen die dort symmetrisch angelegten Sohlformen keinerlei räumliche Verlagerung oder Erhöhung (Abbildung 3-21). Die wirkende Hydrodynamik in diesem Bereich wird offenkundig nicht von der Sohlformgestaltung abgebildet, nur umfangreiche Messungen zeitgleich an mehreren Stellen im Gebiet könnten Aufschluss darüber geben. Da dies nicht realisierbar war, wurde versucht, mit Hilfe von Modellen aus **AufMod-C** diese Frage zu beantworten. Über zwei „Schönwetter“-Wochen – gemittelte Wellen und Stromwerte wurden in Form von Vektoren dargestellt (Abbildung 3-22).

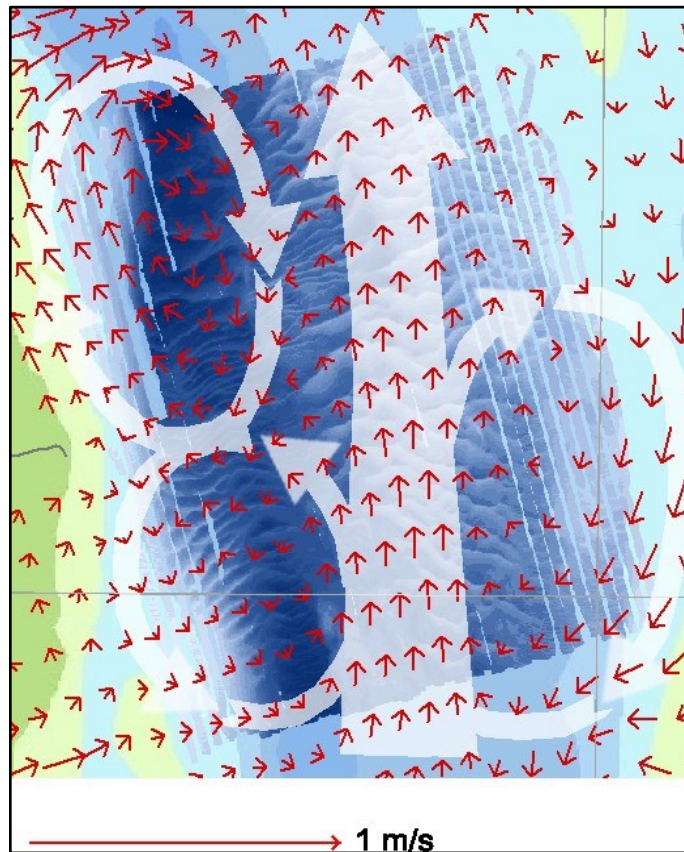


Abbildung 3-22 Vektoren des Reststromes einer Zwei-Wochen Simulation mit Wind-/ Wellen-antrieb im Untersuchungsgebiet (zur Verfügung gestellt von **AufMod-C**) – Die weißen Pfeile zeigen die rotierende Bewegung am Westrand, die für die stabilen Verhältnisse in der Konvergenzzone verantwortlich ist

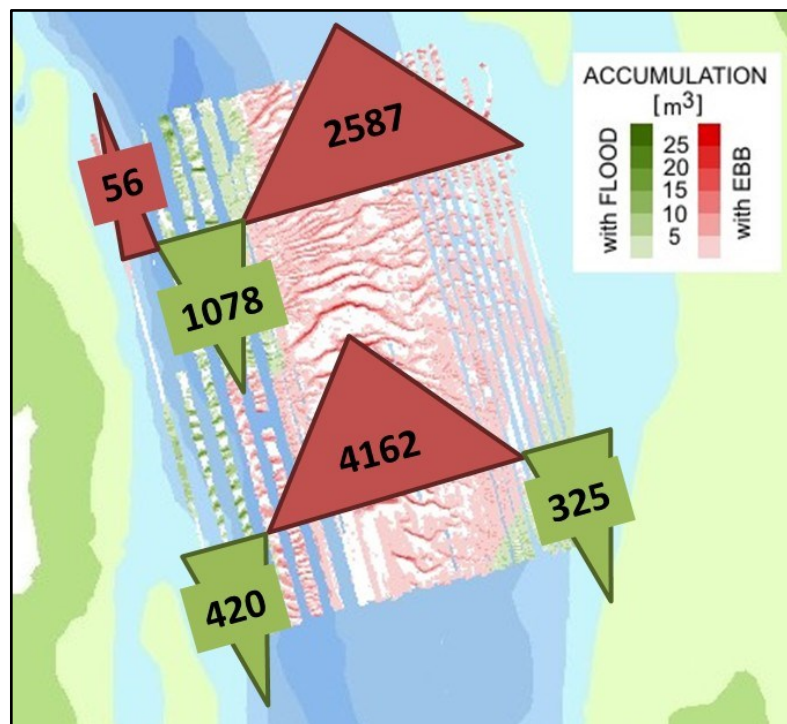


Abbildung 3-23: Sedimentbilanz über einen 6-Monats-Zeitraum (10/2010 bis 04/2011) am Beispiel von zwei Rinnenquerschnitten. Auf Länge von 3 km mit einer Breite von 1 m wurden in einem halben Jahr ca. 7000 m³ ebbstrom-exportiert, in Flutstromrichtung dagegen nur ca. 2000 m³ (bezogen auf die zwei Rinnenquerschnitte)

Die Vektoren zeigen insgesamt einen deutlich seewärts gerichteten ebb-orientierten Transportweg. Die im westlichen Teil auftretenden, gegenläufigen Verwirbelungen wirken dem entgegen und bewegen sich in einer der Zahl Acht ähnlichen Zirkulationsstruktur. Im Zentrum der Acht flankiert ein Teil des transportierten Materials den Zentralbereich der Konvergenzzone, was dort die stabile Dünenhöhe und die ausgeglichene Sedimentbilanz erklärt (Abbildung 3-22). Die auf dieser Grundlage durchgeführten Sedimentbilanzen werden am Beispiel von Rinnenquerschnitten dargestellt (Abbildung 3-23). Ähnlich den Spiekeroog-Daten wurde eine Zeitscheibe von sechs Monaten gewählt, zu der ebb- und flutrelevante Anteile der Sedimentumlagerung kalkuliert wurden. In der Jaderinne liegt der Betrag 20mal höher im Vergleich zu den Zungenriffen vor Spiekeroog. Da die Basis der Jaderinne in diesem Bereich durch harte, schwer erodierbare, pleistozäne Geschiebemergel charakterisiert ist, kann die Existenz dieser Sohlformen nur durch andere Sedimentquellen erklärt werden. Ein wesentlicher Punkt hierfür ist Unterhaltungsbaggerei mit ihren Verklappstellen in der unmittelbaren Umgebung des Untersuchungsgebietes. Nur wenige hundert Meter östlich liegt die Verklappstelle „Mellumplate“. Hier wurden laut WSA-WHV mehr als 11 Millionen Kubikmeter Material zwischen 1994 und 2001 verklappt, die eine Entwicklung von Dünen erst möglich machten. Diese Hypothese wird durch die vorliegenden Bodenproben gestützt. Mehrfach wurden in den Greifern an der Basis der Dünen konsolidierte, sehr harte Tone gefunden, die auch durch starke Reflektoren in der Flachseismik belegt werden (Abbildung 3-24).

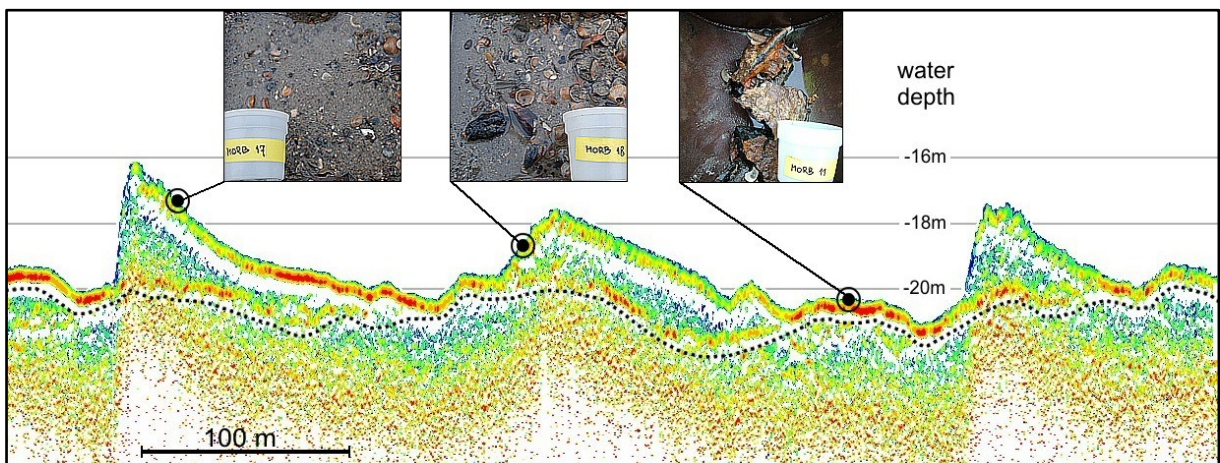


Abbildung 3-24: Flachseismik-Aufzeichnung von drei Dünen mit Greiferproben von drei Stationen (s. Abbildung 3-19a Transekt B). Die rechte Greiferprobe zeigt den typischen Hartgrund innerhalb der Dünen, der sich als roter Reflektor in der Seismik darstellt

3.1.3 Ergebnisse der Sedimentklassifikation „Watten“

In der Pieprinne vor Büsum wurde insgesamt ein Gebiet von knapp 80 km² mit Seitensichtsonar-daten abgedeckt (Streifenbreite 100 m). Für ausgewählte Teilbereiche liegen außerdem Wiederholungsmessungen vor. Insgesamt verteilen sich 295 Sedimentproben auf den Untersuchungsbereich (Abbildung 3-25). Weiterhin liegen knapp 300 km Profildaten mit hochauflösendem Sedimentecholot (Subbottom-Profilier) vor.

In der Norderhever wurde eine Fläche von 53 km² mit 161 Sedimentproben abgedeckt (Abbildung 3-26). Zusätzlich wurden 430 km Daten mittels Subbottom-Profilier aufgenommen.

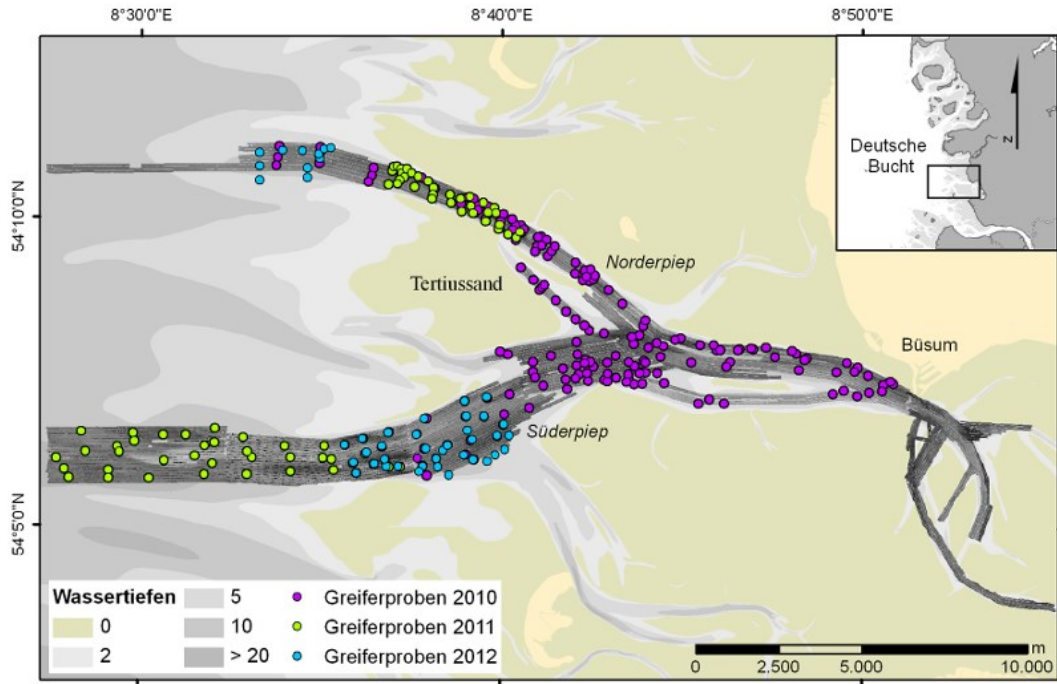


Abbildung 3-25: Übersicht über die in den Piepinnen untersuchten Flächen sowie über die Lokationen der entnommenen Sedimentproben

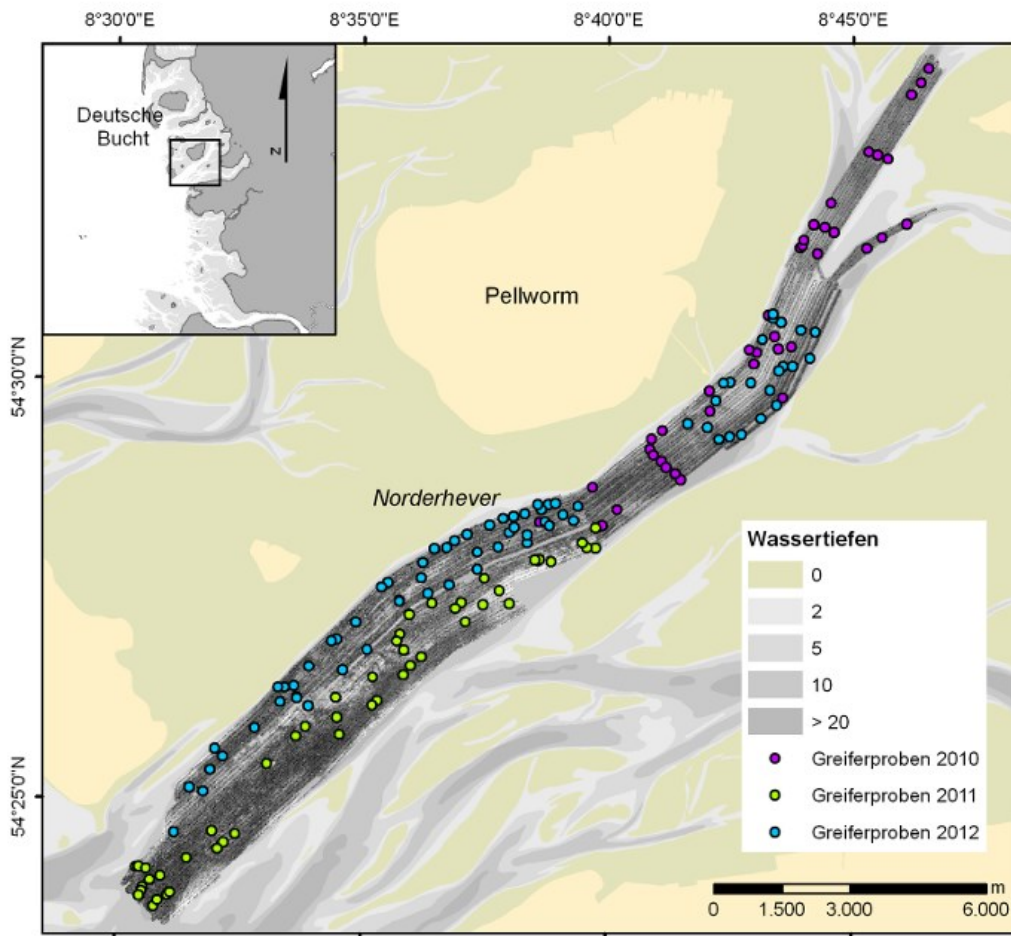


Abbildung 3-26: Übersicht über die in der Norderhever untersuchten Flächen sowie über die Lokationen der entnommenen Sedimentproben

Das Rinnensystem der Piep

Die Aufnahmen mit dem Seitensichtsonar zeigen im Bereich der Pieprinnen recht gleichförmige Signaturen ohne auffällige Meeresbodeneigenschaften. Die Rückstreustärken sind meistens gering, was auf eine Verbreitung von Feinsanden oder schlickigen Feinsanden hinweist. Unterbrochen werden diese gleichförmigen Flächen nur durch Bereiche, wo sich in konsolidierten, älteren Ablagerungen (Klei) Kanten und andere Erosionsformen herausgebildet haben bzw. Schill, also leere Molluskenschalen, in größeren Mengen akkumuliert wird (vgl. Abbildung 3-27).

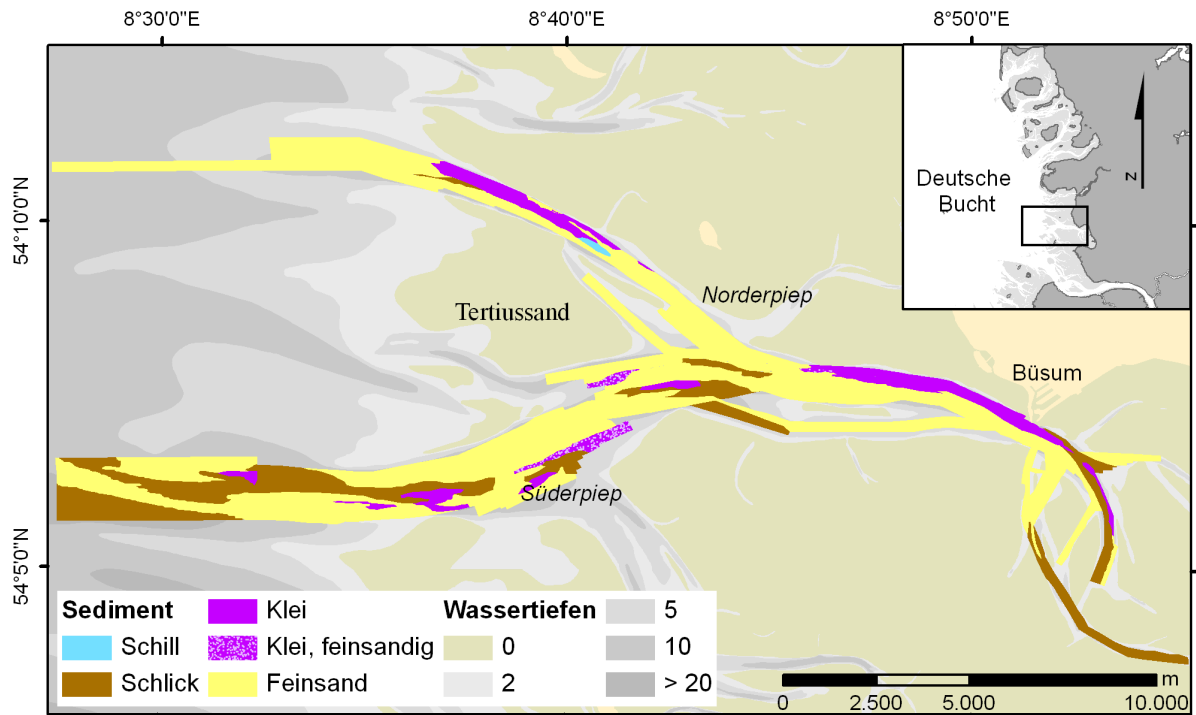


Abbildung 3-27: Karte der Sedimenttypenverteilung im System der Pieprinnen vor Büsum

Wichtige Anmerkung: Bei dem in dieser Karte als Schlick bezeichneten Sedimenten handelt es sich nicht um Schlick im eigentlichen Sinne, also um ein Sediment mit mehr als 50% Gewichtsanteilen an Schluff und Ton (Figge et al., 1980). Vielmehr werden hier integrierend als Schlick solche Ablagerungen bezeichnet, die als Probe sehr wohl einen ausgeprägten Anteil an Feinmaterial sowie plastische Eigenschaften aufweisen und deren Verbreitungsgebiet sich in den Sonaraufnahmen als wenig strukturiert und durch geringe Rückstreuintensität charakterisiert zeigt.

Die Gesamtheit der in den Gezeitenrinnen von Norder- und Süderpiep sowie in der eigentlichen Pieprinne mit ihren Ausläufern in der Meldorfer Bucht entnommenen Sedimentproben deckt ein Spektrum mittlerer Korngrößen (D_{50}) ab, das von 1,6 bis 5,9 Phi reicht. Dabei sind fast 88% der 245 analysierten Proben den Mittelwertklassen sehr feiner Sand (D_{50} 63 -125 μm , 4 - 3 Phi) bzw. feiner Sand (D_{50} 125 - 200 μm , 3 - 2 Phi) zuzuordnen, was schon auf eine gewisse Dominanz von Feinsanden im Rinnensystem hinweist (s. Abbildung 3-28). Im Mittel gröberkörnige Ablagerungen kommen im Arbeitsgebiet so gut wie nicht vor (eine Probe). Die Feinsande sind im seewärtigen Bereich speziell in Norder- und Süderpiep gröber ausgebildet als in der eigentlichen Pieprinne und den noch weiter landwärtigen Abschnitten. Mit Annäherung an die buchtinneren Bereiche nimmt ebenfalls der Anteil an Schluff und Ton (Schlick) zu (vgl. Abbildung 3-29). Der sich hierin abbildende Gradient mit gröberem Material am seewärtigen und feineren Sedimenten am landwärtigen Rand des Wattenmeeres spiegelt recht gut die bekannte Abnahme der Transportenergie von der offenen See in Richtung Land wider. Die weite Verbreitung von Sedimenten mit schlickigem Charakter in der Süderpiep,

kann dagegen nicht recht mit dieser Modellvorstellung in Einklang gebracht werden. Dieser Bereich ist nämlich, wie eigenen Untersuchungen im Rahmen des BMBF Projekts Promorph (Mayerle, et al., 2005) gezeigt haben, hydrodynamisch eher durch starke Gezeitenströmungen und eine vergleichsweise hohe Seegangsbelastung geprägt, beides Elemente also, die einer dauerhaften Ablagerung von Feinmaterial entgegenstehen sollten.

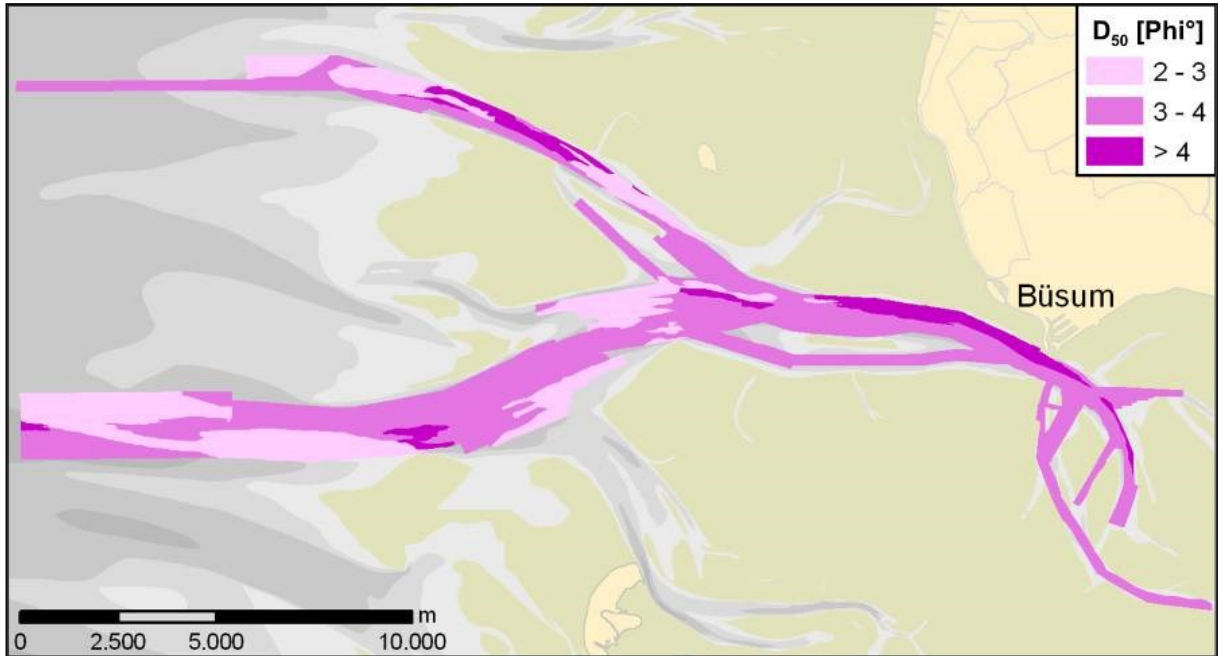


Abbildung 3-28: Mittlere Korngrößen der Sedimente im System der Pieprinnen vor Büsum

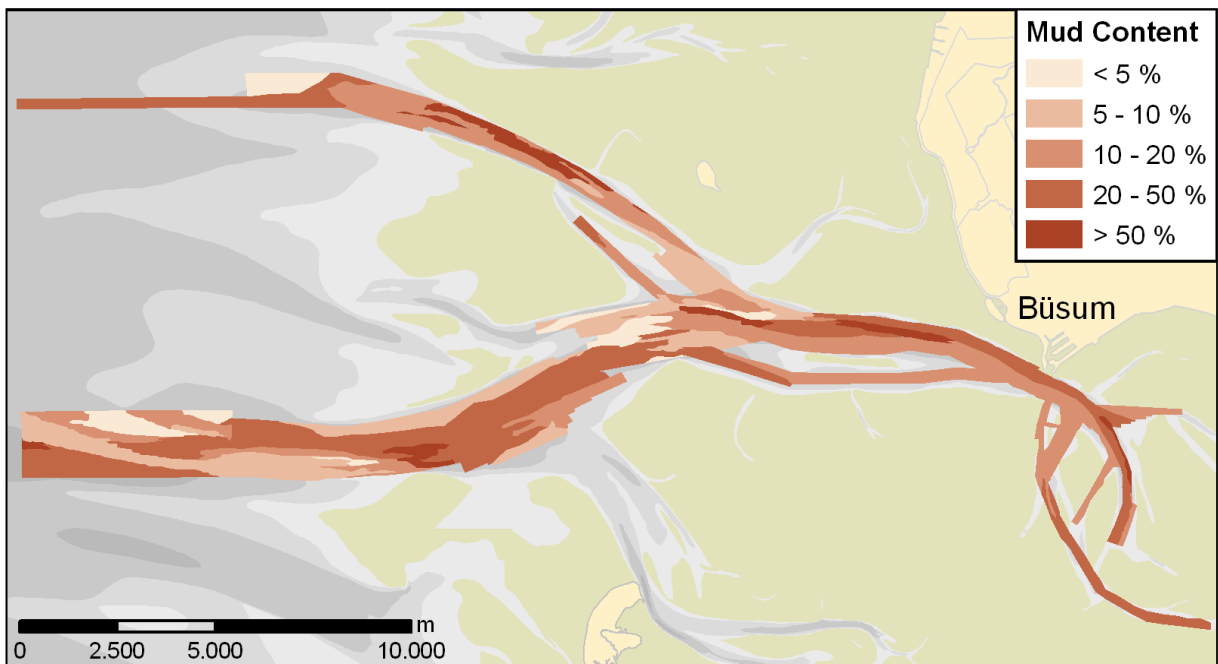


Abbildung 3-29: Anteil der Fraktion < 63 µm (Schlick, Mud) an den Sohl-sedimenten in den Pieprinnen vor Büsum

Allerdings wird der Seegrund hier, wie in anderen Teilen der Pieprinnen auch, stellenweise von konsolidierten, feinkörnigen Ablagerungen eingenommen. Meist handelt es sich dabei um sogenannten Dithmarscher Klei, der stratigraphisch ins mittlere Holozän (Dittmer, 1938) zu stellen ist. Diese Sedimente finden sich in tiefen Abschnitten der Rinne nahe Büsum und beiderseits des Tertiusandes in der Norder- und Süderpiep. Dort bilden sie nach Ricklefs &

Asp (Ricklefs, et al., 2005) aufgrund ihrer vergleichsweise höheren Erosionsstabilität zwar eine Art Gleitbahn für morphodynamische Abläufe, können aber, da sie eben auch erosiven Abläufen ausgesetzt sind, gleichzeitig als Quelle für feinkörnige Sedimente angesehen werden. Auch stellt sich in diesem Zusammenhang die Frage, in wie weit diese Ablagerungen durch einen neuerlichen Kontakt zur Wassersäule wieder aufweichen können, wodurch sie in Sonaraufnahmen kaum und selbst als makroskopische Probe schwer von rezemem Schlick zu unterscheiden sind.

Dort wo Klei am Gewässergrund anstehend vorkommt, ist er jedoch eindeutig zu detektieren, da die Seitensichtsonardaten dieser Gebiete charakteristische Signaturen aufweisen (Abbildung 3-30). Allerdings enthalten die hier entnommenen Sedimentproben häufig einen nennenswerten Anteil an Sanden, was darauf hindeutet, dass diese Flächen von Schleiern mobilen Sandes überdeckt bzw. überwandert werden. Diese Sandschichten können Mächtigkeiten von mehreren Dezimetern annehmen und dabei Rippel- und Dünenformen ausbilden, wobei allerdings oft der Klei in den Tälern der Sohlformen wieder sichtbar wird ("Hungerrippel").

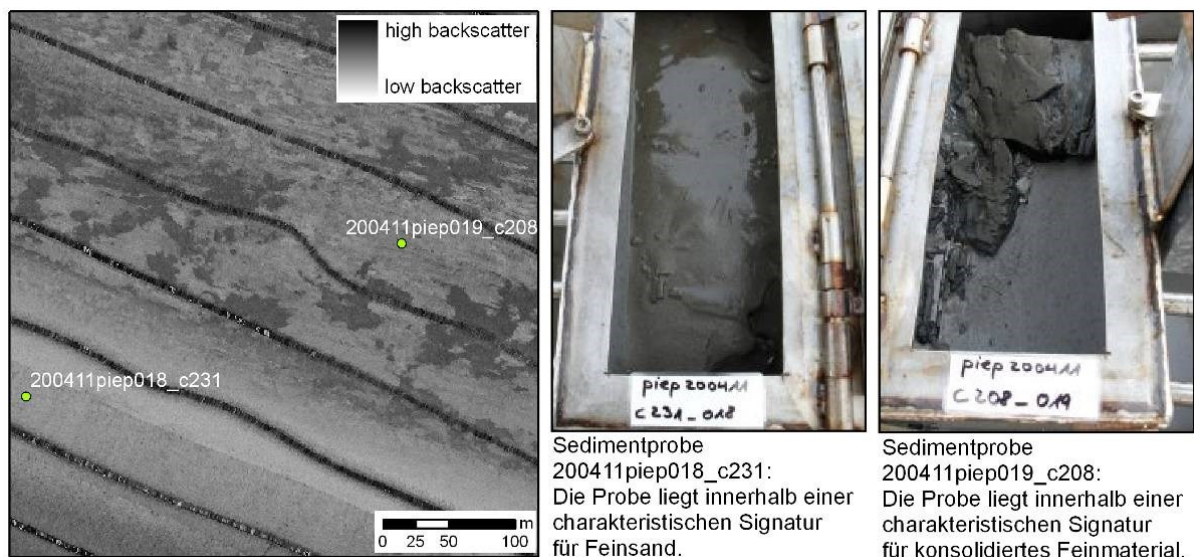


Abbildung 3-30: Beispiele für typische Sonar-Signaturen von Feinsand und Klei mit Fotografien von Sedimentproben aus diesen Faziesräumen

Wie ein Vergleich mit den Ergebnissen einer Sonar Untersuchung aus dem Jahre 2000 zeigt Ricklefs (Ricklefs, et al., 2005), scheint die Größe der Flächen mit anstehendem Klei besonders in der Norderpiep abzunehmen (Abbildung 3-31). Dies mag einerseits im Zusammenhang mit morphologischen Umgestaltungsvorgängen in dem Gebiet (z.B. Veränderungen des Blauortsandes) stehen, wie sie bei Ricklefs (Ricklefs, et al., 2005) beschrieben werden. Andererseits könnten sich darin auch eine nach wie vor anhaltende Anpassungsreaktion - Eintrag von Sediment in das Tidebecken - auf die in den 1970er Jahren erfolgte Eindeichung der Meldorfer Bucht manifestieren ((Witez, 2002), (Ricklefs, et al., 2005)).

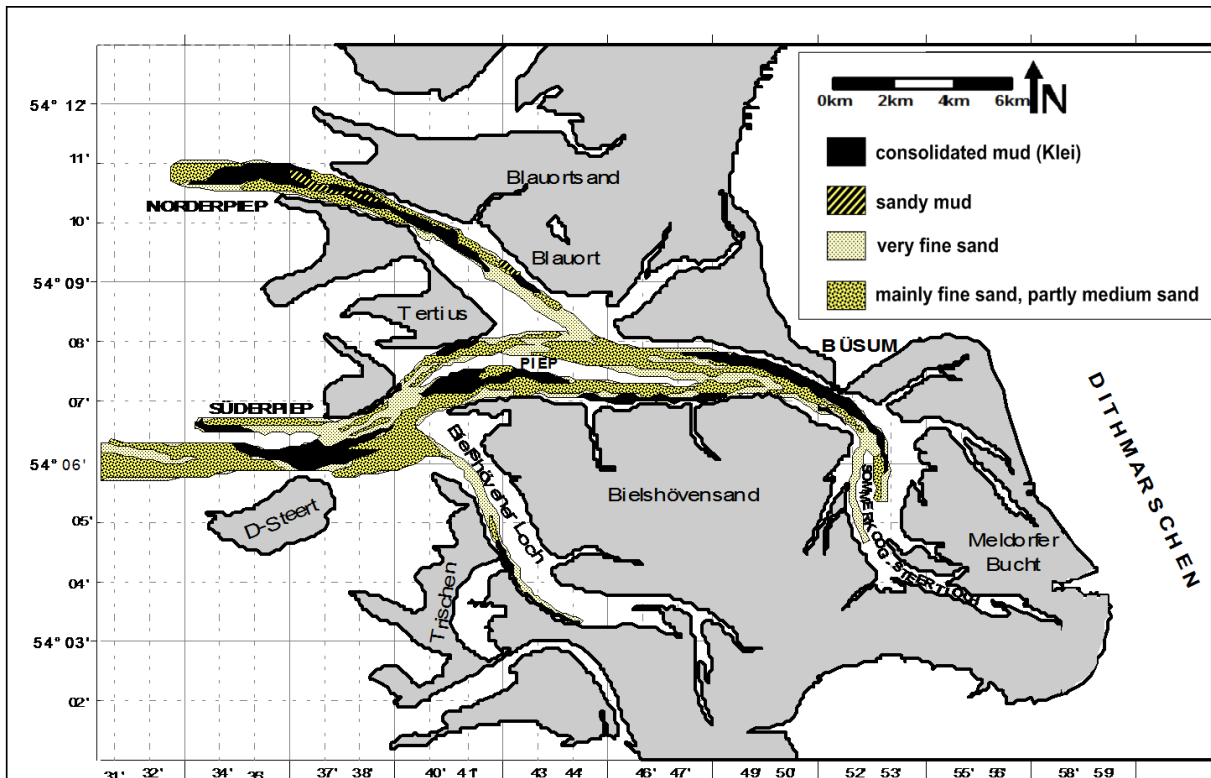


Abbildung 3-31: Übersicht über Flächen mit anstehendem Klei, wie sie 1999 / 2000 durch Seitensichtsonar-Untersuchungen detektiert wurden (verändert nach (Ricklefs, et al., 2005))

Norderhever

Die Abbildung 3-32 fasst die Ergebnisse der Kartierung der Oberflächensedimente der Norderhever zusammen. Das Sedimentinventar dieses Gezeitenstroms zeigt im Gegensatz zu den Pieprinnen im Dithmarscher Wattenmeer ein deutlich breiteres und größeres Korngrößenspektrum. Die Sohle der Norderhever wird über weite Flächen hinweg von groben Feinsanden oder Mittelsanden dominiert. In geringerer Verbreitung kommen auch Grobsande vor. Kiesige oft mit Muschelschalen durchsetzte Ablagerungen sind nur in einem kleinen Bereich am südwestlichen Rinnenrand am Übergang zum Heverstrom zu finden. Insgesamt lässt das sedimenttypologische Verteilungsmuster eine Tendenz zur Kornverfeinerung der Sande in Richtung auf die inneren Abschnitte der Norderhever erkennen (Abbildung 3-32). Dieser Gradient ist auch in der Verbreitungskarte der mittleren Korngrößen (D_{50}) zu erkennen (Abbildung 3-33).

In der Norderhever werden zudem, vor allem im Bereich der Rinnenränder, größere Flächen von konsolidierten Ablagerungen eingenommen. Am Nordrand der Rinne in etwa zwischen Pellworm und der Hallig Süderoog sind diese Ablagerungen zum Teil Grobklastika führend. Dies kann zusammen mit der Tatsache, dass zwischen 1937 und 1939 am Südrand von Pellworm in entsprechender Tiefenlage Geschiebemergel erbohrt wurde, als Indiz dafür angesehen werden, dass hier die tieferen Abschnitte des Rinnenrandes aus Geschiebemergel aufgebaut werden.

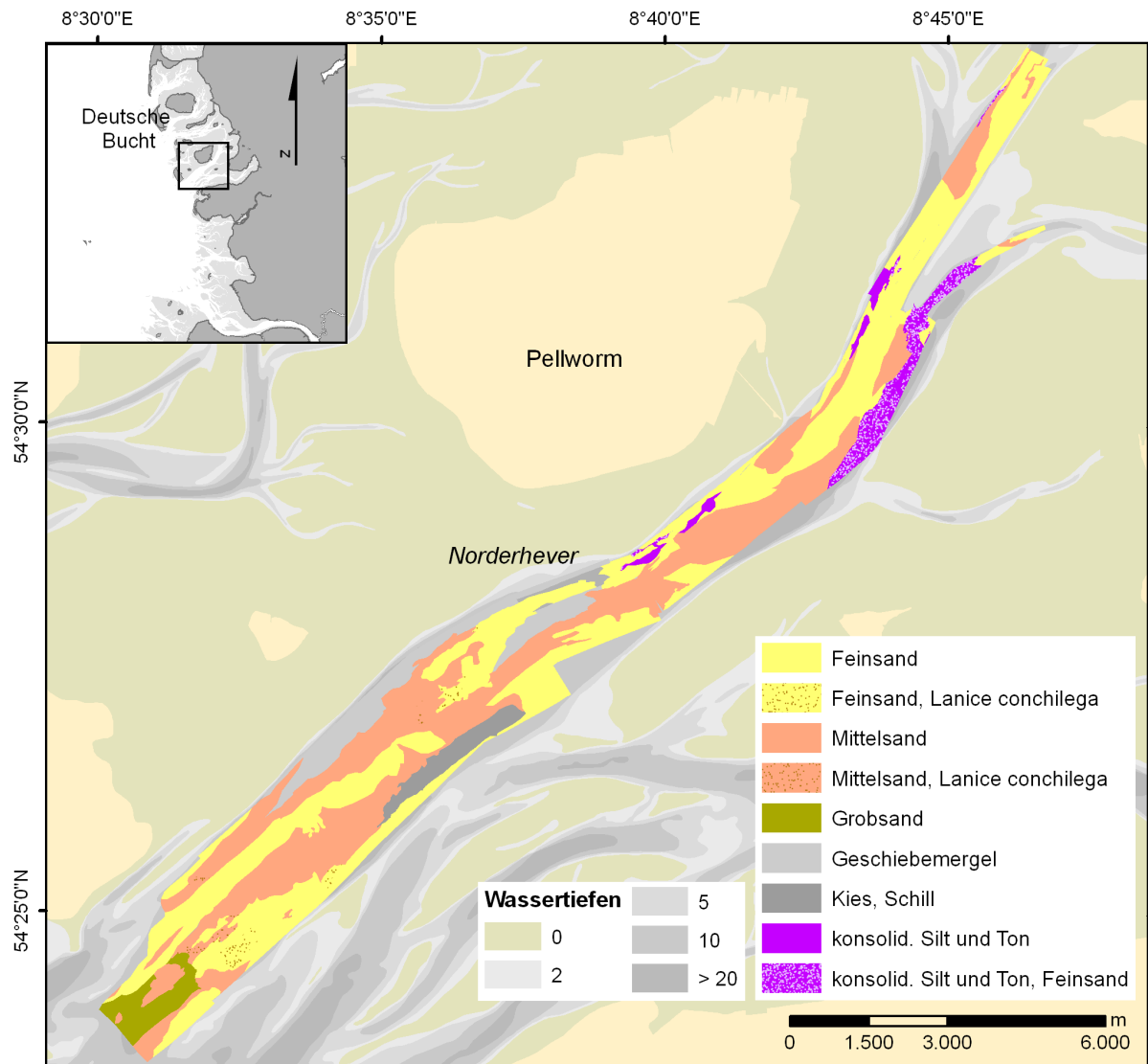


Abbildung 3-32: Karte der Sedimenttypen in der Norderhever. (Silt und Ton < 63 µm, Feinsand 63 - 200 µm, Mittelsand 200 - 630 µm, Grobsand 630 - 2000 µm.)

Aufgrund der stratigrafischen Verhältnisse im Gebiet ((Temmler, 1995), (Ahrendt, 2006)) kann allerdings auch nicht ausgeschlossen werden, dass es sich bei einigen in der Rinne mit dem Seitensichtsonar detektierten konsolidierten Sedimenten um Ablagerungen des Eem, also der vorangegangenen Warmzeit, handelt. Durch Proben konnte dies allerdings nicht belegt werden. Das liegt zum Teil daran, dass auf allen konsolidierten Ablagerungen, seien es nun Geschiebemergel der Saaleiszeit, eemzeitliche Tone und Schluffe oder auch Kleivorkommen holozänen Alters, mobile Sandauflagen variabler Mächtigkeit vorkommen. Diese überdecken die bindigen Schichten teilweise in fleckhafter Verbreitung, als Schleier, als dünne Schicht oder auch als unvollständig ausgebildete Transportkörper und sind dann häufig das einzige Sediment, dass in einer Greiferprobe zu finden ist, obwohl die Meeresbodenoberfläche im Sonarbild klar und eindeutig durch die darunter liegenden älteren Sedimente geprägt ist.

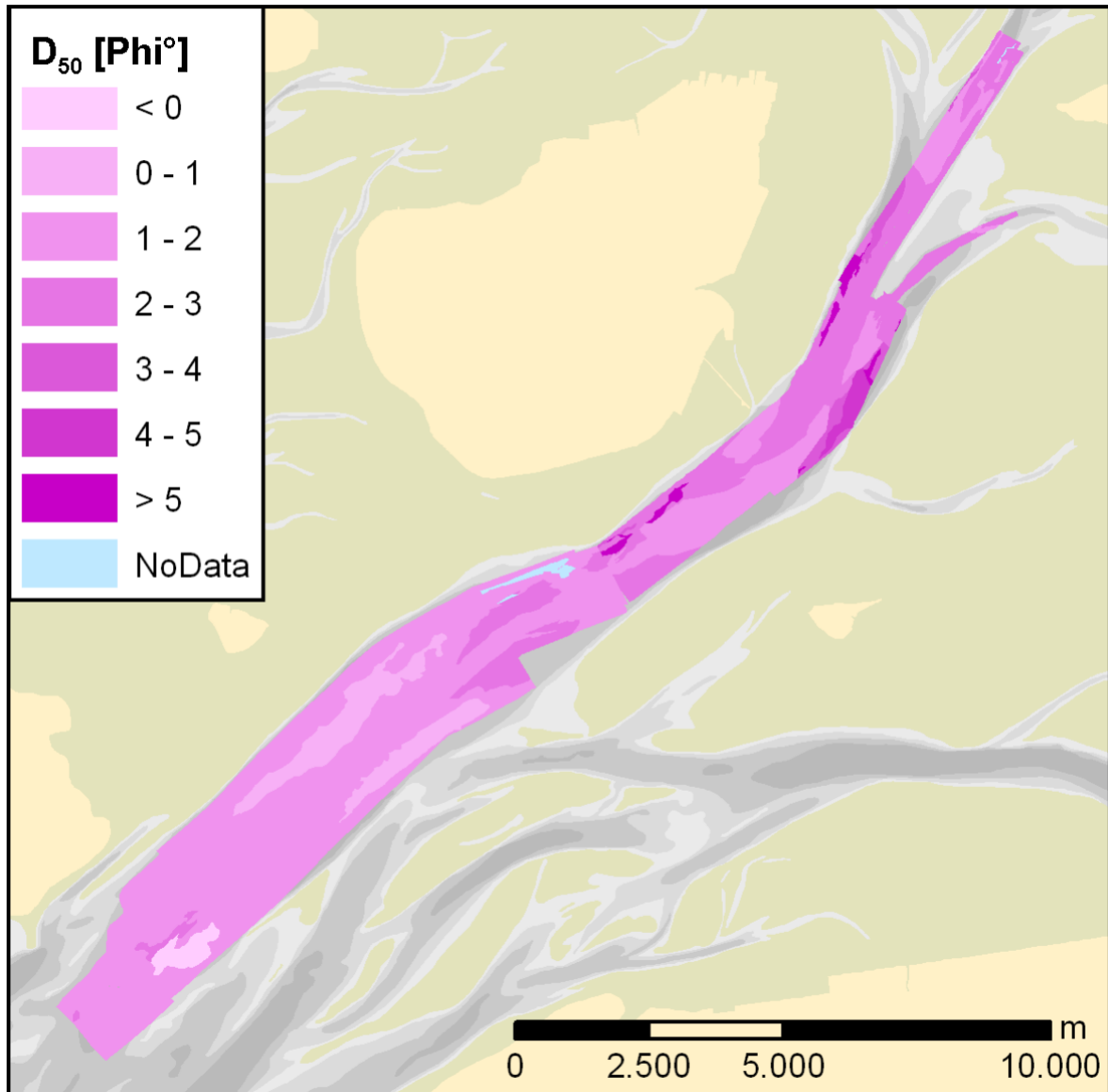


Abbildung 3-33: Mittlere Korngrößen (D_{50}) im Gezeitenstrom Norderhever. Die im Bereich von Geschiebemergelflächen (vgl. Abbildung 3-32) angegebenen Werte, beziehen sich auf mobile Sandauflagen, die über diesen älteren Ablagerungen zu finden sind

Aufgrund des geologischen Aufbaus des Hevergebietes (Temmler, 1995), (Ahrendt, 2006) sowie aufgrund der nach eigenen Messungen und Beobachtungen getroffenen Einschätzung, dass sich die Strömungsverhältnisse in der Norderhever nicht deutlich von denen der Dithmarscher Pieprinnen unterscheiden, wird davon ausgegangen, dass die gröberen Sande der Norderhever weitestgehend aus der lokalen Aufarbeitung pleistozäner Ablagerungen stammen und weniger als Resultat jener großräumigen holozänen Materialumlagerungen zu sehen sein, die in Summe zum Aufbau des Sedimentkörpers des Wattenmeers geführt haben.

Alle Sande im System der Norderhever-Rinne unterliegen jedoch einer ständigen Umlagerung. Dies äußert sich einerseits in der Durchmischung mit rezentem Schill und andererseits in der Ausbildung ausgeprägter Sohltransportkörper wie Großrippeln und subaquatischen Dünen. Für den inneren Abschnitt der Norderhever wurde auf der Basis der Sonaraufzeichnungen eine kategorisierende Vermessung der Transportkörper durchgeführt. Entsprechend

ihres Kammverlaufes sowie ihrer Wellenlänge werden folgende Rippeltypen unterschieden: Geradlinig regelmäßige sowie unregelmäßige, d.h. gebogene oder unterbrochene Rippeln mit Kammabständen unter 5 m (Höhe bis 0,3 m) bzw. über 5 m (Höhe bis ca. 1 m).

Wie ein Vergleich der Abbildung 3-32 und Abbildung 3-33 mit der nachfolgenden Abbildung 3-34 erkennen lässt, zeigt das Verteilungsmuster der ausgewiesenen Rippeltypen eine gute Übereinstimmung mit dem der Sedimente. Danach kommen wie erwartet die ausgeprägtesten Sohltransportkörper dort vor, wo in ausreichender Menge Mittelsande vorhanden sind. In Gebieten mit Feinsand fallen die Sohlformen dagegen kleiner aus. In Gewässerabschnitten mit Mangel an mobilen Sanden, wie z.B. im Bereich älterer, konsolidierter Ablagerungen, gibt es entweder gar keine oder nur Mangelformen ("Hungerrippel").

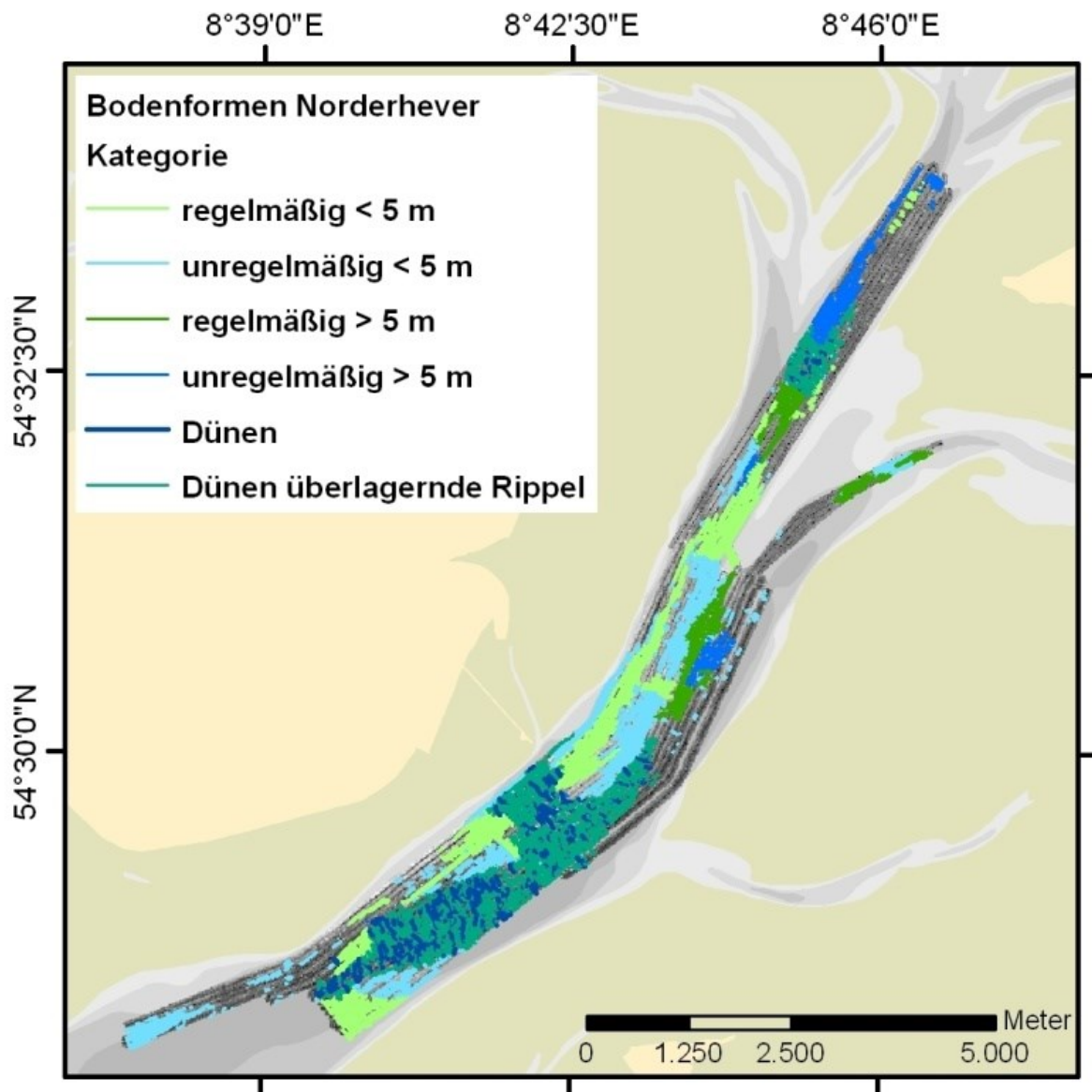


Abbildung 3-34: Verbreitung klassifizierter Sohltransportkörpern im inneren Bereich der Norderhever

3.1.4 Ergebnisse der Sedimentklassifikation „Vorstrand/ Schelf“

Das Arbeitsgebiet des Sylter Aussenriffes wurde ausgewählt, da es für weite Bereiche des Nordseeschelfes repräsentativ ist. Der Untergrund ist durch glaziale Ablagerungen geprägt (Köster, 1979), die teilweise nur von einer dünnen Decke holozäner Sedimente überdeckt

sind ((Zeiler, et al., 2000a), (Zeiler, et al., 2000b)). Eine ähnliche Situation liegt im Bereich des Borkum Riffgrundes (Ostfriesland) vor. Die in **AufMod** erarbeiteten Ergebnisse haben daher für weite Bereiche des Nordseeschelfs Gültigkeit.

Der Anteil $< 63 \mu\text{m}$ (Silt und Ton) war mit Ausnahme von wenigen Proben im Randbereich von Sorted Bedforms und *Lanice conchilega* Feldern (vgl. Kapitel 3.3) generell bei allen Proben sehr gering und lag meist unterhalb 1%. Dieser Anteil wurde abgeschlämmt und verworfen. Auf die Bestimmung von C_{org} wurde verzichtet, da diese Substanzen in der Regel an die Fraktion $< 63 \mu\text{m}$, die nur untergeordnet vorkommt, gebunden sind. Die Nutzung des HELCOM-Greifens in sandigen Sedimenten führte dazu, dass häufig sehr rasch das überstehende Wasser abfloss. Zudem konnte eine Störung des Kornverbandes durch die eingesetzte Entnahmetechnik nicht ausgeschlossen werden. Porositätsmessungen entfielen daher.

Die Seitensichtsonaraufnahmen kombiniert mit Ergebnissen der Sedimentanalysen spiegeln für die erfassten Flächen des Untersuchungsgebietes „Schelf / Vorstrand“ eine aus Fein- bis Grobsanden aufgebaute Sedimentoberfläche wider, die teilweise durch sehr scharfe, sedimentologische Grenzen geprägt ist (s. Abbildung 3-35). Im gesamten kartierten Gebiet überwiegen Feinsande. Diese werden vor allem im nördlichen Bereich von Bändern gröber sandiger Sedimente durchzogen. Die einzelnen Sedimentfaziesbereiche zeigen sehr häufig ein WNW – ESE gerichtetes Streichen. Die Vermutung liegt nahe, dass dies durch im oberflächennahen Untergrund liegende pleistozäne Ablagerungen vorgegeben ist. Sehr häufig treten über den gesamten kartierten Bereich sogenannte Sorted Bedforms in unterschiedlichen Größenordnungen auf (s. hierzu die detaillierten Ausführungen in Kapitel 3.2.3). Sie sind daher in Abbildung 3-36 gemeinsam mit den jeweiligen Sandfaziesbereichen ausgewiesen. Das Bild der hier dargestellten Sedimentfaziesverteilung erscheint sowohl gegenüber Abbildung 3-35, als auch gegenüber der unterlegten BSH-Karte 2900 wesentlich differenzierter. Ein überwiegendes WNW – SSE Streichen der Strukturen bleibt aber erhalten.

Aufgrund biologischer Einflussfaktoren war die manuelle Faziesklassifikation, basierend auf SSS-Mosaiken in bestimmten Bereichen des Arbeitsgebietes westlich von Sylt nach 2010 problematisch. Grund dafür war die dichte Besiedlung weiter Meeresbodenbereiche mit dem Bäumchen-Röhrenwurm *Lanice conchilega* (vgl. Kapitel 3.3). Diese Besiedlung trat in der Kartierung in 2010 noch nicht auf. Durch die Art der Röhrenbildung, bei der dieser Wurm Sandkörner einbaut, sowie die Tatsache, dass diese Röhren aus dem Meeresboden herausstehen, werden die akustischen Eigenschaften der Meeresbodenoberfläche stark beeinflusst. Feinsandbereiche in denen der Wurm bevorzugt Kolonien bildet, erscheinen besonders in geringer aufgelösten SSS-Mosaiken identisch zu nicht besiedelten Grobsandbereichen (Heinrich, et al., 2013).

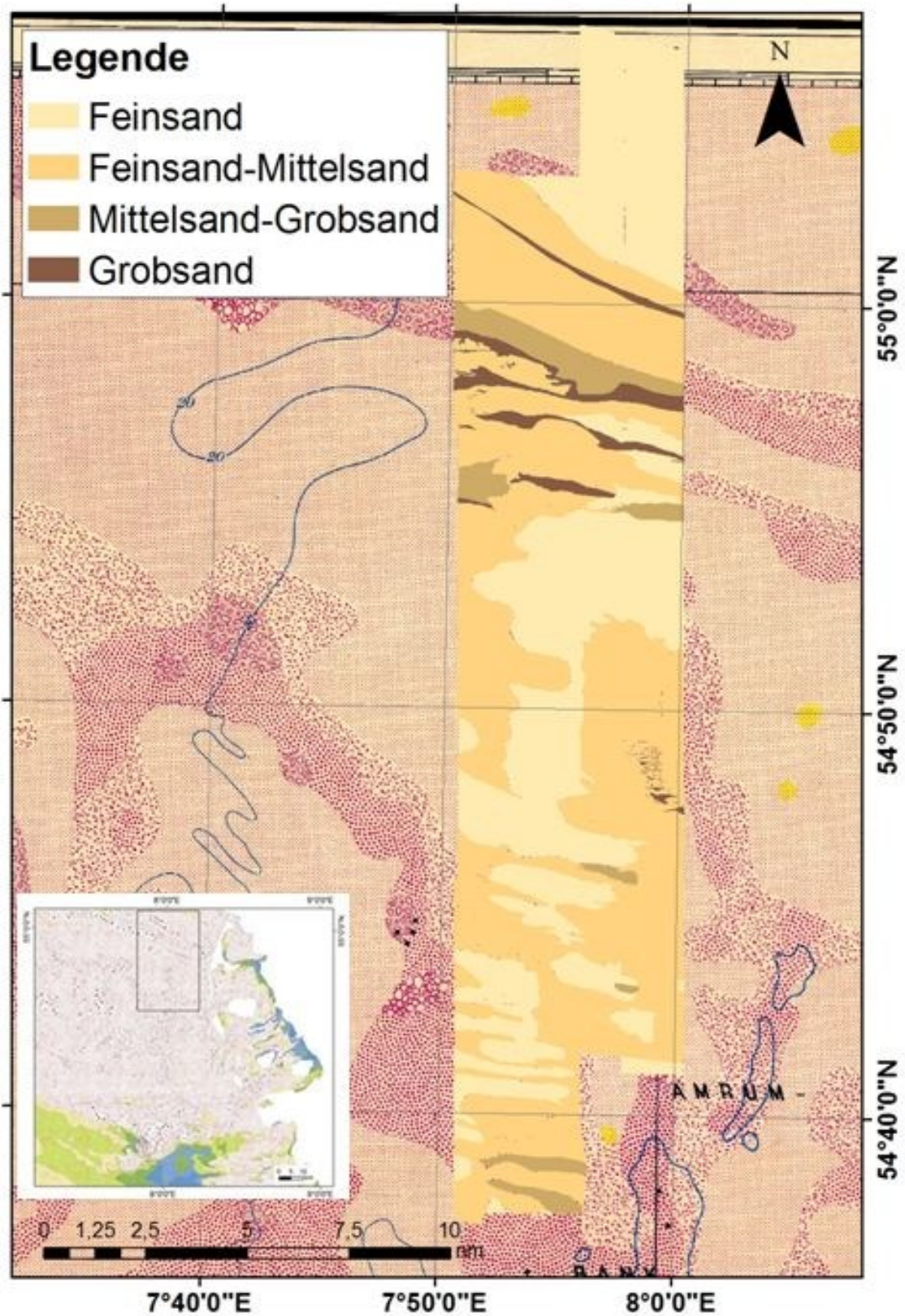


Abbildung 3-35: Grobe Einteilung in Sedimentklassen auf der Basis der in 2010 - 2012 durchgeführten Seitensicht-Sonarkartierung (projiziert auf die BSH-Karte Nr. 2900; Kartenausschnitt: s. Übersichtsabbildung unten links)

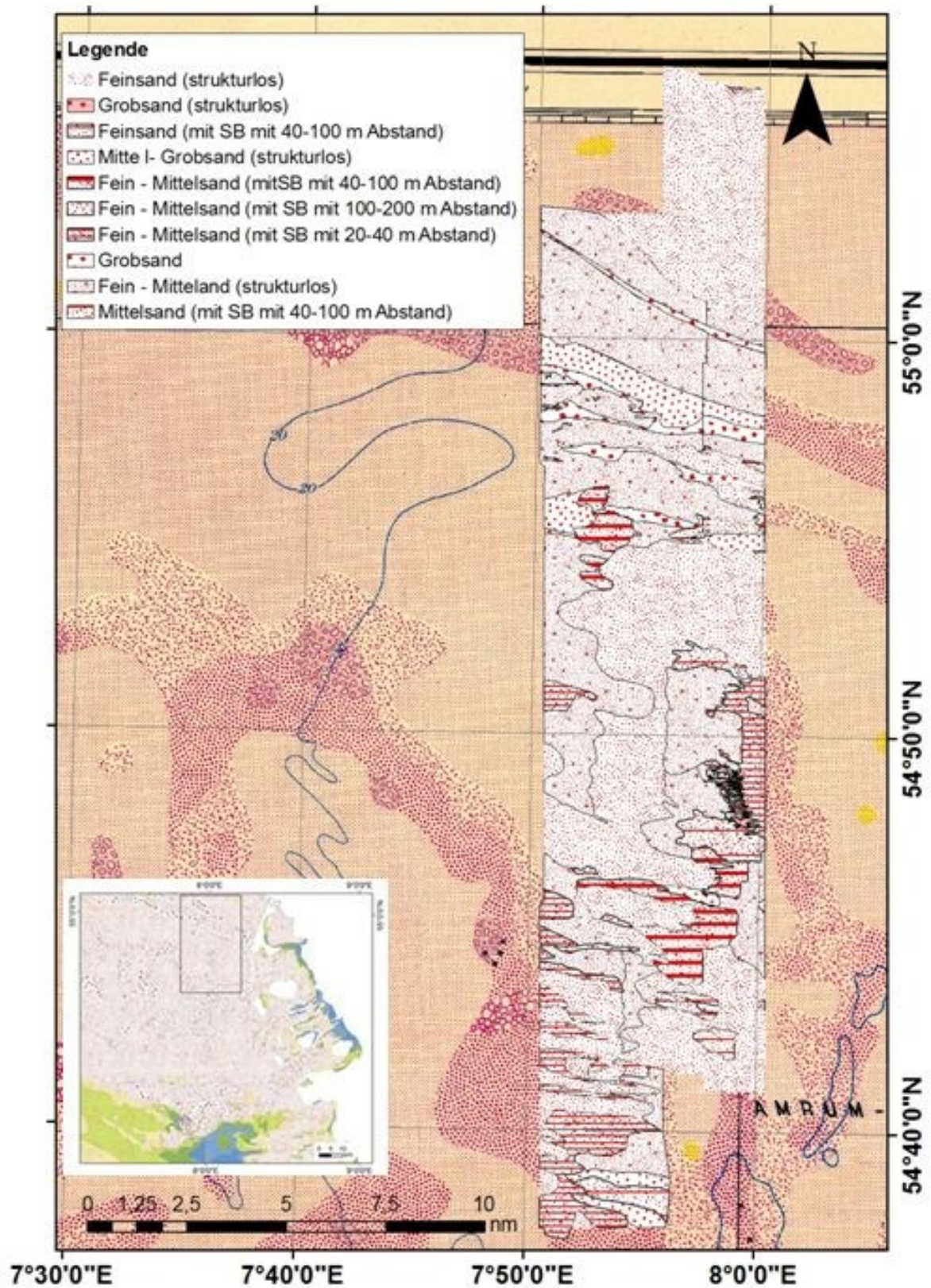


Abbildung 3-36: Sedimentklassen auf der Basis der in 2010 - 2012 durchgeführten Seitensichtsonar Kartierung. Neben den Sedimentklassen sind auch die Gebiete eingetragen, in denen Sorted Bedforms beobachtet wurden

3.1.5 Ergebnisse zu den Zungenriffen vor der Insel Spiekeroog

Neben den in *AufMod* erhobenen Daten wurden zusätzlich zwei hochauflösende bathymetrische Vermessungen aus den Jahren 2003 und 2007 auf den Zungenriffen vor der Insel Spiekeroog herangezogen (s. Abbildung 3-36). Die Zungenriffe streichen in NNW-SSE (280° bis 297°) in einer Wassertiefe von 9 bis 20 m unter N.N. Die beiden nördlichen Riffe haben eine Gesamtlänge von 30 km und sind etwa 1 km breit und enden im Seegatt der Harle. Die Profilquerschnitte durch die Riffe weisen ein asymmetrisches Profil auf, wobei das seewärts etwas steiler ($0,7^\circ$) und landwärts etwas flacher ($0,4^\circ$) einfällt. Die südlichen Zungenriffe sind einige Kilometer (max. bis zu 10 km) lang und einige hundert Meter breit und enden mit ihrem südlichen Ende direkt im Küstenvorfeld von Spiekeroog (vgl. Abbildung 3-36). Während die bathymetrischen Daten beider älteren Vermessungen für die kleineren Zungenriffe eine deutliche Verlagerung nach Osten ausweisen, bleiben die großen Zungenriffe davon unberührt, was auf ein sehr stabiles hydrodynamisches Gleichgewicht schließen lässt.

Die in *AufMod* erhobenen Daten bestätigen die Umlagerung der kleinen Riffe mit 20 m pro Jahr, während sich die großen Zungenriffe leicht nach Norden verlagert haben (vgl. Abbildung 3-38). Die hoch aufgelöste Zeitserie ergab eine Verlagerungsrate von 5 m pro Jahr, mit dem sich das Sediment über die großen Riffe bewegt (vgl. Abbildung 3-38).

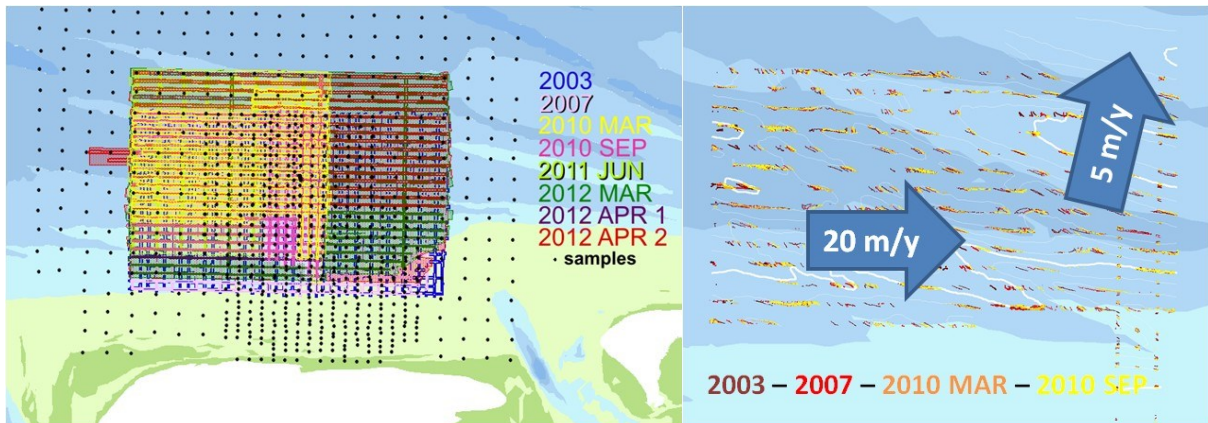


Abbildung 3-37: Verfügbare Datensätze aus der Zeit vor und während *AufMod-G*

Abbildung 3-38: Vergleich der Bathymetrie von 2003 und 2010 inkl. Änderungsvektoren der Isobathen (Abstand 1m) basierend auf Fächerecholot-Daten. Die verschiedenen Messzeiträume sind durch unterschiedliche Farben gekennzeichnet

Der Prozess der Riffumlagerung ist sehr komplex im Hinblick auf den anstehenden Geschiebemergel als Lieferant für Reliktsedimente. Er enthält zwar weniger erodierbares, dafür aber gröberes Sediment im Vergleich zum auflagernden, feineren Holozän. Die Karte zur Verteilung der Oberflächensedimente als Interpretation aus den Seitensichtsonar (SSS)-Daten zeigt einen küstennormalen Trend in der Korngrößenzusammensetzung (Abbildung 3-39). Die kleinen Zungenriffe bestehen überwiegend aus Feinsand mit wenig Grobsand. Der obere „Shoreface“ von Spiekeroog besteht bis in die Rinnen hinein aus feinem Sand, die Rinnensohle dagegen besteht aus Schlack. Die tiefer liegenden landwärtigen Bereiche der inneren Zungenriffe bestehen aus Mittel- bis Grobsand mit wenigen, einige Zentimeter großen Geröllen, die sich gut im Rückstreusignal des Seitensichtsonars darstellen. Die höher liegenden, landwärtigen Bereiche bis hin zur Riffkrone sind durch Mittelsand charakterisiert. Die seewärtige Flanke der inneren Zungenriffe ist mit Mittel- bis Feinsand bis hinunter an die Riffsohle bedeckt. Auch hier finden sich teilweise dünne Schlickauflagen.

Die landwärtigen Bereiche der äußeren (seewärtigen) Riffe ähneln in den Sedimenten denen der inneren Zungenriffe. Auch hier bestehen die unteren Teile der Flanken überwiegend aus Grobsand mit eingeschalteten Geröllen und Mittel- bis Feinsanden während die Riffkrone von Mittelsand dominiert wird. An den äußeren Flanken nimmt die Korngröße von Mittelsand an der Krone bis zu Feinsand an der Rinnenbasis ab. Innerhalb von zwei Jahren (März 2010 bis April 2012) zeigen sich nur geringfügige Veränderungen in der generellen Verteilung der Sedimente, was auf stabile hydraulische Bedingungen hinweist. Die seismischen Daten belegen die enge Abhängigkeit von Oberflächensedimenten und Untergrund. Die groben Fraktionen in den tiefer liegenden Bereichen der landwärtigen Flanken der äußeren Riffe lassen anstehenden Geschiebemergel als harten Reflektor in der Seismik erkennen, auf dem eine bis zu 3 m mächtige, bewegliche Sandlage liegt (Abbildung 3-40).

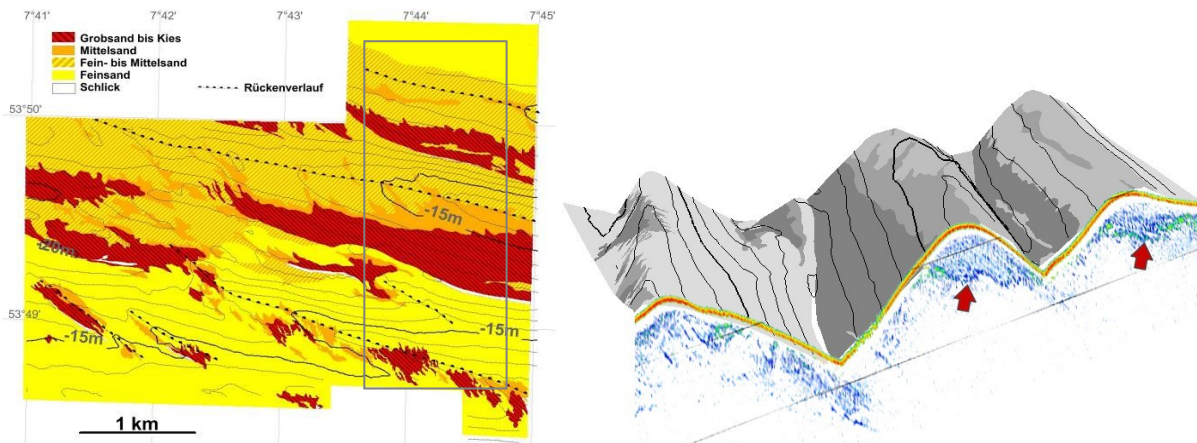


Abbildung 3-39 (links): Sedimentverteilung auf den Zungenriffen seewärts der Insel Spiekeroog auf der Basis von Seitensichtsonardaten für das Jahr 2010

Abbildung 3-40 (rechts): 3D-Rekonstruktion der bis zu 3 m mächtigen Auflage von Lockersedimenten mit Hilfe von Seitensichtsonar- und Subbottom-Profilier-Daten (Lokalität siehe Rechteck Abbildung 3-39)

Der Vergleich der Bathymetrien von 2003 zu 2010 ergibt eine Erosionsrate von 0,3 m an den landwärtigen Flanken in einem Zeitraum von über acht Jahren. Ein Betrag, der auf den seewärtigen Flanken akkumuliert wurde. Dies dokumentiert sich auch in einer zunehmenden seewärts gerichteten Asymmetrie der Riffe. Die Erosion ist das Produkt eines längerfristigen Sortierungs- und Abreicherungsprozesses von feinkörnigem Material (= Verlust). Volumetrisch betrachtet sind Grobsedimentflächen mehr durch Erosion (Volumenverlust) gekennzeichnet, während Flächen mit akkumulierten feineren Sedimenten von der Erosion profitieren (vgl. Abbildung 3-41).

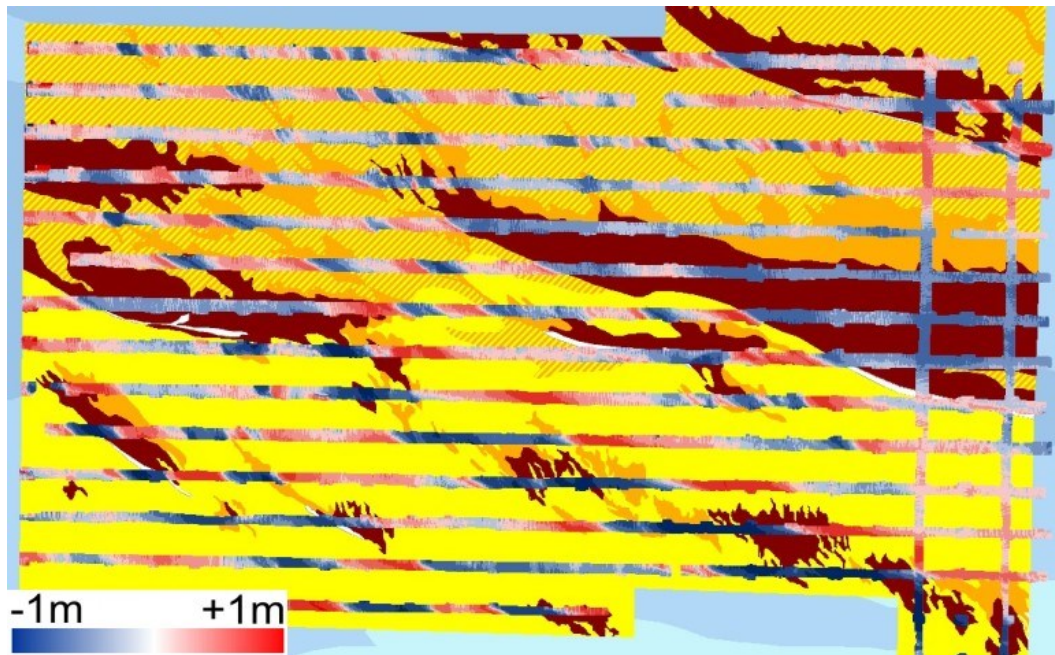


Abbildung 3-41: Sedimentverteilung vor Spiekeroog mit den überlagerten Raten von Erosion (blau) und Akkumulation (rot) entlang von Transekten auf der Basis der Volumenbilanz zwischen 2003 und 2010

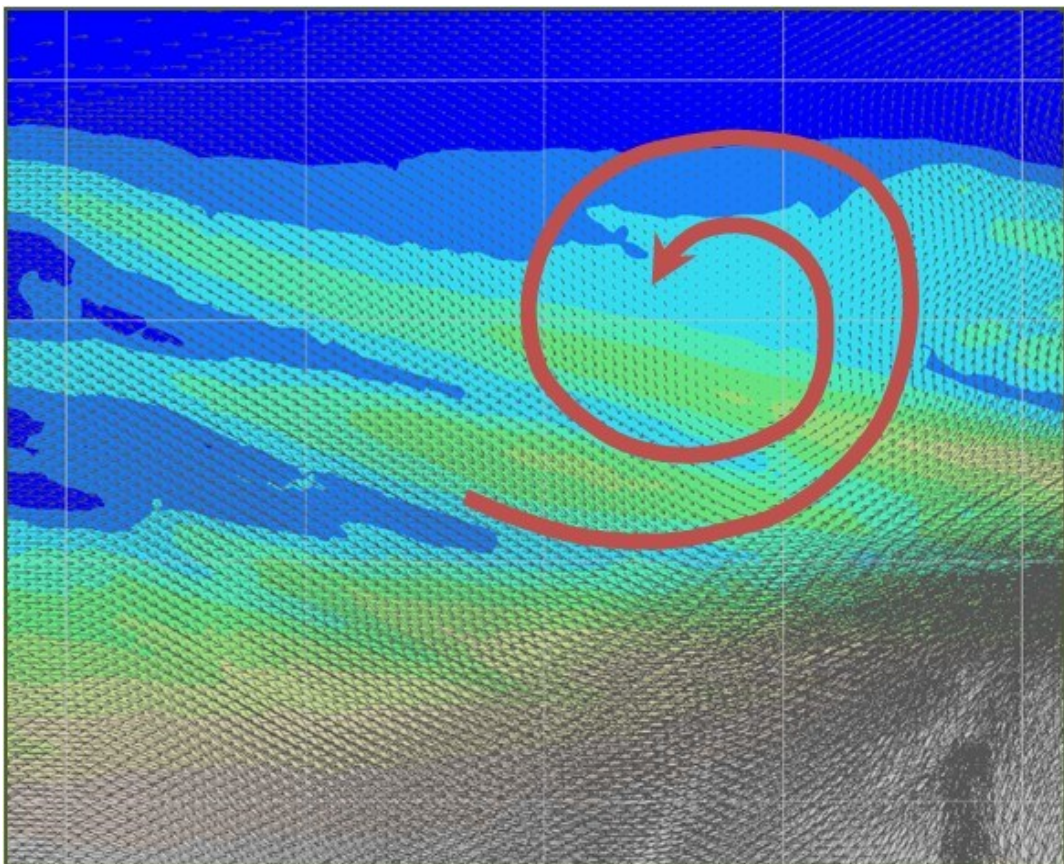


Abbildung 3-42: Vektoren des bodennahen Sedimenttransports, basierend auf einer gezeitgetriebenen Simulation über ein Jahr (von *AufMod-D* zu Verfügung gestellt) - Die rote Spirale weist auf einen in Zellen organisierten Transport hin, der bisher im wieder zitierte Küstenlängstransport lässt sich auf Grund der gewonnenen Ergebnisse ausschliessen und wird vom Modell "bestätigt"

Der Vergleich zwischen 2003 und den aktuellen Arbeiten in **AufMod-G** erlaubt ein besseres Verständnis der Morphodynamik und Hydrographie auf mindestens halbdekadischer Zeitachse. Kurzfristige Veränderungen für die großen Zungenriffe konnten aufgrund der systembedingten Auflösung von 5 Höhenzentimeter, nicht nachgewiesen werden. Daher wurde in den Modellläufen aus **AufMod-D** nur Augenmerk auf die Langzeitveränderungen gerichtet. Ein rein Gezeiten getriebenes Modell mit einem Jahr Laufzeit wurde auf die bestehenden Bathymetriedaten aufgesetzt. Die Ergebnisse des mehr in Zellen angelegten Transportweges (s. Abbildung 3-42) deckt sich mit anderen Untersuchungen aus dem seewärtigen Seegatt der Otzumer Balje.

Da sich keine eindeutigen Tagestrends im Transport ausweisen lassen, gehen wir davon aus, dass die großen Verlagerungen rein Wind angetrieben sind. Dazu wurden Einzelereignisse in Form von Stürmen in ihrer Auswirkung untersucht. Vergleiche bathymetrischer Daten vom 25. März bis zum 30. Mai 2012, vom 2. bis zum 4. April 2012 (vor Sturm) und vom 23. bis zum 27. April 2012 (nach Sturm) zeigen räumliche Tiefenänderungen von ± 15 cm (Abbildung 3-43). Unter Berücksichtigung von Messungenauigkeiten zeigte sich Erosion von Sediment im tieferen nördlichen Küstenvorfeld, das vermutlich im flacheren Teil akkumuliert wurde. Generell zeigen die Zungenriffe Erosion an den landwärtigen Flanken, abgelagert wird nur auf den Riffkronen und an den seewärtigen Flanken. Generell fand der Export in Flutstromrichtung nach Osten hin statt (vgl. Abbildung 3-44).

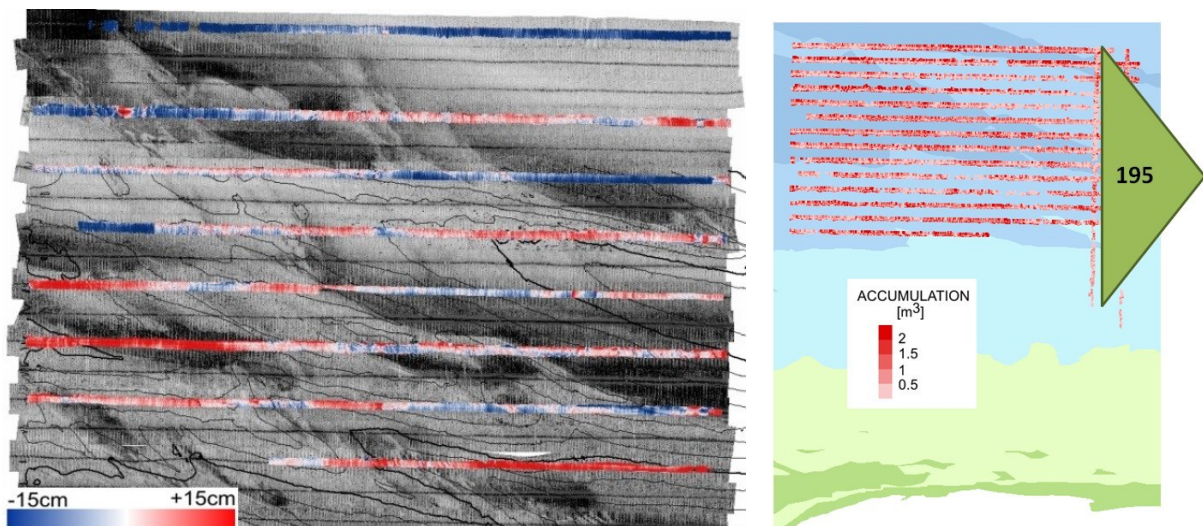


Abbildung 3-43 (links): Einfluss von Einzelereignissen (am Beispiel 31.03.2012) auf die Morphologie der Zungenriffe im Seitensichtsonarbild – überlagert sind Volumendifferenzen (Erosion in blau, Akkumulation in Rot)

Abbildung 3-44 (rechts): Sedimentbilanz über einen 6-Monats-Zeitraum (03-09/2010) am Beispiel eines Querprofils – Auf der Länge von 3 km mit einer Breite von 1 m wurden in einem halben Jahr 195 m³ Volumen in östliche Richtung exportiert

3.2 Vergleich der **AufMod**-Ergebnisse mit bestehenden Kartierungen

Zwischen 1964 und 1976 wurden etwa 25.000 Sedimentproben im Bereich der deutschen Bucht entnommen. Auf Basis der Information aus diesen Proben sowie ergänzend mittels Sedimentechogrammen (2000 Seemeilen), Seitensichtsonar-Aufnahmen und etwa 10.000 Unterwasserfotografien entstand die Karte der *Sedimentverteilung in der Deutschen Bucht* (Nr. 2900) nach Figge (Figge, 1981), im Maßstab 1:250.000, die heute als Figge-Karte bekannt ist. Diese Karte basiert auf 8 Kartenblättern im Maßstab 1:100.000, die am BSH digital erhältlich sind, und im Folgenden ebenfalls als Figge-Karten bezeichnet werden, mit

der Angabe auf welchen Maßstab sich die Erläuterungen beziehen. Zwischen dieser Kartierung und der vorliegenden **AufMod**-Kartierarbeiten gibt es einige methodische Unterschiede, die hier kurz erläutert werden.

Die Figge-Karte gibt Aufschluss über die Sedimentzusammensetzung der obersten 10 cm des Meeresbodens, während im Rahmen von **AufMod** insbesondere die obersten 4 cm des Sediments untersucht wurden. Die Figge-Karte wurde in erster Linie auf Basis von Korngrößeninformationen (Medianwert, Sortierung, Schiefe) diskreter, auf einem mehr oder minder dichten Raster entnommener Proben erstellt. Die **AufMod**-Kartierungen hingegen beruhen in erster Linie auf flächendeckenden Seitensichtsonaraufnahmen, die u.a. mittels Informationen aus gezielt entnommenen Sedimentproben („Groundtruthing“) in Sedimentverteilungskarten überführt wurden. Auf diese Weise ist eine sehr viele größere räumliche Differenzierung erreicht worden. Auch ist die räumliche Verortung deutlich verbessert worden. Musste in den 1960-70er Jahren meist noch Decca mit Ungenauigkeiten von bis zu mehreren hundert Metern als Ortungsverfahren eingesetzt werden, so finden heute GPS Systeme mit Genauigkeiten im Meter- bzw. Zentimeterbereich Verwendung.

Weitere Unterschiede bestehen in der Behandlung von "Festgestein", sowie konsolidierten feinkörnigen Sedimenten. In der Figge-Karte wird "Festgestein" durch die Kies-Signatur symbolisiert, da beobachtet wurde, dass in weiten Gebieten konsolidierte präholozäne Ablagerungen durch mehr oder weniger dichte Kies- und Steinlagen ("Restsedimente") bedeckt sind. Im Rahmen von **AufMod** konnte die beschriebene Kiesbedeckung auf konsolidierten Sedimenten vor allem auf dem Schelf beobachtet werden. In den Ästuaren und Watten wurden in den Sonaraufnahmen zwar häufig deutliche Kanten, Schichtausbisse, Rutschungen und ähnliche Hinweise auf verfestigte Ablagerungen gefunden, die dort entnommenen Proben förderten aber, vermutlich ähnlich wie bei der älteren Beprobung durch Figge, zumeist Sande zu Tage. Der Grund hierfür liegt in der Tatsache begründet, dass in den tidedominierten, küstennahen Ablagerungsräumen zwar häufig Bereiche mit konsolidierten, feinkörnigen Ablagerungen (z.B. Klei) vorkommen, diese aber in vielen Fällen von mehr oder minder dünnen Sandlagen überdeckt sind bzw. überwandert werden. Da solche Areale hinsichtlich ihrer Erosionsstabilität anders einzustufen sind als Bereiche die ausschließlich aus Sand aufgebaut sind, sind diese in **AufMod** nur dann als Sandflächen ausgewiesen worden, wenn sich die Sandüberdeckung mit mehr als 4 cm Mächtigkeit und als über weite Abschnitte geschlossen darstellte. In allen anderen Fällen wurden diese Flächen mit deutlichen Hinweisen auf anstehende konsolidierte, feinkörnige Sedimenten auch als solche ausgewiesen.

Schließlich gibt es Unterschiede in der Laboraufbereitung der Sedimentproben. Dem Begleitheft der "Karte der Sedimentverteilung der Deutschen Bucht" Figge-Karte (Figge, 1981) ist zu entnehmen, dass vor der Korngrößenbestimmung lediglich große Muschelschalen bzw. grober Schill entfernt wurden. Aus der Überlegung heraus, für die in **AufMod** eingesetzten Modelle möglichst nur Kornverteilungen der rein mineralischen Fraktion bereit zu stellen, sind bei den Proben aus den Ästuaren und dem Watt alle karbonatischen Anteile entfernt worden. Hierdurch kann es im Vergleich zur Figge-Karte zu Verschiebungen in Richtung feinerer mittlerer Korngrößen kommen.

Nachfolgend werden die in **AufMod** erarbeiteten Sedimentverteilungsmuster jenen der Figge-Karte vergleichend gegenübergestellt. Zu diesem Zweck sind die **AufMod** Daten entsprechend des in der aktuellen digitalen Version der Figge-Karte verwendeten Klassifikationsschemas in Sedimentklassen eingeteilt worden. Die in den Karten gezeigte Legende gibt Aufschluss über das verwendete Schema.

3.2.1 Ästuare

Zur Übersicht werden im nachfolgenden die neuen Ergebnisse der Oberflächensedimentkartierungen jeweils nur für Teilgebiete der untersuchten Ästuare den Daten aus der Figge-Karte (Maßstab 1:100.000) gegenübergestellt. Da nicht auf jede Änderung eingegangen werden kann, sind exemplarisch einige Lokationen herausgegriffen worden, die wie folgt näher betrachtet werden.

Bei Markierung 1 in Abbildung 3-45 steht zu beiden Aufnahmen ein konsolidiertes, überwiegend feinkörniges Sediment an, das partiell von Kiesen und Steinen bedeckt ist. Unter Berücksichtigung methodischer Unterschiede, lassen sich im Kartenvergleich eine flächenmäßige Verkleinerung dieses Bereiches ausmachen. Da nicht davon auszugehen ist, dass die in der Figge-Karte als Festgestein definierten Ablagerungen in größeren Mengen erodiert wurden, ist hier von Sedimentakkumulation auszugehen, gestützt durch das derzeitige Vorhandensein von Fein- und Mittelsanden in unmittelbarer Umgebung dieses Bereiches.

Markierung 2 wurde von Figge (Figge, 1981) als mittel- bis grobsandiger Bereich auskartiert, der zu neueren Untersuchungen so nicht mehr vorzufinden ist. Auch hier ist eine flächenmäßige Zunahme von Fein- bis Mittelsandablagerungen festzustellen. Insbesondere der Feinsand stammt vermutlich aus der Medemrinne (vgl. Kapitel 3.1.1).

Die bei Markierung 3 auf der Figge-Karte anzutreffenden Oberflächensedimente mit erhöhtem Feinkornanteil spiegeln sich in den neuen Daten nicht wider. Auch südwestlich der Markierung 3, wo auf der Figge-Karte ein kiesiger Bereich vermerkt ist haben sich Änderungen in der Oberflächensedimentverteilung ergeben. Jüngst prägen dort 2 bis 3 Meter hohe, stromab ausgerichtete subaquatische Dünen aus Mittelsanden die Gewässersohle (Abbildung 3-45). Im Umfeld von Markierung 4 ist die Oberflächensedimentverteilung nach Figge (Figge, 1981) räumlich differenzierter ausgewiesen und durch vergleichsweise gröbere Sedimente gekennzeichnet.

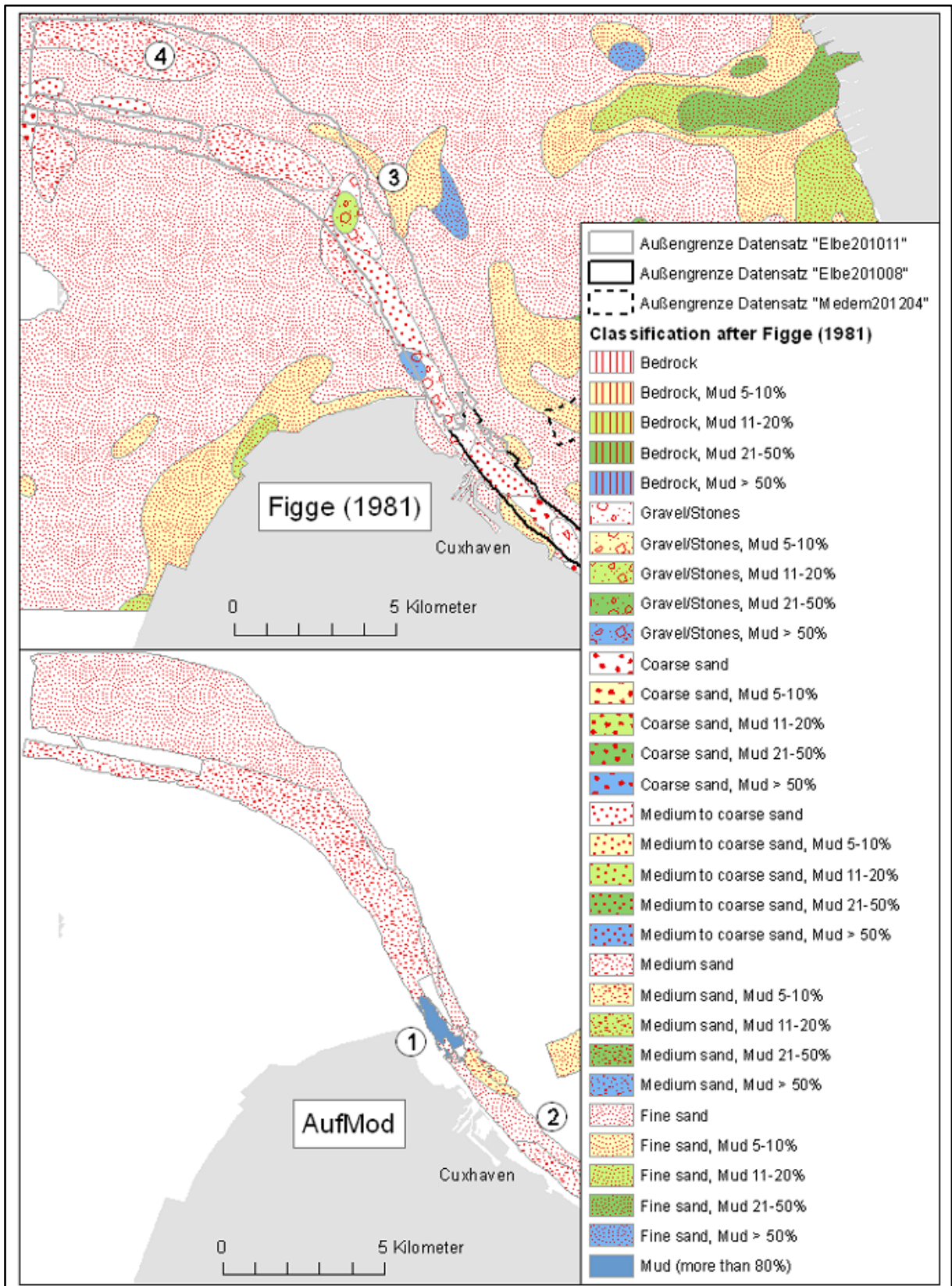


Abbildung 3-45: Gegenüberstellung der Oberflächensedimentverteilung im äußeren Elbe-Ästuar, basierend auf den Daten der Figge-Karte (oben) und den in **AufMod-F** erarbeiteten Daten, hier der Kartierungen von August 20110, November 2011 und April 2012 (unten)

Von Markierung 2 stromauf dominieren derzeit Feinsande, was im Vergleich zur älteren Aufnahme eine Sedimentverfeinerung bedeutet. Auch hier ist von einem Sedimenteintrag aus der Medemrinne auszugehen.

Unterschiede zwischen den Kartierungen sind auch im Bereich der Markierung 3 zu erkennen. Während Figge (Figge, 1981) dort unterschiedliche Oberflächensedimente ausweist, vor allem anstehendes Festgestein mit Grobsedimentauflage, so ist dieser Bereich aktuell vergleichsweise homogener und hauptsächlich fein- mittelsandig. Stromauf der Ostemündung ist jüngst auch Sediment mit erhöhtem Feinkornanteil anzutreffen. Im August und November 2010 fand sich in einer Reihe von Proben aus diesem Gebiet Schlick, der nach Konsolidierungsgrad nicht den temporären Flüssigschlickablagerungen zuzuordnen ist. Markierung 4 hebt den Bereich der Medemrinne hervor. Im Vergleich zeigt sich, dass dort zu beiden Aufnahmen Feinsande dominieren. Unterschiede ergeben sich in der Angabe des Feinkorngehaltes, der bei Figge räumlich stärker differiert, sowie in der Kartierung von Mittelsanden 2010 am Prallhang der Medemrinne. Es gilt an dieser Stelle zu berücksichtigen, dass sich insbesondere der Bereich der heutigen Medemrinne durch die dort hohe Morphodynamik mit einhergehender Rinnenverlagerung stark verändert hat, was eine Änderung der Faziesräume nach sich zieht.

Es lässt sich für den betrachteten Bereich der Elbe übergreifend zusammenfassen, dass vor allem Flächen, die von Feinsanden dominiert werden, im Zeitraum 1981 bis 2010 in ihrer flächenhaften Ausbreitung zugenommen haben, während mittel- und grobsandige Bereiche bzw. ausbeißende konsolidierte Sedimente in ihrer räumlichen Verbreitung abgenommen haben bzw. nun gänzlich von Sanden überlagert werden.

Für eine vergleichende Gegenüberstellung der alten und neuen Oberflächensedimentkartierung im Weser-Ästuar wurde der Datensatz von Februar 2011 herangezogen. Es gilt anzumerken, dass die Figge-Karte stromauf im Bereich des Blexer Bogens endet. Im Vergleich fällt zunächst auf, dass Figge (Figge, 1981) im betrachteten Abschnitt nirgendwo „sogenanntes Festgestein“ d.h. anstehendes konsolidiertes Feinsediment ausweist. Aktuell sind solche Ablagerungen am Prallhang des Blexer Bogens sowie entlang der Fahrrinnenflanken anzutreffen (Abbildung 3-47, u.a. Markierung 4, 2). Denkbar ist, dass zur Aufnahme von Figge (Figge, 1981) eine mobile Sedimentauflage die Sohloberfläche geprägt hat. Schlick- bzw. schlickreiche Sande, die aktuell die Gewässersohle vor allem im Fahrwasser stromab von Bremerhaven großflächig prägen und der sogenannten „Schlickstrecke“ zugeordnet werden können, sind in der Figge-Karte nicht zu finden, werden aber hingegen auch bei (Wetzel, 1987) und (Schrottke, et al., 2005) beschrieben (Abbildung 3-47, Markierung 3). Die nicht gezeigte, stromaufwärtige Ausdehnung der Schlickstrecke deckt sich mit den Angaben von ((Wetzel, 1987), und (Schrottke, et al., 2005)). Schlickige Sedimente finden sich im jüngst betrachteten Abschnitt auch bei Markierung 1.

Insgesamt wird nach Figge (Figge, 1981) die Sohloberfläche im Fahrwasser des Weser-Ästuars immer wieder von grobsandigen Bereichen geprägt (Abbildung 3-47, Markierung 2), die in jüngeren Aufnahmen fehlen. Allerdings ist ansonsten insgesamt von einer leichten Vergrößerung der Oberflächensedimente im Fahrwasser auszugehen.

Es lässt sich für die vergleichenden Gegenüberstellungen der Datensätze aus den gezeigten Teilbereichen des Weser-Ästuars zusammenfassen, dass die Oberflächensedimentverteilung nur in wenigen Abschnitten im Detail genau übereinstimmt.

Es sei zudem erwähnt, dass sich Änderungen auch bei einem Vergleich der beiden **AufMod**-Datensätze vom März 2010 und Februar 2011, insbesondere durch Verschiebungen von

Sedimentgrenzen zeigen, was wiederum auf eine hohe Sedimentdynamik rückschließen lässt. Insgesamt bleiben die großen Faziesräume über längere Zeiträume erhalten.

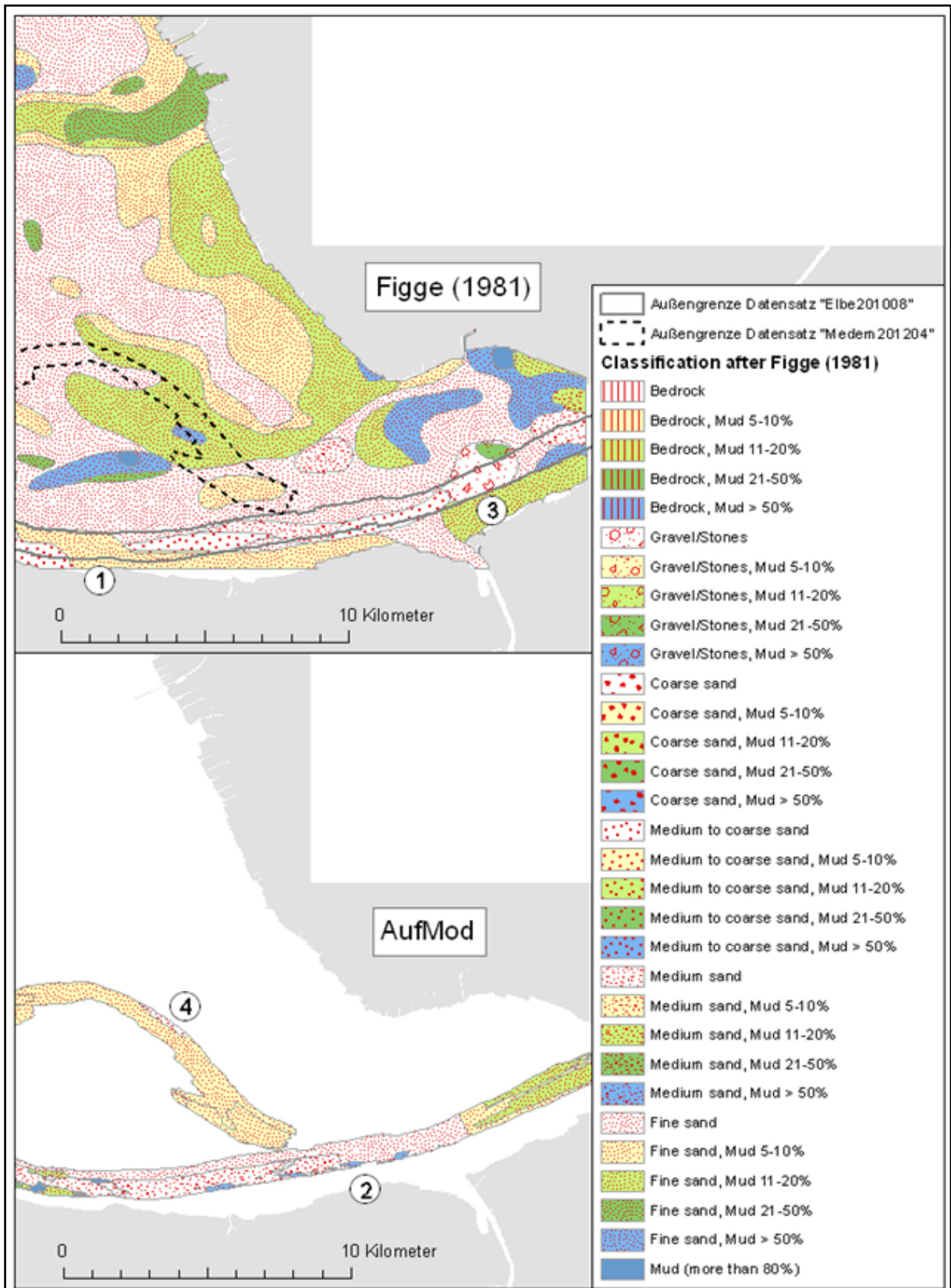


Abbildung 3-46: Gegenüberstellung der Oberflächensedimentverteilung im Elbe-Ästuar zwischen Cuxhaven und Brunsbüttel, basierend auf den Daten der Figge-Karte (oben) und den in *AufMod-F* erarbeiteten Daten aus den Kartierungen im August 2010 und April 2012 (unten)

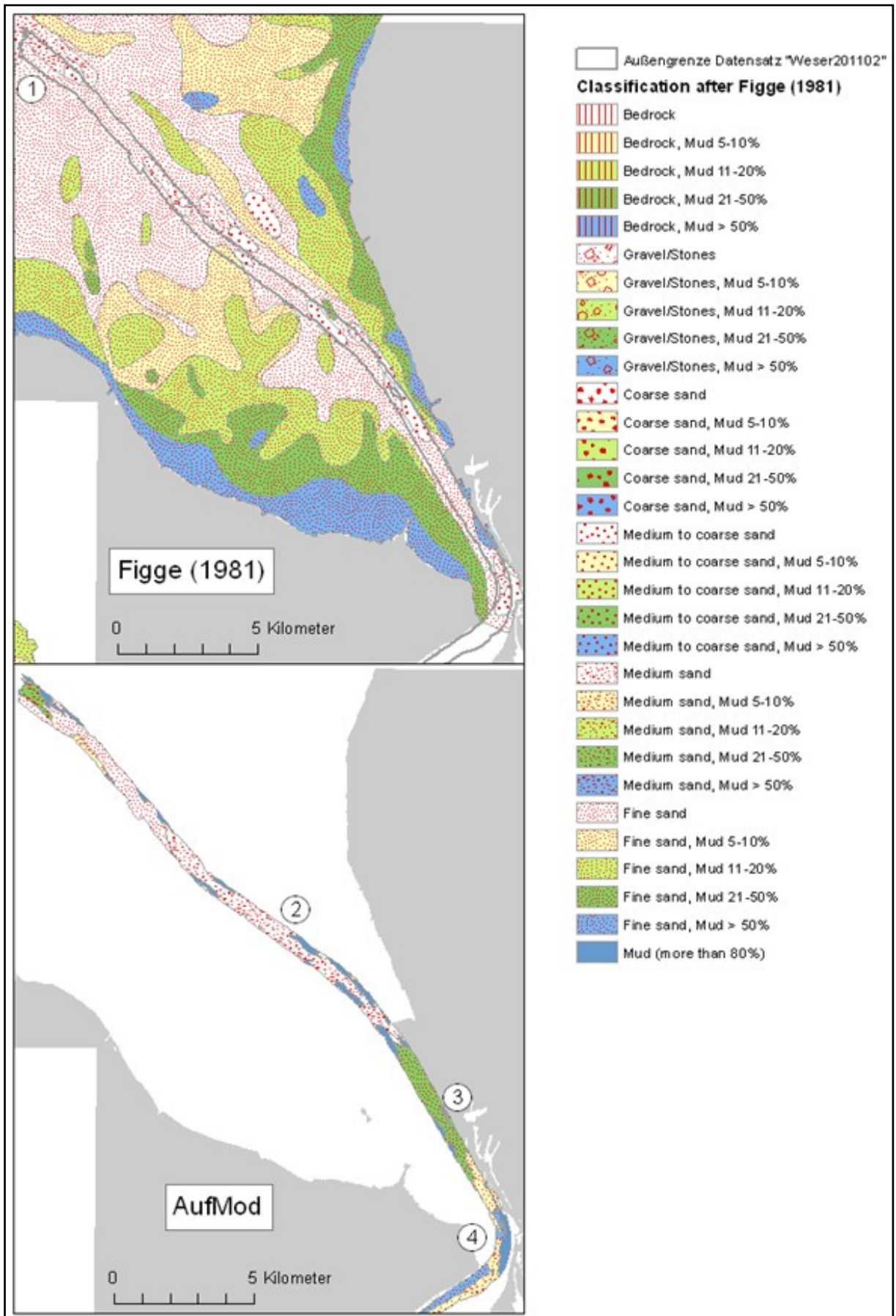


Abbildung 3-47: Gegenüberstellung der Oberflächensedimentverteilung im äußeren Weser-Ästuar, basierend auf den Daten der Figge-Karte (oben) und den in **AufMod-F** erarbeiteten Daten vom Februar 2011 (unten)

3.2.2 Watten

Für die sedimentologisch kartierten sublitoralen Bereiche von Piep und Norderhever wurde ebenfalls ein Vergleich mit den Verteilungsmustern der Figge-Karte (Maßstab 1:100.000) durchgeführt. Dabei wird die höhere räumliche Auflösung der **AufMod** Datensätze deutlich sichtbar. Dies allein kann bereits zu merklichen Unterschieden führen, die dann allerdings methodisch bedingt sind. Ein Beispiel dafür sind vermutlich die in der neuen Darstellung der Sedimentverbreitung in der Piep sehr viel größeren Bereiche mit feinkörnigen Ablagerungen. Überwiegend findet sich die zugehörige Signatur in Gebieten mit Kleiablagerungen. Die Verbreitung von Kleiablagerungen kann mit dem Seitensichtsonar leicht und sicher detektiert werden. Bei einem relativ weiten Probenraster, wie es der BSH Karte zugrunde liegt, kann zwangsläufig das genaue Verbreitungsgebiet nur dann erfasst werden, wenn Proben mehr oder minder zufällig nahe der Verbreitungsgrenzen entnommen wurden. Darüber hinaus können auch Unterschiede bei der Laborbearbeitung der Sedimentproben zu Unterschieden führen. So wurden bei den Proben des BSH Karbonatanteile (Schill) in der Sandfraktion mit gesiebt. Im Teilprojekt "Watt" wurde jedoch das Karbonat mit Hilfe von Salzsäure gelöst und nur der rein mineralische Anteil korngößenanalytisch bearbeitet. Da sich bei Wattsedimenten die größten Fraktionen fast ausnahmslos aus Muschelbruchstücken zusammensetzen, gehen diese zwangsläufig nicht in die granulometrische Analyse ein, wodurch statistische Kenngrößen signifikant anders ausfallen können. Insbesondere ist eine Verschiebung der mittleren Korngrößen zu feineren Werten hin zu erwarten.

Trotz der beschriebenen Problematik sind die in der Figge-Karte bzw. in der **AufMod**-Karte (Abbildung 3-48) die durch Informationen bezüglich der mittleren Korngröße der Sandverteilung belegten Flächen in Lage und Ausdehnung vergleichbar. Deutliche Unterschiede gibt es jedoch beim prozentualen Anteil der Feinfraktion < 63 µm. Diese Werte fallen in der **AufMod**-Karte deutlich höher aus. Sollte es tatsächlich zu einem verstärkten Eintrag von Feinmaterial gekommen sein, sollte sich dies nach unserem Verständnis der Naturvorgänge in einer graduellen Zunahme der Feinkornanteile in Richtung auf die inneren Teile des Tidebeckens äußern. Da jedoch im gesamten Gebiet die Anteile an feinkörnigen Sedimenten zugenommen zu haben scheinen, würden wir diese (scheinbare) Zunahme eher auf methodische Unterschiede denn auf natürliche Prozesse zurückführen. Trotz entsprechender Recherche konnte leider nicht nachvollzogen werden, ob es diese vermuteten methodischen Unterschiede tatsächlich gibt.



Abbildung 3-48: Vergleich der in **AufMod-F** für das Gebiet der Pieprinnen entwickelten Sedimentkarte (2010/11) mit der Figge-Karte (Maßstab 1:100.000)

Wie schon bei der Pieprinne führte auch in der Norderhever die in **AufMod** eingesetzte Kartiertechnik zu einem deutlich differenzierteren Bild der Sedimentverteilung. Auch wenn die beiden Karten (s. Abbildung 3-49) auf den ersten Blick vielleicht merklich abweichend von einander erscheinen mögen, weisen sie gleichwohl wenige Unterschiede auf. So bilden beide Karten den Umstand ab, dass das Verbreitungsgebiet der größten Sedimente bis zu einem gewissen Grad den Außenbögen der Rinne folgt. Auch zeigt sich, dass der untersuchte Gewässerabschnitt über weite Strecken hinweg von Mittelsanden und Grobsand führenden Mittelsanden eingenommen wird. Im Fall von solch granulometrisch eng beieinander liegenden Kornklassen können jedoch bereits natürliche Prozesse kleineren Ausmaßes sowie Unschärfen bei der Probenentnahme bzw. der Probenbearbeitung zu signifikanten Verschiebungen der rein nach statistischen Gesichtspunkten unterschiedenen Klassengrenzen führen. Eine „labortechnische Unschärfe“ führt im Rahmen der **AufMod** Kartierung beispielsweise zur Ausweisung von merklichen Feinanteilen in ansonsten groben Sedimenten. Dieser Feinanteil liegt tatsächlich nicht feinverteilt zwischen den größeren Körnern vor, sondern rührt von im größeren Sediment zu findenden Schlick- bzw. Kleigeröllen her. Diese Klasten werden bei der Laborbehandlung zerstört. Der Feinanteil innerhalb der Kornverteilung ist somit also nicht Ausdruck einer natürlichen Ablagerung einzelner feiner Körner, sondern allein Ausdruck der Zerlegung größerer Feinkornklasten in ihre Einzelkornbestandteile. Da nicht nachvollzogen werden konnte, wie bei früheren Analysen Kleigerölle unterschiedlicher Größe labortechnisch behandelt worden sind, würden wir dem beim Vergleich der beiden Karten entstehenden Eindruck, als hätte der Feinanteil im Sediment zugenommen, wenig Bedeutung schenken.

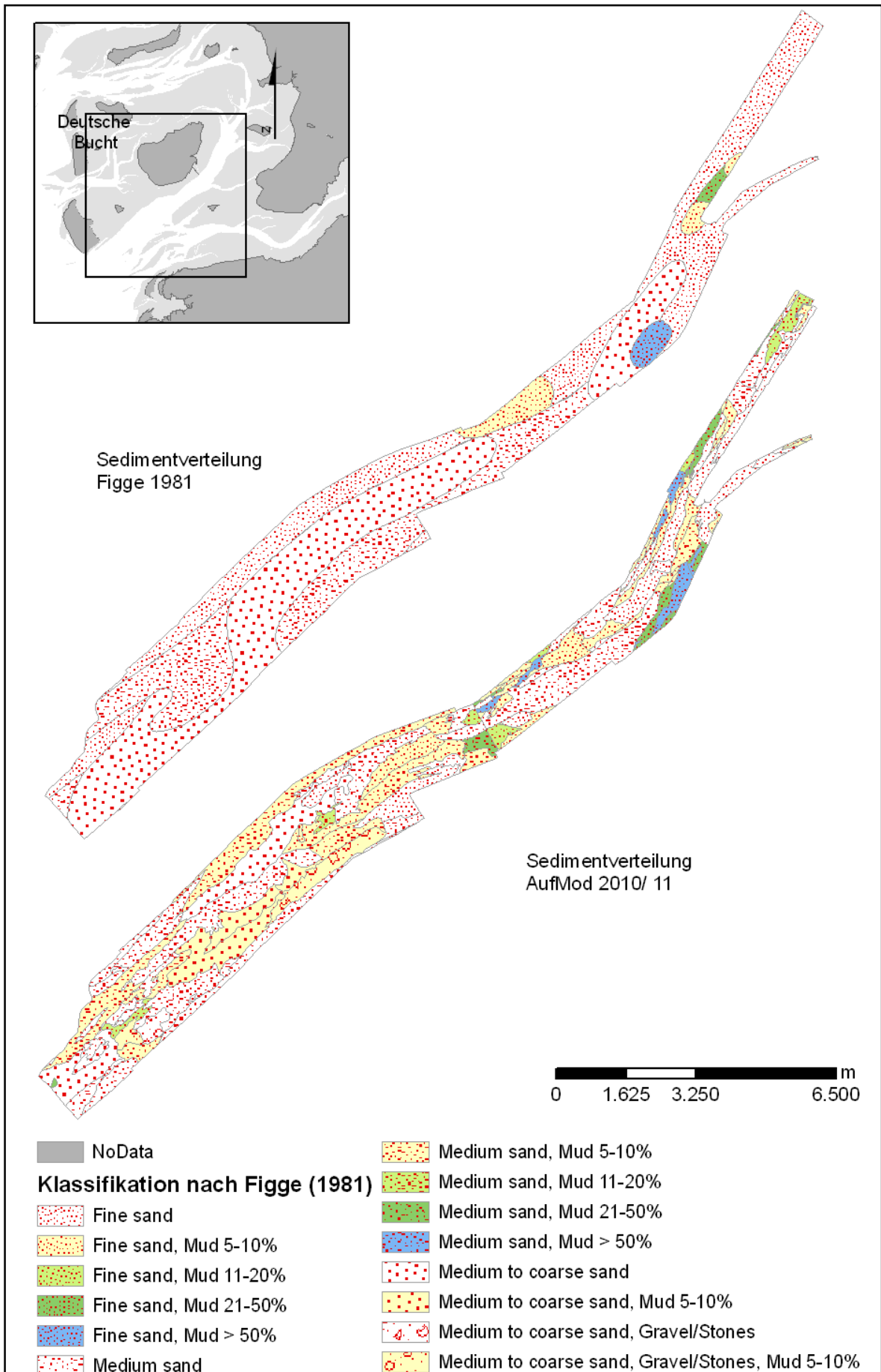


Abbildung 3-49: Vergleich der Sedimentverteilungsmuster in der Figge-Karte Figge-Karte (Maßstab 1:100.000) mit den eigenen Ergebnissen

Für einen weiteren Vergleich wurden die Sedimentverteilungsmuster, wie sie von Dechend (Dechend, 1950) für die Verhältnisse in der Norderhever im Jahre 1938 beschrieben werden, neuerlich grafisch umgesetzt (vgl. Abbildung 3-50). Aus Unkenntnis über die Ausgangsdaten und deren Analyse mussten allerdings die alten Klassengrenzen beibehalten bzw. konnten die neuen Daten diesen nicht angeglichen werden. Nichtsdestotrotz zeigt sich erneut eine große Ähnlichkeit in der Sedimentverteilung. Wieder sind es Mittelsande oder grobe Mittelsande die weite Bereiche des Gewässergrundes einnehmen. Unterbrochen wird ihr Verbreitungsgebiet von Feinsandfeldern, deren Lage der der mehr als 70 Jahre später ausgewiesenen Flächen recht ähnlich ist.

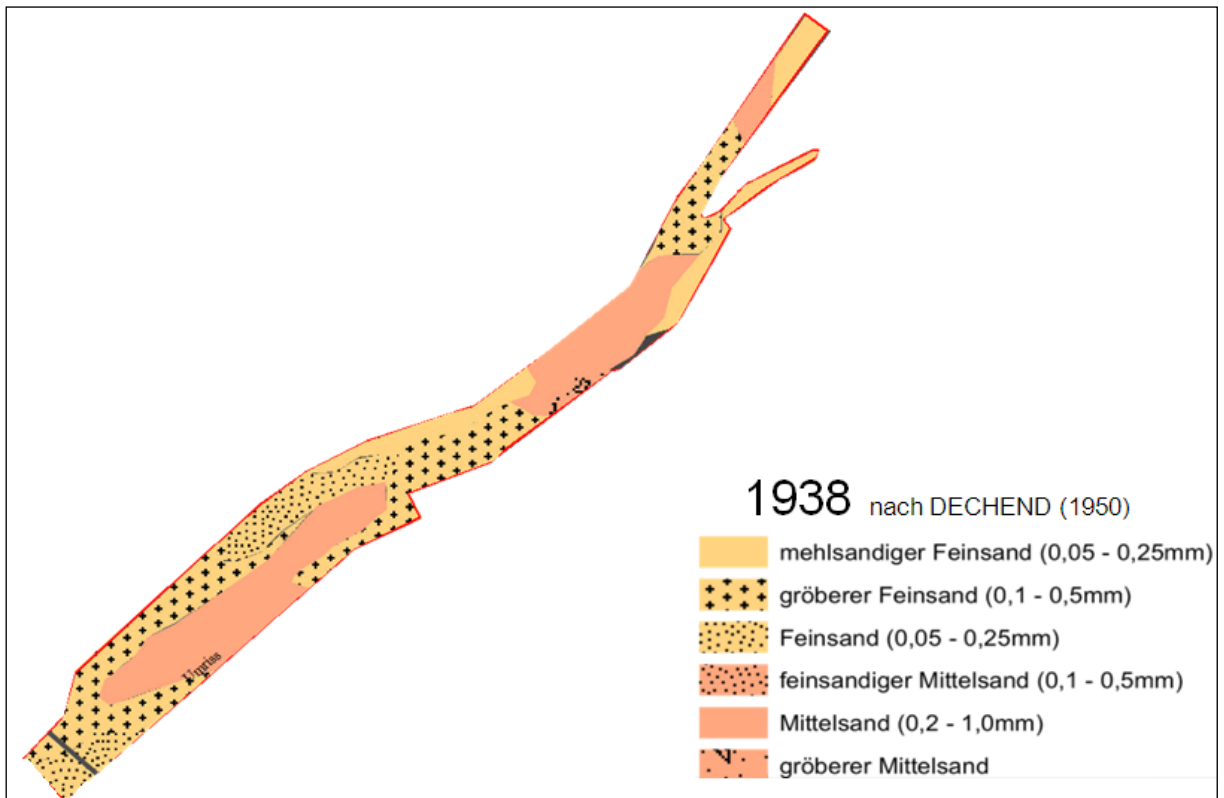


Abbildung 3-50: Sedimentverteilung in der Norderhever nach Dechend (Dechend, 1950)

Zusätzlich zu den Wattrinnen Piep und Norderhever ist auch der Übergangsbereich zwischen beiden Gebieten zwar nicht flächendeckend aber entlang von insgesamt sechs Transekten mit dem Seitensichtsonar befahren worden. Zur Umsetzung der Sonarbefunde in Information hinsichtlich der Sedimentverteilung sind wiederum Proben entnommen und granulometrisch analysiert worden. Die Ergebnisse dieser Übersichtskartierung werden in Abbildung 3-51 den Sedimentverteilungsmustern der Figge-Karte gegenübergestellt.

Beide Kartierungen zeigen eine Dominanz von Feinsanden im Gebiet. Weiterhin scheint sich anzudeuten, dass im südlichen Bereich, also vor den Ebbdeltas von Norderpiep, Wesselburener Loch und Eider (nördliche Grenze etwa $55^{\circ} 15' N$), der Anteil an feinkörnigem Material $< 63 \mu m$ abgenommen hat. Die neuere Kartierung zeigt dafür im sich daran nördlich anschließenden Bereich zumindest in Teilbereichen leicht erhöhte Feingehalte. Insgesamt scheint es jedoch im Seegebiet vor der Halbinsel Eiderstedt wenig Änderungen gegeben zu haben. Der nördlichste Abschnitt zeigt wiederum stärkere Veränderungen, was aber nicht verwundert, liegt er doch nahezu vollständig im Bereich des Ebbdeltas der nordfriesischen Heverrinne. Hier sind in den Jahrzehnten zwischen den beiden Kartierungen starke morphologische Umgestaltungsvorgänge abgelaufen, die natürlich auch Änderungen der Sedimentverbreitung nach sich gezogen haben. Daher scheint es wenig sinnvoll Vergleiche anzu-

stellen, könnte doch dort wo sich z.B. heute eine Mündungsrinne befindet zurzeit der Probenentnahme für die Figge-Karte noch eine Barre gelegen haben.

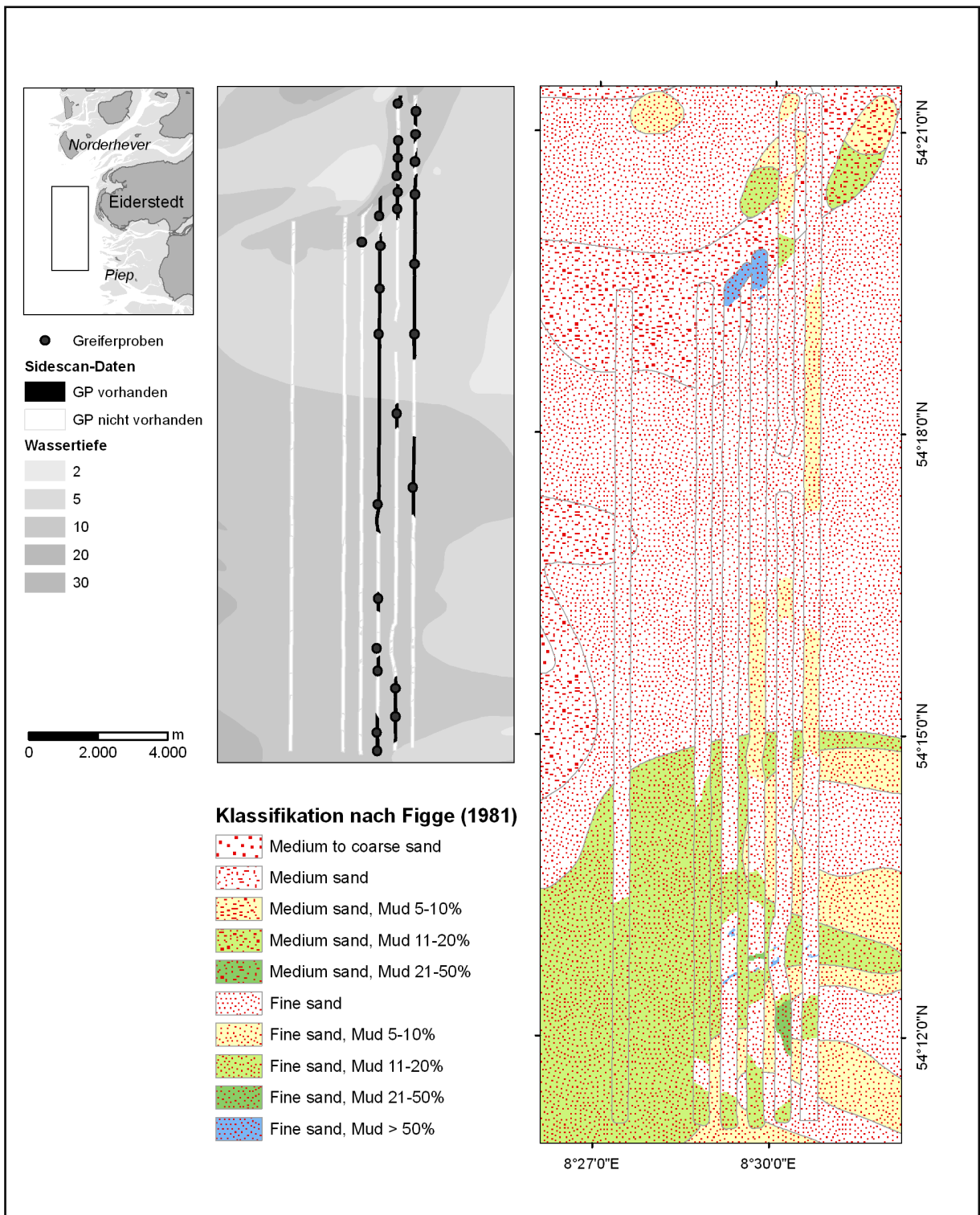


Abbildung 3-51: Grundlage und Ergebnisse der sedimentologischen Kartierung des seawärtigen Übergangsbereichs zwischen Norderpiep und Norderhever. Zur besseren Übersicht sind die Sonarstreifen breiter als tatsächlich aufgenommen dargestellt

Fasst man die Ergebnisse der vergleichenden Betrachtung zusammen, so zeigt sich, dass sich Zusammensetzung und Verteilung der Sedimente in den Gezeitenrinnen Piep und Norderhever sowie in dem beide Rinnen verbindenden Teil der offenen Nordsee in den

vorangegangenen Jahrzehnten wenig verändert haben. Dies gilt speziell für die granulometrische Zusammensetzung der Sandfraktion in den Ablagerungen. Der Feinanteil < 63 µm stellt sich dagegen in den im Projekt **AufMod** erstellten Karten als oft erhöht im Vergleich zu älteren Abbildungen dar. Da bei dieser Zunahme jedoch keine räumlichen Gradienten sichtbar werden, wie sie recht deutlich durch die Verteilung der sandigen Sedimentbestandteile aufgezeichnet wird, sind wir der Meinung, dass die scheinbare Kornverfeinerung auf methodische und leider nicht nachvollziehbare Unterschiede bei der Bearbeitung der Sedimente und ihrer Kenngrößen zurückzuführen sind.

3.2.3 Schelf

Die Grundzüge zur Erarbeitung der Figge-Karte, die sich räumlich überwiegend auf den Schelf erstreckt, wurden bereits in Kapitel 3.2 erläutert. (Anmerkung: Die hier angeführten Aussagen beziehen sich auf die 1982 erschienene Sedimentverteilungskarte (Maßstab 1:250.000). Eine neue Version der Karte, basierend auf ca. 40.000 Sedimentproben, erscheint 2013. Sie lag zum Zeitpunkt der Berichtserstellung noch nicht vor). Die in der Figge-Karte gezeigten Sedimentverteilungsmuster lassen sich in groben Zügen mit der durch die Seitensichtsonar Kartierung erarbeiteten Sedimentverteilungskarte nachvollziehen. Dies gilt vor allem für die Gebiete, die durch nah an die Meeresbodenoberfläche reichendes Pleistozän geprägt sind (vergleiche hierzu Abbildung 1-2, (Köster, 1979)). In der Karte von Köster (Köster, 1979) korreliert die im nördlichen Teil des Kartenausschnittes liegende Pisa Moräne sehr gut mit den sedimentologischen Grenzen des Seitensichtsonar Mosaiks; das im südlichen Teil abgelagerte Moränenmaterial paust sich hingegen nicht durch (vgl. Abbildung 1-2). Die Abbildung 3-54 zeigt das über die Figge-Karte projizierte Seitensichtsonar Mosaik, das über die Projektlaufzeit im Rahmen von mehreren Ausfahrten erarbeitet wurde. ESE – WNW streichende Grobsand- und Kiesbereiche, die an die bei Köster (Köster, 1979) gezeigten Moränen gekoppelt sind, und auch in der Figge-Karte als Bänder gleichförmigen Sedimentes ausgewiesen sind, zeichnen sich durch scharf ausgeprägte hell-dunkel Wechsel (Feinmaterial – Kiesmaterial) an der jeweiligen Südflanke aus, während Richtung Norden der dunkle Grauton (hohe Rückstreuung) allmählich heller wird. In der Abbildung 3-54 ist dies im Teilausschnitt „A“ deutlich zu erkennen. Dies entspricht in der Regel einem Korngrößengradienten. Die Figge-Karte liefert jedoch keinerlei Hinweis auf

- a) Korngrößengradienten zwischen den verschiedenen Sedimentfaziesbereichen,
- b) die Dynamik von Sedimenten und damit einhergehende Strukturen,
- c) Besiedlungsstrukturen, die die Sedimentoberfläche maßgeblich hinsichtlich ihres Akkumulationsverhaltens und der Sedimentdynamik beeinflussen.

Dieses soll im nachfolgenden Text an einigen Beispielen erläutert werden.

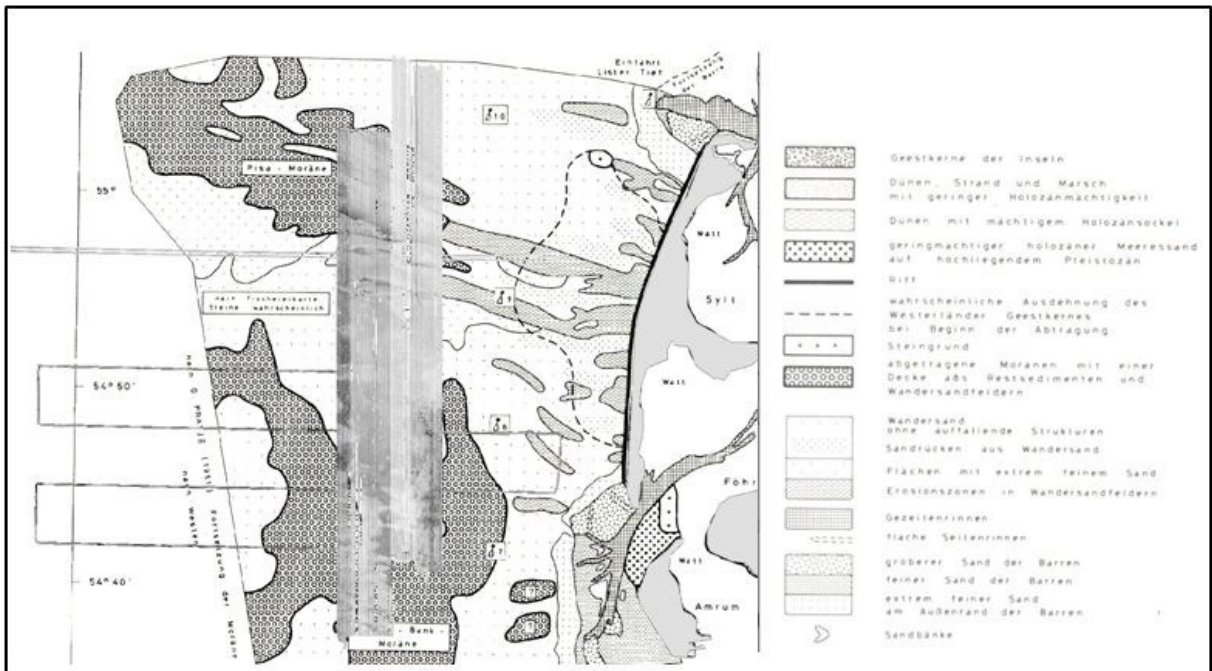


Abbildung 3-52: Kartierarbeiten von Köster (Köster, 1979) zeigen, dass der Schelfbereich durch nah an die Meeresbodenoberfläche aufragende, pleistozäne Ablagerungen glazialen Ursprungs geprägt ist

Sogenannte Sorted Bedforms (s. Abbildung 3-53), früher auch als „Rippled Scour Depressions“ bezeichnet Cachione (Cacchione, et al., 1984), sind küstennormal verlaufende Strukturen, die bis zu mehrere Kilometer lang sein können und eine Breite zwischen einigen 10er bis 100er Meter aufweisen ((Green, et al., 2004), (Goff, et al., 2005), (Murray, et al., 2004)). Sie finden sich über das gesamte Kartiergebiet verteilt, das mit den weit nach Westen reichenden Übersichtsprofilen ca. 2.800 km² umfasst (s. hierzu auch Abbildung 3-54 und Abbildung 3-55). Sie unterscheiden sich morphologisch deutlich von anderen klassischen Meeresbodenstrukturen, wie z.B. subaquatischen Dünen, dadurch, dass ihre Höhenunterschiede auf mehreren 100 m Länge lediglich einige Dezimeter bis zu 1 – 2 m betragen. Aufgrund ihres Vorkommens vor der ostfriesischen Küste, hier wurden sie auf dem Borkum Riffgrund und vor Juist beobachtet Linke (Linke, et al., 2010), und der nordfriesischen Küste werden sie als charakteristisches Merkmal für weite Bereiche des Nordseeschelfs angesehen. Sorted Bedforms sind geprägt durch gröberes Sediment, das häufig auch einen hohen Anteil an Schillbruch enthält. Gegenüber der Umgebung weist dieses Sediment eine relativ höhere Rauigkeit auf. Teilweise sind die hier gefundenen Strukturen von einem mehrere Meter breiten Saum sehr feinen Sediments (Silt) umrahmt (vgl. Abbildung 3-55, Bildausschnitt 5). Über die Bildungsbedingungen dieses Saumes ist bisher nichts bekannt.

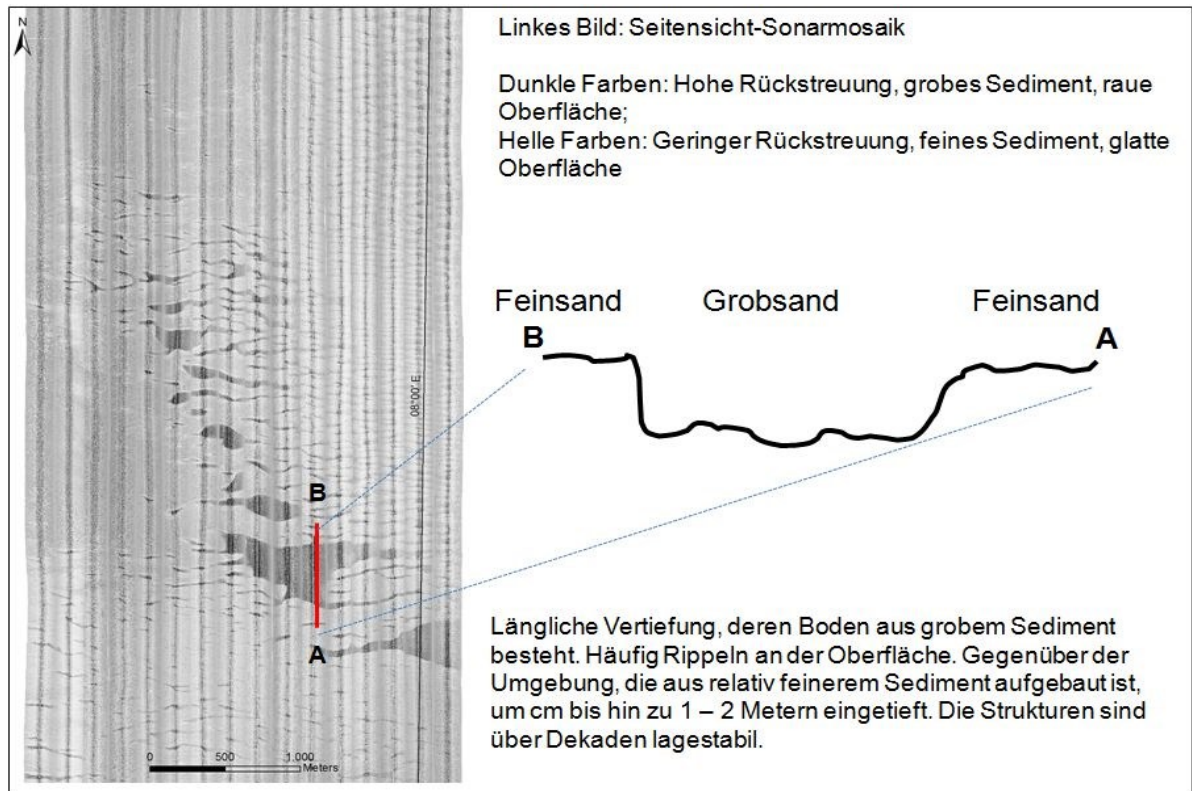


Abbildung 3-53: Prinzipskizze zum morphologischen und sedimentologischen Erscheinungsbild von Sorted Bedforms aus dem Arbeitsgebiet westlich von Sylt

Schon landwärts des Fokusgebietes, bereits wenige Kilometer westlich der Insel Sylt, beginnen Sorted Bedforms (freundl. mdl. Mitt. v. Christian Hass, AWI List / Sylt). Bei unseren Arbeiten konnten diese Strukturen bis ca. 55 km westlich von Sylt ($7^{\circ}24'$ E) beobachtet werden (s. Abb. Abbildung 3-55 und Abbildung 3-56). In einem ausgesuchten Abschnitt (Bereich B in Abbildung 3-54) wurden sie näher untersucht. Hier weisen sie Längen bis zu 1720 m und Breiten bis zu 470 m auf bei einem mittleren Längen / Breitenverhältnis von 7,8: 1. Die Streichrichtung schwankt zwischen 90° - 110° mit einem mittleren Wert von 99° (Willems, 2013). Damit sind sie nahezu alle küstennormal ausgerichtet. Wie weit sie sich tatsächlich über das Fokusgebiet hinaus nach Westen ziehen, war im Rahmen der Projektlaufzeit nicht zu klären, da nicht genügend Schiffszeit zur Verfügung stand bzw. schlechte Wetterbedingungen ein weiteres Vermessen Richtung Westen verhinderten.

Sorted Bedforms weisen in der Nordsee eine hohe Lagestabilität auf (Diesing, et al., 2006a), ähnlich, wie es auch auf für andere Schelfbereiche beobachtet wird (Green, et al., 2004). Ihre Genese ist bis heute nicht abschließend geklärt. Sie werden überwiegend als ein Produkt aus der geologischen Vorprägung des Untergrundes und den einwirkenden hydrologischen Kräften von Tide, Wellen und wellenindizierten Strömungen interpretiert (Gutierrez, et al., 2005). Es besteht in der Fachwelt aber einhellige Meinung darüber, dass diese sedimentologischen Formen einen Schelf repräsentieren, der über einen längeren Zeitraum (10^2 - 10^3 Jahre) von Sedimentmangel geprägt ist (Sediment Starving Shelf, (Murray, et al., 2004)).

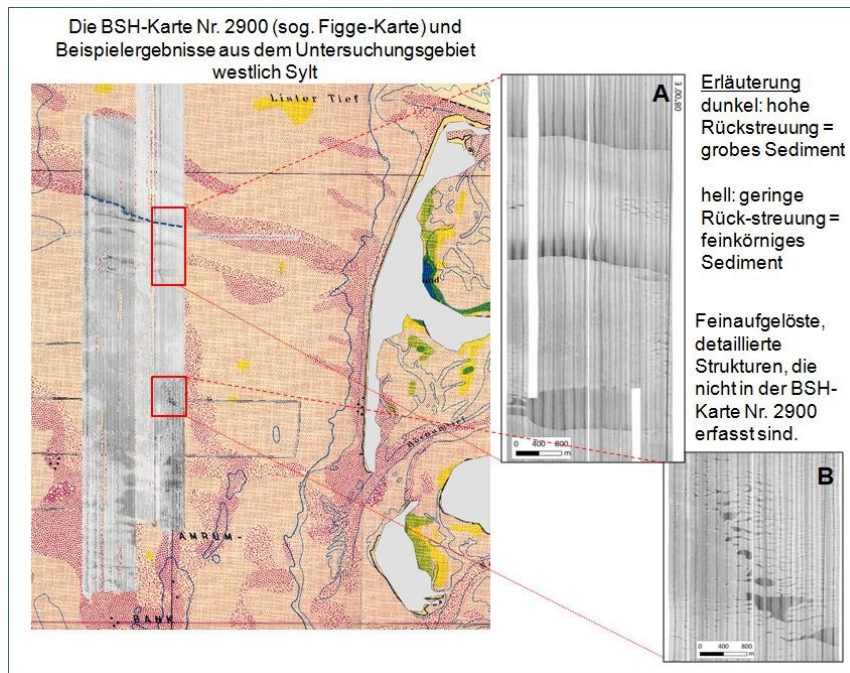


Abbildung 3-54: Auf die Figge-Karte projiziertes Seitensichtsonar Mosaik. Große Bereiche mit kleinräumiger Sedimentvariabilität, wie sie das Seitensichtsonar Mosaik zeigt (B), sind in der Figge-Karte nicht abgebildet

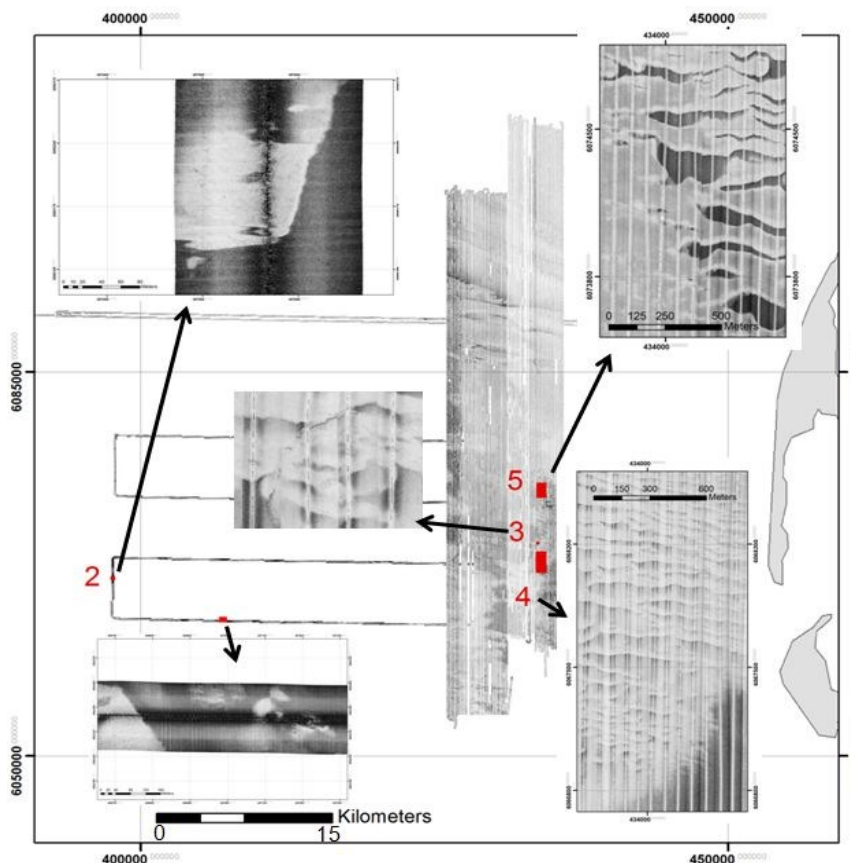


Abbildung 3-55: Ausschnitte aus dem Seitensichtsonar Mosaik mit einigen zusätzlich in E – W - Richtung aufgenommenen Profilen. Beispielhaft sind 5 Bereiche mit unterschiedlich aussehenden Sorted Bedforms gezeigt, die immer den abrupten Wechsel von einem hellen zu einem dunklen Rückstreuungsmuster (hell = feines Material, dunkel = relativ dazu gröberes Material, weitere Erläuterungen im Text) aufweisen. Eine Ausnahme bildet der dunkle Bereich im rechten, unteren Bereich von Ausschnitt 4. Er hat seine Ursache im Auftreten von *Lanice Conchilega* (s. hierzu Kapitel 4.3.2).

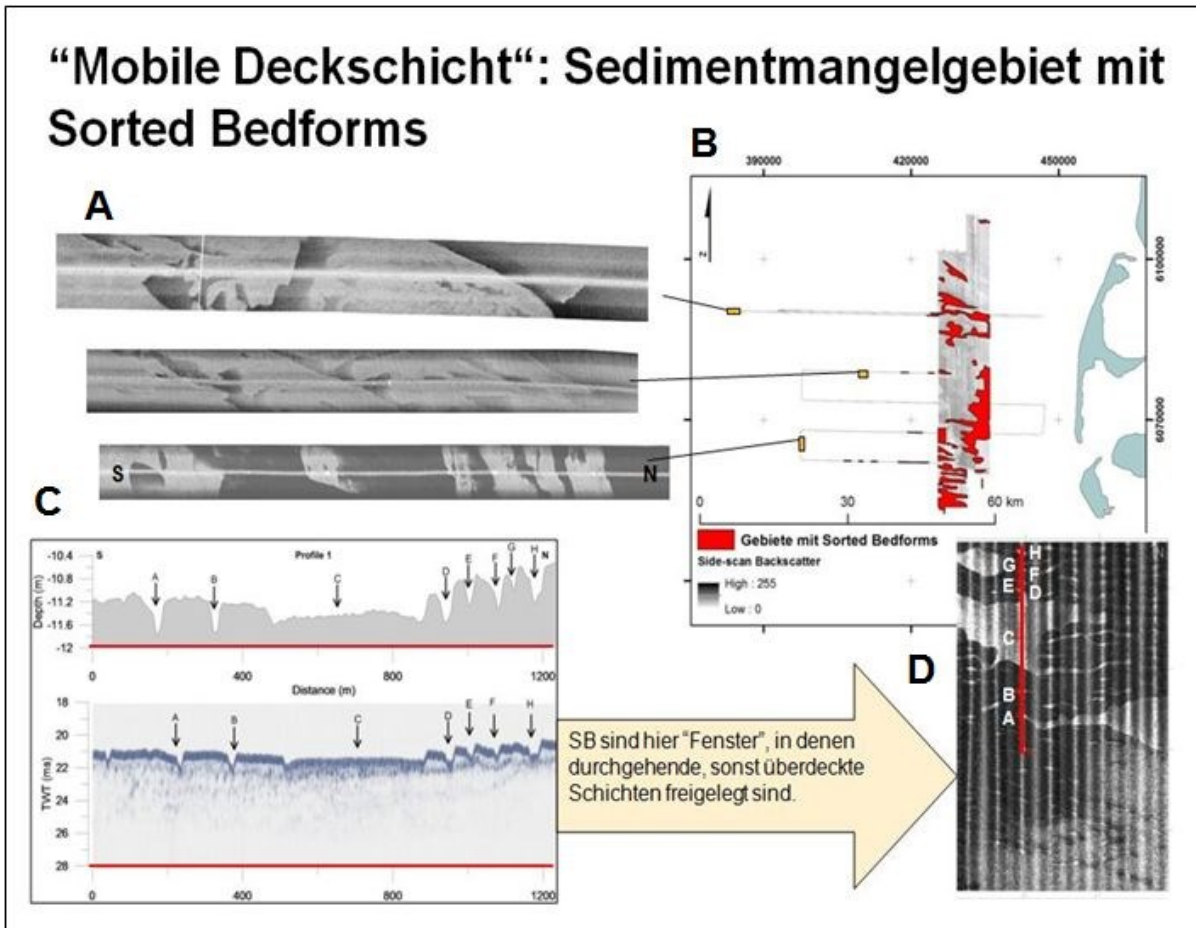


Abbildung 3-56: Sorted Bedforms auf dem Schelf westlich der Insel Sylt. Die Abbildung B zeigt den Bereich, in dem Sorted Bedforms vorkommen; C zeigt ein morphologisches und seismisches Profile über den in D gezeigten Bereich (Achtung: Inverse Darstellung. Die hellen Bereiche markieren hier eine hohe Rückstreuung). Im unteren Teil von C ist zu erkennen, dass sich das in den Sorted Bedforms exponierte Sediment unter den Transportkörpern weiter verfolgen lässt

3.3 Mobilisierbarkeit oberflächennaher Sedimente

3.3.1 Mobilität subtidaler Wattsedimente

Basierend auf den für die Sedimentkartierung notwendigen Untersuchungsergebnissen sowie unter Einbeziehung zusätzlicher geologisch/sedimentologischer Informationen wurde ein Ansatz für ein konzeptionelles Modell zur Mobilität der sublitoralen Sedimente in der Nordsee entwickelt. Unterschieden werden in diesem Zusammenhang einerseits "mobile Sedimente", Korngemische die sich durch die vorherrschende Hydrodynamik leicht bewegen lassen und wiederkehrend für großräumige morphodynamische Umgestaltungsvorgänge zur Verfügung stehen. Demgegenüber stehen die "schwer mobilisierbaren Sedimente", die auf Grund ihrer bodenphysikalischen Eigenschaften unter normalen hydrologischen Bedingungen nur schwer aus ihrem Schichtverbund heraus gelöst werden können. Durch diese Erosionsstabilität tragen sie zur morphologischen Stabilität der Wattstromrinnen bei.

Als prominentester Vertreter der „mobilen Sedimente“ werden die weit verbreiteten Feinsande angesehen. Sie finden sich nicht nur in den Rinnen sondern bauen überwiegend auch die mobilen Ebbdeltas sowie den eigentlichen Wattsedimentkörper auf.

Mittelsande und feine Grobsande, die in der zentralen Norderhever weit verbreitet sind, werden hingegen einer dritten Gruppe, der der "bedingt mobilen Sedimente" zugeordnet. Diese Sande sind zwar innerhalb ihres derzeitigen Verbreitungsgebietes mobil (Transportkörper), tragen aber nicht zu großräumigen morphologischen Veränderungen bei. So taucht ihr Kornspektrum z.B. kaum oder gar nicht in intertidalen Ablagerungen (Berner, et al., 1986) des Gebietes auf oder im Sedimentinventar der Halligen (freundl. mündl. Mitt. Prof. von Eynatten, Forschungsprojekt „Zukunft Hallig“) auf.

Als „schwer mobilisierbare Sedimente“ werden schließlich Kies, grober Schill und besonders die in Gezeitenrinnen verbreitet vorkommenden Ablagerungen aus konsolidiertem, kohäsivem Feinmaterial (Klei, Geschiebemergel/lehm) eingestuft. Die Klassifizierung als „schwer erodierbar“ ergibt sich bei den groben Komponenten Kies und grober Schill, die im Wesentlichen als sogenannte Restsedimente anzusehen sind, schlicht durch die Größe der Materialien. Bei den konsolidierten, kohäsiven Feinmaterialien hat der Befund, dass diese am Gewässergrund häufig Härtlingsstrukturen ausbilden und ihre Verbreitungsgebiete oft über Jahrzehnte (vergl. Abbildung 3-27, Abbildung 3-31, Abbildung 3-48 und Abbildung 3-49) hinweg stabil sind, zur Einstufung geführt. Aufgrund der Korngröße ist bei den groben „schwer erodierbaren“ Ablagerungen auszuschließen, dass sie an großmaßstäblichen morphologischen Umgestaltungsvorgängen beteiligt sind. Anders sieht es hingegen bei den konsolidierten Feinkornablagerungen aus. Werden sie trotz ihrer Stabilität mobilisiert, steht ihr Material aufgrund der kleinen Korndurchmesser für weitreichende Umlagerungsprozesse, z.B. vom tieferen Rinnengrund bis auf höhere Watten, zur Verfügung. Die bei diesen Sedimenten ausgeprägte Differenz zwischen der Strömungsgeschwindigkeit des Wassers, die zur Erosion bzw. zum Transport des Materials notwendig ist, spielt natürlich für die rechnerische Simulation von Sedimenttransporten eine entscheidende Rolle.

Die Abbildung 3-57 fasst die Ergebnisse des konzeptionellen Modells zum Grad Mobilisierbarkeit der Sedimente im Gebiet der Norderhever zusammen. Es ist ersichtlich, dass die Einteilung vollständig auf der Zuordnung zu Sedimentklassen beruht. Eine Erweiterung hätte die Modellbetrachtung u.U. auch durch die Einbeziehung jener meist feinsandigen Bereiche erfahren können, die dicht mit dem Bäumchenröhrenwurm *Lanice conchilega* besiedelt sind (Abbildung 3-32). Diese Flächen stellen sich in den Sonaraufnahmen als gegenüber ihrer Umgebung leicht erhöht dar, was den Schluss nahe legt, dass dichtere Bestände dieses Wurms eine gewisse „sandfangende“ oder „sandhaltende“ Wirkung haben. Da es hierzu jedoch keine Literaturangaben gibt und die Bestandsdauer einer solchen Wurmkolonie vermutlich auch in anderen Zeitskalen zu messen sein wird als die von großräumiger Sedimentumlagerung, sind diese biologisch beeinflussten Flächen vorerst nicht mit in den Ansatz des konzeptionellen Modells aufgenommen worden. Gleichwohl stellt die biologische Verfestigung von Sedimenten einen wichtigen, wenn auch sehr komplexen Aspekt dar, dessen wissenschaftliche Aufarbeitung noch viel Forschungsaufwand in Anspruch nehmen wird.

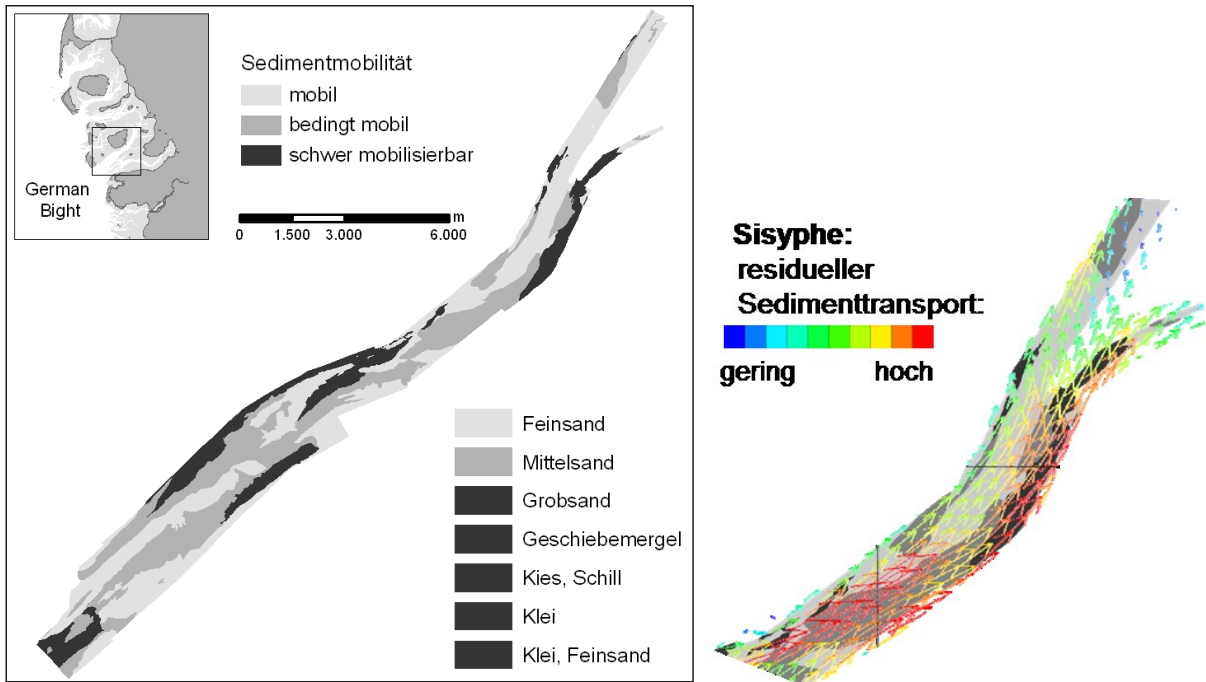


Abbildung 3-57: Grafische Umsetzung des konzeptionellen Modells zum Grad der Mobilisierbarkeit der Sedimente im Gebiet der Norderhever

Abbildung 3-58: Residueller Sedimenttransport nach dem Modell SISYPHE mit Mobilitätseinstufung

In einem ersten Versuch sind Sedimentverteilungsmuster sowie die Verteilung der postulierten Mobilitätsklassen einigen Ergebnissen des von der Univ. der BW in München betriebenen Modells SISYPHE gegenüber gestellt worden. Die simulierten residuellen Sedimenttransporte im Vergleich zu den Mobilitätsklassen sind in Abbildung 3-58 exemplarisch dargestellt. Dabei zeigt sich, dass intensive Transporte einerseits im Bereich der bedingt mobilisierbaren Sedimente zu erwarten wären. Andererseits würden nach den Modellergebnissen intensive Transporte ebenfalls im Bereich von schwer erodierbaren Kleivorkommen am Südrand der Rinnen auftreten. Beide Gebiete werden aber nach den geologischen Befunden als vergleichsweise stabil angesehen. In diesem Zusammenhang soll in weiteren Analysen geprüft werden, ob die Sedimentmengen, die zu den berechneten residuellen Transporten beitragen, sich aus diesen Gebieten speisen oder aber auf einen intensiven Transfer durch diese Areale hinweisen. Im ersten Fall könnte eine Verbesserung der Modellergebnisse dadurch erreicht werden, dass diese Gebiete als erosionsresistenter parametrisiert werden. Ein fast ausschließlich ins Buchtinnere gerichteter residueller Transport, wie ihn die Modellergebnisse für die zentrale Norderhever andeuten, konnte durch die Naturuntersuchungen nicht verifiziert werden. Vielmehr zeigt die Auswertung der Symmetrieverhältnisse der in der Norderhever vorkommenden Sohltransportkörper ein komplexes Muster von teils in einander übergehenden Rippelfeldern auf, die entweder vom Ebbstrom oder aber vom Flutstrom dominiert werden.

Ein kleiner Abschnitt im Süden des Arbeitsgebietes wird nach den Modellergebnissen durch divergierende und sehr kurze Vektoren des residuellen Sedimenttransports charakterisiert. Dieses Gebiet ist sedimentologisch durch die größten Ablagerungen gekennzeichnet. Dies legt nahe, dass feines Material sowohl in Richtung offene See als auch in Richtung auf die inneren Teile des Wattenzugsgebietes ausgewaschen worden ist. Man kann dies Gebiet also eine Art „Transportscheide“ ansehen. Eine vergleichbare Transportscheide wurde basierend auf den Ergebnissen von Schwermineraluntersuchungen bereits von Dechend

(Dechend, 1950) postuliert. Allerdings liegt sie bei Dechend etwas weiter landeinwärts etwa auf der Höhe des südlichsten Endes von Pellworm.

3.3.2 "Mobile Deckschicht" auf dem Schelf

Das für Sorted Bedforms charakteristische, relativ grobe Sediment, das sich in dem Raster engabständiger (Abstand voneinander 180 m) seismischer Profile (SES -parametrisches Echolot, Boomer) in seiner horizontalen Erstreckung auch unter der Sedimentüberdeckung weiter verfolgen lässt, eröffnet die Möglichkeit die Mächtigkeit einer sogenannten mobilen Deckschicht, also jenen Sedimenten, die unter rezenten hydrodynamischen Krafteinwirkungen mobilisiert werden können, sehr hochauflösend zu ermitteln. Zur Korrelation der seismischen Daten mit den realen geologischen Verhältnissen wurden in dem Untersuchungsgebiet 19 Sedimentkerne mit bis zu 6 m Eindringtiefe entnommen. Abbildung 3-59 zeigt einen Ausschnitt aus dem Seitensichtsonar Mosaik, mit den Stationen für den Sedimentkern K16 und die Greiferprobe G13, die in einer Sorted Bedform entnommen wurde. Im gleichen Bild ist das Sedimentkernprofil (B) dargestellt, das von 42 – 62 cm eine ausgeprägte Lage groben Sedimentes (Grobsand / Kies) zeigt. In dem Korngrößendiagramm im rechten unteren Teil des Bildes (C) ist die Kornverteilung des Sorted Bedform Sedimentes und die der Grobsand / Kiesschicht des Sedimentkernes übereinandergelegt dargestellt. Es ist offensichtlich, dass es sich hinsichtlich der Kornverteilung um nahezu identische Sedimente handelt.

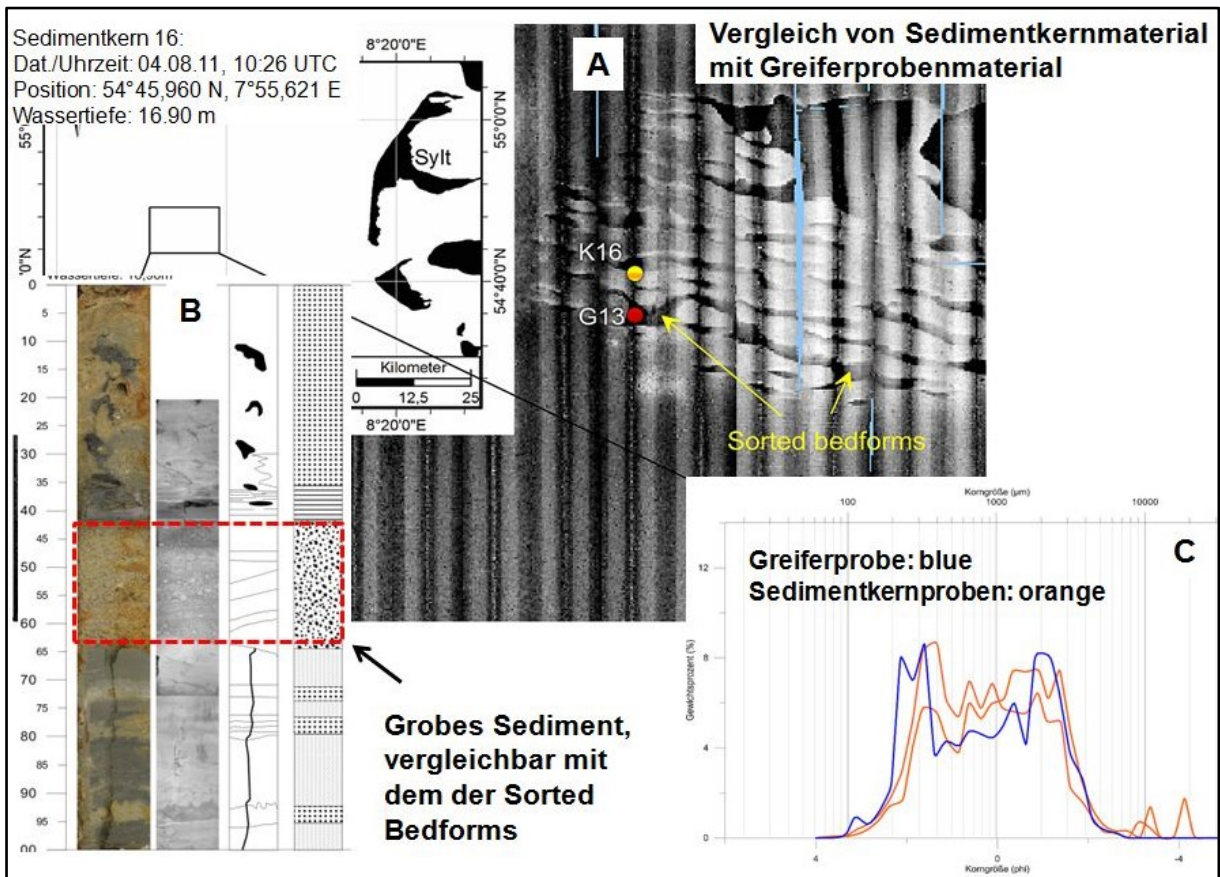


Abbildung 3-59: Vergleich der Sedimentzusammensetzung einer Backengreiferprobe aus einer Sorted Bedform mit der Kornverteilung der Grobsand / Kiesschicht aus Kern 16. Die Kurven zeigen nahezu identische Kornverteilungen (weitere Erläuterungen s. Text)

Die Sedimentkerne sind nicht immer direkt auf den seismischen Profillinien genommen worden, sondern gezielt in morphologisch erhöhten Bereichen, um maximale Mächtigkeiten der

einzelnen Schichten zu erhalten. In diesen Fällen liegen die seismischen Profillinien häufig zu allen 4 Seiten der Kernstation. Dies ist in Abbildung 3-60 verdeutlicht. Dargestellt sind 2 seismische Profile (gelb), die je einen Abstand von 189 m von der Kernstation haben. Die rechtwinklig dazu verlaufenden schwarzen Linien sind seismische Profile in N – S – Richtung. Die einzelnen Schichten des Sedimentkernes lassen sich in die hochauflösenden seismischen Profile einhängen, so dass damit die Ausdehnung der Kieslage in die Fläche interpoliert werden kann. Die Sorted Bedforms sind in diesem Fall die „sedimentologischen Fenster“, in denen die Grobsand- / Kieslage immer wieder zum Vorschein kommt.

In einem weiteren Schritt wurden für die einzelnen Profillinien die Mächtigkeiten der Sandlage über der Grobsand / Kiesschicht bestimmt (s. dazu Abbildung 3-61). Die Mächtigkeiten erreichen lokal bis zu 2,20 m. Die Verteilung der Mächtigkeiten über der Grobsand- / Kiesschicht zwischen zwei Sorted Bedforms ist dabei asymmetrisch, mit einer rasch ansteigenden Mächtigkeit am Nordrand der Sorted Bedforms und einer sehr allmählich abklingenden Mächtigkeit bis zur nördlich anschließenden Sorted Bedform (Abbildung 3-62, rechtes Bild).

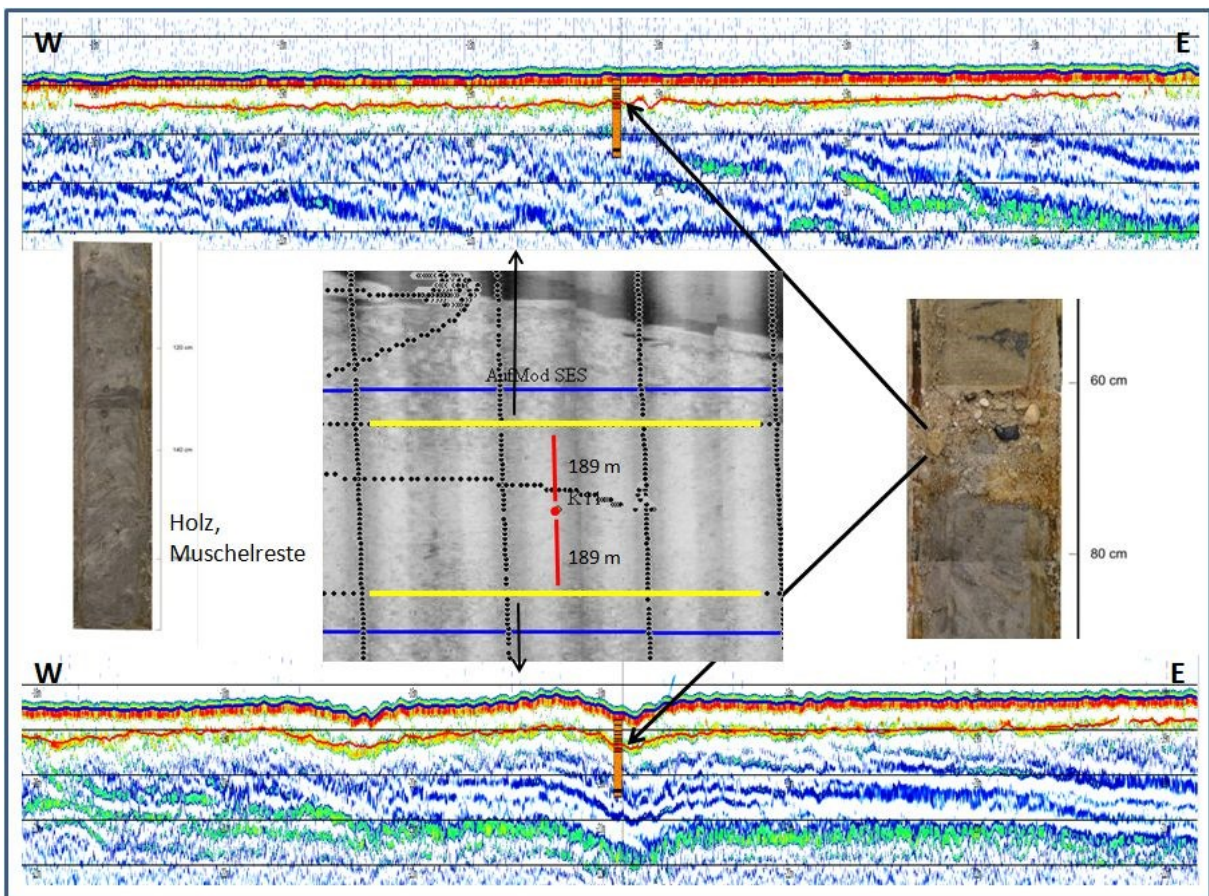


Abbildung 3-60: Zusammenstellung von seismischen Profilen, Seitensichtsonar Mosaiken und Fotos des Sedimentkerns Nr. 11, der auf einer Sandfläche entnommen wurde. Das am oberen Ende des Seitensichtsonar Mosaiks durch die dunkle Farbe des Rückstreusignals repräsentierte grobe Sediment findet in dem Sedimentkern in ca. 65 cm Tiefe seine Fortsetzung

In den entnommenen Sedimentkernen wurden nicht nur rezent-marine Ablagerungen gefunden, sondern auch Sedimente älterer Phasen, die vor der endgültigen Transgression durch die heutige Nordsee abgelagert wurden. Hierzu zählen z.B. Ablagerungen ehemaliger Wattgebiete, die sich hier in früheren Zeiten in diesem Bereich ausgebildet hatten (Erdmann, 2012). Das Alter dieser Sedimente wurde teilweise durch C-14 Datierungen bestimmt. So beträgt in Kern 12 das Alter der Schicht unmittelbar unter der Kieslage (90 cm unter der Sedi-

mentoberfläche, s. Abbildung 3-63) 4.710 ± 25 ^{14}C -Jahre BP. Ein Torf ca. 140 cm unter der Sedimentoberfläche hat ein Alter von ca. 8.000 ^{14}C -Jahren BP. Das hohe Alter, der die Kies-schicht unterlagernden Sedimente, legt den Schluss nahe, dass das in den Sorted Bedforms am Meeresboden aufgeschlossene grobkörnige Sediment als eine Art Transgressionskonglomerat angesehen werden kann. Es überdeckt terrestrische als auch alte, intertidale Sedi-mente. Es setzt energiereiche Bedingungen voraus. Auch wenn der Bildungszeitpunkt dieses Transgressionskonglomerates nicht genau bekannt ist, so kann doch davon ausgegangen werden, dass es die Wirtiefe aller jener Sediment mobilisierenden Prozesse begrenzt, die unter den heutigen hydrodynamischen Randbedingungen möglich sind. Die Menge des für Umlagerungen zur Verfügung stehenden Sedimentes ist damit großflächig wohl als noch geringer einzuschätzen, als es bei Zeiler (Zeiler, et al., 2000b) angegeben ist.

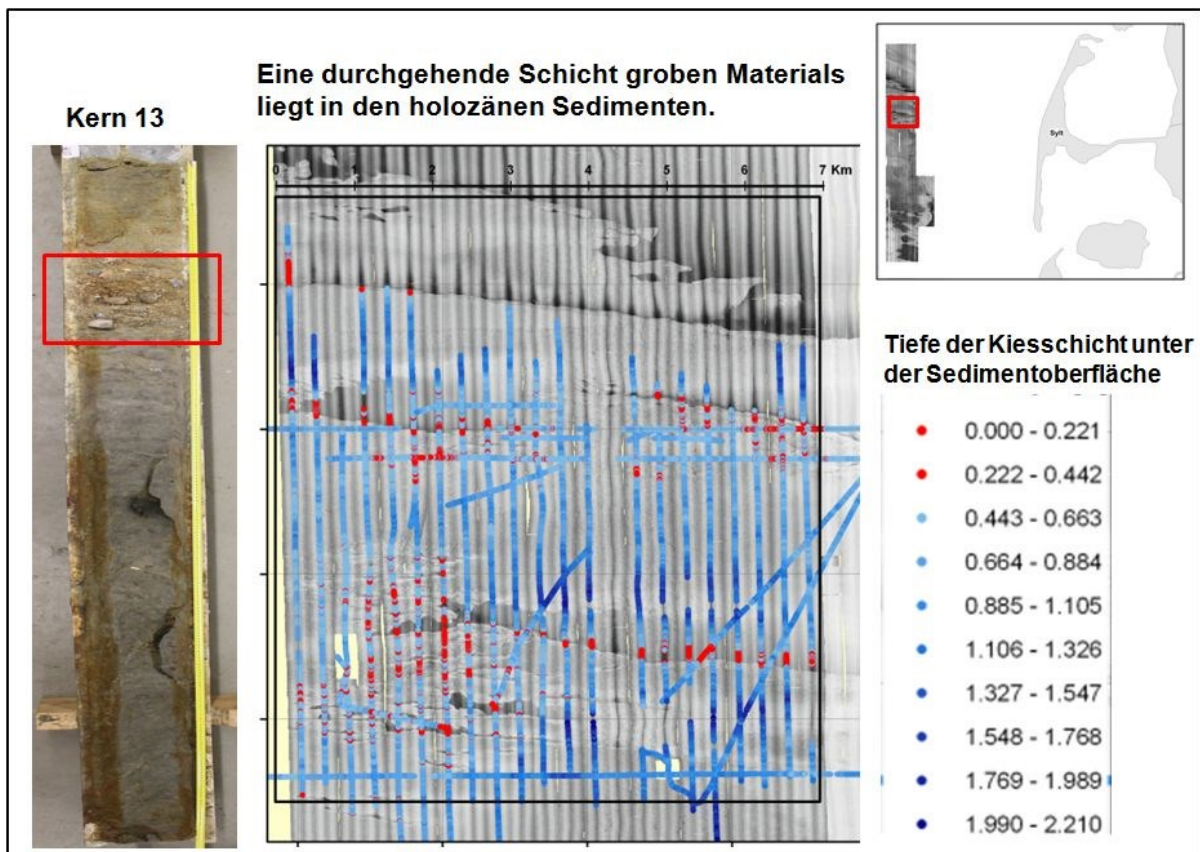


Abbildung 3-61: Mächtigkeit der mobilen Sandauflage über der den Sorted Bedforms entsprechenden Grosand- / Kiesschicht

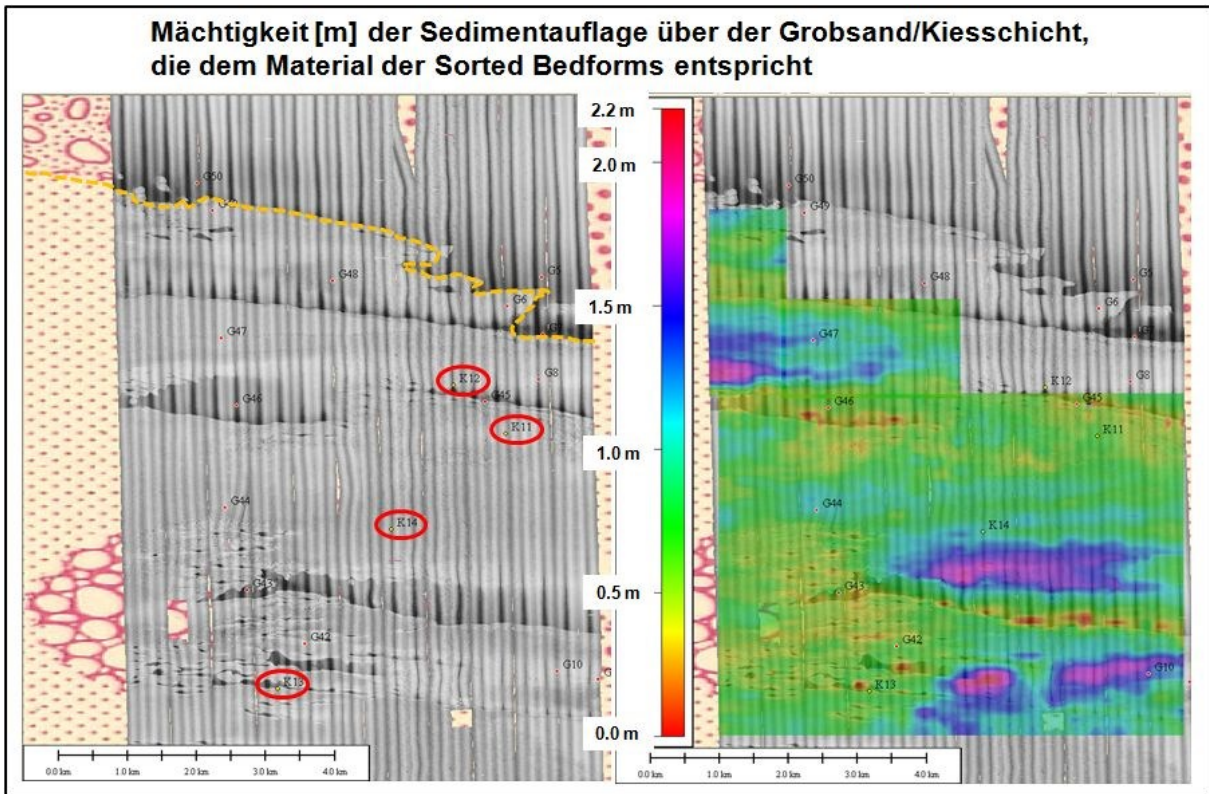


Abbildung 3-62: Linke Seite: Seitensichtsonar Mosaik. Die gelbe Linie zeigt die mit der BSH-Karte übereinstimmende Grenze zwischen feinem und grobem Sediment. Die roten Kreise markieren die Positionen der Sedimentkernentnahmen. Rechte Seite: Flächenhafte Darstellung der Mächtigkeit der mobilen Deckschicht projiziert über die Figge-Karte

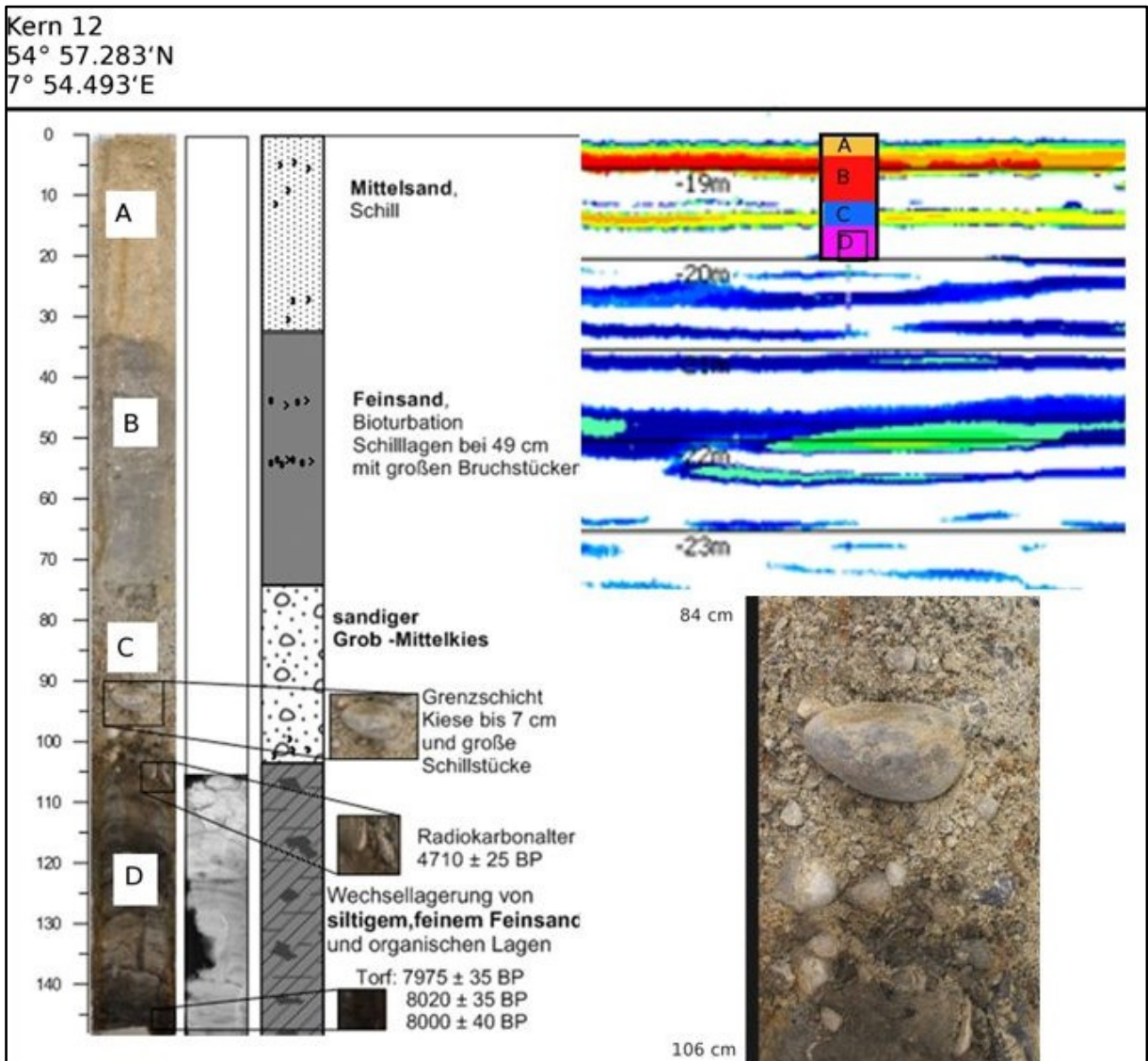


Abbildung 3-63: Lithologisches Profil von Kern 12 inkl. der Ergebnisse der C-14 Datierung sowie eines seismischen Profils an der Lokalität

3.3.3 Einfluss benthischer Organismen auf die Ausbildung der Meeresbodenoberfläche, dargestellt am Beispiel von *Lanice conchilega*

Im Zuge der Kartierungen mit Seitensichtsonaren wurde vor allem auf dem Schelf ein Problem offensichtlich, über das bisher wenig bekannt war. Die Mosaik beinhalten Bereiche mit einem hohen Backscatter (dunkle Bereiche), die in der Regel als Bedeckung mit einem Sediment hoher Rauigkeit, meist Grobsand mit Beimengungen von Mittelsand oder Kies interpretiert werden. Das Groundtruthing durch Greiferproben und Videoaufnahmen zeigte jedoch, dass häufig Feinsandflächen mit einem hohen Grad benthischer Besiedlung vorliegen. Diese Veränderung in dem Signal, das von dem Meeresboden samt benthischer Besiedlung zurückgestreut wird, macht vor allem dann Probleme, wenn künftig automatische Klassifizierungsalgorithmen angewandt werden sollen und nicht ausreichend Sedimentproben zur Verifizierung der Sonarbefunde zur Verfügung stehen. Da benthisch lebende Organismen zusätzlich bestimmte Lebenszyklen aufweisen (juvenile und adulte Stadien) und auch auf Änderungen in den abiotischen Umweltbedingungen reagieren (Sturmereignisse, starke Temperaturschwankungen, saisonale Veränderungen) kann dieses Problem je nach Jahreszeit, zu der die Aufnahmen gemacht werden, unterschiedlich in den Sonaraufnahmen abgebildet sein (Degraer, et al., 2008). Dieser Sachverhalt soll am Beispiel des Bäumchen-

röhrenwürms (*Lanice conchilega*, s. Abbildung 3-65 u. Abbildung 3-66) der in einigen Bereichen des Untersuchungsraumes Flächen in der Größenordnung von mehreren km² dicht besiedelt (Abbildung 3-64), dargestellt werden.

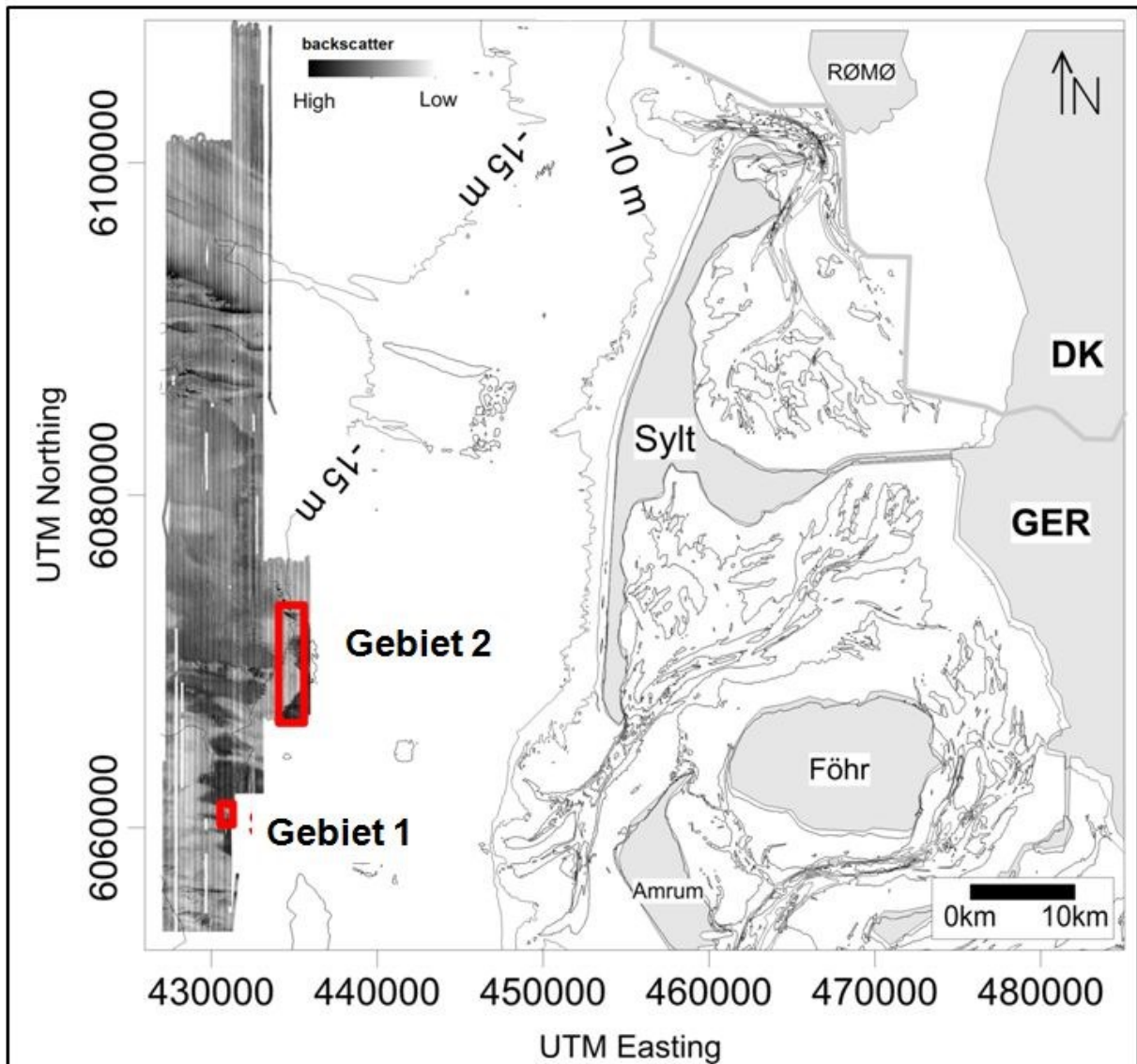


Abbildung 3-64: Die roten Rechtecke markieren Gebiete, in denen der Einfluss des Bäumchenröhrenwurmes (*Lanice conchilega*) auf das Rückstreuverhalten bei Seitensichtsonar Vermessungen, auf die Sedimentverteilungen und auf die Sedimentmobilität detaillierter untersucht wurde. Gebiet 1 umfasst ca. 0,5 km², Wassertiefe ca. 12 m; Gebiet 2 ist ca. 8,6 km² groß, die Wassertiefe reicht bis ca. 15 m (Bezug für die Wassertiefen ist SKN) (aus: Heinrich et al., 2013)

Lanice conchilega kommt von den Intertidalfächern bis zu 1600 m Wassertiefe vor, nimmt dabei aber in seiner Populationsdichte ab (van Hoey et al., 2008). Die höchsten Abundanzen erreicht er auf dem Kontinentalschelf in Wassertiefen bis zu 70 m, wobei er ein siltig / sandiges Sediment favorisiert (Van Hoey, et al., 2008), (Van Lancker, et al., 2004), (Willems, et al., 2008). Der im Sediment röhrenbauende Polychaet (s. Abbildung 3-65 u. Abbildung 3-66) bildet kleine „Riffe“, die sich gegenüber der umgebenden Sedimentoberfläche 10 – 40 cm erheben (Carey, 1987), (Rabaut, et al., 2008). Seine Wohnröhre (vgl. Abbildung 3-65) baut er häufig aus dem gröberen Material des umgebenden Sedimentes, wobei er neben Sandkörnern auch Schalenbruchstücke von Muscheln nutzt (Ziegelmeier, 1952),

(Callaway, 2003), (Rabaut, et al., 2007). *Lanice concchilega* ist in der Nordsee weit verbreitet (Bartholomä, 2006), (Rees, et al., 2007), (Diesing, et al., 2009). Aufgrund seiner Lebensweise, mit der er andere Organismen anzieht aber auch das hydrodynamische und morphologisch / sedimentologische Umfeld verändert, wird er geläufig als „Ecosystem-Engineer“ bezeichnet (Jones, et al., 1993), (Van Hoey, et al., 2008). Der Lebenszyklus von *Lanice concchilega* verläuft saisonal (Carey, 1987). Adulte Formen, die den Winter überlebt haben bzw. nicht unter dem Einfluss von Winterstürmen erodiert wurden oder zu niedrigen Wassertemperaturen zum Opfer fielen, reproduzieren im Frühjahr - Frühsommer, wobei sich zunächst junge Formen zwischen den Älteren anheften. Ungefähr Ende Juli/ August lösen sie sich dann, um die nahe Umgebung des Aufwachsortes zu besiedeln. Aus der Nordsee sind Populationsdichten von bis zu 1000 Individuen/ m² bekannt (Rees, et al., 2007). Sowohl die Grabspuren als auch die Röhren verändern die physikalischen Eigenschaften hinsichtlich Rauheit und Festigkeit; die Größe der Sedimentoberfläche nimmt zu und damit ändert sich auch das Strömungsverhalten über dem Sediment erheblich ((Jones, et al., 1993), (Rabaut, et al., 2007)). Ein weiterer Effekt ist, dass auch das Rückstreuverhalten des Seitensichtsonar Signals derart beeinflusst wird, dass mit *Lanice concchilega* besiedelte Flächen im prozessierten Mosaik nicht eindeutig von Grobsand / Kiesflächen, oder wie im vorliegenden Fall von Sorted Bedforms unterschieden werden können.



Abbildung 3-65: Die Abbildung zeigt adulte Formen von *Lanice concchilega*, wie sie auf der Oberfläche eines Vibrocorkerns (Oberfläche 15 x 15 cm) gefunden wurden. In der linken Abbildung zeigt der Maßstab cm-Einteilungen. Das rechte Bild zeigt, dass die Wohnröhren mehr als 10 cm tief in das Sediment reichen / Ausfahrt: AL – 378)

Ein hohes Maß an Information steckt in der Textur des Bildes, das aus dem rückgestreuten Signal erzeugt wird. Es ist jedoch recht schwierig, kleine Unterschiede visuell zu differenzieren. Eine Graustufen „Co-occurrence Matrix (GCLM)“ kann jedoch benutzt werden, um die Textur eines Bildes zu beschreiben (Haralick, et al., 1973). Statistische Parameter zweiter Ordnung können daraus abgeleitet- und als Eingangsparameter zur Beschreibung der Meeresbodenoberfläche genutzt werden. Blondel & Sichi (Blondel, et al., 2009) und Micallef (Micallef, et al., 2012) haben dieses Verfahren mit Erfolg angewandt. Die Kombination der Texturparameter Entropie und Homogenität werden hier angewandt, um die Textur des vom Meeresboden zurückgestreuten Signals besser zu beschreiben. Hierzu wurde das Signal über 128 Graustufen gespreizt und Flächen der Größe 20 x 20 m ausgewertet (vgl. Abbildung 3-69, Details dazu s. Heinrich (Heinrich, et al., 2013)).



Projekt: AufMod
Fahrt: ALKOR – 396
Entnahmegesetz:
Großkastengreifer
Datum: 14.07.2012,
Position: 7°58.74 E; 54°44.60 N



Abbildung 3-66: Bilder von Sedimentoberflächen, die dicht mit *Lanice conchilega* besiedelt sind. Die Bilder **A** und **C** zeigen den Ausschnitt einer Sedimentoberfläche einer Großkastengreiferprobe (50 x 50 cm Oberfläche) mit juvenilen Formen von *Lanice conchilega*. **C** zeigt deutlich die Höhe der einzelnen Röhren, die in die Wassersäule ragen; im Hintergrund ist ein Probenzylinder zu sehen. **B** zeigt den Ausschnitt mit einer Vertiefung, wo das überstehende Wasser herausgelaufen ist. Deutlich ist zu erkennen, dass ein Großteil der Röhren im Sediment steckt. **D** zeigt das filigrane Tentakelbäumchen, an dem viele Sedimentkörner kleben. **E** zeigt zum Vergleich eine adulte Form von 21 cm Länge.

Wiederholungskartierungen des gleichen Gebietes über 2 Jahreszyklen zeigen, dass es in der Ausbildung von *Lanice conchilega* und in der räumlichen Verteilung der Backscatterintensität erhebliche Unterschiede gibt (Abbildung 3-67). Da es in den Sedimentverteilungen des Substrates kaum Unterschiede zwischen den beiden Jahren gibt, sind die Variationen im Backscatterverhalten auf Veränderungen in der Ausbildung durch die Besiedlung mit *Lanice conchilega* zu suchen. In 2011 wurde das Gebiet aufgrund der unterschiedlichen Intensität des Backscatters in die Faziesbereiche A, B und C unterschieden (vgl. Abbildung 3-67). Fazies A weist einen hohen Backscatter auf und ist im Norden und Süden des Gebietes zu beobachten. Videoaufnahmen und Greiferproben zeigen, dass der Meeresboden hier komplett mit Bäumcheneröhrenwürmern besiedelt ist. Lediglich kleine Bereiche sind unbesiedelt und durch freiliegende Feinsandflächen charakterisiert. Die Textur von Fazies A ist durch hohe Entropiewerte (7,5 – 7,7) und geringe Homogenitätswerte auf (0,06 – 0,08) charakterisiert (s. hierzu Abbildung 3-68). Fazies B zeigt eine geringere Besiedlung mit *Lanice conchilega*. Entsprechend sinken die Entropiewerte (6,3 – 7,3) und die Homogenitätswerte nehmen zu. Fazies C entspricht einem feinen, gut sortierten Sand, auf dem sich Wellenrippen bilden. Die Besiedlung mit *Lanice conchilega* ist äußerst gering. Videoaufnahmen zeigen lediglich einige freiliegende Röhren. Die Entropiewerte liegen bei 5,7 – 5,8, die Homogenitätswerte steigen auf 0,17 – 0,18.

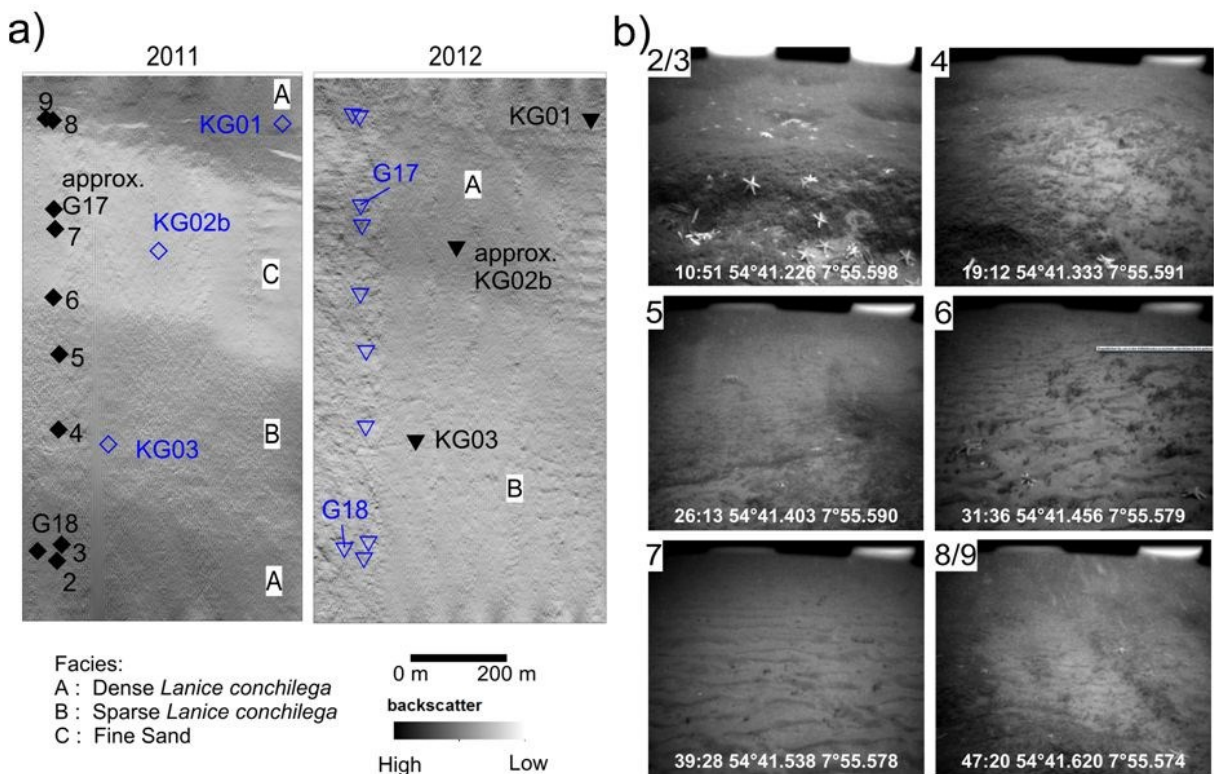


Abbildung 3-67: Vergleich von Seitensichtsonar Mosaiken aus den Jahren 2011 und 2012 (Gebiet 1, vgl. Abbildung 3-64). a) Mosaik mit den Positionen der Sedimententnahmen in 2011 und 2012. Blaue Symbole repräsentieren die Wiederholungsbeprobungen in 2012, gleiche Positionen wie in 2011. Großkastengreifer (KG) wurden nur in 2012 entnommen. In a) im linken Bild sind die KG-Positionen nur fiktiv. b) Screenshots von Videoaufnahmen aus 2011. Die einzelnen Ziffern repräsentieren die Probenahmestationen (aus: Heinrich, et al., 2013))

Die Wiederholungskartierung und -beprobung des Gebietes in 2012 zeigte, dass Fazies A im Norden immer noch vorhanden war, jedoch Fazies C nicht wiedergefunden wurde (vgl. Hierzu Abb. Abbildung 3-69). Dieser Bereich war jetzt mit *Lanice conchilega* besiedelt. Fa-

zies A im Süden des Gebietes zeigte eine geringere Besiedlungsdichte von *Lanice conchilega* und entsprach hinsichtlich der Texturparameter nun Fazies B (s. Abbildung 3-67 u. Abbildung 3-68). Diese Sachverhalte wurden durch Kastengreiferproben und Videoaufnahmen bestätigt. *Lanice*-Felder können durch sinkende Homogenitätswerte und steigende Entropiewerte charakterisiert werden. Die Besiedlungsdichte der Meeresbodenoberfläche mit *Lanice conchilega* lässt sich damit durch die Texturparameter Entropie und Homogenität automatisch differenzieren und charakterisieren. Dies ist von hoher Bedeutung, wenn künftig automatische Klassifikationsverfahren angewandt werden. Dennoch ist eine vorherige Eichung durch Bodenproben und Videoaufnahmen unabdingbar. Für Modellierungsaufgaben hinsichtlich des Sedimenttransportes müssen solche Flächen, die jahreszeitlichen Änderungen unterliegen, ausgewiesen werden, da die dichte Besiedlung nicht nur die Initiierung des Sedimenttransportes behindert, sondern auch eine morphologische Beeinflussung durch Erhöhung der Sedimentoberfläche darstellt.

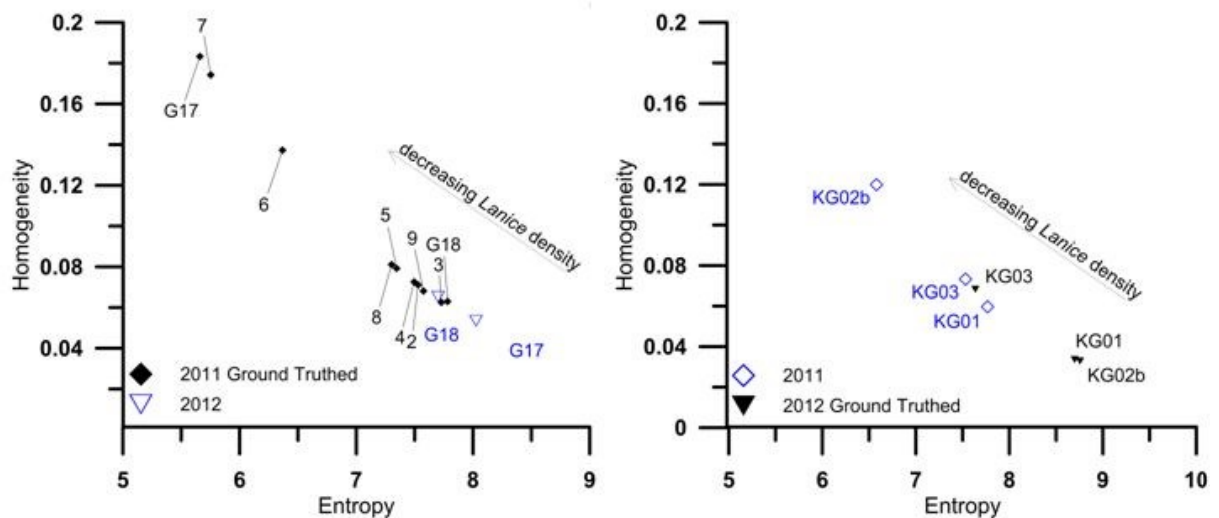


Abbildung 3-68: Das linke Diagramm zeigt das Verhältnis von Homogenitätswerten gegenüber Entropiewerten für ausgewählte Probenstationen aus dem Mosaik 2011. Groundtruthing erfolgte neben Greiferbeprobungen auch durch Videoaufnahmen. In der rechten Abbildung sind die Werte für einzelne Positionen aus 2011 und 2012 zusammen dargestellt. Es wurden identische Stationen beprobt. Die veränderten Naturbedingungen spiegeln sich in veränderten Texturparametern wider (aus: (Heinrich, et al., 2013).

3.3.4 Analyse der Bodenformen

Insgesamt wurden etwa 2000 individuelle Bodenformen aus den Datensätzen 2008-2010 ermittelt. Dieser große Datensatz ermöglicht die Überprüfung und Weiterentwicklung gängiger empirischer Beziehungen, die beispielsweise den Zusammenhang zwischen Höhe und Länge von Bodenformen zeigen ((Allen, 1968), (Dalrymple, et al., 1978), (Flemming, 1988), (Francken, et al., 2004) und (Van Landeghem, et al., 2009)).

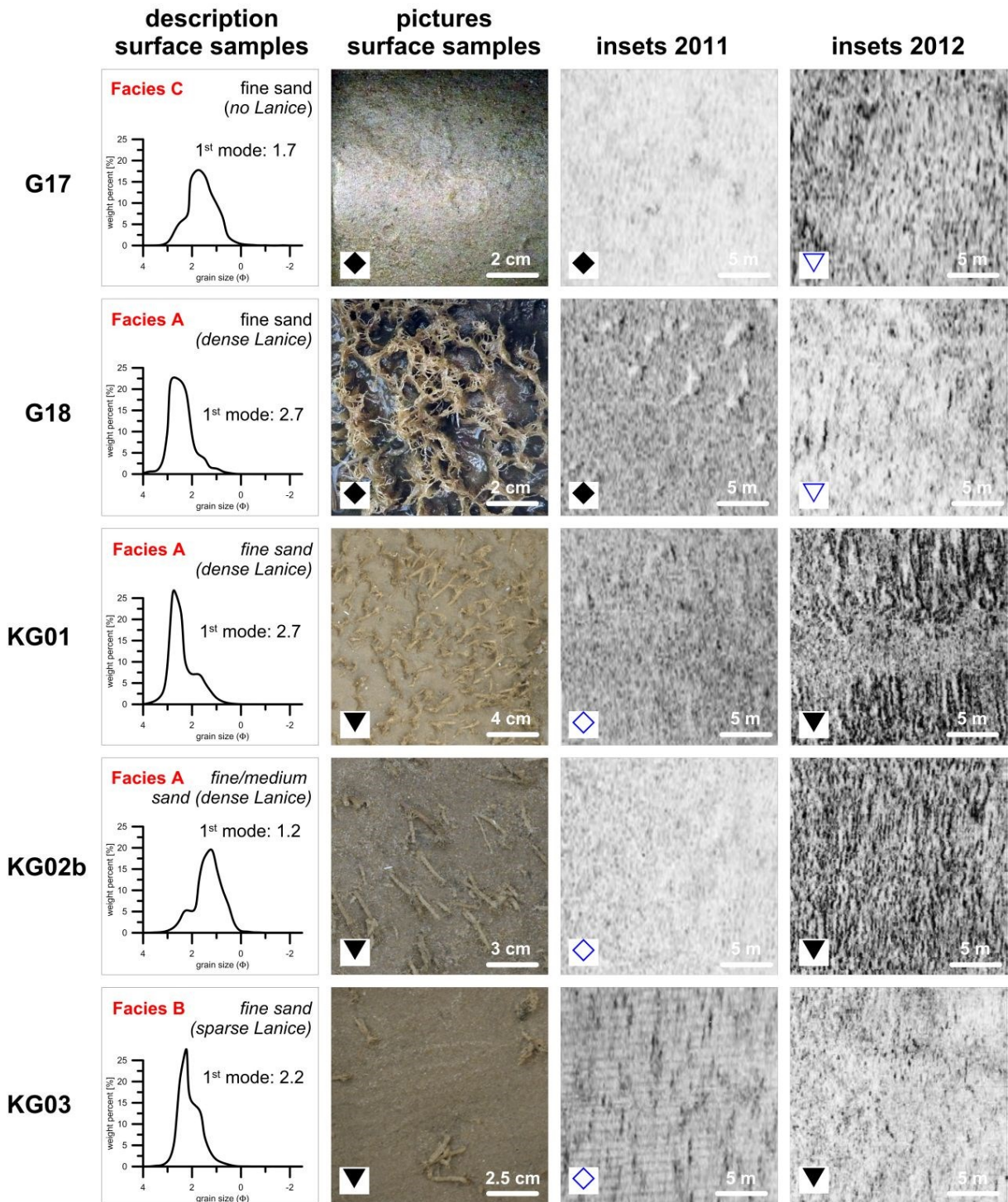


Abbildung 3-69: Siebkurven, Fotoausschnitte der Sedimentoberfläche und die entsprechenden 20 x 20 m insets aus den jeweiligen Jahren (Erläuterung s. Text, für die Symbole vgl. Abbildung 3-67 u. Abbildung 3-68).

Der Vergleich dieser Funktionen mit den Daten unserer Studie zeigt eine große Streuung der Beziehung zwischen Längen und Höhen individueller Bodenformen (Abbildung 3-70). Werden alle Bodenformen in die Berechnung einbezogen, so ergeben sich sehr schwache Korrelationskoeffizienten ($R^2=0.3$). Die entsprechende Trendlinie liegt etwas unterhalb der Beziehung von Flemming (Flemming, 1988) und unterschätzt im Vergleich zu dessen Gleichung um einen Faktor von bis zu 1.6. Zur weiteren Analyse wurde eine Wichtung nach der Wahrscheinlichkeitsdichte durchgeführt: So wurden die einzelnen Höhen jeder Längenklasse nach ihrer Häufigkeit aufgetragen und diese Verteilung mit einer Funktion approximiert

(Generalised Extreme Value Method). Diese Art der Auswertung führt zu der Möglichkeit der Darstellung einer Funktion, die die Höhe angibt, die sich mit höchster Wahrscheinlichkeit einer bestimmten Länge zuordnet (Abbildung 3-71).

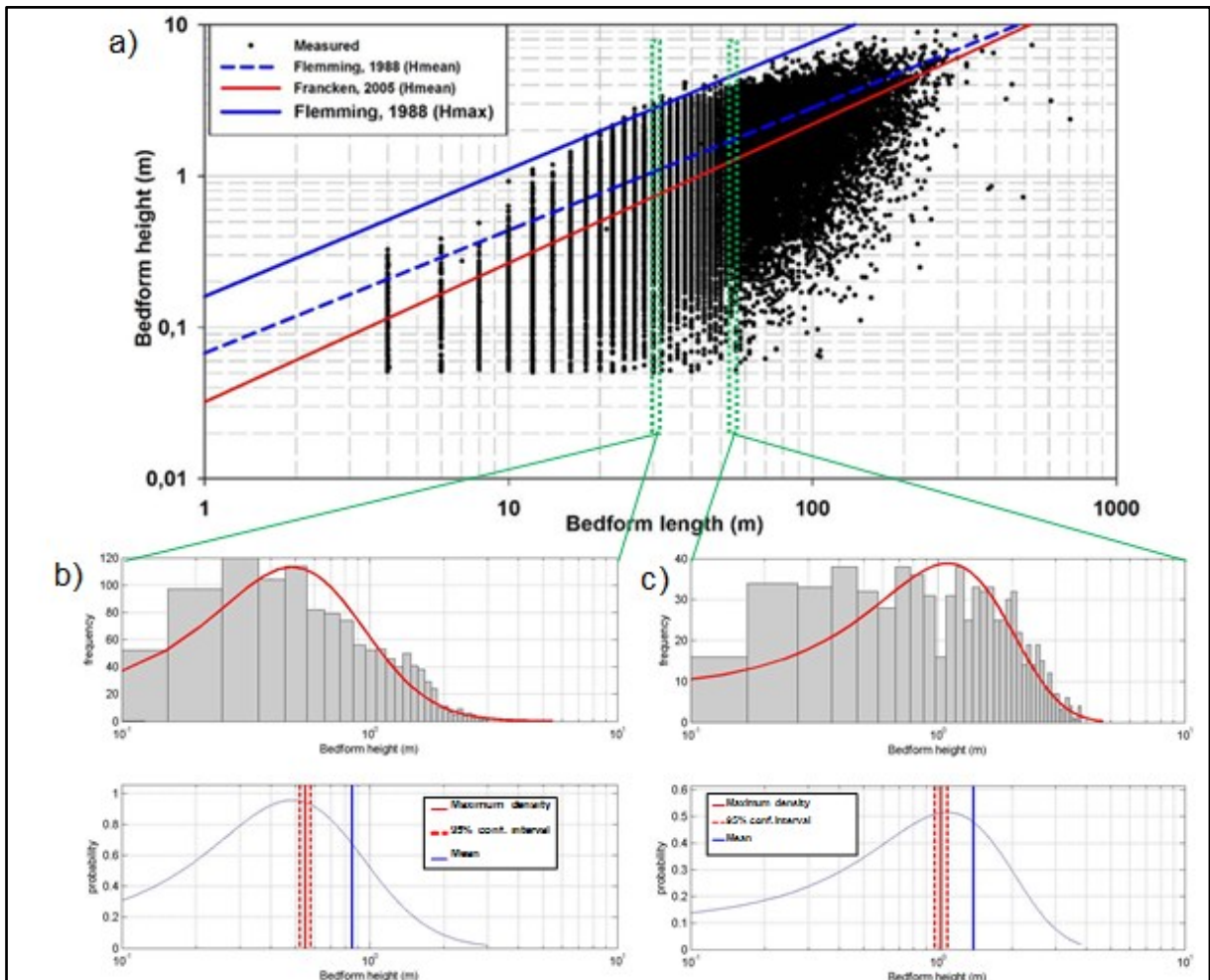


Abbildung 3-70: a) Empirischer Zusammenhang zwischen Bodenform Längen und Höhen und b) Anpassung einer Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion und Bestimmung der jeweiligen Maxima

Diese Punkte können mit einer weiteren Funktion ($H=0.01129 L^{1.093}$) mit erhöhter Korrelation ($R^2=0.752$) approximiert werden. Diese Funktion liegt unterhalb der Gleichung zur Mittlere Höhe von Bodenformen von Flemming (Flemming, 1988) und prognostiziert bis zu einem Faktor 4 geringere Höhen.

Diese Abweichung kann mit mehreren Ansätzen erklärt werden:

1. Die Methodik der Wahrscheinlichkeitsdichte führt zu geringeren Werten, wie beispielhaft in Abbildung 3-70 a gezeigt ist. Die Verwendung individueller Bodenformen in dieser Studie unterscheidet sich von den Daten von Flemming (Flemming, 1988), der überwiegend mittlere Größen aus Feldbeobachtungen und Kanalexperimenten zusammengeführt hatte.
2. Die Bestimmung der Höhe von Bodenformen aus den DGM kann durch die notwendige Diskretisierung zu geringeren Höhen führen.
3. Die hier untersuchten Bodenformen sind nicht notwendigerweise in einem natürlichen Gleichgewichtszustand. Die Unterhaltung der Schifffahrtsstraßen erfordert regelmäßige Baggerungen, und damit eine Reduktion der Höhe (großer) Bodenformen.

Im Rahmen dieses Forschungsprojekts ist die hydraulische Wirksamkeit von Bodenformen von besonderem Interesse. Bodenformen sind besonders dann hydraulisch wirksam, wenn sich in Strömungsrichtung hinter der Form ein Leewirbel ausbildet, der (Strömungs-) Energie aus dem System umwandelt. Nach Paarlberg (Paarlberg, et al., 2007) finden eine Ablösung der Grenzschicht und eine Rezirkulation hinter Bodenformen statt, wenn eine Steilheit von 10° überschritten wird. Berücksichtigt man in der Darstellung der Abhängigkeit von Längen und Höhen nur jene mit einer Steilheit von mindestens 10° , dann ändert sich die Verteilung signifikant: In Abbildung 3-71 sind farbige die als hydraulisch aktiv bezeichneten Bodenformen gezeigt. Diese gliedern sich größtenteils unterhalb der Beziehung der maximalen Verhältnisse von Flemming (Flemming, 1988), die hier als obere Grenze gesehen werden kann, und oberhalb der oben angegebenen Approximation der maximalen Wahrscheinlichkeitsdichte. Diese hier als hydraulisch relevant bezeichneten Bodenformen lassen sich mit der Beziehung $H=0.1665 L^{0.6672}$ ($R^2=0.53$) annähern.

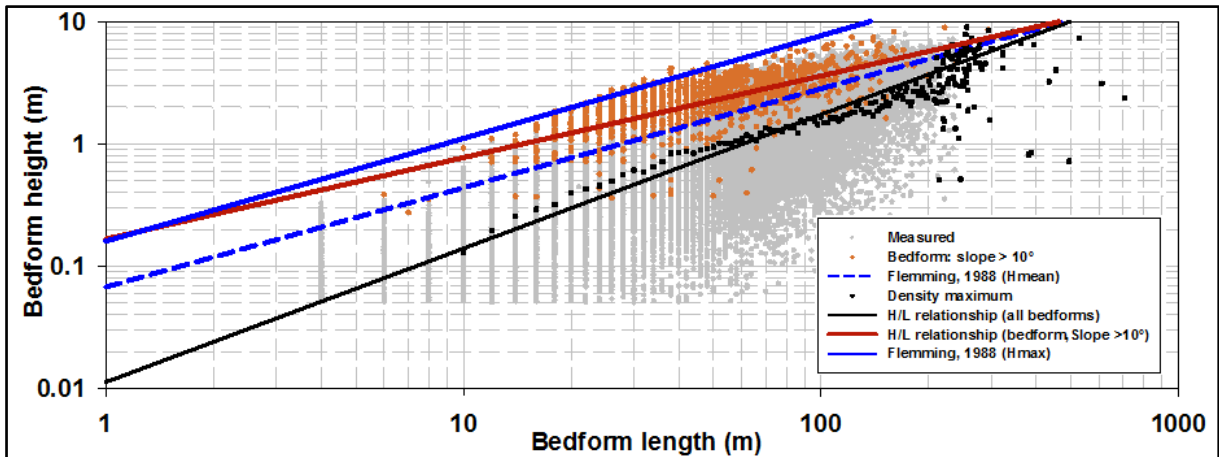


Abbildung 3-71: Darstellung hydraulisch aktiver Bodenformen

3.3.5 Stabilität von Bereichen mit Bodenformen

Die räumliche Entwicklung der Bodenformen in einem etwa 35-37 jährigen Zeitraum lässt sich durch den Vergleich der Daten von Ulrich (Ulrich, 1971) und den aktuellen Daten durchführen. Dabei lassen sich nur solche Bereiche vergleichen, die von beiden Datensätzen gleichermaßen abgedeckt sind (Abbildung 3-72). Nur die übereinstimmenden Gebiete (129 km^2) wurden berücksichtigt, um die Evolution von Bodenformen zu quantifizieren.

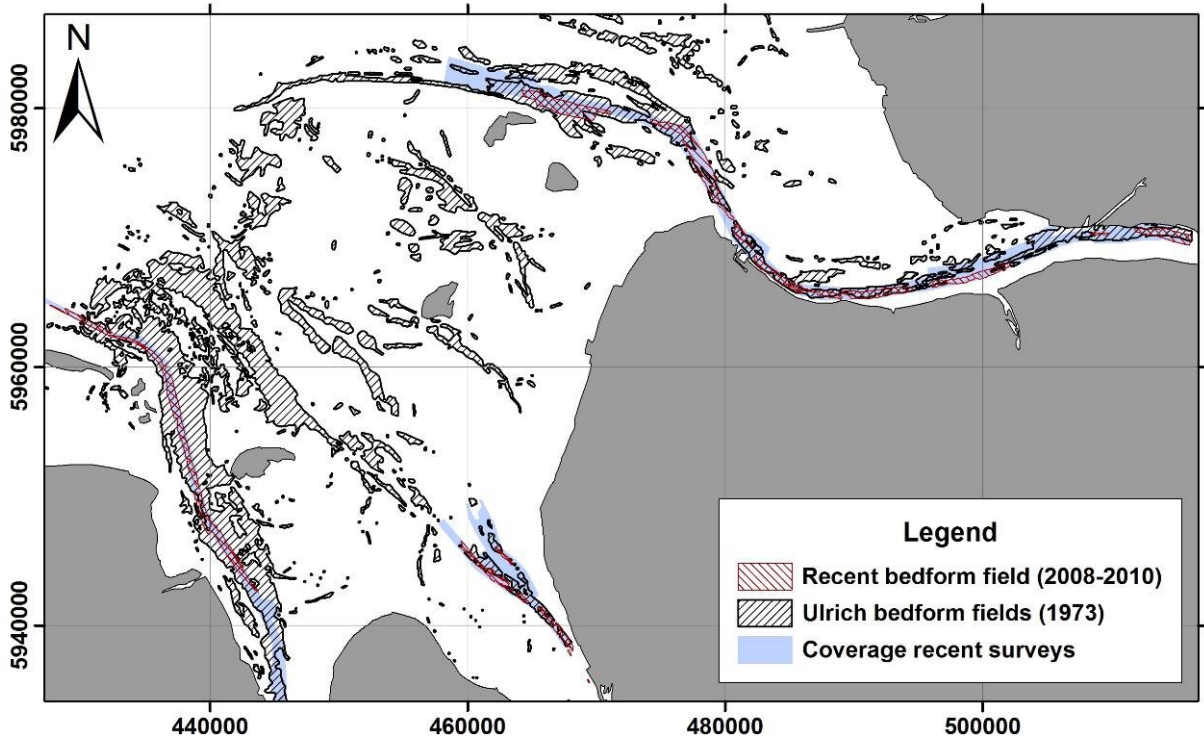
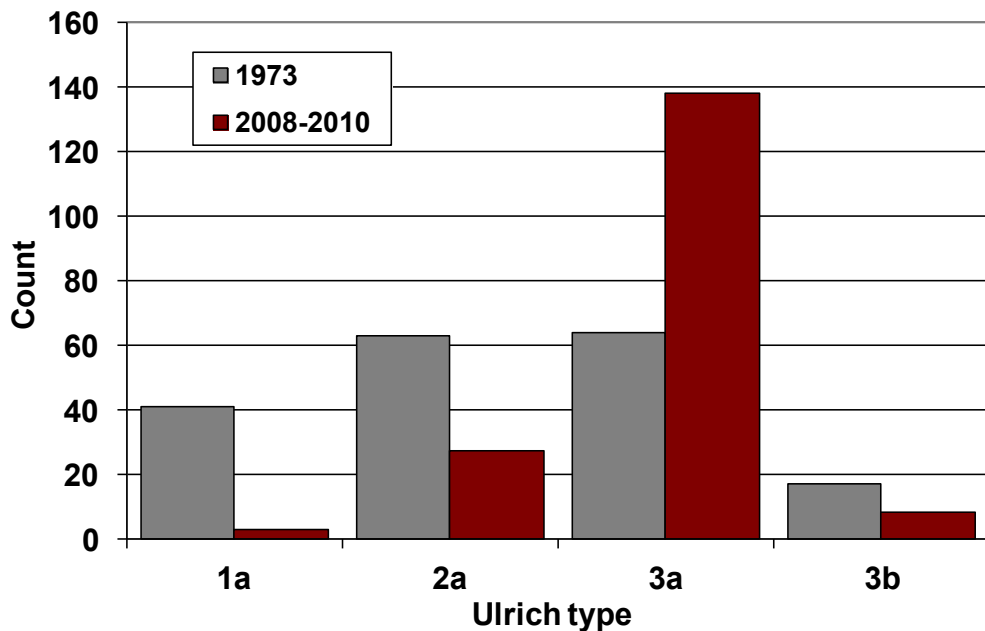


Abbildung 3-72 Bereiche die sowohl von Ulrich (Ulrich, 1971) als auch von den neuen Datensätzen abgedeckt sind

Generell stimmen die Bereiche zu den Zeitpunkten vor 1973 und in 2008-2010 überein. Es zeigt sich eine deutliche Abnahme kleinerer und flacherer Formen (Ulrich Typ 1a, 2a, 2). Im Gegensatz dazu nehmen die großen, steileren Bodenformen zu.



	1a	2a	3a	3b
Bedform height	0.5 m - 1 m	1 m - 2 m	2 m - 6 m	2 m - 6 m
Bedform length	6 m - 75 m	12 m - 150 m	24 m - 200 m	100 m - 400 m

Abbildung 3-73: Entwicklung der Arten der Bodenformen im Untersuchungsgebiet

3.3.6 Gültigkeit von Prädiktoren

Auf der Basis umfangreicher bathymetrischer Daten (Fächerecholot Aufnahmen der zuständigen Behörden) wurden individuelle Bodenformen identifiziert, und hinsichtlich ihrer Eigenschaften (Länge, Höhe, Steigung) charakterisiert. Eine Sortierung nach der Steigung des Leehangs der Bodenformen ermöglicht die Identifikation hydraulisch wirksamer Bodenformen (hier: Steigung > 10°). Durch Verschneidung dieser Daten mit Information über die lokale Sedimentbeschaffenheit (Shelf Geo-Explorer, BSH) und Hydrodynamik (Modellrechnung BAW) lassen sich Wirkungsbeziehungen durch empirische Funktionen beschreiben.

Anhand dieser Datengrundlage wurden Gleichgewichtsbeziehungen (Prädiktoren), die zur Berechnung von Bodenformen aus repräsentativen hydrodynamischen und sedimentologischen Kenngrößen oft verwendet werden ((Van Rijn, 1984), (Yalin, 1964), (Julien, et al., 1995)) überprüft. Ergebnisse (vgl. Abbildung 3-74) zeigen eine nicht signifikante Korrelation zwischen gemessenen und berechneten Bodenformhöhen und –längen. Für die Gesamtheit der in dieser Studie ausgewerteten Bodenformen sind die untersuchten Prädiktoren nicht hinreichend.

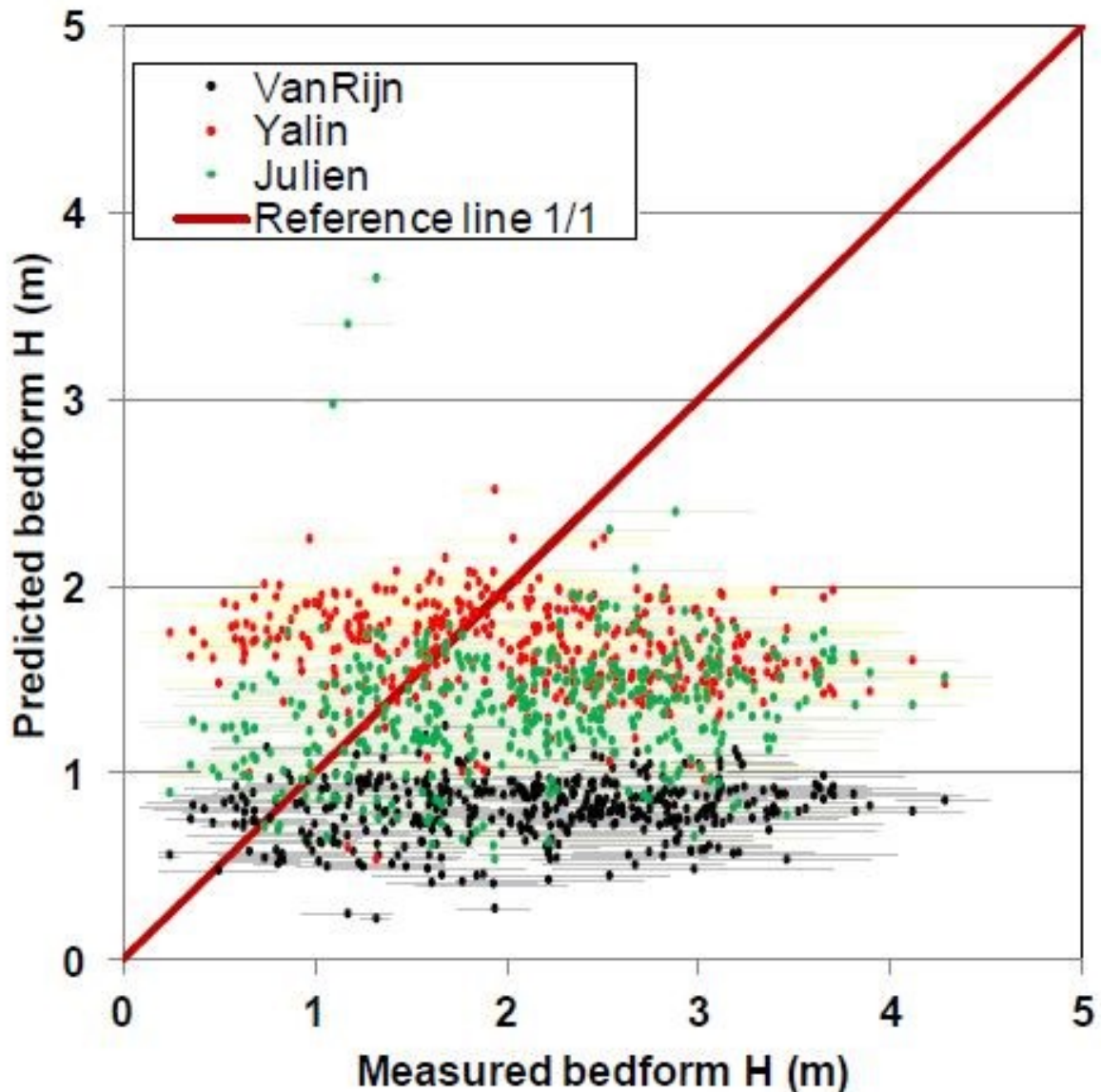


Abbildung 3-74: Vergleich gemessener und berechneter Prädiktoren für die Höhe von Bodenformen

Zur Eingrenzung und genaueren Analyse der Gleichgewichtsbeziehungen wurden Zeiträume identifiziert, die geringe Abflussraten aufweisen. Die in diesen Zeiträumen erhobenen morphologischen Daten können somit als vom Abfluss wenig beeinflusst charakterisiert werden. Eine Überprüfung der Gültigkeit gängiger Prädiktoren mit Beschränkung auf diesen reduzierten Datensatz, ergab keine Verbesserung der Qualität. Weiterhin gilt also, dass die bekannten Prädiktoren für den großen Datensatz der in dieser Studie ausgewerteten Bodenformen nicht hinreichend sind.

3.3.7 Zeitliche Variabilität von Bodenformen

Aus früheren Studien (z.B. (Nasner, 1978)) ist die hohe zeitliche Variabilität der Bodenformen in Tideflüssen und Ästuaren bekannt. Es besteht ein hoher empirischer Zusammenhang zwischen Bodenformhöhe (und damit auch der hydraulischen Wirksamkeit) und dem Oberwasser. Im Rahmen dieser Studie wurde diese Abhängigkeit für verschiedene Bereiche der Unterweser quantifiziert. Dafür wurde ein vierjähriger Datensatz ausgewertet, bei dem monatliche Vermessungen gleicher Gebiete mit den jeweils vorherrschenden Abflussbedingungen in Beziehung gesetzt wurden. Es konnten für einzelne Bereiche hohe Korrelationen zwischen Abfluss und Bodenformhöhe ($R^2=0.63$) gezeigt werden. In der Außenweser liegen die maximalen gemittelten Migrationsgeschwindigkeiten (bei höchsten Abflussraten) bei mehreren Metern pro Monat, in der Unterweser bei bis zu 30 Metern pro Monat.

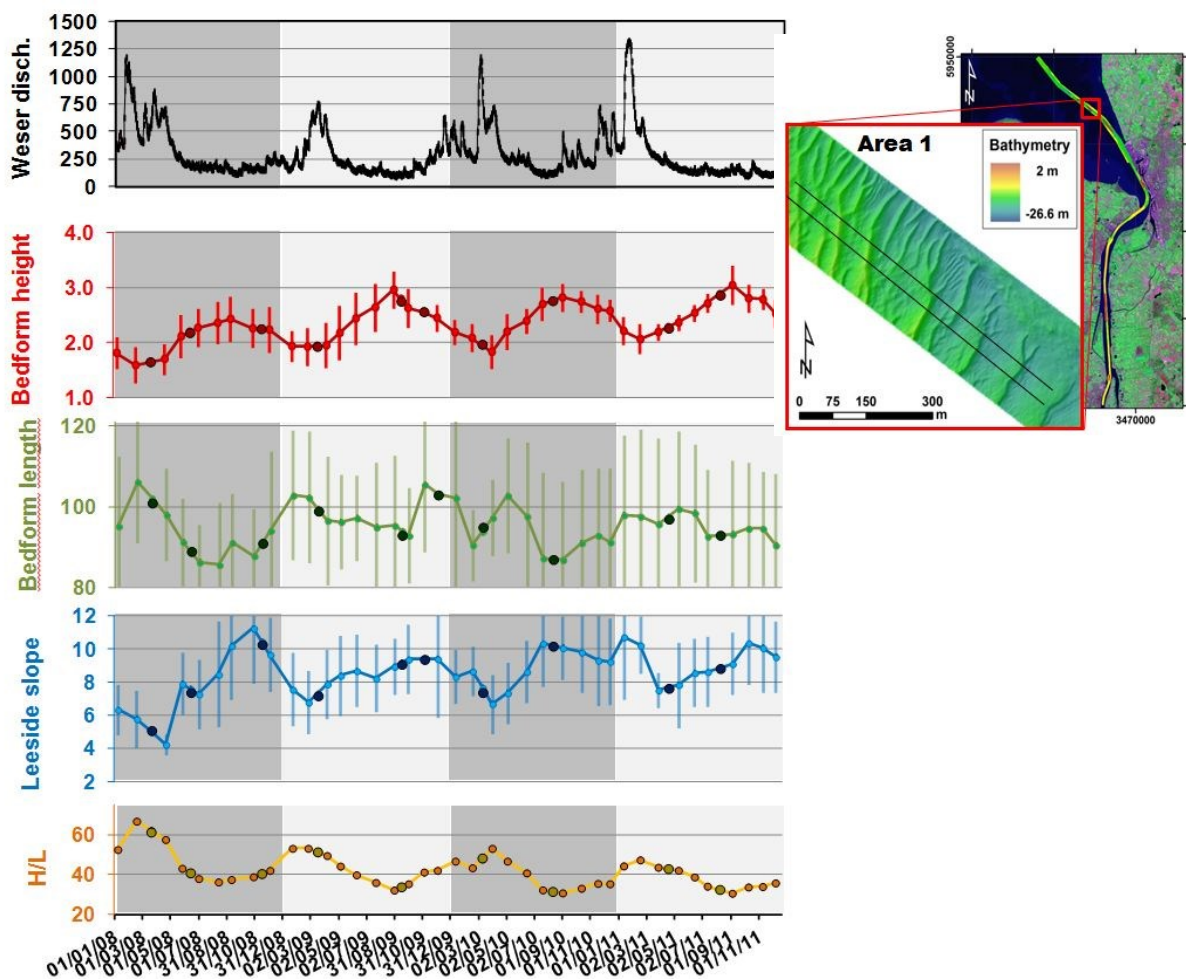


Abbildung 3-75: Abfluss Weser und Zeitreihen der mittleren Höhe, Länge, Leewinkel, Steilheit von Bodenformen im Gebiet 1 (Außenweser)

3.3.8 Gleichgewichtsbeziehung

Nach erneuter Reduktion des Datensatzes auf hydraulisch wirksame Bodenformen bei niedrigen Abflussraten wurde durch Anpassung einer polynomischen Funktion eine empirische Beziehung zur Beschreibung der Bodenformhöhe formuliert (Abbildung 3-76).

Diese Beziehung beschreibt mit vergleichsweise hoher Genauigkeit ($R^2=0.66$) die hier analysierten Bodenformen. Die Gleichung ist stetig und lässt sich einfach in numerische Modellsysteme integrieren.

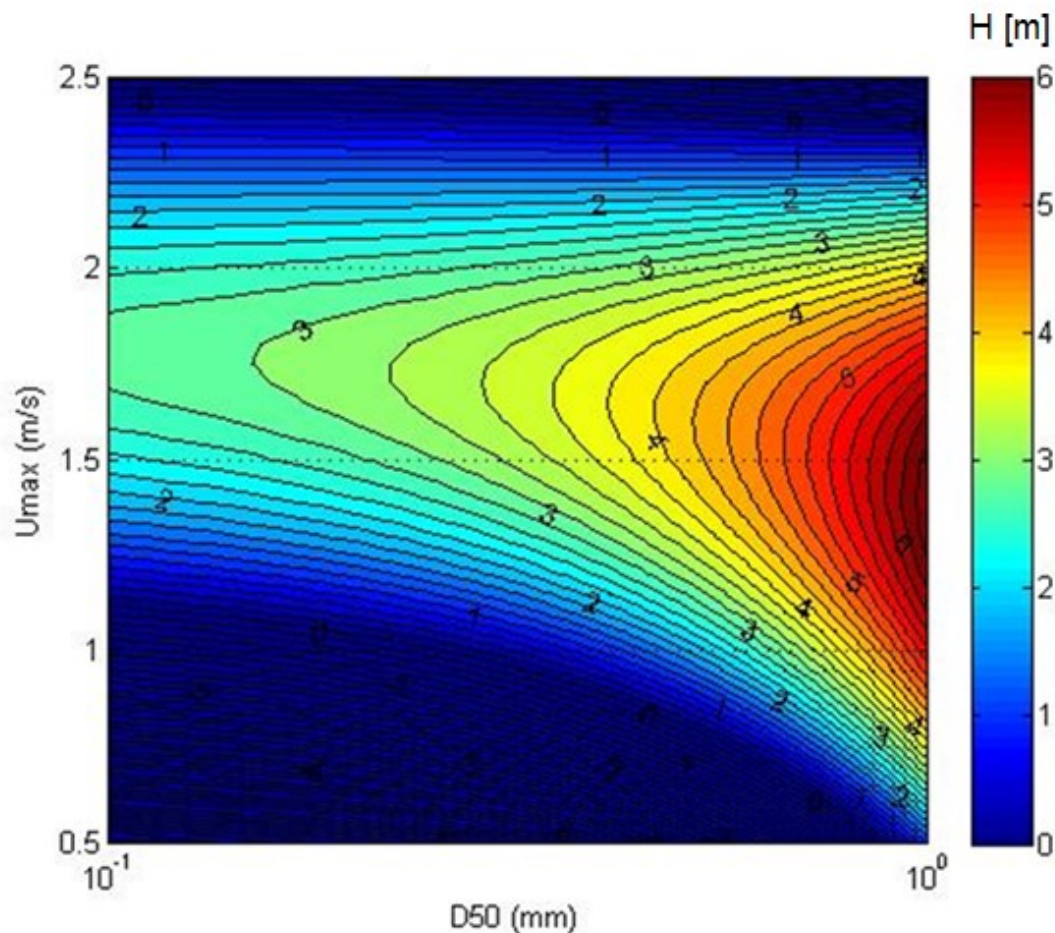


Abbildung 3-76: Abhängigkeit der Bodenformhöhe H von Strömungsgeschwindigkeit (U_{max}) und Korngröße D_{50}

3.4 Produkte der flächendeckenden Sedimentkartierung

Wie in Kapitel 2.4.3 erläutert wurden im Zuge der flächendeckenden Sedimentkartierung für alle Fokusgebiete Polygone einheitlicher Sedimenttypen erzeugt, die als Produkt der Öffentlichkeit zur Verfügung stehen. Nachfolgende Tabelle 3-3 zeigt die Parametrisierung und verfügbaren Dienste dieser Daten. Abbildung 3-77 und Abbildung 3-78 geben ein Beispiel anhand des Fokusgebiets nördlich von Spiekeroog wieder.

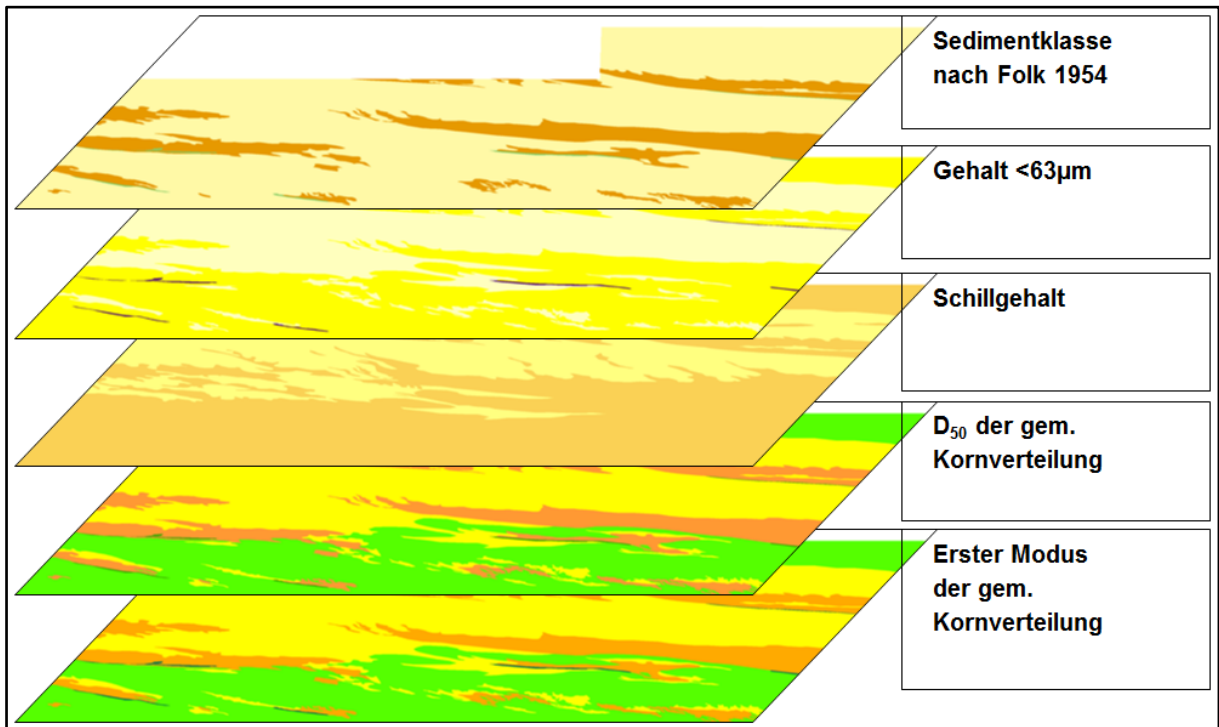


Abbildung 3-77: Verschiedene Layer der SSS-Klassifikation am Beispiel des Fokusgebiets nördlich von Spiekeroog, nach der Darstellung im Fachinformationssystem „Shelf Geo-Explorer“ des BSH (Legende in Abbildung 3-78 dargestellt)

Tabelle 3-3: Parametrisierung und verfügbare Web-Dienste (in Arbeit) der Ergebnisse aus der flächendeckenden Sedimentkartierung in den Fokusgebieten

Parameter	WMS (Darstellung im WebGIS MDI-DE, GDI-BSH)	WFS (Spalte in Attributtabelle)
Klassifikation nach Folk (1954)	Darstellungslayer	Folkklasse (Text)
Gehalt <63µm	Darstellungslayer	[%]
1. Modus	Darstellungslayer, [Phi]	[Phi]
D ₅₀	Darstellungslayer, [Phi]	[Phi]
Schillgehalt	Darstellungslayer, [Gewichts-%]	[Gewichts-%]
Glühverlust	Darstellungslayer, [Gewichts-%]	[Gewichts-%]
Porosität	Darstellungslayer für Ästuare	Gemittelte Werte
Mobilitätsinformation	-	individuelle Einträge für einzelne Fokusgebiete
Bodenformen	-	Textspalte für 2 Einträge: 1. Angabe über Vorkommen und evtl. Art der Bodenform 2. Keine Angabe möglich (die Aussage „keine Bodenformen“ wird bewusst vermieden, da solche in SSS-Aufnahmen nicht immer sichtbar sind)
Besonderheiten	-	Textspalte zur Angabe von für das Fokusgebiet spezifische Besonderheiten

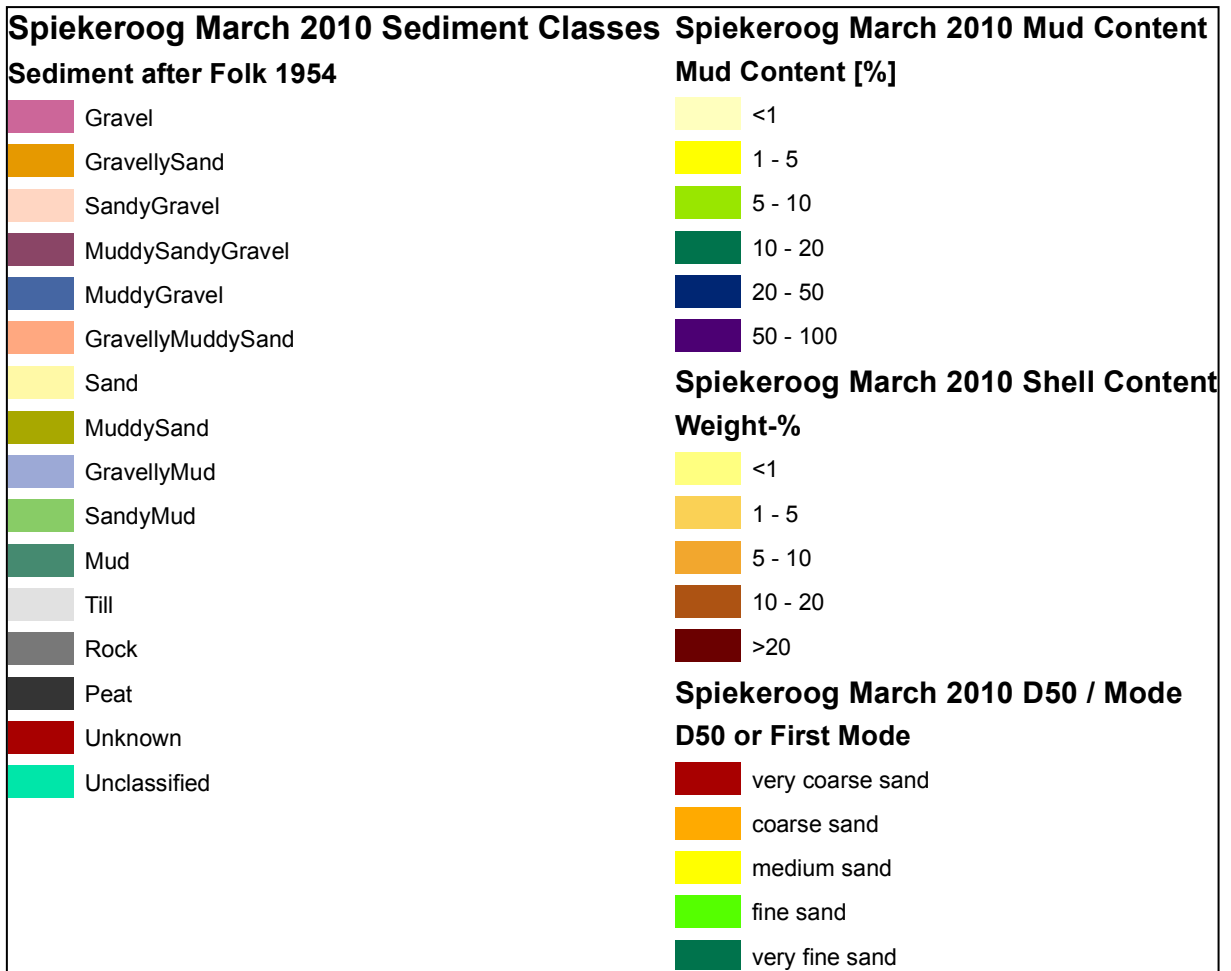


Abbildung 3-78: Legende der einzelnen Darstellungslayer aus Abbildung 3-77

Neben diesen Ergebnissen wurden weitere Produkte erstellt, die der Verfügbarkeit und Dokumentation der Messdaten aus **AufMod** dienen. Die hydroakkustischen Rohdaten werden zentral am BSH gespeichert. Die Verläufe der Messungen wurden als Linien erfasst, die Informationen zu den Ausfahrten (wie Datum und Witterungsbedingungen) eingesetzten Geräten (Gerätetyp, verwendete Frequenz,...), Namen der Rohdateien und Hinweise auf weiterverarbeitete Produkte (Rastermosaike) tragen. Für die Sedimentproben wurden die Probestationen als Punkte erfasst, die ebenfalls Informationen zu Ausfahrten und Geräten enthalten. Zudem wurden die Beschreibungen des Sediments festgehalten und Laborwerte, wie Korngrößenverteilungen, Porosität, Schillgehalt und Glühverlust als Attributtabelle angefügt. Abbildung 3-79 zeigt am Beispiel des Fokusgebiets „Vorstrand/Schelf“ die Aufbereitung der hydroakustischen und sedimentologischen Messdaten.

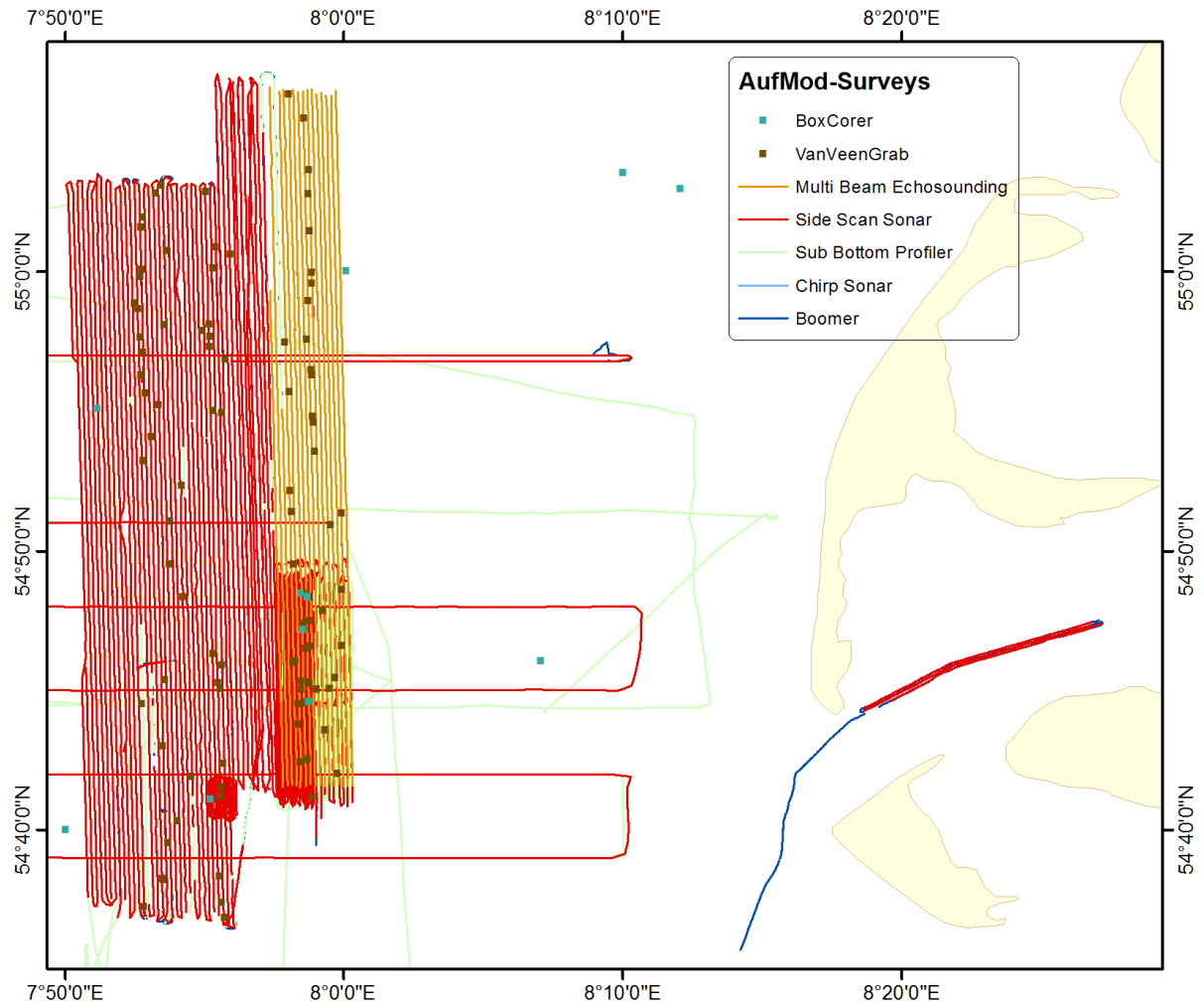


Abbildung 3-79: In **AufMod** erfasste Messdaten im Fokusgebiet „Vorstrand/Schelf“ westlich von Sylt, nach der Darstellung im „Shelf Geo-Explorer“

3.5 Datenbasierte Ergebnisse

3.5.1 Morphologische Produkte des Funktionalen Bodenmodells

Im Folgenden werden die frei verfügbaren morphologischen Ergebnis-Produkte dokumentiert, die aus dem Funktionalen Bodenmodell innerhalb des Forschungsvorhabens **AufMod** hervorgegangen sind. Diese sind über die Seite der MDI-DE recherchierbar und können in verschiedenen Datenformaten heruntergeladen werden.

Zu den wesentlichen Produkten aus **AufMod** gehören flächendeckende Tiefenverteilungen, die als Ausgangsdatensätze weiterer morphologischer Analysen herangezogen werden können.

Tiefenverteilung deutsche Nordsee

Als „aktuelle Bathymetrie“ wurde die Tiefe über das gesamte deutsche Nordseegebiet flächendeckend interpoliert. Hierzu dienten die neuesten Datensätze die im Bodenmodell abgelegt wurden als Grundlage. Die räumliche Auflösung dieses Datensatzes beträgt 250m.

Bathymetrische Zeitreihe

Für den morphologisch hoch dynamischen Küstennahbereich war es möglich aufgrund der umfangreichen Wiederholungsmessungen zeitvariante Bathymetrien zu berechnen, anhand

derer weitere Analysen durchgeführt wurden (vgl. Abbildung 3-81). Der Zeitraum dieser Datenreihe reicht von 1982 bis 2012, wobei jeweils zum 01.06. jeden Jahres eine Topographie raum-zeitlich interpoliert wurde. Die räumliche Auflösung dieser umfangreichen Zeitreihe beträgt 50m, mit einer Ausdehnung von der Küstenlinie bis zur seewärtigen 20m-Isobathe (Abbildung 3-80).

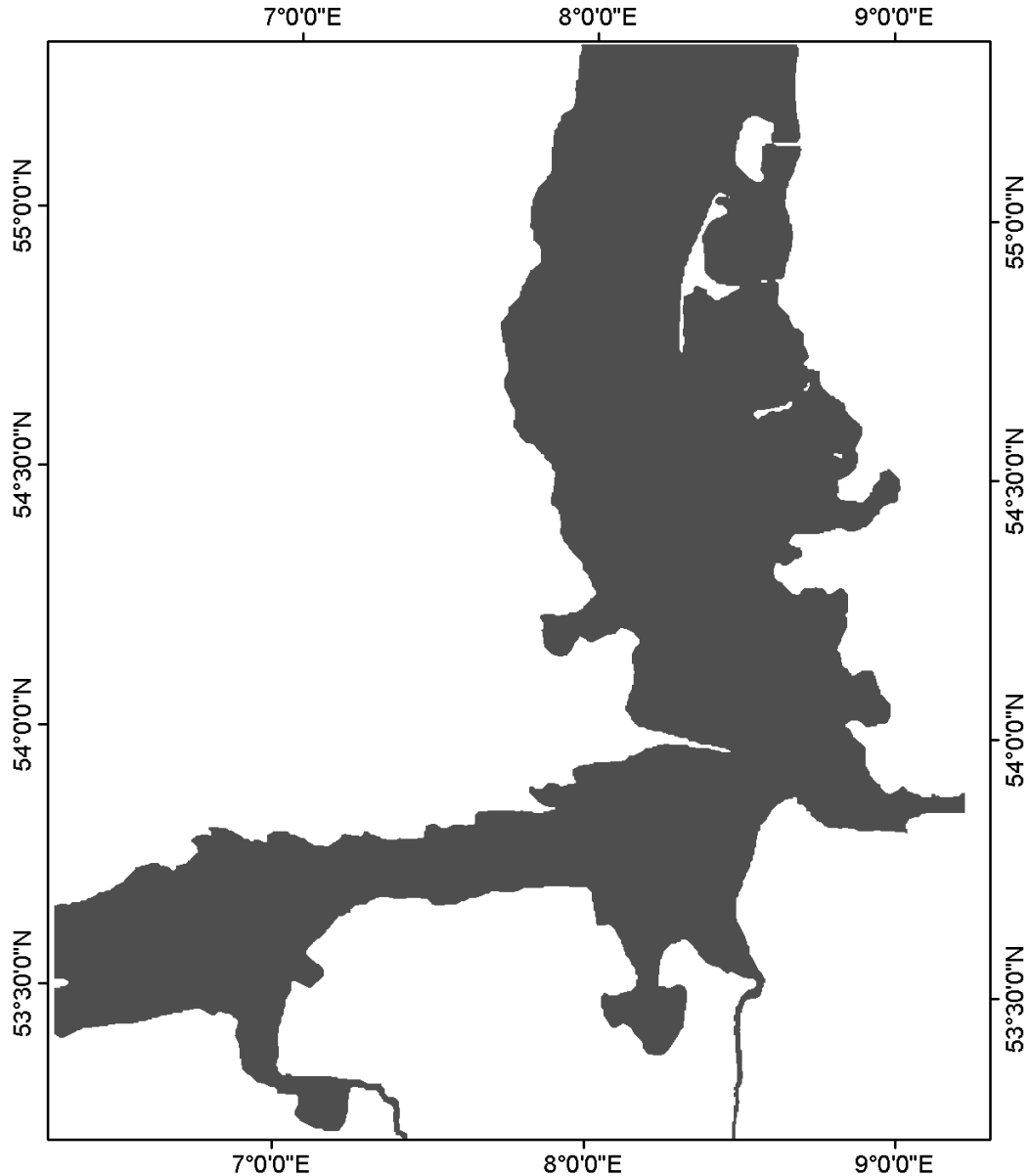


Abbildung 3-80: Ausdehnung des Modellnetzes (50-m Raster) der bathymetrischen Zeitreihe über 31 Jahre

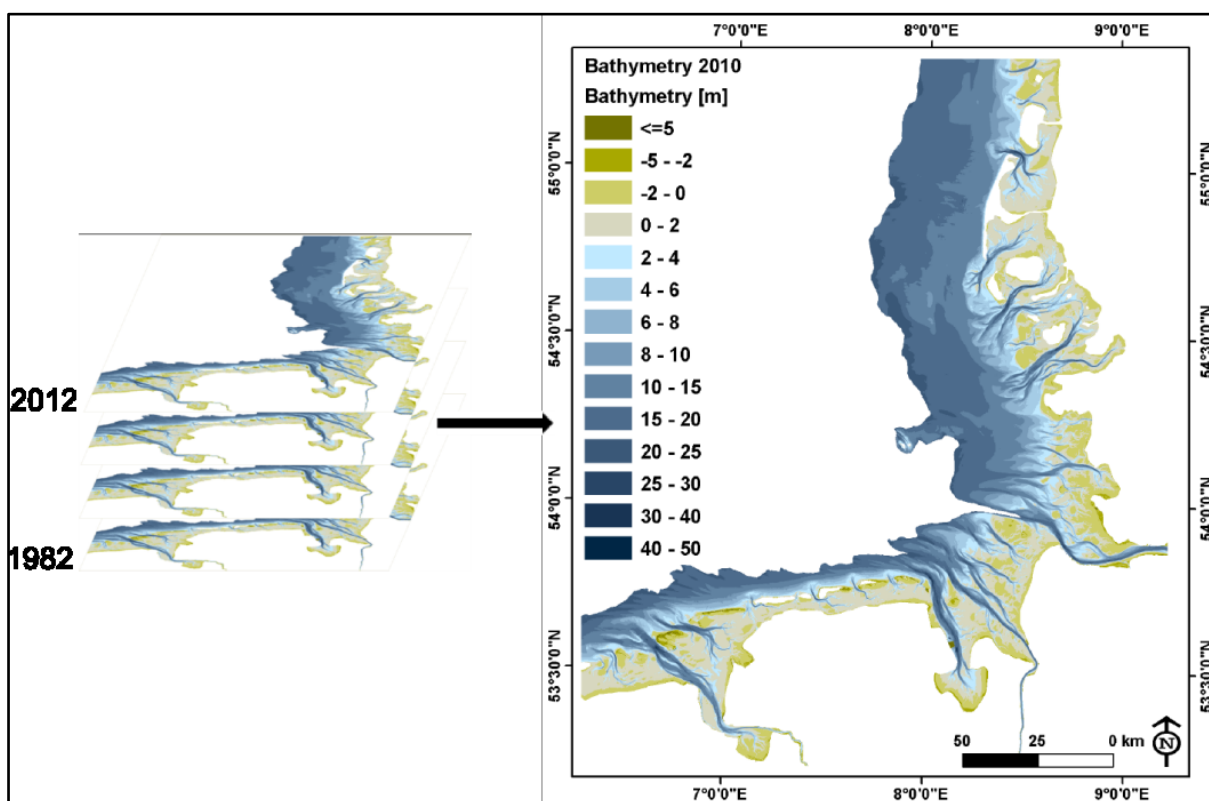


Abbildung 3-81: Bathymetrische Zeitreihe mit jährlichen Tiefenverteilungen über den Zeitraum 1982-2012, jeweils zum 01.06.2010. Rechts: Zeitscheibe vom 01.06.2010, nach der Klassifizierung im Fachinformationssystem „Shelf Geo-Explorer“ des BSH

Zusatzinformationen zu den einzelnen Jahrestopographien

Die erzeugten Tiefenverteilungen sind von der Beschaffenheit der Eingangsdaten abhängig. Als Indikator für die Genauigkeit der Daten aufgrund der Modellbildung und des zeitlichen und örtlichen Abstandes zu den Messpunkten wurden für jede Jahrestopographie weitere Parameter erzeugt. Diese Parameter wurden auf dasselbe Modellgitter wie das der Tiefenverteilungen (Abbildung 3-80) abgelegt.

Der Parameter *Confidence* [m] (Abbildung 3-82) gibt die Vertrauenswürdigkeit der modellierten Bathymetriem an. Ausgehend von der Messgenauigkeit der zugrundeliegenden Vermessungsdaten (durchschnittlich ± 20 cm) steigt die Confidence der interpolierten Daten mit zeitlicher und räumlicher Entfernung zum Messpunkt an. Niedrige Werte zeigen demnach eine hohe Vertrauenswürdigkeit der Modelldaten an, hohe Werte eine geringere.

Minimum dt [Dezimaljahr] beschreibt den minimalen zeitlichen Abstand zur zeitlich am nächsten gelegenen Vermessungskampagne in der Datenbank, so dass eine schnelle Einschätzung der Vertrauenswürdigkeit der zeitlichen Interpolation an jedem Gitterpunkt ermöglicht wird (s. Abbildung 3-83).

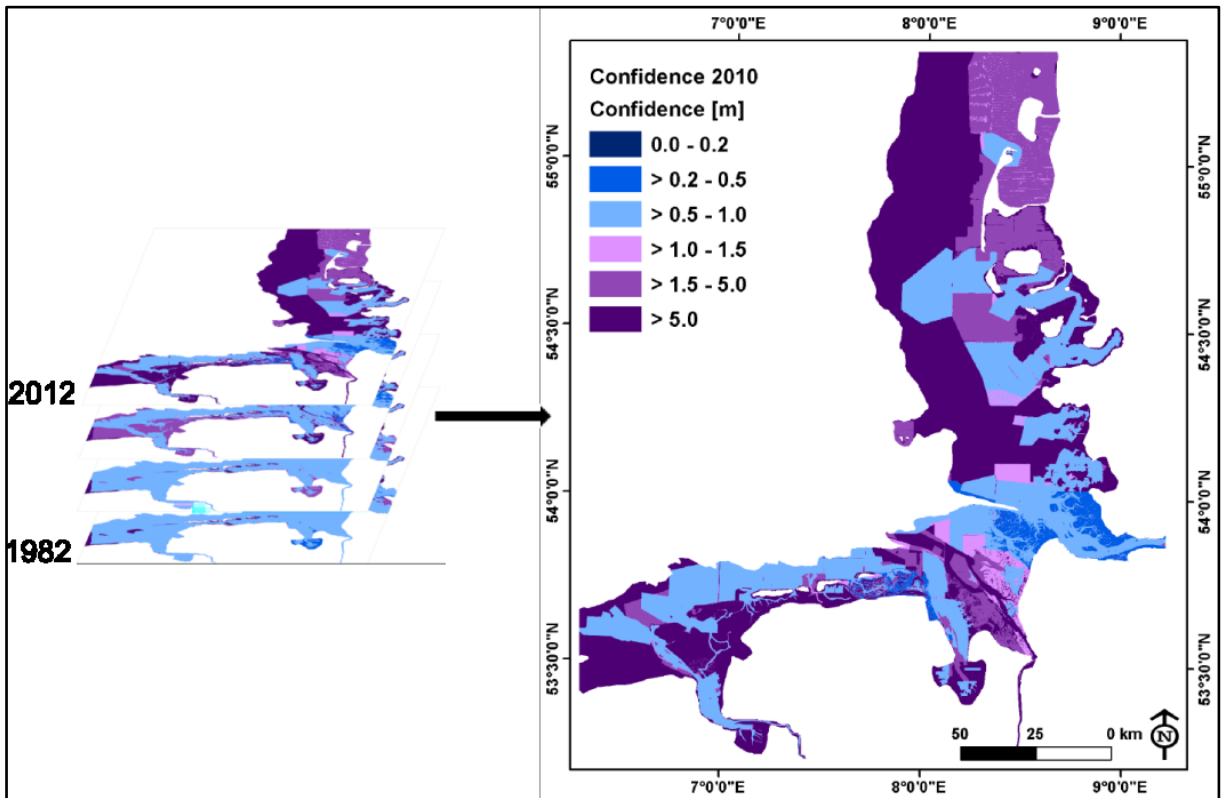


Abbildung 3-82: Zu jeder Jahrestopographie der bathymetrischen Zeitreihe wurde ein Confidence-Layer generiert. Rechts: Zeitscheibe vom 01.06.2010, nach der Klassifizierung im Fachinformationssystem „Shelf Geo-Explorer“ des BSH

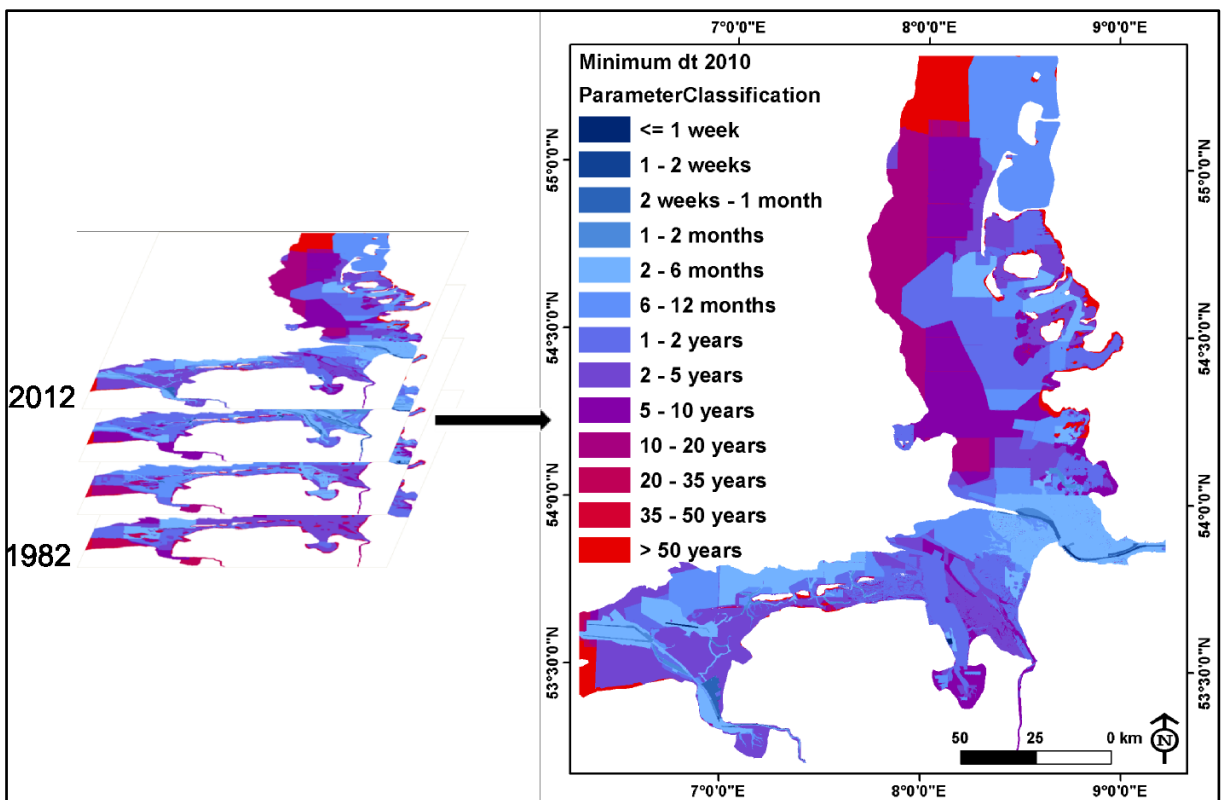


Abbildung 3-83: Zu jeder Jahrestopographie der bathymetrischen Zeitreihe wurde ein Layer mit dem minimalsten zeitlichen Abstand generiert. Rechts: Zeitscheibe vom 01.06.2010, nach der Klassifizierung im Fachinformationssystem „Shelf Geo-Explorer“ des BSH

Weitere morphologische Parameter

Durch analytische und statistische Auswertungen der interpolierten bathymetrischen Zeitreihe, über 31 Jahre, können weitere Informationen über die Morphodynamik des Betrachtungsraums gewonnen werden.

Die einfachste hier zu nennende Kenngröße ist die Änderungsrate (*Alteration Rate* [m/xa]). Diese stellt die Tiefendifferenzen zweier Jahrestopographien dar und wurde für verschiedene Zeiträume berechnet; in jährlichen Schritten von 1982 bis 2012, in 5, 10 und 30 Jahresintervallen (gemäß Tabelle 3-4).

Der *Morphological Space* errechnet sich aus der Differenz der maximalsten und minimalsten Tiefe an jedem Gitterpunkt (s. Abbildung 3-84). Er gibt demnach Aufschluss über die Mächtigkeit der maximalen Sedimentverlagerung innerhalb des Betrachtungszeitraums ($Z_{\max} - Z_{\min}$). Dieser Wert eignet sich besonders zur Analyse der großräumigen Morphodynamik; so lassen sich die hochdynamischen Rinnen von den weniger mobilen Wattflächen gut abgrenzen. Es ist jedoch nicht ersichtlich, ob Sedimentation oder Erosion stattgefunden hat. Auch das Zeitintervall in dem die morphologische Aktivität stattgefunden hat, ist nicht erkennbar.

Ein weiterer Parameter zur Analyse der Morphodynamik ist der *Morphological Drive* ($(dz/a)_{\max} - (dz/a)_{\min}$) (vgl. Abbildung 3-85). Durch diese Kenngröße wird eine Aussage darüber möglich, ob eine morphologische Änderung über den Betrachtungszeitraum stetig verläuft, oder ob Extremereignisse stattgefunden haben. Hiermit lässt sich auch die Verlagerung von Rinnen gut identifizieren.

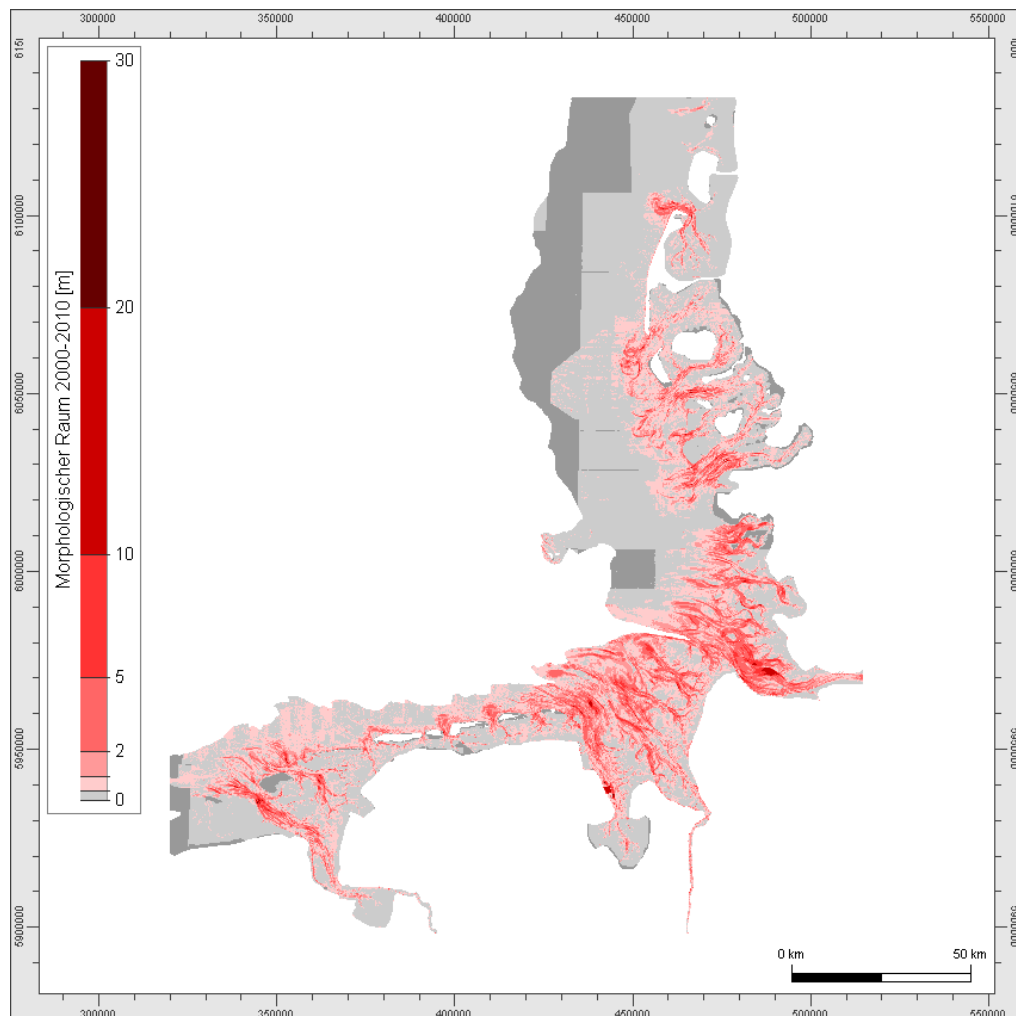


Abbildung 3-84: Morphologischer Raum für den Betrachtungszeitraum 2000-2010

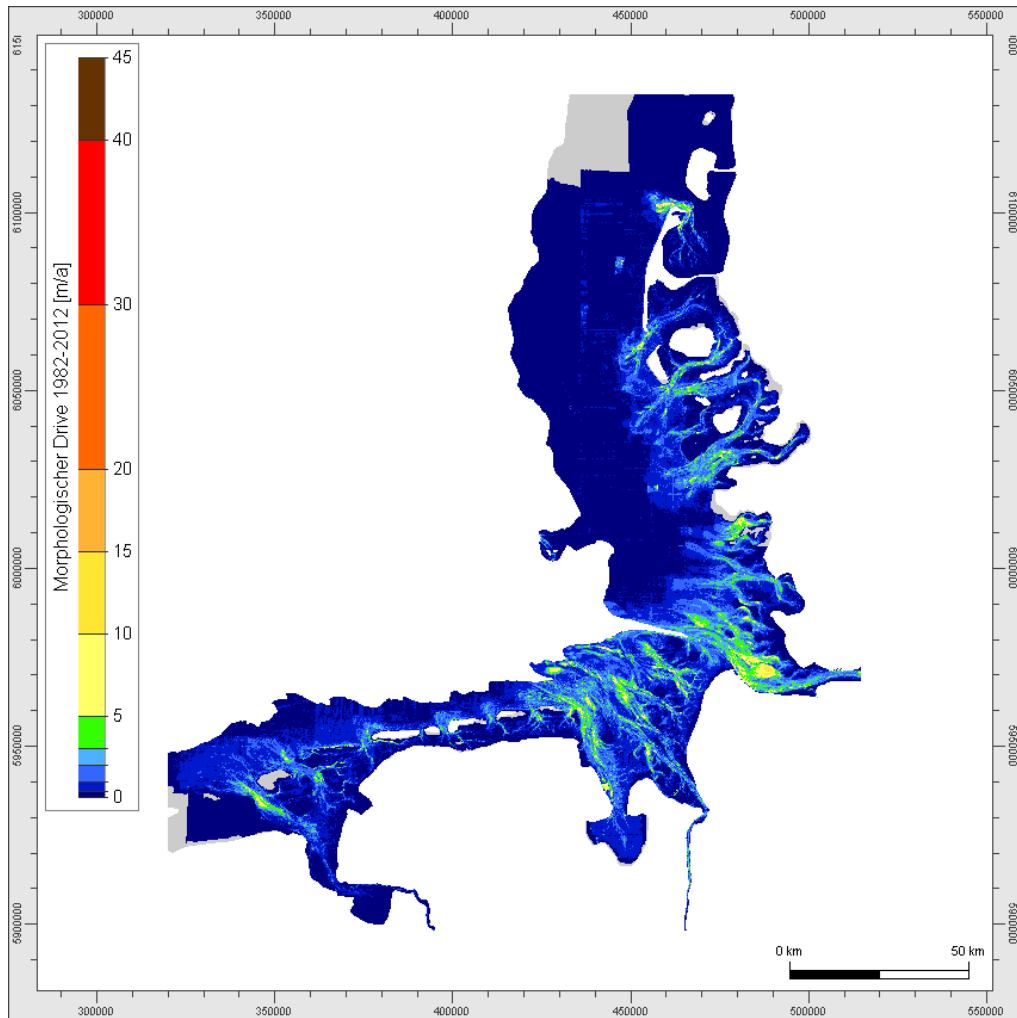


Abbildung 3-85: Morphologischer Drive für den Betrachtungszeitraum 1982-2012

Tabelle 3-4: Übersicht der betrachteten Zeiträume der morphologischen Parameter

Zeitintervall	Betrachtete Jahre	Morphologischer Parameter	Informationsparameter zu Genauigkeit
1 Jahr	1982-2012	Bathymetry Alteration Rate	Confidence, Minimum dt
5 Jahre	1997-2002, 2002-2007, 2007-2012	Alteration Rate Morphological Space Morphological Drive	Count of Datasets, Considered Period, <i>minT</i> , <i>maxT</i> , <i>maxTdist</i> , <i>maxTds</i> , <i>maxTde</i> , <i>minTdis</i> , <i>meanTdis</i>
10 Jahre	2000-2010	Alteration Rate Morphological Space Morphological Drive	Count of Datasets, Considered Period, <i>minT</i> , <i>maxT</i> , <i>maxTdist</i> , <i>maxTds</i> , <i>maxTde</i> , <i>minTdis</i> , <i>meanTdis</i>
31 Jahre	1982-2012	Alteration Rate Morphological Space Morphological Drive	Count of Datasets, Considered Period, <i>minT</i> , <i>maxT</i> , <i>maxTdist</i> , <i>maxTds</i> , <i>maxTde</i> , <i>minTdis</i> , <i>meanTdis</i>

Zusatzinformationen zur morphologischen Analysen innerhalb verschiedener Zeiträume

Die Aussagekraft der aus der bathymetrischen Zeitreihe abgeleiteten morphologischen Parameter ist ebenfalls vom zugrundeliegenden Datenbestand abhängig. Im Folgenden werden Kenngrößen einer umfassenden Datenbankanalyse vorgestellt, die speziell für die Betrachtung von Zeitspannen weitere Informationen über die Datenbasis geben. Wegen des enormen Rechenaufwands wurden diese auf einem 250m-Raster anstatt des 50m-Rasters generiert, jedoch für denselben Raumausschnitt wie die bathymetrische Zeitreihe.

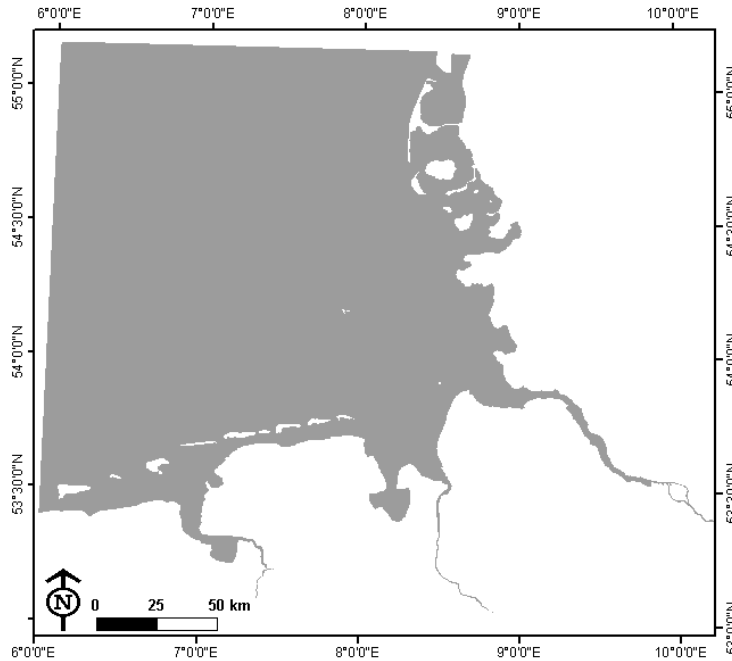
Count of Datasets gibt die Anzahl der im jeweiligen Betrachtungszeitraum (vgl. Tabelle 3-4) vorhandenen Messkampagnen wieder; Tabelle 3-5 gibt die Verfügbarkeit der Datensätze nach ihren Formaten an. Des Weiteren wurden mehrere Parameter berechnet, um Informationen über die zeitliche Aufteilung der Datensätze innerhalb des Betrachtungszeitraums vorzuhalten:

- *ConsideredPeriod*: Zeitintervall, der tatsächlich innerhalb des Betrachtungszeitraums mit Daten abgedeckt ist [Dezimaljahre]
- *minT*: Datum des frühesten Datensatzes innerhalb des Betrachtungszeitraums [dd/mm/yyyy]
- *maxT*: Datum des spätesten Datensatzes innerhalb des Betrachtungszeitraums [dd/mm/yyyy]
- *maxTdist*: größter zeitlicher Abstand zwischen zwei Datensätzen innerhalb des Betrachtungszeitraums [Dezimaljahr]
- *maxTds*: Startdatum des größten zeitlichen Abstands zwischen zwei Datensätzen innerhalb des Betrachtungszeitraums [dd/mm/yyyy]
- *maxTde*: Enddatum des größten zeitlichen Abstands zwischen zwei Datensätzen innerhalb des Betrachtungszeitraums [dd/mm/yyyy]
- *minTdis*: minimaler zeitlicher Abstand zwischen den Datensätzen innerhalb des Betrachtungszeitraums [Dezimaljahre]
- *meanTdis*: mittlerer zeitlicher Abstand zwischen den Datensätzen innerhalb des Betrachtungszeitraums [Dezimaljahre]

Tabelle 3-5: Verfügbarkeit der morphologischen Parameter nach ihren Datenformaten

Datensatz	CSV / XYZ-Datei	WMS (in Arbeit)	WFS (in Arbeit)
<i>Bathymetry mit Confidence und Minimum dt</i>	Eine Datei/Jahr: X, Y, Depth, Confidence, mindt	Klassifizierte Polygone, alle 31 Topographien mit Confidence und Minimum dt in einem Layer	Klassifizierte Polygone, alle 31 Topographien mit Confidence und Minimum dt in einem Layer
<i>Alteration Rate</i>	Jeweils eine Datei / Zeitintervall: X, Y, Alteration	Klassifizierte Polygone, Datensätze aller Zeitintervalle in einem Layer	Klassifizierte Polygone, Datensätze aller Zeitintervalle in einem Layer
<i>Morphological Space, Morphological Drive, Count Of Datasets, Considered Period</i>	Jeweils eine Datei / Zeitintervall: X, Y, Parameter1,..., 3	Klassifizierte Polygone, Datensätze aller Parameter und Zeitintervalle in einem Layer	Klassifizierte Polygone, Datensätze aller Parameter und Zeitintervalle in einem Layer
<i>minT, maxT, maxTdist, maxTds, maxTde, minTdis, meanTdis</i>	Jeweils eine Datei / Zeitintervall: X, Y, Parameter1,..., 3	-	-

3.5.2 Sedimentologische Produkte des Funktionalen Bodenmodells



Für den Bereich der Deutschen Bucht wurden Kornverteilungen über eine monotone kubische Spline-Interpolation auf einem 250m-Raster generiert (Abbildung 3-86), auf Grundlage der im Bodenmodell vorhandenen Datensätze.

Aus den Kornverteilungen wurden verschiedene sedimentologische Parameter berechnet und als Produkte zur öffentlichen Nutzung aufbereitet.

Abbildung 3-86: räumliche Ausdehnung des Modellgitters (250m-Raster)

Folgende Parameter wurden als Produkte für den Bereich der Deutschen Bucht aufbereitet:

- Median-Korndurchmesser der interpolierten Kornsummenkurve
- Mittelwert des Korndurchmessers
- Sortierung nach TRASK: $\sqrt{\frac{D_{75}}{D_{25}}}$
- Sortierung nach Folk & Ward (1957): $\sigma_1 = \frac{\phi_{84} - \phi_{16}}{4} + \frac{\phi_{95} - \phi_5}{6,6}$
- Schiefe nach Folk & Ward (1957): $Sk_1 = \frac{\phi_{16} + \phi_{84} - 2\phi_{50}}{2(\phi_{84} - \phi_{16})} + \frac{\phi_5 + \phi_{95} - 2\phi_{50}}{2(\phi_{95} - \phi_5)}$
- Kurtosis nach Folk & Ward (1957): $K_G = \frac{\phi_{95} - \phi_5}{2,44(\phi_{75} - \phi_{25})}$
- Kornfraktionen in 1/2-Phi -Intervallen

Verfügbar sind diese zum einen zusammengeführt in einer CSV-Datei, zum anderen als klassifizierte Polygondatensätze für jeden einzelnen Parameter (vgl. Abbildung 3-87 und Abbildung 3-88).

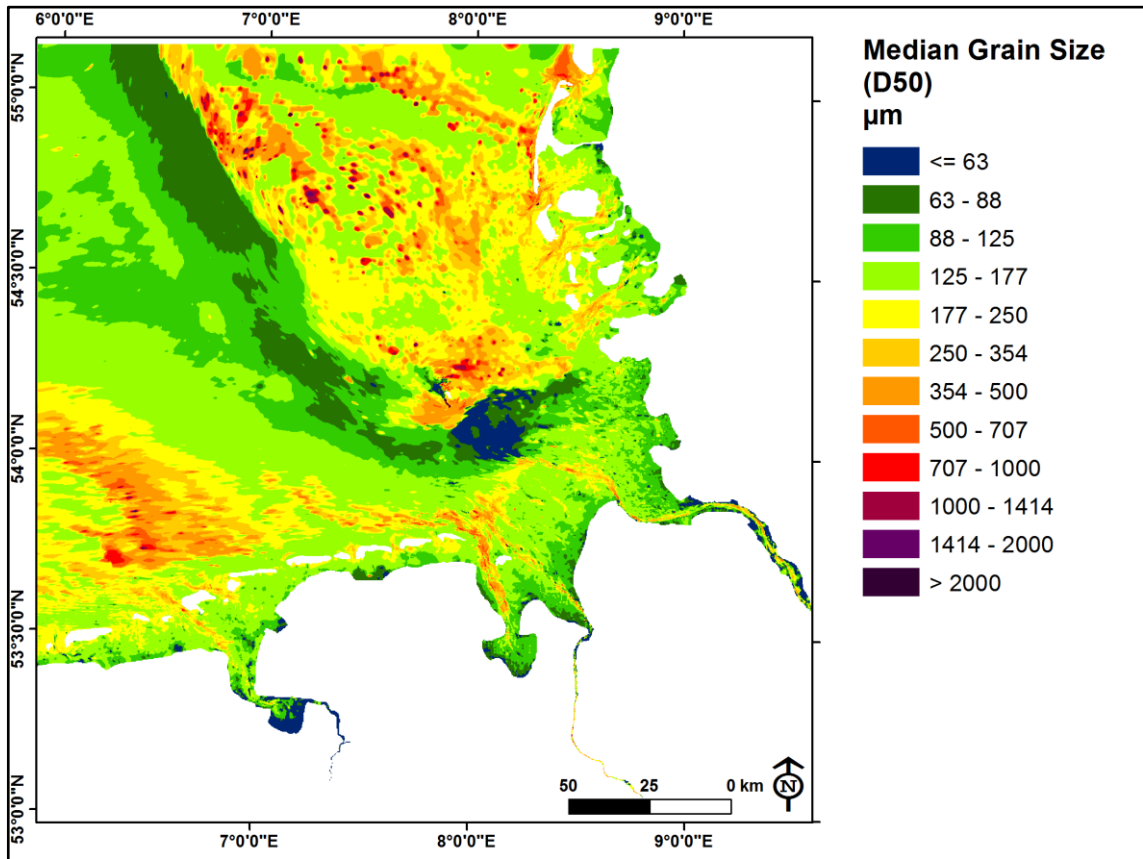


Abbildung 3-87: Median-Korndurchmesser (D_{50}), nach der Klassifizierung im Fachinformationssystem „Shelf Geo-Explorer“ des BSH

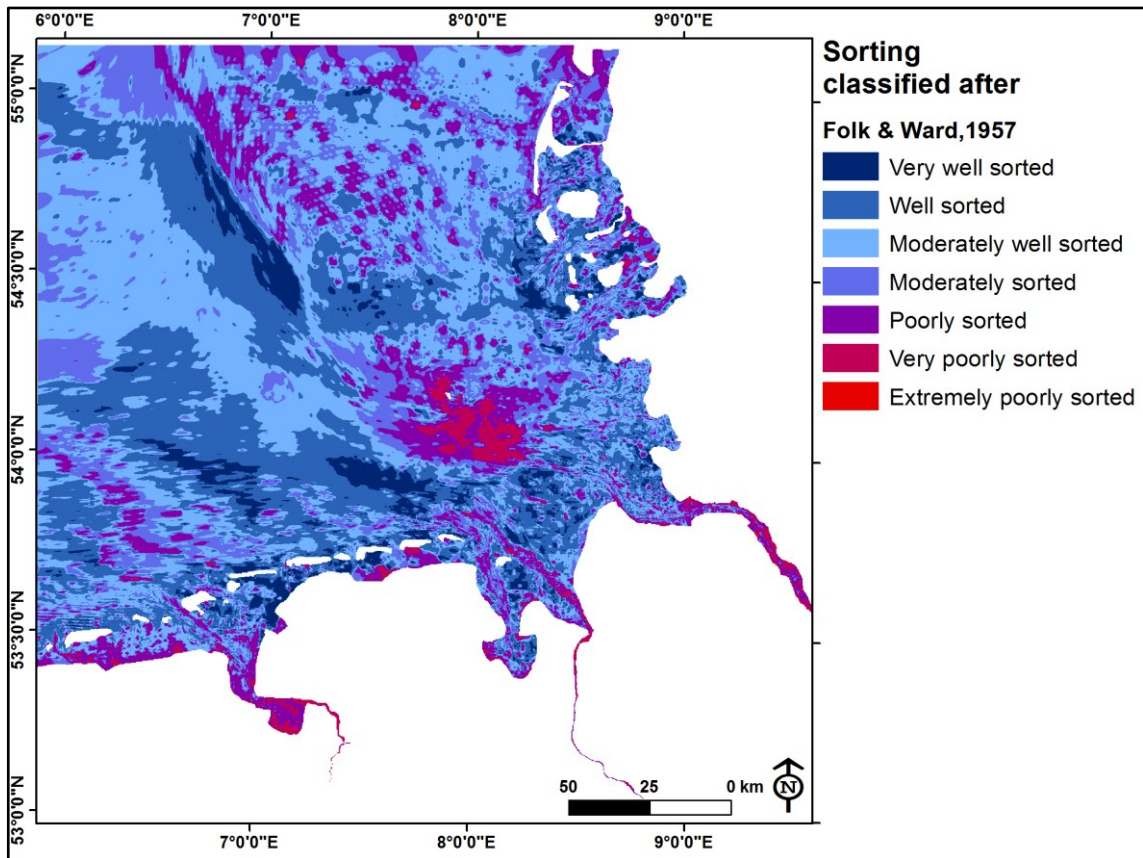


Abbildung 3-88: Sortierung σ_1 nach der Klassifizierung im Fachinformationssystem „Shelf Geo-Explorer“ des BSH

3.5.3 Berechnung der Mächtigkeit der mobilen Deckschicht

Um den Modellen eine Eingangsinformation zu Mächtigkeit der mobilen Sedimente in der Deutschen Bucht zu liefern, wurde mittels des Funktionalen Bodenmodells zunächst eine Tiefenlage des konsolidierten Horizonts berechnet (vgl. Kapitel 2.3.1). Durch Differenzbildung dieses Horizonts mit einer raum-zeitlich variablen Bathymetrie lassen sich so für beliebige Simulationsszenarien Mächtigkeiten mobiler Sande berechnen. Abbildung 3-89 zeigt die so errechnete mobile Deckschicht im Jahr 2006.

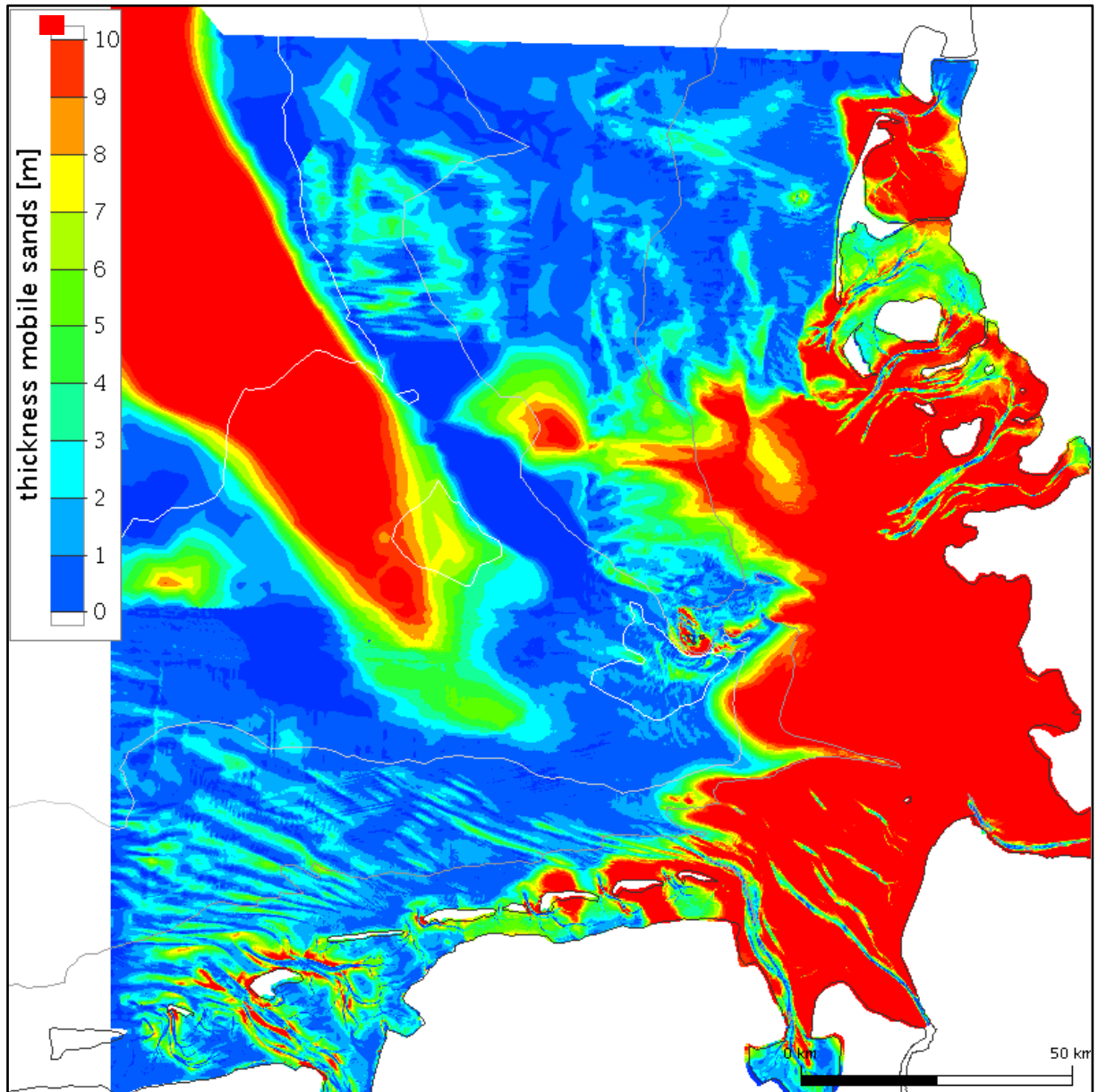


Abbildung 3-89: Beispielhaft dargestellt ist die Differenz aus der raum-zeitlich interpolierten Topographie von 2006 und der Tiefe des konsolidierten Horizonts; Mächtigkeit der mobilen Deckschicht im Jahr 2006

3.5.4 Analysen aus Bathymetrieänderungen

Die Bathymetriedaten aus der morphodynamischen Simulation dienen zwei übergeordneten Zielen. Das erste Ziel ist die Darstellung und Analyse der zeitlichen und räumlichen

Veränderung der Bathymetrie in der Deutschen Bucht. Dieses geschieht sowohl über die Jahre 1996-2007 als auch über folgenden Teilgebiete (Abbildung 3-90):

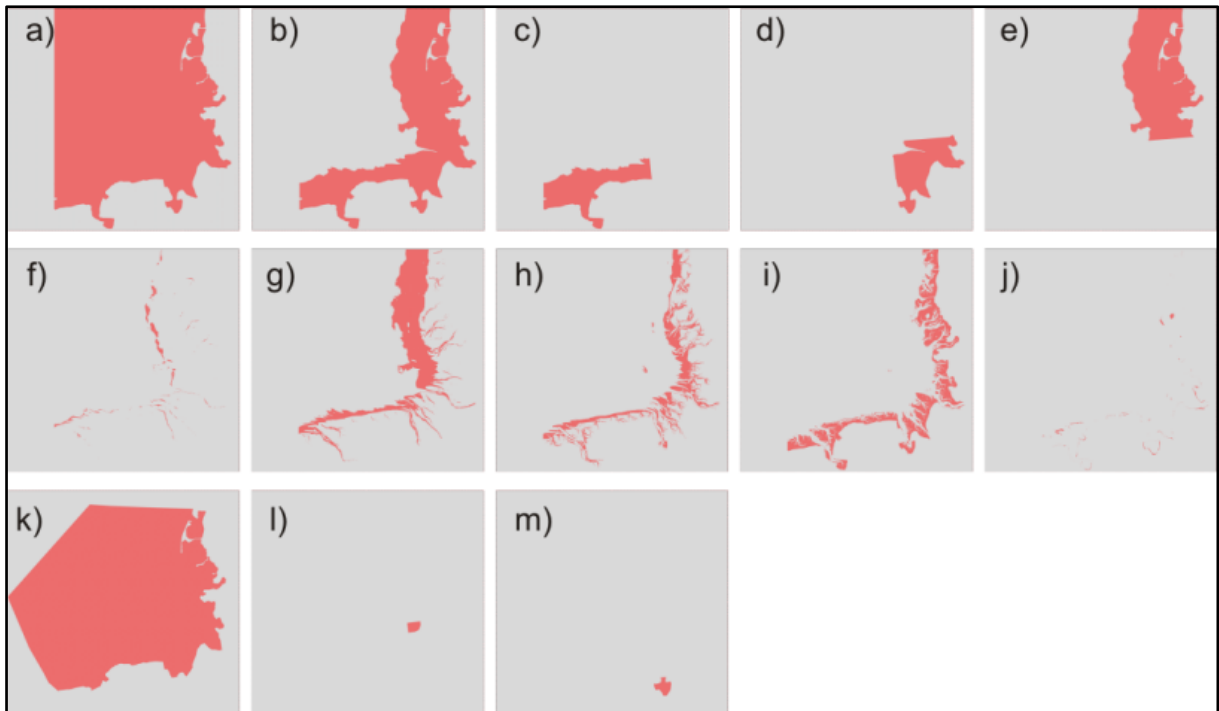


Abbildung 3-90: die Teilgebiete die Auswertung

- Gesamtgebiet (a)
- das Küstenvorfeld (etwa 20m Tiefenlinie) (b)
- das Küstenvorfeld der Ostfriesischen Inseln (c)
- das Küstenvorfeld von Jade, Weser und Elbe (d)
- das Küstenvorfeld der Nordfriesischen Inseln (e)
- das Küstenvorfeld in der Tiefenzone
 - o <-20m (f)
 - o -20m - -10m (g)
 - o -10m - -2m (h)
 - o -2m – 2m (i)
 - o >2m (j)
- Massenbilanzgebiet/Gebiet der Profilanalysen (k)
- Helgoländer Schlicklinse (l)
- Jade (m)

Das zweite übergeordnete Ziel ist die Frage nach der Massenbilanz. Dazu wurden die Profilauswertungen (vgl. Kapitel 4.3.2.3.2) verglichen mit der Bathymetrieänderung des Teilgebietes k. Im günstigsten Fall entsprechen die Massenflüsse über die Profile den Massenänderungen durch die veränderte Bathymetrie. Dabei entspricht das Teilgebiet k genau dem Gebiet, das durch Profilschnitte oder den Modellrand beschrieben wird.

Die Zielgrößen der Bathymetrieanalyse sind

- das Erosionsvolumen
- das Sedimentationsvolumen
- und das Bilanzvolumen

3.5.4.1 Methode

Zurzeit ist es mit den BAW-Methoden nicht möglich auf die Polygontiefen von SediMorph an verschiedenen Simulationszeitpunkten zuzugreifen. Verfügbar sind Knotentiefen, die von den Polygonzentren aus SediMorph auf die benachbarten Knoten flächengewichtet interpoliert sind. Es muss daher ein Umweg gegangen werden, der den Knotenwerten wieder Flächen zuordnet, so dass daraus wieder Volumen werden können. Der folgende Weg wurde dabei beschritten:

- Konversion der Ergebnisse aus SediMorph (Knotenorientiert, BDF) nach NetCDF (dataconvert)
- Berechnung des Delta z (dz) aus zwei Zeitpunkten (Zeitspanne vom 15.1. bis 300 Tage danach; eine Version vom 1.1. bis 1.1. des Folgejahres musste verworfen werden, da in einigen Jahren ungewöhnliche hohe Wasserstände zu Beginn des jeweiligen Jahres auftraten) und Export als ASCII-Punktdateien (Mathematica-Skript)
- Interpolieren des dz auf ein 50m-Raster und Export nach ASCII (Janet)
- Konversion der ASCII-Dateien nach HDF5 aus Performancegründen und Abbildungen (Mathematica-Skript)
- Ausmaskieren der gewünschten Bereiche (Mathematica-Skript)
- Summen und Bilanzen sowie Diagramme und Excel-Tabellen (Mathematica-Skript)

3.5.4.2 Bewertung der Methode

Es wurden zwei Möglichkeiten erprobt den Punktdateien Flächen zuzuordnen. Eine Methode ist die Flächenzerlegung nach Voronoi (oder auch Thiessenpolygone). Die Voronoi-Zerlegung mit unseren Tools ist bislang nur für kleine Gebiete möglich bzw. performant. Die andere hier verwendete Methode ist die Interpolation auf ein feines 50m Raster. Beide Verfahren benutzen Interpolationsmethoden, so dass zusätzliche Unsicherheiten erzeugt werden.

Ein Vergleich beider Methoden wurde bei der Modellvalidierung durchgeführt. Beide Methoden liefern ähnliche Ergebnisse (siehe Kapitel 4.2.8).

Grundsätzlich muss gesagt werden, dass eine flächengewichtete Interpolation von Polygonzentren auf Knoten nicht massenkonsistent ist. Die nachfolgende lineare Interpolation auf ein regelmäßiges 50m - Raster fügt zusätzlich Unsicherheiten hinzu, so dass die Werte aus diesem Verfahren nur Anhaltspunkte geben können.

3.5.4.3 Ergebnisse

Karten mit Angaben von Tiefenänderungen geben wichtige Anhaltspunkte über morphodynamisch aktive und inaktive Gebiete sowie Erosions- und Depositionsgebiete. Über die Zeit betrachtet sind Gebiete mit hoher oder geringer Variabilität erkennbar. Der Fokus dieses Projekt liegt in großräumigen und langfristigen Skalen, so dass die oben genannten Informationen wichtige Basiskenntnisse sind in die kleinräumige und kurzfristige morphodynamische Untersuchungen eingebettet werden können.

Beispielhaft wird ein Bild des Gesamtgebietes gezeigt, dass die räumlich differenzierten Erosions- und Depositionsgebiete darstellt (Abbildung 3-91). Die erkennbaren Muster unterscheiden sich in den Jahren lediglich in ihrer Intensität jedoch nur sehr geringfügig in ihrer Ausbreitung. Sie sind also im Modell zeitlich recht stabil.

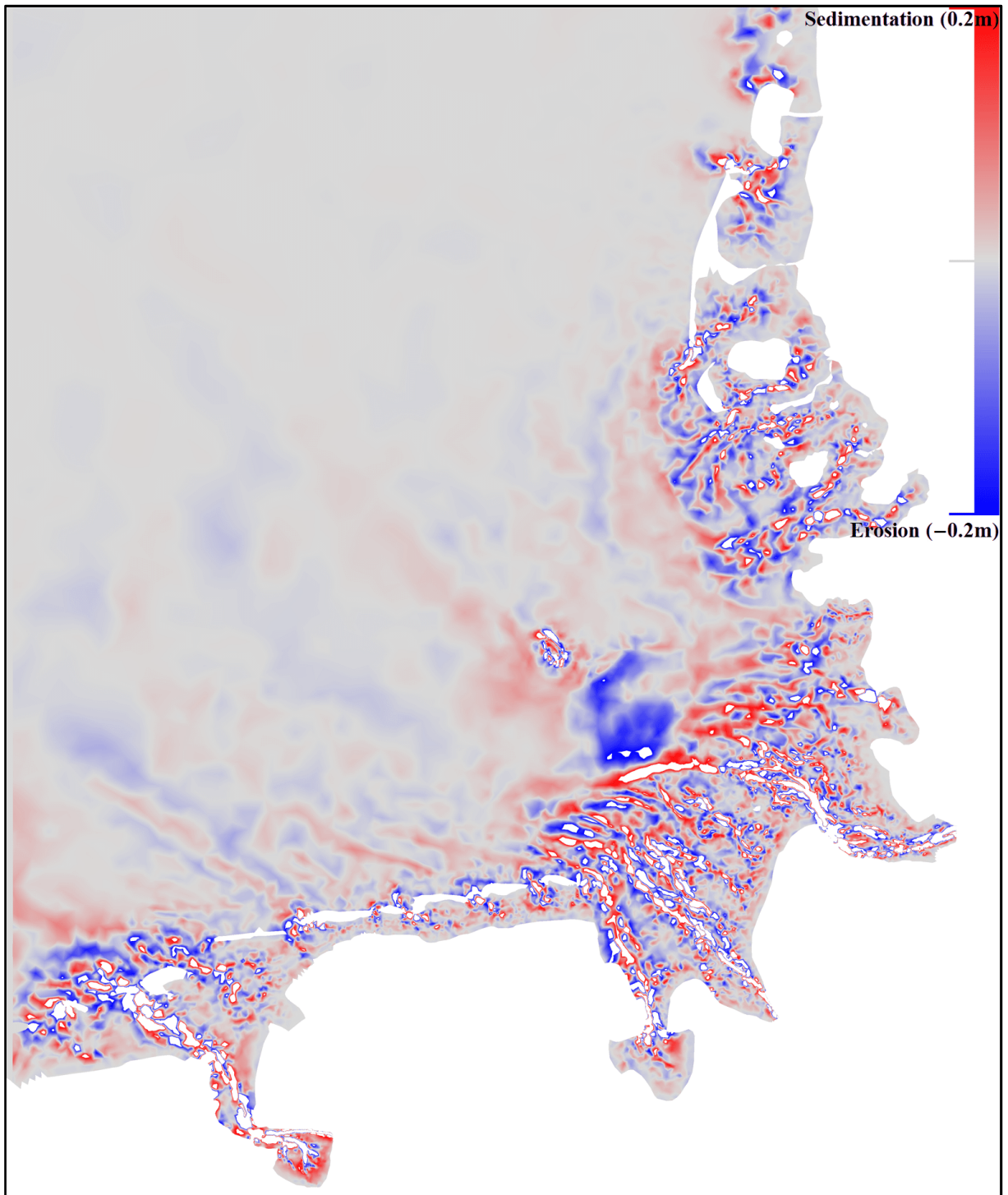


Abbildung 3-91: Beispielhafte Differenzbathymetrie von 2003 (15.01. + 330Tage danach) aus der morphodynamischen Simulation

Die zeitliche Entwicklung (für die Zeitspanne des Jahres vom 15. Januar bis 330 Tage danach) der Bilanzvolumen für einige Teilbereiche und den Gesamtbereich sowie Mittelwerte daraus ist in der Abbildung 3-92 bzw. der Tabelle 3-6 zu sehen.

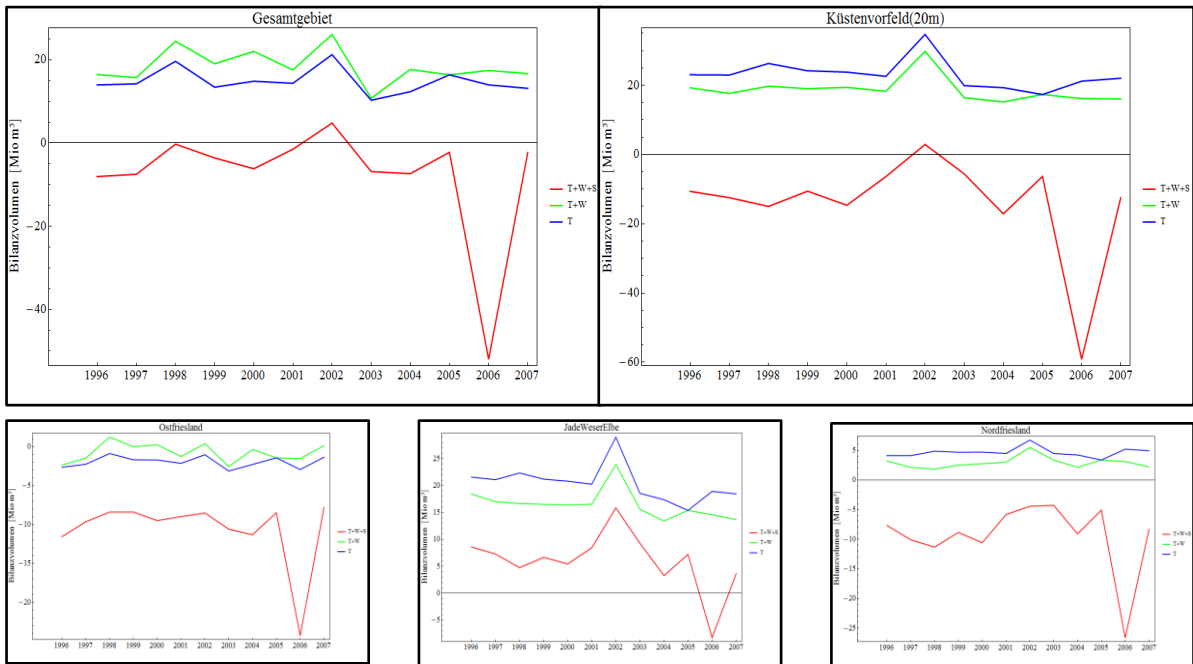


Abbildung 3-92: Bilanzvolumen für Teilbereiche und den Gesamtbereich in zeitlicher Auflösung

Tabelle 3-6: mittlere Volumenbilanzen aus der Bathymetrieanalyse der morphodynamischen Simulation

Volumenbilanz [Mio.m ³ /330d]	Tide + Wind + Seegang	Tide + Wind	Tide
Auswertepprofile	3	24	16
Gesamtgebiet	-8	18	15
Küstenvorfeld(20m)	-14	19	23
Ostfriesland	-11	-1	-2
Jade/Weser/Elbe	6	17	20
Nordfriesland	-9	3	5
Jade	-1	0	-1
Helgoland-SL	-17	-15	-16
Küstenvorfeld (20m) < -20m	23	21	21
Küstenvorfeld (20m) -20m - -10m	73	55	58
Küstenvorfeld (20m) -10m - -2m	-58	-59	-59
Küstenvorfeld (20m) -2m - 2m	-52	1	0
Küstenvorfeld (20m) > 2m	-1	1	1

Unter der Voraussetzung, dass die Größenordnungen und Trends richtig sind und die Massenbilanz stimmig ist, können folgenden Aussagen getroffen werden:

- Die Gesamtbilanz für das Gesamtgebiet ist ohne Seegang positiv, mit Seegang leicht negativ
- Die Zahlen für das Küstenvorfeld sind ähnlich denen im Gesamtgebiet, so dass davon ausgegangen werden kann, dass die größte Dynamik im Küstenvorfeld besteht

- Die Entwicklung im Küstenvorfeld ist zweigeteilt: die Bereiche, die höher als -10m liegen verlieren Material, in Bereichen, die tiefer liegen, kommt es zur Nettodeposition
- Die Bereiche Nord- und Ostfriesland sind mit Seegang in Summe Erosionsgebiete, während es im Bereich der Weser, Jade und Elbe zur Nettodeposition kommt
- Im Bereich der Helgoländer Schlicklinse (SL) kommt es zu Erosion. Das steht im Gegensatz zum bekannten Wissen (Scheuerle, 2004) und liegt am dort verfügbaren sehr feinen Material.
- Der Bereich der Jade ist im Mittel nahezu ausgeglichen.

3.5.4.3.1 Massenbilanz

Zum Ende soll noch geprüft werden, ob die Massen- bzw. Volumenflüsse über die Profile in das Teilgebiet k (Abbildung 3-90) in etwa den Massenänderungen aus der Bathymetrie entsprechen. Dazu wurde eine Maske entworfen, die dem Modellrand und den Profillinien entspricht. Die Bilanz aus den Bathymetrieanalysen (330d T+W+S morphodynamisch) wurde für das Gebiet berechnet und ist in Tabelle 3-7 eingetragen.

Die Massenflüsse der Jahre 1998 und 2006 vom 15. Januar bis 330 Tage darauf für die Simulation mit Tide, Wind und Seegang über die Profile (morphostatisch) sind in Kapitel 4.3.2.3.2 zu finden. Die Umrechnung von Massen- zu Volumenstrom erfolgte über dieselbe Dichte (2.65 kg/dm³) und Porosität (40%) wie sie im Modell verwendet wurde.

Tabelle 3-7: Bilanz der Bathymetrieanalyse

Jahr	Profilbilanz [Mio.m ³ /330d]	Bathymetriebilanz [Mio.m ³ /330d]
1998	27	12
2006	23	-32

Die sich aus diesen Zahlen ergebende erhebliche Massendifferenz kann leider nicht in dieser Größenordnung erklärt werden. Folgende unsichere Faktoren seien nochmals aufgelistet:

- Interpolationen von Flächen auf Knoten
- Interpolationen auf ein 50m-Raster
- Sedimentspeicher Wassersäule
- Vergleich von morphostatischen (Profile) und morphodynamischen (Bathymetrie) Simulationen (wobei ein Vergleich von morphodynamisch (Profile) und morphostatisch (Bathymetrie) sehr ähnliche Diskrepanzen aufzeigt)

3.5.4.4 Ausblick

Um Vertrauen in das Modell und die Modellergebnisse zu gewinnen, sollte eine nachvollziehbare Massenbilanz implementiert werden. Diese sollte neben der Integration der Massen- / Volumenströme über die offenen Ränder auch eine Integration über die Wassersäule umfassen und schließlich die Summen in den einzelnen Kompartimenten Wassersäule, Sediment und die Berandung pro Zeitschritt optional auflisten.

Ferner sollte gewährleistet werden, dass auch die Werte der Polygonzentren, so wie sie in SediMorph behandelt werden, über eine geeignete Schnittstelle (z.B. NetCDF) nach außen

verfügbar gemacht werden. Nur so können die mit unbekanntem Unsicherheiten belasteten Interpolationen bei Bilanzierungen vermieden werden.

3.6 Entwicklung eines konzeptionellen Morphodynamik-Modells der Deutschen Bucht

Morphodynamische Prozesse in der Deutschen Bucht werden im Wesentlichen durch die Hydrodynamik und diese wesentlich beeinflussende Meteorologie bestimmt. Sowohl der Großteil der Eingangsparameter, wie Bodenzusammensetzung und meteorologischer Einfluss, als auch die eigentlichen Prozesszusammenhänge sind nur in sehr eingeschränktem Umfang bekannt. Diese Einschränkungen führen sowohl bei datenbasierten als auch prozessbasierten numerischen Modellen zu großen Unsicherheiten. Durch einen hohen Grad an Abstraktion wird ein konzeptionelles Morphodynamik-Modell aufgebaut, welches unter anderem zum Ziel hat sediment- bzw. morphodynamische Einheiten mit gleichartigen Eigenschaften und Verhalten abzugrenzen. Die so entstehende Zerlegung der Deutschen Bucht nach sedimentologischen, morphodynamischen und hydrodynamischen Aspekten erlaubt eine vereinfachte Verknüpfung charakteristischer (zeitlich und/oder örtlich integrierter) Parameter.

Im Küstenbereich bietet es sich aufgrund der relativ hohen Verfügbarkeit an Vermessungsdaten an, die Einteilung anhand der Morphologie (und daraus abgeleiteten Parameter, vgl. Kapitel 3.5.1) vorzunehmen. Die räumliche Abdeckung an Sedimentproben im **AufMod** - Bodenmodell ist für die sehr kleinräumige Sedimentcharakteristik dieses Gebiets zur Klassifizierung weniger nützlich. Auf dem Schelf hingegen ist die Sedimentbeschaffenheit großräumiger ausgeprägt als im Küstennahbereich, dafür sind kaum Zeitreihen an Vermessungsdaten vorhanden, und morphologische Veränderungen liegen im Bereich des Messfehlers (vgl. Kapitel 3.7). Hier bietet es sich an Oberflächensedimentproben zu Unterteilung in sedimentdynamische Einheiten zu nutzen.

Die Abgrenzung sedimentologischer bzw. morphologischer Einheiten dient u. a. dazu die Transportrichtungen in verschiedenen Raum- und Zeitskalen zu identifizieren bzw. zu analysieren. Dies kann zum einen durch die gezielte statistische Datenauswertung in den abgegrenzten Systemen erfolgen. Zum anderen ermöglicht die Raumeinteilung Ergebnisse der numerischen Simulationen gezielt zu bewerten.

Im Rahmen von **AufMod** wurde in einem ersten Schritt eine Einteilung der Oberflächensedimente unternommen.

Sedimentologische Klassifizierung zur Entschlüsselung sedimentdynamischer Vorgänge in der Deutschen Bucht

Bei der Betrachtung der flächenhaften Verteilung von Gewichtsprozenten einzelner Sandklassen lassen sich große zusammenhängende Areale erkennen. Im zentralen Teil der Deutschen Bucht, über dem ehemaligen Elbeurstromtal, sind großflächig recht homogene Feinsande zu finden. Bei der Betrachtung ihrer Verteilung fällt eine Verfeinerung des Sediments in nordöstlicher Richtung, parallel zum ehemaligen schleswig-holsteinischen Geestrand auf (vgl. Abbildung 3-93). Da Feinsande in allen hydraulisch beeinflussten Georäumen als die am besten sortierten Kornfraktionen gelten (McManus, 1988), ist es sinnvoll diese, zur Analyse morphodynamischer Prozesse feiner aufzuschlüsseln als es in gängigen Sedimentklassifikationen ((Figge, 1981) und (Folk, 1954)) der Fall ist.

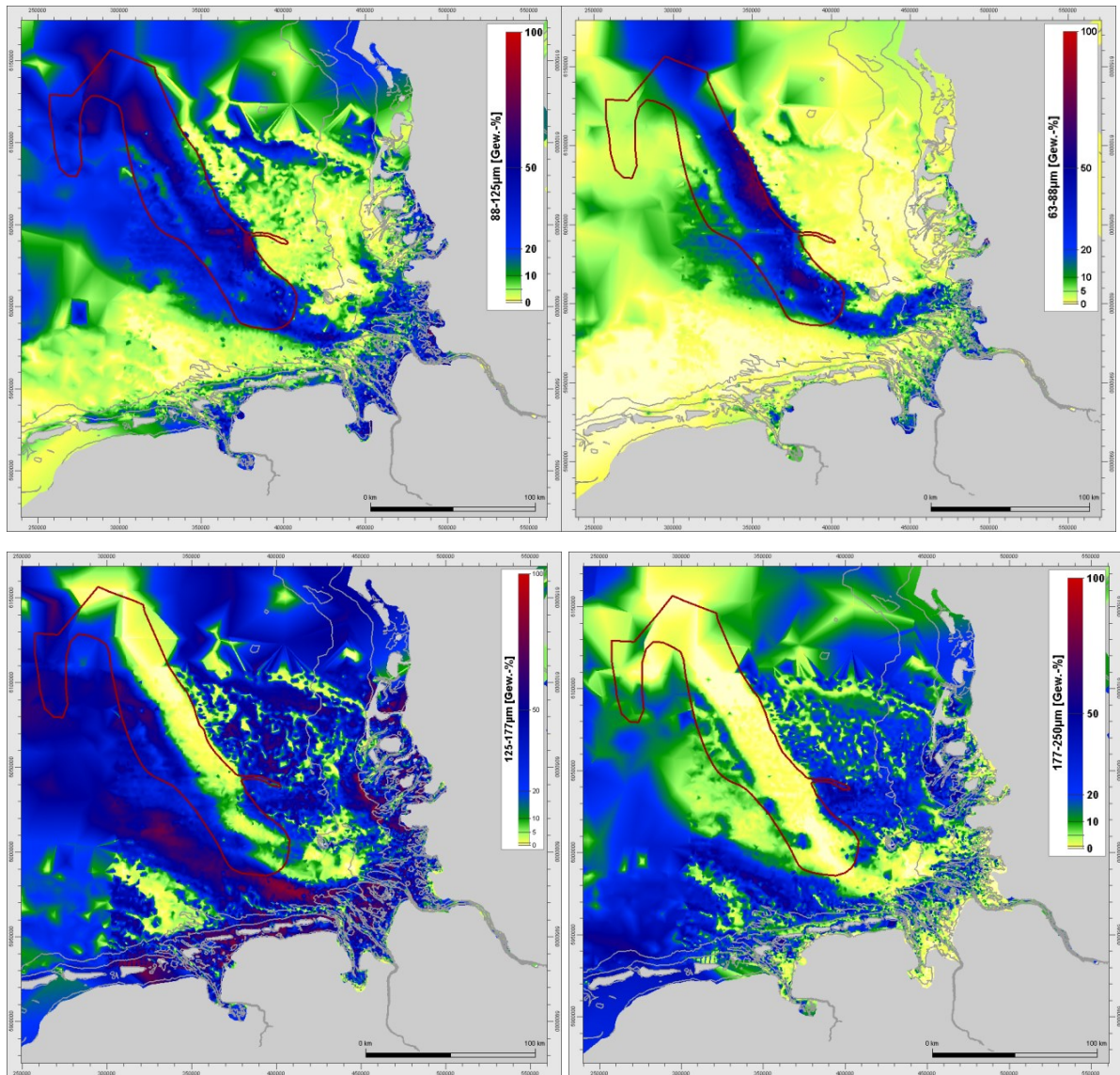


Abbildung 3-93: Anteil verschiedener Feinsandfraktionen [Gew.-%] im Oberflächensediment der Deutschen Bucht in $\frac{1}{2}$ Phi Intervallen, basierend auf triangulierten Probestationen. Die rote Linie zeigt grob die Umrandung des Elbeurstromtals (graue Linien: 10 und 20 m Isobathe)

Um die Verbreitung verschiedener Sandfraktionen in der Deutschen Bucht vergleichend gegenüberzustellen, wurden Querprofile angelegt. Diese verlaufen ausgehend vom Borkum Riffgrund in nordöstlicher Richtung zur ehemaligen schleswig-holsteinischen Geest (vgl. Anhang 8.3: Abbildung 8-1, Abbildung 8-2). Über diese Querprofile wurden Wassertiefe, Sortierung und die Verhältnisse der Gewichtsprozent der Sandfraktion in 1 Phi-Intervallen aufgetragen.

In der Ebene südöstlich des Borkum Riffgrunds und über dem ehemaligen Elbeurstromtal liegt vorwiegend eine der betrachteten Feinsandklassen über 50% im Gewichtsanteil. Mittel- und Grobsande sind gar nicht oder nur in sehr geringem Anteil vertreten. Diese vorherrschende Feinsandklasse wird in nordöstlicher Richtung graduell von der nächst feineren Sandfraktion abgelöst. Es ist also eine Verfeinerung der Sande entlang der Profilrichtung erkennbar. Im Zentrum dieses Gebiets, im Bereich des östlichen Ausläufers des Austerngrunds, der sich westlich des ehemaligen Elbeurstromtals erstreckt, erreicht über größere Distanzen keine der beiden betrachteten Feinsandklassen deutlich höhere Anteile. Die

Feinsande sind demnach weniger gut sortiert als in den nordöstlich und südwestlich angrenzenden Bereichen.

Im Bereich des Borkum Riffgrunds liegt vorwiegend die Mittelsandfraktion über 50% im Gewichtsanteil und der Anteil von Grobsanden liegt über dem der Feinsande. Die Sande zeigen eine schlechtere Sortierung auf als über dem ehemaligen Elbeurstromtal. Südwestlich des Borkum Riffgrunds liegt die dominierende Fraktion im Feinsandbereich.

Im Umfeld der ehemaligen Geestfläche Schleswig-Holsteins verhält sich der Sandgehalt ähnlich dem des Borkum Riffgrunds, wobei die Querprofile einen heterogeneren Verlauf zeigen. Bereiche mit vorwiegend mittelsandigem Sediment wechseln mit feinsandigerem (wie in der Region südwestlich des Borkum-Riffgrundes) innerhalb kurzer Distanzen. Kleine Teilbereiche enthalten sogar vorwiegend Grobsand.

Auf Grundlage dieser Profilauswertung wurde folgende Klassifizierung der Sande vorgenommen (vgl. Abbildung 3-94):

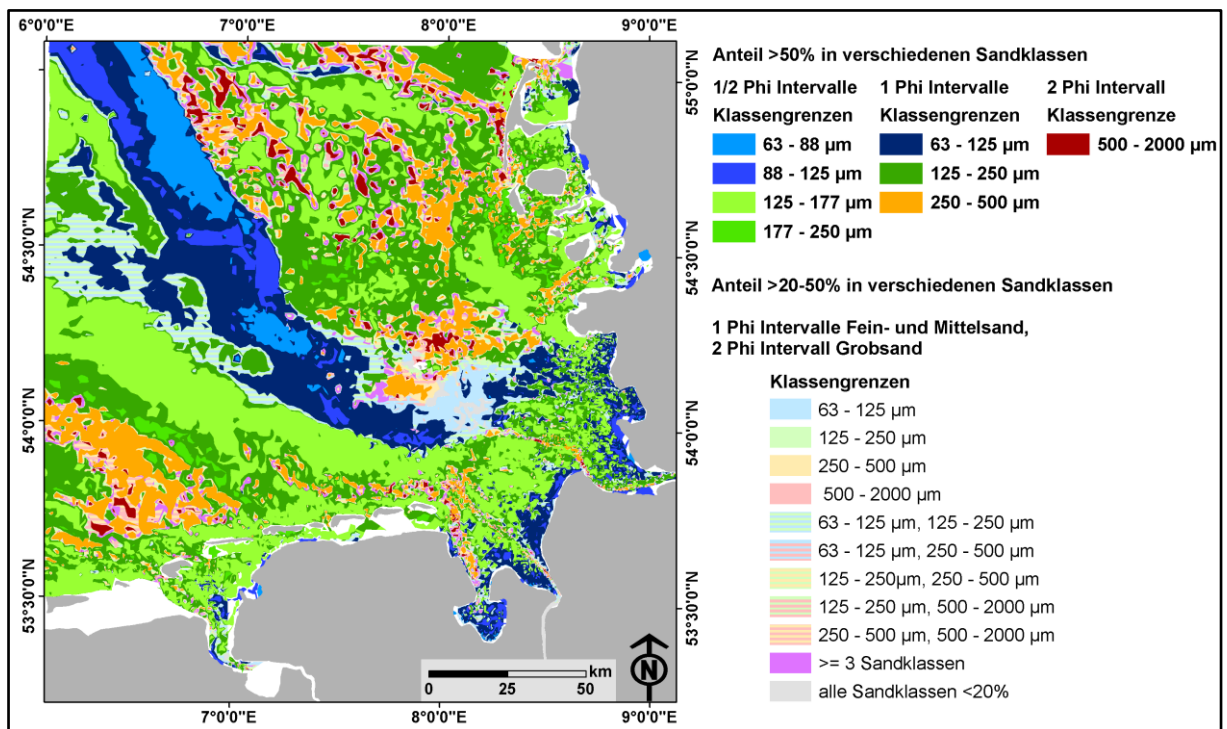


Abbildung 3-94: Flächeneinteilung der Deutschen Bucht nach unterschiedlichen Sandfraktionen und deren Gewichtsanteilen

In einem ersten Schritt wurden die Probestationen der Sedimentdaten trianguliert. Dann wurden zunächst Flächen identifiziert, bei denen eine der betrachteten Kornfraktionen über 50% im Gewichtsanteil ausmacht. Mit diesem Parameter konnte bereits ein Großteil der gesamten Deutschen Bucht abgedeckt werden. Die bestehenden Lücken wurden mit Sedimentfraktionen belegt, deren Gewichtsanteil zwischen 20 - und 50 % einnimmt (siehe Legende Abbildung 3-94).

Das Ergebnis aus der Verschneidung verschiedener Sandfraktionen in der Deutschen Bucht stellt einen höheren Informationsgehalt über die mobile Feinsandfraktion dar als bislang für diesen Bereich in großräumigen Kartenwerken verfügbar war. Die Karte der Sedimentverteilung in der Deutschen Bucht (Figge, 1981) unterteilt den Sand lediglich in drei Fraktionen: Fein-, Mittel- und Grobsand. Abbildung 3-94 zeigt jedoch deutliche Fraktionie-

lungsmuster innerhalb des Feinsands (63 - 250 μm). Hierbei fällt vor allem die Klasse 125 - 177 μm auf, die im gesamten Bereich der Deutschen Bucht die weiteste Verbreitung aufweist. Diese reicht, im Unterschied zu den in den Querprofilen betrachteten Sandfraktionen, lediglich über einen halben Phi Intervall, ihre Gewichtsanteile überschreiten jedoch ebenfalls 50 %. Diese Klasse ist demnach besonders gut sortiert, und legt aufgrund ihres häufigen Vorkommens und Sortierungsgrads den Schluss nahe, die mobilste Fraktion der Deutschen Bucht darzustellen.

Im Bereich nordöstlich des Borkum Riffgrunds geht das Sediment von Mittelsand in Feinsand über. Weiter im Nordosten sortiert sich dieser weiter zur feineren Klassengrenze des Feinsandes hin (125 - 177 μm). Deutlich wird auch, dass sehr feiner Sand (63 – 125 μm), neben kleinflächigen Verbreitungen im Wattenmeer, lediglich über dem ehemaligen Elbeurstromtal im Anschluss westlich der ehemaligen Geestkante des schleswig-holsteinischen Schelfs auftritt. Vergleicht man die Sedimentmuster mit modellierten resultierenden Sedimenttransporten (Abbildung 3-95), wird deutlich, dass die Transporte über dem Borkum Riffgrund in östliche Richtung verlaufen und in Einklang mit der im Sediment erkennbaren Fraktionierungsrichtung gebracht werden können. Über dem ehemaligen Elbeurstromtal knicken die Transportvektoren an der Geländekante zur ehemaligen schleswig-holsteinischen Geest in nord-nord-östliche Richtung ab. Das Oberflächensediment weist hier einen abrupten Wechsel der zu Nordseezeiten akkumulierten feinen Sande über dem Elbeurstromtal zu dem vom pleistozänen Untergrund dominierten Bereichen westlich des alten Geesthangs auf.

Auf dem Schelfbereich, vor der schleswig-holsteinischen Küste, stimmen die Ergebnisse der zwei unterschiedlichen Datensätze ebenfalls gut überein. Die Resttransporte zeigen geringere Transportmengen auf und die Richtungen variieren stark, teilweise bilden sie Wirbel aus. Das Verteilungsmuster des Oberflächensediments ist hier maßgeblich durch den geologischen Untergrund geprägt, ohne dass sich dieses Material durch starke Strömungen großflächig fraktionieren konnte, wie es auf dem Borkum Riffgrund der Fall ist (vgl. hierzu Kapitel 3.3.2).

Dieses großräumige Abbild der sedimentdynamischen Prozesse auf dem Schelf der Deutschen Bucht beschreibt einen relativen stabilen Zustand, da es auf einer heterogenen Datengrundlage fußt, die über einen Zeitraum von ca. 30 Jahren erhoben worden ist. Es ist davon auszugehen, dass dieses sedimentdynamische Abbild den Zustand seit mindestens 2.000 Jahren beschreibt, seitdem der Meeresspiegel in der Nordsee um seinen heutigen Stand oszilliert.

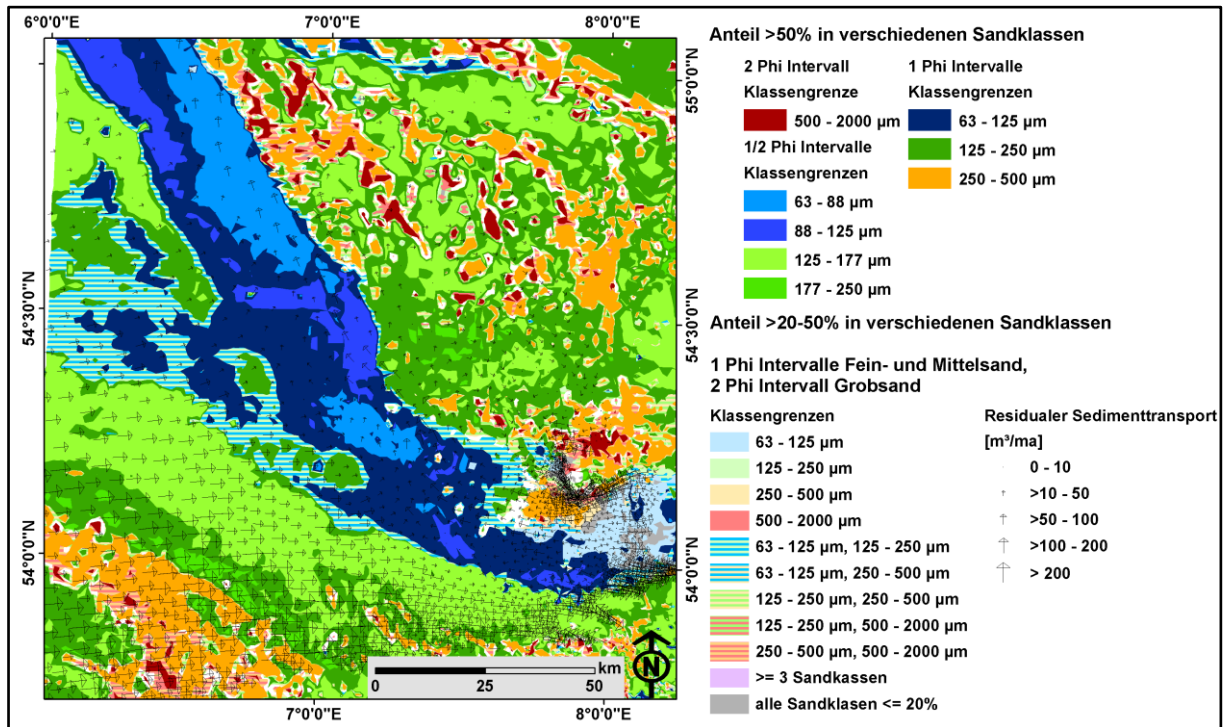


Abbildung 3-95: Vergleich der Sandverteilung in der Deutschen Bucht mit resultierenden Sedimenttransportvektoren ab Wassertiefen über 20m, die in MARINA für das Jahr 2006 berechnet wurden

3.7 Datenbasierte Analyse der Sediment- und Morphodynamik auf dem Schelf, in Wassertiefen über 15m

Die Analyse von Bathymetriedaten aus dem Funktionalen Bodenmodell erlaubt keine Aussagen zu Änderungen der Morphologie. Zum einen liegen hier nicht genug Wiederholungsmessungen vor. Zum anderen liegt die morphologische Änderungsrate im Bereich des Messfehlers, was aus Analysen des Kartenmaterials der Überwachungsberichte der Transitrohrleitungen in der deutschen AWZ der Nordsee (NORPIPE, EUROPIPE (EP) I und II) hervorging (siehe Zwischenbericht 2011 (Heyer, et al., 2011)). In Bereichen wo die Rohrleitungen im Meeresboden verlegt wurden und damit als Höhenreferenz geeignet sind, wurden die Änderungen der Sedimentmächtigkeit ermittelt.

Um Informationen über die Sedimentdynamik im tieferen Gewässer zu bekommen, wurde anhand des Kartenmaterials überprüft, ob einseitige Sedimentanhäufung an freiliegenden Rohrleitungen Aufschluss über sedimentdynamische Abläufe gibt. Zunächst wurden freiliegenden Bereiche der Rohrleitungen identifiziert, deren Überwachungsdokumente einen möglichst langen Zeitraum abdecken, und ausgewertet.

Es wurden die Überwachungsergebnisse an jeweils einem Abschnitt von EP I und EP II näher untersucht. Zur Lage der Abschnitte vgl. Abbildung 3-96). Die Akkumulation im SW der EP I die in den Querprofilen der Jahre 2005 und 2011 ersichtlich ist (s. Abbildung 3-97), weist auf einen Sedimenttransport aus südwestlicher Richtung hin. Der Verlauf der EP I liegt in diesem Bereich orthogonal zur südwestlichen Hauptrichtung numerisch errechneter resultierender Sedimenttransporte (vgl.

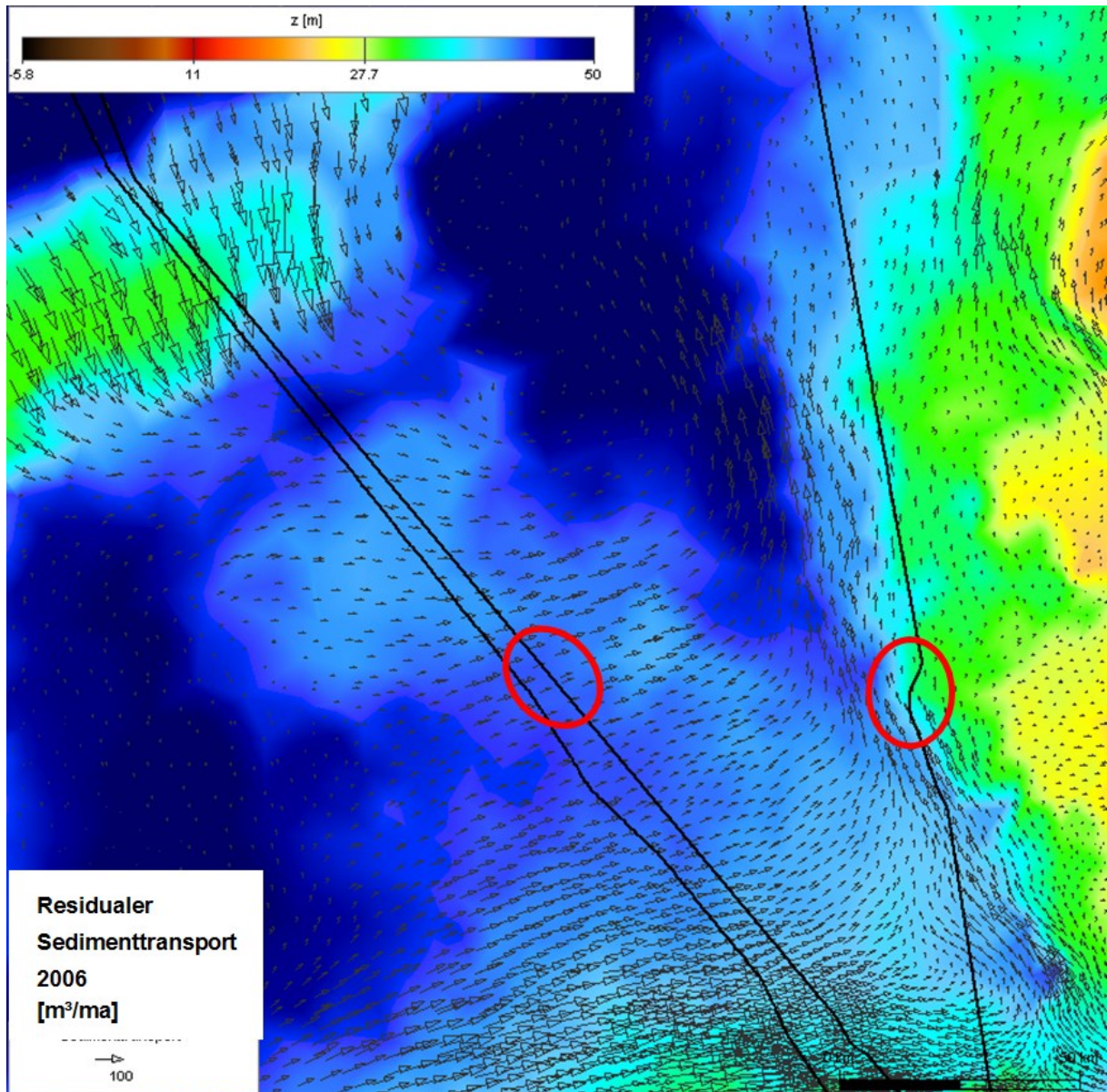


Abbildung 3-99).

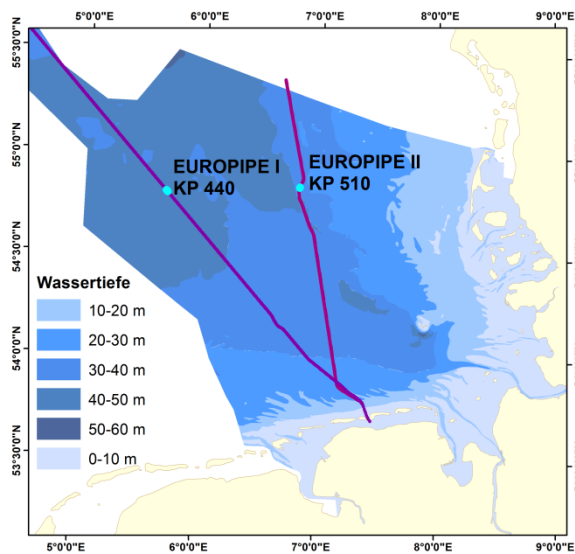


Abbildung 3-96: Lage der Kilometerpunkte EUROPIPE I, KP 440 und EUROPIPE II, KP 510

Der Abschnitt entlang EP II befindet sich nahezu parallel zur Steigungsrichtung zum ehemaligen Geesthang des schleswig-holsteinischen Schelfbereichs (vgl. Abbildung 3-96). Das Querprofil der betrachteten Jahre 2000, 2006 und 2011 zeigt eine leichte Sedimentanlagerung im SO, im NW eine Kolkbildung, was auf einen Sedimenttransport aus südöstlicher Richtung schließen lässt (vgl. Abbildung 3-97, Abbildung 3-98). Auch das geben die numerisch modellierten Sedimenttransporte wieder (

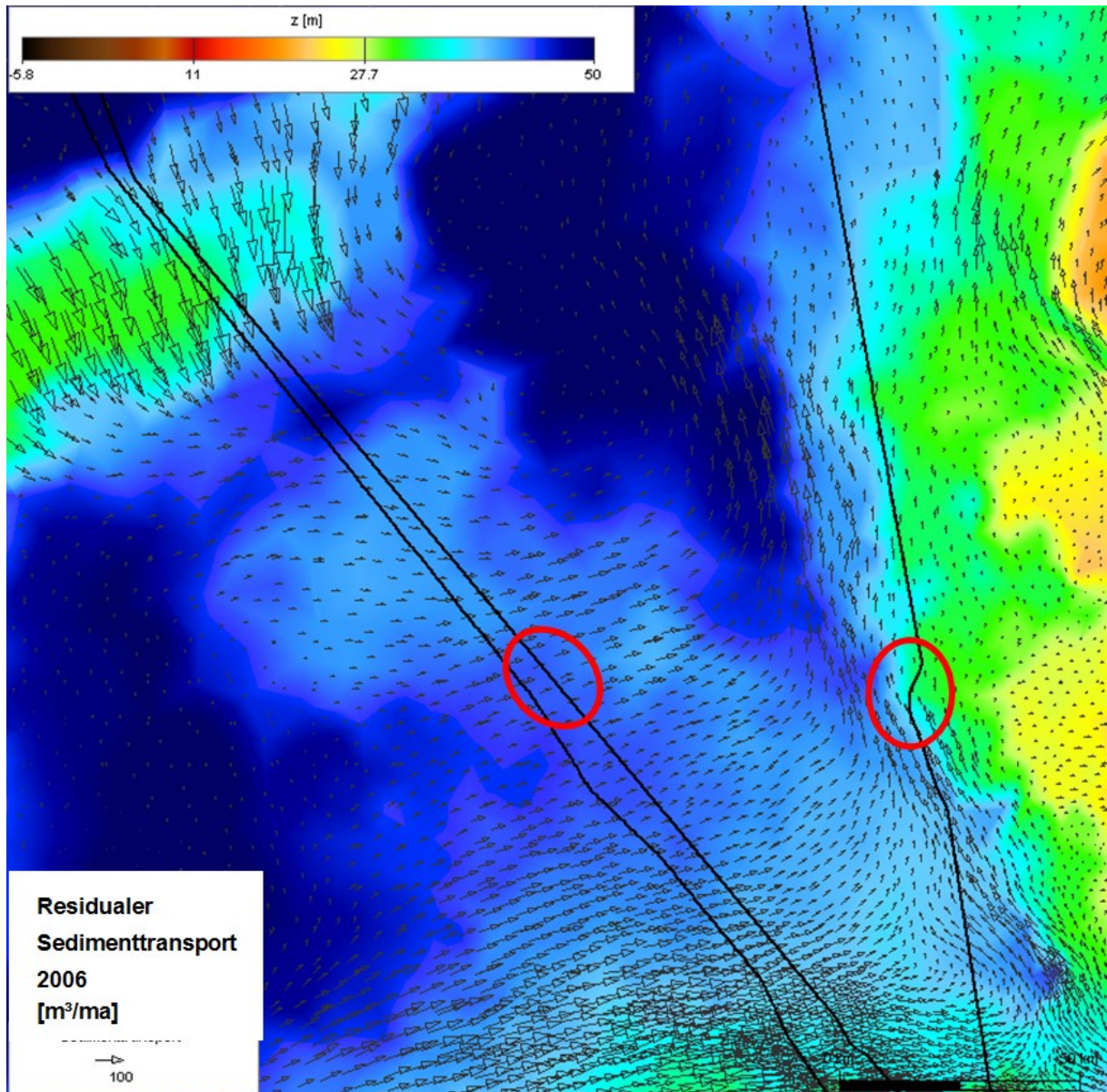


Abbildung 3-99). Die Überwachungsberichte stellen demnach, wenn auch nur punktuell, eine Möglichkeit zur Validierung numerischer Modellergebnisse dar.

Des Weiteren zeigen diese Ergebnisse, dass der Meeresboden der Deutschen Bucht in Wassertiefen zwischen 40 und 60 m von sedimentdynamischen Prozessen beeinflusst wird.

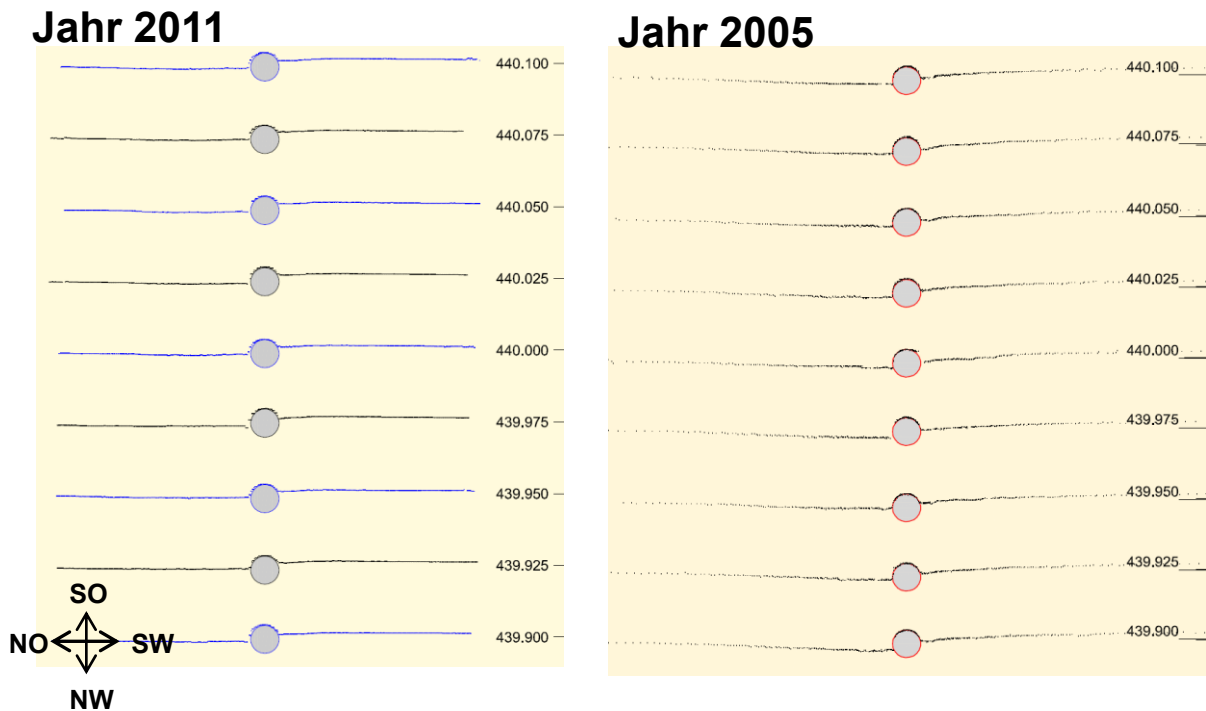


Abbildung 3-97: Querprofile an KP 440 (EUROPIPE I) von 2011 und 2005. Im SW der Pipeline ist deutlich eine Sedimentakkumulation erkennbar, die sich im betrachteten Zeitraum von 6 Jahren weiter ausgeprägt hat

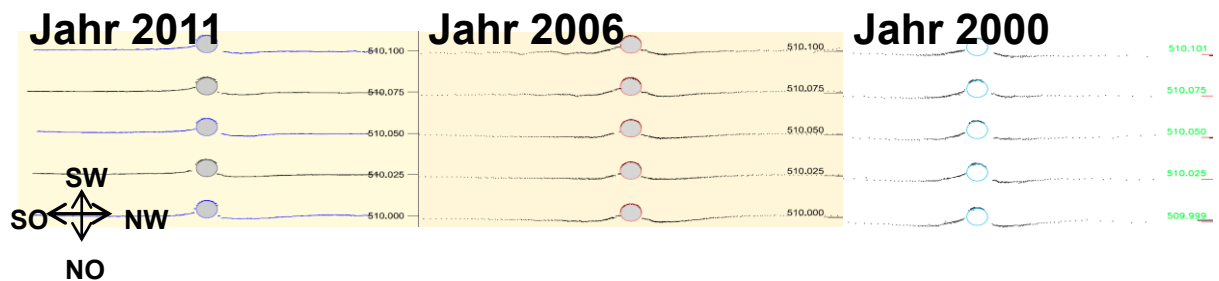


Abbildung 3-98: Querprofile an KP 510 (EUROPIPE II) von 2011, 2006 und 2000. Im SO der Pipeline ist eine leichte Sedimentanlagerung erkennbar, im NW eine Kolkbildung

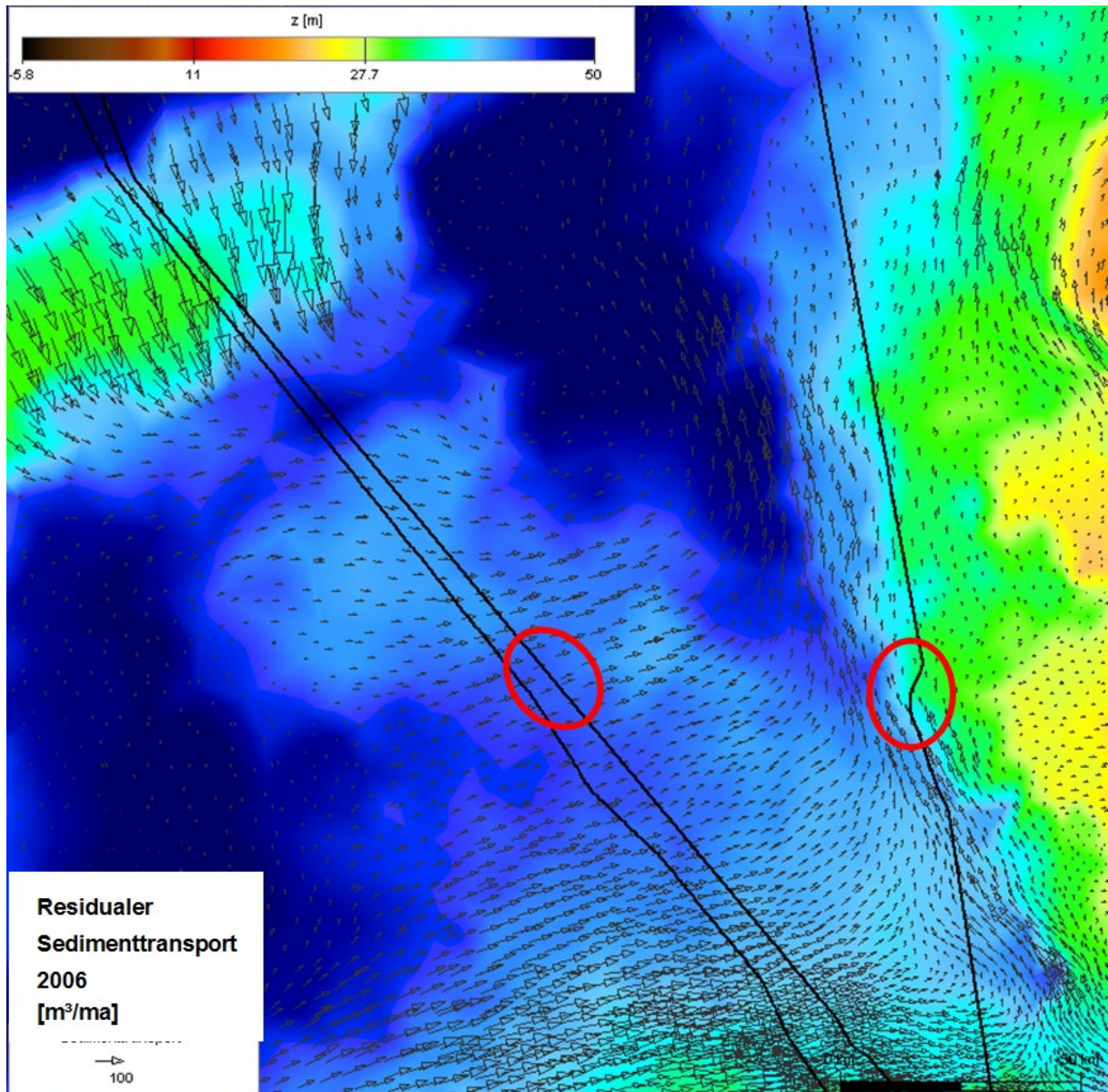


Abbildung 3-99: Wassertiefen und Vektoren resultierender Sedimenttransporte für das Jahr 2006, berechnet mit Marina. Die Lage der oben betrachteten Kilometerpunkte ist rot eingekreist (EP I KP 440: links, EP II KP 510: rechts)

4 Prozessbasierte Simulationsmodelle

Numerische Simulationsmodelle bilden ein wichtiges Ingenieurwerkzeug zur Beurteilung von Veränderungen im tide- und windgetriebenen Strömungsgeschehen, den Seegangsverhältnissen und auch bei der Beurteilung von Transport und Umlagerungsprozessen. Im Verbundprojekt wurde 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 und prozessbasierte Modellansätze klassifiziert werden. Im Gegensatz zu datenbasierten Modellansätzen ermöglichen prozessbasierte Simulationsmodelle nicht nur die Analyse zurückliegender Zeiträume, sondern sind insbesondere Ingenieurwerkzeuge zur Prognose zukünftiger Veränderungen. Sie erlauben aber auch die systematische Untersuchung von Zusammenhängen, die in der Natur nur schlecht oder gar nicht zu beobachten sind. Eine ausführlichere Beschreibung des Systems der Nordsee, den Anforderungen an die Modellsysteme und das konzeptionelle Modell liegt als separater Bericht vor (BAW, 2013).

4.1 Multi-Modell-Ansatz

Prozessbasierte numerische Simulationsmodelle basieren auf der Analyse der physikalischen Gesetzmäßigkeiten der zu beschreibenden Prozesse, deren mathematischen Formulierung und nicht zuletzt der numerischen Approximation im Rahmen einer softwaretechnischen Realisierung. Die Güte der Simulation hängt weiterhin von den verwendeten Rand- und Anfangswerten sowie der gewählten örtlichen und zeitlichen Auflösung ab.

Um die Variabilität der Simulationsergebnisse unterschiedlicher physikalischer Approximationen und numerischer Umsetzungen zu beurteilen, wurden im Rahmen des konzeptionellen Simulationsmodells (Multi-Modell-Ansatz) folgende prozessbasierte numerische Modellkerne eingesetzt:

[Hydrodynamik \(HN\)](#) / [Seegang \(SG\)](#) / [Morphodynamik \(MD\)](#):

• UnTRIM	Unk	SediMorph
• Delft3D (FLOW)	SWAN	Delft3D (MOR)
• MARINA	MARINA	MARINA
• TELEMAR	TOMAWAC	SISYPHE

Der Betrieb dieser Simulationsmodelle erfolgte unter weitgehend gleichen Netzauflösungen, Rand- und Anfangsbedingungen.

Eine weitere Differenzierung wird durch die Wahl der Modellausdehnung gegeben:

- Basismodell,
- Feinmodell (Prozessstudien),
- Teilmodelle (Gitternetzverfeinerungen) für detaillierte Untersuchungen in den sedimentologischen Fokusgebieten und Gitternetze, die für die entsprechenden Rechenkerne angepasst und eingesetzt wurden.

Die betrachteten Zeiträume hängen sowohl von den Modellkernen als auch von den angestrebten örtlichen und zeitlichen Auflösungen ab. In der folgenden Tabelle sind die betrachteten Simulationszeiträume zusammen gestellt. Die Angabe eines Modellnamens in Klammern

mern bedeutet, dass die betrachtete Zeitskala durch Nutzung eines morphologischen Faktors ≥ 1 erreicht wurde.

Tabelle 4-1: Klassifizierung der Modelle nach betrachteten Zeiträumen

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

4.1.1 Beschreibung der Modellverfahren

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. Die im Rahmen von **AufMod** eingesetzten Simulationsmodelle unterscheiden sich in den approximierten physikalischen Prozessen, den eingesetzten numerischen Verfahren und den verwendeten Programmiersprachen und –techniken. Im Folgenden wird auf die wesentlichen Eigenschaften und Unterschiede eingegangen. Die folgende Liste nennt die eingesetzten Modelle und die im Rahmen von **AufMod** angestrebten Simulationszeitspannen:

- 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)
- TELEMAC - SISYPHE / DredgeSim -TOMAWAC (Simulationen von 10 - 100 Jahre)
- DASIMO (datenbasiertes Hindcast-Simulationsmodell) Zeitspanne 1989 bis 2010

In den folgenden Tabellen werden wesentliche Charakteristika und Eigenschaften der morphodynamischen Simulationsmodelle zusammengestellt.

Tabelle 4-2: Übersicht der verschiedenen Simulationsverfahren in **AufMod**

Allgemeines	UnTRIM ³	DELFT3D	MARINA	TELEMAC	DASIMO
	prozessbasiert				datenbasiert
Dimension	2D / 3D	2D / 3D	2D	2D	2D
Typ	FDM / FVM	FDM / FVM	FEM	FEM	
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	Teilweise	Nein
Code	Kosten	PD	Kosten	PD	Research
Ersteller	Casulli	Deltares	Milbradt	EDF	Milbradt
Support	Gut	Gut	Gut	Gut	Nein
User-meeting	Ja	Ja	Nein	Ja	Nein
Validierungs-dokument	Ja	Ja	Ja	Ja	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 ³	DELFT3D	MARINA	TELEMAC
Druck	HS, NHS.	HS, NHS.	HS	HS
Dispersion ⁴	Ja	Ja	Nein	Ja
Turbulenz ⁵	C, A(P_UI), k-ε	C, A, k-ε, k-L	C, A	Ja
Large Eddy	Nein	2d:Ja/3d:Nein	Smagorinsky	Nein
ortsvar. Wind	Ja	Ja	Ja	Ja
ortsvar. Reibung	Ja	Ja	Ja	Ja
Strukturen	W, G	W, G, F, T	W, G	W, G
Sohle	Zeitvariabel	Zeitvariabel	Zeitvariabel	Zeitvariabel
Gezeitenkraft	Ja	Ja	Ja	Ja
Randbed.	H	H	H + V + Q	H + V + Q
Nichtreflekt. Rdb	Ja	Ja	Ja	Nein
Stabilität	Sehr gut	Gut	Sehr gut	Sehr gut
num. Dämpfung	Gering	Gering	Gering	Gering
Zeitschritt	Variabel	Variabel	Intern Automatisch	Variabel
Diskretisierung	Variabel	Variabel	Variabel	Variabel

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

HS = hydrostatisch / NHS = nicht hydrostatisch

Seegang	UnTRIM ³	DELFT3D	MARINA	TOMAWAC
Verfahren	Unk-Modell	SWAN	Holistischer Ansatz	TOMAWAC
Typ	Spektral	Spektral	Hyperbolisch	Spektral
Kopplung	Online	Online	Vollständig	Online
Wechselwirkung	r, e(P_UI) ⁶	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	S, R, B, D

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

³ BAW-Version

⁴ 2D

⁵ C= konstant, A = algebraisch

Transport	UnTRIM³	DELFT3D	MARINA	TELEMAC
Salz	Ja	Ja	Ja	Ja
Temperatur	Ja	Ja	Ja	Ja
Bed-load:	vRi, bag, mpm, hun	vRi, mpm, ein, e&h	vRi, mpm, w&s	vRi, mpm, ein, hun, bik, bai
Formel				
Fraktionen	Fraktioniert	Fraktioniert	Parameterisiert	Fraktioniert
Schwebstoff	Fraktioniert	Fraktioniert	Parameterisiert	Ja
Sinkgeschwind.	n+c (P_UI) ⁶	h, c, n	Oseen	van Rijn
Dichte	Ja (P_UI) ⁴	Ja	Ja	Nein
Atmosphäre	Ja	Ja	Nein	Nein
Baggern/Umlagern	Ja	Ja	Prototypisch	Ja

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

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

Morphodynamik	UnTRIM³	DELFT3D	MARINA	TELEMAC
Verfahren	SediMorph	Integriert	Integral	SISYPHE
Typ	FV	FV	FEM	FV
Kopplung	Online	Online	Vollständig	Online
Fraktionen	Ja	Ja	Parameterisiert	Ja
Morpholog. Faktor	Ja	Ja	Ja	Ja
Sohlformen	Ja	?	Ja	Ja
Baggern/Umlagern	Ja	Ja	Prototypisch	Ja
unerodierbarer Boden	Ja	Ja	Ja	Ja
3D-Bodenaufbau	In Arbeit	Ja	Nein	Ja

4.1.2 Modellausdehnungen und –auflösung

Das Modellgebiet des gemeinsamen Basismodells umfasst sowohl die Nordsee als auch den Englischen Kanal und die westliche Ostsee (Abbildung 4-1). Auf Grund der spezifischen Anforderungen an die Ortsdiskretisierung wurde für das Modellsystem DELFT3D ein eigenständiges Deutsche Bucht Modell aufgebaut.

Für eher kleinräumige Fragestellungen wurden weiterhin Detailmodelle, z. B. für das Jade-Weser-Ästuar genutzt.

4.1.3 Gitternetze

Die Lage des Gewässerbodens (Bathymetrie) wird bei den verschiedenen Modellsystemen jeweils durch ein Gitternetz diskretisiert. Die Rechenmodelle UnTRIM, MARINA und TELEMAC verwenden unstrukturierte Dreieckselemente (siehe Abbildung 4-2) mit einer variablen Auflösung von ca. 80 m bis ca. 24 km. Dieses erlaubt die gleichzeitige Abbildung der gesamten Nordsee mit grober Auflösung und einer höher aufgelösten Deutschen Bucht. Einzelne Priele, Tiderinnen und Ästuar sind in diesem Modell jedoch immer noch verhältnismäßig grob diskretisiert.

⁶ Eigenleistung der BAW als vorzugebende, variable Größe (P_UI)

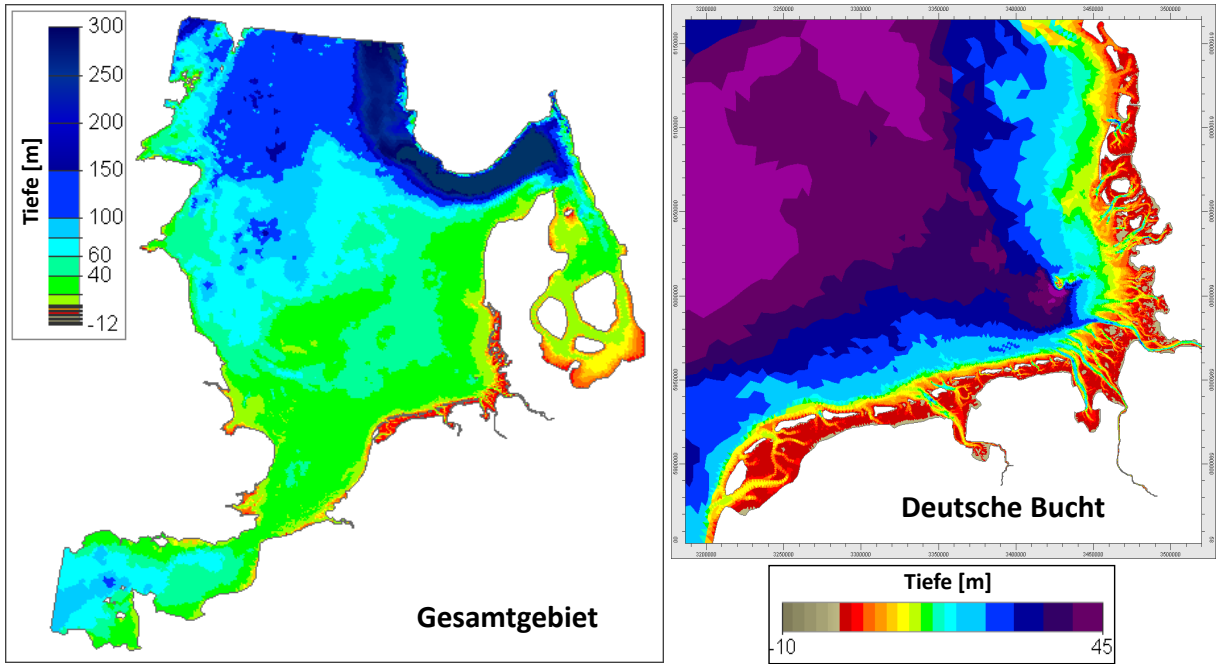


Abbildung 4-1: Modellausdehnung und Auflösung des Gesamtgebietes (links) und in der Deutschen Bucht (rechts)

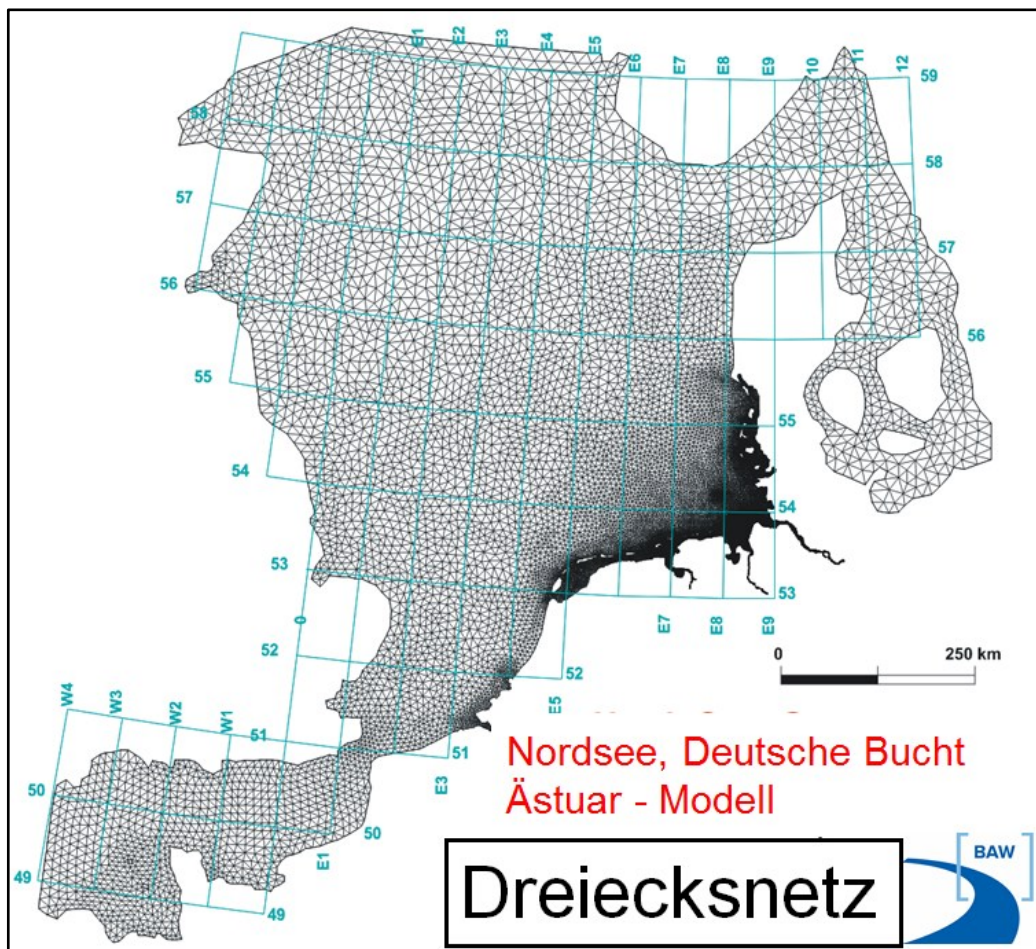


Abbildung 4-2: Dreiecksnetznetz Nordsee / DB für UnTRIM, MARINA und TELEMAC

Das Modellsystem DELFT3D basiert auf Quadrat- bzw. Rechteckelementen mit leicht variablen Abmessungen (curvilinear grid). Da bei dieser Gittertopologie die große Flexibilität der o. g. Dreieckselemente nicht gegeben ist wird bei der Simulation mit DELFT3D mit jeweils einem Gitternetz für die Nordsee und einem eingebetteten Netz für die Deutsche Bucht gerechnet (siehe Abbildung 4-3). Diese gestaffelte Netzhierarchie wird als Nesting (Schachtelung) bezeichnet.

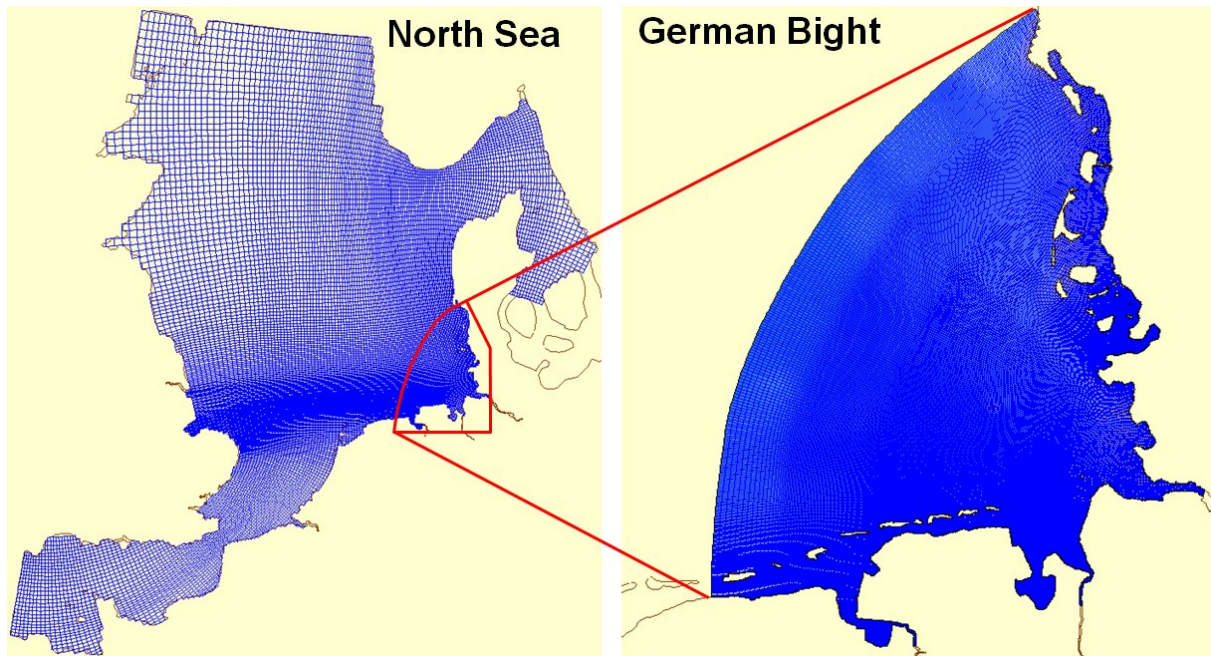


Abbildung 4-3: Gitternetze in DELFT3D: Nordsee und Deutsche Bucht (Nesting)

Die Zuweisung der Tiefen an den Knoten (DELFT3D, MARINA, TELEMAC) bzw. an den Kanten (UnTRIM) erfolgt volumentreu auf der Basis einer voronoibasierten Tiefenapproximation.

4.1.4 Anfangsbedingungen

Zu Beginn eines jeden Simulationslaufes müssen an allen Knoten des Berechnungsgitters konsistente Zustandsgrößen (Variable) vorgegeben werden. Diese stammen aus Messdaten oder werden durch das Funktionale Bodenmodell, wie beispielsweise die Lage des Gewässerbodens, die Sedimentzusammensetzung oder Bodenformen generiert. Andere Anfangsbedingungen wurden aus vorherigen Modellläufen extrahiert.

Hydrodynamik

- **Wasserspiegellage:** Die Lage des Wasserspiegels wurde aus einem Vorlauf übernommen, das Modell startet also eingeschwungen.
- **Strömungsgeschwindigkeit:** Die Strömungsgeschwindigkeiten wurden aus einem Vorlauf übernommen, das Modell startet also eingeschwungen.
- **Salzgehaltsverteilung:** Die 2d-Salzgehaltsverteilung wurde aus einer Salzgehaltsklimatologie der Nord- und Ostsee (Janssen, et al., 1999) für einen Vorlauf genutzt und für drei Monate unter realistischem Forcing weiter berechnet.
- **Seegangsfeld:** Die Parameter des Seegangsfeldes wurden abgemindert auf der Basis des Windfeldes generiert, das Modell startet somit „eingeschwungen“.

Sedimentologie

Für den Sedimenttransport sowie für die morphodynamischen Simulationen wurden folgende Anfangsbedingungen verwendet:

- Bathymetrie: Für die Tiefenverteilung wurde jeweils die Tiefenverteilung zum 01. Januar des betrachteten Jahres aus dem Funktionalen Bodenmodell abgeleitet.
- Sedimentinventar: Die im Funktionalen Bodenmodell archivierten Summenkurven der Korngrößenverteilungen werden nach frei wählbaren Kornklassen exportiert.
- Bodenformen: Die Bodenformen wurden, wenn vorhanden, aus dem Funktionalen Bodenmodell abgeleitet.
- Porosität: Die Porosität der Bodensedimente wurde aus den Sedimentparametern abgeleitet.

4.1.5 Randwerte

Randwerte sind wesentliche treibende Kräfte für die Simulationsmodelle und beschreiben die Einbettung (des Teilmodells) in eine globale Umgebung. Die Abbildung 4-4 zeigt eine Übersicht über die verwendeten Randwerte und Randbedingungen.

Meteorologie

Der meteorologische Energieeintrag durch Wind in den Wasserkörper wurde über orts- und zeitvariable Windfelder des Prognosemodells des Deutschen Wetter Dienstes (DWD) mit einer Rasterweite von ca. 33 km und stündlicher Auflösung realisiert. Die Veränderlichkeit des Luftdrucks wurde nicht berücksichtigt.

Hydrodynamik

- Wasserstand:
 - Einsteuerung von Zeitreihen des Wasserstands am offenen Modellrand, generiert aus den Ergebnissen des globalen Gezeitenmodells FES 2004 (Lyard, et al., 2006)
 - Steuerung der Mittelwasserlage aus dem Windstaumodell des BSH, basierend auf dem Nordatlantikmodell BSHcmod.na
- Strömungsgeschwindigkeit: kein Impulseintrag
- Salzgehalt: Relaxation des vertikal gemittelten Salzgehaltes am Modellrand zu klimatologischen Werten der Salzgehaltsklimatologie von Janssen (Janssen, et al., 1999), vgl. Abbildung 4-4
- Oberwasser: Oberwasserabflüsse im Bereich der Deutschen Bucht als Zeitreihe der täglichen Messwerte; im übrigen Gebiet klimatologische Werte
- Seegang: Der Seegang wurde an den offenen Modellrändern Englischer Kanal und Atlantik entsprechend den Windfeldern als teilweise ausgebildet approximiert

Sedimentologie

- Schwebstoffgehalt: 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 (Gayer, et al., 2004) und Dobrynin (Dobrynin, 2009).
- Geschiebetransport: Gleichgewichtsformulierung (zero gradient) an den offenen Rändern.

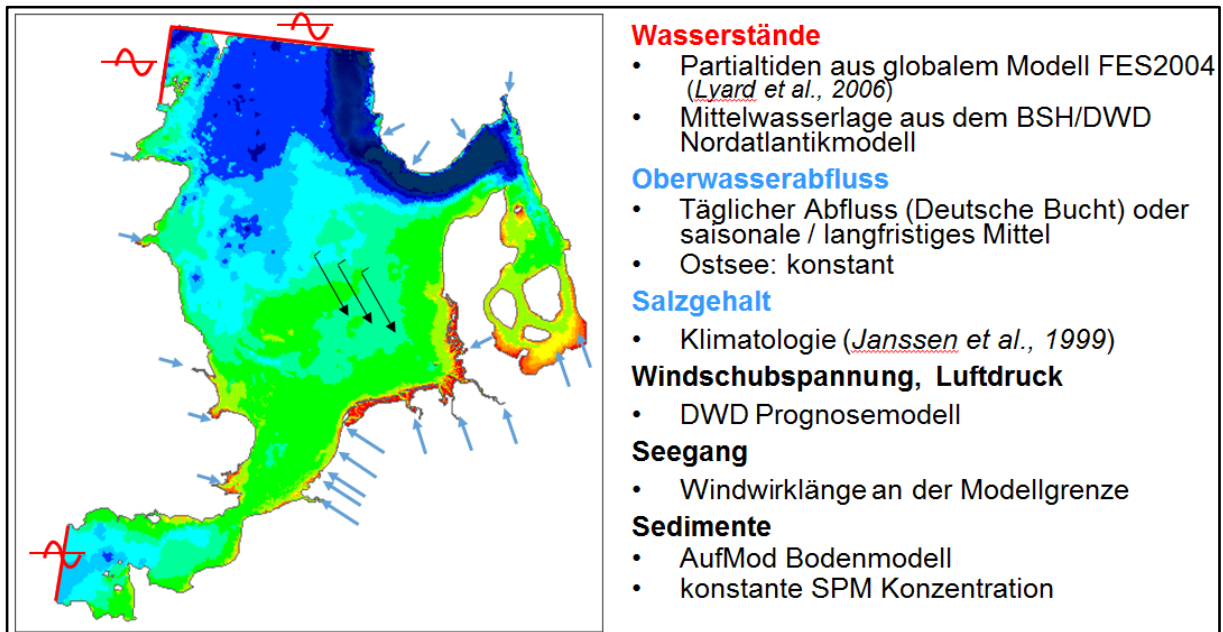


Abbildung 4-4: Übersicht der Randwerte

4.2 Validierung

In diesem Kapitel wird die Validierung der hier verwendeten prozessbasierten Modelluntersuchungen dargelegt. Soweit möglich wird Bezug auf die Ergebnisse untereinander genommen; einzelne Aspekte werden gesondert für die verschiedenen Simulationsmodelle dargestellt.

Wie bei allen Validierungsuntersuchungen wird die Naturähnlichkeit bzw. die Diskrepanz zwischen Modell und Messung dargestellt, um die Ergebnisse hinsichtlich der Belastbarkeit besser einschätzen zu können. Dabei muss beachtet werden, dass die zur Validierung herangezogenen Messungen ebenfalls eine gewisse Unsicherheit aufweisen, die es im Vergleich zu berücksichtigen gilt.

Die ursprüngliche Idee, die Validierung mit einem einheitlichen Vorgehen für alle Modelle eventuell sogar mit derselben Software zur Analyse durchzuführen, erwies sich mit den bestehenden Softwarewerkzeugen als nicht durchführbar. Die Gründe hierfür liegen in den unterschiedlichen Modellansätzen (Finite Elemente bzw. Finite Volumen) und der Datenverarbeitung (Ausgabeformate).

Bei einigen integrativen Parametern (z.B. Transportmengen über Profile oder Depositionsflächen) ist eine Validierung mangels gemessener Vergleichsdaten nicht möglich. Hier kann nur mit einer Plausibilisierung oder mit einem Multi-Modell-Ansatz gearbeitet werden. Erstere um zu sehen, ob das Modell bestimmte Phänomene ebenfalls simulieren kann, letztere um überhaupt eine Größenordnung plus Spannweite beispielsweise eines Transportes zu bekommen.

Hinter den Begriffen Sedimenttransport und Morphodynamik stehen komplexe, bis heute nicht bis ins Detail verstandene, natürliche Prozesse. Die eingesetzten Simulationsmodelle bilden nur einen Teil dieser Prozesse ab. Zur Vereinheitlichung und zur Verständlichkeit sind deshalb die Begriffe Morphodynamik und Sedimenttransport im Folgenden definiert.

4.2.1 Validierungsparameter

Wassertiefe:

Die Tiefe (Wassertiefe) ist bei der Morphodynamik einer der bedeutendsten Parameter. Als zeitliche Ableitung kommt noch die Tiefenänderung pro Zeit in Form einer Geschwindigkeit oder noch weitergehend die zweite Ableitung als eine Beschleunigung hinzu. Die zeitlichen Änderungen der Tiefe können sehr wertvolle Informationen liefern, benötigen jedoch zur Validierung sehr viele Wiederholungsmessungen an einem Ort.

Die Tiefeninformation ist zwar flächendeckend vorhanden, sie ist jedoch in großen Bereichen durch räumliche und zeitliche Interpolationen entstanden (Referenz Bodenmodell). Durch die Anwendung eines solchen Interpolationsalgorithmus entsteht Redundanz, die nicht validiert werden sollte, da das nicht dem ursprünglichen Zweck der Validierung entspricht. Vielmehr sollten nur die Daten als Validierungsdaten herangezogen werden, die tatsächlich gemessen wurden. Genauer betrachtet müssen es Orte sein, an denen mindestens zwei Messungen durchgeführt wurden (die erste Messung für die Initialbelegung des Modells, die zweite Messung als tatsächliche Validierungsmessung). Daraus ergibt sich für das große Gebiet der Deutschen Bucht eine sehr geringe Datenbasis (s. Abbildung 4-5). Um die Datenbasis zu erhöhen, müssen die Modelle deutlich längere Zeitspannen simulieren, was sehr zeitaufwändig werden kann.

Kornzusammensetzung:

Ein weiterer sehr bedeutsamer Parameter ist die Kornzusammensetzung. Die Informationsdichte ist bei diesem Parameter sehr gering. Zeitliche Veränderungen in Form von Zeitreihen stehen nahezu nicht zur Verfügung.

Porosität:

Die Porosität ist ein wichtiger Modellparameter. Es zeigt sich, dass nahezu keine Messungen hierzu vorhanden sind. Im *AufMod*-Projekt wurde erstmals versucht diesen Parameter zu bestimmen (Näheres siehe Kapitel 2.2.1.3).

Sohlformen:

Für die Sohlformen gilt hinsichtlich der Datenlage ähnliches wie für die Porosität. Bei den Sohlformen wurde im Projekt versucht erstmals eine Karte der Sohlformparameter für die Deutsche Bucht zu erstellen (siehe Kapitel 2.2.1.4). Zeitliche Veränderungen dieser Formen und eine Validierung waren bis jetzt nur qualitativ möglich.

Zukünftig könnten mit solchen Karten Dünen- und Riffelprädiktoren, die in den Modellen implementiert sind, validiert werden.

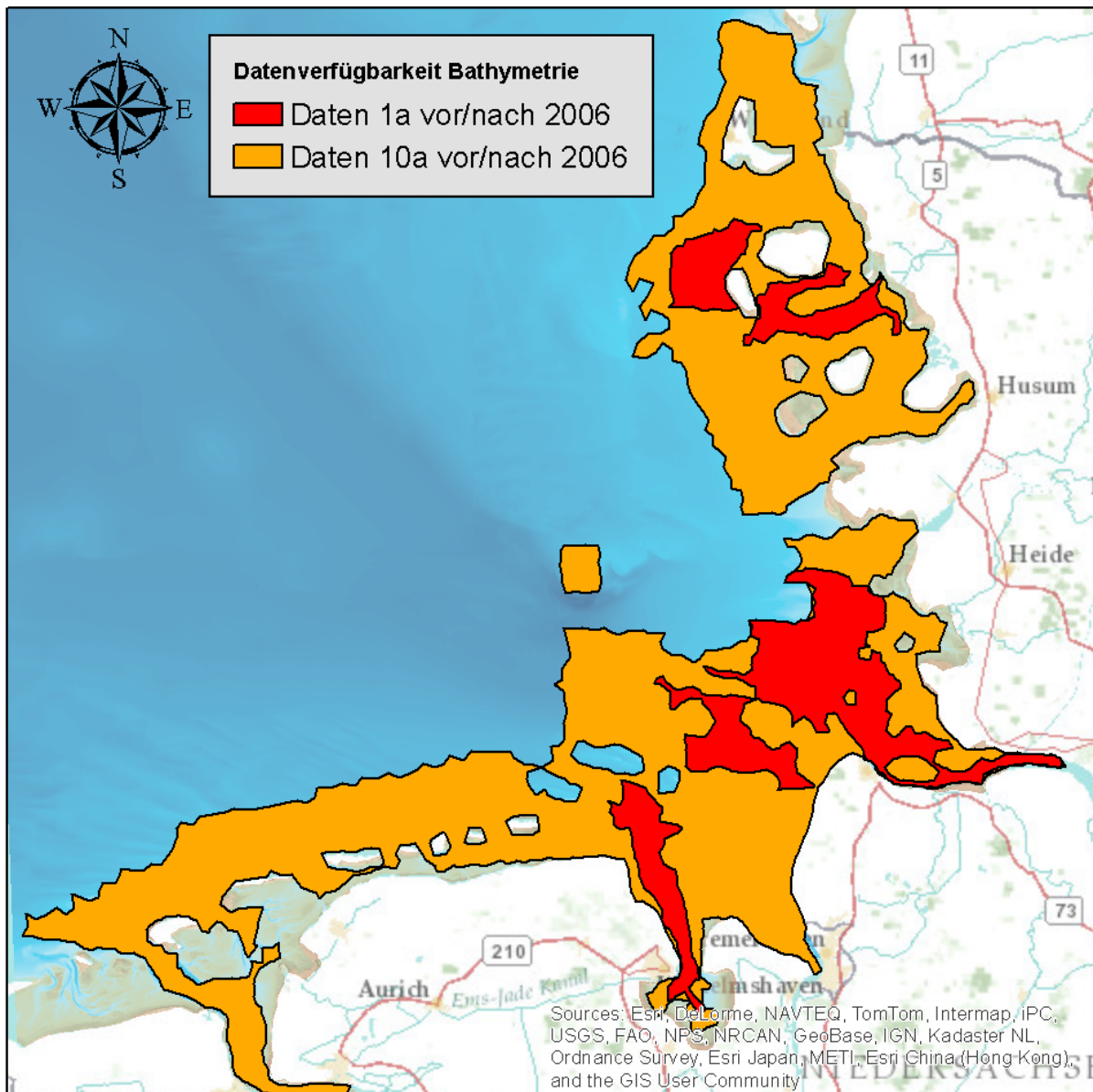


Abbildung 4-5: Datenverfügbarkeit der Bathymetrie; die Flächen markieren die Bereiche mit jeweils zwei Datensätzen (maximal 1/10 Jahr(e) vor dem 1.1.2006 und maximal 1/10 Jahr(e) nach dem 1.1.2007)

Integrative Größen:

Folgende integrativen Größen können zur Validierung herangezogen werden:

- Tiefe, integrativ über Bereiche -> Volumenanalysen
- Tiefenverteilung in bestimmten Bereichen -> Hypsometrie
- der morphologische Raum
- Transportkenngrößen (z.B. bed load/suspended load über ein Profil pro Tide)
- Brier Skill Score

4.2.2 Plausibilisierung

Neben der Validierung, die sich quantitativ ausdrücken lässt, gibt es die beobachteten Phänomene. Gerade auf großen Skalen und bei einer ungünstigen Datenlage kann ein Modell zeigen, ob es qualitativ in der Lage ist, die beobachteten Phänomene zu simulieren.

Folgende Phänomene könnten zur Plausibilisierung geeignet sein:

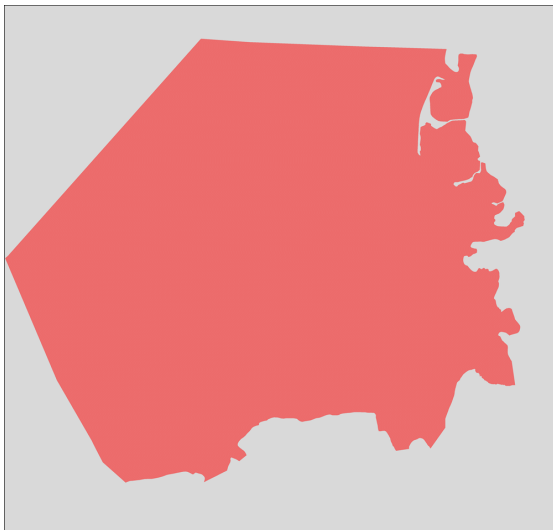
- Rinnenverlagerung (Medemrinne)
- Nehrungshaken Wangerooge
- Theeknobsände südlich von Sylt
- Verlagerung Amrum Odde / Kniepsand
- Helgoländer Schlicklinse
- Sedimentsortierung in den tiefen Rinnen
- Sedimenttransportpfade

In Bezug auf die Fragestellung von großräumiger und langfristiger Simulation muss jedoch überlegt werden, ob die Skalen vergleichbar sind. Spielt beispielsweise die regional für die Tideelbe sehr bedeutsame Verlagerung der Medemrinne eine Rolle für das Gesamtsystem der Deutschen Bucht?

Unstrittig ist, dass die Helgoländer Schlicklinse gerade hinsichtlich der Sedimenttransporte und Erosions- / Depositionsgebiete eine wichtige Stellung im Sedimentsystem der Deutschen Bucht spielt.

4.2.3 Massenbilanz

Eine wichtige Eigenschaft zur Beurteilung der Güte eines Modells ist die Massenerhaltung bzw. als Kenngröße die Massenbilanz. Eine nahezu ausgeglichene Massenbilanz steigert



das Grundvertrauen in die morphodynamische Simulation. Da das morphodynamische Simulationsmodell über keine intern berechnete Massenbilanz der Sedimente für größere Teilgebiete verfügt, werden Bilanzierungen über den Profillumring (Bilanzierungsprofile) eines Teilgebietes mit den simulierten Bathymetrieänderung desselben Teilgebietes (s. Abbildung 4-6) verglichen. Im günstigsten Fall entsprechen die Massenflüsse über die Profile den Massenänderungen durch die veränderte Bathymetrie.

Abbildung 4-6: Teilgebiet für die Analyse der Profillflüsse und der Bathymetrieanalyse

Methode:

Zurzeit ist es mit den BAW-Methoden nicht möglich, auf die Kantentiefen von SediMorph zuzugreifen. Verfügbar sind Knotentiefen, die von den Polygonzentren aus SediMorph auf die benachbarten Knoten flächengewichtet interpoliert sind. Es musste daher ein Umweg gegangen werden, der den Knotenwerten wieder Flächen zuordnet, so dass daraus erneut Volumina berechnet werden können. Der folgende Weg wurde dabei beschritten:

- Konversion der Ergebnisse aus SediMorph (Knotenorientiert, BDF) nach NetCDF (data-convert)
- Berechnung des Delta z (dz) aus zwei Zeitpunkten (Zeitspanne vom 15.1. bis 300 Tage danach; eine Version vom 1.1. bis 1.1. des Folgejahres musste verworfen werden, da in einigen Jahren ungewöhnliche hohe Wasserstände zu Beginn des jeweiligen Jahres auftraten) und Export als ASCII-Punktdateien (Mathematica-Skript)
- Interpolieren des dz auf ein 50m-Raster und Export nach ASCII (Janet)

- Konversion der ASCII-Dateien nach HDF5 aus Performancegründen und Abbildungen (Mathematica-Skript)
- Ausmaskieren der gewünschten Bereiche (Mathematica-Skript)
- Summen und Bilanzen sowie Diagramme und Excel-Tabellen (Mathematica-Skript)

Für die Auswertung der Massenflüsse wurden Profile über Ästuarquerschnitte und über die Deutsche Bucht gespannt. Die Massenflüsse über diese Profile werden ausgewertet.

Für das Modell SediMorph soll eine Plausibilisierung für den Bereich der Helgoländer Schlicklinse gezeigt werden. Es werden Differenzenpläne der Tiefe für die Kalenderjahre 1996 - 2008 erstellt. Die Volumenbilanz wird auf einen Teilbereich der Helgoländer Schlicklinse angewendet (s. Abbildung 4-7).

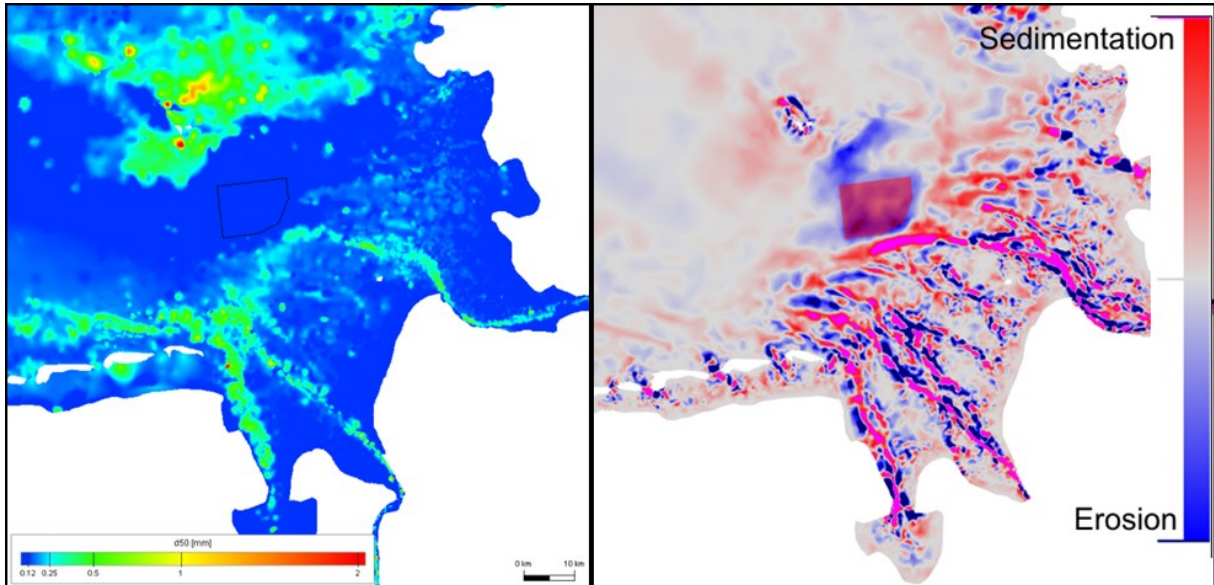


Abbildung 4-7: Analysebereich zur Auswertung im Bereich der Helgoländer Schlicklinse; links: Sedimentverteilung D_{50} ; rechts: Tiefenänderung 2006

4.2.4 Hydrodynamik

Für die Validierung des Wasserstandes wurden entlang der Pegelstationen in der Nordsee / Deutschen Bucht die Analysen für die M2-Gezeit verglichen (siehe Abbildung 4-8).

Der Vergleich von charakteristischen Strömungszuständen ist problematisch (siehe Einleitung zu diesem Kapitel). Anzustreben ist die Analyse und der Vergleich resultierender Strömungen, was aufgrund fehlender Datenlage noch nicht durchgeführt werden konnte.

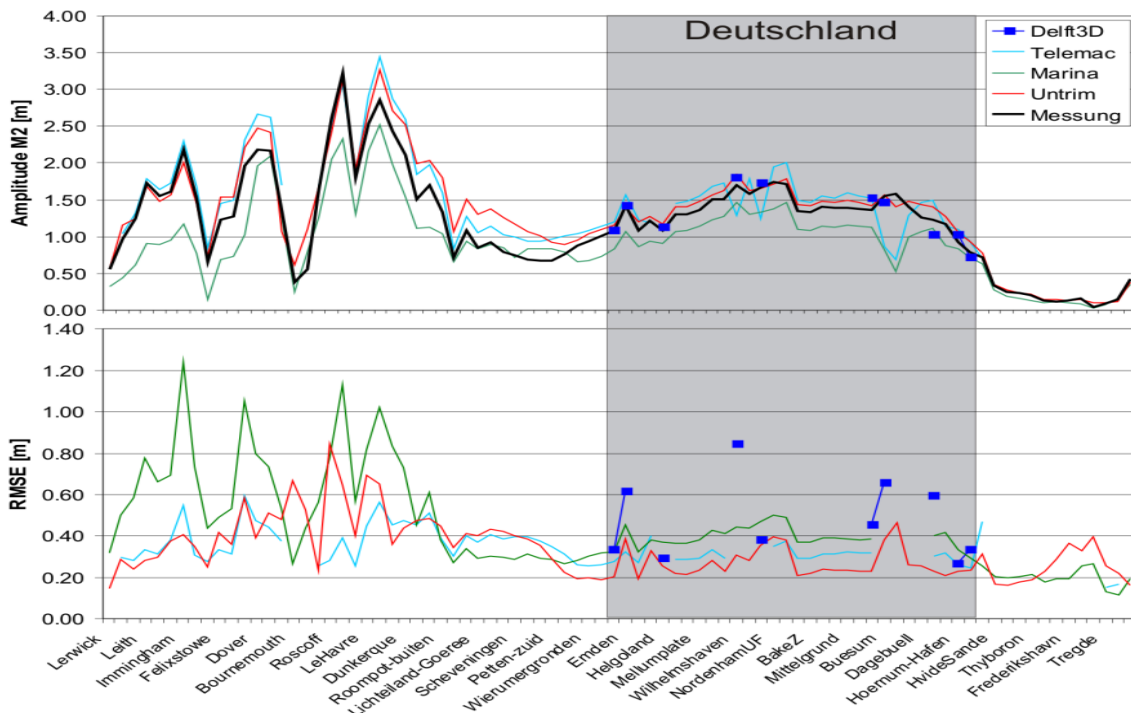


Abbildung 4-8: Vergleich der M2-Partialtide entlang der Nordseeküste aus den Simulationen und der Analyse aus den Pegelmessungen

4.2.5 Seegang

Der Vergleich der signifikanten Wellenhöhe (Seegang) für den Februar 2006 zwischen der Messung und den Modellberechnungen von UnK und SWAN zeigt vergleichbare Resultate für Helgoland (vgl. Abbildung 4-9). Vergleichbare Resultat erbrachte das Simulationsmodell MARINA (vgl. Abbildung 4-10). Ergebnisse der TOMAWAC-Simulation siehe Kapitel 4.2.9.

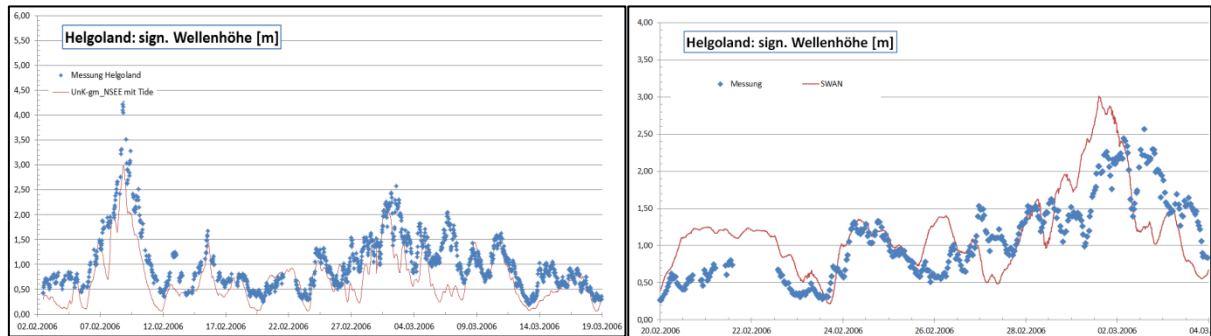


Abbildung 4-9: Hsig: Helgoland Messung/Unk-Simulation (Links) – SWAN (Rechts) 02-2006

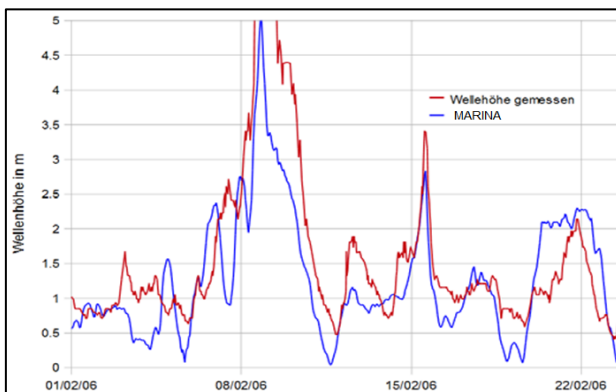


Abbildung 4-10: Hsig: Boje NSB Messung vs. MARINA

4.2.6 Sedimenttransport

Sedimenttransport ist die Bewegung von abiotischen Feststoffen. Die Bewegung kann sowohl durch als natürlicher Prozess oder auch durch menschliche Eingriffe erfolgen. Dominante natürliche Prozesse sind die Hydrodynamik, Gravitation und Druckwellen. Wesentliche menschliche Eingriffe sind das Baggern und Verklappen. Hinter den Begriffen Sedimenttransport und Morphodynamik stehen komplexe, bis heute nicht bis ins Detail verstandene, natürliche Prozesse. Die eingesetzten Modelle bilden nur einen Teil dieser Prozesse ab.

Eine Validierung des Sedimenttransportes ist allein durch den Vergleich mit Messwerten an bestimmten Lokationen nicht ausreichend. Sowohl die Messmethoden (Unsicherheiten in der Interpretation der Daten) als auch die Datenverfügbarkeit (Räumlich und zeitlich sind relativ wenige Messungen vorhanden) lassen sich nicht direkt mit den Modellergebnissen vergleichen.

Die Sedimenttransportpfade wurden aus den Vektoren des resultierenden Gesamttransportes (suspendierter- und Geschiebetransport) des Jahres 2006, einschließlich Seeegangswirkung, berechnet. Die resultierenden Vektorfelder wurden mehrfach dupliziert und dann zu einem Datensatz addiert. Aufbauend auf dieser Datenbasis wurden Schwimmbahnen (Tracer) erzeugt, die dem Verlauf und den Richtungen der resultierenden Größen entsprechen; hierdurch wurde der Struktur der resultierenden Transporte deutlich.

Als Beispiel für die berechneten Sedimenttransportpfade in der Deutschen Bucht mit UnTRIM, MARINA und TELEMAC wird auf Abbildung 4-11 auch der Mittelwert aus diesen unterschiedlichen Simulationsläufen dokumentiert. Hierauf wird der grundlegende Trend der Sedimentbewegung von West nach Ost seewärts der west- und ostfriesischen Küste deutlich. Im Bereich der inneren Deutschen Bucht (Jade-, Weser-, Elbmündung bis etwa Helgoland) herrschen uneinheitliche Transporte vor. Westlich der Nordfriesischen Küste verschwenken die Vektoren weit seewärts in nördliche Richtung. Es bildet sich eine linksdrehende Zirkulation im Bereich zwischen Wash und Doggerbank aus.

Bilanzierung

Die Analyse der Sedimenttransporte entlang von Querschnitten (Polgone) erlaubt die Quantifizierung der sich bewegenden Sedimentmassen. Eine Bilanzierung gibt Auskunft über die resultierenden Richtungen / Mengen. Eine detaillierte Dokumentation hierzu befindet sich im Anhang (Kapitel 8.3).

Satellitendaten

Der Vergleich der suspendierten Sedimenttransporte mit Satellitendaten wird ausführlich im Anhang (Kapitel 8.4) dokumentiert.

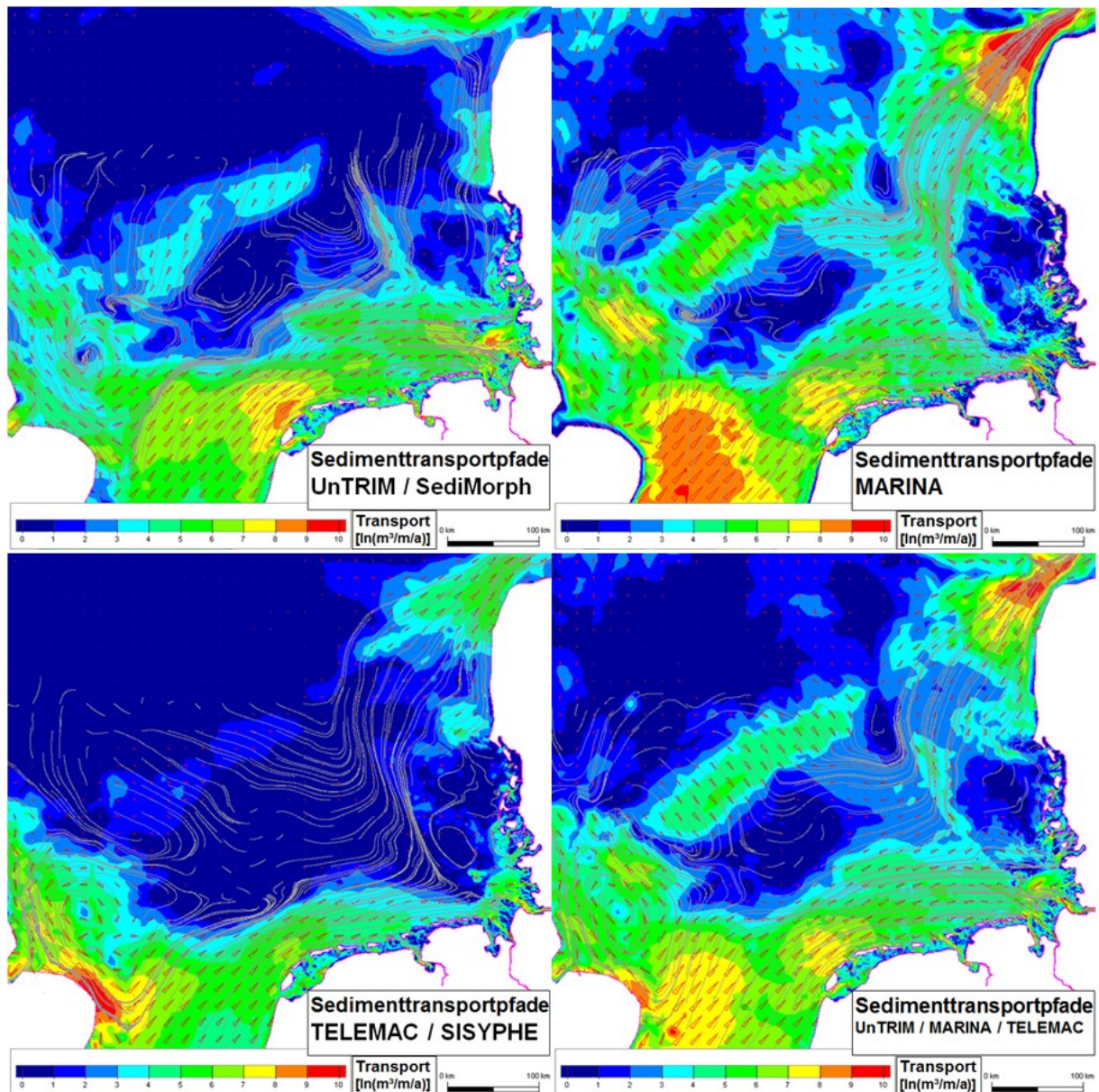


Abbildung 4-11: Sedimenttransportpfade aus Simulationen mit UnTRIM / MARINA / TELEMAC sowie als Mittel aus diesen Berechnungen

4.2.7 Morphodynamik

Morphodynamik ist die zeitliche Änderung der Höhenlage, des Sohlbaus und der Sohlformen des Gewässerbodens. Der Sohlbau lässt sich vereinfacht durch die Parameter Kornzusammensetzung und Porosität beschreiben. Als Sohlformen gelten beispielsweise Rippel und Dünen. Tektonische Veränderungen und Isostasie werden nicht betrachtet.

Morphodynamische Simulationsmodelle beschreiben die Veränderung der Lage des Gewässerbodens und die dazugehörigen Transportvorgänge. Zusätzlich liefern diese numerischen Modelle auch häufig Informationen über Veränderungen der Zusammensetzung und Ausprägung des Gewässerbodens. Die Beurteilung der Güte der (morphodynamischen) Modelle, das heißt der Grad der Übereinstimmung der berechneten Ergebnisse mit den Prozessen in der Natur, wird anhand von Vergleichen mit Naturmessungen erbracht und ist immer abhängig von der Problemstellung, zu deren Beantwortung diese herangezogen werden sollen. Dieser Prozess der Modellvalidierung ist der letzte Schritt im Prozess des Modellaufbaus.

Die morphologischen Veränderungen des Gewässerbodens werden im Wesentlichen durch die hydrodynamischen Kräfte auf den Boden verursacht. Aus diesem Grunde wird eine stufenweise Validierung der Modelle, beginnend bei der Analyse der meteorologischen Randwerte über die hydrodynamischen Modellkomponenten bis hin zu den Transport- und Umlagerungsprozessen der eigentlichen morphodynamischen Modellkomponenten durchgeführt.

Wie bei allen Validierungsuntersuchungen wird die Naturähnlichkeit bzw. die Diskrepanz zwischen Modell und Messung dargestellt, um die Ergebnisse hinsichtlich der Belastbarkeit besser einschätzen zu können. Dabei muss beachtet werden, dass die zur Validierung herangezogenen Messungen ebenfalls eine gewisse Unsicherheit aufweisen, die es im Vergleich zu berücksichtigen gilt.

Bei einigen integrativen Parametern (z. B. Transportmengen über Profile oder Depositionsflächen) ist eine Validierung mangels gemessener Vergleichsdaten nicht möglich. Hier kann nur mit einer Plausibilisierung oder mit einem Multi-Modell-Ansatz gearbeitet werden. Erstere um zu sehen, ob das Modell bestimmte Phänomene ebenfalls simulieren kann, letztere um überhaupt eine Größenordnung plus Spannweite beispielsweise eines Transportes zu bekommen. Durch regelmäßige Vermessungen des Gewässerbodens in Verbindung mit geeigneten räumlichen und zeitlichen Interpolationsverfahren lassen sich volumetrische Veränderungen recht gut bestimmen. Wesentlich bei diesen Analysen sind sowohl die räumliche als auch die zeitliche Auflösung der Vermessungsdaten.

4.2.8 Volumenbilanz

Der wichtigste Validierungsparameter der morphodynamischen Simulation ist die Wassertiefe. Da in den digitalen Geländemodellen und der simulierten Sedimentbelegung lokal große Fehler auftreten können, wird auf eine integrative Auswertung der Tiefe ausgewichen. Hier eignen sich Volumenbilanzen für bestimmte Bereiche. Diese Bereiche können weiter untergliedert werden, um differenziertere Aussagen ableiten zu können.

Alle Modelle liefern in ihren Ausgabeformaten Tiefeninformationen auf den Netzknoten. Bei Finite Elemente-Verfahren (MARINA und TELEMAC / SISYPHE) werden ebenfalls intern die Tiefeninformationen auf den Knoten abgelegt, so dass die Daten in den Ausgabedateien den originären Daten des Modells entsprechen. Bei UnTRIM / SediMorph (Finite Differenzen / Finite Volumen Modell) ist die Tiefeninformation dem Polygonzentrum zugeordnet. Die Tiefeninformation entspricht damit der sog. Elementtiefe, definiert für das Zentrum der Gitternetzzele. Diese Information wird über Flächenanteile gewichtet auf die Netzknoten interpoliert – die Originalinformation steht damit nicht mehr zur Verfügung und kann auch nicht mehr hergestellt werden. DELFT3D (Finite Differenzen Modell) hält ebenfalls originär die Information in der Zellenmitte vor; auf diese Information kann auch zugegriffen werden. Die Ansatzfunktionen unterscheiden sich ebenfalls: bei den Finite Element-Methoden sind sie linear, während sie bei UnTRIM/SediMorph und DELFT3D konstant sind.

Primär sind nicht die Tiefen, sondern die Tiefenänderungen bzw. die daraus abgeleiteten Volumenänderungen von Interesse. Die Tiefenänderungen erhält man durch Differenzbildung von den Tiefen an zwei Zeitpunkten. Die Tiefenänderungen nahe Null sind sehr unsicher und liegen im Rauschen, es sollen nur deutliche Signale miteinander verglichen werden. Dazu wurde ein Schwellwert (*Threshold*) eingeführt. Nur Werte, die über diesem Schwellwert liegen, werden berücksichtigt, alle anderen Werte werden zu Null gesetzt und bleiben damit unberücksichtigt.

Um aus den Tiefeninformationen Volumeninformation zu errechnen, wird die den Knoten zugehörige Fläche benötigt. Es wurden jeweils zwei Methoden zur Flächenberechnung getestet und miteinander verglichen.

Voronoi:

Die Voronoi-Zerlegung der Fläche (auch bekannt als Thiessenpolygonzerlegung) lässt sich wie folgt beschreiben:

„Jede Region wird durch genau ein Zentrum bestimmt und umfasst alle Punkte des Raumes, die in Bezug zur euklidischen Metrik näher an dem Zentrum der Region liegen, als an jedem anderen Zentrum“ (Wikipedia, <http://de.wikipedia.org/wiki/Voronoi-Diagramm>).

Diese Zerlegung muss für ein Berechnungsnetz einmal durchgeführt werden. Nach der Berechnung der Tiefendifferenz aus zwei Zeitpunkten wird diese Differenz (wenn sie über dem Schwellwert liegt) mit den Voronoi-Flächen multipliziert. Das so erhaltene Differenzvolumen kann über die Gesamtfläche sowie über Teilflächen aufsummiert werden und stellt die Volumenbilanz der Fläche für die gewählte Zeitspanne dar.

Die Voronoi-Bilanzierung fand im Teilprojekt **AufMod-E** (smile) statt.

50 m-Raster:

Aus den Tiefeninformationen aus zwei Zeitpunkten wird die Differenztiefe berechnet und danach auf ein regelmäßiges 50-Meter-Raster linear interpoliert. Die Volumendifferenz errechnet sich durch Multiplikation der Differenztiefe mit der zugehörigen ($50\text{m} \times 50\text{m} = 2.500 \text{ m}^2$) Fläche, jedoch nur, wenn der Schwellwert der Differenztiefe überschritten wird. Auch hier kann durch Summation über alle Elemente oder Teilgebiete die Volumenbilanz für die gewählte Zeitspanne errechnet werden.

Die 50 m-Raster-Bilanzierung fand im Teilprojekt **AufMod-C** (BAW) statt.

Methodenvergleich:

Beide Methoden wurden auf die Ergebnisse unterschiedlicher Modellsimulationen angewendet. Es zeigt sich, dass beide Methoden sehr ähnliche Ergebnisse liefern (s. Abbildung 4-12). Schlechter wird der Vergleich bei kleineren Gebieten – hier werden die Voronoi-Flächen geschnitten und spiegeln eventuell nicht mehr genau die Abgrenzungen der Teilgebiete wieder. Dem könnte mit einer Neuberechnung der Voronoi-Flächen begegnet werden.

Eine generelle Aussage über die Richtigkeit oder Güte der Verfahren lässt sich nicht treffen, da keines der Modelle die für seine Ansatzfunktion und Speicherung der Daten richtige Volumenbilanz intrinsisch auszugeben vermag.

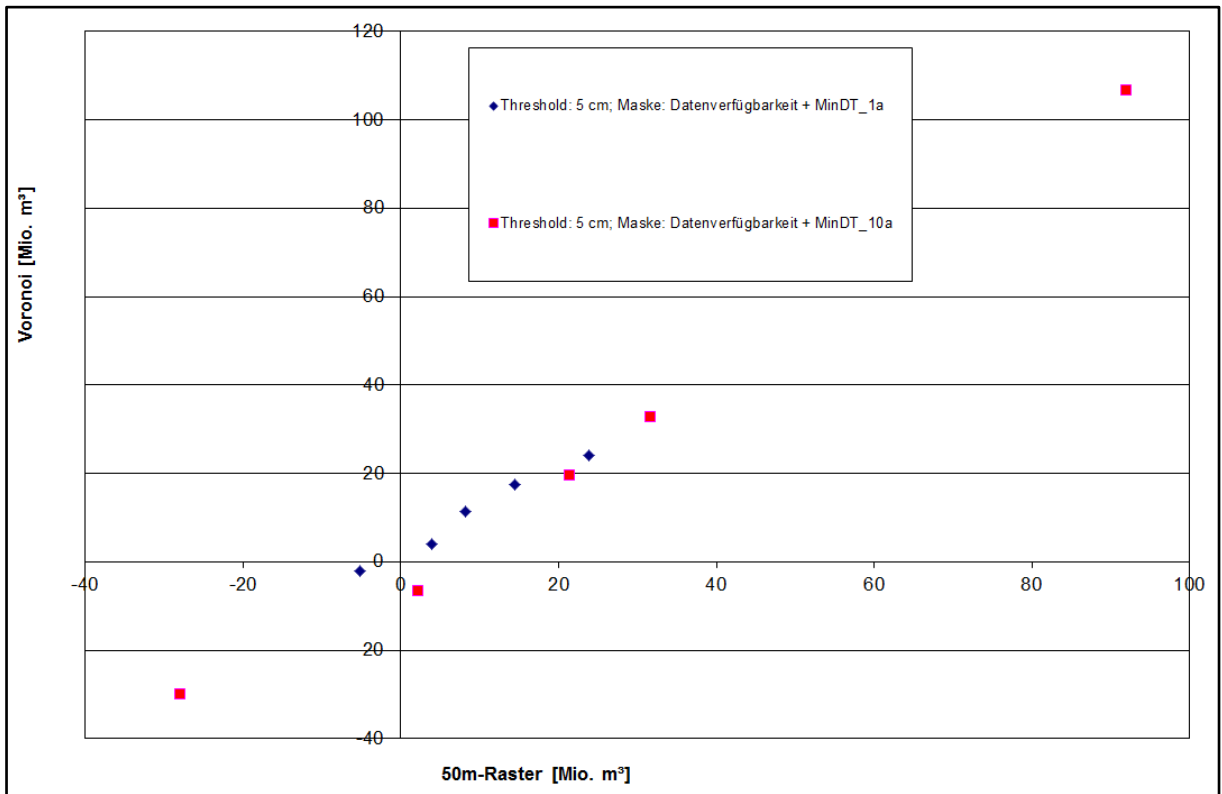


Abbildung 4-12: Vergleich der beiden Verfahren (Voronoi und 50m-Raster)

Die Tiefendifferenz wurde für das Kalenderjahr 2006 (1.1.2006 – 1.1.2007) aus allen Modellergebnissen errechnet, um damit die Volumenbilanz zu bestimmen. Da die Qualität der Peilungen und die Datenlage für Tiefen unterhalb von 20 m als unsicher eingeschätzt wird, wird nur auf die Daten des Küstenvorfeldes (< 20m Tiefe) zurückgegriffen. Ferner wird der Bereich durch zwei weitere Masken eingeschränkt: eine Maske beinhaltet die Validierungsdaten, die nicht weiter als ein Jahr von den Zeitpunkten 1.1.2006 / 1.1.2007 zurückliegen (Abbildung 4-13, links, Vertrauenwürdigkeit 1a), eine weitere Maske beinhaltet die Validierungsdaten, die nicht weiter als zehn Jahre von den Zeitpunkten 1.1.2006/7 zurückliegen ((Abbildung 4-13, rechts).

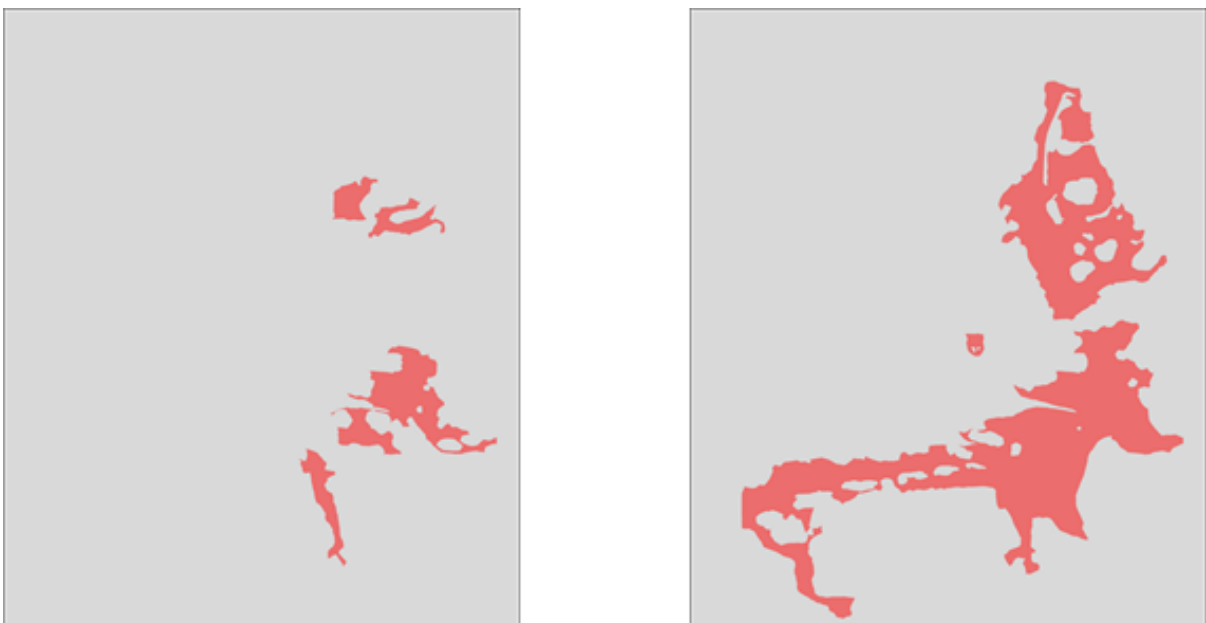


Abbildung 4-13: Flächen für die Bilanzanalyse (links: ca. 1450 km², rechts: ca. 7500 km²)

Die Ergebnisse der Volumenbilanzen sind in den folgenden Tabellen (Tabelle 4-3 und Tabelle 4-4) zu sehen. Als Zwischenschritt wurden noch Teilsummen nur jeweils für positive Volumen (Sedimentation) bzw. negative Volumen (Erosion) ermittelt. Der Schwellwert für die Differenztiefe beträgt 5 cm.

Tabelle 4-3: Volumenbilanzen der Modelle (Vertrauenswürdigkeit 10a)

Threshold: 5 cm			
Maske: Datenverfügbarkeit + MinDT 10a			
Modell	Volumen [Mio.m ³]		
	Sedimentation	Erosion	Bilanz
DASIMO (2007 Januar – 2006 Januar)	555.5	-524.0	31.5
DASIMO (2008 Juni – 1996 Juni)	3497.8	-2200.2	1297.6
DELFT3D (Basismodell) 2006	470.0	-455.3	14.8
MARINA 2006	456.0	-454.0	2.0
SediMorph (mdgm153a)	330.9	-380.3	-49.3
SediMorph (mdgm151)	152.5	-180.5	-28.0
SISYPHE 2006	288.8	-196.9	91.9

Tabelle 4-4: Volumenbilanzen der Modelle (Vertrauenswürdigkeit 1a)

Threshold: 5 cm			
Maske: Datenverfügbarkeit + MinDT 1a			
Modell	Volumen [Mio.m ³]		
	Sedimentation	Erosion	Bilanz
DASIMO (2007 Januar – 2006 Januar)	213.4	-198.9	14.5
DASIMO (2008 Juni – 1996 Juni)	1132.4	-833.5	298.9
DELFT3D (Basismodell) 2006	192.1	-174.6	17.5
MARINA 2006	167.7	-172.9	-5.2
SediMorph (mdgm153a)	117.9	-103.7	14.2
SediMorph (mdgm151)	56.0	-52.1	3.9
SISYPHE 2006	82.6	-74.4	8.2

Da es keinen direkten Vergleich mit modellintrinsischen Bilanzen gibt und davon ausgegangen werden kann, dass Fehler durch die Interpolation hinzugekommen sind, fällt eine Beurteilung sehr schwer. Es zeigte sich, dass die Ergebnisse der Simulationsmodelle selbst im Vorzeichen vom Referenzwert des Datenmodells (DASIMO, 2007 Januar – 2006 Januar) abwichen. Die Schwankungsbreite betrug maximal ca. 140 / 22.7 Mio. m³, was bei einer Fläche von 7500 / 1450 km² einer mittleren Höhe über das Gesamtgebiet von weniger als 5/4 cm (Porosität 40%) entspricht (Vertrauenswürdigkeit 10a/1a).

Histogramm der Bodenevolution:

Die Tiefenänderungen an den Knoten des Modellgitter können auch als Histogramm dargestellt werden (siehe Abbildung 4-14). Gut erkennbar in beiden Histogrammen ist eine leichte Unsymmetrie in Richtung Sedimentation. Das Histogramm der Bodenevolution des prozessbasierten Modells (MARINA) ist im Änderungsbereich von -25 cm bis 25 cm leicht höher als das datenbasierte Histogramm, was ein Hinweis auf ein morphologisches Einschwingen sein kann.

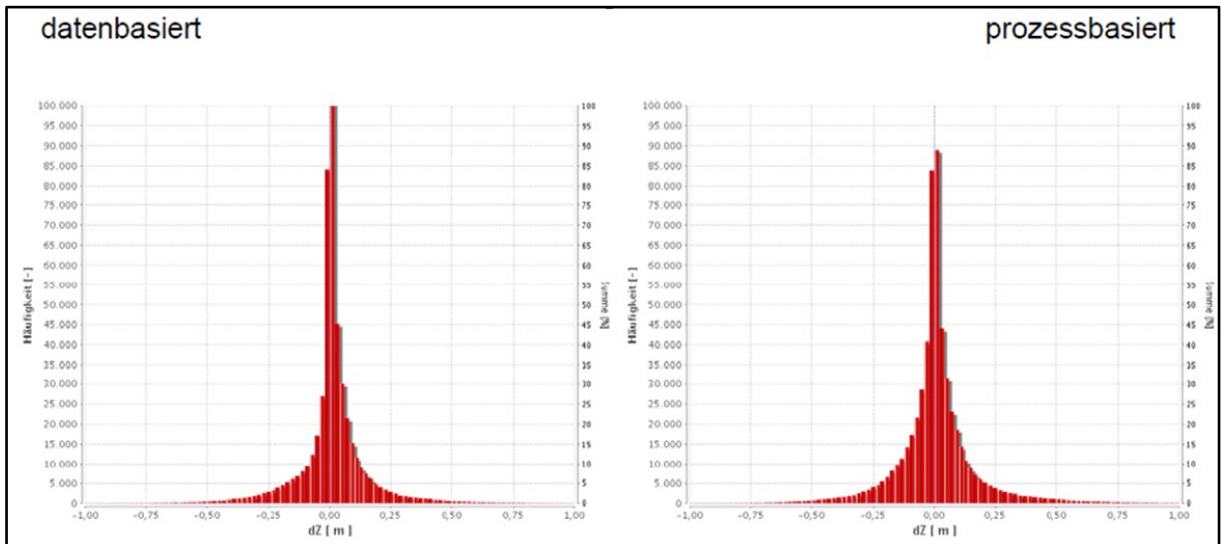


Abbildung 4-14: Histogramm der Bodenevolution des prozessbasierten Elbe-/Wesermodells (voll gekoppelt) 2006/2007

Beispiel Helgoländer Schlicklinse:

Die Volumenbilanzen der Simulation mit UnTrim und SediMorph für die Einzeljahre und die unterschiedlichen Simulationsarten (Tide, Tide und Wind, Tide, Wind und Seegang) zeigt die folgende Abbildung 4-15.

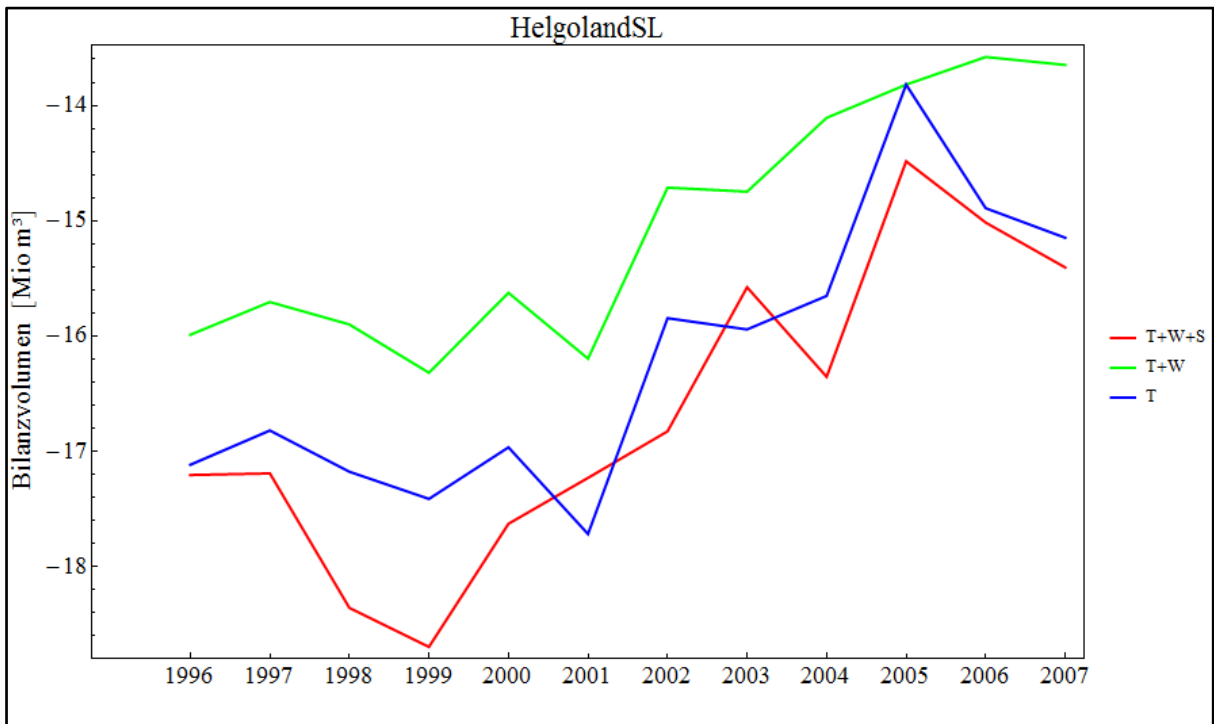


Abbildung 4-15: Bilanz des Bodenvolumens im Analysebereich der Helgoländer Schlicklinse

Für alle Simulationsarten und für alle Kalenderjahre liegt die Bilanz des Bodenvolumens im negativen Bereich: es findet Erosion im Modell SediMorph statt. Scheuerle (Scheuerle, 2004) schreibt, dass der Bereich der Helgoländer Schlicklinse in den letzten 750 Jahren zu einer stabilen Sedimentationszone gehört und Sedimentationsraten von ca. 1.6 mm/Jahr ausweist. Das Modell liefert in diesem Fall unplausible Ergebnisse: die Bodenschubspannung liegt so hoch, dass das dort vorhandene Material erodiert wird. Hier könnte eine Erweiterung der

Formulierungen – beispielsweise Einführung eines Mobilitätsparameters – zu besseren Ergebnissen führen.

4.2.9 Validierung des Langfristsimulationsmodells

Die Validierung des Langfristsimulationsmodells wurde für einen Zeitraum von einem Jahr für die Hydrodynamik und den Seegang durchgeführt. Für die Sedimentdynamik wurde eine längere Periode gewählt. Auf Basis von Daten des Funktionalen Bodenmodells wurde der Zeitraum 2006 bis 2012 zur Analyse herangezogen.

Hydromechanik

Das Simulationsmodell wurde für das Jahr 2006 kalibriert und am Beispiel des Jahres 2001 validiert. Die Simulationen wurden mit Tide, Wind, Fernwellen und Oberwassereinfluss sowie mit fester Sohle durchgeführt.

Die Sohlrauheit wurde aus dem mittleren Korndurchmesser auf Basis der aus dem Funktionalen Bodenmodell generierten Sedimentbelegung und einem globalen Rauigkeitsparameter von 0,0125 m, der durch die Kalibrierung ermittelt wurde, berechnet. Um den Eintrittszeitpunkt der Tide zu optimieren, wurde die Sohlage außerhalb der Deutschen Bucht modifiziert. In diesem Gebiet wurde die Sohlage mit einem Faktor von 1,1 multipliziert.

Für einen Vergleich der Simulationsergebnisse mit Messungen wurden 27 Datensätze von den im Projekt **AufMod** bereitgestellten Pegeldata ausgewählt. Der Schwerpunkt wurde hierbei auf die Pegel der Deutschen Bucht gelegt. Bei der Ergebnisanalyse muss beachtet werden, dass für die Pegel Hooksielplate, Mellumplate und Wangerooge-Nord keine Daten für den Zeitraum 2001 vorlagen.

Die Ergebnisse der Partialtidenanalyse wurden mit dem Matlab-Paket T Tide (Pawlowicz, et al., 2002) bearbeitet und sind für die Amplitude der M2-Gezeit in Abbildung 4-16 dargestellt. Für 2006 beträgt die mittlere absolute Abweichung (MAE) über alle Pegel 0,0412 m. Der geringste Fehler tritt am Pegel BakeA mit $3,9 \times 10^{-4}$ m auf. Die größte Differenz liegt am Pegel Cromer mit 0,18 m vor.

Ein ähnliches Bild ergibt sich für das Simulationsjahr 2001. Der MAE der M2-Amplitude liegt in derselben Größenordnung und beträgt 0,0479 m. Ebenso ist die minimale Abweichung mit $7,7 \times 10^{-4}$ m am Pegel Helgoland sehr gering. Der maximale Fehler tritt am Pegel St. Heller-Jersey auf, ist aber mit 0,29 m größer als im Vergleich zum Simulationsjahr 2006.

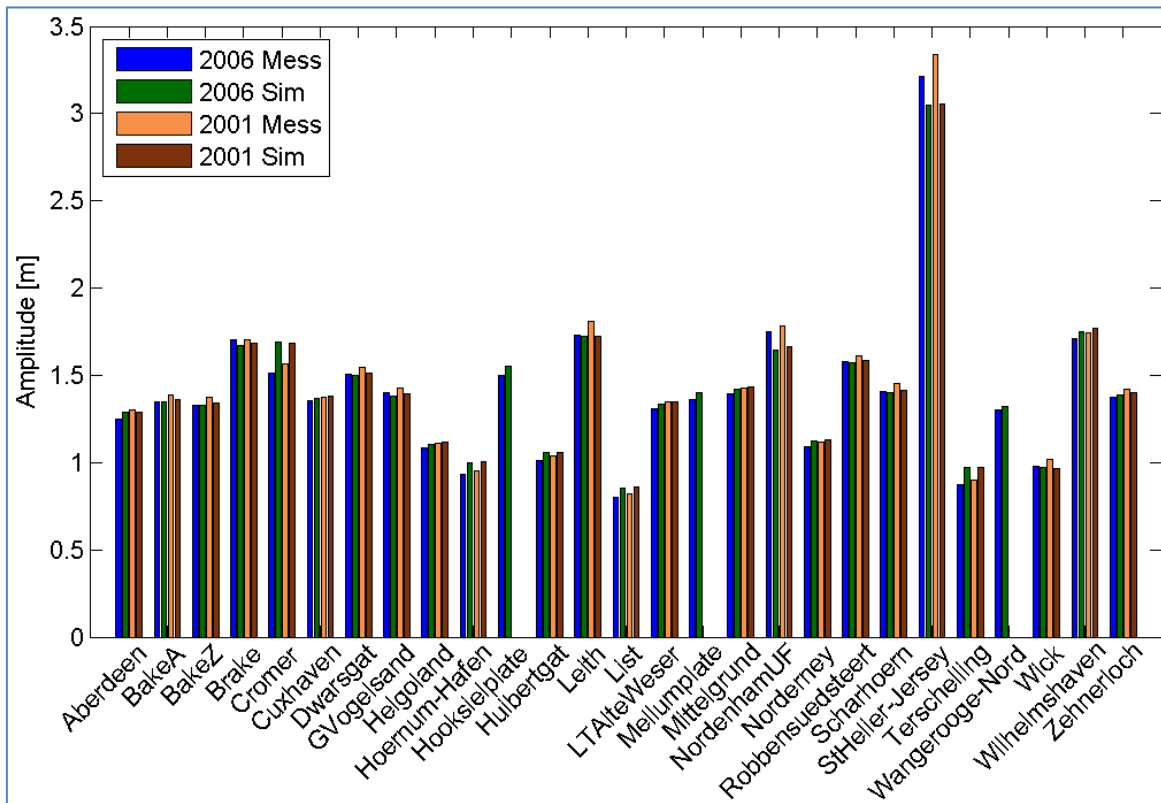


Abbildung 4-16: M2-Amplitude ausgewählter Pegel für die Nordsee und Vergleich mit TELEMAC-Simulation

Die statistischen Kennwerte zur Analyse der Wasserspiegellage sind in Tabelle 4-5 zusammengefasst und als Mittelwerte über alle Pegel sowie als Minimal- und Maximalwerte aufgeführt. Abbildung 4-17 zeigt stellvertretend den RMSE für die ausgewählten Pegel. Für das Jahr 2006 beträgt der RMSE 0.23 m mit einer Bandbreite von 0,17 m für den Pegel Huibertgat bis 0,46 m, der am Pegel St. Heller-Jersey zu verzeichnen ist. Der MAE liegt naturgemäß darunter und beträgt als Mittelwert aller Pegel 0,18 m. Die simulierte Wasserspiegellage liegt im Mittel um 0,05 m über der gemessenen; die Korrelation ist nahezu 1.

Tabelle 4-5: Zusammenfassung statistischer Kennwerte der Wasserspiegellage für die Jahre 2006 und 2001

Jahr	RMSE			MAE			Bias			Korrelation		
	Ø	min	max	Ø	min	max	Ø	min	max	Ø	min	max
2006	0.23	0.17	0.46	0.18	0.13	0.36	0.05	-0.17	0.17	0.983	0.969	0.989
2001	0.25	0.18	0.59	0.20	0.14	0.47	0.08	0.02	0.17	0.979	0.959	0.986

Der RMSE für das Jahr 2001 ist um 0.02 m geringfügig höher als 2006. Dagegen ist bei der größten Abweichung eine deutliche Zunahme auf 0.59 m zu verzeichnen. Auch der gemittelte MAE hat zugenommen und beträgt 0.20 m. Die Extremwerte unterscheiden sich aber nur wenig von denen des Jahres 2006. Dagegen liegt die simulierte Wasserspiegellage im Mittel systematisch über den Messungen und die Korrelation ist etwas geringer.

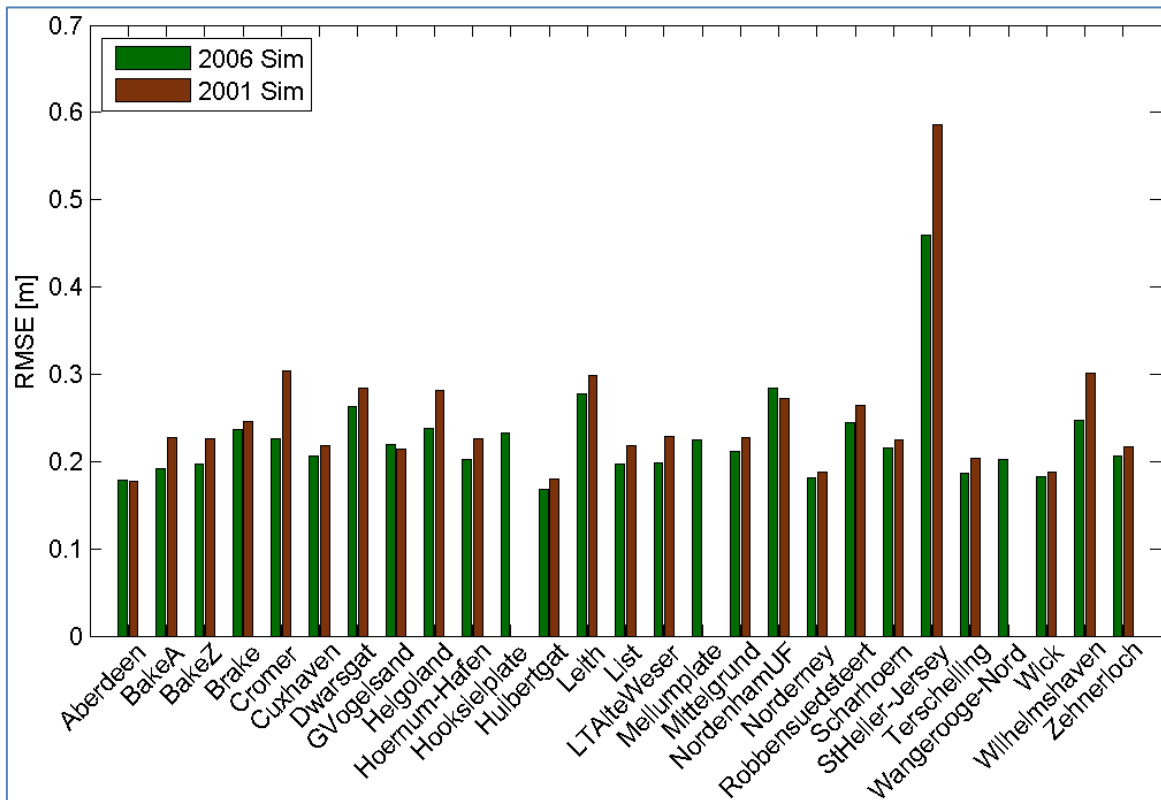


Abbildung 4-17: RMSE der Wasserspiegellage ausgewählter Pegel in der Nordsee

Seegang

Für die Validierung des spektralen Seegangmodells TOMAWAC standen Daten der Pegel Elbe, FINO_1 und Helgoland aus dem Jahr 2006 zur Verfügung. Sie wiesen allerdings teils beträchtliche Datenlücken auf.

In Abbildung 4-18 sind die Messungen und Simulationsergebnisse dargestellt. Der Verlauf der signifikanten Wellenhöhe H_s wird bei allen 3 Pegeln gut wiedergegeben. Der RMSE ist maximal 0,38 m am Pegel FINO_1, ebenso der MAE mit 0,29 m (vgl. Tabelle 4-6). Dieser Pegel weist allerdings die größten Datenlücken auf und ist damit weniger repräsentativ für das Jahr 2006 als die anderen beiden Pegel. Der Bias zeigt, dass die Wellenhöhe grundsätzlich unterschätzt wird, wobei aber die Korrelation nicht unter 0,89 fällt.

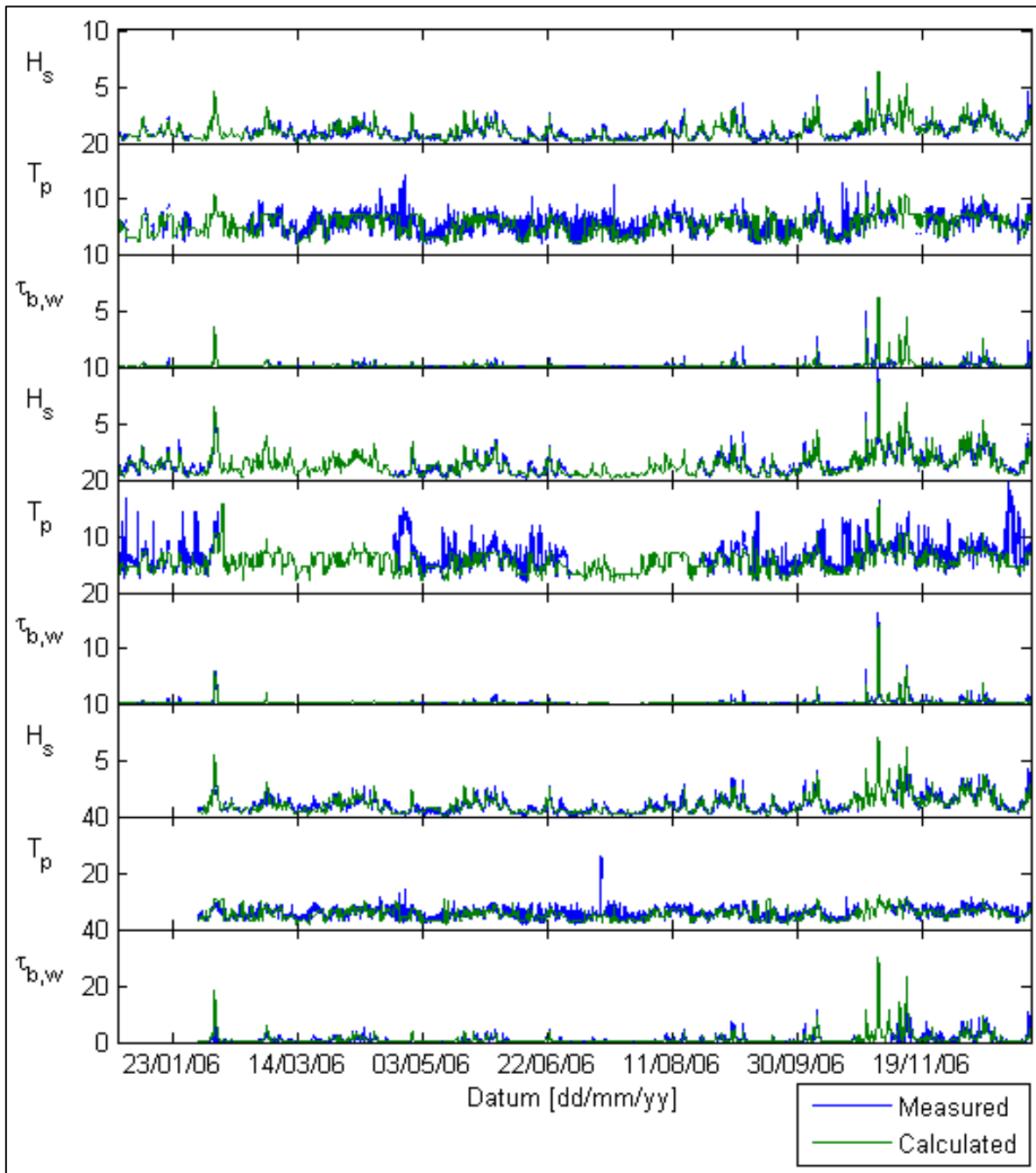


Abbildung 4-18: Vergleich gemessener zu simulierter signifikanter Wellenhöhe H_s [m], Peakperiode T_p [s] und der daraus berechneten Sohlschubspannung $\tau_{b,w}$ [N/m²]: oberen 3 Grafiken: Pegel Elbe; mittleren 3 Grafiken: Pegel FINO1; unteren 3 Grafiken: Helgoland

Tabelle 4-6: Statistische Kennwerte von Seegangparameter und der daraus berechneten Sohlschubspannung für das Jahr 2006 (Hel. = Helgoland)

Parameter	RMSE			MAE			Bias			Korrelation		
	Elbe	Fino	Hel.	Elbe	Fino	Hel.	Elbe	Fino	Hel.	Elbe	Fino	Hel.
H_s	0.32	0.38	0.35	0.21	0.29	0.24	-0.03	-0.05	-0.08	0.90	0.94	0.89
T_p	1.51	2.65	1.62	1.10	1.58	1.13	-0.34	-1.23	-0.45	0.63	0.39	0.61
$\tau_{b,w}$	0.18	0.31	0.97	0.06	0.13	0.44	-0.01	-0.06	-0.16	0.81	0.92	0.81

Die Übereinstimmung zwischen gemessener und simulierter Peakperiode fällt dagegen geringer aus. Der RMSE beträgt bis zu 2,65 s und die Wellenperiode wird deutlich unterschätzt. Das zeigt sich auch an der Korrelation. Sie fällt bis auf 0,39 am Pegel FINO 1 und auf ca. 0,6 bei den anderen beiden Pegeln ab.

Für die morphodynamische Simulation ist besonders die durch Wellen erzeugte Sohlschubspannung $\tau_{b,w}$ von Bedeutung. Abbildung 4-18 zeigt diese für die drei Pegel zusammen mit den gemessenen Seegangsparemtern und mit den durch TOMAWAC berechneten Seegangsgößen. Obwohl die Peakperiode deutlich unterschätzt wird, wird die Sohlschubspannung gut simuliert. Das unterstützen auch die statistischen Kennwerte in Tabelle 4-6. Auffällig sind allerdings die vergleichsweise hohen Werte für RMSE von 0,97 m und MAE von 0,44 m des Pegels Helgoland. Dies liegt an der größeren Bandbreite der Sohlschubspannung, die für diesen Pegel berechnet wurde. Da die Eingangsparemter bereits unterschätzt wurden, zeigt auch die simulierte Sohlschubspannung im Mittel diesen Trend.

Sedimentdynamik

Die Langfristsimulationen wurden auf dem Grobmodellgitternetz ausgeführt. Deshalb wurde die Validierung ebenfalls mit auf dieses Gitternetz volumentreu interpolierte Sohllagen durchgeführt. Sie wurden intern im Rahmen des Forschungsprojektes **AufMod** auf Basis des Funktionalen Bodenmodells (FBM) zur Verfügung gestellt. Aufgrund ständiger Ergänzungen der Datenbank des FBM kann es zu Abweichungen mit anderen Auswertungen im Rahmen von **AufMod** kommen. Als Maske für die großräumige Analyse wurde ein Gebiet gewählt, das bis zur 20 m-Tiefenlinie reicht und Teile der Ästuarare umfasst (vgl. Abbildung 4-18).

Für den Zeitraum von 2006 bis 2012 verzeichnet das FBM eine Volumenzunahme von $80,0 \times 10^6 \text{ m}^3$ (Tabelle 4-7). Das sedimentierte Volumen beträgt $1.144,8 \times 10^6 \text{ m}^3$ und erodiert wurden demnach $1.064,8 \times 10^6 \text{ m}^3$. Die mit TELEMAC simulierten Volumina folgen diesem Trend, fallen aber geringer aus. In der Bilanz ergibt sich eine Volumenzunahme von $21,0 \times 10^6 \text{ m}^3$. Das entspricht etwa einem Viertel des Wertes, der auf Basis der Daten des FBM ermittelt wurde. Die simulierten Volumina betragen für die Deposition $371,1 \times 10^6 \text{ m}^3$ und Erosion $350,1 \times 10^6 \text{ m}^3$. Sie sind somit etwa ein Drittel so hoch wie die des FBM.

Tabelle 4-7: Kennwerte zur Sedimentdynamik für den Zeitraum 2006 bis 2012

Modell	Volumen in Mio. m ³			Sohlländerung		
	Σ	Deposition	Erosion	\emptyset	min	max
FBM	80.0	1144.8	-1064.8	0.0061	-24.26	14.23
Telemac	21.0	371.1	-350.1	0.0016	-9.39	9.36

Die mittlere Sohlländerung beträgt simuliert 0,0016 m und ist somit geringer als die des FBM mit 0,0061 m. Die Minimal- und Maximalwerte stimmen tendenziell überein. Zu den Extremwerten des FBM muss angemerkt werden, dass sie durch den Bau des Jade-Weser-Ports hervorgerufen wurden. Berücksichtigt man das Großprojekt nicht, beträgt die maximale Sohlländerung nur noch etwa 8 m und die minimale Sohlländerung ca. -12 m.

Interessant für eine Prädiktion sind nicht nur quantitative Aussagen zu den Sedimentvolumina, sondern auch der zeitliche qualitative Verlauf. Dazu wurden für den Zeitraum 2006 bis 2012 jährliche Volumenanalysen durchgeführt und die Ergebnisse des FBM und der Simulation normiert. Um den simulierten Trend zu verdeutlichen, sind zusätzlich Simulationsergebnisse für weitere 7 Jahre bis 2019 hinzugezogen worden.

Abbildung 4-19 zeigt das Ergebnis dieser Auswertung. Die Verläufe sind im Prinzip ähnlich. Beim FBM könnte man annehmen, dass die Deposition am ehesten einer Wurzelfunktion entspricht, die einem Grenzwert entgegenstrebt. Gleiches, nur an der x-Achse gespiegelt, lässt sich für den Erosionsverlauf feststellen. Die Simulationsergebnisse lassen erahnen, dass auch hier ein Grenzwert angestrebt wird. Die Bilanz des FBM zeigt 2009 einen Knick und dann ein Abfallen des Sedimentvolumens. Die Simulationsergebnisse prädikieren dagegen eine generelle gleichmäßige Zunahme der Sedimentbilanz.

Diese Analyse kann nur einen Anhaltspunkt geben, da die Aussagekraft der Daten des FBM von den zugrunde liegenden Datensätzen abhängt. Es lässt sich aber festhalten, dass von 2006 bis 2012 eine Volumenzunahme vorliegt und diese auch vom Simulationsmodell wiedergegeben wird.

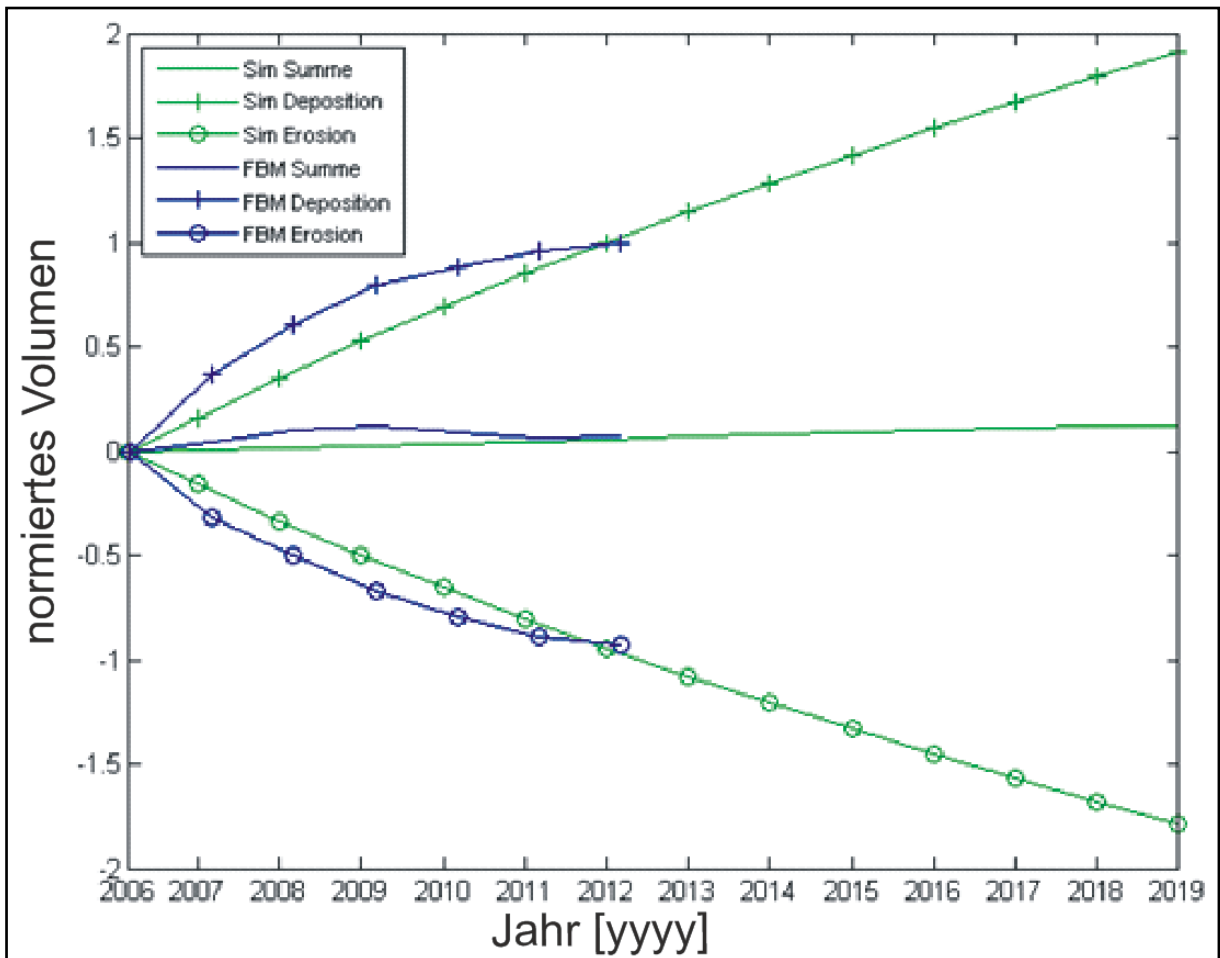


Abbildung 4-19: Vergleich der normierten Sedimentvolumina aus der Langfristsimulation mit denen des Funktionalen Bodenmodells (FBM)

4.3 Modellsystem UnTRIM/SediMorph/UnK

Die numerischen Modelluntersuchungen können drei Hauptthemen zugeordnet werden:

- **Sedimentologie:** Analyse der Sedimentologie der Deutschen Bucht im Hinblick auf die Wirkung der Hydrodynamik
- **Sedimenttransport:** Analyse der großräumigen Sedimentdynamik zur Abschätzung von Sedimenttransportmengen und -wegen
- **Morphodynamik:** Vergleich der berechneten Bodenumlagerungen mit Bathymetriemessungen und -analysen sowie Analyse der großräumigen Transport- und Formänderungsprozesse.
- Das Validierungsdokument für das Basismodell UnTRIM-SediMorph liegt als separater BAW Bericht vor (BAW, 2013)

4.3.1 Sedimentologie

4.3.1.1 Einführung

Eine Voraussetzung für die naturähnliche Simulation morphodynamischer Vorgänge in numerischen Modellen ist eine repräsentative anfängliche Korngrößenverteilung der Sedimente im Untersuchungsgebiet („Anfangskornverteilung“). Durch die Abhängigkeit des Sedimenttransports von der Korngröße bestimmt die Anfangskornverteilung maßgeblich die morphologische Reaktion des Systems (Hirschhäuser, et al., 1998). Im Rahmen von **AufMod** wurde die bereits vorhandene Beschreibung der Sedimentzusammensetzung der Deutschen Bucht nach Figge (Figge, 1981) ergänzt und als datenbasiertes Modell verfügbar gemacht. In dieser Untersuchung wird die gemessene Sedimentverteilung mit den Ergebnissen einer numerischen Modelluntersuchung verglichen, um die beobachteten Sedimentstrukturen besser erklärbar zu machen. Dazu werden zwei verschiedene Ansätze verfolgt.

Im ersten Ansatz wird versucht, die gemessene Sortierung des Sediments im Modell nachzubilden. Dazu wird in einer Systemstudie mit einem 3-dimensionalen hydrodynamischen Modell die Sortierung eines anfangs homogen verteilten Sediments berechnet. Im Idealfall können so die beobachteten Strukturen nachgebildet und einzelnen Prozessen zugewiesen werden. Dieser Ansatz wurde bereits von Hirschhäuser (Hirschhäuser, et al., 1998) genutzt, um ein geeignetes Sedimentinventar für numerische Modelluntersuchungen zu generieren.

Der zweite Ansatz geht von der gemessenen Sedimentverteilung aus und vergleicht die Erosionsstabilität auf Basis dieser Korngrößenverteilung mit der modellierten Sohlschubspannung. So kann die Stabilität der anstehenden Sedimente bewertet werden. Die Bedeutung der Sohlschubspannung als Antrieb des Suspensionstransportes wurde bereits von Stanev (Stanev, et al., 2009) für den Bereich der südlichen Nordsee untersucht. Hier konnte auf Basis von numerischen Modellergebnissen und Fernerkundungsdaten gezeigt werden, dass eine Korrelation von Bereichen hoher Suspensionskonzentration und der modellierten Sohlschubspannung besteht, was als Resuspension lokaler Sedimente interpretiert wurde.

4.3.1.2 Methodischer Ansatz

Das hydrodynamische Modellierungssystem UnTRIM 2007 wurde für die gesamte Nordsee aufgesetzt und mit dem Sedimenttransport und Morphodynamik Modul SediMorph als auch mit der unstrukturierten Variante des spektralen Seegangmodells (UnK-Modell) gekoppelt. Damit wird der Sedimenttransport durch tidegetriebene Strömung, windgetriebene Zirkulation als auch Seegangswirkung berücksichtigt. In dieser Systemstudie wurde das Modell mit idealisierten meteorologischen Bedingungen angetrieben, dazu wurde ein konstanter Wind aus Nordwest mit einer Windgeschwindigkeit von 12.5 m/s verwendet. So sollen repräsentative meteorologische Bedingungen ohne den Einfluss der Variabilität abgebildet werden.

4.3.1.3 Ergebnisse

4.3.1.3.1 Datenbasiertes Modell der Oberflächensedimentverteilung

Die Sedimentverteilung der Deutschen Bucht wurde als Median des Korndurchmessers (D_{50}) aus dem datenbasierten **AufMod**-Modell exportiert (vgl. Abbildung 4-20 a). Um eine Vergleichbarkeit von berechneten und gemessenen Daten zu erreichen, wurden die Messungen an den Stützstellen des Gitternetzes des numerischen Modells interpoliert und extrahiert (vgl. Abbildung 4-20 b).

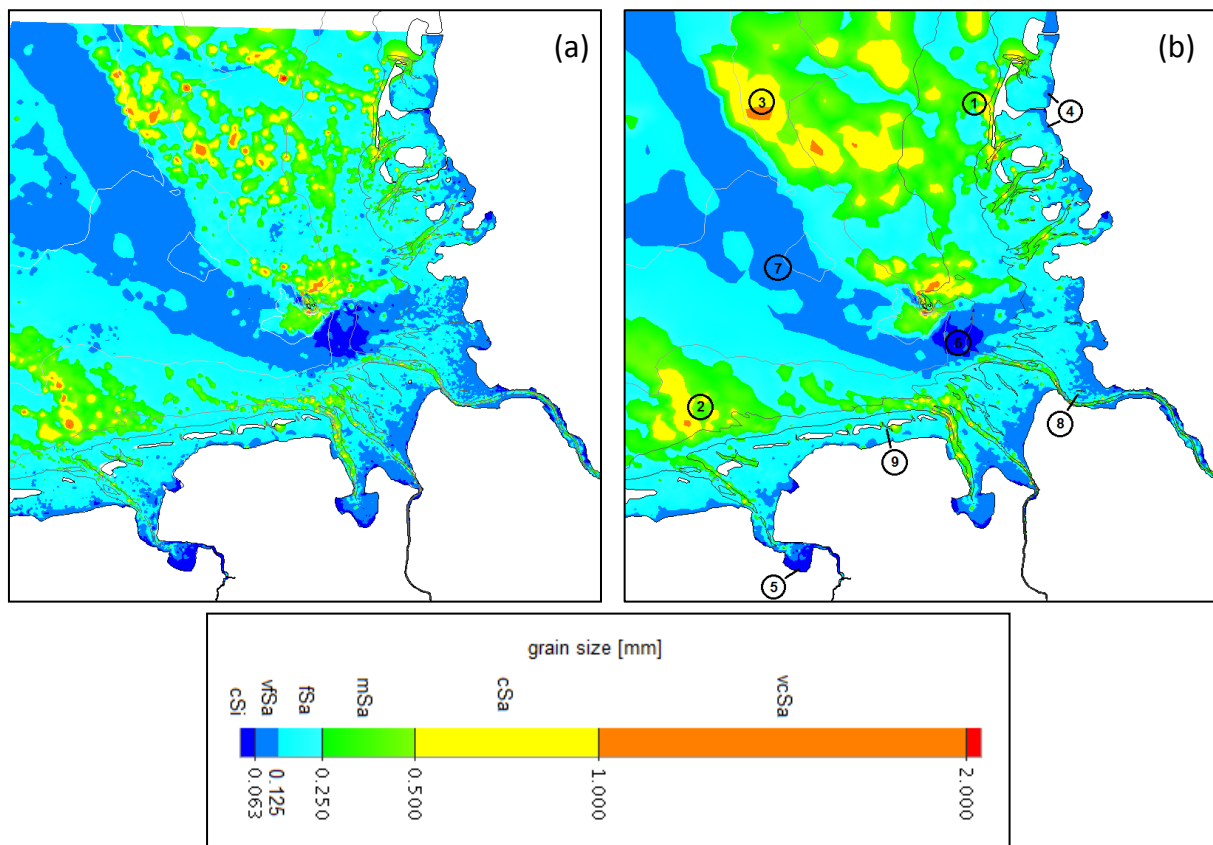


Abbildung 4-20: Gemessene Sedimentverteilung in der Deutschen Bucht als Median des Korndurchmessers (D_{50}) für a) das datenbasierte Modell und b) interpoliert auf das Berechnungsgitter des numerischen Modells. Die Ziffern kennzeichnen den Schelfbereich seewärts von Sylt (1), den Borkum Riffgrund (2), den westlichen Teil des nordfriesischen Schelfs (3), das Sylter Rückseitenwatt (4), das Ems-Ästuar (5), die Helgoländer Schlicklinse (6), das Elbeurstromtal (7), das Elbe-Ästuar (8) und das Seegatt Otzumer Balje zwischen Langeoog und Spiekeroog (9).

Die gemessene Sedimentverteilung wurde in dem Übersichtsartikel von (Zeiler, et al., 2008) beschrieben. Die heutige Sedimentverteilung resultiert aus der Sortierung holozäner Sedimente durch die angreifende Strömung und anstehende Pleistozäne Sedimente in Gebieten mit Sedimentmangel, die nicht durch holozäne Sedimente überdeckt sind. Die Sedimente bestehen im Wesentlichen aus gut sortierten Feinsanden sowie regional aus Mittelsanden im nordfriesischen Bereich, wie seeseitig der Insel Sylt (1) und im westlichen Bereich der ostfriesischen Inseln, dem Borkumer Riffgrund (2). Teilweise sind auch gröbere Sedimente an der Sohle zu finden, so stehen im westlichen Bereich des nordfriesischen Schelfs Kiesablagerungen an (3). Feinkörnigere Sedimente finden sich im Wattenmeer, z. B. im Sylter Rückseitenwatt (4), in den Ästuaren wie der Ems (5), im Bereich der Helgoländer Schlicklinse (6) und im Elbeurstromtal (7). In den Tiderinnen der Ästuar, wie im Elbeästuar (8) und in den Seegatten wie zwischen Langeoog und Spiekeroog (9) können grobkörnigere Sedimente gefunden werden.

4.3.1.3.2 Prozessbasierte Analyse der Oberflächensedimentverteilung

Für die Berechnung der Sortierung wurde der Sedimenttransport im numerischen Modell für eine Dauer von 30 Tagen berechnet. Dazu wurde als anfängliches Sedimentinventar eine mittlere Verteilung für die Deutsche Bucht auf Basis des **AufMod** Datensatz definiert. Die Kornverteilung wird durch eine Fraktionierung in 9 Kornklassen beschrieben, von denen vier als Geschiebe transportiert werden: sehr grober Sand (vcSa, Korndurchmesser 1,500 µm, Masseanteil an gesamt 0.3%), Grobsand (cSa, 750 µm, 2.9%), Mittelsand (mSa, 375 µm, 16.2%), Feinsand (fSa, 187.5 µm, 36.5%) und 5 Fraktionen, die in Suspension transportiert werden, sehr feiner Sand (vfSa, 94 µm, 25.9%), Grobschluff (cSi, 46.5 µm, 9.6%), Mittelschluff (mSi, 23.5 µm, 3.7%), Feinschluff (fSi, 12 µm, 3.3%), sehr feiner Schluff (vfSi, 6 µm, 1.6%). Diese Sedimente sind anfangs in einer 20 cm mächtigen Schicht homogen über die Deutsche Bucht verteilt und werden dann durch die Wirkung von Tide, Wind und Seegang transportiert. Daraus ergibt sich am Ende der Simulation eine räumlich differenzierte Verteilung des Sediments (Abbildung 4-21).

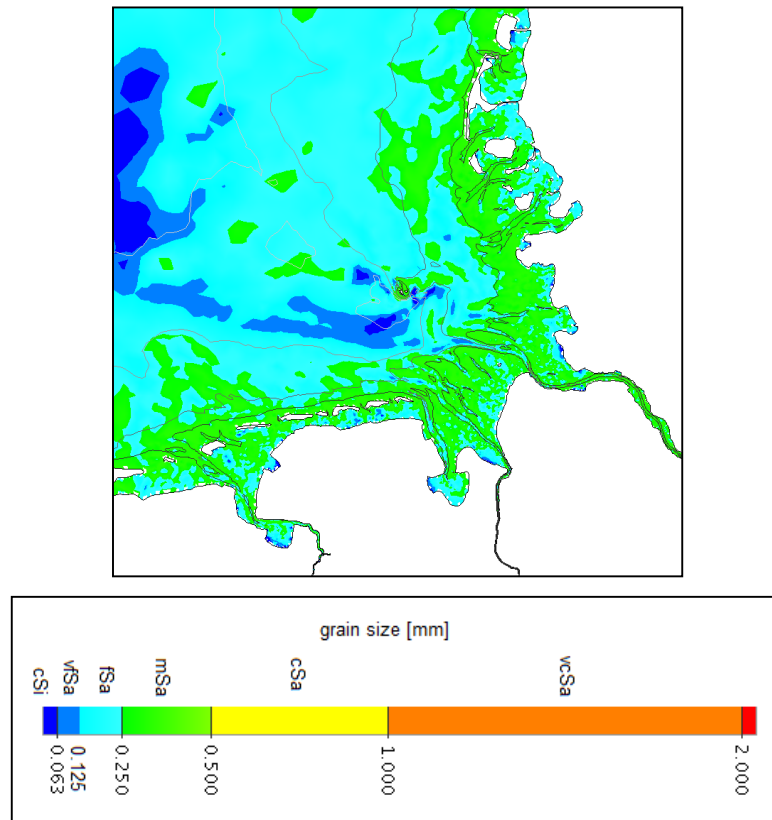


Abbildung 4-21: Berechneter D_{50} nach 30 Tagen Simulationszeit

Die berechnete Sedimentverteilung (Abbildung 4-21) reproduziert im Vergleich mit der gemessenen Sedimentverteilung (Abbildung 4-20) einige charakteristische sedimentologische Merkmale. Die typische Akkumulation von Feinsedimenten im Bereich des Rückseitenwatts der nordfriesischen Inseln (4), in den Ästuaren (5) und im Bereich des Elbeurstromtals (7) konnte erfasst werden. Die Verteilung der grobkörnigen Sedimente kann vom Modell nur teilweise erfasst werden, wie zum Beispiel für den Bereich des Borkumer Riffgrundes (2). Der großräumige Bereich grobkörniger Sedimente im nordfriesischen Schelfbereich wird nicht wiedergegeben. Einige markante kleinskalige Phänomene, wie der Bereich grober Sedimente seewärts von Sylt (1), scheinen jedoch eng mit dem hydrodynamischen Antrieb verknüpft zu sein. Die gröberen Sedimente im Bereich der Tiderinnen in den Ästuaren (8) und Seegatten (9) bilden sich tendenziell in den Modellergebnissen ab, werden jedoch von der Größenordnung her unterschätzt. Der Bereich verstärkter Ansammlung von Feinsedimenten südöstlich von Helgoland („Helgoländer Schlicklinse“) kann ebenfalls in den Modellergebnissen identifiziert werden.

Die Erosionsstabilität von Sedimenten kann durch den Vergleich von an der Sohle wirksamer und kritischer Sohlschubspannung τ_c abgeschätzt werden. Die kritische Sohlschubspannung kann z. B. nach Soulsby (Soulsby, 1997) abgeschätzt werden als:

$$\tau_c = g(\rho_s - \rho_w)D \frac{0.30}{1 + 1.2 D_*} + 0.055[1 - e^{-0.020 D_*}]$$

mit der Dichte des Wassers ρ_w , der Dichte des Sediments ρ_s , der dimensionslosen Form des Korndurchmessers D_* und dem Korndurchmesser D . Für typische Werte der Dichte des Wassers und des Sediments ist die Beziehung τ_c/D in Abbildung 4-22 dargestellt.

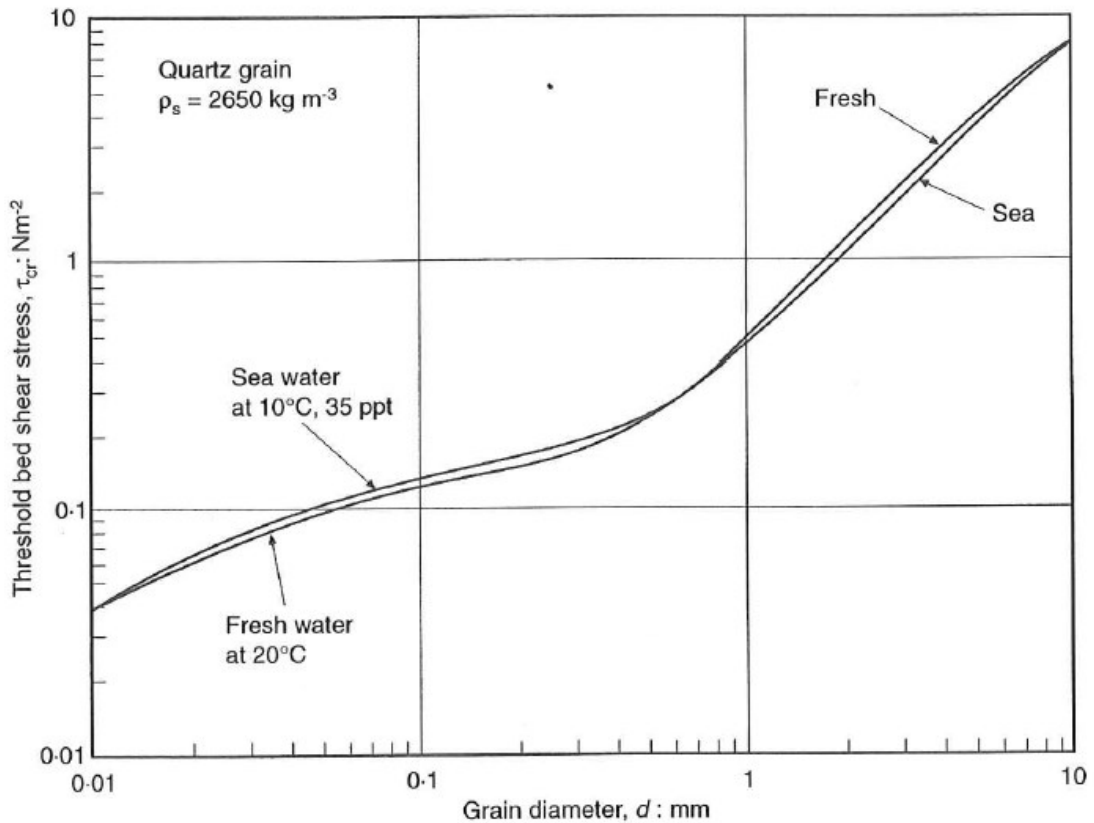


Abbildung 4-22: Kritische Sohlschubspannung nach Soulsby (Soulsby, 1997)

Dieser Ansatz wurde hier invertiert, das heißt auf Basis der berechneten Sohlschubspannung wurde diejenige Sedimentverteilung bestimmt, die noch stabil ist. Dazu wurde auf Basis der 95% Perzentilen der berechneten Sohlschubspannungen der Grenzwert des noch stabilen Korndurchmessers abgeleitet, der hier als D_{95} definiert wurde. Auf Basis der mittleren Sedimentverteilung in der Deutschen Bucht wurde dieser D_{95} in einen D_{50} umgerechnet. Das Ergebnis (Abbildung 4-23) stellt eine idealisierte Kornverteilung im Gleichgewicht mit der hydrodynamischen Belastung dar.

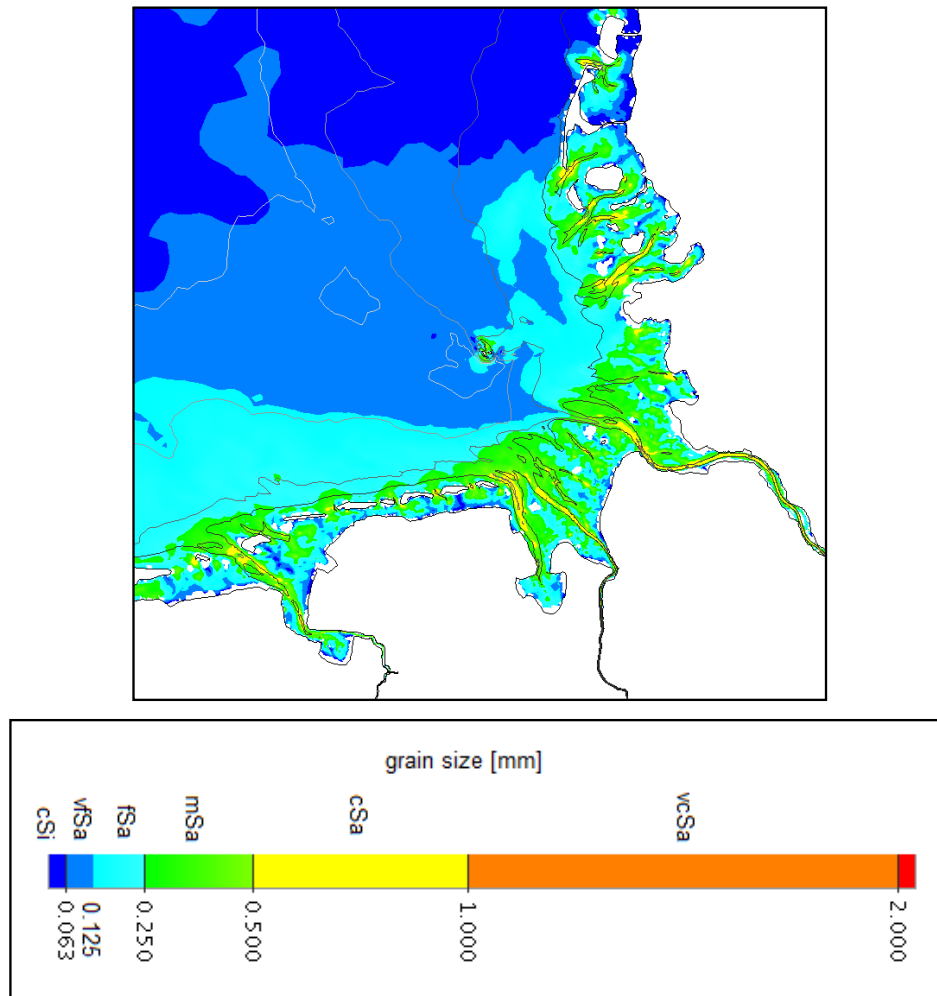


Abbildung 4-23: Idealisierte Kornverteilung (D_{50}) auf Basis der hydrodynamischen Belastung

Es zeigen sich klar die Gebiete lokaler hoher Sohlbelastung wie Tiderinnen.

4.3.1.4 Diskussion

Die gemessene Sedimentverteilung in der Deutschen Bucht ist in geologischen Zeitskalen (Größenordnung mehrere 1.000 Jahre) entstanden und bildet die Sedimenttransporte über das gesamte Holozän ab.

Die Belastung der Sohle prägt sich auf die Kornzusammensetzung durch – falls die Sohl-schubspannung zur Mobilisierung der Sedimente ausreicht. Für gut sortierte Sedimente wird es, abhängig von der Sohlbelastung zu Umlagerungen kommen, ohne dass diese in der Kornzusammensetzung zu erkennen wären.

Für die Deutsche Bucht lassen sich aus den Ergebnissen die folgenden grundsätzlich verschiedenen Bereiche ablesen:

- Gebiete mit sehr groben Sedimenten, wie zum Beispiel die glazialen Relikte im Bereich des nordfriesischen Schelfs (Pleistozäne Sedimente), die unter der heutigen hydrodynamischen Sohlbelastung nicht mehr mobil sind.
- Tiderinnen
- Ostfriesische Inseln weisen eine enge Verbindung mit heutiger Hydrodynamik auf

Es zeigt sich also, dass die Sedimentbeschaffenheit der Deutschen Bucht als eine Mixtur aus der geologischen Vergangenheit und als Resultat der heutigen hydrodynamischen Belastung verstanden werden kann.

4.3.2 Sedimenttransport

4.3.2.1 Einführung

Eine synoptische Abschätzung der großräumigen Sedimenttransporte auf Basis von Naturmessungen ist mit den bis heute verfügbaren Messmethoden nicht zu leisten. Gemessene Sedimenttransporte beschränken sich daher auf kleinräumigere Untersuchungsgebiete, wie einzelne Rinnen und Abschnitte von Ästuaren.

Um dennoch Aussagen über Sedimenttransporte auf jährlichen Zeitskalen zu bekommen, können Messungen mit numerischen Modelluntersuchungen kombiniert werden. So schätzen (Puls, et al., 1997) im Rahmen des TUVAS Projekts auf Basis von Naturmessungen und numerischen Modelluntersuchungen für den Transport von Feinsedimente ($<20\ \mu\text{m}$) in der Deutschen Bucht einen Eintrag von $29.9\ \text{Mt/a}$ und einen Austrag von $27.3\ \text{Mt/a}$ ab, also eine Nettodeposition von ca. $2.6\ \text{Mt/a}$.

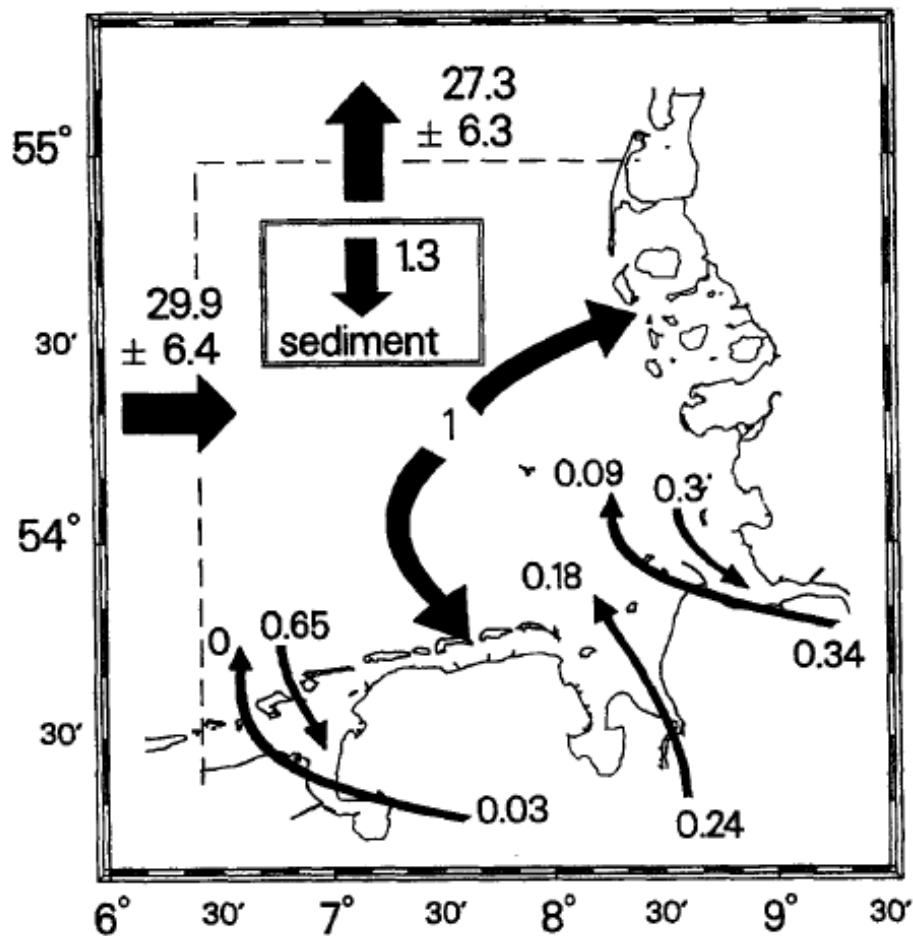


Abbildung 4-24: Transport von suspendierten Sedimenten ($<20\ \mu\text{m}$) in der Deutschen Bucht auf Basis von Modelluntersuchungen für die Jahre 1990-1991 (Puls, et al., 1997)

Für längere Zeitskalen können auch geologische Ansätze genutzt werden, die auf Basis der Sedimentbeschaffenheit und Ausbildung der Sohlformen großräumige Transporte zumindest qualitativ abschätzen. Bei der Untersuchung zur Mächtigkeit der mobilen Sande in der Deutschen Bucht wurde (Zeiler, et al., 2000) so ein konzeptionelles Modell der großräumigen Geschiebetransporte entwickelt (Abbildung 4-25). Dies zeigt für den Bereich der inneren Deutschen Bucht eine Konvergenzzone des Geschiebetransportes an. Es ist also zu erwarten, dass sich bei einer Bilanzierung über diesen Bereich eine Netto Deposition der sandigen Fraktionen ergibt, so wie es in den Untersuchungen von Puls, et al. (Puls, et al., 1997) für den Suspensionstransport der Feinsedimente <20 µm gezeigt wurde.

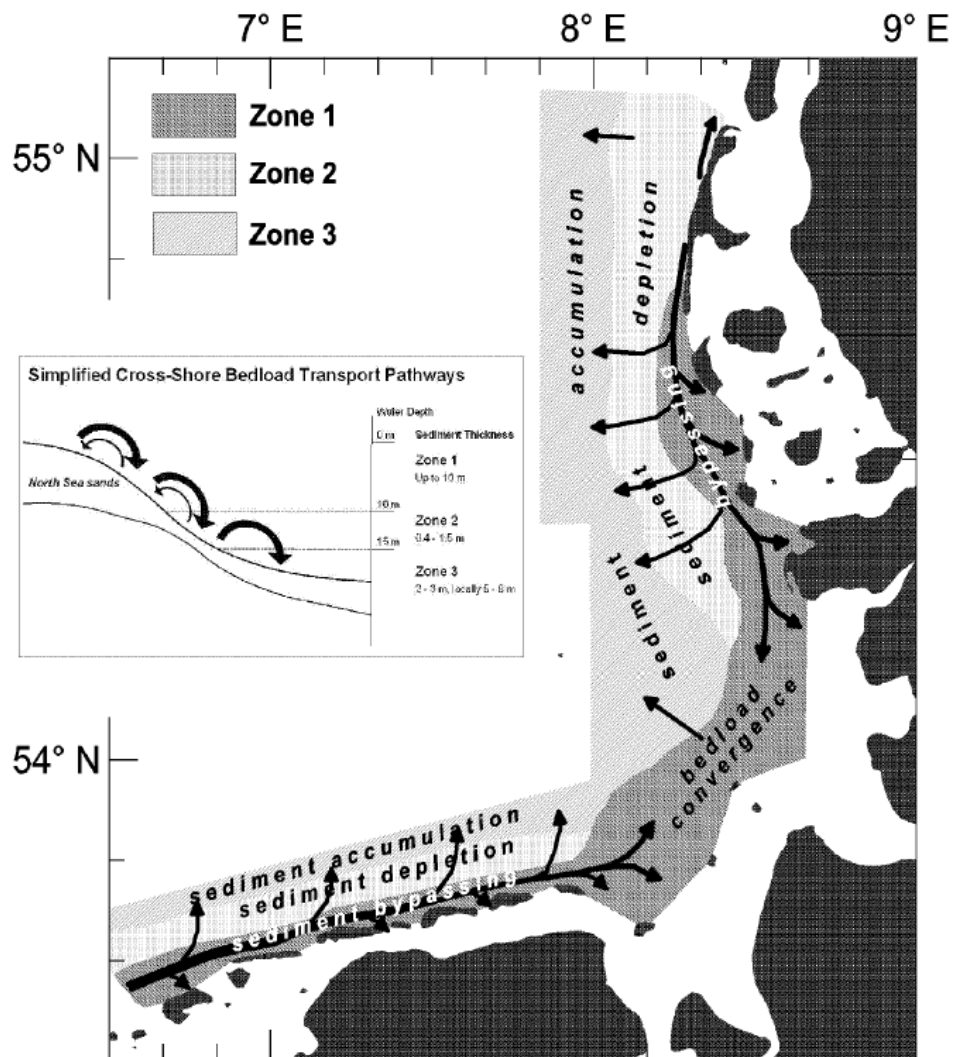


Abbildung 4-25: Schematisches Modell des Geschiebetransportes in der Deutschen Bucht

Die unterschiedlichen kleinräumigen Untersuchungen erlauben zwar keine synoptische Abschätzung der Sedimenttransporte, diese können jedoch zusammengefasst genutzt werden, um konzeptionelle Modelle wie das von (Zeiler, et al., 2000) zu vervollständigen. Eine Übersicht der vorhandenen Messungen wird z. B. in Gerritsen, et al. ((Gerritsen, et al., 2000) und (Gerritsen, et al., 2001)) gegeben. Die darin enthaltenen Angaben sind in Abbildung 4-26 zusammen mit Abschätzungen für die Ästuare auf Basis unveröffentlichter BAW Daten und der Abschätzung von Puls (Puls, et al., 1997) dargestellt.

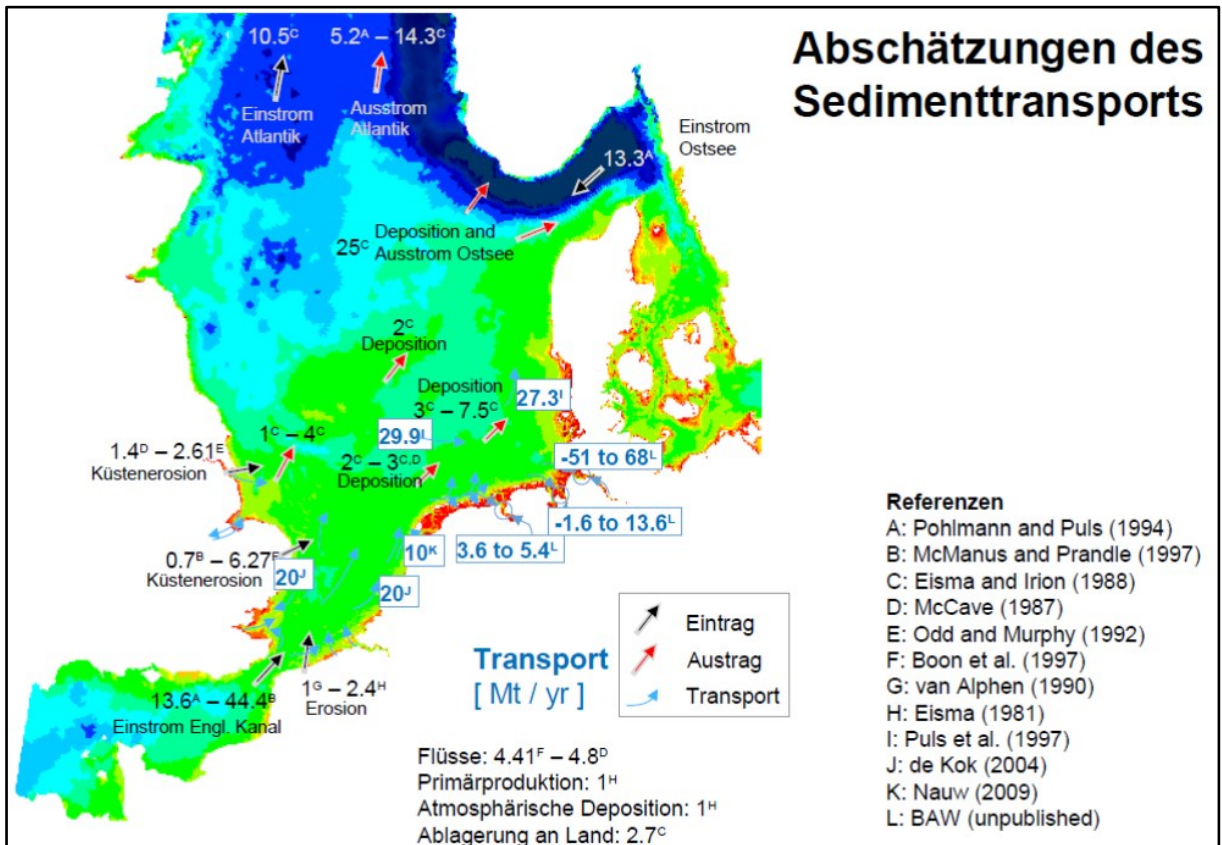


Abbildung 4-26: Abschätzung des Sedimenttransports in Mt/a auf Basis veröffentlichter Daten

In diesem Abschnitt wird der Sedimenttransport für die Deutsche Bucht auf Basis prozessbasierter Modelluntersuchungen bilanziert und die zwischenjährliche Variabilität abgeschätzt.

4.3.2.2 Methodischer Ansatz

Das vorab beschriebene Modellverfahren UnTRIM – SediMorph – UnK wurde zur Berechnung des fraktionierten Sedimenttransportes eingesetzt.

4.3.2.3 Ergebnisse

4.3.2.3.1 Prozessbasierte Modellierung des Sedimenttransports in der Deutschen Bucht

Der tiefenintegrierte Sedimenttransport von Suspensions- und Geschiebefracht wurde für die Jahre 1996 – 2007 jeweils auf der zugehörigen Jahrestopographie berechnet.

Der mittlere, tiefenintegrierte Transport von Sedimenten in der Deutschen Bucht ist für das Jahr 2006 in Abbildung 4-27 für den Transport von Geschiebe und in Suspension dargestellt.

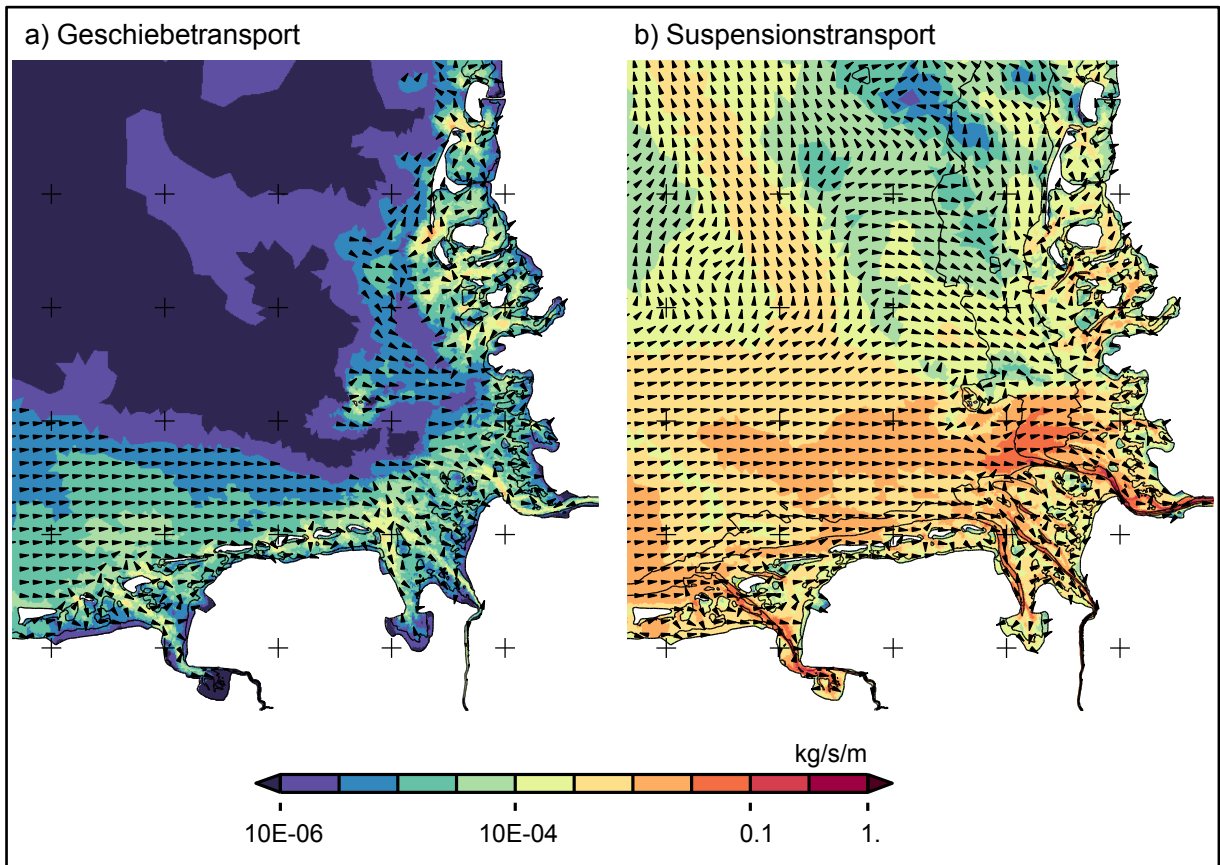


Abbildung 4-27: Sedimenttransport in der Deutschen Bucht aufgeteilt in a) Geschiebetransport und b) Suspensionstransport für das Jahr 2006 (logarithmische Skalierung)

Die räumliche Struktur des Suspensionstransports (Feinsand und feinere Fraktionen) zeigt einen Transport entlang der ostfriesischen Inseln in die Innere Deutsche Bucht. Das in diesen Bereichen transportierte Material verbleibt im Wesentlichen hier. Nur im tieferen Bereich (Wassertiefe $\gg 20$ m) verzweigt der Sedimenttransport westlich von Helgoland nordwärts.

Die räumliche Struktur des Geschiebetransportes (Mittelsand und gröber Fraktionen) entspricht im Wesentlichen dem Suspensionstransport. Es zeigt sich ein klarer Küstenlängstransport vor den ostfriesischen Inseln. Im nordfriesischen Bereich zeigen sich fast keine durchgehenden Sedimenttransportbänder. Signifikant ist hier nur der Transport in den Tiderinnen. Der Geschiebetransport ist fast flächendeckend um mehr als eine Größenordnung geringer als der Suspensionstransport.

Die Abhängigkeit des großräumigen Sedimenttransportes von der Wirkung des Windfelds auf Strömung und Seegang wird durch den Vergleich der Jahre 1998 (windreich) und 2006 (windarm) untersucht.

Der Vergleich des mittleren, tiefenintegrierten Suspensionstransports für die Jahre 1998 und 2006 (Abbildung 4-28) und des mittleren Geschiebetransports (Abbildung 4-29) zeigt keine signifikanten großräumigen Unterschiede in der räumlichen Struktur der Sedimenttransportpfade zwischen den beiden Jahren. Für das windreiche Jahr 1998 ist die Menge des transportierten Materials jedoch höher als im windarmen Jahr 2006.

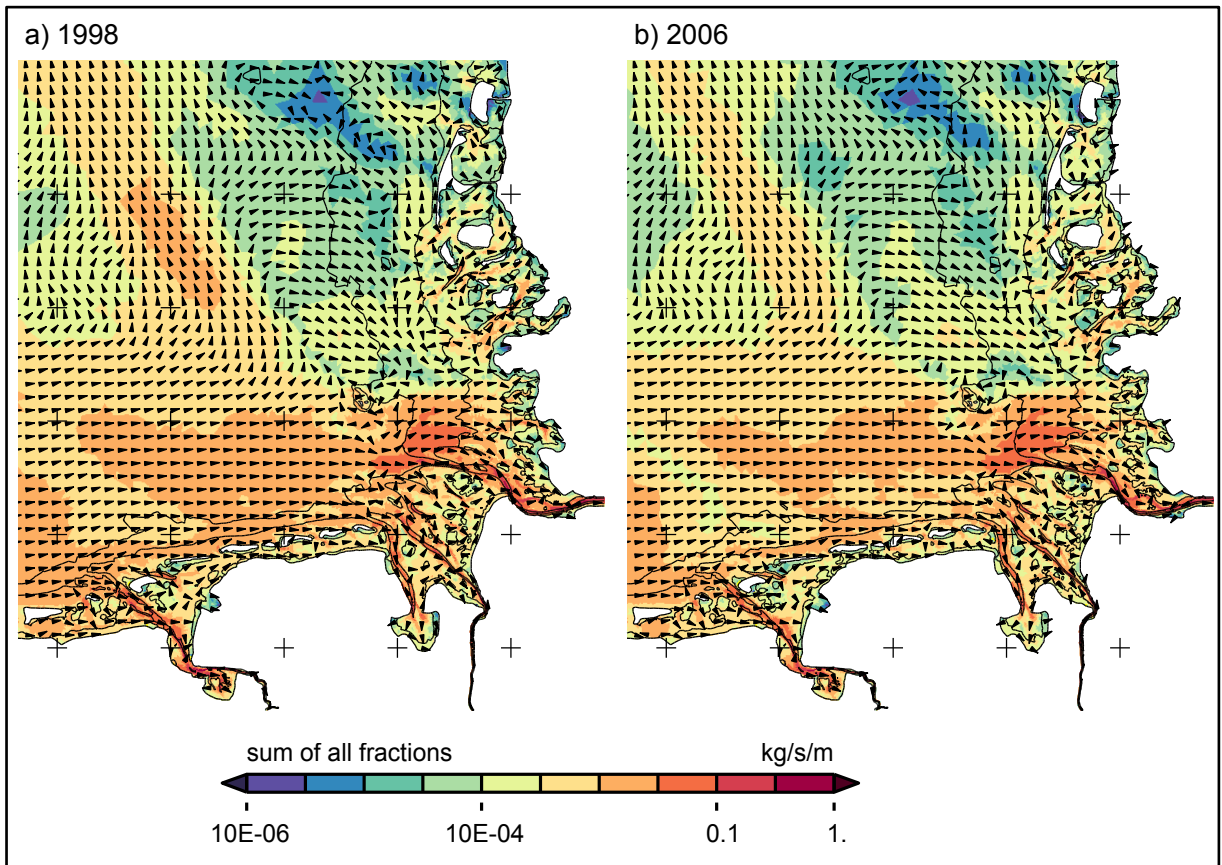


Abbildung 4-28: Mittlerer Suspensionstransport für 1998 / 2006 (logarithmische Skalierung)

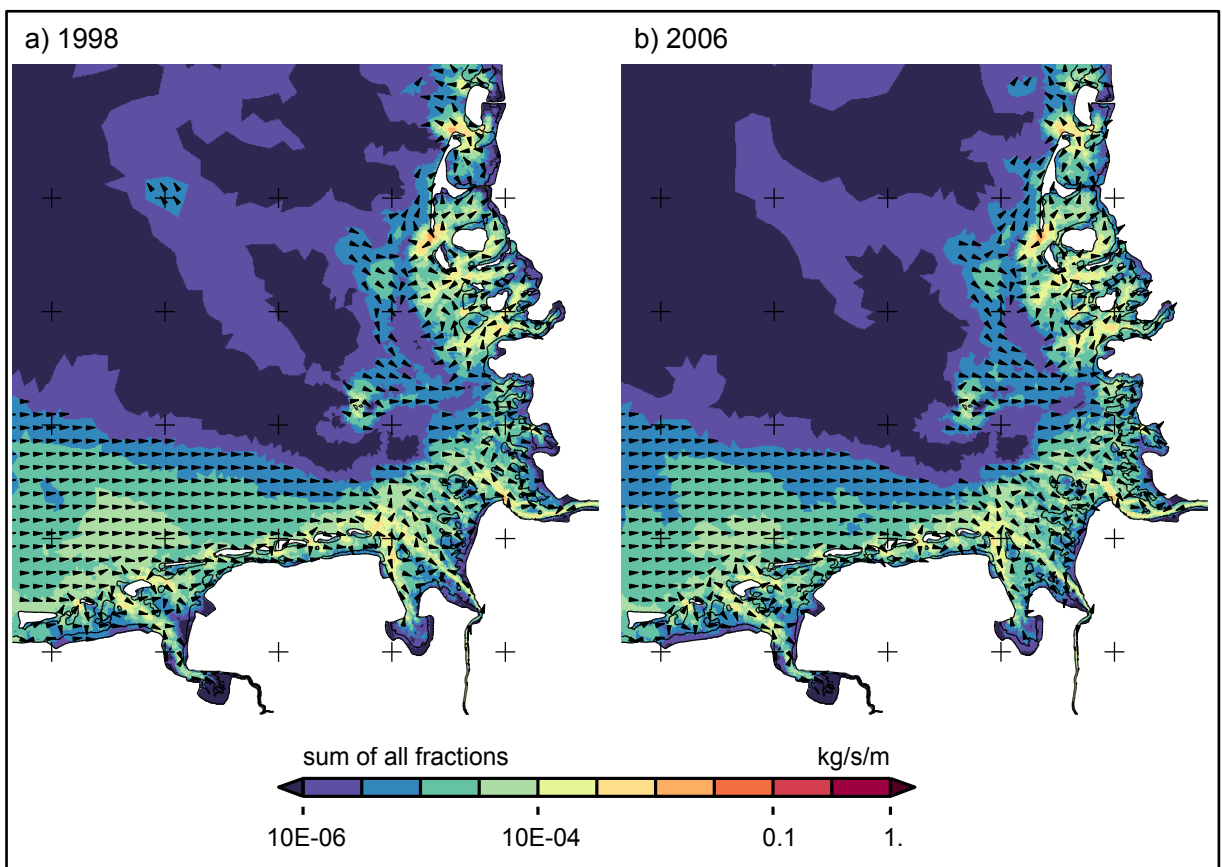


Abbildung 4-29: Mittlerer Geschiebetransport für 1998 / 2006 (logarithmische Skalierung)

4.3.2.3.2 Bilanzierung für die Deutsche Bucht

Im Rahmen von **AufMod** sollte abgeschätzt werden, welche Sedimentmengen großräumig transportiert werden. Die räumliche Verteilung der Transporte wurde im vorhergehenden Abschnitt beschrieben. Zur Abschätzung der Nettotransporte in die Deutsche Bucht hinein bzw. aus der Deutschen Bucht heraus, wurden die Sedimenttransporte entlang ausgewählter Profile bilanziert (siehe Abbildung 4-30 zur Lage der Profile). Die Bilanzierung wurde für den gesamten Untersuchungszeitraum 1996 - 2007 durchgeführt, dargestellt sind im Folgenden das Referenzjahr 2006 und das Jahr 1998 als Vergleichszeitraum.

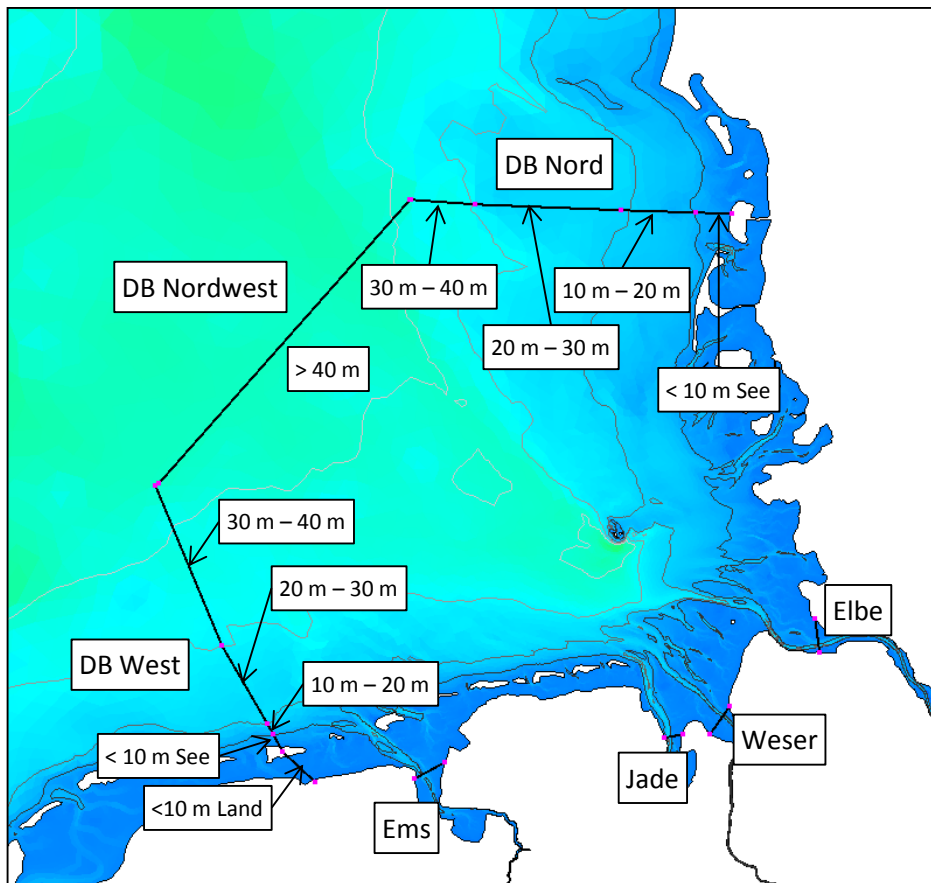


Abbildung 4-30: Bilanzierungsprofile für die Deutsche Bucht

Die Profile wurden so gewählt, dass diese den Transport entlang der niederländischen Küste in die Deutsche Bucht hinein erfassen (Profil „DB West“), sowie aus der Deutschen Bucht hinaus Richtung Norden (Profil „DB Nord“). Beide Profile sind noch mit einem weiteren Profil verbunden (Profil „DB Nordwest“). Die einzelnen Profile sind zusätzlich noch in Tiefenklassen der Topographie eingeteilt, um innerhalb eines Profils differenzieren zu können. Zusätzlich werden die Einträge aus den Ästuaren (Ems, Weser, Elbe), sowie der Austausch mit der Jade bilanziert.

Die Sedimentbilanz für die Jahre 1998 und 2006 (Abbildung 4-31) zeigt den Nettotransport von Sedimenten aus den Niederlanden in die Deutsche Bucht (1998: 41,5 Mt/a, 2006: 30,7 Mt/a), von diesem Eintrag wird nur ein kleiner Anteil wieder im Norden aus der Deutschen Bucht heraus transportiert (1998: 7,0 Mt/a, 2006: 3,9 Mt/a). Die Ästuare zeigen generell einen Stromabtransport, also einen Netto Eintrag in die Deutsche Bucht (1998: 13,1 Mt/a, 2006: 13,8 Mt/a). Als Gesamtbilanz ergibt sich damit eine Nettodeposition in der Deutschen Bucht (1998: 47,6 Mt/a, 2006: 40,5 Mt/a).

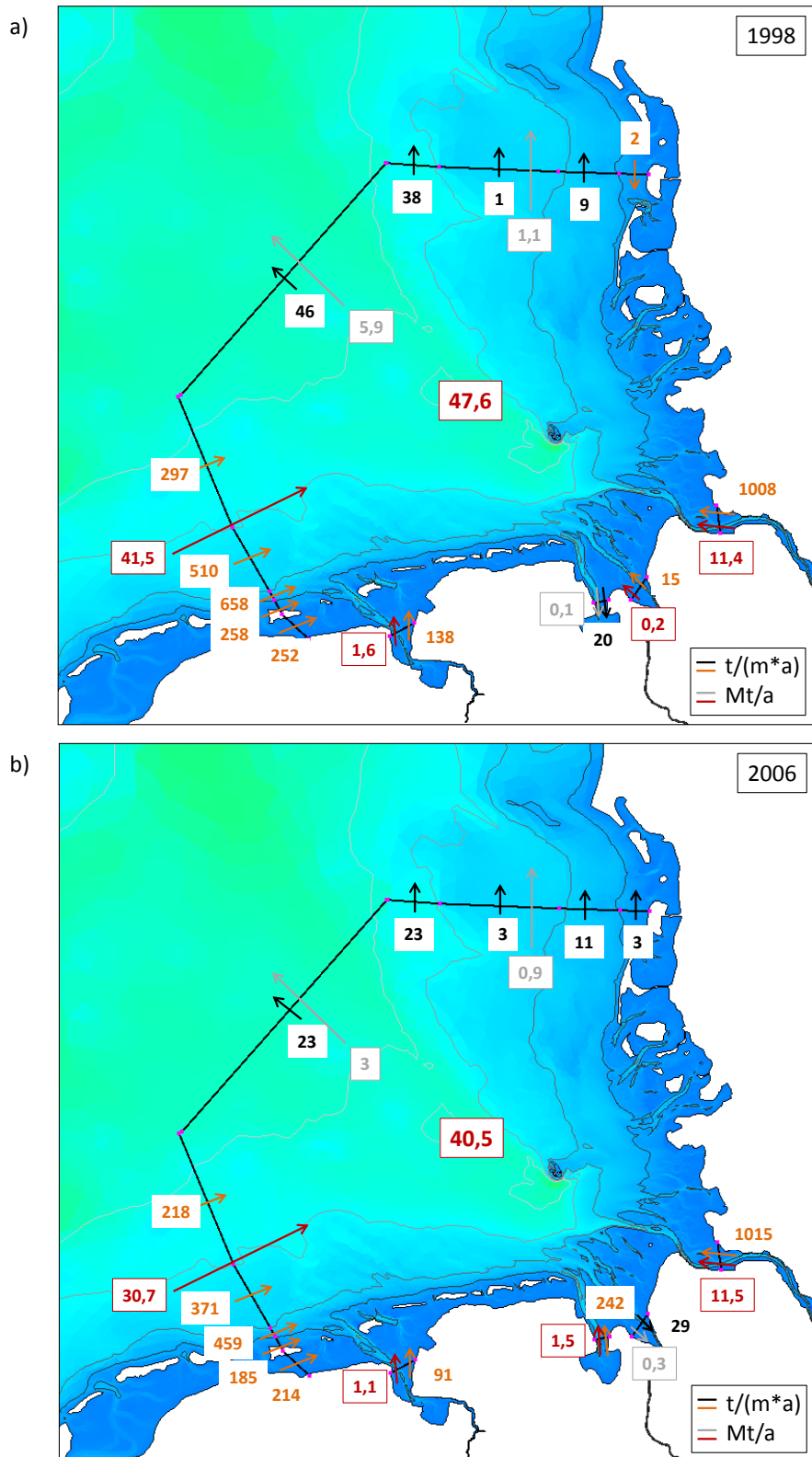


Abbildung 4-31: Sedimentbilanz für die Jahre a) 1998 und b) 2006. Der Sedimenttransport ist als Transport je Profilmeter und Jahr (schwarz, orange) und als absoluter Transport über das gesamte Profil (grau, rot) angegeben

Die Teilabschnitte des Profil DB West zeigen, dass der höchste Schwebstofftransport im Tiefenbereich zwischen 10 m und 20 m stattfindet, der sich mit zunehmender Wassertiefe auf ca. 78% im Tiefenbereich 20 m – 30 m und auf ca. 45% im Tiefenbereich 30 m – 40 m reduziert. Der Transport im Rückseitenwatt der ostfriesischen Inseln ist dagegen deutlich geringer.

Tabelle 4-8: Bilanz der Sedimenttransporte für die in Abbildung 4-30 gezeigten Profile

Jahr	Sedimenttransport [Mt/a]				
	DB West	DB Nord	DB Nordwest	Ästuare	gesamt
1996	22,76	-0,36	1,65	11,30	35,35
1997	22,76	0,95	-2,50	10,62	31,83
1998	41,51	-1,06	-5,94	13,14	47,65
1999	40,96	-1,23	-4,67	13,59	48,64
2000	44,89	-3,24	-3,43	13,97	52,20
2001	22,05	0,04	-0,91	11,74	32,91
2002	35,75	-1,52	-0,49	19,21	52,95
2003	13,11	0,06	-0,88	10,17	22,46
2004	29,28	-0,91	-2,65	10,33	36,04
2005	16,91	-0,08	0,09	11,63	28,55
2006	30,68	-0,94	-2,98	13,78	40,53
2007	22,93	0,69	-3,71	13,54	33,45
Mittel	28,63	-0,63	-2,20	12,75	38,55

4.3.2.3.3 Variabilität des Sedimenttransports durch Tide, Wind und Seegang

Die zeitliche Variabilität des Sedimenttransports wird durch unterschiedliche Einflussfaktoren bestimmt. Dies sind zum einen zyklische Änderungen auf unterschiedlichen Zeitskalen aus der Variabilität der Tide selbst, wie z.B. Spring-Nipp-Zyklen, zum anderen aber auch ereignisgesteuerte Änderungen, die sich aus der Meteorologie ergeben, wie die windgetriebene Zirkulation selbst und aus dem Windantrieb entstehende Seegangereignisse.

Der Suspensionstransport durch das Bilanzierungsprofil „DB West“ (Abbildung 4-32) zeigt eine ausgeprägte Variabilität mit der Veränderung der Tideenergie im Spring-Nipp Zyklus. Der Sedimenttransport in diesem Bereich steigt während einer Springtide bis über das 15-fache einer Nipptide an (Abbildung 4-32a). Aber auch auf längeren Zeitskalen zeigen sich Unterschiede im Sedimenttransport, die durch die Schwebung der unterschiedlichen halbtäglichen Partialtiden (i. W. M_2 , S_2 , N_2 , K_2 , L_2 , v_2) erzeugt werden. Bereits auf der kürzeren Zeitskala der täglichen Ungleichheit zeigen sich Unterschiede im Transport um das bis zu 2-fache (Abbildung 4-32b).

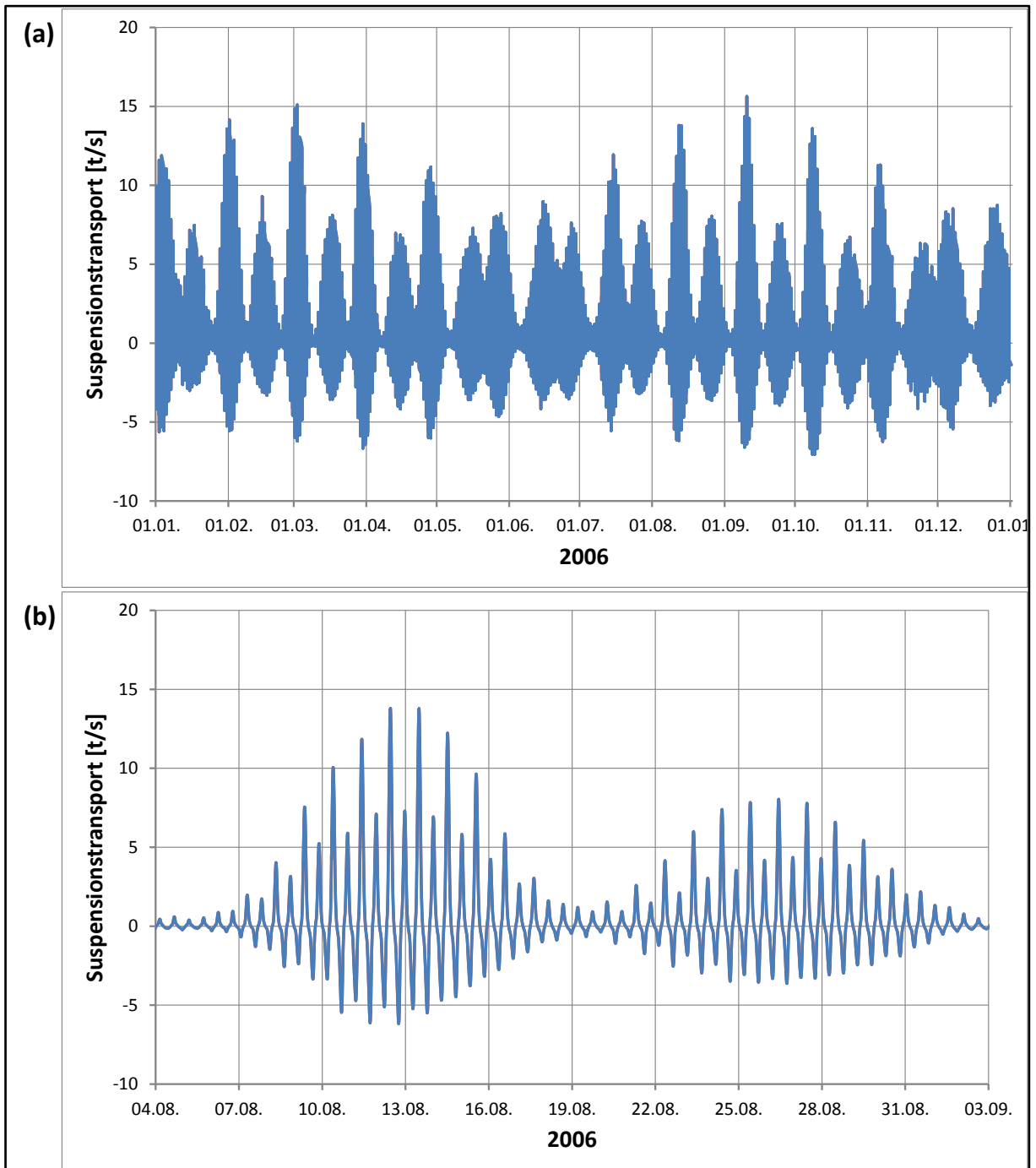


Abbildung 4-32: Suspensionstransport am Bilanzierungsprofil „DB West“ für a) das gesamte Jahr 2006 und b) für zwei Spring-Nipp-Zyklen im August / September 2006

Bereits aus der Zeitreihe des Sedimenttransports durch das Bilanzierungsprofil wird deutlich, dass für den großräumigen Transport der tidegetriebene Transport eine überwiegende Rolle spielt. Zur genaueren Abschätzung des Einflusses von Wind und Seegang auf den großräumigen Sedimenttransport wurden unterschiedliche Modellsimulationen durchgeführt. Es wurden jeweils drei Varianten eines Jahres berechnet, die sich in der Berücksichtigung der einzelnen Antriebsgrößen unterscheiden:

- rein tidegetriebener Antrieb (Variante T)
- tidegetriebener Antrieb und Berücksichtigung des örtlich- und zeitlich variablen Windfeldes (Variante T, W)

- wie Variante T, W jedoch zusätzlich Berücksichtigung der Seegangswirkung (Variante T, W, S)

Der Vergleich von Tide, Windeinfluss und Seegang zeigt deutlich den Unterschied zwischen dem kontinuierlichen Transport durch die Tide und den sporadischen Wind- und Seegangseffekten (Abbildung 4-33). Signifikante wind- und seegangsgetriebene Transporte finden im Wesentlichen im Herbst bzw. Winter statt. Die Sommermonate sind klar tidedominiert. Während der einzelnen Sturmereignisse werden bis zu 5-fache Mengen Sediment transportiert, insbesondere die Richtung der Transporte unterscheidet sich deutlich. Der überwiegend aus westlicher und nordwestlicher Richtung wirkende Wind führt zu einem ostwärts gerichteten Transport. Dagegen zeigen die tidegetriebenen Transporte auch immer eine westwärtige Komponente auf. Insgesamt führt dies dazu, dass durch die kombinierte Wind und Seegangswirkung über das gesamte Jahr, mehr Sediment ostwärts transportiert wird, als durch die Tide allein.

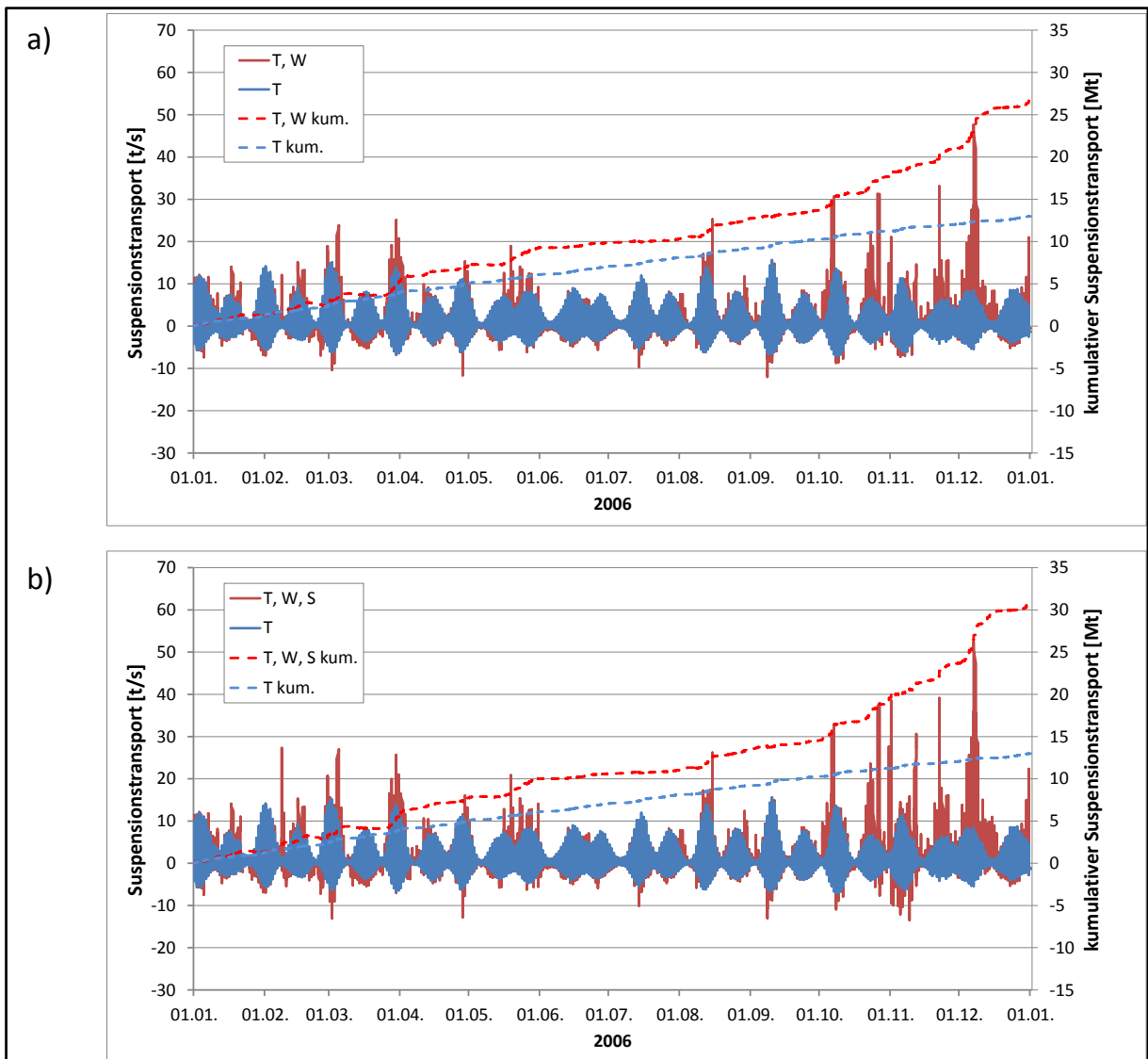


Abbildung 4-33: Suspensionstransport für die Varianten Tide (T), Tide und Wind (T, W) und Tide, Wind und Seegang (T, W, S) für das Jahr 2006

4.3.2.4 Diskussion

Limitation des methodischen Ansatzes

Der fraktionierte Transport im Modellsystem UnTRIM-SediMorph setzt eine Vorgabe für die Transportform voraus, das heißt eine bestimmte Fraktion kann nur als Suspension oder als Geschiebe transportiert werden. Da sich in der Natur der Transport je nach Antrieb unterscheiden kann, darf die Aufteilung in Suspensions- und Geschiebetransport nur sehr eingeschränkt interpretiert werden.

4.3.3 Prozessbasierte Analyse der Morphodynamik

4.3.3.1 Einführung

Als Morphodynamik wird hier die morphologische Umformung, also die zeitliche Veränderung der Gewässersohle, verstanden. Die Prozesse, die dieses bewirken, werden als Formänderungsprozesse bezeichnet. Zur Unterscheidung der einzelnen Prozesse wurden detaillierte Untersuchungen zu Tide-, Wind-, und Seegangseinfluss durchgeführt. Zum erweiterten Prozessverständnis wird hier der Ansatz verfolgt, die beobachteten morphologischen Formänderungsprozesse durch eine Analyse der Sohlschubspannung auf die direkte Sohlbelastung zurückzuführen. Weiterhin wird die zu erwartende zwischenjährliche Variabilität durch die Analyse der einzelnen Jahrgänge des Untersuchungszeitraums abgeschätzt.

4.3.3.2 Methodischer Ansatz

Für die Analyse der morphologischen Änderungen, im Sinne einer morphologischen Aktivität oder Umhüllenden der einzelnen Sohländerungen, gelingt dies durch die Berechnung des morphologischen Raums oder „bed elevation range (BER)“ (Winter, 2011). Die morphologische Aktivität an dem Ort (i, j) in der Zeitspanne von t_1 bis t_2 kann durch die Differenz der maximalen Sohlage $\max z_{i,j}(t)$ und der minimalen Sohlage $\min z_{i,j}(t)$ abgeschätzt werden:

$$BER_{i,j} = \left| \max z_{i,j}(t) - \min z_{i,j}(t) \right|, \forall t_1 \leq t \leq t_2$$

Vorteil dieser Betrachtungsweise ist, dass auch Informationen aus den Zwischenzuständen der Sohländerung in die Kenngröße eingehen können. Deutlich wird dies an dem Beispiel einer migrierenden Rinne, die über den Gesamtbereich der Migration eine hohe morphologische Aktivität erzeugt, wenn diese Migration durch die zugrundeliegenden Daten abgedeckt ist.

Als Vergleichsgröße auf Basis der numerischen Modellergebnisse werden diagnostische Größen der Sohlschubspannung genutzt. Zum einen die 95% Perzentile der Sohlschubspannung als Maß für die maximale Sohlbelastung, ohne jedoch einzelne Ausreißer der Sohlbelastung überzubewerten. Zum anderen die Dauer hoher Sohlschubspannung (*BSSI*, bed shear stress intensity), als Anteil der Zeit, in der die Sohlschubspannung über einem kritischen Wert liegt, hier der kritischen Sohlschubspannung für die Erosion von Feinsand (0.17 N/m²).

4.3.3.3 Ergebnisse

Der auf Basis des AufMod Datensatzes der Bathymetrie berechnete morphologische Raum (BER) wurde aus dem Teilprojekt AufMod-E zur Verfügung gestellt (Abbildung 4-34).

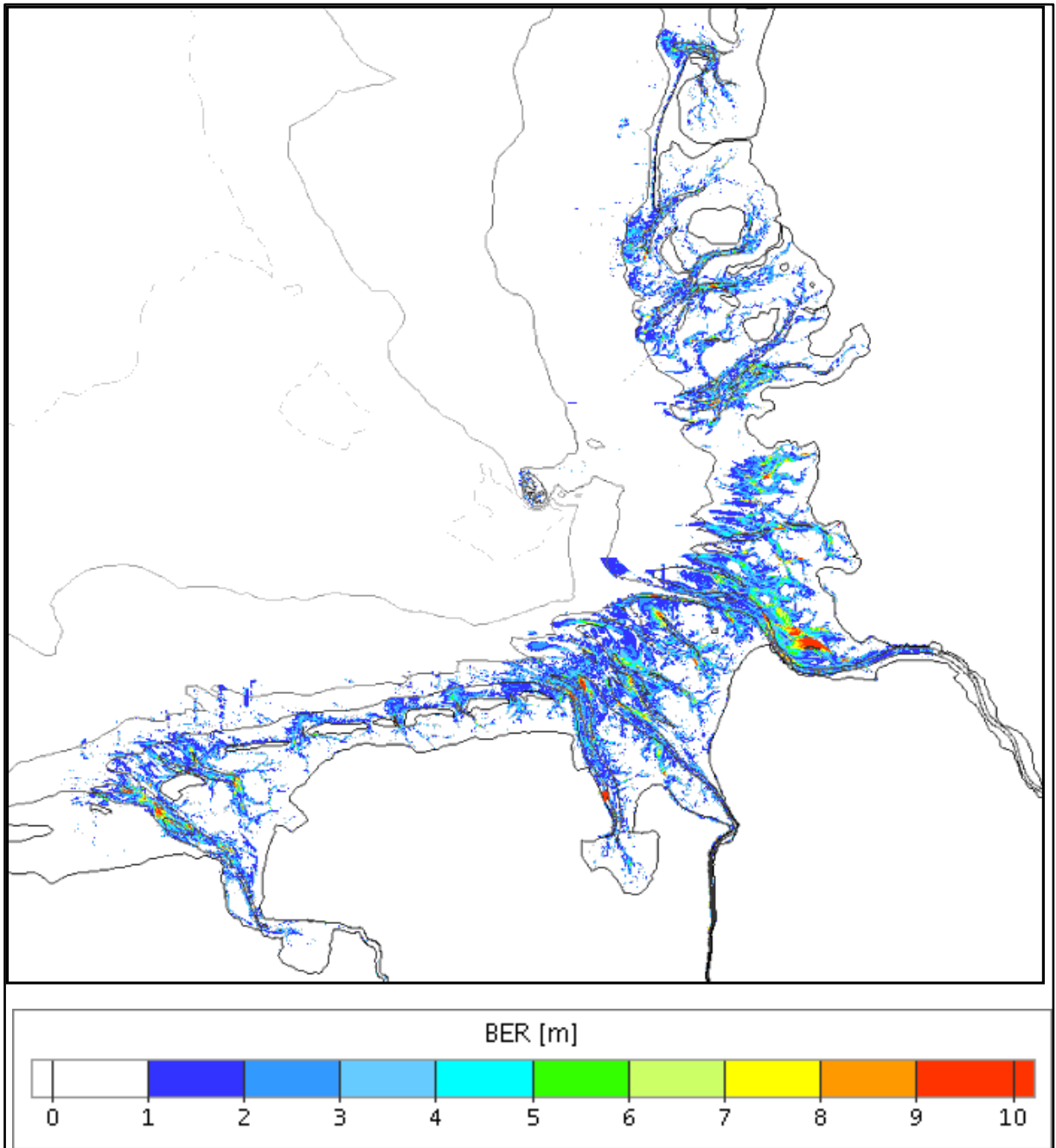


Abbildung 4-34: Morphologischer Raum BER auf Basis des datenbasierten **AufMod**-Modells (bereitgestellt durch **AufMod-E**)

Eine direkte Berechnung des BER aus den morphodynamischen Modellsimulationen ist nicht möglich, da diese nicht kontinuierlich für den Gesamtzeitraum berechnet wurden sondern jeweils als Jahresrechnung mit entsprechender Jahrestopographie durchgeführt wurden. Der gemessene BER lässt sich jedoch mit der Summe der morphologischen Änderungen der Einzeljahre aus den numerischen Modelluntersuchungen vergleichen.

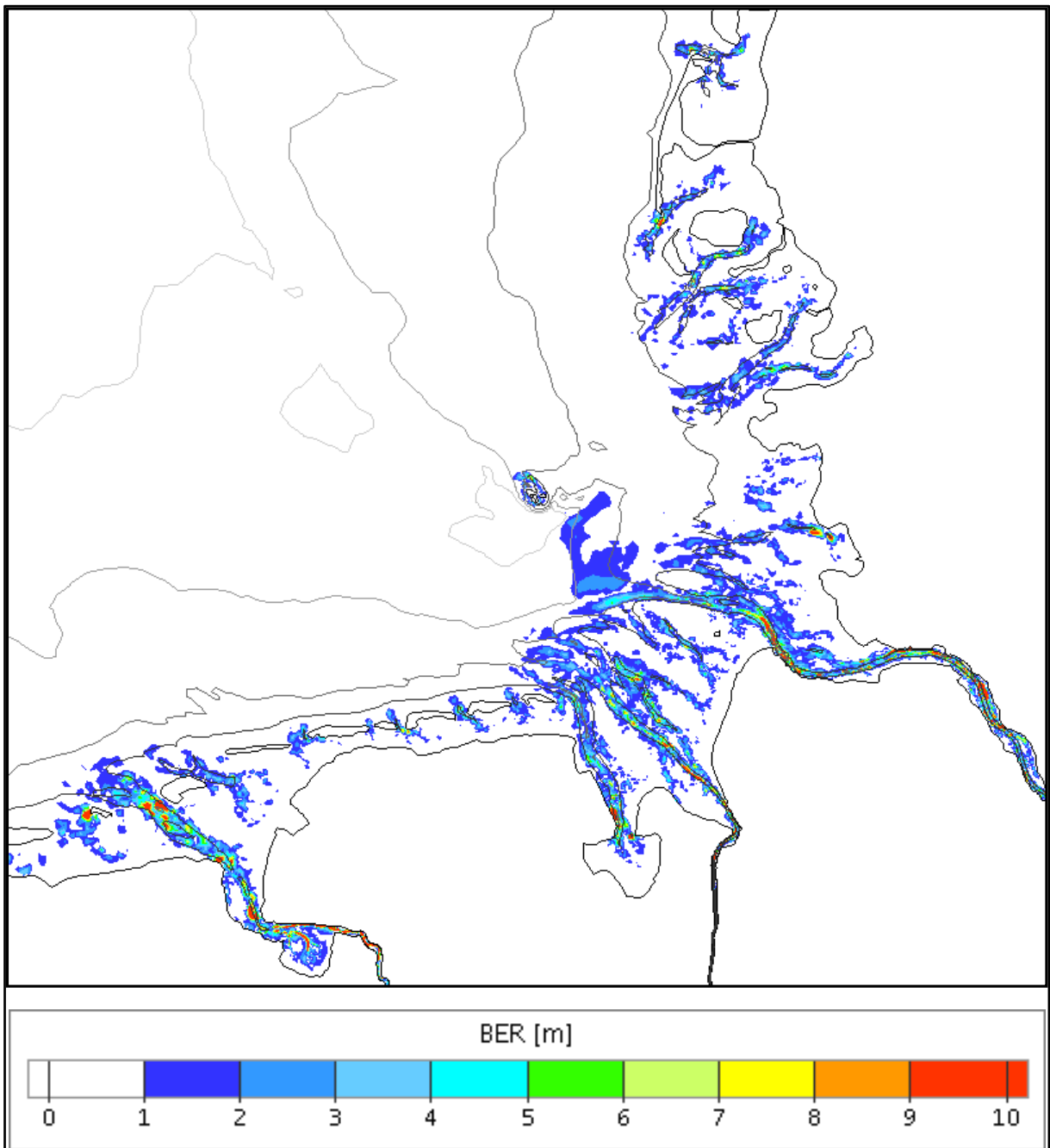


Abbildung 4-35: Morphologischer Raum auf Basis der numerischen Modelluntersuchungen

Der Vergleich von gemessenem BER (Abbildung 4-34) und berechnetem BER (Abbildung 4-35) zeigt, dass die morphologisch aktiven Bereiche von dem Modell bereits annähernd getroffen werden, wobei sich jedoch Größe und Lage im Detail unterscheiden.

Zur Interpretation des gemessenen BER wurde die berechnete Sohlschubspannung für die Zeitspanne 1996 – 2007 genutzt. Aus den 12 Einzeljahren wurde für drei verschiedene Varianten (T: nur Tideantrieb, TW: Tide- und Windantrieb, TWS: Tide-, Wind- und Seegangs-antrieb) die 95% Perzentile der Sohlschubspannung berechnet und über alle Jahre gemittelt (vgl. Abbildung 4-36).

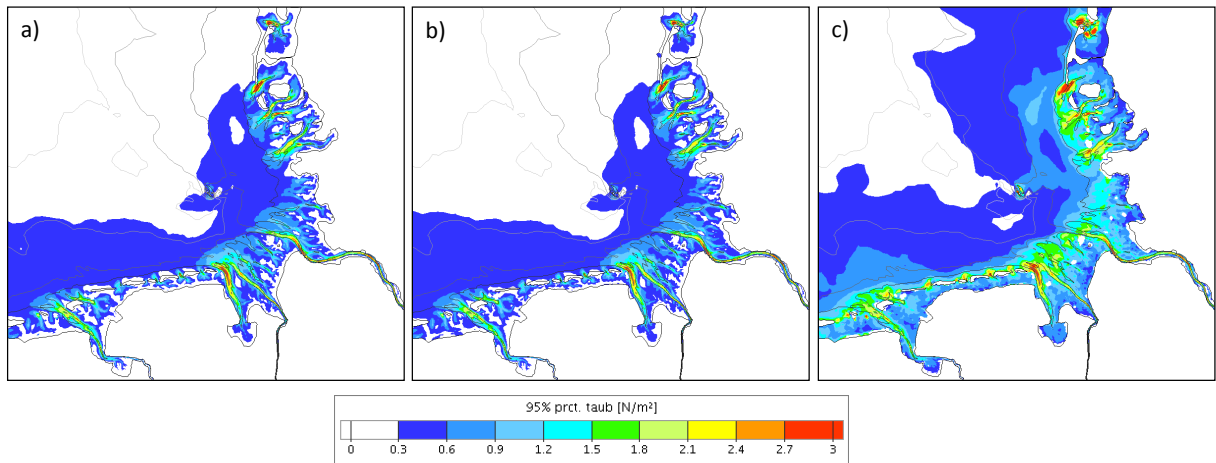


Abbildung 4-36: 95% Perzentile der Sohl Schubspannung gemittelt über den gesamten Untersuchungszeitraum (1996 - 2007) aus der Wirkung von a) Tide, b) Tide und Wind und c) Tide, Wind und Seegang

Die Wirkung des Windes kann aus der Differenz TW – T (Abbildung 4-37a) und die Wirkung des Seegangs aus der Differenz TWS – TW (Abbildung 4-37b) abgelesen werden.

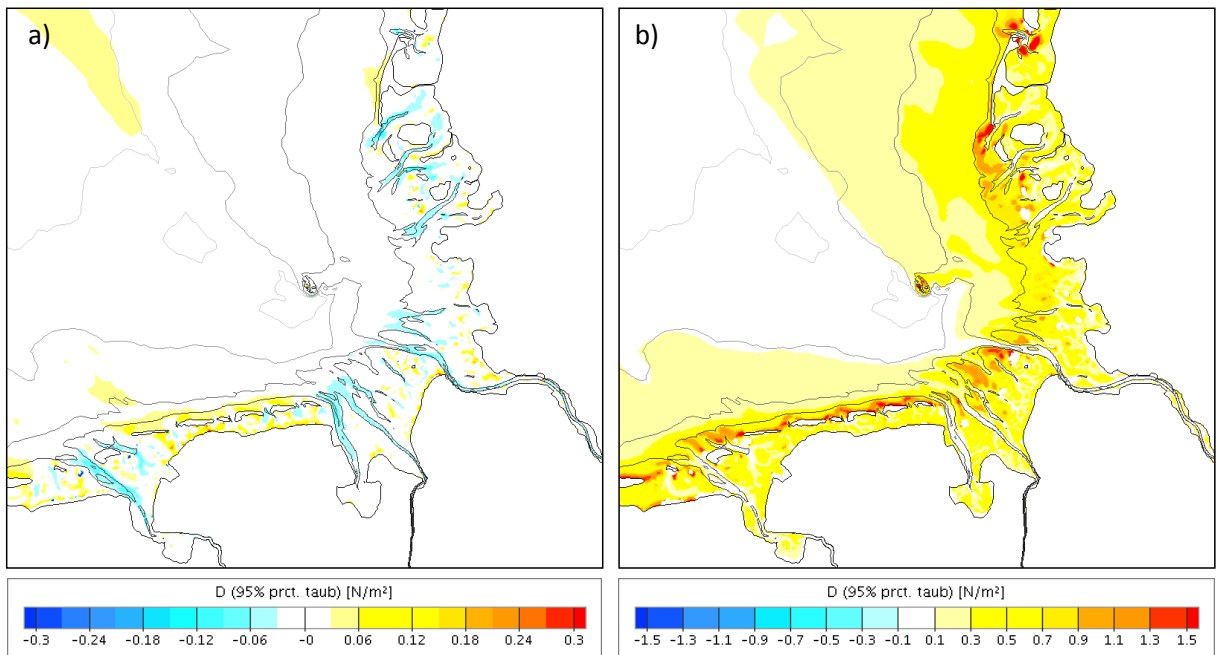


Abbildung 4-37: Differenz der 95% Perzentile der Sohl Schubspannung für die Wirkung a) des Windeinflusses (Differenz aus Tide mit Wind zu nur Tide) und b) des Seegangs (Differenz aus Tide, Wind mit Seegang zu nur Tide mit Wind)

Abbildung 4-36a zeigt die tideinduzierte Verteilung der maximalen Sohlbelastung. Insbesondere die großen Tiderinnen, die Seegatten und deren jeweilige Mündungsbereiche erfahren eine Sohlbelastung $>0.5 \text{ N/m}^2$; typische Werte in den Rinnen liegen bei über 2 N/m^2 . Die zusätzliche Wirkung des Windantriebs ist gering (Abbildung 4-37a). Tendenziell trägt die Windwirkung zu einer Abnahme der Sohlbelastung in den Tiderinnen und einer Zunahme im Vorstrandbereich bei. Die Sohlbelastung bei Berücksichtigung des Seegangs zeigt eine deutlich größere Fläche mit einer Stärke von über 0.5 N/m^2 . Insbesondere der Bereich des Vorstrandes bis zu 10 m Tiefe wird durch den Seegang beeinflusst. Die reine Seegangswirkung (Abbildung 4-37b) weist besonders exponierte Regionen, wie den Bereich der Elbmündung (Scharhörn), das nordfriesische Schelf und den Vorstrand der ostfriesischen Inseln aus.

Das gleiche Vorgehen wurde für die Dauer hoher Sohlschubspannung gewählt. Diese wurde ebenfalls über die Jahre 1996 – 2007 gemittelt und ist für die drei Varianten (T, TW, TWS) in Abbildung 4-38 dargestellt.

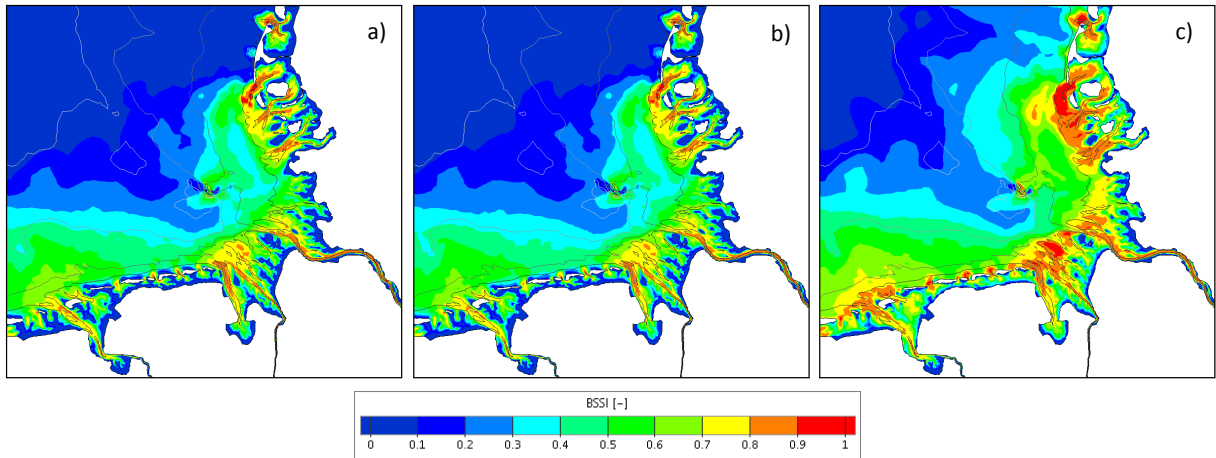


Abbildung 4-38: Anteil der Dauer hoher Sohlschubspannung (BSSI) gemittelt über den gesamten Untersuchungszeitraum (1996 - 2007) aus der Wirkung von a) Tide, b) Tide mit Wind und c) Tide, Wind mit Seegang. Der Grenzwert für die Definition hoher Sohlschubspannung beträgt $0,17 \text{ N/m}^2$

Die Wirkung des Windes kann aus der Differenz TW – T (Abbildung 4-39a) und die Wirkung des Seegangs aus der Differenz TWS – TW (Abbildung 4-39b) abgelesen werden.

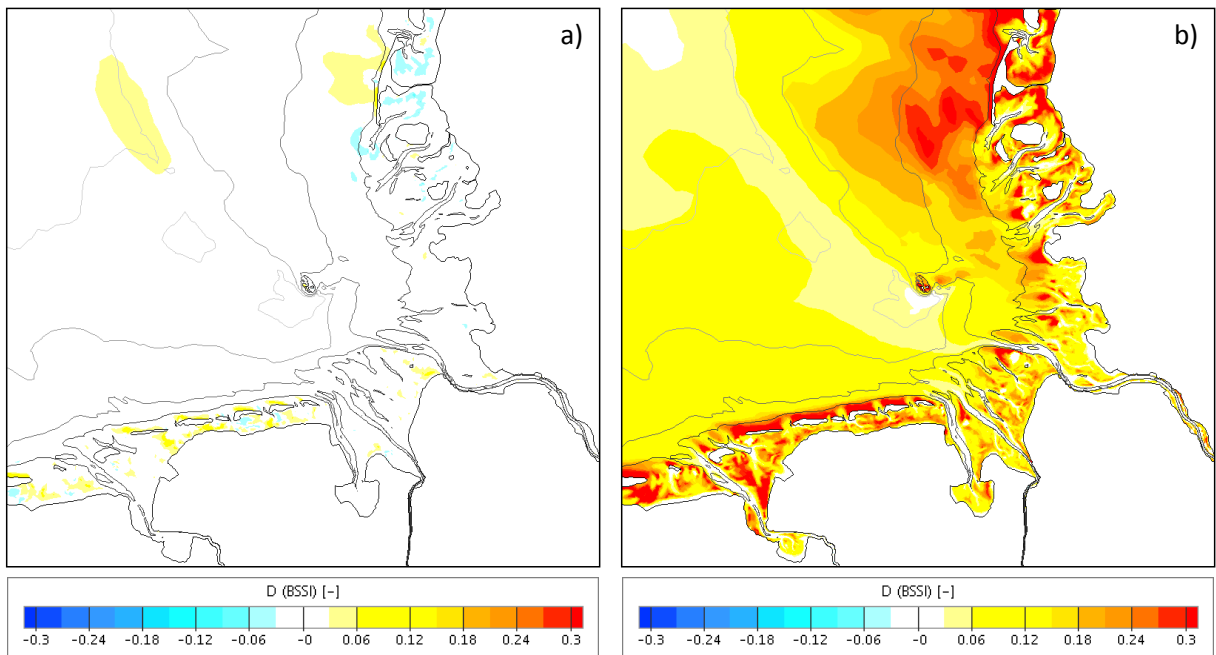


Abbildung 4-39: Differenz der Dauer hoher Sohlschubspannung für die Wirkung a) des Windeinflusses (Differenz aus Tide mit Wind und nur Tide) und b) des Seegangs (Differenz aus Tide, Wind mit Seegang und Tide mit Wind). Der Grenzwert für die Definition der hohen Sohlschubspannung beträgt $0,17 \text{ N/m}^2$

Hier zeigt sich ein ähnliches Bild wie bei der 95% Perzentile der Sohlbelastung. Der Seegang verlängert die Dauer hoher Sohlbelastung insbesondere im Bereich des Vorstandes der ostfriesischen und nordfriesischen Inseln. Der Vergleich von der durch Tide und Wind bedingten hohen Sohlbelastung (Abbildung 4-38b) mit der zusätzlichen Wirkung des Seegangs (Abbildung 4-38c) zeigt, dass nur unter Seegangswirkung eine nennenswerte

Belastung des Vorstrandbereiches der ostfriesischen Inseln auftritt. Noch deutlicher als bei der 95% Perzentilen der Sohlbelastung gezeigt, wird durch die Seegangswirkung die Dauer hoher Sohlbelastung des Schelfs verlängert. Dies macht sich insbesondere im Bereich des nordfriesischen Schelfs aber auch im Bereich der ostfriesischen Inseln bemerkbar.

Zur Quantifizierung der Korrelation des gemessenen morphologischen Raums mit den Kenngrößen der berechneten Sohl Schubspannung werden die Größen auf ein gleichmäßiges Raster von 1250 m gerastert und gegeneinander dargestellt. Abbildung 4-40 zeigt den BER in Abhängigkeit des BSSI (Abbildung 4-40a) und der 95% Perzentile der Sohl Schubspannung (Abbildung 4-40b) für die Variante TWS als Auswertung für die gesamte Deutsche Bucht. Dabei wurden nur solche Gitterzellen berücksichtigt, in denen mindestens so viele Messpunkte vorhanden waren, dass 20% der Fläche der Rasterzelle abgedeckt werden konnten. Aus dem gemessenen BER wurden jeweils Klassen gebildet (Klassenbreite 2.5% bei BSSI und 0.1 N/m² bei der 95% Perzentilen der Sohl Schubspannung) und ebenfalls als Perzentile (5%, 50% und 95%) dargestellt. Daraus lässt sich die Streuung des BER erkennen.

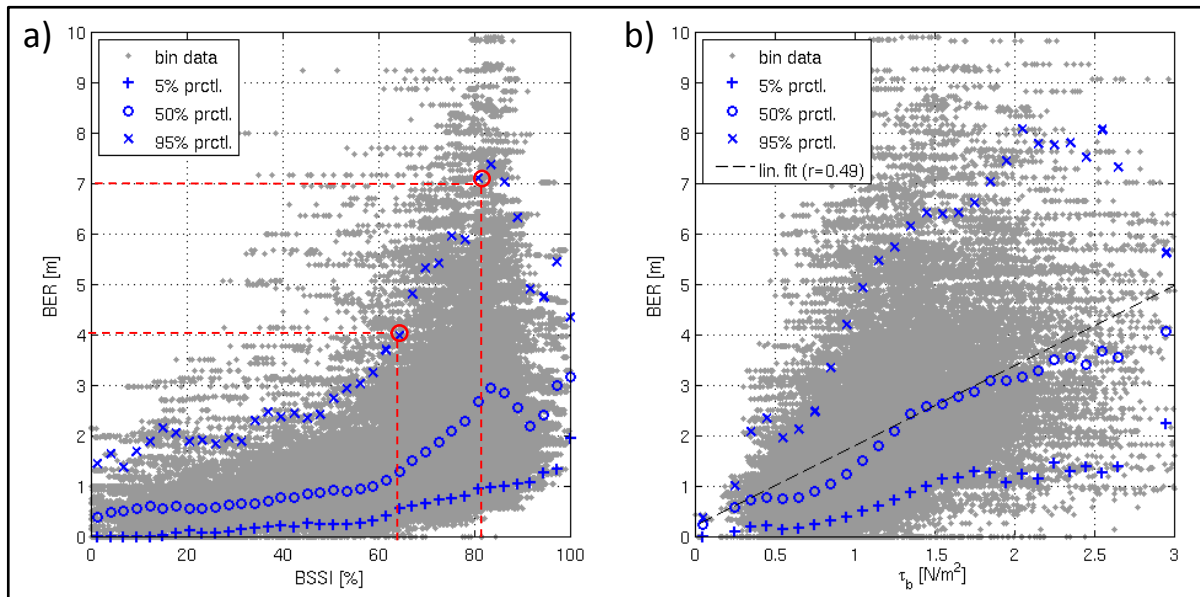


Abbildung 4-40: Korrelation von a) Dauer hoher Sohl Schubspannung (BSSI) zu morphologischem Raum (BER) und b) Korrelation von 95% Perzentile der Bodenschubspannung mit BER

Der Verlauf des BER als Funktion des BSSI zeigt eine exponentielle Zunahme bis zu 80% und eine anschließende Abnahme (Abbildung 4-40a). Dabei ist zu berücksichtigen, dass sich 100% auf den Gesamtzeitraum beziehen, das heißt trockenfallende Bereiche können nie 100% erreichen. Insofern kann die Verteilung des lokalen Maximums in Abbildung 4-40a als ein Artefakt des zeitenabhängigen Überflutens und Trockenfallens gesehen werden.

4.3.3.4 Diskussion

Die Bedeutung des BSSI liegt in der Sichtweise als Grenzwert für einen bestimmten BER, so kann aus Abbildung 4-40a abgelesen werden, dass zu 95% der BER bei einem BSSI <62.5% unterhalb von 4 m liegt oder unterhalb von ca. 7 m bei einem BSSI von 80% (vgl. rote Hilfslinien in Abbildung 4-40a).

Die 95% Perzentile der Sohl Schubspannung zeigt eine näherungsweise lineare Korrelation mit dem BER (Abbildung 4-40b). Für die Variante TWS und das Gesamtgebiet Deutsche

Bucht in der gesamten Untersuchungszeitspanne (1997-2007) erklärt die 95% Perzentile 49% der Varianz des BER. Die lineare Korrelation wird besonders deutlich bei dem Vergleich des Medians des BER (blaue Kreise in Abbildung 4-40 b) und der Regressionsgerade (gestrichelte schwarze Linie).

Generell ist bei der Interpretation der Korrelation zu berücksichtigen, dass die Datenbasis des BER in unterschiedlichen Tiefenbereichen unterschiedlich vertrauenswürdig ist. Die zugrundeliegenden Daten wurden mittels Peilung erhoben, d. h. die Informationsdichte der Messungen ist im Bereich der Wasserwechselzone geringer. So kann durch eine geringere Anzahl von zur Verfügung stehenden Peilungen in diesen Bereichen nur ein geringer BER nachgewiesen werden, im numerischen Modell ist die Datenabdeckung hier jedoch so umfassend wie in allen anderen Gebieten, d. h. auch die Wirkung von Seegangseignissen als starke Sohlbelastung wird vollständig abgebildet.

4.4 Modellsystem DELFT3D/MOR/SWAN

Das hydrodynamische Modellierungssystem DELFT3D wurde für die gesamte Nordsee aufgesetzt und mit dem Sedimenttransport- und Morphodynamikmodul MOR, sowie mit dem spektralen Seegangmodell SWAN gekoppelt. Im Gegensatz zu den anderen o. g. prozessbasierten Modellsystemen wird hier die Simulation von Hydrodynamik, Sedimenttransport und Morphodynamik auf zwei unterschiedlichen Gitternetzen durchgeführt (Nesting -> vgl. Kapitel 4.1.3, Abbildung 4-3).

4.4.1 Hydrodynamik

Die Tidewasserstände und -strömungen werden für die gesamte Nordsee berechnet. Hieraus werden die Zustandsgrößen (Wasserstand und teilweise auch Strömungsvektoren) in das erweiterte Modell der Deutschen Bucht eingesteuert. Somit ist hier zwar ein anderer Simulationsweg beschrieben worden, die Dynamik in der Deutschen Bucht ist jedoch in vergleichbarer Weise simuliert worden.

Die räumliche Verteilung der Wasserstände in der gesamten Nordsee (typische Hoch- bzw. Niedrigwasserzeitpunkte) zeigt Abbildung 4-41. Es sind die typischen Muster einer Drehtide in der süd-westlichen Nordsee sowie im Englischen Kanal um die amphidromischen Punkte klar erkennbar.

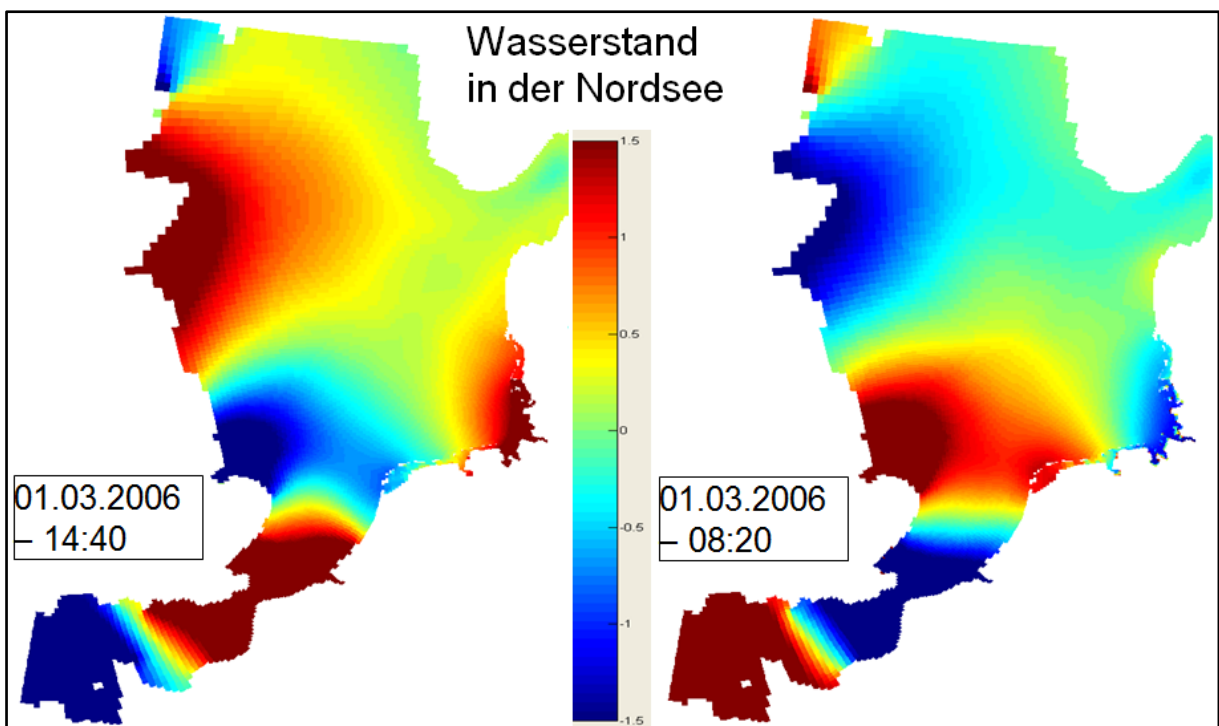


Abbildung 4-41: Wasserstand in der Nordsee zu Hoch- / Niedrigwasserzeiten

4.4.2 Seegang

Die mit SWAN berechnete flächenhafte Verteilung des Seegangs auf der Nordsee (vgl. Abbildung 4-43) zeigt sich beispielhaft am Parameter „signifikante Wellenhöhe (Seegang)“.

Der Vergleich mit einer Messung auf Helgoland und den Ergebnissen aus der Simulation mit SWAN (vgl. Abbildung 4-42) zeigt eine gute Übereinstimmung bezgl. Der signifikanten Wellenhöhe und der Peakperiode.

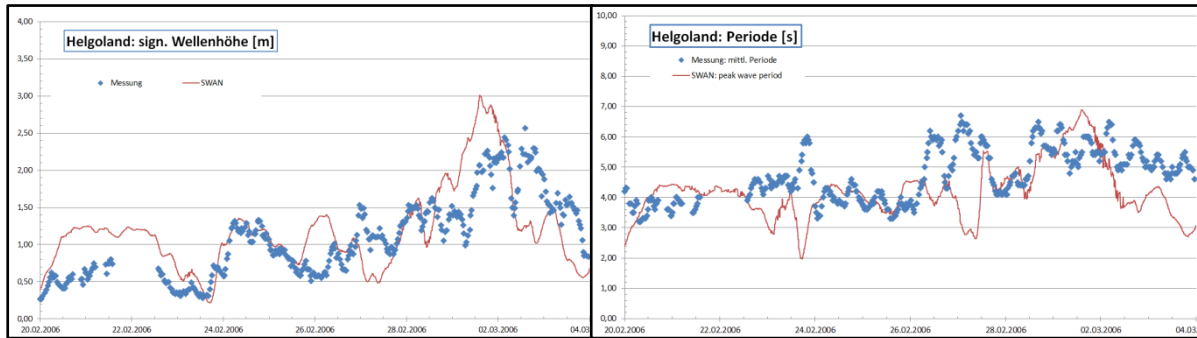


Abbildung 4-42: Messung / SWAN-Simulation Helgoland II-III 2006 (Wellenhöhe / Periode)

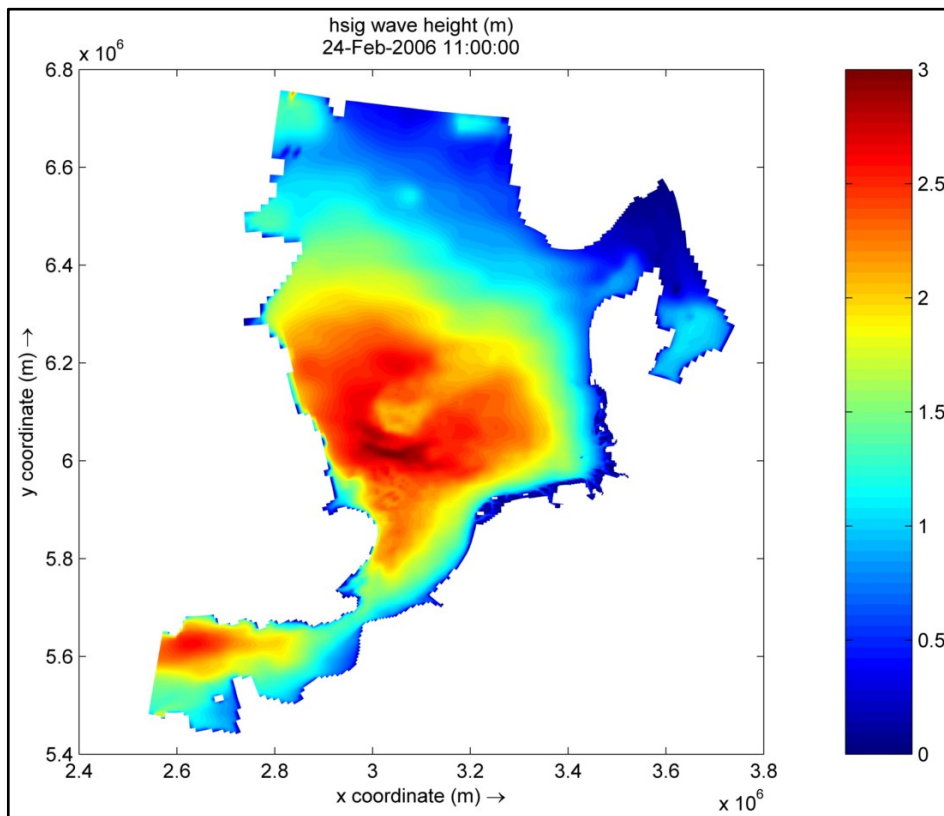


Abbildung 4-43: Hsig in der gesamten Nordsee (gm_nsee) am 24.02.2006-11:00 Uhr

4.4.3 Sedimenttransport / Morphodynamik

Als ein Beispiel für den mit DELFT3D berechneten Geschiebetransport (bed-load-transport) wird auf Abbildung 4-44 der mittlere Transport für den Bereich der Deutschen Bucht dokumentiert. Insbesondere in den Ästuarmündungen und den Tiderinnen sind deutliche Geschiebetransporte erkennbar.

Die Änderung der Bathymetrie nach 80-tägiger Simulation unter Berücksichtigung von Tide, Wind und Seegangswirkung wird auf Abbildung 4-45 dokumentiert. Hierbei wurde zunächst für zwei Monate allein die Hydrodynamik ohne Sedimenttransport berechnet. Ausgehend von diesem hydrodynamisch „eingeschwungenen“ Systemzustand wurden für 70 Tage der Sedimenttransport und die sich daraus ergebenden morphologischen Änderungen (morphologischer Zeitstreckungsfaktor = 4) berechnet (entspricht also $70 \cdot 4 = 280$ Tagen). Im Anschluss an diesen, morphodynamisch balancierten Zustand, wurde für 20 Tage die Bodenän-

derung (morphologischer Faktor MF = 4) ermittelt, und so zeigen sich deutlich Bereiche mit Erosion und Sedimentation (vgl. Abbildung 4-45).

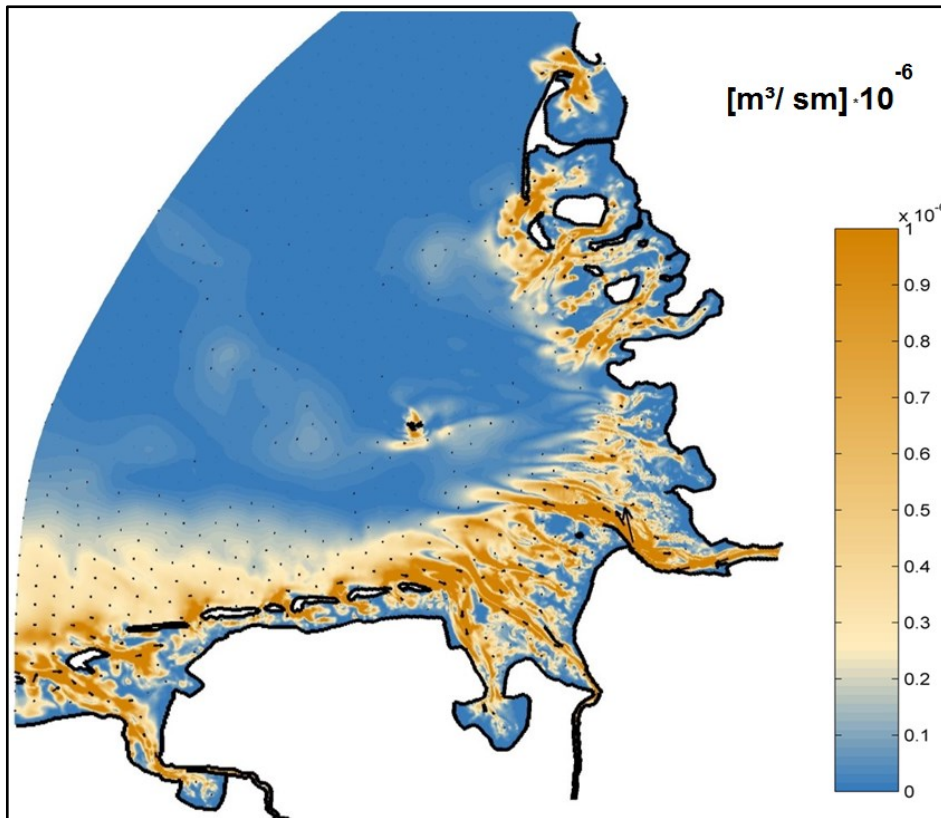


Abbildung 4-44: Mittlerer bed-load Transport $[m^3/s/m]$ 21.08.15⁰⁰ – 22.08.21⁰⁰ 2006, Westwind (12 m/s) – Summe aller Fraktionen (gS, mS, fS, gU, fU)

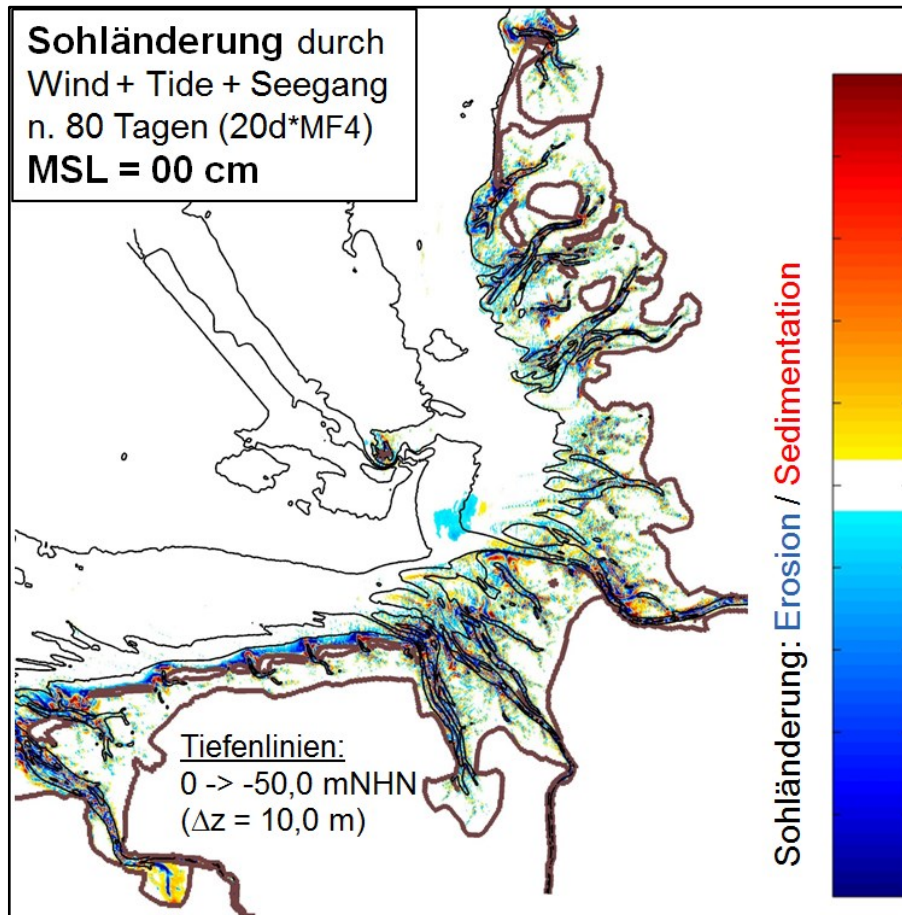


Abbildung 4-45: Sohländerung nach rd. 80 Tagen: Tide + Wind + Seegang (MSL=0cm)

4.4.4 Parameterstudien

Nachfolgend werden die Ergebnisse einiger Parameterstudien dokumentiert.

Änderung des mittleren Meeresspiegels:

Die Auswirkungen eines ansteigenden mittleren Meeresspiegels auf die Morphodynamik in der Deutschen Bucht wurden durch morphodynamische Berechnung mit DELFT3D ermittelt. Hierfür wurden zwei Simulationen, ausgehend von dem Nordseemodell mit Schachtelung zum Deutsche Bucht- Modell hin, jeweils ohne (Abbildung 4-45) und mit angenommenem Meeresspiegelanstieg um +80 cm berechnet (Abbildung 4-46). Als Differenz dieser beiden Erosions- und Sedimentationstendenzen zeigen sich die durch den Meeresspiegelanstieg hervorgerufenen Tendenzen einer verstärkten bzw. verringerten Erosion. Im Allgemeinen verstärken sich die Erosionstendenzen in den Tiderinnen und vor den Inseln (rötliche Färbung) bei gleichzeitiger Tendenz zu einer größeren Sedimentation in den flacheren Wattgebieten (bläuliche Färbung).

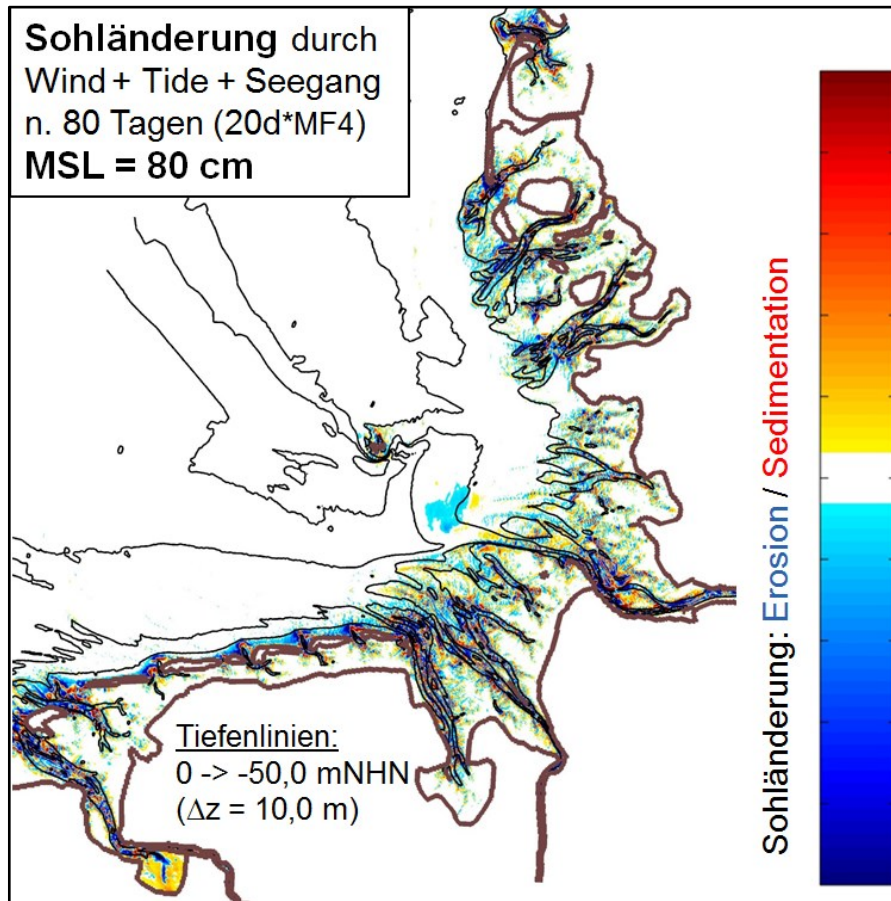


Abbildung 4-46: Sohländerung nach rd. 80 Tagen: Tide + Wind + Seegang (MSL=+80cm)

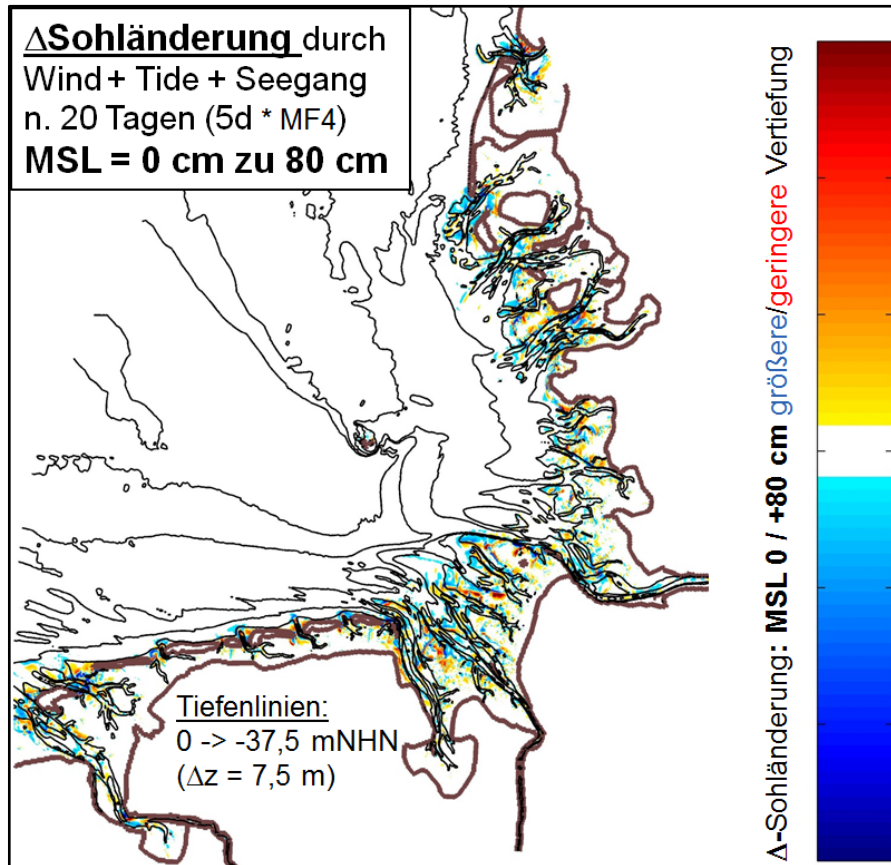


Abbildung 4-47: Änderung der morphologischen Bodenreaktion nach rd. 20 Tagen allein durch Anstieg des Meeresspiegels um 80 cm

Wie sich zeigt, ist die Vorgabe der Porosität des Bodenmaterials ein wesentlicher Parameter bei der morphodynamischen Simulation; die Differenzdarstellung (vgl.

Abbildung 4-49) der beiden morphodynamischen Simulationsläufe weist große Gebiete mit einer veränderten morphologischen Reaktion aus!

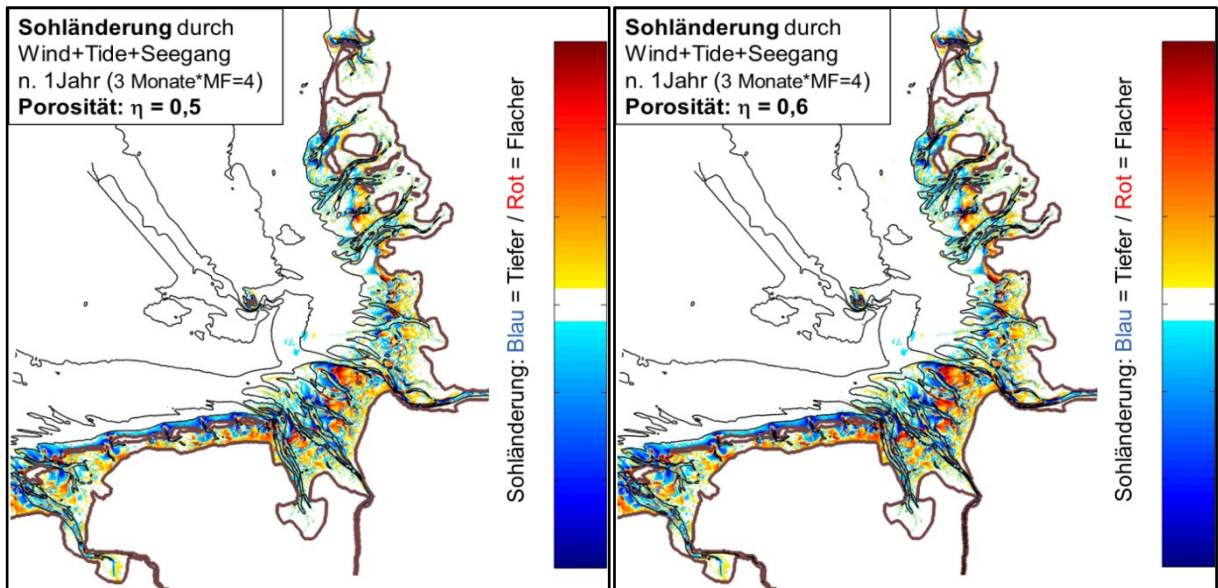


Abbildung 4-48: Sedimentation und Erosion [m] in der Deutschen Bucht nach einem Jahr mit Porengehalt $\eta=0,5$ (links) und $\eta=0,6$ (rechts)

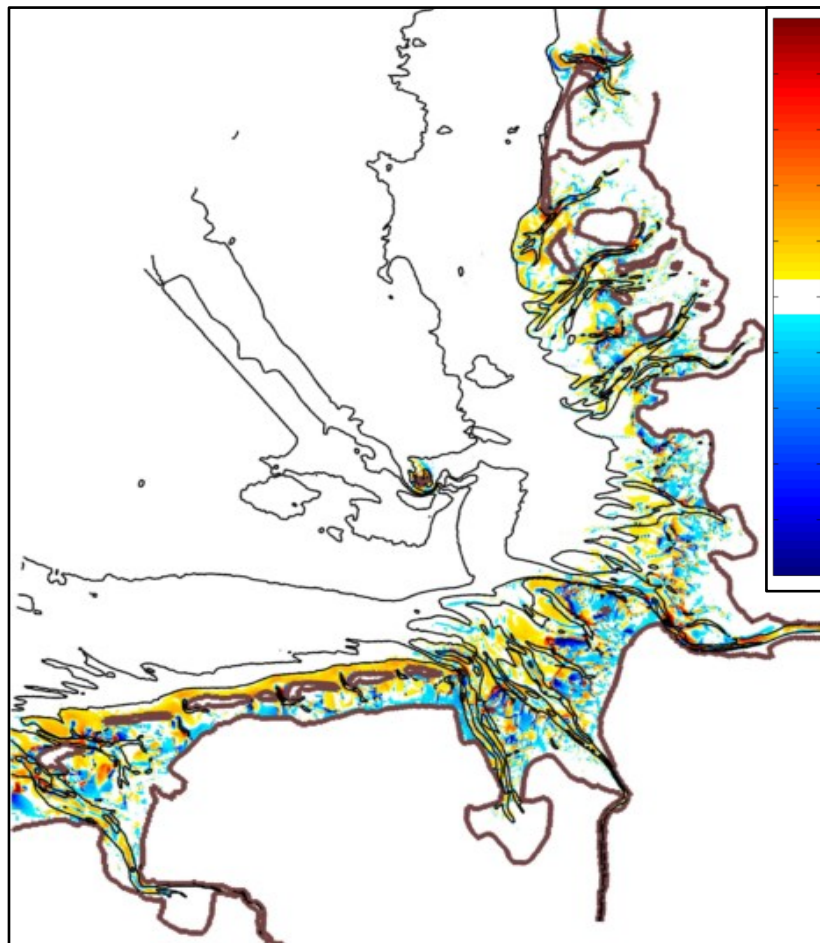


Abbildung 4-49: Änderung der Sedimentation und Erosion [m] in der Deutschen Bucht nach einem Jahr zwischen Porengehalt $\eta=0,5$ und $\eta=0,6$

4.5 Modellsystem MARINA

Das numerische Verfahren von Marina basiert auf der Methode der Finiten Elemente. Jeder Knoten der finiten Elementzerlegung repräsentiert hierbei die Systemeigenschaften einer Region um diesen Knoten. Diese Eigenschaft ist sowohl bei der Initialisierung von Anfangswerten und Modellparametern als auch bei der späteren Validierung zu berücksichtigen. Beispielhaft wird dieses Vorgehen an der Initialisierung der Tiefen mit einer voronoibasierten Tiefenapproximation vorgestellt (siehe Kapitel 3.5.4.2).

4.5.1 Modellkomponenten

Das holistische Modellsystem MARINA ist modular aufgebaut. Die einzelnen Module werden bei der Lösung der zugrundeliegenden physikalischen Erhaltungsgleichungen direkt gekoppelt berechnet. Im Rahmen der hier durchgeführten Modelluntersuchungen zur den morphodynamischen Prozessen in der Deutsche Bucht wurden die Komponenten CurrentModel2D, SaltTransportModel2D, SedimentModel2D und WaveHypModel2D genutzt.

4.5.2 Hydrodynamik

Die Hydrodynamik wird nach ihren Zeitskalen in einen turbulenten, Seegangs- und langperiodischen Anteil unterteilt. Turbulenz ist ein kleinräumiges und sehr „kurzperiodisches“ Phänomen und wird in den Modulen von MARINA nur parametrisiert berücksichtigt.

Großräumige Strömung

Die Strömungsphänomene in der Deutschen Bucht basieren im Wesentlichen auf den Gezeiten, Dichteunterschieden im Wasserkörper und dem Windeinfluss.

Die Gezeitenströmung wird hauptsächlich hervorgerufen durch die halbtägigen M2- und S2-Gezeiten sowie deren zum Spring-Nipp-Zyklus führenden Überlagerungen. Die Tidesströmung ist insbesondere in den Ästuarbereichen recht groß, jedoch ist ihr resultierender Anteil eher klein gegenüber den anderen Anteilen. Das Tidesignal führt zu einem Ausgleich in der Morphodynamik.

Das Modul CurrentModel2D löst die tiefenintegrierten Flachwassergleichungen und berücksichtigt wind-, seegangs- und dichteinduzierte Strömung.

Die Randbedingungen des großräumigen Strömungsmodells entsprechen den gemeinsamen Randbedingungen und Oberwasserabflüssen (vgl. Kapitel 4.1.5).

Seegang

Der Seegang hat durch seine periodischen Strömungen und insbesondere durch den Energieeintrag in den Wasserkörper beim Wellenbrechen in Form von Turbulenz eine ganz besondere Bedeutung für den Sedimenttransport.

Das Seegang-Modul WaveHypModel2D löst die hyperbolischen Seegangsgleichungen und berücksichtigt den Energieeintrag durch Wind, Refraktion, Shoaling und Diffraktion sowie die Interaktion mit einer zugrundeliegenden Strömung

Als Randbedingungen für den Seegang (vgl. Kapitel 4.1.5) wurden an den Modellrändern der offenen See auf der Basis des Windes folgende Zeitreihen verwendet:

- mittlere Wellenanlaufrichtung entspricht der Windrichtung am Modellrand
- mittlere Wellenperiode ergibt sich aus der Wurzel der Windgeschwindigkeit:
 $T = 1,8 \sqrt{u * w}$
- die mittlere Wellenhöhe wird zu Null gesetzt

4.5.3 Morphodynamik

Das Sedimenttransportmodul SedimentModel2D berechnet

- den mittleren Transport von suspendiertem Material und Bodenfracht
- die Bodenevolution
- die Entwicklung des D_{50}
- die Ausprägung von subaquatischen Dünen
- die Porosität der oberen Schicht des Sedimentes

Im Modul zur Berechnung der Morphodynamik mit MARINA wird das Oberflächensediment durch einen mittleren Korndurchmesser und die Sortierung parametrisiert. Beide Parameter wurden aus dem Funktionalen Bodenmodell interpoliert. Als Randbedingungen für den suspendierten und den bodennahen Transport kam die Annahme eines gesättigten Transportes über die Modellränder zur Anwendung. Die initiale Porosität wurde aus den Kornparametern über die Formel von Komuras 1963 berechnet:

$$p = 0.13 + \frac{0.21}{(d_{50} + 0.002)^{0.21}}$$

Als Anfangswerte wurden keine Bodenformen vorgegeben.

Modellvalidierung

Allgemeine Anmerkungen zur Modellvalidierung siehe Kapitel 2.5.2

Der Validierungszeitraum war im Wesentlichen das Jahr 2006. Die Validierung der Hydrodynamik und des Seegangs erfolgt im Kapitel 4.2.

Die Validierung des morphodynamischen Moduls erfolgte schrittweise. In einem ersten Schritt wurden die prognostizierten resultierenden Transporte an Querschnitten in der Elbe mit ADCP-basierten Schwebstoffmessungen verglichen. In einem zweiten Schritt konnte eine gute Übereinstimmung der simulierten Dünenparameter mit teilautomatisch generierten Dünenparametern aus dem Funktionalen Bodenmodell nachgewiesen werden. Nicht zu letzt wurde die Bodenevolution zum Nachweis der Modellgüte betrachtet.

Bodenevolution

Durch regelmäßige Vermessungen des Gewässerbodens in Verbindung mit geeigneten räumlichen und zeitlichen Interpolationsverfahren lassen sich Veränderungen der Lage des Gewässerbodens, im Rahmen der Messunschärfe, recht gut bestimmen. Wesentlich bei diesen Analysen, sind sowohl die Räumliche als auch zeitliche Auflösung der Vermessungsdaten. Vergleiche zwischen den Ergebnissen der prozessbasierten Simulationsmodelle und den datenbasierten Ergebnissen des Funktionalen Bodenmodells lassen sich in verschiedenen Integrationsstufen durchführen. Für großräumige Fragestellungen bieten sich beispielsweise flächenhafte und volumetrische Analysen an. Exemplarisch ist in der Abbildung 4-50 die Veränderung der Wattfläche (vom Deichfuß bis zur 2 m Tiefenlinie) dargestellt.

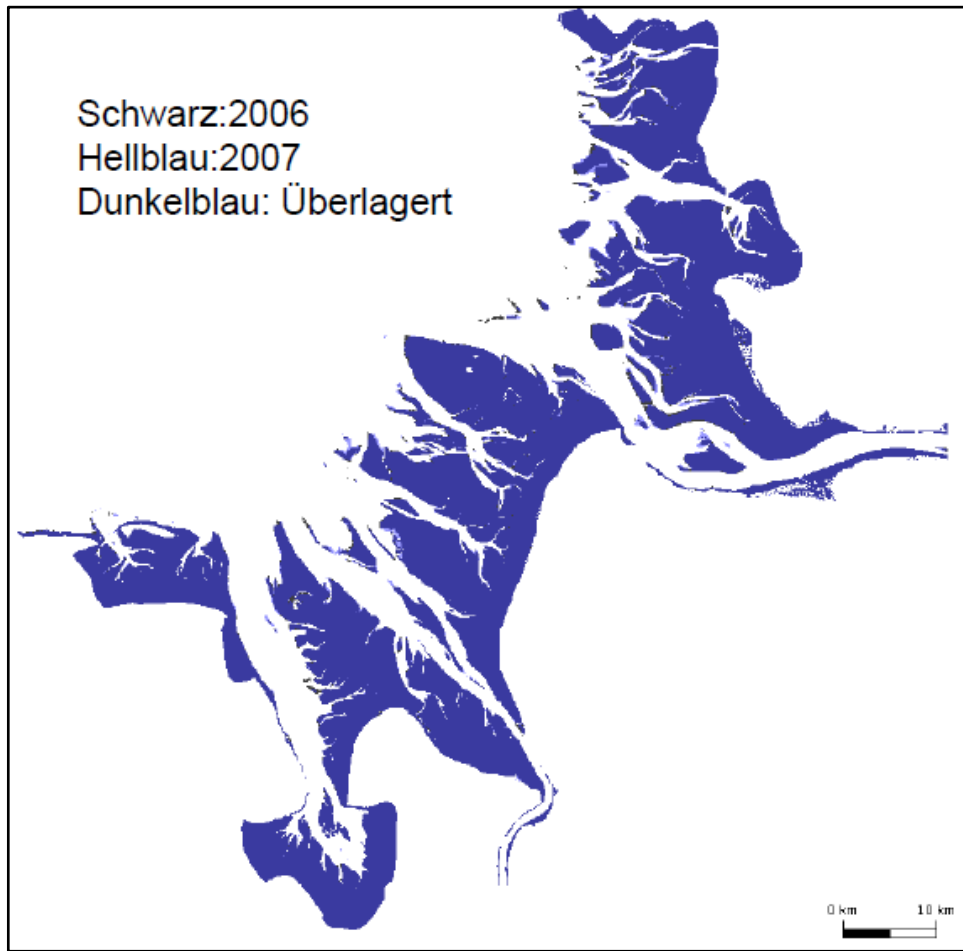


Abbildung 4-50: Bereich der volumetrischen Analysen (-2 bis -2 m NHN)

Werden die Tiefenänderungen an den Knoten des Berechnungsgitters in einem Histogramm zusammengefasst, lässt sich dessen Ausprägung analysieren. Werden die Tiefenänderungen an den Knoten mit den repräsentativen Voronoiflächen verknüpft, können Aussagen zur beobachteten und prognostizierten Entwicklung von Erosions- und Sedimentationsflächen als auch –volumen gegeben werden (hierauf wird in 4.2.6 näher eingegangen).

4.6 Entwicklung des Langfristsimulationsmodells

Langfristige morphodynamisch-numerische Simulationen sind selbst auf heutigen Hochleistungsrechnern rechenintensiv und langwierig. Um diese trotzdem in einem realistischen Zeitrahmen durchführen zu können und zudem eine stabile Simulation zu gewährleisten, könnten die zugrunde liegenden Gleichungen der Aufgabenstellung angepasst und Parametrisierungen physikalischer Prozesse verwendet werden.

Aufgrund dieser Rahmenbedingungen wurde ursprünglich ein Simulationskonzept vorgeschlagen, das nur die wichtigsten treibenden Prozesse berücksichtigt und bei Bedarf um zusätzliche physikalische Prozesse oder numerische Verfahren erweitert werden kann (Modellsystem NSea100). Die Basis hierfür bildete ein Ansatz zur effizienten Lösung der tiefengemittelten Impulsgleichungen als morphodynamischer Treiber. Eine eingehende Anwendung und Analyse des Ansatzes hat im Projektverlauf jedoch gezeigt, dass damit die Ziele im Rahmen dieses Projektes nicht erreicht werden konnten.

Die Auswertung langfristiger prozessorientierter Simulationen hat plausible, teilweise aber auch unplausible morphodynamische Entwicklungen gezeigt. Insbesondere konnte beobach-

tet werden, dass sich in Rinnen und Ästuaren nur lokal Sediment abgelagert hat und in der Folge nur dort der Fließquerschnitt verschlossen wurde. Zusätzliche Simulationen und eine eingehende theoretische Analyse der verwendeten Gleichungen haben gezeigt, dass sich in diesem Fall die von NSea100 berechnete Strömungsgeschwindigkeit nicht den morphologischen Änderungen anpasst. Begründet wird dieses Verhalten durch die Vernachlässigung der Kontinuitätsgleichung, die bei morphologischen Änderungen zu lösen ist.

Deshalb wurde zunächst eine Erweiterung des Ansatzes geprüft. Untersucht wurden u. a. Verfahren auf Basis der Poissongleichung / Streamfunktion oder eine Korrektur der Impulsgleichungen unter Berücksichtigung der Kontinuitätsgleichung. Dabei hat sich gezeigt, dass die zusätzlichen Gleichungen zu einem wesentlich höheren Rechenaufwand führen. Mit Hinblick auf die Zielstellung einer 100-Jahre-Simulation und der ständig steigenden Rechnerleistung, wurden deshalb andere numerische Modellverfahren in Betracht gezogen. Es wurde eine Neubewertung alternativer numerischer Verfahren vorgenommen, die den ursprünglich vorgeschlagenen morphodynamischen Treiber adäquat ersetzen sollten. Als Ergebnis wurde die erst seit 2010, also nach dem Zeitpunkt des Projektantrages, frei erhältliche Finite-Element-Software TELEMAC (Hervouet, et al., 2000) gewählt und in das Simulationskonzept integriert. Das darauf basierende Langfristsimulationssystem wird in den folgenden Abschnitten näher erläutert. Die Validierung wird zusammen mit den anderen prozessbasierten Modelluntersuchungen gezeigt (Kapitel 4.2).

Trotzdem wird aufgrund der Vorteile dieses Ansatzes empfohlen, ihn für zukünftige Projekte zu erwägen und ggf. verbessert einzusetzen, wenn nicht die Morphodynamik im Vordergrund steht sondern die Hydrodynamik über lange Zeitspannen simuliert werden soll. Der vorgeschlagene Ansatz ist numerisch sehr stabil, effizient sowie auf einem unstrukturierten Gitternetz lauffähig. Zudem können unter Vorgabe geeigneter Partialtiden hydrodynamisch relevante Langfristeffekte auch für komplexe Topographien untersucht werden. Die Grundlagen und exemplarische Ergebnisse dazu werden im Anhang 8.5 dokumentiert.

Einbindung des TELEMAC-Systems

Die Performance von TELEMAC war insgesamt die beste bei wesentlich verbesserter Physik, was auf den hohen Optimierungsgrad des Telemacsystems und die zugrundeliegenden Gleichungen zurückzuführen ist. Darüber hinaus bietet es die Möglichkeit weitere Randbedingungen wie Oberwassereinfluss, Wind oder auch Seegang zu berücksichtigen und ist durch die MPI-Erweiterung auf Parallelrechnen einsetzbar.

Zum Aufbau des prozessbasierten Langfristsimulationssystems wurden aus dem TELEMAC-System folgende Module ausgewählt:

- 2D-Strömungsmodell TELEMAC-2D (Electricité de France, 2010b),
- spektrale Seegangsmodell TOMAWAC (Electricité de France, 2011) und
- morphodynamische Modell SISYPHE (Electricité de France, 2010a)

Die Modellierung von Unterhaltungsmaßnahmen erfolgte weiterhin mit dem Paket DredgeSim.

Verwendete numerische Modelle des Telemac-Systems

Hydrodynamikmodell

Das TELEMAC-2D-Modell löst die tiefengemittelten Flachwassergleichungen für Strömungen mit freier Wasseroberfläche. Die wesentlichen Ergebnisse an jedem Knoten des Rechen-

gitters sind die Wassertiefe und die tiefengemittelten Strömungsgeschwindigkeiten. Für die Simulationen wurde das Elder-Turbulenzmodell gewählt und ein konstanter Coriolisparameter für das gesamte Modellgebiet gewählt. Besondere Beachtung wurde der Modellierung der Wattflächen gewidmet. Hierfür wurden das neu in TELEMAC-2D implementierte kantenbasierte Advektionsschemata gewählt, welches besonders für Modellgebiete mit trockenfallenden Gitterknoten geeignet ist. Die Wattstrategie vermeidet negative Wassertiefen und ist gleichzeitig massenerhaltend. Als Zeitschritt wurden 200 s gewählt. Die Sohlrauheit wird durch SISYPHE bereitgestellt.

Seegangmodell

Die Seegangmodellierung wurde mit TOMAWAC durchgeführt. Es ist ein Seegangmodell der dritten Generation und dient zur Simulation der Seengangausbreitung in Küstengebieten. Es löst die Wave-Action-Gleichung an jedem Knoten des Gitternetzes und liefert als wesentliche Ergebnisse die signifikante Wellenhöhe, die Peakfrequenz und die Wellenrichtung. Diese werden für morphodynamische Simulationen unter Seegangwirkung mit SISYPHE benötigt. Das Frequenz-Richtungs-Spektrum wurde mit 8 Frequenzen und 8 Richtungen diskretisiert. Die Simulationen für den Zeitraum 1996 bis 2006 wurden ohne Wasserspiegeländerung bei einem Zeitschritt von 600 s durchgeführt.

Morphodynamikmodell

Das morphodynamische Modell SISYPHE wurde zur Simulation von Sedimenttransport und der daraus resultierenden Sohlevolution verwendet. Die Zusammensetzung des Gewässerbodens wurde durch 8 Sedimentfraktionen diskretisiert:

- Very coarse sand mit $d=1.4 \times 10^{-3}$ m
- Coarse sand mit $d=7 \times 10^{-4}$ m
- Medium sand mit $d=3.5 \times 10^{-4}$ m
- Fine sand mit $d=1.7 \times 10^{-4}$ m
- Very fine sand mit $d=8.8 \times 10^{-5}$ m
- Coarse silt mit $d=4.4 \times 10^{-5}$ m
- Fine silt mit $d=1.1 \times 10^{-5}$ m
- Clay mit $d=1.9 \times 10^{-6}$ m

Zur vertikalen Diskretisierung wurde der initiale Bodenaufbau durch 2 Schichten repräsentiert. Die oberste transportaktive Schicht (Active-Layer) steht in direktem Kontakt mit dem angrenzenden Wasserkörper. Die Dicke betrug das Dreifache des mittleren Korndurchmessers. Darunter wurde eine Schicht definiert, die sich bis an den nicht-erodierbaren Horizont anschloss. Beide Schichten zusammen bildeten die initiale Mächtigkeit der Sedimentschicht.

Der Sedimenttransport und die Sohlevolutionsgleichung wurden für jede Fraktion separat aus den tiefengemittelten Strömungsgeschwindigkeiten und der Wassertiefe berechnet. Die Schwebstofffracht wurde durch Lösen der tiefengemittelten Transportgleichung ermittelt. Die Geschiebefracht wurde nur für die nicht-kohäsiven Fraktionen berechnet. Eine Vielzahl an Sedimenttransportformeln für Geschiebetransport für Strömung und Wellen sind implementiert, von denen die Formel nach Bijker gewählt wurde. Sie bietet die Möglichkeit, die Seegangwirkung zu berücksichtigen. Die Geschiebefracht erscheint im Divergenzterm der Sohlevolutionsgleichung und führt zusammen mit dem Erosions- und Depositionsfluss aus dem Schwebstofftransport zu Sohländerungen. Der Zeitschritt betrug ebenfalls 200 s, wobei morphodynamische Beschleunigungsverfahren nicht angewendet wurden.

4.6.1 Modellkopplung

Das Langfristsimulationssystem wird durch TELEMAC-2D gesteuert, das mit SISYPHE direkt gekoppelt ist. In jedem Zeitschritt werden von TELEMAC-2D die Wassertiefe und die Strömungsgeschwindigkeit an SISYPHE übermittelt. Daraus wird der Sedimenttransport als Geschiebe und als Schwebstoff berechnet. Anschließend wird die Exnergleichung für jede Sedimentfraktion gelöst. Das Ergebnis des morphodynamischen Schrittes ist die Sohlevolution an jedem Gitterknoten und die Fraktionierung des Sediments.

Im Fall einer Simulation mit DredgeSim, welches in SISYPHE integriert ist, wird anschließend die Wirkung von Baggern und Verklappen simuliert.

Die Sohlage und die Sohlrauheit werden am Ende eines Zeitschrittes von SISYPHE an TELEMAC-2D gesendet und die Simulation kann so mit veränderter Bathymetrie im nächsten Zeitschritt fortgeführt werden.

Der Seegang wurde entkoppelt und a priori mit dem spektralen Seegangsmodell TOMAWAC gerechnet. Die Seegangsparameter wurden als Datei gespeichert, welche während einer Simulation eingelesen wurde. SISYPHE berechnet daraus die seegangsinduzierte Sohl Schubspannung in jedem Simulationszeitschritt.

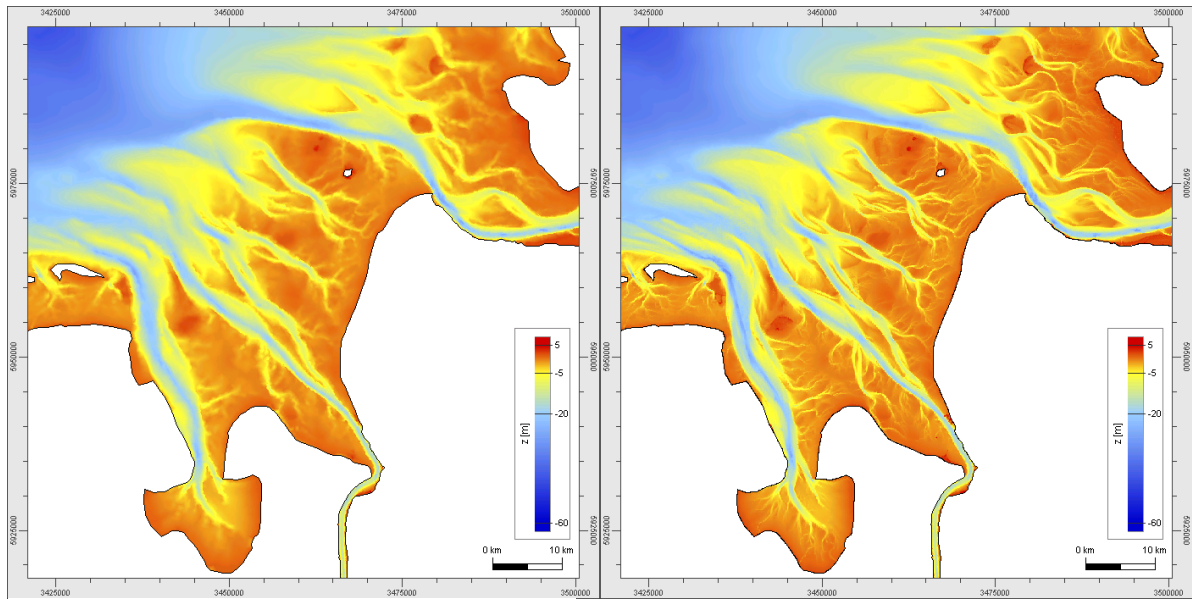
4.6.2 Gitternetz, Rand- und Anfangsbedingungen

Das Modellgebiet umfasst die Nordsee, den Englischen Kanal und den westlichen Teil der Ostsee. Das Gitternetz besteht aus ca. 80 000 Dreieckselementen und wurde im Rahmen von **AufMod** zur Verfügung gestellt (siehe Kapitel 4.1.3). Dieses Gitternetz wurde für alle oben genannten Modelle verwendet. Daneben wurde ein hochaufgelöstes Gitternetz entworfen (Feinmodell), das im Küstenbereich eine Auflösung von 100 m aufweist und dasselbe Gebiet wie das Basismodell umfasst. Dieses Feinmodell mit einer Elementanzahl von 2×10^6 wurde in Zusammenarbeit mit Projektpartnern zur Analyse von detaillierten Sedimenttransportprozessen verwendet.

Die Anfangs- und Randbedingungen entsprechen den im Gesamtprojekt verwendeten Daten (siehe Kapitel 4.1.4, 4.1.5). Abweichend von diesen Vorgaben wurde hier jeweils ein konstanter Oberwasserzufluss berücksichtigt für:

- die Elbe mit $870 \text{ m}^3/\text{s}$ (WSA Cuxhaven, 2012)
- die Ems mit $80.1 \text{ m}^3/\text{s}$ (NLWKN, 2006)
- die Weser mit $324.0 \text{ m}^3/\text{s}$ (NLWKN, 2006)
- den Rhein mit $2330 \text{ m}^3/\text{s}$
- die Themse mit $65.8 \text{ m}^3/\text{s}$

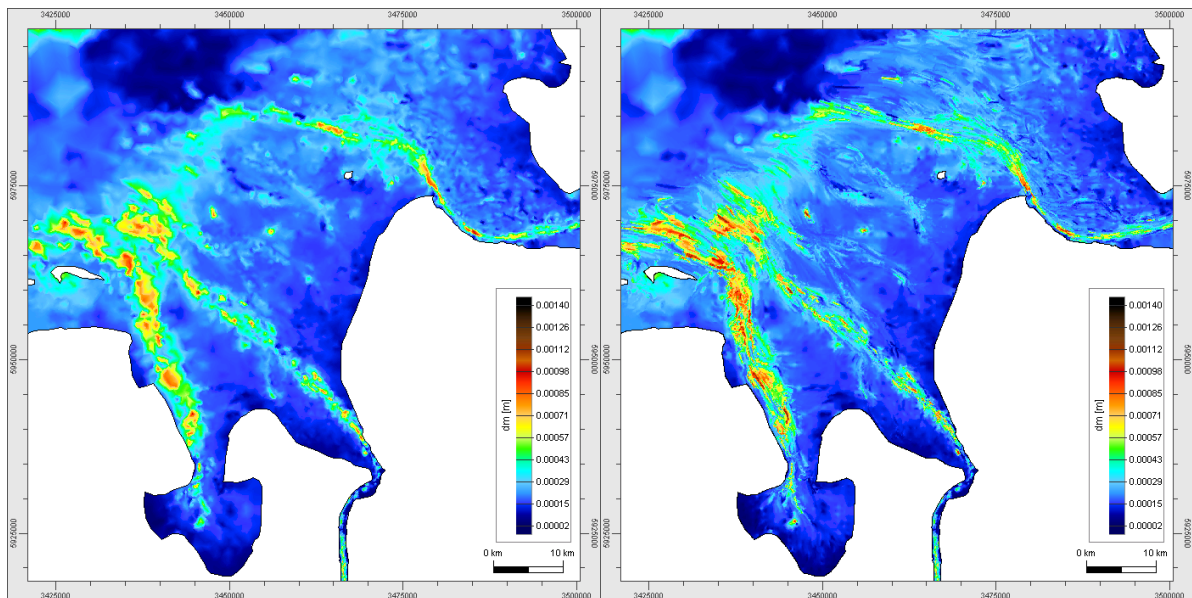
Die initiale Bathymetrie wurde durch das Funktionale Bodenmodell generiert und für verschiedene Jahre bereitgestellt. Abbildung 4-51 zeigt sie für das Jahr 2006. Die initiale Sedimentdicke wurde konstant mit 20 m im gesamten Modellgebiet definiert. Die initiale Sedimentbelegung basiert auf den anisotropen Sedimentdaten des Funktionalen Bodenmodells. Der daraus berechnete mittlere Korndurchmesser ist in Abbildung 4-52 dargestellt.



a) Grobmodell mit 70 000 Elementen

b) Feinmodell mit 2×10^6 Elementen

Abbildung 4-51: Initiale Bathymetrie von 2006 im Bereich der Elbe-Weser-Mündung



a) Grobmodell mit 70 000 Elementen

b) Feinmodell mit 2×10^6 Elementen

Abbildung 4-52: Mittlerer Korndurchmesser der initialen Sedimentbelegung im Bereich der Elbe-Weser-Mündung auf Basis anisotrop interpolierter Sedimentdaten

Grundlage für Langfristsimulationen bildeten, wie bei den anderen Modellsystemen in **AufMod**, die Windfelder des DWD. Hieraus wurden mit TOMAWAC die Seegangsfelder der Jahre 1996 bis 2006 berechnet. Aus diesen Daten wurde ein Teildatensatz für eine bestimmte Periode, z. B. für das Jahr 2006, generiert. Das Telemac-System wurde für eine 100-jährige Simulationen so modifiziert, dass dieser Teildatensatz permanent wiederholt wurde. Auf diese Weise konnten mit realistischen Belastungen langfristige Simulationen durchgeführt werden.

4.6.3 Modellierung von Unterhaltungsmaßnahmen

Die Unterhaltungsstrategien wurden im Rahmen des Forschungsprojektes **AufMod** mit Hilfe des Softwarepakets DredgeSim simuliert. Dazu wurden für die drei großen deutschen Ästuarare Elbe, Weser und Ems Baggerkriterien definiert, die jeweils aktuelle Unterhaltungsstrategie enthalten.

Simulation der Baggermaßnahmen durch Referenzwasserspiegel

Für die Definition der Baggeroperationen beim Referenzwasserspiegellagenkriterium sind die Referenztiefe, die Solltiefe und die kritische Tiefe vorzugeben. Die Referenztiefe gibt das Referenzniveau vor, auf das alle Vorhaben bezogen werden. Eine solche Definition ist im Bereich der Flüsse und Ästuarare erforderlich, da man es hier mit variablen Wasserspiegellagen infolge schwankender Abflüsse und des Tideeinflusses zu tun hat. Im Küstenbereich werden daher alle wasserbaulichen Vorhaben in der Regel auf das NN-Niveau bezogen. Bei Binnenflüssen wird eine Referenzwasserspiegellage berechnet, um bauliche Maßnahmen auf diesen Wert zu orientieren. Im Rahmen der Gewässerunterhaltung werden die Solltiefen auf dieses Niveau bezogen. Der tiefste Punkt der Solltiefe für die Fahrrinne in der Tideelbe liegt beispielsweise bei -16.94 mNHN.

Bei der Modellierung der Baggervorgänge in DredgeSim wird diese Referenzwasserspiegellage (RWL) in einer einfachen Datei vorgegeben. Für das Forschungsprojekt **AufMod** wurde darin beispielsweise für die Ästuarare ein Polygon definiert, an deren Eckpunkten die Referenzhöhe bei NN liegt. Während der Initialisierung von DredgeSim werden sodann allen Gitterpunkten, die innerhalb dieses Polygons liegen, jene Werte zugewiesen. Im Falle unterschiedlicher Höhen, wie sie im Binnenbereich vorkommen, würden die Werte auf die in dem Polygon liegenden Knoten interpoliert werden.

Des Weiteren sind in DredgeSim Werte für den Baggerbeginn und die Baggertiefe vorzugeben. Der Baggerbeginn wird bei Verwendung des Referenzwasserspiegellagenkriteriums durch eine kritische Tiefe, bezogen auf die RWL definiert. Diese kann unterschiedliche Werte für die verschiedenen Abschnitte der Fahrrinne aufweisen. Die zu vereinbarende Baggertiefe ist die Tiefe unterhalb der RWL, die durch den Baggervorgang hergestellt werden soll. Für die Modellierung im Rahmen des Forschungsprojektes **AufMod** wurden sowohl die kritische Tiefe als auch die Baggertiefe gleich den jeweiligen Solltiefen der Fahrrinne eines Ästuars gesetzt. Sie besitzen damit denselben Wert.

Weitere Vorgaben für ein Baggerkriterium sind der Peilbeginn, das Peilintervall und die Baggerraten für jeden Abschnitt. Der Peilbeginn beschreibt den ersten Zeitpunkt eines Peilvorgangs in DredgeSim, bei dem die aktuellen Tiefen bezogen auf die RWL mit den kritischen Tiefen verglichen werden. Das Peilintervall gibt die Wiederholung dieses Vorgangs an. Mit der Baggerrate wird die Entnahmemenge definiert, die pro Zeitschritt entnommen werden kann. Diese kann aufgrund tatsächlicher Förderraten eines Nassbaggers oder aus numerischen Gründen spezifiziert werden.

Solltiefen für das Elbe-Ästuar

Die Daten über die abschnittswisen Solltiefen für die Tideelbe wurden durch die Bundesanstalt für Wasserbau Hamburg bereitgestellt. Die Solltiefen sind von der Elbmündung bis zum Hamburger Hafen nicht konstant sondern weisen eine konkave Wölbung in der Mitte der Strecke auf, bei der die Solltiefe geringer als in den Randbereichen ist (blaue Linie in Abbildung 4-53).

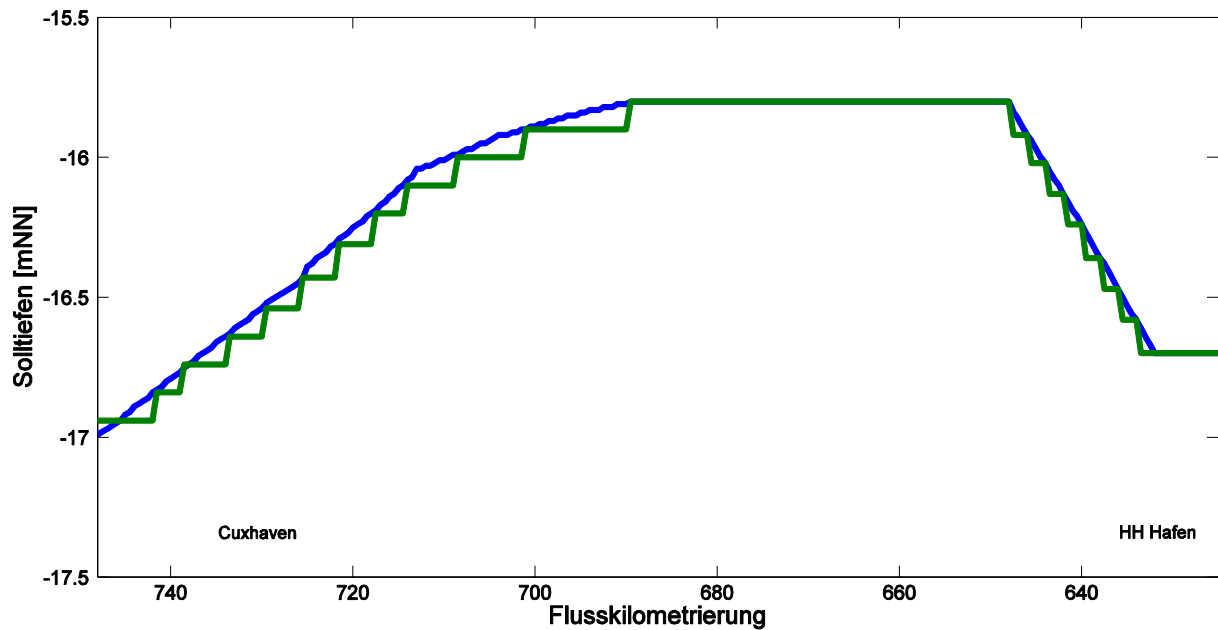


Abbildung 4-53: Einteilung in Abschnitte der Tideelbe mit konstanten Solltiefen für DredgeSim

Um diesen Verlauf der Solltiefen in DredgeSim zu berücksichtigen, wird die Fahrrinne in verschiedene Abschnitte unterteilt. Jedem Abschnitt wird eine Solltiefe zugeordnet, die sodann in DredgeSim als kritische Tiefe und als Aushubtiefe verwendet wird. Die Einteilung in diese Abschnitte erfolgt anhand von Beobachtungspolygonen, die im IPDS-Format vorgehalten werden. Die einzelnen Bereiche sind in ihrer räumlichen Ausdehnung durch die Fahrinnenkoordinaten bestimmt. Als Ergebnis erhält man eine Treppenfunktion, die dem Verlauf der wirklichen Solltiefen angepasst ist.

Für eine möglichst detaillierte Darstellung in DredgeSim sollte das Intervall der Solltiefenänderung zur Erzeugung der Treppenfunktion relativ klein gewählt werden. Da es in der Tideelbe Bereiche gibt, in denen sich die Tiefen auf einer kurzen Strecke relativ stark ändern, wurde ein 10 cm-Raster angewendet, um die einzelnen Abschnitte für konstante Solltiefen festzulegen. Insgesamt ergeben sich somit 20 Bereiche, die durch jeweils ein Beobachtungspolygon diskretisiert wurden (Abbildung 4-53).

Solltiefen für das Weser-Ästuar

Auch im Weser-Ästuar liegen keine konstanten Solltiefen vor. Hier ist ein signifikanter, seeseitiger Abfall der Tiefen ab Bremerhaven zu erkennen (Abbildung 4-54). Der Grund liegt darin, dass an der Weser zwei große Häfen liegen.

Für die Simulation in DredgeSim wurde die Fahrrinne des Weser-Ästuars in ähnlicher Weise wie die Tideelbe diskretisiert. Die dazu erforderlichen Daten über die Solltiefen und Fahrinnenkoordinaten wurden durch die WSÄ Bremen und Bremerhaven bereitgestellt. Die Fahrrinne wurde in Abschnitte mit konstanten Solltiefen unterteilt, die in DredgeSim als kritische Tiefe und als Baggertiefe verwendet werden. Für das Weser-Ästuar wurde analog zur Tideelbe ein Maß von maximal 10 cm für die Solltiefensprünge gewählt, um die Beobachtungspolygone zu definieren.

Insgesamt wurde die Fahrrinne des Weser-Ästuars auf diese Weise in 34 Beobachtungspolygone unterteilt. Sie besitzen gemäß der Vorgaben einen Höhenunterschied von 10 cm, außer auf den ersten Kilometern nahe der Hansestadt Bremen. Hier vollzieht die Solltiefe innerhalb der ersten Kilometer eine Änderung von 4,50 m auf 10,10 m, weshalb hier größere

Sprünge zugelassen worden sind, um das Profil diskretisieren zu können. Ein weiterer größerer Sprung ist von Kilometer 58 bis Kilometer 67 zu berücksichtigen. Hier wird über vier Beobachtungspolygone eine Höhe von 4.20 m überwunden. An dieser Stelle befindet sich Bremerhaven.

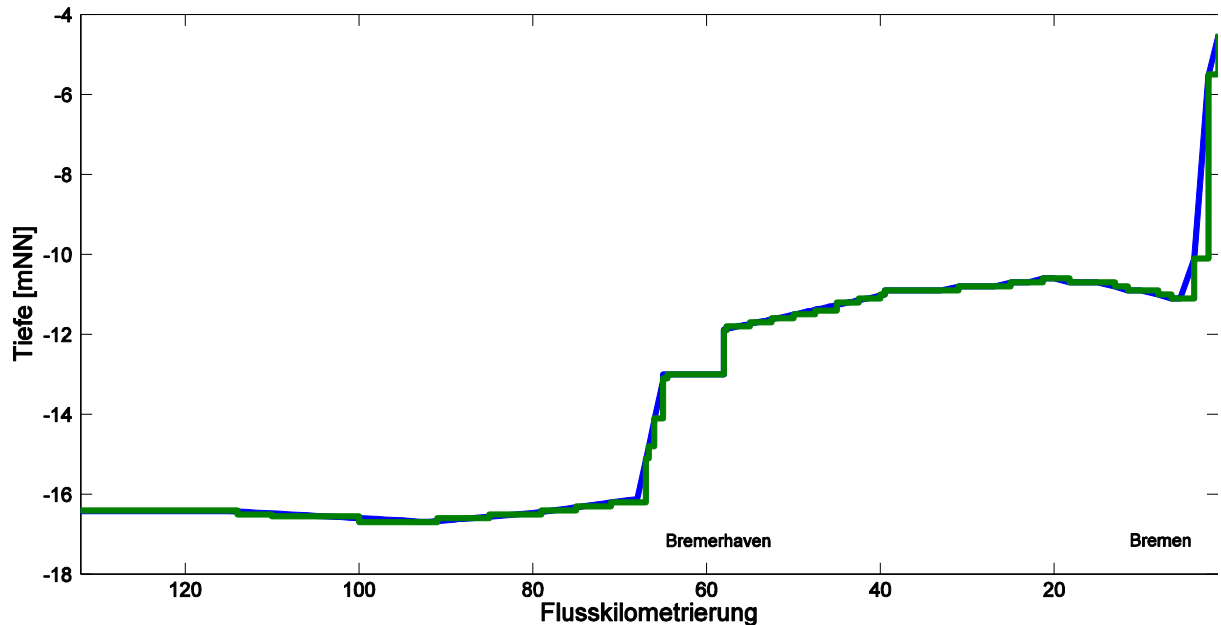


Abbildung 4-54: Einteilung in Abschnitte des Weser-Ästuars mit konstanten Solltiefen für DredgeSim

Solltiefen für das Ems-Ästuar

Die Daten über die Solltiefen der Ems wurden durch das WSA Emden bereitgestellt. Diese waren bereits idealisiert und konnten daher direkt für die Modellierung verwendet werden. Auch hier sind größere Solltiefensprünge zu erkennen (Abbildung 4-55). Bei Kilometer 40 ändert sich die Zieltiefe von 5.04 m auf 8.10 m, auf Höhe von Kilometer 68 von 8.60 m auf 9.60 m und bei Kilometer 74.62 von 9.60 m auf 12.1 m.

Bei km 40 befindet sich der Hafen Emden. Daher ist ein größerer Tiefgang von der Außenems bis zu dieser Stelle erforderlich, damit auch größere Schiffe abgefertigt werden können.

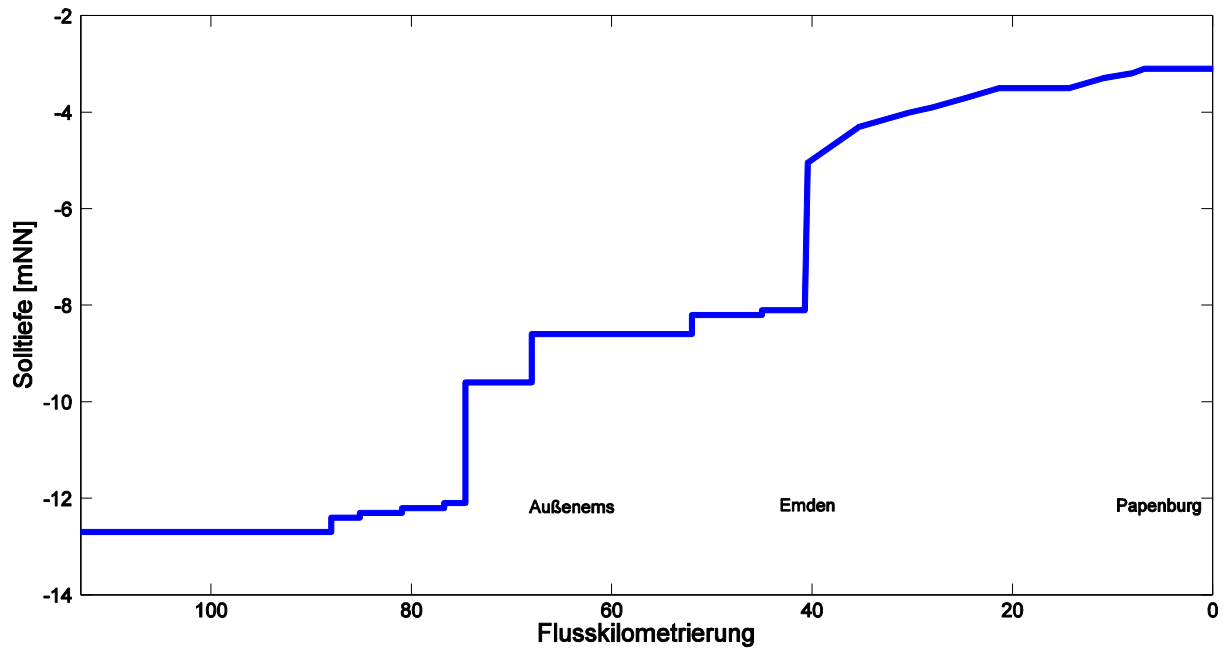


Abbildung 4-55: Solltiefen des Ems-Ästuars

4.6.4 Modellierung von Baggergutumlagerungen

Für eine gute und nachhaltige Unterhaltungsstrategie ist es in der Regel erforderlich das Baggergut an einer geeigneten Stelle im Gewässer zu verbringen bzw. umzulagern. Im Lauf der Jahre haben sich verschiedene Unterhaltungsstrategien aus der Notwendigkeit einer Anpassung der Baggergutumlagerung aus wirtschaftlichen und ökologischen Überlegungen heraus entwickelt. An der Tideelbe hat sich beispielsweise durch die Baggergutverbringung an der Stadtgrenze zu Hamburg über die Jahre ein Baggerkreislauf entwickelt, indem die umgelagerten Sedimente durch das flutstromdominierte Transportregime wieder in die baggerintensiven Hafenbereiche verdriftet sind, wo sie wenig später erneut gebaggert wurden. Durch die Umstellung der Unterhaltungsstrategie konnte dieser Kreislauf durchbrochen werden. Unter anderem wurde das Hamburger Baggergut eine Zeitlang in der Nordsee verbracht, wodurch ein Rückgang der Baggermengen festgestellt wurde (Hamburg Port Authority und Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes, 2008). Die verfolgten Konzepte für die Fahrrinnenunterhaltung unterliegen einem ständigen Wandel, der nicht zuletzt darauf zurückzuführen ist, dass immer detailliertere Messungen und Analyseverfahren zur Verfügung stehen, mit denen neue Optimierungsansätze verfolgt werden können.

Da im Rahmen des Forschungsprojektes *AufMod-D* für die drei großen deutschen Ästuarie die jeweils aktuelle Unterhaltungsstrategie modelliert werden sollte, mussten die Verbringungsmaßnahmen ebenfalls berücksichtigt werden. Auch die Verbringung von gebaggerten Sedimenten kann in DredgeSim simuliert werden. Dazu wird die Lage der Umlagerungsstellen wieder im IPDS-Format definiert. In den Steuerdaten erfolgt sodann die Zuordnung der Verbringstellen zu den Baggerschwerpunkten. Die Zuordnung wurde anhand von Daten und Statistiken vorgenommen, die für die Tideelbe durch die Bundesanstalt für Wasserbau Hamburg und die WSÄ Cuxhaven und Hamburg, für die Weser durch die WSÄ Bremen und Bremerhaven sowie im Fall der Ems durch das WSA Emden bereitgestellt wurden. Die Daten waren nicht immer eindeutig, weshalb die entwickelten Umlagerungsszenarien auch der Interpretation dieser Daten geschuldet sind.

Modellierung von Umlagerungen an der Tideelbe

Um eine möglichst aktuelle Umlagerungsstrategie für die Tideelbe zu erstellen, wurden Daten aus dem MoNa-System ausgewertet. Im MoNa-System werden alle Aufträge der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung zur Unterhaltung der Tideelbe dokumentiert (Bundesanstalt für Wasserbau, 2012). Auf diese Weise kann nachvollzogen werden, welche Mengen an Baggergut an den einzelnen Baggerschwerpunkten angefallen sind und auf welchen Verbringstellen es umgelagert wurde.

Die im Jahr 2010 für die WSÄ Hamburg und Cuxhaven zugelassenen sind in Abbildung 4-56 dargestellt. Man erkennt zum einen, dass sich die Umlagerungsstellen im Amtsbereich Cuxhaven über das gesamte Gebiet erstrecken. Zum anderen ist auch deutlich, dass die Verbringstellen im Amtsbereich Hamburg relativ nah an der Amtsgrenze zum WSA Cuxhaven liegen. Die Gründe sind hier im Wesentlichen im Transportregime zu suchen, indem man ein vermehrtes Verdriften in Richtung Hamburg vermeiden möchte. Nicht aufgeführt sind in dieser Grafik die Verbringstellen des WSA Brunsbüttel.

Ein Beispiel (Maerker, et al., 2011) über die Verteilung des angefallenen Baggerguts auf Umlagerungsstellen ist in den Abbildung 4-57 und Abbildung 4-58 zu sehen. Hier sind die verbrachten Baggermengen aus dem Jahr 2010 für die Verbringstellen 738 und 731 dargestellt. Man erkennt, dass 738 in diesem Jahr sehr ausgiebig genutzt wurde. Zudem ist die Verteilung der Mengen aus den einzelnen Baggerschwerpunkten aufgetragen, die die Herkunft der Baggermengen verdeutlicht.

Vergleicht man beide Grafiken, sieht man beispielsweise, dass die Baggermengen vom Osteriff (Elbe-km 698.5-709) fast ausschließlich auf 738 verbracht wurden. Das Baggergut aus dem Bereich Altenbruch (Elbe-km 717-726) wurde auf 738 und 731 verteilt, allerdings lag die Präferenz bei 738. Das Baggergut vom Medemgrund (Elbe-km 709-717) wurde hauptsächlich auf 731 umgelagert.

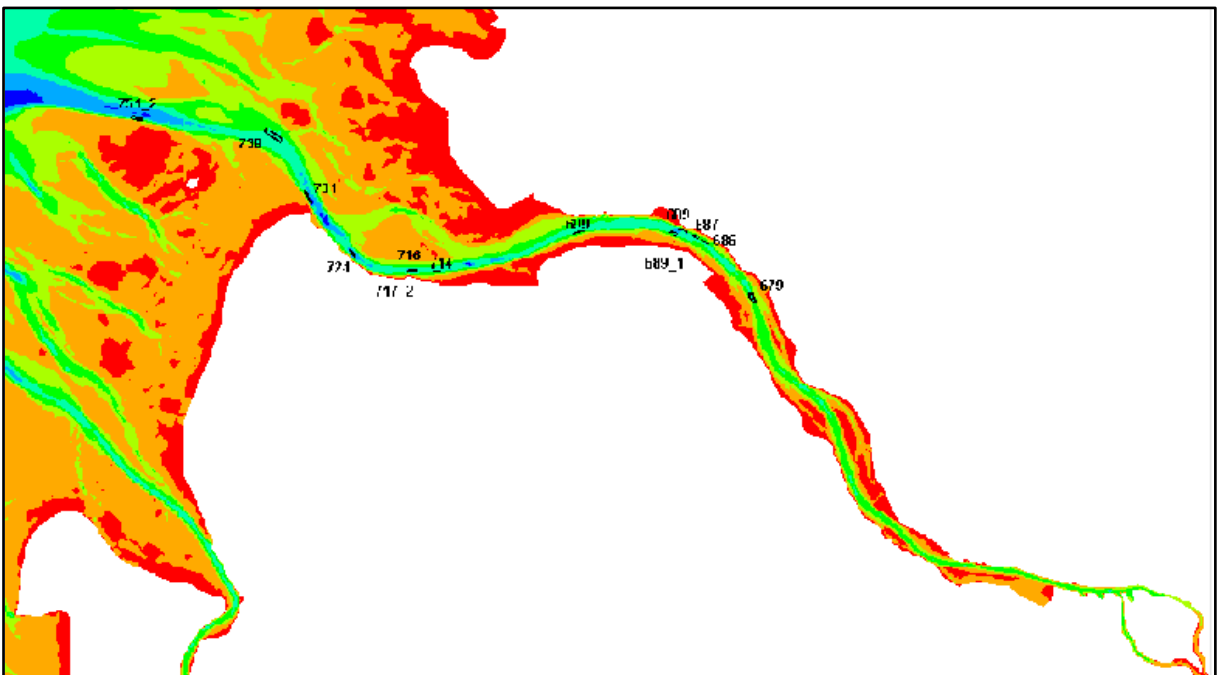


Abbildung 4-56: Zugelassene Verbringstellen in der Tideelbe im Jahr 2010

Anhand solcher Daten kann man erschließen, welche Verbringstelle für die einzelnen Baggerschwerpunkte der Hauptabnehmer ist. Für die Modellierung der Verbringmaßnahmen an der Tideelbe im Rahmen des Forschungsprojektes **AufMod** wurde auf diese Weise jedem Baggerabschnitt eine präferentielle Verbringstelle zugeordnet. Natürlich zeigt sich in den Daten am Beispiel von Altenbruch sehr deutlich, dass mitunter auch mehrere Umlagerungsstellen von einer Baggerstelle aus gespeist werden. Allerdings ist in den Daten über mehrere Jahre kein Muster zu erkennen, das eine Festlegung von Prozentsätzen ermöglicht. Vielmehr wird damit auf andere Begebenheiten reagiert, wie beispielsweise die Sicherung des Kolks am Kugelbakenleitdamms, der Verbringstelle 731 entspricht oder die Tatsache, dass eine Verbringstelle bereits ausgelastet ist. So zeigte sich im Folgejahr, dass die Verbringstelle 731 in den ersten sechs Monaten schon viel stärker frequentiert wurde als im gesamten Jahr 2010.

Ein weiterer Punkt, der bei der Zuordnung von Verbring- zu Baggerstellen zu beachten ist, ist der Paradigmenwechsel, der aktuell verfolgt wird. So wurde die Umlagerungsstelle 738 erst im Jahr 2009 eingerichtet. Zudem werden in den letzten Jahren verstärkt gröbere Sedimente bei 731 verbracht, um den Kugelbakenleitdamm zu stabilisieren.

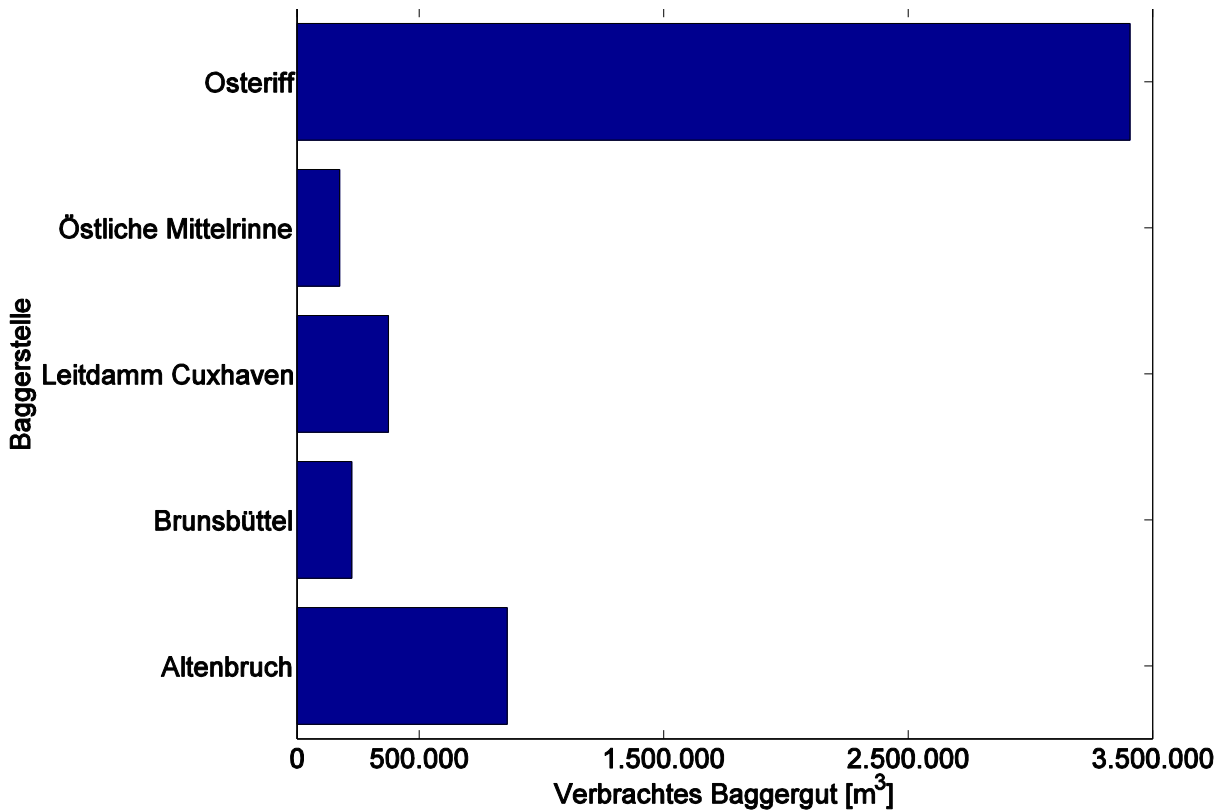


Abbildung 4-57: Baggergutumlagerungen auf VS 738 in 2010 (Maerker, et al., 2011)

Die Festlegung, welche Verbringstelle welchem Baggerabschnitt durch die verantwortlichen WSÄ zugeordnet wird, hängt von verschiedenen Einflussgrößen ab. Zum einen versucht man lange Wege zu vermeiden, damit Transportkosten eingespart werden. Des Weiteren soll das Material an Stellen untergebracht werden, von denen es nicht in kritische Bereiche verdriftet und beispielsweise Baggerkreisläufe hervorruft. Der wichtigste Parameter ist jedoch die Sedimentqualität und die Kornzusammensetzung. Bei Verbringmaßnahmen ist der Leitsatz „Gleiches Sediment zu gleichem Sediment“ zu verfolgen (BMVBS, 2009). Die Sediment-

beschaffenheit des Baggerguts muss demnach der Kornzusammensetzung an der Verbringstelle entsprechen.

Auf der Verwaltungsseite spielt die räumliche Abgrenzung des Amtsbereichs der WSÄ eine entscheidende Rolle für die Wahl der Verbringstellen, da die Verantwortlichen bestrebt sind die Maßnahmen auf ihrem Hoheitsgebiet durchzuführen. Darüber hinaus spielt insbesondere an der Tideelbe auch die Landesgrenzen eine Rolle. Durch das neue Sedimentmanagementkonzept für die Tideelbe wird versucht einen gemeinsamen Ansatz zu verfolgen.

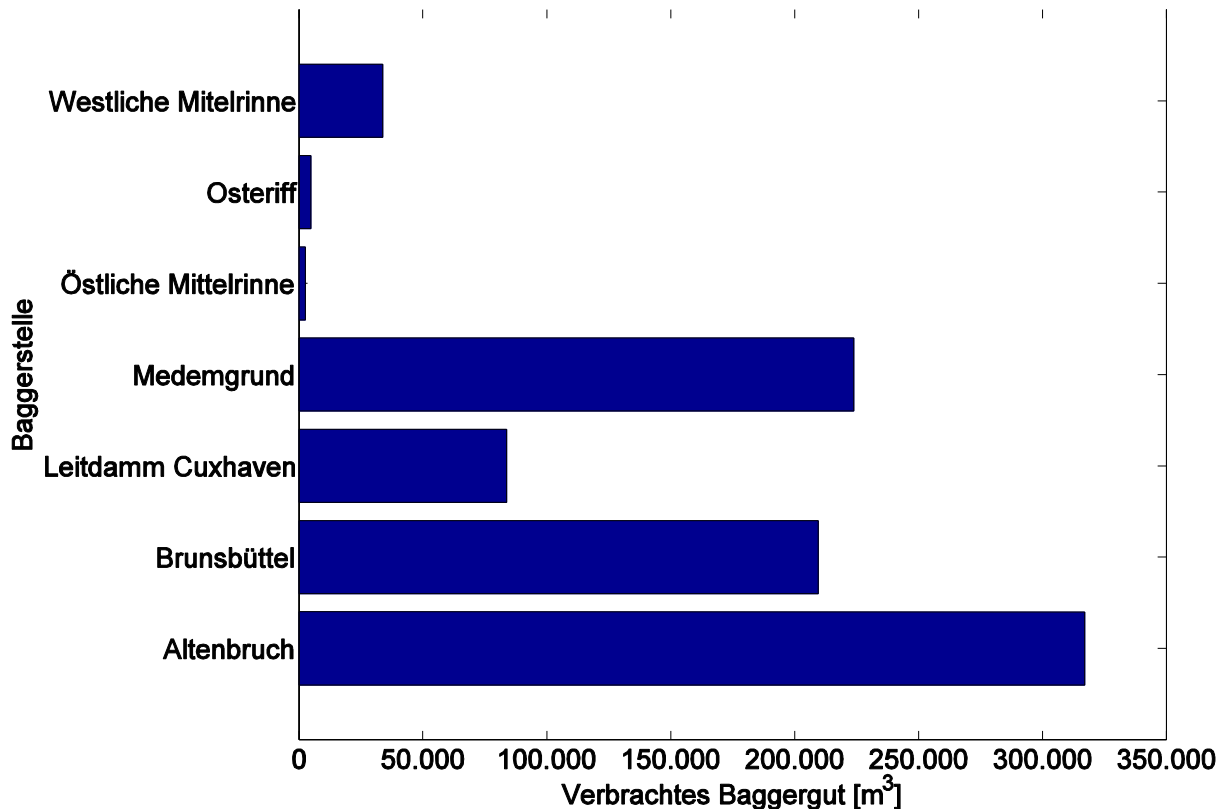


Abbildung 4-58: Baggergutumlagerungen auf VS 731 in 2010 (Maerker, et al., 2011)

Die aus diesen Daten abgeleitete Zuordnung der präferentiellen Verbringstellen zu den Baggerabschnitten ist in Tabelle 4-9 dargestellt. Da die gewählte Einteilung der Solltiefen zur Diskretisierung des Solltiefenprofils nicht deckungsgleich mit den Baggerabschnitten ist, wurden diese noch weiter verfeinert. Damit ergeben sich insgesamt 32 Beobachtungspolygone, die für die Modellierung der Unterhaltungsmaßnahmen an der Tideelbe berücksichtigt werden müssen.

Dem Baggergut aus den Fahrrinnenbereichen der Freien und Hansestadt Hamburg wurde als Verbringstelle die Tonne E3 in der Nordsee zugeordnet. Das entspricht teilweise der damaligen Strategie zur Durchbrechung des Sedimentkreislaufs. Gewisse Mengen an Baggergut wurden und werden auch nach wie vor im Bereich der Insel Neßsand verbracht. Diese Verbringstelle kann durch das im Forschungsprojekt **AufMod** verwendete sehr grobe Modellgitter allerdings nicht aufgelöst werden. Aktuell wird die Verbringstelle Tonne E3 nicht verwendet, da im Zuge der Erprobung des neuen Sedimentmanagementkonzepts andere Wege beschritten werden. Um eine gewisse Einheitlichkeit zu den oben beschriebenen Daten zu wahren, soll die Tonne E3 in diesen Studien noch verwendet werden.

Tabelle 4-9: Zuordnung von Verbringstellen zu Baggerschwerpunkten im Bereich der Tideelbe in **AufMod**

Baggerabschnitt	Verbringstelle	Baggerabschnitt	Verbringstelle
km 625-634	Tonne E3	km 680.5-685.5	689
km 634-636	Tonne E3	km 685.5-689.8	689
km 636-638	Tonne E3	km 689.8-698.5	731
km 638-638.9	Tonne E3	km 698.5-701.5	738
km 638.9-640	690	km 701.5-709	738
km 640-642	690	km 709-714.5	731
km 642-644	690	km 714.5-717	731
km 644-646	689	km 717-718	738
km 646-648	689	km 718-722	738
km 648-649.5	689	km 722-726	738
km 649.5-654.5	689	km 726-730	731
km 654.5-659	689	km 730-732	731
km 659-664.5	689	km 732-734	751_2
km 664.5-670	689	km 724-739	751_2
km 670-676	689	km 739-742	751_2
km 676-680.5	689	km 742-748	751_2

Modellierung von Umlagerungen am Weser-Ästuar

Die Festlegung der Verbringstellen für das Weser-Ästuar erfolgte anhand von übermittelten Daten der zuständigen WSÄ. Im Amtsbereich des WSA Bremen erfolgt die Gewässerunterhaltung ausschließlich mittels Wasserinjektionsgeräten. Auch das WSA Bremerhaven nutzt dieses Verfahren bis km 54. Das bedeutet, dass in diesen Bereichen praktisch kein Baggergut anfällt, das umgelagert oder anderweitig entsorgt werden muss. In DredgeSim wird dieses Vorgehen mit einem einfachen Baggerkriterium zur Überprüfung und Sicherstellung der Solltiefen modelliert. Das bedeutet, dass den betreffenden Baggerabschnitten keine Verbringstellen zugeordnet werden müssen.

Im Amtsgebiet des WSA Bremerhaven fällt durch den Einsatz von Hopperbaggern hingegen Baggergut an, das verbracht werden muss. Die Koordinaten der Verbringstellen wurden durch das WSA bereitgestellt. Ebenso gab es Statistiken über die Mengen, die in den einzelnen Verbringstellen umgelagert wurden. Allerdings konnten Daten über die Verteilung der Baggermengen auf die Verbringstellen bereitgestellt werden. Aus diesem Grund wurde eine eigene Verbringstrategie unter Verwendung dieser Koordinaten entwickelt.

Als Hauptkriterien der Zuordnung wurden die Entfernung von Bagger- zu Verbringstelle und die räumliche Ausdehnung als Maß für die Aufnahmekapazität verwendet. In einem ersten Schritt wurden jedem Baggerabschnitt alle Verbringstellen zugeordnet. DredgeSim kann dann über einfache Algorithmen feststellen, welche Verbringstelle die nächstgelegene ist. Diese Methodik erwies sich jedoch als unbrauchbar, da in diesem Fall das gesamte Baggergut vom Flusskilometer 58 – 80 in die Verbringstelle Robbensüdsteert verbracht wird.

Das führt zu enormen Verbringmengen, die in dieser Größe realistischer Weise nicht allein auf Robbensüdsteert untergebracht werden können.

Aus diesem Grund musste eine Strategie entwickelt werden, welche jedem Baggerabschnitt wieder eine präferentielle Verbringstelle zuordnet und somit die Baggermengen über die Fläche besser verteilt. Nach dem Analysieren der im Modell anstehenden Baggermengen pro Baggerschwerpunkt aus den bereitgestellten Statistiken und den in Wirklichkeit eingebrachten Mengen in die Verbringstellen, konnte eine Zuordnung aufgestellt werden. Daraus ergaben sich neun Verbringstellen, die sich ausschließlich im Bereich der Außenweser befinden (Abbildung 4-59).

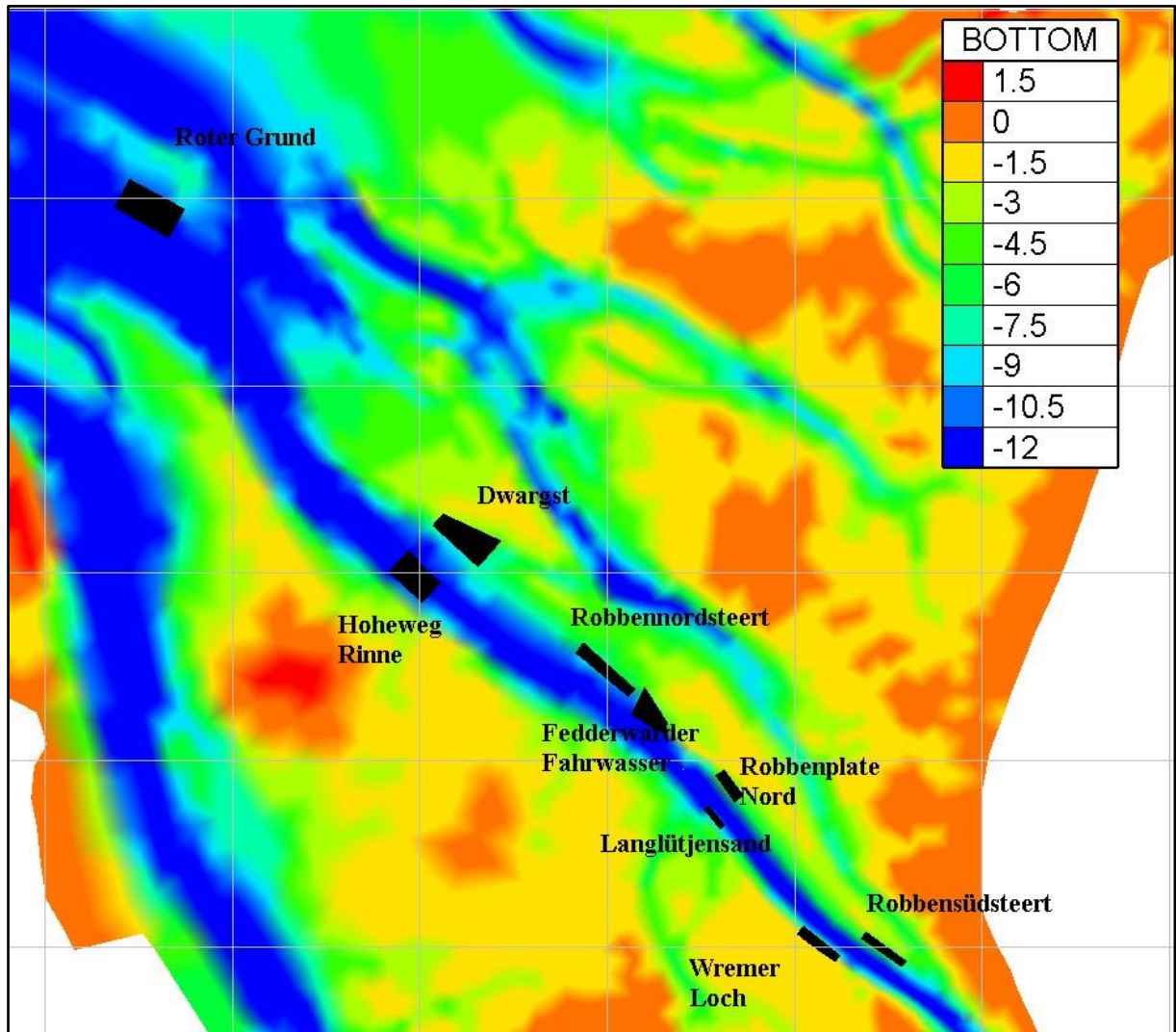


Abbildung 4-59: Verbringstellen im Weser-Ästuar

Die Zuordnung ist im Einzelnen in Tabelle 4-10 zu sehen. Auf dieser Grundlage wurden in DredgeSim die Unterhaltungsmaßnahmen für das Weser-Ästuar modelliert.

Tabelle 4-10: Zuordnung von Verbringstellen zu Baggerschwerpunkten im Bereich des Weser-Ästuars in **AufMod**

Baggerabschnitt	Verbringstelle	Baggerabschnitt	Verbringstelle
km 55-57.7	Hoheweg Rinne	km 71-75	Robbensüdsteert
km 57.7-58	Hoheweg Rinne	km 75-79	Robbensüdsteert
km 58-64.5	Robbenplatte Nord	km 79-85	Robbensüdsteert
km 64.5-65	Fedderwarder Fahrwasser	km 85-91	Langlütjensand Nord
km 65-66	Hoheweg Rinne	km 91-100	Dwarsgat
km 66-66.67	Wremer Loch	km 100-110	Roter Grund
km 66.67-67	Dwarsgat	km 110-114	Roter Grund
km 67-71	Wremer Loch	km 114-132	Roter Grun

Modellierung von Umlagerungen am Ems-Ästuar

In der Ems wurde eine ähnliche Vorgehensweise verfolgt. Das WSA Emden stellte Daten über die Lage der Umlagerungsflächen (Abbildung 4-60) sowie Statistiken über die Baggermengen und deren Verteilung auf die verschiedenen Verbringstellen bereit. Auch in diesen Daten ist zu erkennen, dass das Baggergut einiger Bereiche auf verschiedene Verbringstellen verbracht wurde. So wurden zum Beispiel vom Flusskilometer 74,6 - 77 62 % des Baggerguts auf Klappstelle 5 verbracht und die übrigen 38 % auf die Klappstelle 7. Im Rahmen des Forschungsprojektes **AufMod** soll jedoch auch für die Ems in einem ersten Schritt angenommen werden, dass es präferentielle Verbringstellen gibt, die im Idealfall durch die gesamte Menge an Baggergut eines Baggerschwerpunkts gespeist werden.

Anhand der zur Verfügung gestellten Daten wurde die prozentuale Verteilung der Baggermengenverteilung für die einzelnen Baggerabschnitte auf die Verbringstellen bestimmt. Sodann wurde jeweils die Verbringstelle, die die größte Menge an Baggergut aus einem Baggerbereich aufnimmt als präferentielle Verbringstelle definiert. Die daraus folgende Verteilung der Baggermengen ist in Tabelle 4 dargestellt.

Tabelle 4-11: Zuordnung von Verbringstellen zu Baggerschwerpunkten im Bereich des Ems-Ästuars in **AufMod**

Baggerabschnitt	Verbringstelle	Baggerabschnitt	Verbringstelle
km 40-45	K7	km 76-80	K5
km 45-52	K7	km 80-85	K5
km 52-68	K7	km 85-88	K5
km 68-74	K5	km 88-113	K2
km 74-76	K5		

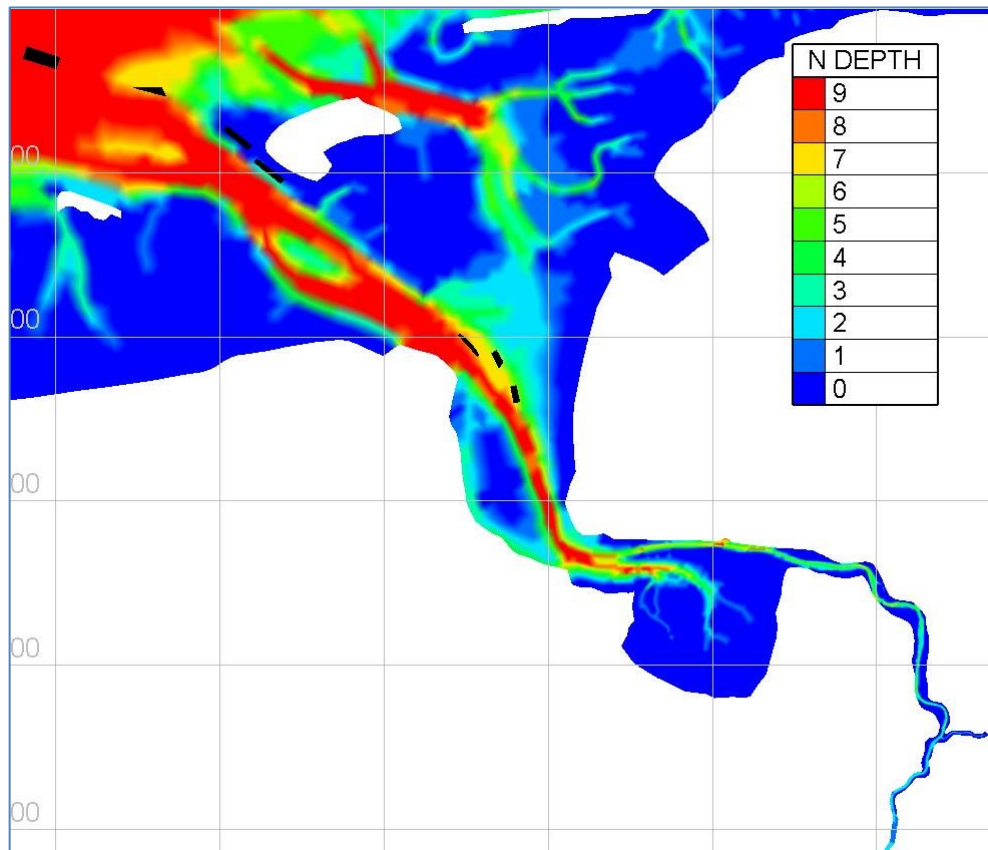


Abbildung 4-60: Verbringstellen im Ems-Ästuar

4.6.5 Szenarien

4.6.5.1 Szenario Meteorologie 2006

Sohlentwicklung

Die Sohlentwicklung nach 100 Jahren Simulationszeit ist in Abbildung 4-62 dargestellt. Im Vergleich zur Ausgangsbathymetrie (Abbildung 4-61) lassen sich nur geringe großräumige Änderungen der Morphologie feststellen. Hervorzuheben ist das Gebiet südöstlich von Helgoland, in dem sich langfristig rinnenartige Vertiefungen gebildet haben.

Betrachtet man die Sohlevolution (Abbildung 4-63) lassen sich Gebiete hoher Morphodynamik von denen geringer unterscheiden. Unterhalb der 20 m-Isobathe ist sie gering bis nicht vorhanden. Das führt im Bereich des ehemaligen Elbeurstromtals sogar zur Bildung einer ausgedehnten Depositionsfläche. Sie reicht von südlich Helgoland bis zum nordwestlichen Bereich der Deutschen Bucht, wobei die Breite fächerförmig zunimmt. In diesem Gebiet erreichen die Ablagerungen bis zu 0,5 m.

Morphodynamisch am aktivsten sind die küstennahe Bereiche mit den Seegaten und Rinnen sowie die Ästuar. Im Bereich der Ostfriesischen Inseln sind Sohländerungen von $-1,5$ m bis 3 m insbesondere bei den Ebbdeltas zu verzeichnen, während auf den rückwärtigen Wattgebieten überwiegend Sediment deponiert wird.

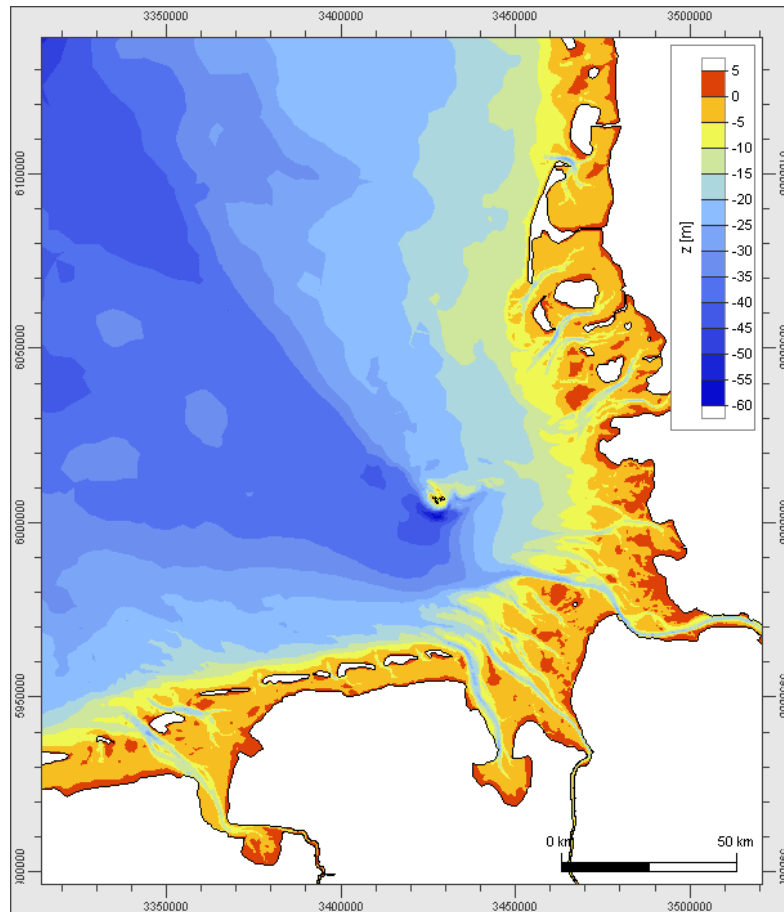


Abbildung 4-61: Szenario 2006: Initiale Sohlage

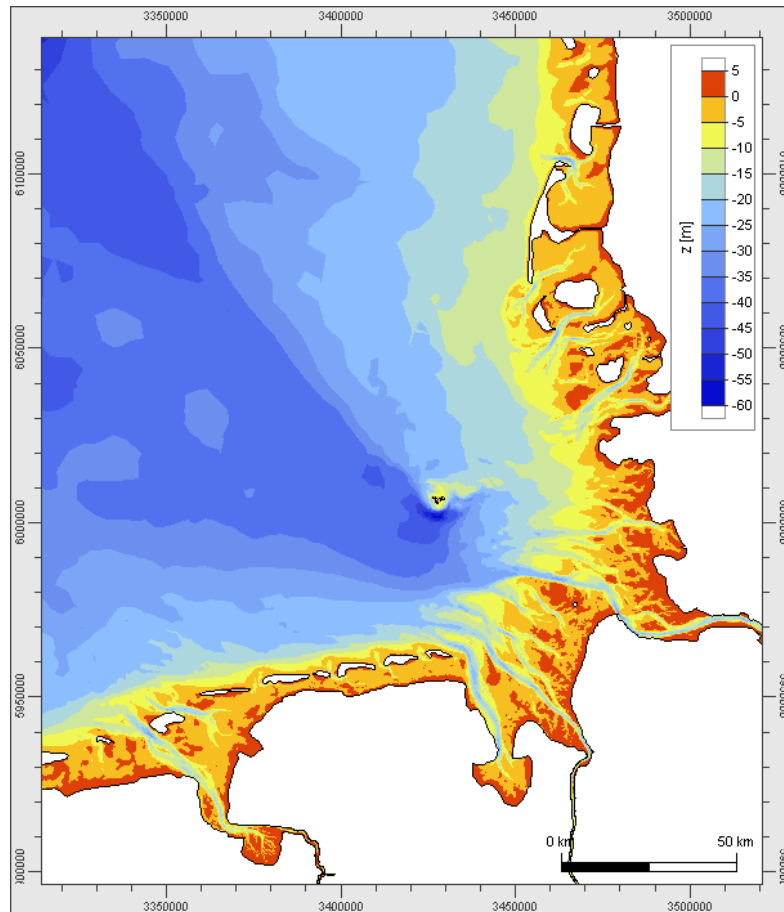


Abbildung 4-62: Szenario 2006: Simulierte Sohlage nach 100 Jahren

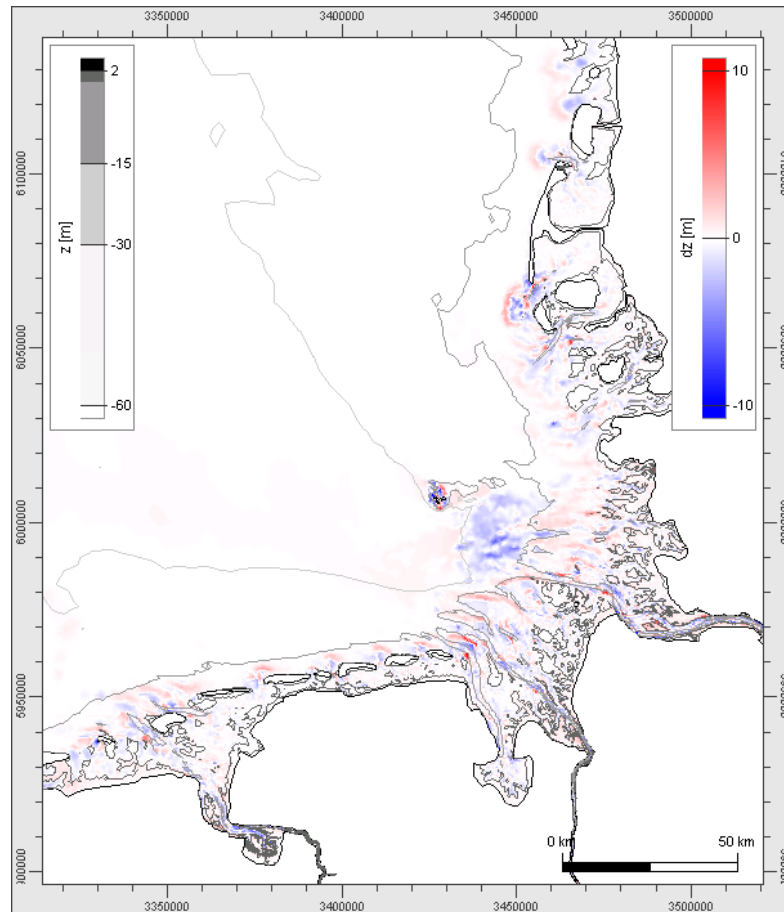


Abbildung 4-63: Szenario 2006: Simulierte Sohlevolution nach 100 Jahren

Hohe Dynamik zeigt das Elbe-Weser-Mündungsgebiet und die Dithmarscher Bucht (Abbildung 4-63). Im Bereich der Außenjade lässt sich eine Sohlevolution (**Rot**) von 9,3 m bis $-6,0$ m bei gleichzeitiger Verlagerung in Richtung Osten verzeichnen. Ebenso lässt sich diese Tendenz auf die den Wattens vorgelagerten und besonders dem Seegang ausgesetzten Gebieten, z. B. Scharhörnriff und Nordergründe, beobachten. Die Sohländerungen sind geringer, liegen aber noch zwischen 3,6 m bis $-2,5$ m. Insgesamt findet eine Südwest-Nordost-Verlagerung des Sedimentvorkommens im Bereich der Elbe-Weser-Mündung statt. Auf den angrenzenden Wattgebieten wird Sediment mit einer Mächtigkeit von 0,05 m bis 0,4 m abgelagert, stellenweise auch bis 1 m. In der Dithmarscher Bucht sind vor allem Norder- und Süderpiep, Tertiusand und Blauortsand, die morphodynamisch aktiv sind.

Weiter nördlich im Gebiet der Nordfriesischen Inseln ist die Sohländerung weitaus geringer. Sie betragen durchschnittlich etwa 2 m und erreichen nur vereinzelt größere Werte, z. B. in der Norderhever (2,9 m) oder in der Süderau (8,6 m bis $-3,9$ m). Das ausgedehnteste Erosions- und Depositionsgebiet befindet sich südlich von Sylt. Hier finden ausgedehntere Sedimentumlagerungen statt, die zu Sohländerungen von 12,5 m bis $-11,4$ m führen. Hier sollten weitere numerische Analysen durchgeführt werden, um die Naturähnlichkeit dieser Maximalwerte abzusichern.

Kumulierter Sedimenttransport

Die örtlich sehr unterschiedliche Sedimentdynamik spiegelt Abbildung 4-64 wieder, in der die kumulierte absolute Sedimenttransportrate der Gesamtfracht dargestellt ist.

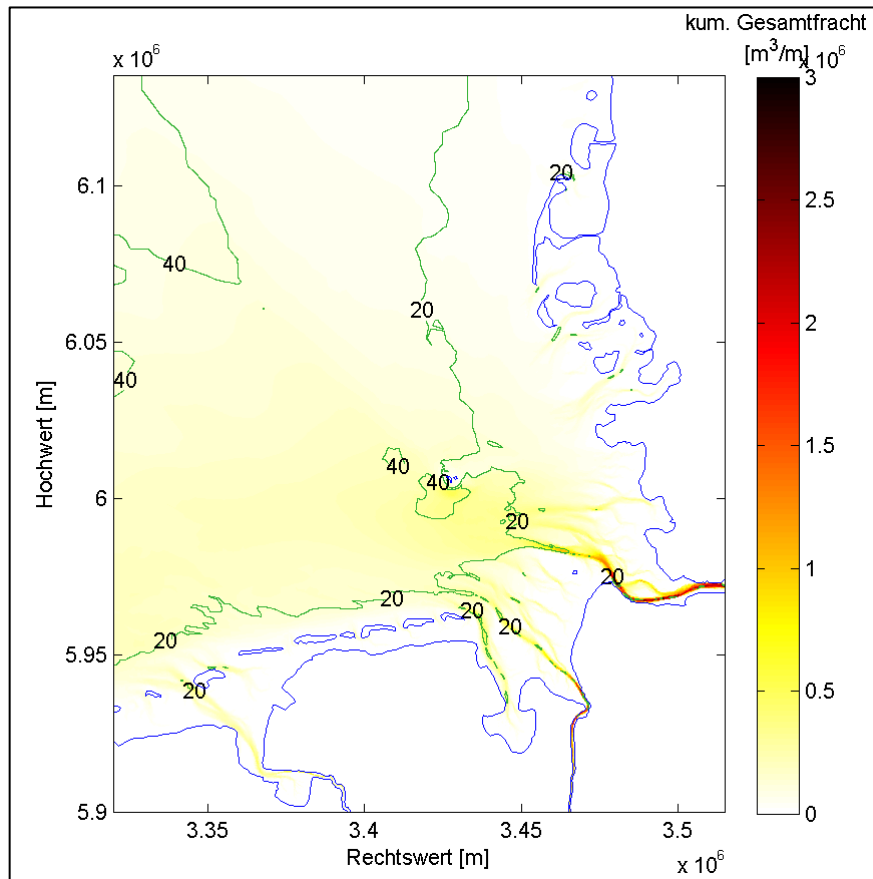


Abbildung 4-64: Szenario 2006: Kumulierte Geschiebefracht nach 100 Jahren. Dargestellt sind auch die 40 m- und die 20 m-Isobathen bezogen auf NN

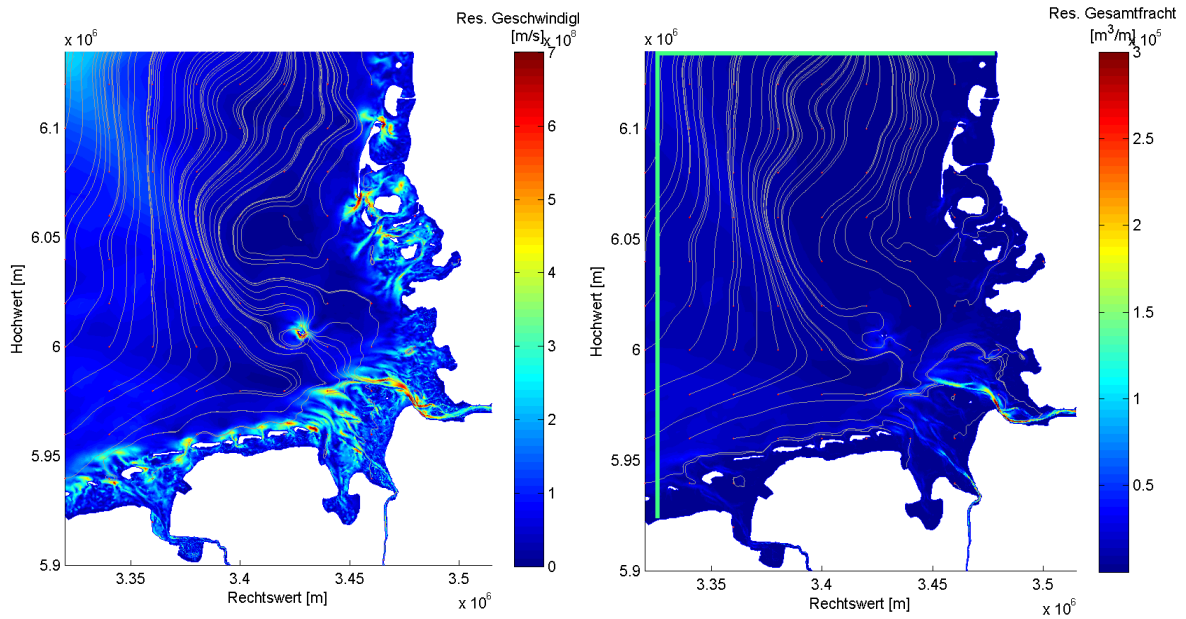
Großräumig betrachtet liegt signifikanter Transport im westlichen und südlichen Teil der Deutschen Bucht vor (ca. $1000 \text{ m}^2/\text{s}$ bis $2000 \text{ m}^2/\text{s}$). Die Depositionszone im ehemaligen Elbeurstromtal lässt sich anhand des Musters wiedererkennen. Im Bereich der Nordfriesischen Inseln und dem vorgelagerten Küstenabschnitt sind die Beträge weitaus geringer; Werte von $1000 \text{ m}^2/\text{s}$ werden nicht überschritten.

Die höchsten Werte treten im Bereich der Rinnen und Ästuar auf. Hervorzuheben sind die Mündungsbereiche von Elbe (ca. $15\,000 \text{ m}^2/\text{s}$), Ems (ca. $4000 \text{ m}^2/\text{s}$) und Weser (ca. $12\,000 \text{ m}^2/\text{s}$) sowie der Jade (ca. $3500 \text{ m}^2/\text{s}$).

Residualer Sedimenttransport

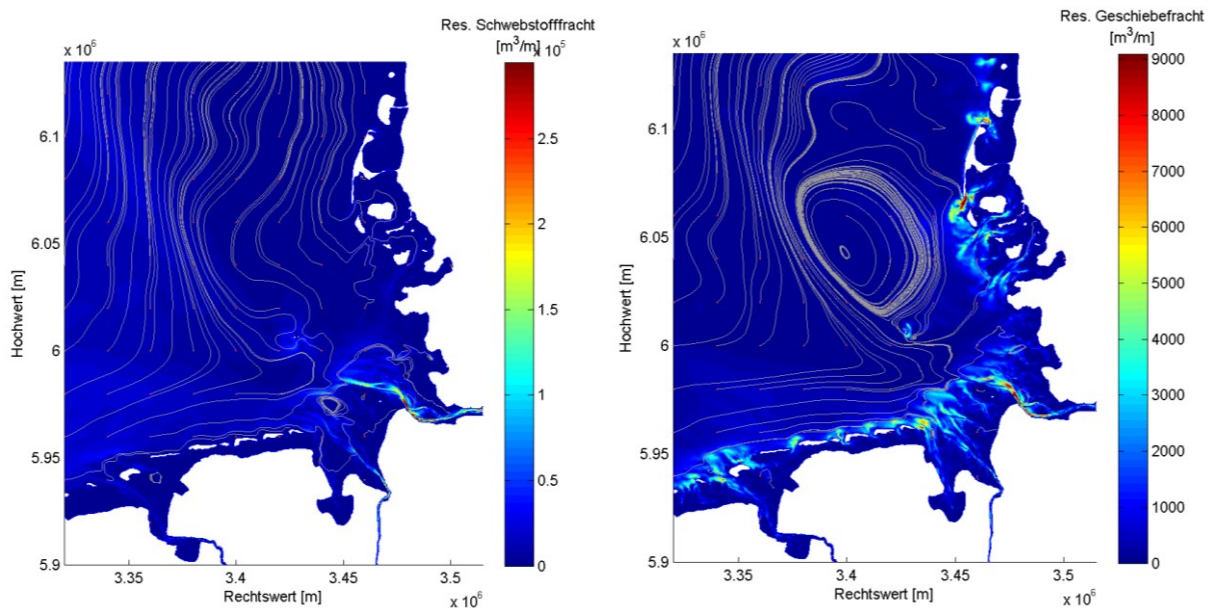
Für die Analyse von ein- und ausgetragenem Sediment wurden residuale Ergebnisgrößen generiert und daraus Transportpfade beginnend auf einem gleichmäßigen Raster abgeleitet.

In Abbildung 4-65a ist zunächst die residuale Strömungsgeschwindigkeit des Wasserkörpers dargestellt. Man erkennt, dass die generelle Richtung der Trajektorien nach Norden führt. Von Westen kommend knicken die Pfade vor Helgoland ab. Die Pfade aus dem Inneren der Deutschen Bucht verlaufen zunächst in nordwestliche Richtung um dann Richtung Norden und Nordosten das Untersuchungsgebiet zu verlassen. Nördlich von Helgoland bildet sich nahezu ein Wirbel aus.



a) Residuale Strömungsgeschwindigkeit [m/s] **b) gesamte Sedimentfracht [m³/m]**

Abbildung 4-65: Szenario 2006: a) residuelle Strömungsgeschwindigkeit und b) Gesamtfracht -hier sind die Profile West und Nord (grüne Linien) eingezeichnet



a) Schwebstofffracht [m³/m]

b) Geschiebefracht [m³/m]

Abbildung 4-66: Szenario 2006: residueller Sedimenttransport aufgeschlüsselt je nach Transportmodus a) Schwebstoff- und b) Geschiebefracht

Diesem Bild entspricht größtenteils auch die residuale Gesamtfracht (Abbildung 4-66b) als Summe aus Schwebstoff- und Geschiebefracht. Auch hier knicken die Trajektorien vor Helgoland nach Norden ab. Vor den Ostfriesischen Inseln existiert ein schmales residuales Transportband, über das Sediment bis in das Innere der Deutschen Bucht gelangt. Die Pfade hier lassen vermuten, dass Sediment nur umgelagert, aber nicht großräumig weiter transportiert wird. Ganz offensichtlich abgeschnitten von den in das Untersuchungsgebiet eintretenden Transportpfaden ist der Küstenbereich vor den Nordfriesischen Inseln. Bilanziert man die residuellen Transporte nach 100 Jahren über die Ränder der Deutschen Bucht dann lässt sich zeigen, dass über den Westrand $1.706,32 \times 10^6 \text{ m}^3$ Sediment eingetragen und über den Nordrand $283,78 \times 10^6 \text{ m}^3$ ausgebracht werden (Tabelle 4-12). Die Differenz von $1.422,54 \times 10^6 \text{ m}^3$ verbleibt Eintrag im Untersuchungsgebiet.

Tabelle 4-12: Volumenbilanzen in Mio. m³ nach Transportmodus und Profil. Ein negatives Vorzeichen bedeutet Austrag aus der Deutschen Bucht

Profil	Transportmodus		
	Gesamtfracht	Schwebstoff	Geschiebe
West	1.706,32	1.674,31	31,85
Nord	-283,78	-274,72	-8,68
gesamt	1.422,54	1.399,59	23,16

Abbildung 4-66a zeigt die residualen Pfade des Schwebstofftransportes. Die Größenordnung zeigt, dass dieser Transportmodus den größten Anteil an der Gesamtfracht darstellt. Somit entsprechen auch die Transportpfade im Wesentlichen denen der Gesamtfracht.

Als Schwebstoff wird über den Westrand $1.674,31 \times 10^6 \text{ m}^3$ ein und über den Nordrand $274,72 \times 10^6 \text{ m}^3$ ausgetragen, so dass $1.399,59 \times 10^6 \text{ m}^3$ im Untersuchungsgebiet verbleiben (Tabelle 4-12). Auch beim Geschiebetransport (Abbildung 4-66b) knicken die von Westen kommenden Pfade vor Helgoland ab und verlassen das Untersuchungsgebiet nördlich. Das Transportband vor den Ostfriesischen Inseln ist sehr viel schmaler, nur ein Bruchteil erreicht in der Bilanz den inneren Teil der Deutschen Bucht.

Im Gegensatz zum Schwebstofftransport weist der residuale Geschiebetransport ein wesentlich komplexeres Transportmuster aus. Nördlich von Helgoland existiert eine residuale Zirkulationszelle mit einem Durchmesser von etwa 50 km. Wie beim Schwebstofftransport ist die Sedimentbilanz positiv: über den Westrand dringen $31,85 \times 10^6 \text{ m}^3$ ein, während über den Nordrand $8,68 \times 10^6 \text{ m}^3$ das Gebiet verlassen und ein Gewinn von $23,16 \times 10^6 \text{ m}^3$ zum Sedimenthaushalt in der Deutschen Bucht beiträgt.

4.6.5.2 Szenario Meteorologie 1998

Das Jahr 1998 weist im Gegensatz zum Jahr 2006 eine dreimal so große Anzahl an Tagen mit Windgeschwindigkeiten zwischen 12,5 m/s und 18,0 m/s auf (1998 über 60 Tage, 2006 nahezu 20 Tage). Daher wurde für eine Analyse des Wind- und Seegangseinflusses auf die Sedimentdynamik eine langfristige Simulation mit den Wind- und Seegangsfeldern von 1998 durchgeführt und die Ergebnisse mit denen des Szenarios 2006 verglichen.

Sohlentwicklung

Grundsätzlich lassen sich zwischen beiden Szenarien keine prinzipiellen Unterschiede in der großräumigen morphologischen Struktur nach 100 Jahren feststellen, weshalb auf eine Darstellung an dieser Stelle verzichtet wird. Aussagekräftiger ist die Differenz zwischen beiden Sohllagen nach einem Zeitraum von 100 Jahren. Sie ist in Abbildung 4-67 dargestellt. Hierbei wurde die Sohllage des Szenarios 2006 von der des Szenarios 1998 subtrahiert.

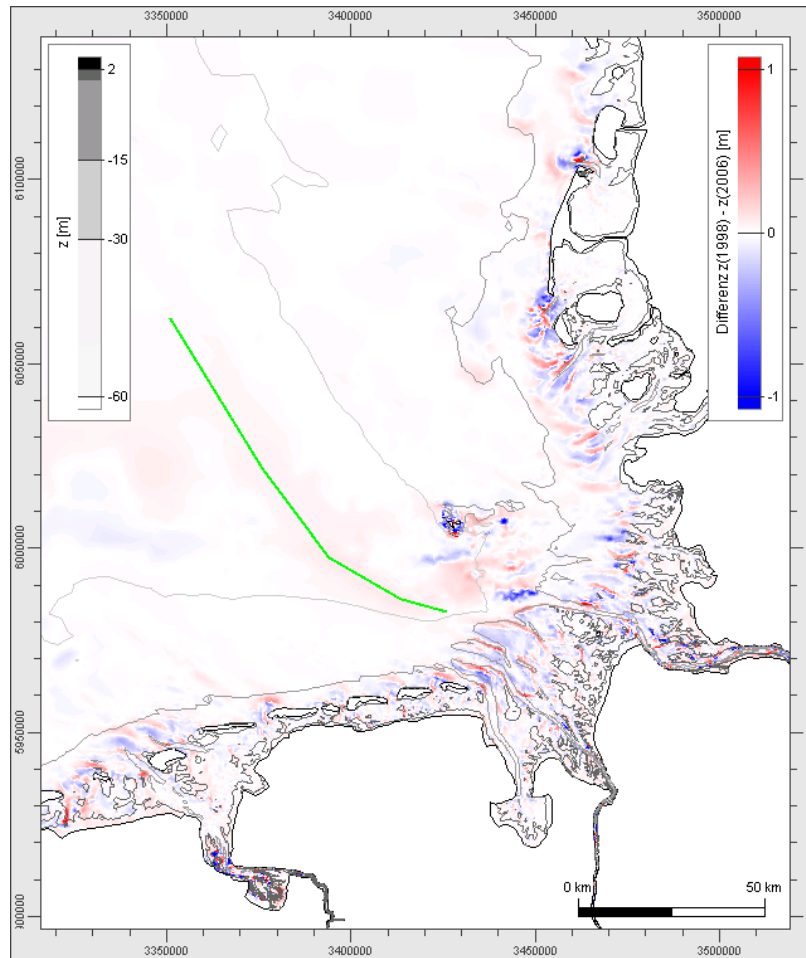


Abbildung 4-67: Szenario Meteorologie 1998: Sohldifferenz der Simulationen mit der Meteorologie von 1998 und von 2006

Die Erosions- und Depositionstendenzen werden durch die Meteorologie 1998 verstärkt, was sich in einer erhöhten Sedimentumlagerung äußert. Vor den Ostfriesischen Inseln liegen die Differenzen zwischen ca. 0,3 m und ca. -0,5 m, wie sie beispielsweise beim Norderneyer Seegatt ersichtlich sind. Im Gebiet der Elbe-Weser-Mündung sind größere Unterschiede erkennbar die von ca. -0,7 m bis ca. 0,7 m reichen. Als Beispiel seien die Gebiete der Außenjade und der Alten Weser genannt. Es lässt sich feststellen, dass vor den Ostfriesischen Inseln und im Gebiet der Weser-Elbe-Mündung vermehrt Sediment Richtung Osten verlagert wird.

Auch bei den Nordfriesischen Inseln führt die Simulation mit der Meteorologie von 1998 zu erhöhten Sedimentumlagerungen. Im Bereich der Ebbdeltas sind die Differenzen in einer Größenordnung, wie sie im Gebiet der Elbe-Weser-Mündung auftreten. Besonders ausgeprägt sind sie südlich von Sylt. Hier ist der Theeknobs, der Maximalwerte zwischen ca. -1 m und ca. 1 m aufweist.

Zwar sind die Sohlagen beider Szenarien relativ ähnlich, jedoch lässt sich im Bereich des Elbeurstromtals eine deutliche ausgedehnte Sohldifferenz nach 100 Jahren feststellen. Sie ist in Abbildung 4-68 entlang eines Polygonzugs, beginnend nördlich vor Wangerooge auf Höhe der 30 m-Isobathe (Abbildung 4-67), dargestellt. Demnach führt die Meteorologie von 1998 zunächst zu einer exponentiellen Zunahme bis zum Maximalwert von 0,1 m bei km 10,87. Anschließend nimmt die Sohldifferenz linear ab. Die Sohlage liegt somit ausnahmslos höher als beim Szenario 2006.

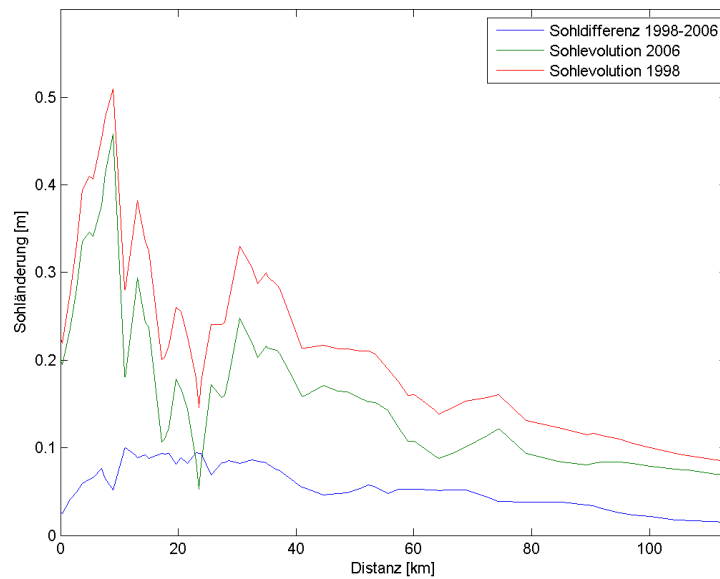


Abbildung 4-68: Szenario Meteorologie 1998: Sohlentwicklungen nach 100 Jahren entlang des Profils in Abbildung 4-67 mit der Meteorologie von 1998 und 2006 sowie ihrer Differenz. Das Profil verläuft von der Küste ($x = 0$ km) bis in den tiefen Bereich der Deutschen Bucht ($x = 113$ km)

Zusätzlich sind in Abbildung 4-68 die Sohlevolutionen beider Szenarien abgebildet. Beide Profile sind wie erwartet ähnlich und zeigen nach einem Anstieg auf den Maximalwert eine exponentielle Abnahme mit zunehmender Distanz, die nur bei km 20 durch eine geringere Sohlevolution gestört wird. Es handelt sich demnach in beiden Szenarien um ein Depositionsgebiet.

Residualer Sedimenttransport

Die residualen Transporttrajektorien beider Szenarien unterscheiden sich vor allem im Westteil des in Abbildung 4-69 dargestellten Gebiets. Durch erhöhte Wind- und Seegangswirkung verschieben sich die Transportpfade des Szenarios 1998 Richtung Osten. Bei beiden Szenarien kann ein Abknicken vor Helgoland und die anschließende Bündelung entlang des Elbeurstromtals festgestellt werden. Weiterhin ist ebenfalls beim Szenario 1998 erkennbar, dass vor den Ostfriesischen Inseln ein residuales Transportband Richtung Osten existiert und vor den Nordfriesischen Inseln die Transportpfade das Gebiet nördlich verlassen.

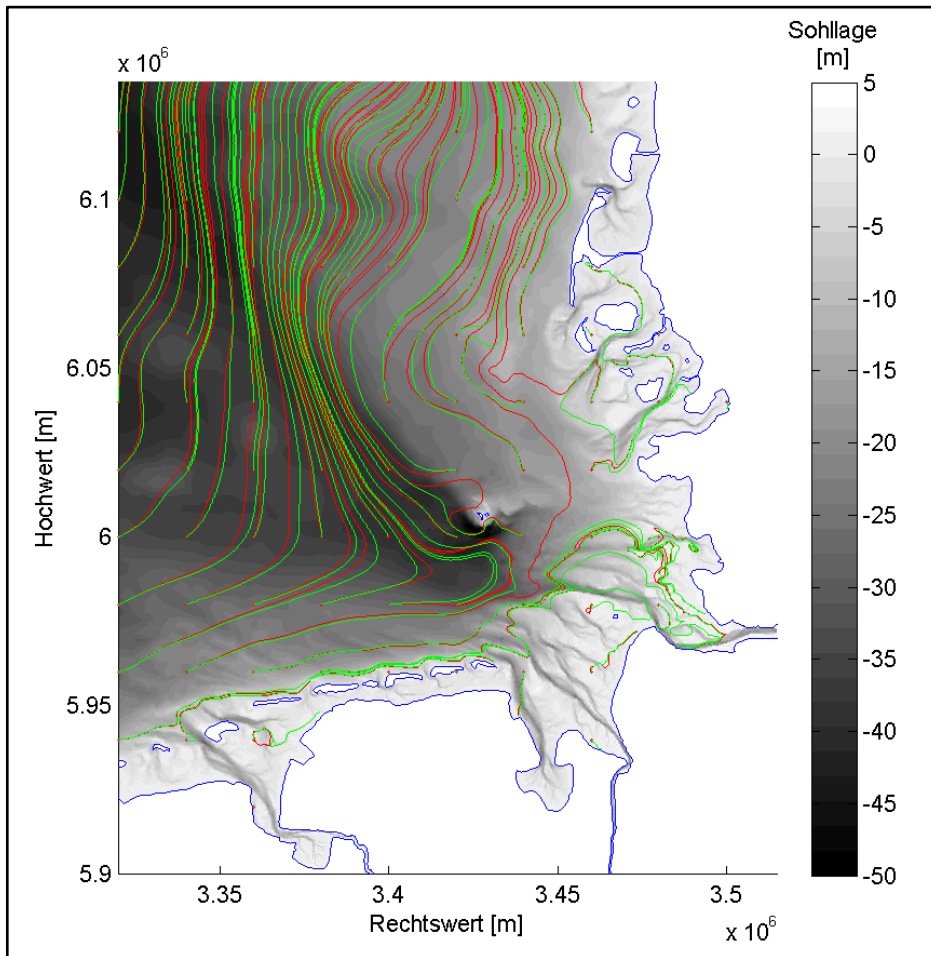


Abbildung 4-69: Szenario Meteorologie 1998: Vektoren der residualen Gesamtfracht mit Meteorologie 2006 (rot) und mit Meteorologie 1998 (grün)

Änderung der Volumenbilanzen

Die vorangegangenen Abschnitte haben gezeigt, dass das Szenario 1998 eine höhere Sedimentdynamik aufweist. Das ist ebenfalls aus den Volumenbilanzen für das Gebiet der Deutschen Bucht ersichtlich. In Tabelle 4-13 sind die Volumendifferenzen zwischen Szenario 1998 und 2006 zusammengefasst.

Tabelle 4-13: Änderungen der Volumenbilanzen in Mio. m³ und Prozentanteil je nach Transportmodus und Profil. Berechnet wurden die Differenzen zwischen Szenario 1998 und Szenario 2006

Profil	Transportmodus		
	Gesamtfracht	Schwebstoff	Geschiebe
West	345.18 (20.23 %)	326.79 (19.52 %)	18.20 (57.14 %)
Nord	-13.25 (4.67 %)	-12.01 (4.37 %)	-1.22 (14.02 %)
gesamt	331.93 (23.33 %)	314.78 (22.49 %)	16.98 (73.30 %)

Demnach erhöht sich die über das Westprofil eintretende Gesamtfracht um $345,18 \times 10^6 \text{ m}^3$, was einer prozentualen Zunahme um 20,23 % entspricht. Das aus der Deutschen Bucht über das Nordprofil transportierte Sediment nimmt ebenfalls zu. Über dieses Profil verlassen das Untersuchungsgebiet $13,25 \times 10^6 \text{ m}^3$ mehr als beim Szenario 2006. Die prozentuale Zunah-

me ist wesentlich geringer als über das Westprofil und beträgt 4,67 %. In der Bilanz verbleiben somit $331,93 \times 10^6 \text{ m}^3$ und führen zu einer Zunahme des Sediments in der Deutschen Bucht um 23,33 %.

Der Schwebstofftransport nimmt über das westlich gelegene Profil um 19,52 % zu. Der Sedi-
menteintrag in Höhe von $326,79 \times 10^6 \text{ m}^3$ macht auch im Szenario 1998 deutlich, dass dieser
Transportmodus maßgeblich zum Sedimenthaushalt beiträgt. Somit ist auch der Austrag
über das Nordprofil mit $12,01 \times 10^6 \text{ m}^3$ bzw. 4,37 % in der Größenordnung wie bei der
Gesamtfracht. Das als Schwebstoff eingetragene und verbleibende Sediment nimmt somit
um $314,78 \times 10^6 \text{ m}^3$ zu.

Deutlich höhere prozentuale Werte werden für den Geschiebetransport berechnet. Die
Meteorologie von 1998 führt zu einer Zunahme über das Westprofil von 57,14 %, was einem
Volumen von $18,20 \times 10^6 \text{ m}^3$ entspricht. Über das Nordprofil wird 14,02 % mehr Sediment als
Geschiebe ausgetragen. In der Summe verbleiben in der Deutschen Bucht $16,98 \times 10^6 \text{ m}^3$
mehr Sediment als beim Szenario 2006.

4.6.5.3 Szenario Meeresspiegelanstieg

Zur Bewertung des Meeresspiegelanstiegs (MSA) auf den Sedimenthaushalt der Deutschen
Bucht wurden zwei tidegetriebene Simulationen miteinander verglichen. Eine Simulation
wurde ohne Meeresspiegelanstieg durchgeführt. Bei dem anderen Szenario wurde an den
offenen Seerändern ein linearer Meeresspiegelanstieg von 80 cm/100a eingesteuert und
dadurch die Wasserspiegellage in jedem Simulationszeitschritt um einen konstanten Wert
erhöht.

Sohlentwicklung

Die Sohlage der Simulation mit Meeresspiegelanstieg (MSA) ist in Abbildung 4-70 darge-
stellt. Es lassen sich durch Tide und Meeresspiegelanstieg keine signifikanten großräumigen
Änderungen der morphologischen Struktur verzeichnen. Allerdings rücken diese durch den
MSA näher an die Küstenlinie heran. Die Differenz zwischen der Simulation mit MSA und
ohne MSA zeigt Abbildung 4-71. Die Differenzen treten in den Wattgebieten und im Küsten-
nahfeld auf und überschreiten kaum einen Wert von 1 m.

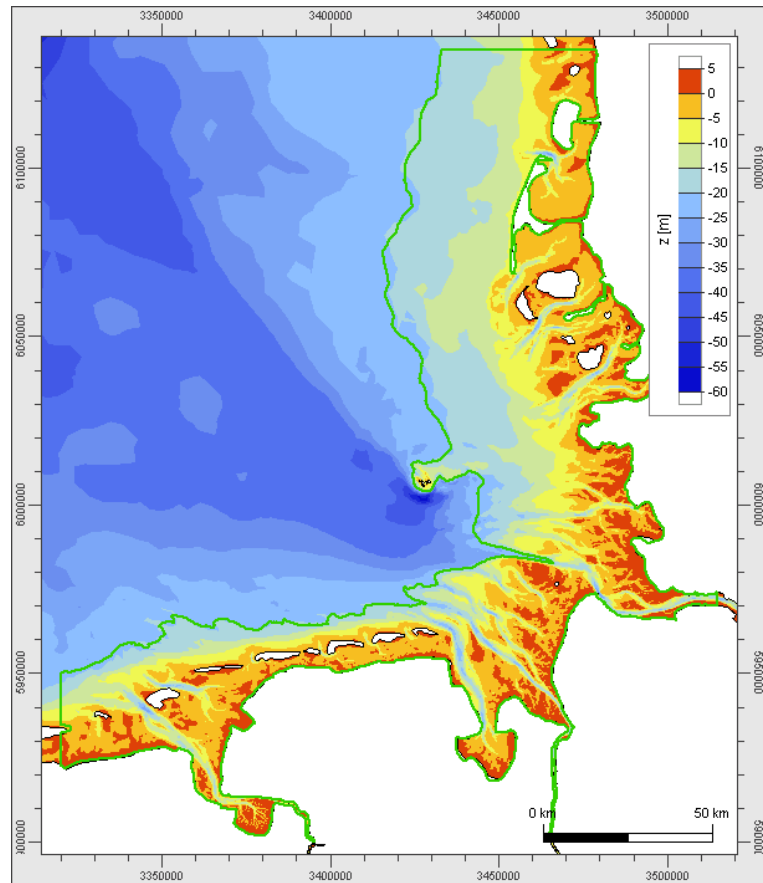


Abbildung 4-70: Szenario Meeresspiegelanstieg (MSA): Sohlage nach 100 Jahren mit MSA und die für die Volumenbilanzen verwendete Maske (grünes Polygon)

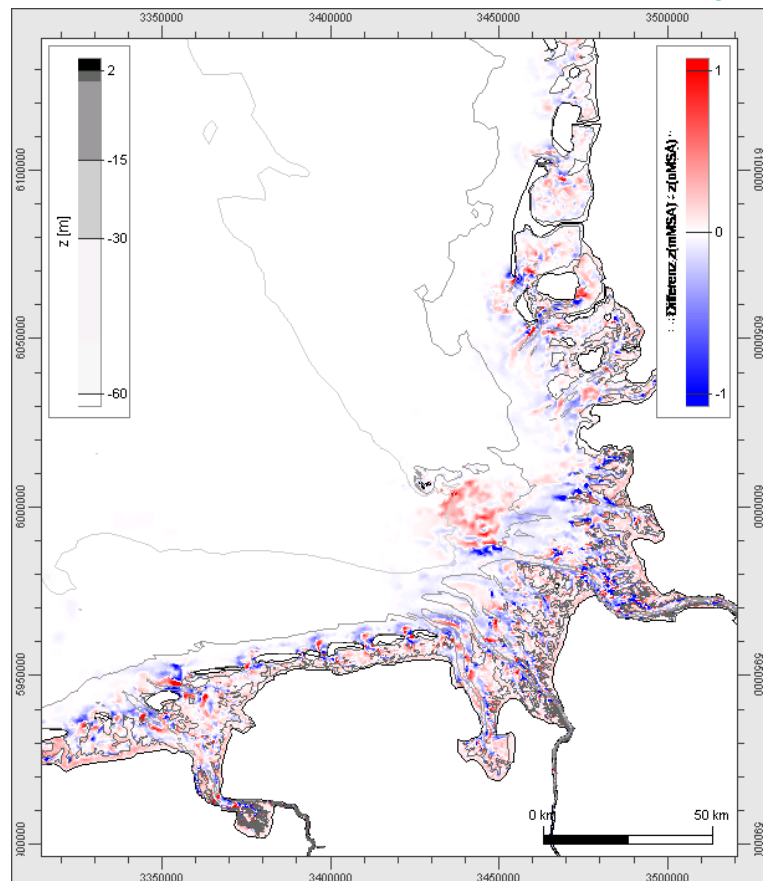


Abbildung 4-71: Szenario Meeresspiegelanstieg: Differenz der Sohlage zwischen der Simulation mit und ohne MSA

Residualer Sedimenttransport

Die residualen Sedimenttransportpfade der Gesamtfracht beider Simulationen sind im Westteil der Deutschen Bucht identisch (Abbildung 4-72). Im inneren Teil lassen sich vereinzelt Unterschiede feststellen. Im Nordostteil sind die Transportpfade mit MSA nach Osten verschoben.

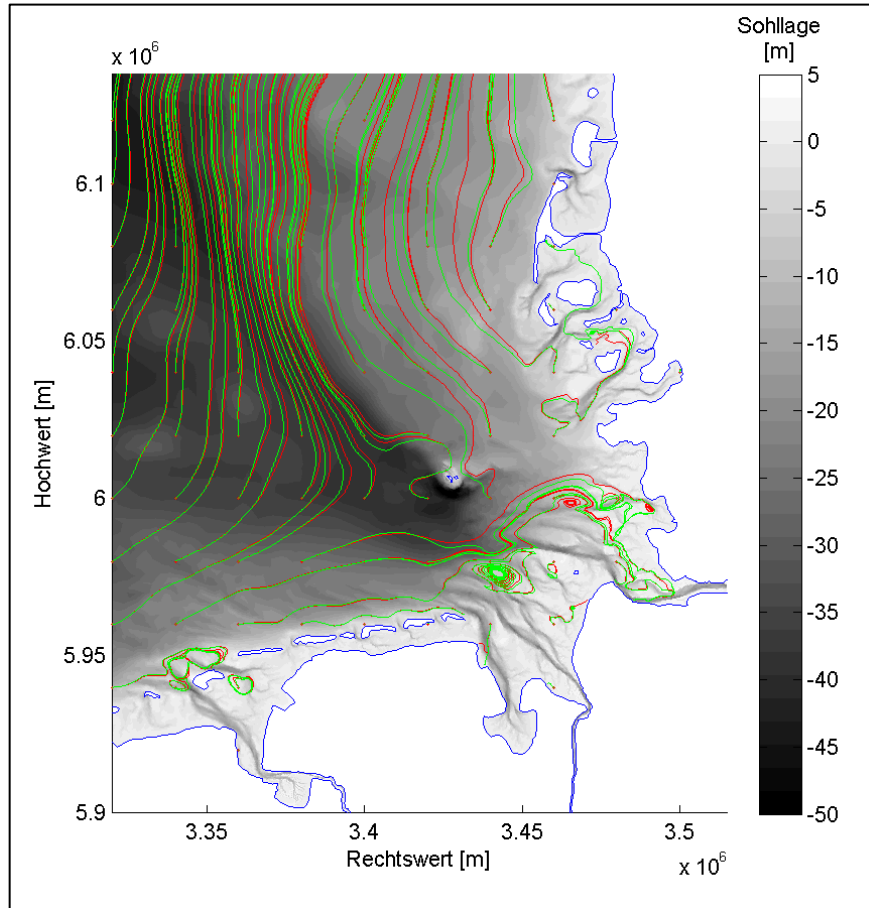


Abbildung 4-72: Szenario Meeresspiegelanstieg: Vektoren der residuellen Gesamtfracht:
grün ohne MSA; rot mit MSA

Langfristige Volumenbilanzen

Die Auswirkung des MSA auf den Sedimenthaushalt zeigt Abbildung 4-73. Der Funktionsverlauf ist bei beiden Simulationen wie erwartet ähnlich, aber die Kurve mit MSA verläuft flacher. Nach 100 Jahren Simulationszeit werden so ohne Meeresspiegelanstieg $3,7 \times 10^8 \text{ m}^3$ und mit MSA $3,3 \times 10^8 \text{ m}^3$ abgelagert. Ein säkularer Meeresspiegelanstieg von 80 cm führt also zu einer Reduktion des abgelagerten Sedimentvolumens um 11 %.

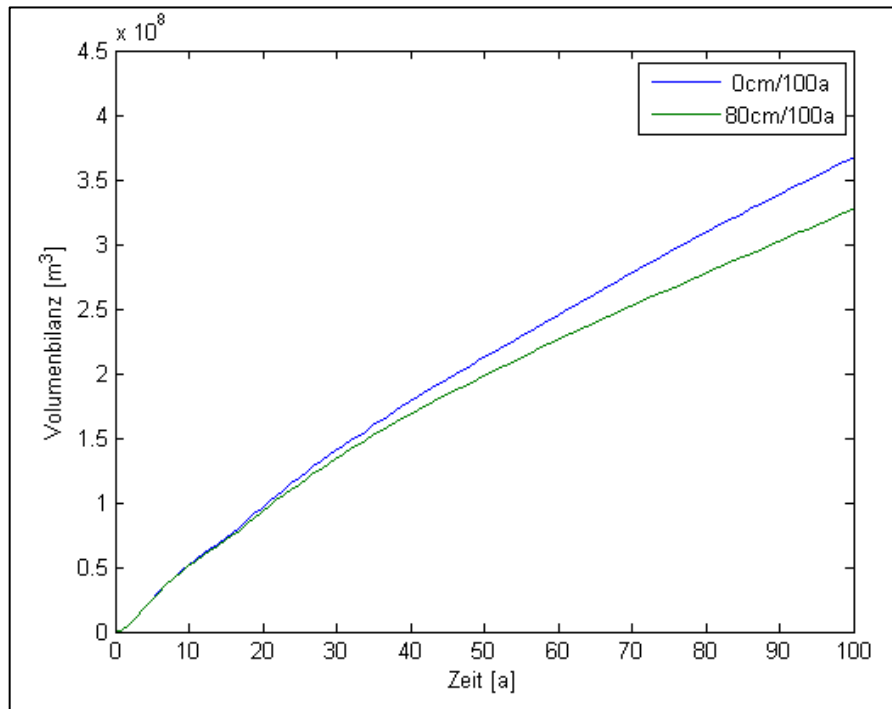


Abbildung 4-73: Szenario Meeresspiegelanstieg: Volumenbilanzen für den küstennahen residuellen Sedimenttransport

4.6.5.4 Szenario Unterhaltungsmaßnahmen

Die Differenz der Sohlage zwischen einer Simulation ohne und mit Unterhaltungsmaßnahmen nach jeweils 100 Jahren ist in Abbildung 4-74 dargestellt. Die Simulationen wurden mit einem Korndurchmesser von $3,75 \times 10^4$ m durchgeführt und als Belastung die Tide eingesteuert.

Sohllagendifferenzen

Unterschiede treten vor allem in den Mündungsbereichen der Ästuarien auf, da gerade hier die Entnahme und Verbringung von Sediment simuliert wird. In unmittelbarer Umgebung der Fahrrinnen betragen die Sohländerungen zwischen 1 m und -1 m. Dagegen werden die Wattbereiche nicht signifikant beeinflusst. Weiterhin fällt auf, dass es im Bereich der Nordfriesischen Inseln ebenfalls zu Unterschieden in der Sohlage im Bereich von einigen Dezimetern kommt. Dies ist auf die durch Unterhaltungsmaßnahmen geänderte Tidedynamik, welche sich langfristig auch außerhalb der Mündungsbereiche der Ästuarien auswirkt, zurückzuführen.

Sohlentwicklung im Mündungsbereich der Elbe

Besonders deutlich lässt sich der Einfluss der Unterhaltungsmaßnahmen auf die simulierte Morphodynamik am Mündungsbereich der Elbe skizzieren. Ohne Unterhaltungsmaßnahmen verlagert sich das Fahrwasser der Elbe zwischen dem Großen Vogelsand und dem Gelbsand in Richtung Nordosten, wie Abbildung 4-75a zeigt. Zur Orientierung sind die Baggerpolygone dargestellt. Werden aber die Baggermaßnahmen berücksichtigt, sind die Erosionen und Depositionen in der Fahrrinne geringer und die im Modell simulierte natürliche Tendenz der Fahrwasserverlagerung nach Nordosten wird vermindert (Abbildung 4-75b).

Das Längsprofil der Sohlage entlang der Baggerpolygone (Abbildung 4-75c, in Flutrichtung Zunahme der Distanz zeigt, dass sich in der Fahrrinne ohne Unterhaltungsmaßnahmen über ca. 14 km signifikant Sediment ablagert und die Schiffbarkeit nicht mehr gewährleistet ist.

Wird Sediment entnommen, dann wird die Sohlage entsprechend der gewünschten Solltiefe korrigiert und die morphodynamische Entwicklung massiv beeinflusst. Die Sohldifferenzen zwischen beiden Simulationen betragen bis zu 17 m. Die angesprochene Rinnenverlagerung ist im Querprofil von Süd nach Nord (Lage s. Abbildung 4-75b) in Abbildung 4-75d dargestellt. Durch die Sedimententnahme wird die Morphodynamik gedämpft und die ausgeprägte Deposition bei 2.7 km tritt nicht auf. Vielmehr existieren 2 Rinnen, die durch eine Ablagerung bei 3.9 km getrennt sind.

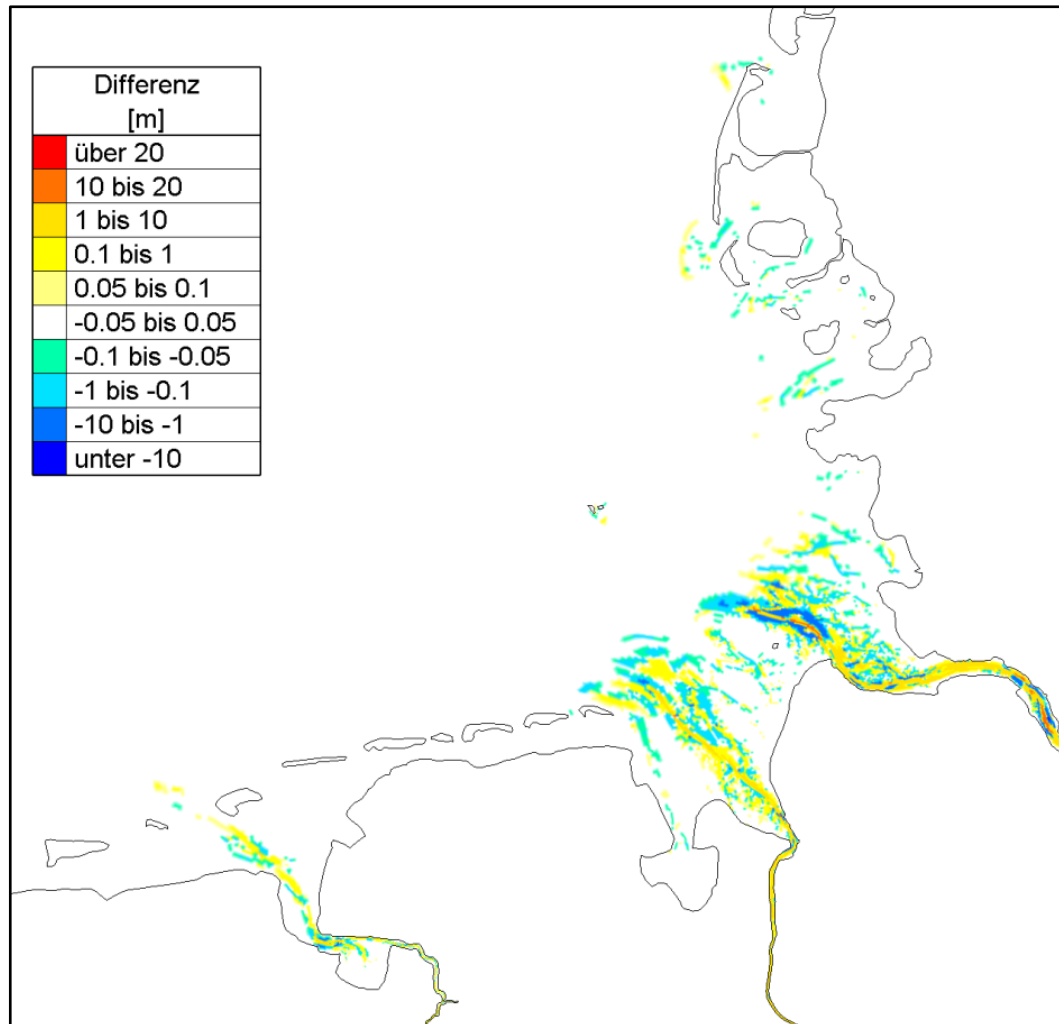
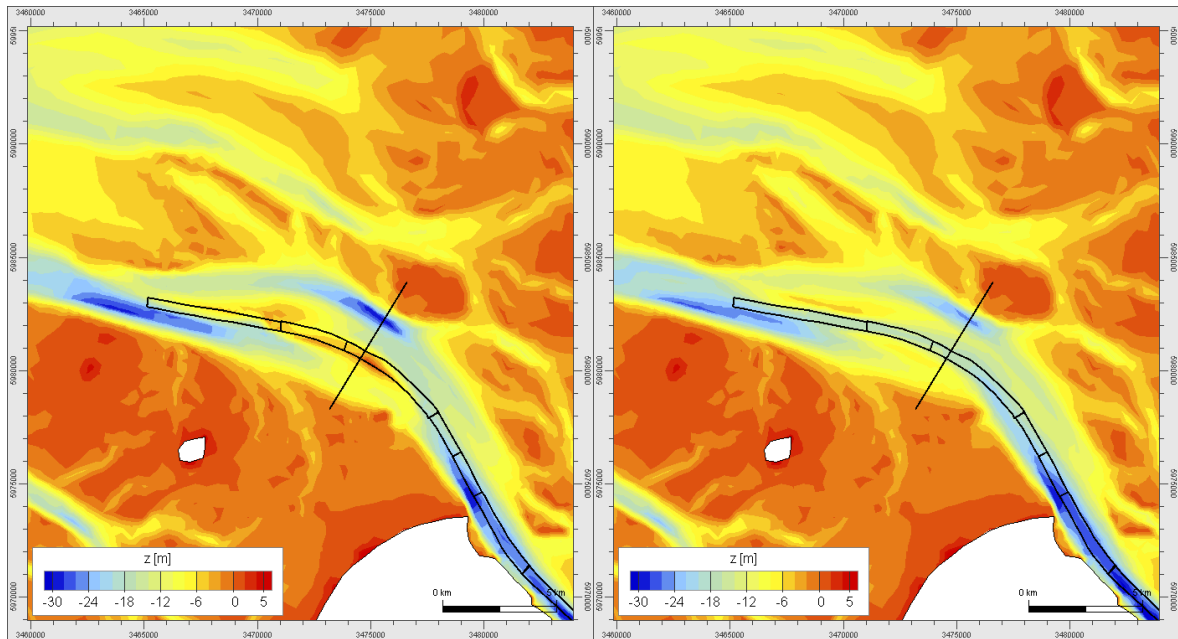
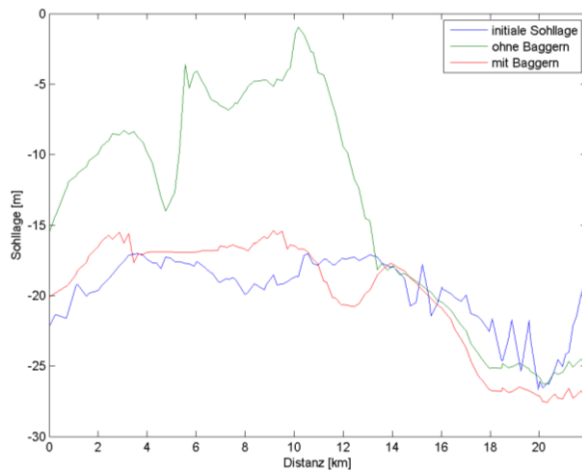


Abbildung 4-74: Szenario Unterhaltungsmaßnahmen: Vergleich zweier 100-jähriger Simulationen zur Wirkung von Unterhaltungsmaßnahmen. Dargestellt ist die Differenz zwischen der Sohlage ohne und mit Unterhaltungsmaßnahmen

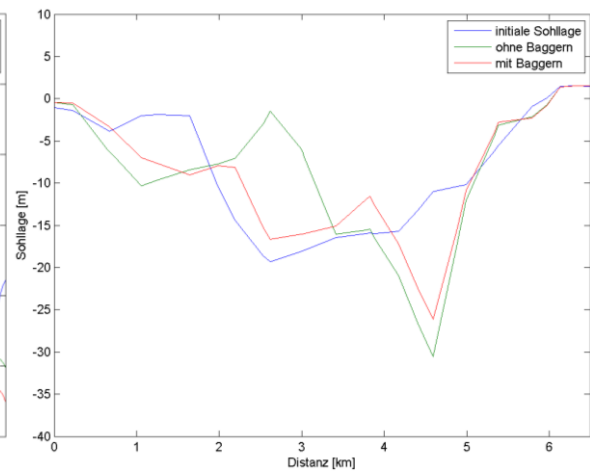


a) Sohllage nach 100 Jahren ohne Baggern

b) Sohllage nach 100 Jahren mit Baggern



c) Profil der Sohllage entlang der Bagger -
polygone (Zunahme Distanz in Flut-richtung)



d) Profil der Sohllage quer zur Fahrrinne
von Süd nach Nord (s. Abbildung b)

Abbildung 4-75: Szenario Unterhaltungsmaßnahmen: Sohllage im Bereich der Elbmündung ohne und mit Baggern

5 Synthese

5.1 Ziel

Das Gesamtvorhaben **AufMod** dient dem **Aufbau** eines integrierten **Modellsystems** für die Deutsche Bucht. Ziel ist die Analyse und die Optimierung des übergreifenden Systemverständnisses der großräumigen und langfristigen Morphodynamik. Das Modellsystem ist als ein gemeinsames Produkt des Gesamtprojekts zu verstehen. Beteiligt am Gesamtprojekt sind die Fachdisziplinen:

- Küsten- und Schelfgeologie,
- Ozeanographie,
- Küsteningenieurwesen,
- Verkehrswasserbau sowie
- Informatik.

Die Beschreibung, Analyse und Prognose der Sediment- und Morphodynamik in der Deutschen Bucht erfolgt auf Grundlage eines fachübergreifend integrierten Konzepts mit gemeinsam nutzbaren Bausteinen. Bisher werden überwiegend abiotische Daten und Prozesse behandelt. Das realisierte Konzept erlaubt jedoch die Integration biotischer Parameter in einer nachfolgenden Entwicklungsstufe. Die Erprobung und Bestätigung des integrierten Modellsystems wird als eine unverzichtbare Grundlage für die nachvollziehbare und reproduzierbare Erweiterung des Wissens für ein verbessertes Systemverständnis angesehen.

Das Modellsystem ermöglicht die Synthese wissenschaftlicher Analysen der Beobachtungsdaten gemeinsam mit umfassenden Ergebnissen aus Simulationsmodellen. Am Aufbau und der Pflege dieses Modellsystems sind verschiedene Fachdisziplinen in den Teilprojekten beteiligt. Diese erarbeiten eigenständig Produkte, die in das gemeinsame Modellsystem integriert werden. Dieser Forschungsansatz soll im Rahmen der fortgeführten Nachnutzung des Modellsystems beibehalten werden. In den genannten wissenschaftlichen Disziplinen werden traditionell verschiedene Methoden und Verfahren eingesetzt. Das Projekt **AufMod** hat schon in der ersten Phase gefordert und auch realisiert, dass Ergebnisse aller Teilprojekte in einer Synthese der relevanten Erkenntnisse zusammengeführt werden, um damit zu einem verbesserten, universellen Systemverständnis beizutragen. Die Synthese zielt damit zunächst einmal auf die Erweiterung des Wissens.

5.2 Konzepte zur Vorhersage

Brommer et al. (Brommer, et al., 2009) stellten Konzepte zur Vorhersage langfristiger und großräumiger Küstenentwicklungen insbesondere in Bezug auf die Sedimentdynamik vor. Die Autoren beschreiben 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 und die Reaktion der Küsten darauf ermitteln.
- **Geomorphologen**, die sich mit der Formenvielfalt und Veränderung des Bodens und mit der Verteilung der Oberflächenformen 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 zu der wichtigen Erkenntnis, dass die von diesen Gruppen erzielten wissenschaftlichen Informationen in Vorhersagesysteme für langfristige küstendynamische Entwicklungen integriert werden müssen. Dieses ist auch ein Hauptziel von **AufMod**. Alle genannten wissenschaftlichen Gruppen sind im Projekt vertreten und das gemeinsam übergeordnete Ziel wird allgemein anerkannt. Neben der Integration vorhandener Daten und Informationen wird in **AufMod** die Erweiterung und Verbesserung der bisher eingesetzten Methoden und Verfahren angestrebt.

Zunächst ist die Sedimentbeschaffenheit umfassend zu beschreiben und zu verstehen. Hierbei geht es um die Analyse der Zusammensetzung und Verteilung der Sedimente einschließlich lateraler, vertikaler und zeitlicher Variabilität. Weiterhin ist die Morphodynamik als Abbild und Umformer der Hydrodynamik im zeitlichen Kontext der antreibenden Kräfte zu analysieren, zu simulieren und zu prognostizieren. Für das grundlegende Systemverständnis muss der sehr langfristige zeitliche Kontext der geologischen Vergangenheit ebenso berücksichtigt werden, wie die signifikant anthropogen beeinflusste Vergangenheit seit Errichtung großer technischer Wasserbauwerke. Vor diesem Hintergrund ist der aktuelle, dekadisch geprägte Zustand zu betrachten, auch als Referenzzustand für die im Klimawandel möglichen bzw. wahrscheinlichen Zukünfte.

Die inneren Wechselwirkungen zwischen Sedimentzusammensetzung, Sedimentverteilung, Sedimenttransport und Dynamik des Gewässerbodens der Deutschen Bucht wurden von den am Projekt beteiligten Fachdisziplinen räumlich differenziert und methodisch in unterschiedlicher Weise analysiert. Die in mess- und datenorientierten Teilprojekten durchgeführten Analysen konzentrierten sich überwiegend auf sogenannte Fokusgebiete, um in diesen verfeinerte lokale Phänomene und Zusammenhänge aufzudecken. Für die Synthese müssen diese Erkenntnisbausteine großräumig und langfristig in die regionalen Wechselwirkungen der Sediment- und Morphodynamik der Deutschen Bucht eingeordnet werden können. Dabei ist zu bewerten, welche konkreten Einzelphänomene im Rahmen dieser Einordnung zu einer allgemeingültigen, wissenschaftlich gesicherten Aussage beitragen können. Dies ist ebenfalls eine wichtige Aufgabe der Synthese.

Ein weiterer besonders wichtiger praktischer Aspekt der Synthese besteht in der Erprobung und Bestätigung des integrierten Modellsystems, das nach Abschluss des Projekts von allen genannten wissenschaftlichen Disziplinen weiter genutzt werden kann. Das Modellsystem liefert eine methodische, funktionale und modellbasierte Basis, auf der verschiedene Fachsichten interferieren. Grundlage muss dabei wiederkehrend die Betrachtung und Bewertung von Unschärfen und Unsicherheiten sein, die sowohl in den Messdaten, den aufbereiteten Modelleingangsdaten und auch in den Parametrisierungen und Annahmen der Simulationsmodelle vorliegen.

Tragende Säule des Modellsystems ist das Funktionale Bodenmodell, das als Bindeglied zwischen den Küsten- und Schelfgeologen, Ozeanographen und Küsteningenieuren fungiert und von allen Beteiligten in jeweils fachspezifischer Ausrichtung genutzt werden kann. Soweit es die bisher geprüften und integrierten Altdaten sowie die im Projekt erhobenen Neudaten ermöglichen, liefert das Funktionale Bodenmodell ein detailliertes Abbild der Gewässersohle hinsichtlich Bathymetrie, Sedimentzusammensetzung und Sedimentver-

teilung, Sedimentmächtigkeit, Sedimentmobilität, Formenvielfalt und Ausprägung der Sohlformen. Grundlage dafür sind konsistente Feld- und Simulationsdaten in Raum und Zeit. Für das Bodenmodell wurden verfügbare Daten aus dem In- und Ausland homogenisiert und integriert. Es besteht die Anforderung, daraus für verschiedene 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 der Bathymetrie und Sedimentbeschaffenheit gemeinsam verwaltet und funktional, d. h. nach spezifischen Vorgaben verarbeiten und dem Anwender anforderungsgerecht unter Nutzung von Methoden für datenbasierte Analysen zur Verfügung stellen kann.

Im Mittelpunkt des Projektinteresses stand die quantitative Erfassung der Dynamik der Modellparameter für die gesamte Deutsche Bucht und in repräsentativen Teilflächen von Schelf / Vorstrand, Watten und Ästuaren.

Die Synthese bezieht die geologischen, sedimentologischen und morphodynamischen Analysen sowie die Ergebnisse aus Modellsimulationen gleichgewichtig ein. Die in den Teilprojekten erarbeiteten Ergebnisse und Phänomene werden als Einzelbausteine begriffen, mit denen ein Gesamtbild des Systemverständnisses einschließlich der Ausweisung von Quantitäten (z.B. der Sedimentbilanz) dargestellt werden soll. Hierzu ist es erforderlich, auch ein Kennwertsystem zu nutzen das geeignet ist die Zusammenhänge zwischen den Einzelbausteinen zu erklären. Ein wichtiger Aspekt ist darin die Aufdeckung und Bewertung aller bekannten Asymmetrien der Tidedynamik, der Seegangswirkung, der Transportdynamik und der Sohlformen.

Ein vollständiges Systemverständnis wird man für komplexe Natursysteme niemals erreichen. Insofern wird auch der Grad der Synthese grundsätzlich beschränkt bleiben. Vor diesem Hintergrund soll nachfolgend der Beitrag zur Synthese anhand von Antworten auf **Kernfragen** gegeben werden, die u. a. bereits in der Ausschreibung des KFKI in den Vordergrund gestellt wurden. Weil die Variabilität des Gesamtsystems nicht nur vom deterministischen Gezeitengeschehen, sondern in hohem Maße auch vom stochastischen Wettergeschehen abhängt, ist die Beantwortung der Fragen komplex. Eine nachvollziehbare Beantwortung der Fragen dokumentiert jedoch ein Grundgerüst abgesicherter Methoden, auf dem in **AufMod** die Strategien für langfristige Analysen und Prognosen der Sediment- und Morphodynamik in der Deutschen Bucht erarbeitet wurden.

Die nachfolgend für die Synthese behandelten Fragenkomplexe können in Hinblick auf die Datenherkunft zweigeteilt betrachtet werden.

1. **Messdatenanalyse:** Die Fragen zur Sedimentverteilung und Zusammensetzung, zu den kleinräumigen Transportkörpern und zur Morphodynamik können primär auf der Grundlage von Messdaten beantwortet werden.
2. **Simulationsmodelle:** Mit den eingesetzten Simulationsmodellen ist zu prüfen, in wie weit die aus der Messdatenanalyse gezogenen Erkenntnisse mit Simulationsergebnisdaten bestätigt und für das Systemverständnis ergänzt werden können. Die Fragen zum Sedimenttransport, zur Differenzierung der Wirkungen antreibender Kräfte und zur Prognose können hingegen primär mit Simulationsmodellen beantwortet werden.

5.3 Fragen zur Sedimentverteilung und -zusammensetzung

Frage: Wie kann man die großräumige Sedimentverteilung phänomenologisch erklären?

Der pleistozäne Untergrund und die holozäne Transgressionsabfolge der Deutschen Bucht prägen die grundlegende Morphologie der Gewässersohle. Die holozäne Basis kennzeichnet den Übergang von den pleistozänen (unveränderten) Sedimentlagen zu den überlagernden holozänen Sedimenten, die mit einem 8000 – 9000 Jahre alten Basistorf einsetzen und zunächst von Wattsedimenten überlagert werden. Die transgredierende Nordsee, mit Meeresspiegelanstiegsraten bis zu 2,1 m/100 Jahre erodierte in dieser Zeit pleistozänes Material und verfrachtete es landwärts. Ein Akkretionskeil bildete sich, der vor dem Festland auskeilte und seewärts bis zu 40 m mächtig wurde. Ca. 7000 Jahre vor heute verlangsamte sich die Meeresspiegelanstiegsrate bei gleichzeitiger Zunahme des Tidenhubes. Die Bildung der heutigen Küstenform mit dem vorgelagerten, bis zu 25 km breiten Wattgürtel und den vorgelagerten Barriereinseln setzte ein. Auf dem Schelf erfolgte durch interne Sedimentumlagerung die Bildung der jungen, nordseezeitlichen Sedimente. Sie werden zur Basis häufig durch eine Grobsand- bis Feinkiesschicht abgegrenzt. In Gebieten, in denen heute auf dem Schelf ein Sedimentdefizit besteht (Sedimentmangelgebiete), liegt der pleistozäne Untergrund sehr hoch und ist nur von einer sehr geringen Decke junger, holozäner Sedimente überlagert, die stellenweise weniger als 1 m Mächtigkeit aufweist.

Die Verteilung des Oberflächensediments in der Deutschen Bucht wird deshalb im Wesentlichen durch zwei Rahmenbedingungen beeinflusst:

- einerseits durch den geologischen Aufbau bzw. die quartäre Entstehungsgeschichte des Untergrundes,
- andererseits durch Umlagerungsprozesse als Folge der vorherrschenden hydrodynamischen Prozesse.

AufMod beschreibt die Korngrößenverteilungen fast flächendeckend für das gesamte Gebiet der Nordsee auf der Grundlage von rund 80.000 Korngrößenverteilungen. Mit dem im Projekt entwickelten Funktionalen Bodenmodell wurden für den Bereich der Deutschen Bucht die Kornverteilungen schon recht fein auf einem 250*250m-Raster generiert. Damit wurden verschiedene sedimentologische Parameter berechnet:

- Median-Korndurchmesser der interpolierten Kornsummenkurve,
- Mittelwerte der Kornsummenkurven,
- Sortierung,
- Kornfraktionen in $\frac{1}{2}$ -Phi –Intervallen.

Diese Produkte tragen ganz wesentlich zur morphodynamischen Analyse bei.

Durch Abstraktion und Verschneidung der sedimentologischen, morphodynamischen und hydrodynamischen Parameter der im Projekt verfügbaren Daten- und Simulationsmodelle wurde eine Modellvorstellung für das übergreifende Systemverständnis entwickelt. Hierzu wurde eine verfeinerte Flächeneinteilung der Deutschen Bucht nach den vorkommenden Sandfraktionen einschließlich ihrer Gewichtsanteile vorgenommen:

- Am Bereich Borkum Riffgrund liegt die Mittelsandfraktion vorwiegend über 50% im Gewichtsanteil. Der Anteil von Grobsanden liegt über dem der Feinsande. Nordöstlich des Borkum Riffgrunds geht das Sediment von Mittelsand in Feinsand über; südwestlich des Borkum Riffgrunds dominiert der Feinsand.
- Im zentralen Teil der Deutschen Bucht liegen großflächig homogenere Feinsande mit Verfeinerung des Sediments in nordöstlicher Richtung.
- Im ehemaligen Elbeurstromtal liegt jeweils eine Feinsandklasse (betrachtet in 1/4 Phi-Intervallen) vorwiegend über 50% im Gewichtsanteil. Diese wird in nordöstlicher Richtung graduell von der nächstfeineren Sandfraktion abgelöst.
- Im Bereich nördlich des Elbeurstromtales wechseln sich vorwiegend mittelsandige Flächen eher kleinräumig mit feinsandigen Flächen ab. Noch kleinere Flächen enthalten vorwiegend Grobsand. Im westlichen Bereich des nordfriesischen Schelfs stehen Sande an, die von primär West-Ost orientierten, länglich ausgebildeten Grobsand / Kiesflächen unterbrochen werden.

Nach Aufteilung der Feinsandklasse (63 - 250 μm) in vier Unterklassen wird deutlich, dass die Klasse 125 - 177 μm in der Deutschen Bucht die weiteste Verbreitung aufweist. Alle Flächen zusammen genommen mit einem Gewichtsanteil einer Kornfraktion über 50% (betrachtet in 1/2 Phi-Intervallen) decken bereits den Großteil der gesamten Deutschen Bucht ab. Die übrigen Flächen verfügen über Sedimentfraktionen mit Gewichtsanteilen zwischen 20 und 50 %. Sie können durch Kombination zweier Klassengrenzen charakterisiert werden:

- Im Bereich des östlichen Ausläufers des Austerngrunds (westlich des ehemaligen Elbeurstromtals) weist keine der beiden Feinsandklassen deutlich höhere Anteile auf. Die Feinsande sind dort weniger gut sortiert als in den nordöstlich und südwestlich angrenzenden Bereichen.
- Sehr feiner Sand (63 – 125 μm) liegt, neben kleinflächigen Verbreitungen im Wattenmeer, lediglich über dem ehemaligen Elbeurstromtal im Anschluss vor.

Die in einer Karte dargestellten fein gegliederten sedimentologischen Einheiten werden mit Simulationsergebnissen verglichen. Als Kennwerte werden die zeitlichen Mittelwerte des Sedimenttransports (mittlerer Geschiebetransport und mittlerer Suspensionstransport) berechnet.

Können die Simulationsmodelle die gemessene Sedimentverteilung reproduzieren, wenn eine homogene Kornverteilung als Anfangszustand (entsprechend der aus den Messungen berechneten mittleren Sedimentverteilung für die Deutsche Bucht) in der Simulation vorgegeben wird?

Diese Frage ist für die Interpretation aller morphodynamischen Modellergebnisse von erheblicher Bedeutung. Im Ergebnis kann zu dieser Frage festgestellt werden:

- Wichtige Merkmale der Sedimentverteilung werden reproduziert.
- Feinsedimente werden in das Rückseitenwatt der nordfriesischen Inseln, in die Ästuare und in das Elbeurstromtal eingetragen.
- Grobkörnige Sedimentflächen (z. B. am Borkum Riffgrund) werden nur teilweise bzw. nicht (nordfriesischer Schelfbereich) reproduziert.
- Die gröberen Sedimente in den tiefen Ästuarinnen und Seegatten bilden sich tendenziell aus; werden aber unterschätzt.

- Die Ansammlung von Feinsedimenten südöstlich von Helgoland („Helgoländer Schlicklinse“) kann in den Modellergebnissen im Ansatz identifiziert werden.

Insgesamt kann festgestellt werden, dass das Simulationsergebnis naturähnlich aber nicht naturidentisch ist. Die Flächen der gemessenen Sedimentverteilung sind räumlich feiner gegliedert. Die gewählte Gitternetzauflösung der Modelle kann diese Verteilung nur diffus nachbilden. Hinzu kommt, dass die pleistozänen Flächen mit hohem Erosionswiderstand mit dem Simulationsansatz a priori nicht nachgebildet werden können. Durch die gemittelte homogene Ausgangsverteilung ist von vornherein weniger sehr grobes Material in diesen Bereichen, als es unter realen Bedingungen der Fall ist, vorhanden. Wichtig ist, dass das Modell das Einschwingen in den Zustand der gut sortierten Sedimentflächen reproduziert. Die gut sortierten sandigen Sedimente der Deutschen Bucht werden durch die hydraulisch angreifenden Kräfte erodiert und umgelagert (hydraulische Sortierung). Sie nehmen weiterhin am Sedimenttransport teil, wenn die hydraulischen Kräfte im Ablagerungsgebiet die von den Korngrößen abhängige Grenzschubspannung überschreiten. Die Betrachtung der mittleren Korngröße liefert deshalb wichtige Hinweise in der Analyse. Beim Abgleich mit den Messdaten des Bodenmodells ist aber vor allem auch die Sortierung zu berücksichtigen. Moderat bzw. relativ schlecht sortierte Sedimente finden sich oftmals in den Sedimentmangelgebieten.

Mit den simulierten resultierenden Sedimenttransporten konnten charakteristische Transportpfade in der Deutschen Bucht identifiziert und Transportmengen abgeschätzt werden. Im südlichen Teil der Nordsee bestehen ganz typische Transportwege. Generalisierend wurde festgestellt:

- Der ausgeprägte West-Ost-Transport entlang der holländischen und niedersächsischen Küste verläuft über dem Borkum Riffgrund in östliche Richtung. Dies steht im Einklang mit der im Sediment erkennbaren Fraktionierungsrichtung.
- Vor Helgoland biegen die Transportbahnen in Richtung des Elbeurstromtals ab. Im Übergang dieser sedimentologischen Einheiten wechselt das Oberflächen-sediment von den feinen Sanden des Elbeurstromtals zu den pleistozänen Relikt-sedimenten.
- Im Schelfgebiet vor der Küste Schleswig-Holsteins verfrachten die Resttransporte nur geringere Massen. Die resultierenden Transportvektoren weisen in unterschiedliche Richtungen und verlaufen teilweise in Zirkulationsbahnen. Im Gegensatz zum Borkum Riffgrund konnte sich hier das Material aufgrund geringer Massentransporte, dem anstehenden pleistozänen Untergrund und seegangsbedingten Belastungen nicht großflächig fraktionieren. Die Sedimentverteilung ist über weite Flächen durch kleinräumige Muster, hier sind auch die „Sorted bedforms“ einzustufen, geprägt

Mit diesem Befund wird bereits deutlich, dass die Deutsche Bucht in ihrer geometrischen Form und Lage sowie mit ihren angrenzenden Ästauarsystemen und Wattgebieten überwiegend eine Sedimentfalle darstellt. Zu klären ist im Besonderen die Variation der Transportmengen und –richtungen, die sich aus den antreibenden Kräften der Nordseezeiten sowie von Wind und Seegang ergibt.

Es ist davon auszugehen, dass dieses grundlegende sedimentdynamische Abbild den Zustand seit mindestens 3.000 Jahren beschreibt, seitdem der Meeresspiegel in der Nordsee um seinen heutigen Stand oszilliert.

Frage: Was kennzeichnet die Sedimentverteilungen in den Fokusgebieten und wie können diese in die großräumige Phänomenologie eingeordnet werden?

Die Figge-Karte (Figge, 1981) beschreibt die Sedimentzusammensetzung der obersten Schicht des Meeresbodens (10 cm), während in **AufMod** überwiegend die obersten 4 cm nach sedimentologischen und –physikalischen Gesichtspunkten untersucht wurden. Zudem ließ sich die räumliche Differenzierung mit den in den Fokusgebieten erhobenen Daten erheblich verfeinern. Grundsätzlich ist zu bedenken, dass Datenerfassungen zur Oberflächensedimentcharakteristik Momentaufnahmen sein können. Dies gilt es bei den Angaben insbesondere für hochdynamische Bereiche in den Fokusgebieten zu berücksichtigen.

Bodenparameter wie Porosität, organischer Anteil und Bodenformen wurden in einigen der Fokusgebiete ebenfalls untersucht. Mit Wiederholungsmessungen wurden sedimentologische Zeitreihen erstellt bzw. fortgeführt. In allen Gebieten ist versucht worden, die Mächtigkeit der sogenannten mobilen Deckschicht mit Echolotsystemen und teilweise durch Sedimentkernentnahmen zu ermitteln.

Nordseeschelf:

Für weite Bereiche des Nordseeschelfs kann das Sylter Außenriff als Repräsentant für den Vorstrand/ Schelf-Bereich eingestuft werden. Anstehende glaziale Ablagerungen sind teilweise von einer nur dünnen Decke holozäner Sedimente überdeckt. Eine ähnliche Situation findet sich auf dem Borkum Riffgrund. Die im Fokusgebiet erfasste Fläche ist durch sehr scharfe, laterale sedimentologische Grenzen geprägt. Großflächig konnte hier unter den Sanden eine Schicht auskartiert werden, die als Transgressionskonglomerat zu verstehen ist. Sie bildet die Grenze zu den überlagernden, mobilisierbaren Sanden, deren Mächtigkeit zwischen 0 – 3 m schwankt.

Aus sedimentdynamischer Sicht zeichnet sich das Gebiet durch seinen Sedimentmangel aus. Charakteristisch hierfür sind die Sorted Bedforms, die als „sedimentologisches Fenster“ identifiziert wurden, in denen eine grobsandige bis kiesige Lage an der Oberfläche zum Vorschein kommt, die sich in seismischen Profilen über das gesamte Gebiet unter einer geringmächtigen (max. 2,20 m) mobilen feineren Sandschicht verfolgen lässt. Durch die Sorted Bedforms ist das Sylter Außenriff durch sehr scharfe, sedimentologische Grenzen geprägt. Eine C-14 Datierungen der Schicht unmittelbar unter der Kieslage (90 cm unter der Sedimentoberfläche) ergab ein Alter von 4.710 ± 25 ¹⁴C-Jahre BP, eine weitere Datierung eines Torfs in 140 cm Tiefe hat ein Alter von ca. 8.000 ¹⁴C-Jahren BP. Das hohe Alter, der die Kiesschicht unterlagernden Sedimente, legt den Schluss nahe, dass das in den Sorted Bedforms am Meeresboden aufgeschlossene grobkörnige Sediment als Transgressionskonglomerat angesehen werden kann. Auch wenn der Bildungszeitpunkt dieses Transgressionskonglomerates nicht genau bekannt ist begrenzt es die Wirtktiefe aller jener Sediment mobilisierenden Prozesse, die unter den heutigen hydrodynamischen Randbedingungen möglich sind.

In einigen der durch Sande geprägten Gebiete bildet der Bäumchen-Röhrenwurm bevorzugt Kolonien. Sowohl die Grabspuren als auch die Röhren des Wurms verändern die physikalischen Eigenschaften des Bodens hinsichtlich Rauheit und Festigkeit.

Die Zungenriffe seewärts der Insel Spiekeroog liegen in einer Wassertiefe von 9 bis 20 m. Der Prozess der Riffumlagerung ist komplex. Die beiden nördlichen Riffe (Gesamtlänge ca. 30 km, Breite ca. 1 km) sind überwiegend stationär mit geringer

Verlagerung nach Norden von ca. 5 m pro Jahr. Die südlichen Zungenriffe (Länge max. 10 km, einige hundert Meter breit) verlagerten sich pro Jahr um ca. 20 m nach Osten. Der anstehende Geschiebemergel enthält als Basis erosionsfeste Reliktsedimente. Feinere Holozänsedimente sind aufgelagert. In der Korngrößenzusammensetzung wurde ein küstennormaler Trend festgestellt. Die inneren Zungenriffe bestehen im landwärtigen Bereich tiefer liegend aus Mittel- bis Grobsand und höher liegend bis zur Riffkrone überwiegend aus Mittelsand. Ihre seewärtigen Flanken sind mit Mittel- bis Feinsand bis hinunter an die Riffsohle bedeckt. Hier finden sich teilweise dünne Schlickauflagen. Die äußeren (seewärtigen) Riffe ähneln bezüglich der Sedimente den inneren Riffen. Auch hier bestehen die unteren Flanken überwiegend aus Grobsand mit eingeschalteten Geröllen und Mittel- bis Feinsanden, während die Riffkrone von Mittelsand dominiert wird. An den äußeren Flanken nimmt die Korngröße von Mittelsand an der Krone bis zu Feinsand an der Rinnenbasis ab. Auf den landwärtigen Flanken der äußeren Riffe liegt eine bis zu 3 m mächtige, bewegliche Sandlage. Die Grobsedimentflächen sind häufig durch Erosion (Volumenverlust) gekennzeichnet. Es zeigten sich nur geringfügige Veränderungen in der generellen Verteilung der Sedimente. Die für das Gebiet der Zungenriffe durchgeführte Langzeitsimulationen, mit allein durch die Gezeiten angetriebenen Simulationsmodellen, deckten kleinräumige Transportwege in Zirkulationszellen auf. Es ist deshalb in Betracht zu ziehen, dass großräumige Sedimentumlagerungen im Bereich der Zungenriffe primär durch Windeinfluss verursacht werden. Auswertungen bathymetrischer Daten vor und nach einem Sturmereignis ergaben Tiefenänderungen von ± 15 cm. Obwohl Messungenauigkeiten vorliegen, kann von einem Erosionsvolumen im tieferen nördlichen Küstenvorfeld ausgegangen werden, das vermutlich durch Stürme im flacheren Teil akkumuliert wurde. Die Zungenriffe erodieren an den landwärtigen Flanken. Abgelagert wird das Material an den Riffkronen und an den seewärtigen Flanken. Generell findet der Transport in Flutstromrichtung nach Osten hin statt.

Die Sedimentzusammensetzung des Sylter Aussenriffs und der Zungenriffe bei Spiekeroog, kann der Charakteristik der übergeordneten Sedimentbeschaffenheit der Deutschen Bucht unmittelbar zugeordnet werden. Die festgestellten Verteilungen und die abgeleiteten Prozesse bestätigen die Phänomenologie der verallgemeinert dargestellten Transportpfade in der Deutsche Bucht.

Wattenmeer:

Das Wattenmeer ist gekennzeichnet durch Rinnen und Intertidalflächen. Die Sedimentklassifikationen erfolgten für die Rinnen der Piep vor Büsum und das Gebiet der Norderhever:

Pieprinnen:

Die Norder- und Süderpiep sowie die eigentliche Pieprinne mit ihren Ausläufern in die Meldorfer Bucht hinein sind durch gleichförmige Flächen mit Feinsanden oder schlickigen Feinsanden gekennzeichnet. Unterbrochen werden sie von Klei (konsolidierten älteren Ablagerungen) bzw. Schill (leere Molluskenschalen in größeren Mengen akkumuliert). Es besteht eine Dominanz von Feinsanden im Rinnensystem. Im seewärtigen Gebiet der Norder- und Süderpiep sind die Feinsande gröber ausgebildet als in der Pieprinne. Mit Annäherung an die inneren Buchtbereiche nimmt der Anteil an Schluff und Ton (Schlick) zu. Ursachen sind die Abnahme der Erosionskräfte von der offenen See in Richtung Land und asymmetrische Transportprozesse. In der hydrodynamisch stärker belasteten Süderpiep besteht der Boden

stellenweise (wie in anderen Teilen der Piep-Rinnen) aus konsolidierten feinkörnigen Ablagerungen (überwiegend Dithmarscher Klei). Diese Sedimente finden sich in tiefen Abschnitten der Rinne nahe Büsum und beiderseits des Tertiusandes in der Norder- und Süderpiep. Entnommene Kleiprobe enthalten häufig nennenswerte Sandanteile, weil die Kleischicht offensichtlich von Schleiern mobilen Sandes überdeckt bzw. überwandert wird. Diese Sandschichten können mehrere Dezimeter betragen und auch Rippel- und Dünenformen ausbilden. In den Tälern der sog. "Hungerrippel" tritt die Kleischicht zutage. In der Norderpiep scheint die Fläche mit anstehendem Klei (ggf. durch Eintrag von Sediment in das Tidebecken) abzunehmen. Kleiflächen treten bei verstärkter Sohlbeanspruchung hervor und können nachfolgend wieder von Sanden überdeckt werden.

Norderhever:

Die Norderhever zeigt im Gegensatz zu den Pieprinnen im Dithmarscher Wattenmeer ein breiteres und gröberes Korngrößenspektrum. Sie wird über weite Flächen von groben Feinsanden oder Mittelsanden dominiert. Es wird davon ausgegangen, dass die gröberen Sande der Norderhever weitestgehend aus der lokalen Aufarbeitung pleistozäner Ablagerungen hervor gehen. Sie entstammen damit weniger den großräumigen im Nordseegebiet vorherrschenden holozänen Materialumlagerungen, die den Sedimentkörper des Wattenmeers aufgebaut haben. Im Bereich der Rinnenränder werden größere Flächen von konsolidierten Ablagerungen eingenommen. Auf allen konsolidierten Ablagerungen kommen auch hier mobile Sandauflagen variabler Mächtigkeit vor. Alle Sande im System der Norderhever-Rinne unterliegen ständigen Umlagerungen. Dies äußert sich einerseits in der Durchmischung mit rezemem Schill und andererseits in der Ausbildung ausgeprägter Sohltransportkörper wie Großrippeln und subaquatischen Dünen.

Watten:

Die Pieprinnen und die Norderhever transportieren überwiegend das Tidevolumen für die angrenzenden Wateinzugsgebiete. Generell sind die Watten entlang der Nordseeküste durch energiegekoppelte, küstenparallele Sedimentgürtel gekennzeichnet, die von See nach Land feiner werden. Dies bildet sich auch in der Sedimentcharakteristik der Watrinnen ab. Saisonal und durch extreme Ereignisse wird diese Zonierung temporär überprägt. Durch Stürme wird Material aus seewärtigen Bereichen vor den Inseln in die Watten transportiert, wo es anschließend reorganisiert wird. Langfristig jedoch zeigt sich die Zonierung bis auf die deichnahen Bereiche stabil. Die Kleilagen und Kleikanten der Watrinnen müssen in einer verfeinerten Modellierung berücksichtigt werden, damit Erosionsprozesse naturähnlich simuliert werden können. Zur Entwicklung der Watten ist die Sedimentmobilität von entscheidender Bedeutung. Mobile Sedimente (überwiegend Feinsand) werden von der vorherrschenden Hydrodynamik umgelagert. Sie steuern die großräumigen morphodynamischen Umgestaltungsvorgänge. Mittel- und Grobsande können als bedingt mobilisierbar eingestuft werden. Sie tragen nicht zu großräumigen morphologischen Veränderungen bei. Schwer mobilisierbare Sedimente (Kies, grober Schill, Klei, Geschiebemergel / -lehm) bedingen die Stabilität der Formen.

Ästuare:

Die Mündungsgebiete von Weser und Elbe zählen zu den größten ihrer Art entlang der Deutschen Bucht. Sie stellen damit jeweils eine für diesen Küstenraum elementare Schnittstelle zwischen Land und Meer dar, wo durch Interaktionen

unterschiedlichster Steuergrößen (darunter Tide, Seegang, Oberwasserabfluss) ein komplexes Sedimenttransport- und -umlagerungsgeschehen anzutreffen ist. Zudem werden sie intensiv als Wasserstraßen genutzt und sind durch Ausbau- und Unterhaltungsmaßnahmen auch stärker anthropogen beeinflusst, als benachbarte Gebiete in der Deutschen Bucht. Vor diesem Hintergrund standen das Weser- und Elbe-Ästuar im Fokus der Untersuchungen in **AufMod-F**. Bekanntermaßen sind intensive Sedimentumlagerungen, insbesondere in den Gewässerabschnitten, wo Vermischungsprozesse von Salz- und Süßwassermassen stattfinden charakteristisch für Ästuarie. Damit unterlagen die angetroffenen Sedimentgrenzen häufigen Raumänderungen. So änderte sich beispielsweise auch die Sedimentzusammensetzung der Sohloberfläche, insbesondere in den Trübungszone, oft über kürzeste Zeitskalen. Die überwiegend mittelsandigen Sohlsedimente in den Fahrrinnen von Elbe und Weser wurden im Bereich der Trübungszone zu den Stauwasserphasen oft von bis zu Meter mächtigen Schlickablagerungen überdeckt.

Das Vorkommen schwach konsolidierter Schlickgerölle, die aus der Aufarbeitung dieser temporären Schlickablagerungen stammen, kann damit erklärt werden. Es ist davon auszugehen, dass dieser Schlickgerölltyp aufgrund seiner Konsistenz nicht über weite Entfernungen transportiert werden kann. Stark konsolidierte Schlickgerölle entstammen hingegen aus überwiegend lateraler Rinnenerosion und können damit bei vermehrtem Auftreten ein Erosionsindikator sein. Kantige Bruchstücke werden aus dem Schichtverband herausgelöst und während des Transportes kantengerundet. Der Rundungsgrad gibt demnach auch Hinweise auf die Entfernung zum Erosionsgebiet. Dort wo Schlickgerölle in größerer Anzahl vorkommen, ist von einer Einflussnahme auf die Mobilisierbarkeit mobiler nichtkohäsiver Sohlsedimente auszugehen. Ferner kann angenommen werden, dass Schlickgerölle die Sohlrauigkeit in bislang noch unbekannter Weise verändern. Es sei an dieser Stelle angemerkt, dass das Vorkommen von Schlickgeröllen keinesfalls auf die Ästuarie beschränkt ist und die gewonnenen Erkenntnisse durchaus auch auf andere Bereiche in der Deutschen Bucht übertragbar sind.

Auch in den Ästuarie ist die Sohloberfläche, insbesondere an den Rinnenflanken, vielerorts von anstehenden kohäsiven Feinsedimenten, wie Klei oder Geschiebemergel, geprägt. Oft sind großflächig anstehende Kleiablagerungen an der Gewässersohle partiell von Sandschleiern bedeckt. Insgesamt ist in beiden Ästuarie das gesamte sandige Korngrößenspektrum anzutreffen. Insbesondere im Fahrwasser der Außenelbe sind grobkörnige Abschnitte durch mehrere Meter hohe subaquatische Dünen gekennzeichnet. Feinsandige Gebiete enthalten abschnittsweise kleinere Transportkörper mit Höhen im Dezimeterbereich. Die mit konstanten initialen Sedimentverteilungen in Simulationsmodellen nachgebildete hydraulische Sortierung ist in den Ästuarie ansatzweise erkennbar. Modellsimulationen ergaben nach längerer Berechnung Änderungen (Sortierung) der Sedimente bezüglich Tiderinnen und Wattbereichen. Die Berechnung schlägt in Bereichen fehl, in denen die Sedimentverteilung an der Sohle nicht primär durch die heutige Hydrodynamik geprägt ist. Auch die Bildung der Trübungszone kann mit den Modellen nachgebildet werden. Dies war jedoch nicht die Aufgabe von **AufMod**. Eine Herausforderung für zukünftige Forschungsaktivitäten besteht in der Nachbildung der stratigraphischen Sortierung.

5.4 Fragen zu kleinräumigen Bodenformen (Transportkörper)

Frage: Was kann aus der dokumentierten Verteilung der Bodenformen geschlossen werden?

Ein Systemverständnis der Hydro-, Sediment-, und Morphodynamik der Deutschen Bucht muss neben der Sedimentologie auch die Verteilung von Bodenformen, deren Dynamik und deren hydraulische Wirkung berücksichtigen. Durch die Verschneidung und gemeinsame Analyse flächenhafter hochaufgelöster bathymetrischer Messdaten zusammen mit sedimentologischen Daten sowie mit zeitaufgelösten und repräsentativen hydrodynamischen Informationen wird ein vertieftes Verständnis für das Auftreten und die Entwicklung von Bodenformen ermöglicht. Alle Bodenformen dokumentieren Wechselwirkungen der hydro- und sedimentdynamischen Prozesse. Die räumliche Verteilung spiegelt die hydrodynamische Belastung auf die Gewässersohle wider, d. h. nahezu alle Bereiche, die von hohen Strömungen beeinflusst werden, weisen Bodenformen auf. Viele untersuchte Bodenformbereiche in der Deutschen Bucht sind in der 40jährigen Zeitspanne (zwischen den von (Ulrich, 1971)) erfassten Bodenformen und heutigen Daten) nahezu ortsfest. Die Heterogenität dieser Elemente ergibt sich aus ihren geometrischen Eigenschaften. In ihrer lokalen Ausprägung sind die Bodenformen sehr variabel, da sich große und kleine Dünen dreidimensional überlagern.

Strömungsnormale Bodenformen entstehen vor allem in den Gezeitenrinnen, Ästuaren und Seegatten. In den stark durchströmten tiefen Rinnen sind die Sohlformen hochdynamisch: Typische Bewegungsraten großer Dünen liegen in Größenordnungen von 10er m/a. Überlagert werden diese Dünen von kleineren Bodenformen mit Bewegungsraten von mehreren m/Tide. Sanddünen wandern auch über ortsfeste Strukturen, wie beispielsweise nichterodierbare Bereiche.

Seit einigen Jahren verfügbare Fächerecholotdaten insbesondere aus Fahrrinnen ermöglichen die detaillierte Analyse individueller Bodenformen und deren Zuordnung zu hydrodynamischen und sedimentologischen Zustandsgrößen. Residuelle Transportrichtungen lassen sich aus den asymmetrischen Bodenformen ablesen.

Auf Basis des Funktionalen Bodenmodells wurde ein teilautomatisiertes Verfahren zur Bestimmung der Bodenformhöhen entwickelt und getestet. Hierfür müssen hoch auflösende Vermessungsdaten vorliegen. Solche Analysen sind deshalb erst ab ca. 2008 für Teilgebiete (z.B. Mündungsbereich der Elbe) möglich.

Die Qualität der Simulation morphodynamischer Prozesse mit numerischen Modellen ist neben korrekter Vorgabe von Bathymetrie und Sedimentologie abhängig von der Kenntnis der Bodenrauigkeit im Untersuchungsgebiet. Ergänzend zur Kornrauigkeit ist besonders die Formrauigkeit der Bodenformen unterschiedlicher Gestalt und Größe bestimmend.

Für eine naturnahe Simulation der Küstendynamik ist deshalb eine Berücksichtigung der Verteilung von Bodenformen in numerischen Modellen notwendig. Dies kann durch Einbindung von Messwerten in die „Bodenbelegung Rauigkeit“ von Modellen erfolgen, oder durch Prädiktoren, die eine erwartete Formrauigkeit berechnen. Simulationsmodelle können Höhen und Längen von Bodenformen prognostizieren. Ihre Geometrie wird in großen Simulationsgebieten nicht durch das Modellgitternetz aufgelöst. Die naturähnlich parametrisierte Berücksichtigung der Bodenformen bestimmt im Zusammenspiel mit der Kornverteilung die Dämpfung der Gesamtener-

gie des Wasserkörpers. Die naturähnliche Abbildung der Wirkung der räumlichen und zeitlichen Variation der Rauigkeitselemente ist eine grundlegende Voraussetzung für die Simulation naturähnlicher Prozesse des Sedimenttransports. Die für das **AufMod**-Referenzjahr 2006 für die Elbmündung prognostizierten Dünenhöhen passen beispielsweise gut zu den Mustern aus dem Jahre 2012. Das Kappen der Dünen durch Baggeraktivitäten kann dabei noch nicht berücksichtigt werden.

Frage: Gibt es eine gesicherte Grundlage zur Genese und Anpassung der Bodenformen?

Trotz der großen Anzahl von Studien und einer großen Bandbreite von Modellansätzen und anderen Methoden ist eine eindeutige deterministische Erklärung der Entstehung und Entwicklung von Bodenformen sowie deren Interaktion mit der Hydrodynamik und Transportprozessen noch nicht bekannt. Die Formparameter sind von der Sedimentologie, der Hydrodynamik, der großräumigen Morphologie und dem Initialzustand abhängig. Voraussetzung für Umlagerung am Boden ist die Verfügbarkeit von Sediment. Der bodennahe Transport findet durch Bewegung als Schicht (sheet flow), in Strömungsriffeln (Ripple) am Boden, in Riffeln über Dünen, in Dünen, oder in Dünen über größeren Transportkörpern (Megariffel, große Dünen) statt.

In gerichteter Strömung verformt das nächstkleinere Element als Transportkörper das nächstgrößere Element. Strömungsriffel „wandern“ beispielsweise über die der Strömung zugewandten Dünenseite und tragen mit dem Übergang auf die Leeseite zur Migration der Düne bei. Die zeitliche Änderung der Bodenformen hängt vom hydrodynamischen Antrieb ab.

Frage: Tragen bewegliche Bodenformen nennenswert zum großräumigen Sedimenttransport bei?

Die beweglichen Bodenformen sind Abbild des sohlnahen (bed-load) Sedimenttransports. Durch die nahezu unmögliche direkte Messung bodennaher Frachten stellt der Vergleich sukzessiver Vermessungen der Bodenformen die einzige Möglichkeit einer Quantifizierung dar. Sie tragen nur indirekt zum großräumigen Schwebstofftransport bei, etwa durch Veränderung der lokalen Hydrodynamik.

Das Dünenfeld bei Minsener Oog in der Außenjade verfügt über subaquatische Dünen bis zu 450 m Länge und Höhen bis 7,2 m. Die großen Dünen bestehen aus Mittelsand an der Dünenbasis und aus Grobsand im Bereich der Dünenkrone. Das Dünenfeld füllt fast die gesamte Breite der Jaderinne aus, nur im Westteil gibt es feinkörnige strukturarme Bereiche sowie Hartgründe am südöstlichen Ende der Fahrinne. Kleine bis mittelgroße Sohlformen aus Feinsand kennzeichnen den südwestlichen Teil des Untersuchungsgebietes. Das Dünenfeld ist überwiegend ebborientiert, nur im Westteil gibt es flutorientierte Formen.

Die ebbdominierten Dünen bewegen sich etwa 5 m pro Monat seewärts, die flutdominierten hingegen 15 m pro Monat in die Jade hinein. Insgesamt 37 hoch aufgelöste Vermessungen belegen konstante Wanderungsraten der Sohlformen. Extremereignisse scheinen die Asymmetrien und Wanderungsbewegungen nicht nachhaltig zu beeinflussen. Mit den analysierten Messdaten können die Sedimenttransportpfade ermittelt werden. Vermutete Zirkulationspfade konnten damit jedoch nicht nachgewiesen werden. Erst durch Überlagerung mit Ergebnissen aus Simulations-

modellen können komplexe Zirkulationssysteme analysiert werden. Ebb- und flutorientierte Anteile der Sedimentumlagerungen wurden berechnet. In der Jaderinne liegt der Betrag 20mal höher im Vergleich zu den Zungenriffen vor Spiekeroog.

Für den inneren Abschnitt der Norderhever wurde auf der Basis der Sonaraufzeichnungen eine kategorisierende Vermessung der Transportkörper durchgeführt. Entsprechend ihres Kammverlaufes sowie ihrer Wellenlänge werden verschiedene Rippeltypen unterschieden: Geradlinig regelmäßige sowie unregelmäßige, d.h. gebogene oder unterbrochene Rippeln mit Kammabständen unter 5 m (Höhe bis 0,3 m) bzw. über 5 m (Höhe bis ca. 1 m). Das Verteilungsmuster der ausgewiesenen Rippeltypen zeigt eine gute Übereinstimmung mit dem der Sedimente. Danach kommen wie erwartet die ausgeprägten Sohltransportkörper dort vor, wo in ausreichender Menge Mittelsande vorliegen. In Feinsandgebieten fallen die Sohlformen kleiner aus. In Gewässerabschnitten mit Mangel an mobilen Sanden, wie z.B. im Bereich älterer, konsolidierter Ablagerungen, gibt es entweder gar keine oder nur Mangelformen ("Hungerrippeln"). Ein fast ausschließlich ins Innere der Bucht gerichteter residualer Transport, wie ihn ein Simulationsergebnis für die zentrale Norderhever andeutet, konnte nicht durch die Messdatenanalysen verifiziert werden. Die Auswertung der Symmetrieverhältnisse der in der Norderhever vorkommenden Sohltransportkörper zeigen ein komplexes Muster von teils in einander übergehenden Rippelfeldern, die entweder vom Ebbstrom oder aber vom Flutstrom dominiert werden.

Die Modellsimulationen der küstennahen Sedimentdynamik zeigen, dass Schwebstofffrachten um Größenordnungen größer als der bodennahe Transport sein können. Es muss aber im jeweiligen Untersuchungsgebiet dargestellt werden, welche Art der Sedimentumlagerung morphologisch (morphodynamisch) relevant ist. Die Ergebnisse weisen hin auf gleichzeitige Aktivität mehrerer sedimentdynamischer Regimes. Hierzu gehört auch die Fluid Mud Dynamik in den Tälern aktiver Sanddünen.

5.5 Fragen zur Morphodynamik

Frage: Hat sich die Bathymetrie der Deutschen Bucht morphodynamisch signifikant / erkennbar verändert? Welche Zeitspannen sollen zur Beantwortung dieser Frage betrachtet werden?

Die generelle Bathymetrie der Deutschen Bucht geht in ihrer Anlage deutlich über den im Projekt *AufMod* als langfristig bezeichneten Zeitraum (Bezug zur Simulationsdauer) hinaus. Die dafür verantwortlichen Prozesse sind an die Küstenentwicklung von mehreren tausend Jahren gekoppelt. In größeren Tiefen der Nordsee sind bathymetrische Veränderungen nur durch langfristig anhaltende Veränderungen der hydrodynamischen Bedingungen zu erwarten. Eine Aussage zu den bereits im Prozess befindlichen Veränderungen ist hier aufgrund der geringen Dokumentationsdichte nur unzureichend und nicht abschließend zu beantworten. Für den Schelfbereich ist aus der verfügbaren Datensicht leider festzustellen, dass der Fehlerbereich der bathymetrischen Daten quantitative Aussagen derzeit nicht zulässt. Auf dem Schelf wäre für eine Auswertung von Daten aus der Seevermessung des BSH der Beschickungsfehler von bis zu 1 Meter deutlich zu reduzieren. Ferner liegen keine ausreichenden Zeitreihen für große Bereiche des Schelfs vor. Die Analyse der Bathymetriedaten in den Wassertiefen über 20 m erlaubt somit keine Aussagen zu Änderungen der Morphologie. Die morphologische Änderungsrate liegt im Bereich des Messfehlers. Auch liegen nicht genug Wiederholungsmessungen vor.

Großräumig kann der Schelf in zwei morphologische Einheiten untergliedert werden:

- Vor der schleswig-holsteinischen Küste und am Borkum und Norderneyer Riffgrund steht der pleistozäne Untergrund am oder nahe am Meeresboden an. Hier besteht ein Sedimentdefizit. Die alten Geestrücken Schleswig Holsteins sind durch kleinräumige Strukturen gekennzeichnet. Hier ist die Sedimentverteilung maßgeblich vom vorhandenen Untergrund geprägt.
- In den übrigen Gebieten liegt in ausreichender Tiefe ein großflächiger holozäner Ablagerungsraum. Die Fraktionierung der Sedimente ist hydrodynamisch geprägt. Im Elbe-Urstromtal lagerte sich holozänes Sediment großer Mächtigkeit ab. Südlich von Helgoland besteht ein Schlickfallgebiet.

Überwachungsberichte für Transitrohrleitungen in der deutschen AWZ der Nordsee (NORPIPE, EUROPIPE (EP) I und II) liefern punktuelle Einblicke in das Transportgeschehen, die auch zur Validierung simulierter Sedimenttransporte herangezogen werden können. Einseitige Sedimentanhäufungen an freiliegenden Rohrleitungen können Aufschluss über resultierende Sedimentbewegungen liefern. Die beobachteten Akkumulationen im SW der EP I, KP 440 (Querprofile 2005 und 2011) belegen den Sedimenttransport der numerischen Modelle aus südwestlicher Richtung.

Auch die beobachteten Sedimentanlagerungen im SO der EP II KP 510 (Querprofil 2000, 2006 und 2011) mit Kolkbildung im NW, die auf einen Sedimenttransport aus südöstlicher Richtung schließen lassen, werden von den numerisch modellierten Sedimenttransporten wieder gegeben. Der Meeresboden der Deutschen Bucht wird folglich noch in Wassertiefen zwischen 40 und 60 m von sedimentdynamischen Prozessen beeinflusst.

Im Sinne des Projektes als langfristig bezeichnete Veränderungen der Bathymetrie sind nur für die unmittelbare Küstenzone ausreichend dokumentiert. Alle Fahrwasserrinnen, Ästuare und Inselvorfelder sind in historischen Karten seit ca. 200 Jahren dokumentiert worden. Die Veränderungen der küstennahen Bereiche wurden vor allem durch menschliche Eingriffe wie Eindeichung und Landgewinnung verursacht. Umfangreiche messdatenbasierte Analysen der Bathymetrie sind nur für den morphologisch hoch dynamischen Küstennahbereich durchführbar. Hier liegen umfangreiche Wiederholungsmessungen vor. Diese Messungen ermöglichen jedoch kaum Analysen auf kurzfristigen Zeitskalen bis zu einem Jahr. Analysen über mehrere Jahre sind möglich, verlieren in der Simulation jedoch an Schärfe. Für kurzfristige Aussagen bedarf es der Modelle.

Frage: In welchen Gebieten besteht eine starke, mittlere oder schwache Morphodynamik?

Gebiete starker morphodynamischer Aktivität können aus dem Funktionalen Bodenmodell für verschiedene Zeitspannen extrahiert werden. Die Zeitspannen müssen in Abhängigkeit vom Untersuchungsgebiet unterschiedlich lang gewählt werden. 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. Der die Bathymetrie verändernde mesoskalige (über Monate stattfindende) Sedimenttransport findet somit überwiegend intern, d. h. innerhalb der Deutschen Bucht statt.

Für **AufMod** wurden mit dem Funktionalen Bodenmodell für die Jahre 1982 bis 2012 (jeweils zum 01. Juni) zeitvariante Bathymetrien bis zur seewärtigen 20m-Isobathe in räumlicher Auflösung von 50m berechnet. Für jede Jahrestopographie wird die Qualität des so erzeugten Bathymetriemodells mit einem berechneten (im selben Modellgitter gespeicherten) Indikator beurteilt. Dieser sogenannte Confidence-Parameter beschreibt den zeitlichen und örtlichen Abstand der Modelltiefen zu den Messungen. In der bathymetrischen Analyse stehen damit wichtige Kennwerte zur Verfügung:

- Die Änderungsrate (Alteration Rate [m/xa]) stellt die Tiefendifferenzen zweier Jahrestopographien dar.
- Der morphologische Raum (Morphological Space) als Differenz der maximalen und minimalen Tiefe an jedem Gitterpunkt gibt Aufschluss über die Mächtigkeit der maximalen Sedimentverlagerung innerhalb des Betrachtungszeitraums ($Z_{max} - Z_{min}$). Er ist besonders zur Analyse der großräumigen Morphodynamik geeignet. Ob Sedimentation oder Erosion stattgefunden hat, ist mit diesem Kennwert nicht ersichtlich. Dies gilt ebenso für das Zeitintervall der morphologischen Aktivität.
- Der morphological Drive $((dz/a)_{max} - (dz/a)_{min})$ zeigt, ob eine morphologische Änderung über den Betrachtungszeitraum stetig verläuft, oder ob Extremereignisse stattgefunden haben. Hiermit lässt sich beispielsweise die Verlagerung von Rinnen gut identifizieren.
- Ergänzende Kenngrößen können für eine umfassende Datenbankanalyse speziell für die Betrachtung von Zeitspannen genutzt werden.

Regelmäßige Vermessungen des Gewässerbodens ermöglichen in Verbindung mit geeigneten räumlichen und zeitlichen Interpolationsverfahren die Bestimmung volumetrischer Veränderungen. Die bathymetrische Datenbasis des Funktionalen Bodenmodells legt nahe, dass die Watten in der Deutschen Bucht im Mittel über die letzten 15 Jahre leicht aufgewachsen sind, jedoch in Teilgebieten mit unterschiedlichen Tendenzen. In der Elbmündung führt der Durchbruch der Medemrinne zum Klotzenloch beispielsweise zu einer Abnahme von Wattvolumen und Wattfläche. In den Rinnensystemen der Seegatten und Wattrinnen führen lokale Prallhangsituationen generell bei hohen Strömungsgeschwindigkeiten zur Verlagerung der Rinnen. In diesen Rinnen und ihren jeweiligen Mündungsbereichen liegen die typischen Werte der Sohlenbelastung (Bodenschubspannung) über 2 Pa. Das Gebiet der Ostfriesischen Inseln und des Nordfriesischen Wattenmeeres ist eng an die heutige Hydrodynamik angebunden. Die größte Dynamik besteht auch hier in den Tiderinnen. Es ist davon auszugehen, dass diese sich weiterhin räumlich begrenzt verlagern, wobei sich das vorhandene Muster nicht grundsätzlich verändern wird.

Die mit den Datenmodellen im Hindcast analysierte Rinnendynamik kann mit mathematischen Simulationsmodellen nur im Ansatz nachvollzogen werden. Es besteht ein erheblicher FuE-Bedarf. Das gesamte Nordseemodell ist zur Prognose dieser lokalen Entwicklungen weniger gut geeignet. Ausschnittsmodelle mit einer deutlich besseren lokalen aufgelösetung können dafür effizienter eingesetzt werden.

Morphodynamische Simulationsmodelle beschreiben die Lageänderungen des Gewässerbodens in Folge berechneter Sedimenttransporte. Zusätzlich kann die Entwicklung und Veränderung der Dünen, der Kornzusammensetzung des Gewässer-

bodens oder des Kornparameters D_{50} und der Porosität des Sedimentes berechnet werden. Für die großräumige Analyse der volumetrischen Veränderungen wurde der Bereich vom Deichfuß bis zu 20 m-Tiefenlinie einschließlich umfangreicher Ästuargebiete einbezogen. Für ein Regionalmodell Jade/Weser/Elbe berechnet das Funktionale Bodenmodell z.B. für 2006 eine Sedimentzunahme von ca. 15 Mio. m^3 . Diese Größenordnung konnte in der Simulation reproduziert werden. Das Histogramm der Tiefenänderungen zeigt für die Simulation im Vergleich zum Bodenmodell eine leichte Asymmetrie in Richtung Sedimentation. Die Häufigkeit der Tiefenänderungen zwischen -25 cm bis 25 cm ist leicht erhöht. Derartige Auswertungen ermöglichen eine generelle fachliche Einschätzung der simulierten Morphodynamik.

Für die Jahre 1996 bis 2007 wurden die Gezeiten, der Seegang, der fraktionierte Sedimenttransport und die Sohländerung mit einem 3D-Modell ohne morphologisches Zeitraffungsverfahren berechnet. Anfangskornverteilung und Porosität bestimmen maßgeblich die morphologische Reaktion des Systems. Im Ergebnis sind in der Zeitreihe dieser Jahre Gebiete mit hoher oder geringer Variabilität der Erosions- und Sedimentationsvolumina erkennbar. Die größte Dynamik besteht im Küstenvorfeld. Bereiche Nord- und Ostfrieslands sind unter Seegangsbelastung überwiegend Erosionsgebiete. In der Weser, Jade und Elbe überwiegt Sedimentation. Die Jade ist im Mittel nahezu ausgeglichen. Der mit dem Funktionalen Bodenmodell bestimmte morphologische Raum BER („bed elevation range“) wurde mit der Summe der für die Einzeljahre berechneten morphologischen Änderungen (1996 bis 2007) verglichen. Es zeigte sich, dass die morphologisch aktiven Bereiche von der Simulation bereits annähernd getroffen wurden, im Detail mit Unterschieden in Lage und Höhe. Tendenziell trägt die Windwirkung zu einer Abnahme der Sohlbelastung in den Tiderinnen und einer Zunahme im Vorstrandbereich bei. Die Fläche erhöhter Sohlbelastung wird unter Seegangseinfluss deutlich vergrößert, insbesondere im Vorstrandbereich bis zu 10 m Tiefe. Besonders seegangsexponierte Regionen befinden sich in der Elbmündung (Scharhörn), auf dem nordfriesischen Schelf und im Vorstrandbereich der ostfriesischen Inseln. Durch die Wirkung des Seeganges nimmt hier die Dauer hoher Sohlbelastungen zu. Die von einigen Modellsimulationen berechnete Erosion im Bereich der Helgoländer Schlicklinse steht im Gegensatz zum bekannten Wissen. Die Erodierbarkeit des dort verfügbaren sehr feinen Materials wird im Modell offenbar überschätzt.

Die Ergebnisse liefern einerseits Erkenntnisse, in die kleinräumige und kurzfristige morphodynamische Untersuchungen eingebettet werden können. Andererseits besteht Forschungsbedarf für verschiedene Einzelfragen.

Frage: Welche morphologischen Veränderungen sind natürlich / anthropogen geprägt?

Auf der Basis des Funktionalen Bodenmodells können sowohl natürliche als auch anthropogene Veränderungen in der Deutschen Bucht erkannt werden. Voraussetzung ist hierfür eine hohe zeitliche und räumliche Datendichte. Natürliche morphodynamische Veränderungen lassen sich im Rahmen der Unschärfe von Messungen und Modellbildungen quantifizieren. Hierzu gehören insbesondere die angesprochenen Veränderungen der Rinnensysteme. Aus dem Bodenmodell detektierbare anthropogene Eingriffe sind beispielsweise die Fahrrinnenanpassung der Tideelbe (1999-2000), vereinzelt Bagger- und Umlagerungsaktivitäten in der

Tideelbe und der Bau des Jade-Weser-Ports. Andere anthropogene Eingriffe können nicht identifiziert werden, weil die Datenreihen zeitlich zu kurz und räumlich zu gering aufgelöst sind, bzw. Daten komplett fehlen oder aufgrund unzureichender Projektunterstützung noch nicht hinreichend gut eingepflegt werden konnten. Dieses betrifft beispielsweise die langfristigen Wirkungen der Fixierungen von Inselköpfen durch feste Bauwerke, die Eindeichungsmaßnahmen oder die historischen Ausbauten der Hafenzufahrten in der Elbe, der Weser, der Jade und der Ems. Neue Fragestellungen ergeben sich zukünftig aus kleinräumigen Wirkungen von Bauwerken wie Offshore-Windenergieanlagen oder Plattformen auf die Bathymetrie des Meeresbodens. Beispielsweise sind Kolkungen im Einflussbereich von Offshore-Tripod-Gründungen bis max. 70 m um die jeweilige Anlage nachweisbar. Von zunehmender Bedeutung ist die Fragestellung auch im Zusammenhang mit der Bewertung von Umweltauswirkungen bei der Verlegung von Seekabeln oder auch bei der Gewinnung von marinen Sanden und Kiesen.

Eine offene Frage für die zukünftige Forschung ist, ob für Teilbereiche der Deutschen Bucht Kennwerte entwickelt werden können, mit denen die „Natürlichkeit“ der Morphodynamik quantifizierbar ist. Veränderungen dieser Kenngrößen könnten weitergehend auf Veränderungen des morphodynamischen Regimes hinweisen.

5.6 Fragen zum Sedimenttransport

Frage: Wie ist die hydrodynamische Belastung des Bodens als Antrieb für den Sedimenttransport in den Teilgebieten der Deutschen Bucht einzustufen?

Die im Funktionalen Bodenmodell verfügbaren Informationen zur Sedimentzusammensetzung und -verteilung, sowie zur Formenvielfalt und Ausprägung der Sohlformen ermöglichen wichtige Rückschlüsse auf die hydrodynamische Belastung des Bodens in allen Teilgebieten der Deutschen Bucht. Vergleichende Gegenüberstellungen alter und neuer sedimentologischer Datensätze verdeutlichen langfristig vorkommende Faziesbereiche mit über Raum und Zeit variierenden Sedimentgrenzen. Auffällig ist die Akkumulation feiner Sedimente im Küstensaum der Deutschen Bucht außerhalb der stark durchströmten Wattströme und Fahrrinnen. Größeres Sedimentinventar in tieferen Gebieten der Deutschen Bucht steht im Zusammenhang mit dominierend seegangsinduzierter Bodenschubspannung. Sowohl die Verteilung der Korngrößen als auch die der Transportkörper kann mit prozessbasierten Simulationsmodellen in Grenzen nachvollzogen werden.

Frage: Wie verlaufen die langfristigen und großräumigen Sedimenttransportrichtungen, welche Massen werden in welche Richtung transportiert und was ergibt sich daraus für die Sedimentbilanz der Deutschen Bucht?

Großräumig kann der Sedimenttransport im Wasserkörper und am Boden nicht vollständig messtechnisch erfasst werden. Die Beantwortung der Frage muss sich deshalb ausschließlich auf die Ergebnisse der Simulationsmodelle stützen. Resultierende Strömungen und vor allem Transporte stellen gute Indikatoren für großräumige Sedimentumlagerungen dar. Für die Deutsche Bucht stimmen Restströme und Resttransporte in den meisten Fällen gut überein. In Abhängigkeit von der Kornverteilung und teilweise unterschiedlichen Flut- und Ebbstromgeschwindigkeiten muss die Richtung der Restströmungen nicht in jedem Fall mit den Netto-Sedimenttransportrichtungen übereinstimmen. Mit Systemstudien lassen sich Variabilität und

Einfluss der verschiedenen Faktoren bestimmen. Bei unterschiedlichen meteorologischen Situationen ergeben sich charakteristische Muster, die sich mit den Sedimentverteilungen verknüpfen lassen. Hochenergieereignisse sind Motor für die überdurchschnittliche Mobilisierung von Sedimentmassen. Wie das erodierte Material exportiert wird, hängt vom zeitlichen Zusammenspiel der hydrodynamischen Kräfte wie Seegang (Wellen), Wellenanaufrichtung und Gezeitenphase ab. Zur Quantifizierung der transportierten Massen werden Bilanzierungen über Querschnitte ausgewertet. Die großräumigen Sedimenttransporte verlaufen in der Deutschen Bucht i. w. zyklonal und folgen damit der von nordwestlichen Winden getriebenen Restströmung. Bei Ostwindlagen können sich die Transportpfade auch umdrehen und zu einem anti-zyklonalen Transport führen. Jahre mit ausgeprägten Ostwindlagen bewirken vom Mittelwert abweichende Bilanzsummen.

Die prozessbasierte Simulation des Suspensions- und Geschiebetransports erfolgte für die Jahre 1996 – 2007 auf jährlichen Zeitskalen. Dies ermöglicht Bilanzierungen für die Einzeljahre der Zeitreihe. Der suspendierte Transport (Feinsand und feinere Fraktionen) ist im Bereich vor den ostfriesischen Inseln in die Innere Deutsche Bucht gerichtet. Hier verbleibt der überwiegende Anteil des transportierten Materials. Lediglich das in Wassertiefen größer als 20 m transportierte Material zweigt westlich von Helgoland nach Norden hin ab. Dieses Phänomen gilt im Mittel sowohl für windintensive als auch für windstillere Jahre. Die Richtungen des simulierten Geschiebetransportes, bestehend aus Mittelsand und gröberen Fraktionen und entsprechen so im Wesentlichen denen des Suspensionstransports. Im nordfriesischen Schelfbereich werden fast keine durchgehenden Sedimenttransportbänder analysiert. Die in Suspension transportierten Massen sind flächendeckend viel größer als die des Geschiebetransportes. Der berechnete residuale Sedimenttransport, der von Westen aus dem niederländischen Küstenvorfeld in die Deutsche Bucht eingetragen wird, beträgt im Jahr 2000 ca. 45 Mt/a. Dies ist der höchste Wert der untersuchten Jahreszeitreihe. In den anderen Jahren der Zeitreihe wird nur etwa 1/2 bzw. 1/3 dieser Sedimentmasse von Westen eingetragen. Die Sedimentbilanz der Deutschen Bucht kann mit diesem Sedimenteintrag, den Einträgen aus den Ästuaren sowie dem Austrag nach Norden und Nordwesten abgeschätzt werden. Die simulierten Ästuarprozesse verstärken in allen Jahren den Netto-Eintrag in die Deutsche Bucht. Die Austragsmengen aus der Deutschen Bucht sind um etwa eine Größenordnung geringer als die Eintragsmengen. Die untersuchte Jahreszeitreihe zeigt im Ergebnis die höchste Bilanzsumme von ca. 53 Mt/a in zwei Jahren der untersuchten Zeitreihe von 1996 – 2007. In zwei anderen Jahren liegt der Wert unter 30 Mt/a. Von besonderem Interesse ist die tiefenabhängige Verteilung der Netto-Transportmassen. Detailanalysen ergaben, dass der überwiegende Anteil im Tiefenbereich zwischen 10 m und 20 m liegt. Der Transport im Rückseitenwatt der ostfriesischen Inseln ist deutlich geringer.

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 die besondere Schlicksituation im Ems-Ästuar erklärt werden.

5.7 Fragen zu den Methoden und Verfahren für Analysen und Prognosen

Frage: Wie lassen sich die natürlichen Prozesse (analyisierte Messergebnisse) mit Simulationsergebnissen vergleichen? Wie ist hierfür der Status der Datenakquisition / Datenaufbereitung zu bewerten?

Der Vergleich von Messdaten mit Simulationsergebnissen erfordert zunächst eine tiefgreifende Analyse der zu beobachtenden (messbaren) Größen in der Natur, die einen signifikanten Einfluss auf die Morphodynamik in der Deutschen Bucht haben. Die Lage der Gewässersohle kann nur im Rahmen der verfügbaren Messgenauigkeit erhoben werden. Die örtliche und zeitliche Auflösung hängt von den in den Fokus genommenen Prozessen ab (z. B. Entwicklung der Bodenformen, Rinnen, Vorstrandbereich und auf dem Schelf).

Zur Bestimmung volumetrischer Veränderungen müssen Annahmen über die Veränderungen der Form der Oberfläche getroffen werden. Die mathematische Berechnung der stetigen Bodenoberfläche aus punktuellen Messungen vergrößert zwangsläufig die Unschärfe. Für küstenfernere Gebiete können die morphologischen Änderungen innerhalb des Mess-/Beschickungsfehlers liegen. Die natürlichen Prozesse können deshalb nicht allein mit den Messdaten großräumig analysiert werden. Eine Synthese der Ergebnisse aus Daten- und Simulationsmodellen ist unverzichtbar. Insbesondere muss darauf hin gearbeitet werden, dass der Unschärfebereich sowohl für die Messwerte als auch für die Modellergebnisse mit angegeben wird. Dass bedeutet aber auch, dass die Unschärfen mit dem gewählten Simulationsansatz quantifiziert werden können. Neben der Unschärfe der Naturdaten muss auch deren natürliche Variation analysiert sowie deren „statistischer Charakter“ beschrieben werden. Diese Informationen können auch für die Realisierung von langfristigen morphodynamischen Simulationen genutzt werden.

Oberflächennahe Schwebstoffverteilungen lassen sich mit einer qualitativen Quantifizierung über Luft und Satellitenaufnahmen erfassen; weil die Schwebstoffkonzentration nur in Größenordnungen quantifiziert werden kann. Satellitenaufnahmen der Deutschen Bucht enthalten oft großräumige Schwebstoffverteilungen. Der Vergleich mit Modellergebnissen beschränkt sich im Wesentlichen auf die Transportmuster. Aufgenommene Schwebstoffnahmen in der Deutschen Bucht werden auch vom Simulationsmodell reproduziert. Dies gilt beispielsweise für die „Sedimentfahne der Elbe“ oder das westlich von Helgoland mit dem Simulationsmodell analysierte Umschwenken des West-Ost-Transportbandes suspendierten Materials nach Norden.

Die Validierung der Simulationsmodelle ist für die Gezeiten des Meeres und die Tidedynamik der Küstengewässer in Bezug auf Wasserstände, Thermodynamik, Salzgehalt und Seegang weit voran geschritten. In *AufMod* ist die Thermodynamik bisher noch nicht berücksichtigt worden. Dies soll in der zweiten Entwicklungsstufe realisiert werden. Dem Seegang sollte neben dem Wasserstand in der Validierung hohe Aufmerksamkeit geschenkt werden, da er neben der Tideenergie ein bedeutender Energielieferant für die Morphodynamik ist. Die Validierung morphodynamischer Simulationsergebnisse steckt noch in den Kinderschuhen. Mess- und Modellunsicherheiten werden in der Regel noch nicht oder nur rudimentär berücksichtigt. Beim Brill Skill Score wird zwar die Messunschärfe der zu vergleichenden Größe herangezogen, die Unsicherheiten in den Modellparametern (Unsicherheitskaskade) werden jedoch vernachlässigt. Neben den in der Natur messbaren morphologischen und sedimentologischen Zuständen (Tiefen, Bodenformen, Sediment-

verteilungen) lassen sich bei Modellvergleichen auch Sedimentkonzentrationen, Transportraten und Bilanzierungen vergleichen. Die Modellvergleiche können auf der Grundlage verschiedener Simulationsmodelle oder durch Vorgabe variierender Parametrisierungen in einem Simulationsmodell durchgeführt werden. Der Maßstab für die Ergebnisbeurteilung muss aber stets die Natur sein. Der Vergleich der in **AufMod** für die Nordseesimulationen eingesetzten Modellverfahren ergab, dass in der Regel nur geringfügig abweichende Kalibrierungen vorgenommen werden mussten, wenn flächendeckend naturähnliche Korngrößen- und Bodenformverteilungen verwendet wurden. Beim Einsatz unterschiedlicher Simulationsmodelle sowie systematischer Parametervariation ergibt sich eine Streubreite der Simulationsergebnisse. Diese gilt es fachlich zu bewerten um damit insbesondere im Hinblick auf die Morphodynamik zu einer belastbaren und verbesserten Einschätzung des Systemverhaltens zu gelangen. Hierdurch wird das Systemverständnis beträchtlich erweitert.

Frage: In welchen Teilgebieten ist die Einbeziehung von Baggeraktivitäten in die morphodynamische Analyse unverzichtbar?

Eine allgemeingültige Antwort wäre: Bagger- und Umlagerungsaktivitäten müssen in der morphodynamischen Simulation einbezogen werden, wenn sie im Vergleich zu den natürlichen Transport- und Umlagerungsmengen als signifikant eingeschätzt werden. Diese Einschätzung kann jedoch nur gegeben werden, wenn der Sedimenthaushalt für die Teilgebiete der Deutschen Bucht naturähnlich quantifiziert werden kann, in denen Baggerungen und Umlagerungen des Baggermaterials vorkommen.

AufMod definiert für die Ästuare Elbe, Weser und Ems Bagger- und Umlagerungskriterien einschließlich der Umlagerungsgebiete, die den aktuellen Unterhaltungsstrategien entsprechen. Die Baggerung und Umlagerung setzt in der Simulation ein, wenn definierte kritische Wassertiefen (planfestgestellte Solltiefen für die Schifffahrt) unterschritten werden. Der Einfluss der Unterhaltungstätigkeit auf die Morphodynamik kann durch Vergleich von Simulationen mit und ohne Baggerung abgeschätzt werden: Hierbei ergeben sich Unterschiede vor allem in den Mündungsbereichen der Ästuare, weil hier die Entnahme und Verbringung von Sediment bisher im Modell nicht berücksichtigt wurde. In unmittelbarer Umgebung der Fahrrinnen betragen die Sohländerungen zwischen 1 m und –1 m. Die Wattbereiche werden nicht signifikant beeinflusst. Besonders interessant sind Unterschiede in der Sohlage von einigen Dezimetern im Bereich der Nordfriesischen Inseln. Ohne Unterhaltungsmaßnahmen werden erhebliche Sedimentmassen in die Fahrrinne der Elbe eingetragen. Das Fahrwasser verlagert sich zwischen Großer Vogelsand und Gelbsand in Richtung Nordosten. Durch Unterhaltung der Fahrrinne wird diese Tendenz vermindert.

Die Ergebnisse fordern, dass für ein langfristiges Küstensedimentmanagement alle anthropogenen Eingriffe sowohl im Funktionalen Bodenmodell als auch in den Simulationsmodellen zu berücksichtigen sind. Hierzu gehören Vorspülungen, Sandentnahmen, Eindeichungen, Baggerungen und Umlagerungen, Bühnenbau, Fahrrinnenanpassungen, Hafenanbau und Hafenerweiterungen.

Frage: Wie sind Prognosen bzgl. der Morphodynamik zu bewerten und wie kommt man zu belastbaren Prognosen?

Die Gültigkeit des Prognoseverfahrens muss anhand von Hindcast-Untersuchungen nachgewiesen werden. Die Prognoseergebnisse dürfen dem Erfahrungswissen nicht widersprechen. Das Erfahrungswissen basiert auf den Naturdaten und dem Vergleich historischer Seekarten. Generell ist in der Wissenschaft akzeptiert, dass ähnlich wie bei den Wettervorhersagen nur eine relativ kurze Prognosezeit (wenige Jahre) und auch nur als Trendanalyse Akzeptanz finden kann. Vermutlich ist die Darstellung der Ergebnisse mehrerer Szenarien und weniger ein einziges Simulationsergebnis zielführend:

Für die in **AufMod** durchgeführten prognostischen Langfristsimulationen über 100 Jahre kann das Wetter nicht vorhergesagt werden. Es wurde deshalb, wie auch bei den diagnostischen Hindcast-Rechnungen, auf bekannte Windfelder zurückgegriffen. Klimabedingte Zunahmen der atmosphärischen Zirkulation wurden nicht berücksichtigt, weil die Szenarien ein windarmes und ein windreiches Jahr berücksichtigen, um diese hinsichtlich der Windwirkung auf die langfristige Morphodynamik zu vergleichen. Im Jahr 1998 herrschten über 60 Tage Windgeschwindigkeiten zwischen 12,5 m/s und 18,0 m/s vor, im Jahr 2006 jedoch nur über annähernd 20 Tage. Der meteorologische Antrieb wurde im Rahmen der Systemstudien Jahr für Jahr gleichartig wiederholt und alle Gezeitenwellen der 100jährigen Zeitspanne wurden ohne morphologische Beschleunigung auf einem Hochleistungsrechner simuliert. Die der Simulation zugrunde gelegten Seegangfelder wurden ebenfalls für die Jahre 1996 und 2006 berücksichtigt.

Die Simulation über 100 Jahre mit der Wind- und Seegangzeitreihe des Jahres 2006 zeigt:

Das ehemalige Elbeurstromtal ist weiterhin eine ausgedehnte Depositionsfläche mit Ablagerungen bis zu 0,5 m. Diese erstreckt sich, in der Breite zunehmend, südlich von Helgoland bis zum nordwestlichen Bereich der Deutschen Bucht. Die Seegaten, Rinnen und Ästuar sind morphologisch besonders aktiv. Vor den Ostfriesischen Inseln sind Sohländerungen von –1,5 m bis 3 m insbesondere bei den Ebbdeltas zu verzeichnen. Auf den Rückseitenwattgebieten wird überwiegend Sediment deponiert. Einzelne Strukturen verlagern sich nach Osten. Im Bereich der Elbe-Weser-Mündung wird eine Verlagerung des Sedimentvorkommens von Südwest nach Nordost prognostiziert. Auf angrenzenden Wattgebieten nimmt die Bodenhöhe mit unterschiedlichen Beträgen im Dezimeterbereich zu. Für das Küstenvorfeld Nordfrieslands werden geringere Zunahmen prognostiziert. Die Phänomänologie der im Hindcast diagnostizierten Sedimenttransportpfade verändert sich in der langfristigen Prognose kaum. Für den residualen Geschiebetransport wird nördlich von Helgoland eine Zirkulationszelle prognostiziert.

Die vergleichende Simulation ergab mit dem windintensiven Jahr 1998, nach 100 Jahren keine prinzipiellen Unterschiede in der großräumigen morphologischen Struktur. Der stärkere meteorologische Antrieb erzeugte größere Erosionsvolumina. Die Ablagerungen nahmen damit ebenfalls (insbesondere im Elbeurstromtalgebiet) zu. Vor den Ostfriesischen Inseln und im Gebiet der Weser-Elbe-Mündung wurde mehr Sediment nach Osten umgelagert, ebenso, wie im Gebiet der Nordfriesischen Inseln. Im Bereich der Ebbdeltas Nordfrieslands lagen die Umsatzhöhen in einer Größenordnung, wie sie auch im Gebiet der Elbe-Weser-Mündung auftreten.

Von aktuellem Interesse ist vor allem auch die Prognose der Morphologie bei Anstieg des Meeresspiegels. Hierfür werden zwei (mit und ohne Meeresspiegelanstieg) allein durch die Gezeiten angetriebene Simulationen verglichen. In der Simulation steigt der Meeresspiegel über 100 Jahre linear um 0,8 m. Im Ergebnis bewirkt der Meeresspiegelanstieg keine signifikant großräumigen Änderungen der morphologischen Strukturen. Einzelne Strukturen verlagern sich näher an die Küstenlinie. Sohlhöhendifferenzen treten in den Wattgebieten und im Küstennahfeld auf und überschreiten kaum einen Wert von einem Meter. Die Sedimenttransportpfade stimmen für die Gesamtfracht beider Simulationen im Westteil der Deutschen Bucht überein. Im inneren Bereich bestehen vereinzelt Unterschiede. Im Nordosten werden die Transportpfade nach Osten verschoben. Der säkulare Meeresspiegelanstieg von 0,8 m führt in der Deutschen Bucht zu einer Verminderung des abgelagerten Sedimentvolumens auf ca. 90 % der Ablagerungen ohne Meeresspiegelanstieg.

Die aus der Analyse gewonnenen Prognosen zeigen einerseits Streubreiten auf, die sich aus Varianten der Meteorologie und des Meeresspiegels ergeben. Die Streubreiten erscheinen plausibel und entsprechen dem Erfahrungswissen, das insbesondere durch die datenbasierten Modelle in **AufMod** gesteigert werden konnte. Die Phänomenologie der Transportprozesse kann ohne Brüche im Verständnis in die diagnostischen Untersuchungen eingeordnet werden.

5.8 Botschaften für die Öffentlichkeitsarbeit

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

1. Ziel des Vorhabens war die Beschreibung, Analyse und Prognose der Morphodynamik in der Deutschen Bucht auf Grundlage eines integrierten Modellsystems.
2. Zur Entwicklung des integrierten Modellsystems trugen in interdisziplinärer Zusammenarbeit sieben Teilprojekte zu einem Gesamtprojekt bei.
3. Das integrierte Modellsystem wurde durch folgende Fachdisziplinen entwickelt: Küsten- und Schelfgeologie, Ozeanographie, Küsteningenieurwesen, Verkehrswasserbau, Informatik
4. Das Modellsystem ermöglichte die Synthese der wissenschaftlichen Analyse der Beobachtungsdaten mit umfassenden Ergebnissen aus Simulationsmodellen.
5. In **AufMod** wurden ausschließlich abiotische Prozesse behandelt (das konzeptionelle Modell erlaubt jedoch die Integration biotischer Parameter).
6. Das integrierte Modellsystem ist als ein gemeinsames Produkt des Gesamtprojekts zu verstehen.
7. Die Teilprojekte entwickelten und benutzten gemeinsame Grundlagen (z.B. ein gemeinsames Bodenmodell, Wasserstandsrandwerte und Windfelder, gemeinsam verwendbare Modellgitternetze für verschiedene Modellverfahren, Analysewerkzeuge, ...)
8. Das integrierte Modellsystem soll 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 wurden alle verfügbaren Daten aus dem In- und Ausland angefragt, homogenisiert und integriert. Ziel war 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, Sedimentbeschaffenheit 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 wurden 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 Prognosen zur mittel- bis langfristigen Morphodynamik mit großen Unsicherheiten behaftet ist, nutzt das integrierte Modellsystem verschiedene prozessbasierte Modellverfahren (Multi-Modell-Ansatz).
6. Die prozessbasierte Modellierung ermöglichte die prozessbasierte Analyse der Sedimentbewegung im Wasserkörper und an der Gewässersohle. Diese Analyse war ein wichtiges Bindeglied zur Herstellung der übergreifenden fachwissenschaftlichen Synthese.
7. Es wurde angestrebt, die modellübergreifende, prozessbasierte Analyse mit einheitlichen Methoden und Verfahren für die Ergebnisse aus den verschiedenen Modellen durchzuführen.

5.9 Datenmanagement

Die wichtigsten Punkte bezüglich des Datenmanagements in **AufMod** lassen sich wie folgt zusammenfassen:

1 . Angemessene Dokumentation

Für ein umfassendes Datenmanagement müssen Modellierungsergebnisse zusammen mit genutzten Eingangsdaten vollständig und nachvollziehbar dokumentiert werden. Das zurzeit für die Dokumentation genutzte NOKIS-Metadatenprofil kann zwar die Daten korrekt gemäß internationalen Standards abbilden. Die Möglichkeit die Elemente einer kompletten Steuerdatei eines Modelllaufs in Form eines Metadatensatzes abzulegen ist bisher aber nicht gegeben. Somit kann ein Modelllauf noch nicht aus den Angaben eines Metadatensatzes reproduziert werden. Für eine umfassende Qualitätssicherung muss das Metadatenprofil um die entsprechenden Elemente für eine vollständige Beschreibung eines Modelllaufs erweitert werden.

2 . Aufbereitung von Daten

Der Aufwand für die Aufbereitung von Datenprodukten ist zurzeit sehr hoch. Die Prozessierung von einem Ergebnisdatensatz hin zu Online verfügbaren Produkten ist mit vielfältigen Schritten der Datenaufbereitung verbunden, die größtenteils manuell angestoßen werden müssen. Insbesondere die Erstellung von Legenden für neue Parameter ist zum Teil sehr aufwendig und schlecht automatisierbar, für jede Kartenansicht muss effektiv eine neue Legendendatei erstellt werden.

Es gibt bisher wenige Werkzeuge, die eine automatisierte Erstellung und Bereitstellung von Produkten ermöglichen würden. **AufMod** in Kombination mit der MDI-DE hat hierfür ent-

scheidende Anstöße bei der Entwicklung von Arbeitsabläufen und Entwicklungshilfen gegeben. In zukünftigen Projekten muss weiter an den Werkzeugen und Arbeitsabläufen gearbeitet werden, insbesondere bei Projekten mit einer großen Anzahl an zu veröffentlichenden Ergebnissen wird es sonst zu Effizienzminderungen kommen.

3 . Rolle der MDI-DE

Die Produkte aus *AufMod* konnten nur mit Hilfe der Arbeiten in der MDI-DE in standardisierten und nachhaltigen Webdiensten aufbereitet und bereitgestellt werden. Die Webdienste ihrerseits befinden sich aber von Seiten der Standardisierungsorganisationen oft noch in einem Entwicklungsprozess, der in einigen Fällen noch nicht abgeschlossen ist, ebenso unterliegen grundlegende Online-GIS-Funktionalitäten und Visualisierungswerkzeuge einem ständigen Aktualisierungsdruck. Dateninfrastrukturen wie die MDI-DE, und lokale Strukturen wie die GDI-BSH, sind daher ein elementarer Faktor für die erfolgreiche Durchführung von F&E Projekten wie *AufMod*.

6 AufMod -Produkte in der MDI-DE

Um die umfangreichen Ergebnisse von **AufMod** langfristig bereitstellen und einer möglichst breiten Öffentlichkeit verfügbar machen zu können, wird eine Infrastruktur benötigt, die über die monolithische Darstellung einer Projekt-Webseite hinausgeht. Eine umfassende Dokumentation von Datenprodukten ist zudem die Grundlage für eine Bereitstellung. Produkte sollen außerdem in verschiedenen Formaten angeboten werden können.

Im zeitlich parallel durchgeführten F&E Projekt Marine Dateninfrastruktur Deutschland (MDI-DE) wurden die Grundlagen für eine Veröffentlichung von Daten nach internationalen Standards geschaffen. Diese Standards wurden für einen "Infrastrukturknoten BAW" und den „Shelf Geo-Explorer“ in der Geodateninfrastruktur der BSH umgesetzt.

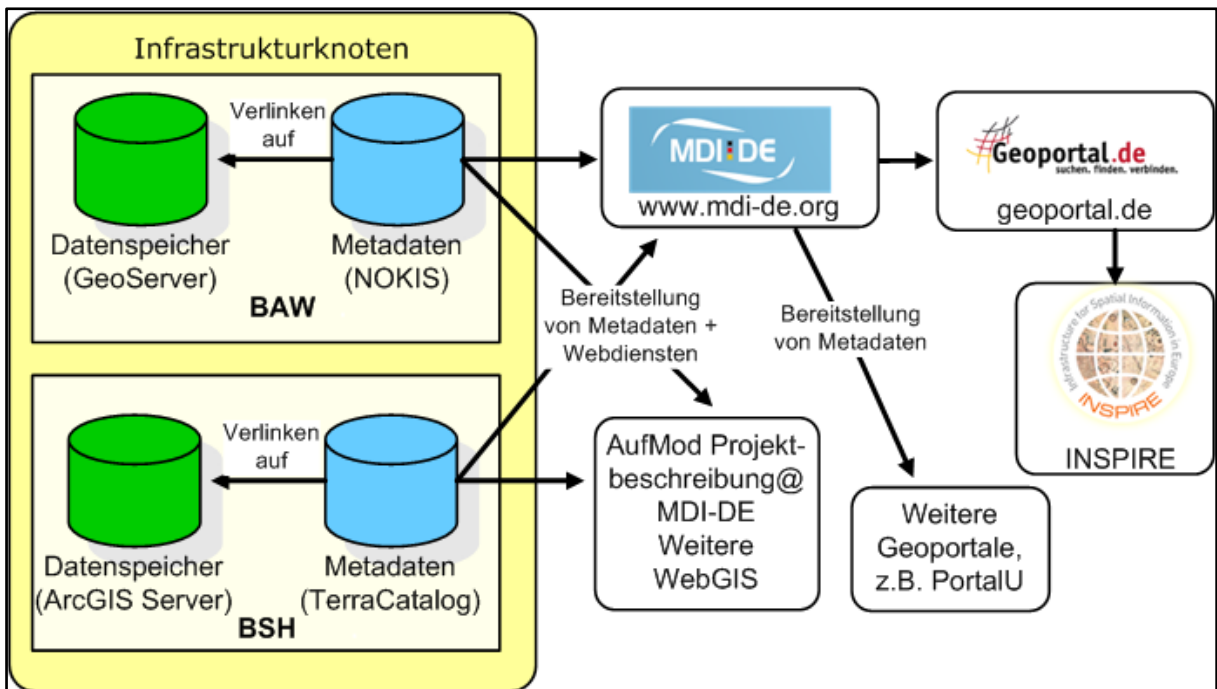


Abbildung 6-1: Verteilte Struktur der **AufMod**-Produkte in der MDI-DE, aufgeteilt auf die Infrastrukturknoten BAW und BSH. Eine Zusammenführung der Daten findet über die MDI-DE statt, von wo aus auch eine Weitergabe an das Geoportal.DE und weitere Zielsysteme erfolgt

Beide Projektpartner stellen jeweils einen sogenannten Datenknoten bereit, wodurch nicht nur das Datenvolumen aufgeteilt wird, sondern auch lokal etablierte Softwaresysteme und –werkzeuge genutzt werden können. Abbildung 6-1 zeigt die vereinfachte Struktur der **AufMod**-Daten in der MDI-DE. BAW und BSH stellen zunächst je einen Infrastrukturknoten mit jeweils einem Datenspeicher und einem Metadatensystem bereit, über Verlinkungen in den Metadaten wird auf die verschiedenen Repräsentationsformen der Daten in den Speicherstrukturen gezeigt. Diese Datenspeicher bestehen insbesondere aus Webservern, die Daten in Form von standardisierten Web-Diensten zur Verfügung stellen. Es ist aber auch möglich auf beliebige Speicher, zum Beispiel FTP-Server, zu verweisen, um beliebige Datenformate zu bedienen.

Das zentrale Portal der MDI-DE [www.mdi-de.org, vgl. Abbildung 6-2] ruft die Metadaten von den Metadatensystemen des BSH und der BAW per "Harvesting" ab. Das Portal stellt die

AufMod-Metadaten außerdem für übergeordnete Portale, wie das Geoportal.DE, bereit, von wo aus die europäische Ebene mit INSPIRE bedient wird.

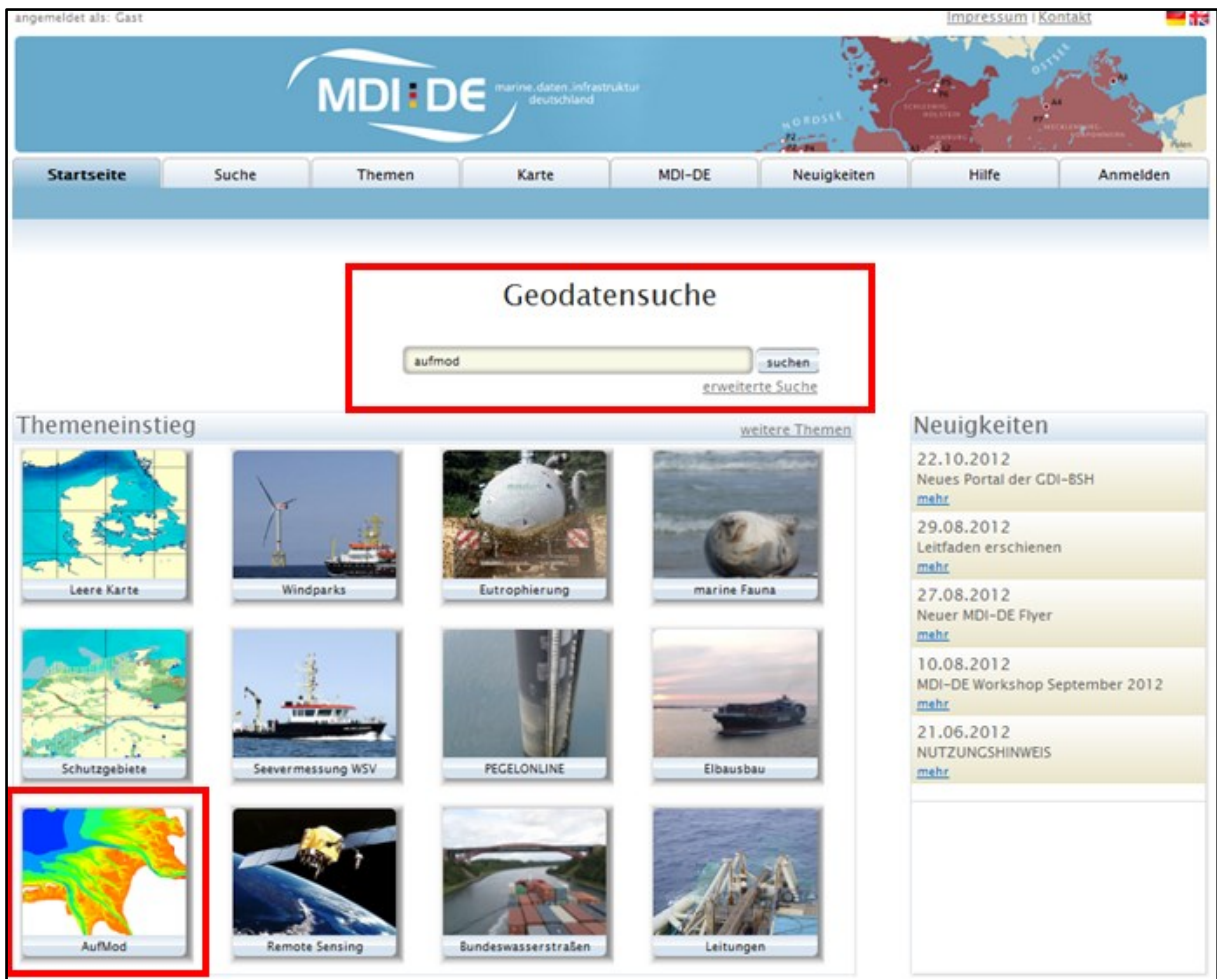


Abbildung 6-2: Die Einstiegsseite des MDI-DE Portals mit Suchoptionen für **AufMod**-Produkte: Die freie Suche und der Themeneinstieg

6.1 Ergebnissicherung bei der BAW

Die Anbindung an die MDI-DE wird in der BAW über einen „Infrastrukturknoten BAW“ realisiert (s. Abbildung 6-3). Als Metadateneditor wird der hausintern bereits etablierte NOKIS-Metadateneditor genutzt, der auch das umfassende NOKIS-Küstenmetadatenprofil nutzt. Als Web-Dienste-Server wird die OpenSource-Lösung GeoServer in Verbindung mit einer PostgreSQL Datenbank und PostGIS Erweiterung für räumliche Daten eingesetzt. GeoServer ist die Referenzimplementierung der OGC Dienste WFS und WCS, und diese ist auch konform mit anderen Standards wie WMS.

In der BAW werden Simulationsergebnisse aus der prozessorientierten Modellierung bereitgestellt. Bei diesen handelt es sich vorrangig um Tidekennwerte des Wasserstandes und der Strömung für unterschiedliche Wind- und Tidesituationen, Kennwerte des Seegangs für unterschiedliche Windsituationen (Wosniok, et al., 2012) (vgl. Tabelle 6-1).

Jede Analysegröße wird unter verschiedenen Bedingungen bereitgestellt: Acht Windrichtungen wurden in 45° Schritten (Nord, Nord-Ost, Ost...) mit einer Windgeschwindigkeit von 12,5 m/s in einem Zeitraum von zwei Tagen (21.08.2006 - 23.08.2006) jeweils gemittelt und bereitgestellt. Zudem wurden, ebenfalls in dem kurzen Zeitraum, die Zustände bei Windrichtung West mit einer Windgeschwindigkeit von 0,6 und 25 m/s aufgezeichnet.

Außerdem wird, ohne Berücksichtigung von Wind, ein Spring-Nipp-Mittel (1.1.2006 - 1.1.2007) bereitgestellt.

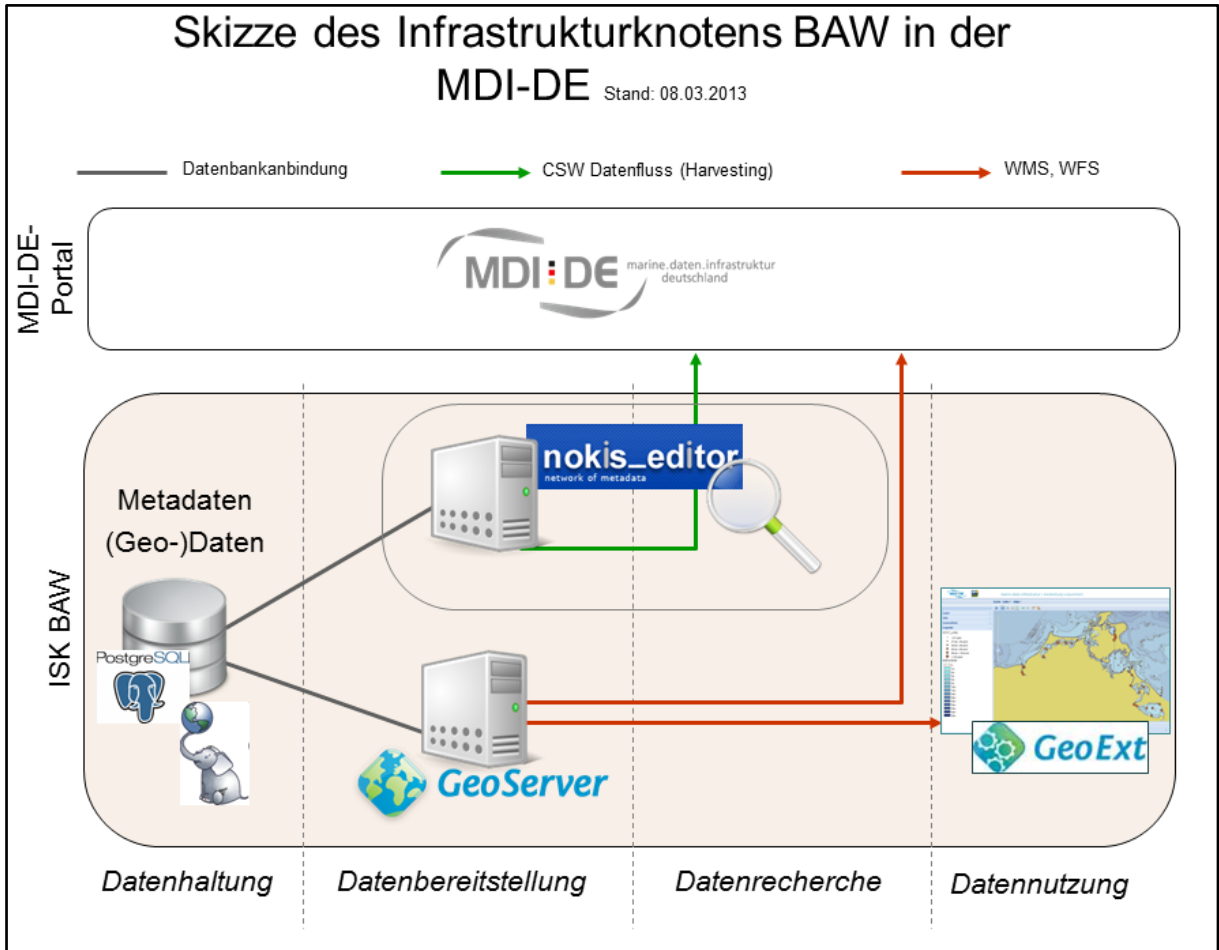


Abbildung 6-3: Struktur des Infrastrukturknotens der BAW mit dem Metadaten-System NOKIS und dem Web-Dienste-Server GeoServer

Für den Seegang wurden die beiden Analysegrößen signifikante Wellenhöhe und Peakfrequenz erstellt, bis auf das Spring-Nipp-Mittel wurde dies zu den gleichen Bedingungen wie für die Tidekennwerte durchgeführt. Insgesamt ergibt sich so eine Anzahl von 284 Datensätzen.

Tabelle 6-1: Von der BAW bereitgestellte Analysegrößen

Mit. Tidehochwasser (THW)
Mit. Tideniedrigwasser (TNW)
Mit. Tidemittelwasser (TMW)
Mit. Tidenhub (THB)
Mit. THW Eintrittszeit
Mit. TNW Eintrittszeit
Mit. Flutdauer
Mit. Ebbdauer
Mit. Flut- zu Ebbdauer
Max. Flutstromgeschwindigkeit
Max. Ebbestromgeschwindigkeit

Max. Flut- zu Ebbestromgeschwindigkeit
Mit. Flutstromgeschwindigkeit
Mit. Ebbestromgeschwindigkeit
Mit. Flutstrom zu mit. Ebbestrom
Mit. Flutstromdauer
Mit. Ebbestromdauer
Mit. Reststrom
Mit. Tidestromvolumen
Mit. Flutstrom-Bodenschubspannung
Mit. Ebbestrom-Bodenschubspannung
Mit. Residuelle Bodenschubspannungswirkung
Mit. Signifikante Wellenhöhe (Hs)
Mit. Peakfrequenz

6.2 Ergebnissicherung im BSH

Die auf den Meeresboden bezogenen Ergebnisse des **AufMod**-Bodenmodells werden im Datenknoten des BSH bereitgestellt.

Zu den Produkten zählen zum einen die Ergebnisse der datenbasierten Modellierung sedimentologischer und morphologischer Parameter (vgl. Kapitel 3.5, Tabelle 3-5). Zum anderen werden Informationen zur Datenerhebung und Auswertung der Seitensichtsonardaten in den Fokusgebieten bereitgestellt (s. Kap. 3.4, Tabelle 3-3). Zusätzlich wird die digitale Überarbeitung der Karte von (Ulrich, 1971) angeboten.

Hierzu wird das speziell auf geologische Fachdaten abgezielte GIS-gestützte Fachinformationssystem (FIS) „Shelf Geo-Explorer“ (SGE) verwendet (Zeiler, et al., 2007). Über ETL-Routinen (Extract, Transform, Load) werden die Fachdaten der verschiedenen FIS des BSH ausgelesen aufbereitet und in ein Data-Warehouse geladen (vgl. Abbildung 6-4). Hier werden ebenfalls die Metadaten der Geofachdaten verwaltet. Der Zugriff auf die Geofachdaten für interne sowie externe Nutzer wird über das Geodaten-Portal des BSH ermöglicht. Hier steht eine Auswahl an Applikationen und Diensten zur Recherche und Darstellung bis hin zum Download von Geofachdaten zur Verfügung. Alle Dienste des BSH werden als Dienste konform zu den Vorgaben des OGC angeboten. Auf Basis dieser Schnittstellen werden Geofachdaten und deren Metadaten zudem für die MDI-DE, das Geodatenportal des Bundes und für das europäische Geodatenportal INSPIRE bereitgestellt.

Grundsätzlich wird angestrebt alle Daten sowohl über digitale Kartendienste (WMS), wie auch digitale Datendienste (WFS) bereitzustellen. Die Ergebnisse der datenbasierten Modellierung des **AufMod**-Bodenmodells liegen ursprünglich als parametrisierte Modellgitterpunkte vor. Die Polygondaten der oben beschriebenen Dienste stellen somit eine Weiterverarbeitung dieser Punktdaten dar. Die originären Daten werden dem Nutzer im CSV, bzw. XYZ-Format als FTP-Download zur Verfügung gestellt. Bis zur endgültigen Fertigstellung der verschiedenen Dienste werden alle Produkte über einen FTP-Download erreichbar sein. Die Dienste und die Datensätze des FTP-Servers, werden in Metadaten im TerraCatalog nach ISO 19115 beschrieben.

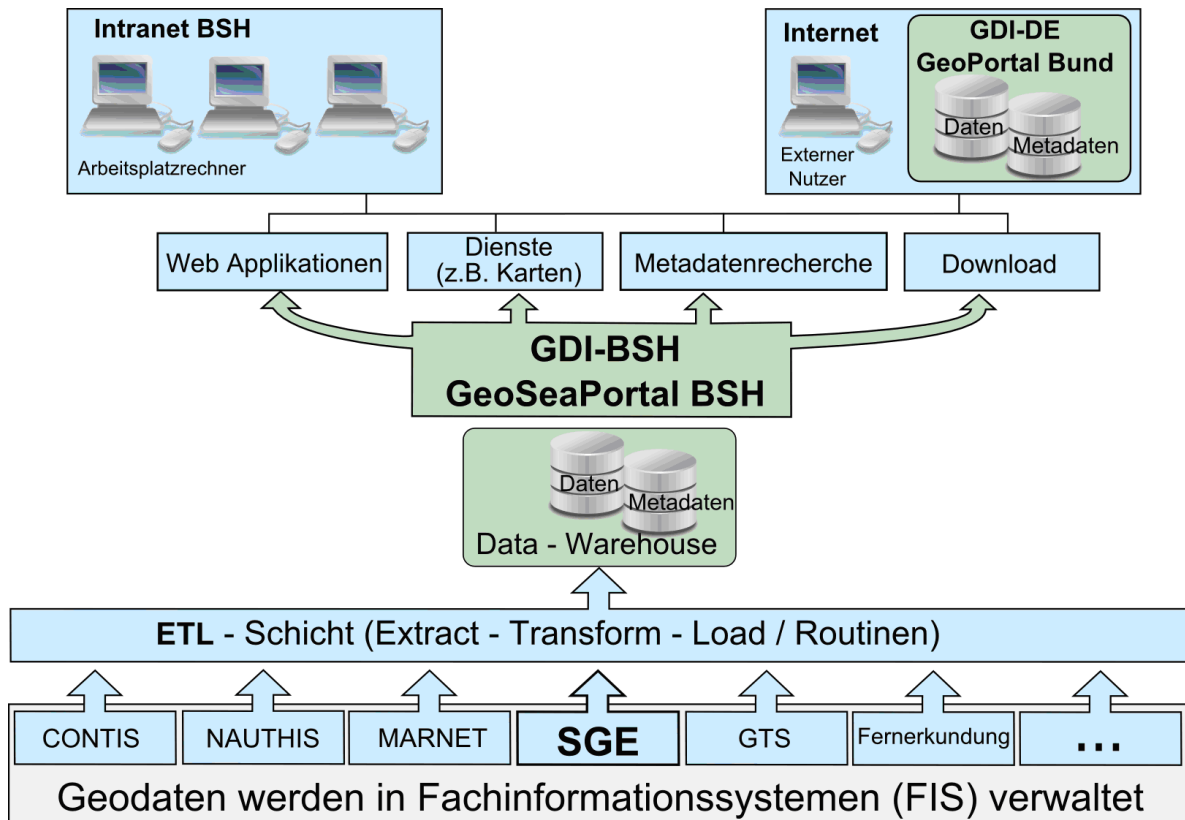


Abbildung 6-4: Die Struktur der GDI-BSH, mit dem hervorgehobenen „Shelf Geo-Explorer“ (SGE)

6.3 Metadatenbeschreibung

Um die **AufMod**-Produkte in die MDI-DE und andere Informationssysteme einzubinden, wurden standardkonforme Metadaten für die **AufMod**-Produkte erstellt (Wosniok, et al., 2012). Als Ergänzung zu den eigentlichen Daten bilden Metadaten als Dokumentation die Grundlage für die Suche nach Daten in Geodatenportalen. Die Zusammenführung der Metadaten kann nur durch die Nutzung eines gemeinsamen Standards gelingen. Eine Standardisierung stellt die semantische Integrität und Vergleichbarkeit der Metadaten her.

Die zusammenführende Rolle für die **AufMod**-Datenprodukte spielen gemeinsame Schlüsselwörter. Die Daten aus der BAW wie auch aus dem BSH können so gesammelt im Portal der MDI-DE unter www.mdi-de.org (Abbildung 6-2) durch die Eingabe des Suchworts "aufmod" oder über einen Parameter gefunden werden. Weitere Datensätze können durch gezieltes Suchen gefunden werden.

Ein elementarer Bestandteil eines jeden Metadatensatzes besteht in der Verbindung zu den tatsächlichen Daten. Diese kann ein Link auf einen Web Mapping Service (WMS) für die Darstellung sein, ein Downloadlink eines Web Feature Service (WFS), oder zu einem FTP Server oder eine beliebige andere Ressource. Diese Verknüpfungen werden in den Metadaten notiert, so können zum Beispiel im MDI-DE Portal die hinterlegten Daten oder Dienste direkt heruntergeladen oder visualisiert werden. Die BAW stellt die **AufMod**-Daten in Form von WMS und WFS zur Verfügung.

6.4 Produktdarstellung und -Zugang

Gemeinsamer Einstiegspunkt für alle **AufMod**-Produkte in der MDI-DE ist die Startseite des MDI-DE Portals. In diesem Portal stellen alle Datenknoten der MDI-DE ihre Daten gebündelt

bereit, darunter auch die Knoten der BAW und des BSH mit den **AufMod**-Produkten (siehe Anhang Datenmanagement). Zusätzlich zur freien Suche ist **AufMod** als Themeneinstieg auf der Startseite des Portals registriert: über einen Mausklick lässt sich eine vorgefertigte Zusammenstellung aus Webdiensten aufrufen, diese werden in der Kartenansicht dargestellt. Ein weiterer Weg nach den Daten zu suchen ist die NOKIS-Suchoberfläche unter <http://www.kfki.de/de/service/nokis> oder <http://projekt.mdi-de.org/services/nokis.html>.

Die Verknüpfungen in den Metadaten führen dann zu den verschiedenen Darstellungs- und Downloadoptionen der Daten. Neben der Darstellung im MDI-DE Portal wurde eine Dokumentationsseite für Daten unter <http://projekt.mdi-de.org/services/verwandte-projekte/40-aufbau-von-integrierten-modellsystemen.html> geschaffen, auf der einzelne Datensätze im Detail vorgestellt werden und das Prinzip von Webdiensten und Metadaten anhand von **AufMod**-Daten illustriert wird.

Außerdem wurde aus **AufMod**-Datenprodukten der BAW ein Tideatlas erstellt, der auf der MDI-DE Dokumentationsseite zu finden ist. Hier können einzelne untersuchte Parameter in verschiedenen berechneten Zuständen im Untersuchungsgebiet Deutsche Bucht verglichen werden (vgl. Abbildung 6-5). Die Metadaten für diese Daten werden deshalb in großen Teilen zusammengelegt. Die Legenden für die Darstellung der BAW-Produkte mussten für die Nutzung im WMS angepasst werden, hierzu wird im GeoServer der OGC Styled Layer Descriptor (SLD) Standard genutzt. Die Darstellung der in der BAW bekannten Darstellungsformen für diverse Parameter und Zustände wurde in dieses XML-Format übertragen, um die in der BAW bekannte Ansicht zu reproduzieren.

Die Datensätze des Tidekennwertatlas werden über die standardisierten OGC Dienste WMS und WFS bereitgestellt. Für die Darstellung der BAW-Datensätze als WMS, wird in einem Geoinformationssystem über entsprechende Werkzeuge eine URL eingebunden: <http://mdi-dienste.baw.de/geoserver/aufmod/wms>.

Das GIS bietet dann auf Grundlage der URL die verfügbaren Datensätze an. Ein vollständiges Beispiel für das Tidehochwasser mit Windrichtung West und Windgeschwindigkeit 12,5 m/s sieht wie folgt aus:

http://mdi-dienste.baw.de/geoserver/aufmod/wms?service=WMS&version=1.3&request=GetMap&layers=aufmod:ti_k_wrw_wq12_00025&styles=&bbox=3258732.75,5880627.0,3588950.75,6166362.0&width=512&height=443&srs=EPSG:31467&format=application/openlayers.

Für den Download von Daten wird ein WFS verwendet. Die Basis-URL lautet: <http://mdi-dienste.baw.de/geoserver/aufmod/ows?service=WFS&version=1.0.0>.

Ein WFS kann ebenfalls in ein GIS eingebunden werden, aber auch als unabhängiger Downloadlink genutzt werden. Der beispielhafte Download des Tidehochwasserdatensatzes sieht so aus:

http://mdi-dienste.baw.de/geoserver/aufmod/ows?service=WFS&version=1.0.0&request=GetFeature&typeName=aufmod:ti_k_wrw_wq12_00025&maxFeatures=60000&outputFormat=csv

In diesem Fall wird das CSV-Format abgerufen, es steht aber auch die Formate Shape, GML oder JSON zur Verfügung.

Der vorläufige Zugang zu den Produkten des Bodenmodells läuft über den FTP-Server des BSH: <ftp.bsh.de/outgoing/AufMod-Data>.

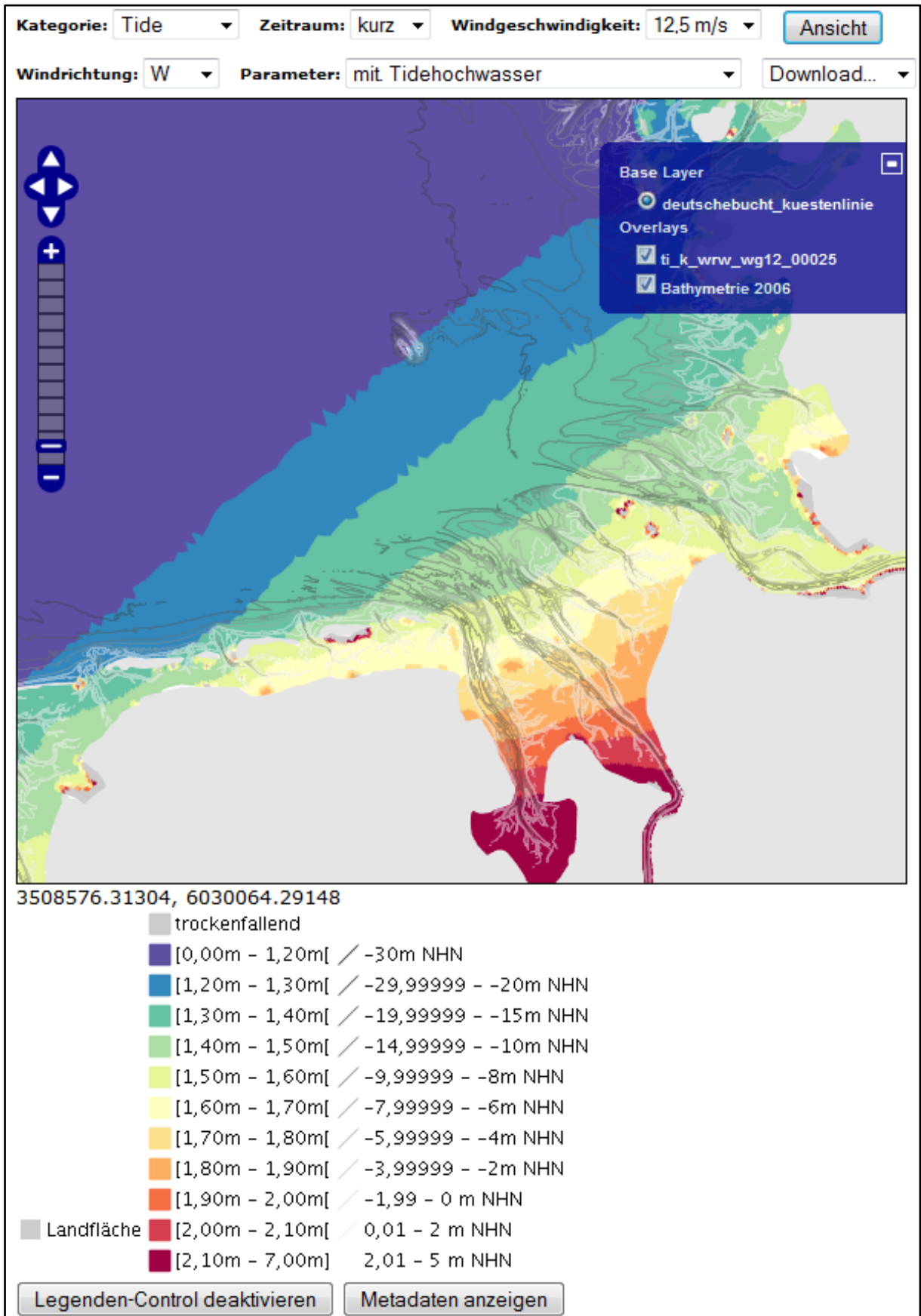


Abbildung 6-5: Tidekennwertatlas mit allen Funktionen. Neben dem Einblenden der Analysegrößen kann die Bathymetrie hinzugeschaltet werden und die Legende ein- oder ausgeklappt werden. Ein Download im CSV oder Shapeformat ist direkt möglich

6.5 Datenverfügbarkeit

Die Web-Dienste zum Download und zur Visualisierung ermöglichen es, Produkte nur einmal aufzubereiten und anschließend an beliebigen Stellen einzusetzen. Neben der Darstellung im zentralen MDI-DE Portal können Nutzer beispielsweise in Geoinformationssystemen auf dem Desktop-Rechner über die Adressen der Dienste auf die Daten zugreifen. Somit sind die Datenprodukte technisch jederzeit verfügbar.

Alle Datenprodukte der BAW werden mit einem Zusatz versehen, der besagt, dass die Daten für nicht-kommerzielle Zwecke weiterverwendet werden dürfen. Bei kommerzieller Nutzung muss die Genehmigung der BAW oder des BSH eingeholt werden, ebenso sobald die Daten ein essentieller Bestandteil einer Veröffentlichung sind.

7 Literaturverzeichnis

- Ahrendt, Kai. 2006.** Ein Beitrag zur holozänen Entwicklung Nordfrieslands. *Die Küste*. 2006, Bd. 71, S. 1-32.
- Ahrendt, Kai. 1988.** *Sedimentdynamik im gezeitenbeeinflussten Bereich der sandigen Brandungsküste Sylts (Deutsche Bucht)*. Kiel : Christian-Albrechts-Universität, 1988. Dissertation.
- Albers, T. 2012.** Messung und Analyse morphologischer Änderungen von Ästuarwatten, Untersuchungen im Neufelder Watt in der Elbmündung. *Hamburger Wasserbau-Schriften, Dissertation*, 124 S. *Hamburger Wasserbau-Schriften, Dissertation*. 2012, S. 1-124.
- Allen, J.R.L. 1968.** *Current Ripples. Their relation to patterns of water and sediment motion*. Amsterdam : North Holland Publishing Company, 1968.
- Antia, E.E. 1993.** Surficial grain-size statistical parameters of a North Sea shoreface-connected ridges: patterns and process implications. *Geo-Marine Letters*, 13. 1993, S. 172-181.
- Antia, E.E., Flemming, B.W. und Wefer, G. 1994.** 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. 1994, S. 15-24.
- Bartholomä, A. 2006.** Acoustic bottom detection and seabed classification in the German Bight, southern North Sea. *Geo-marine Letters*. 2006, Bd. 26, S. 177-184.
- Bartholomä, Alexander. 2006.** Acoustic bottom detection and seabed classification in the German Bight. *Geo-Marine Letters*, 26. 2006, S. 177-184.
- BAW. 2012.** *Model validation and system studies for hydrodynamics, salt and sediment transport in the Elbe Estuary, Basic information for the River engineering and sediment management concept*. Hamburg : Bundesanstalt für Wasserbau - AK, 2012.
- BAW. 2013.** *Nordsee-Basismodell - Teil 1: Allgemeine Übersicht*. Hamburg : Bundesanstalt für Wasserbau, 2013.
- BAW. 2013.** *Nordsee-Basismodell - Teil II: Modellsystem UnTRIM-SediMorph-Unk, a) Hydrodynamik (UnTRIM-SediMorph)*. Hamburg : Bundesanstalt für Wasserbau, 2013.
- Bayerle, K.-A., Köster, R. und Murphy, D. 1998.** Verteilung und Zusammensetzung der Sedimente im Lister Tidebecken. [Buchverf.] C. Gärtje und K. Reise. *Ökosystem Wattenmeer – Austausch-, Transport- und Stoffumwandlungsprozesse*. Berlin, Heidelberg : Springer, 1998, S. 31-38.
- Bergemann, M. 2004.** Die Trübungszone der Tideelbe – Beschreibung der räumlichen und zeitlichen Entwicklung. 2004, S. 1-8.
- Berner, H., et al. 1986.** Detaillierte Kartierung der Oberflächensedimente im mittleren und südlichen Nordfriesischen Wattenmeer. 1986, S. 81-93.
- Blondel, P. 2006.** A review of acoustic techniques for habitat mapping. 2006.
- Blondel, P. 2009.** *Handbook of Sidescan Sonar*. Berlin : Springer, 2009.

- Blondel, P. und Sichi, O.G. 2009.** Textural analyses of multibeam sonar imagery from Stanton Banks, Northern Ireland continental shelf. *Applied Acoustics*. 2009, Bd. 70, S. 1288-1297.
- Blondel, P., Parson, L. und Robigou, V. 1998.** TexAn: Textural analysis of sidescan sonar imagery and generic seafloor characterisation. *OCEANS'98 Conference Proceedings*. 1, 1998, S. 419-423.
- BMVBS. 2009.** *Gemeinsamen Übergangsbestimmungen zum Umgang mit Baggergut in den Küstengewässern - GÜBAK*. s.l. : BMVBS, 2009.
- Boyed, S.E., et al. 2007.** The role of seabed mapping techniques in environmental monitoring and management. *Science Series Technical Report, CEFAS Lowestoft*, 127. 2007, S. 170.
- Brommer, M.B. und Bochev-van der Burgh, L.M. 2009.** Sustainable Coastal Zone Management: A Concept for Forecasting Long-Term and Large-Scale Coastal Evolution. *Journal of Coastal Research*. 2009, Bd. 25, S. 181-188.
- Bundesanstalt für Wasserbau. 2012.** *Model validation and system studies for hydrodynamics, salt and sediment transport in the Elbe Estuary, Basic information for the River engineering and sediment management concept BAW-Nr. A3955 03 10069*. Hamburg : Ästuarsysteme II (K3), 2012.
- Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, et al. 2009.** *Gemeinsame Übergangsbestimmungen zum Umgang mit Baggergut in den Küstengewässern*. 2009.
- Cacchione, D.A., et al. 1984.** Rippled scour depressions on the inner continental shelf off central California. *Journal of Sedimentary Petrology*, 54. 1984, S. 1280 – 1291.
- Callaway, R. 2003.** Juveniles stick to adults: recruitment of the tube-dwelling polychaete *Lanice conchilega* (Pallas, 1766). *Hydrobiologia*. 2003, Bd. 503, S. 121-130.
- Cameron, T.D.J., et al. 1992.** *The geology of the southern North Sea*. s.l. : BGS United Kingdom Offshore Regional Report, 1992.
- Carey, D.A. 1987.** Sedimentological effects and palaeoecological implications of the tube-building polychaete *Lanice conchilega* Pallas. *Sedimentology*. 1987, Bd. 34, S. 49-66.
- Chang, T.S., Bartholomä , A. und Flemming , B.W. 2006.** Seasonal dynamics of fine-grained sediments in a back-barrier tidal basin of the German Wadden Sea (southern North Sea). *Journal of Coastal Research*, 22. 2006, S. 328-338.
- Chowdhuri, K.R. und Reineck , H-E. 1978.** Primary Sedimentary Structures and their Sequence in the Shoreface of Barrier Island Wangerooge (North Sea). *Senckenbergiana maritime* 10. 1978, S. 15-29.
- Cochrane , G.R. und Lafferty , K.D. 2002.** Use of acoustic classification of sidescan sonar data for mapping benthic habitat in the Northern Channel Islands, California. *Continental Shelf Research*, 22. 2002, S. 683-690.
- Coco, G., et al. 2007.** Sorted bed forms as self-organized patterns: 2. Complex forcing scenarios. *J. Geophys. Res.*, 112. 2007.

- Dalrymple, R.W., Knight, R.J. und Lambiase, J.J. 1978.** Bedforms and their hydraulic stability relationships in a tidal environment, Bay of Fundy, Canada. *Nature*, 275. 1978, S. 100-104.
- Davies, A.M., Kwong, S.C. und Flather, R.A. 1997.** Formulation of a variable-function three-dimensional model, with applications to the M 2 and M4 tide on the North-West European Continental Shelf. *Continental Shelf Research*. 1997, Bd. 17(2), S. 165-204.
- Dechend, W. 1950.** Sedimentpetrologische Untersuchungen zur Frage der Sedimentumlagerungen im Watt Nordfrieslands. *Deutsche Hydrographische Zeitschrift, Bd. 3, H. 5/6*. 1950.
- Degraer, S., et al. 2008a.** Habitat suitability as a mapping tool for macrobenthic community: an example from the Belgian part of the North Sea. *Cont. Shelf Res.*, 28 (3). 2008a, S. 369-379.
- Degraer, S., et al. 2008.** Very-high resolution side-scan sonar mapping of biogenic reefs of the tube-worm *Lanice conchilega*. *Remote Sensing of Environment*. 112, 2008, S. 3323-3328.
- Degraer, S., Moerkerke, G., Rabaut, M., et al. 2008b.** Very-high resolution side-scan sonar mapping of biogenic reefs of the tube-worm *Lanice conchilega*. *Remote sensing of Environment*, 112. 2008b, S. 3323 – 3328.
- Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) . 1979.** *Sandbewegung im Küstenraum, Rückschau, Ergebnisse und Ausblick*. Boppard : Harald Boldt Verlag, 1979.
- Diesing, M. und Schwarzer, K. 2006b.** Identification of submarine hard-bottom substrates in the German North Sea and Baltic Sea EEZ with high-resolution acoustic seafloor imaging. [Buchverf.] H. v. Nordheim, D. Boedeker und Krause. J.C. *Progress in Marine Conservation in Europe*. 2006b, S. 111 – 125.
- Diesing, M., et al. 2006a.** Decadal scale stability of sorted bedforms, German Bight, southeastern North Sea. *Cont. Shelf Res.*, 26. 2006a, S. 902-916.
- Diesing, M., et al. 2009.** Understanding the marine environment - seabed habitat investigations of the Dogger Bank offshore draft SAC. *Joint Nature Conservation Committee, Peterborough. JNCC Report*. 429, 2009.
- Dittmer, E. 1952.** Die nacheiszeitliche Entwicklung der schleswig-holsteinischen Westküste. *Meyniana*, 1. 1952, S. 138-168.
- Dittmer, E. 1938.** Schichtenaufbau und Entwicklungsgeschichte des dithmarscher Alluviums. *Westküste*, 2. 1938, S. 105 – 150.
- Dobrynin, M. 2009.** *Investigating the Dynamics of Suspended Particulate Matter in the North Sea using a Hydrodynamic Transport Model and Satellite Data Assimilation*. Geesthacht : GKSS Forschungszentrum, 2009.
- DWD. 2007.** *Klimastatusbericht 2006 – Aktuelle Ergebnisse des Klimamonitorings*. s.l. : Deutscher Wetterdienst, 2007.
- Ehlers, J. 1994.** *Allgemeine und historische Quartärgeologie*. Stuttgart : Ferdinand Enke Verlag , 1994.
- Ehlers, J. 1988.** *The Morphodynamics of the Wadden Sea*. Rotterdam : Balkema , 1988.

- Ehrhold, A., Hamon, D. und Guillaumont, B. 2006.** The REBENT monitoring network, a spatially integrated, acoustic approach to surveying nearshore macrobenthic habitats: application to the Bay of Concarneau (South Brittany, France). *ICES Journal of Marine Science*, 63. 2006, S. 1604 – 1615.
- Electricité de France. 2010a.** *SISYPHE User Manual Version 6.0, Note technique*, Electricité de France, Direction des Etudes et Recherches. Chatou Cedex : s.n., 2010a.
- Electricité de France. 2010b.** *TELEMAC-2D User Manual Version 6.0, Note technique*, Electricité de France, Direction des Etudes et Recherches. Chatou Cedex : s.n., 2010b.
- Electricité de France. 2011.** *TOMAWAC User Manual Version 6.1, Note technique*, Electricité de France, Direction des Etudes et Recherches. Chatou Cedex : s.n., 2011.
- Erdmann, M. 2012.** *Geologischer Aufbau des Seegebietes westlich von Sylt (Nordsee) – Korrelation seismischer Daten mit Sedimentkernen. Bachelor-Arbeit, Inst. f. Geowissenschaften, Univ. Kiel, 50 S. (unveröff.).* 2012.
- Ernstsen, V. B., et al. 2010.** *Tide-controlled variations of primary- and secondary-bedform height: Innenjade tidal channel (Jade Bay, German Bight), paper presented at River, Coastal and Estuarine Morphodynamics 2009, Taylor & Francis Group, London.* 2010.
- Ernstsen, V.B., et al. 2006.** Quantification of dune dynamics during a tidal cycle in an inlet channel of the Danish. *Geo-Marine Letters*. 2006, Bd. 26, S. 151-163.
- Etri, T. und Mayerle, R. 2006.** Effect of Storm Events on the Morphodynamics of a Tidally-dominated Coastal Environment. 2006.
- Feldens, P., et al. 2012.** Sediment distribution on the inner continental shelf off Khao Lak (Thailand) after the 2004 Indian Ocean Tsunami. *Earth Planets Space*, 64. 2012, S. 875 – 884.
- Feldens, P., et al. 2010.** Shallow water sediment structures in a tsunami-affected area (Pakarang Cape, Thailand). *Coastline Reports*, 16. 2010, S. 15 – 24.
- Ferrini, V.L. und Flood, R.D. 2005.** A comparison of Rippled Scour Depressions identified with multibeam sonar: evidence of localized sediment transport in inner shelf environments. *Cont. Shelf Res.*, 25. 2005, S. 1979-1995.
- Figge, K. 1981.** *Begleitheft zur Karte der Sedimentkartierung in der Deutschen Bucht 1:250 000 Nr. 2900.* Hamburg : BSH, 1981.
- Figge, K., et al. 1980.** Schlickuntersuchung im Wattenmeer der Deutschen Bucht, Zwischenbericht über ein Forschungsprojekt des KFKIs. *Die Küste*, 35. 1980, S. 187-204.
- Figge, Klaus. 1980.** Das Elbe-Urstromtal im Bereich der Deutschen Bucht (Nordsee). *Eiszeitalter u. Gegenwart*. 1980, S. 203—211.
- Figge, K. 1981.** *Karte und Begleitheft zur Karte der Sedimentverteilung in der Deutschen Bucht, Maßstab 1:250.000.* Hamburg : Deutsches Hydrographisches Institut, 1981.

- Flemming, B.W. und Bartholdy, J. 2006.** Quantification of dune dynamics during a tidal cycle in an inlet channel of the Danish Wadden Sea. *Geo-Marine Letters*, 26 (3). 2006, S. 151-163.
- Flemming, B.W. und Davies, R.A.Jr. 1994.** Holocene evolution, morphodynamics, and sedimentology of the Spiekeroog barrier island system (southern North Sea). *Senckenbergiana maritima*, 24. 1994, S. 117-155.
- Flemming, B.W. 1988.** Zur Klassifikation subaquatischer, strömungstransversaler Transportkörper. *Bochumer geologische und geotechnische Arbeiten*, 29. 1988, S. 44-47.
- Folk, R.L. 1954.** The Distinction between Grain Size and Mineral Composition in Sedimentary-Rock Nomenclature. *The Journal of Geology*, Volume 62. 1954, S. 344-359.
- Folk, R.L. und W.C., Ward. 1957.** Brazos River bar: a study in the significance of grain size parameters. *Journal of Sedimentary Petrology*. 1957, Bd. 27, S. 3-26.
- Francken, F., et al. 2004.** Factors influencing subaqueous dunes in the Scheldt Estuary. *Geo-Marine Letters* 24 (1). 2004, S. 14-21.
- Füchtbauer, H. und Reineck, H.R. 1963.** Porosität und Verdichtung rezenter, mariner Sedimente. *Sedimentology* 2. 1963, S. 294-306.
- Gast, R., Köster, R. und Runte, K.H. 1984.** Die Wattsedimente in der nördlichen und mittleren Meldorfer Bucht. Untersuchungen zur Frage der Sedimentverteilung und Schlicksedimentation. *Die Küste* 40. 1984, S. 165-257.
- Gayer, G., Dick, S. und Pleskachevsky, A. 2004.** *Modellierung von Schwebstofftransporten in Nordsee und Ostsee*. BSH-Hamburg : Berichte des BSH, 2004.
- Gerritsen, H., et al. 2001.** Integrated Modelling of Suspended Matter in the North Sea. 2001, S. 581-594.
- Gerritsen, H., et al. 2000.** Suspended sediment modelling in a shelf sea (North Sea). 2000, S. 317-352.
- Goff, J.A., et al. 2005.** Detailed Investigation of Sorted Bedforms, or "Rippled Scour Depressions" within the Martha's Vineyard Coastal Observatory, Massachusetts. *Cont. Shelf Res.* 25. 2005, S. 461-484.
- Grabemann, I. und Krause, G. 2001.** On Different Time Scale of Suspended Matter Dynamics in the Weser Estuary. *Estuaries*, Vol. 24, No. 5. 2001, S. 688-698.
- Green, M.O., Vincent, C.E. und Trembanis, A. 2004.** Suspension of coarse and fine sand on a wave dominated shoreface, with implications for the development of rippled scour depressions. *Continental Shelf Research*, 24. 2004, S. 317 – 335.
- Gutierrez, B.T., Voulgaris, G. und Thielert, E.R. 2005.** Exploring the persistence of sorted bedforms on the inner-shelf of Wrightsville Beach, North Carolina. *Continental Shelf Research*, vol. 25. 2005, S. 65 – 90.
- Hamburg Port Authority.** Tideelbe Journal. [Online] <http://www.tideelbe.de>.
- Hamburg Port Authority und Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes. 2008.** *Strombau- und Sedimentmanagementkonzept für die Tideelbe*. 2008.

- Hamilton, L.H. und Menard, H.W. 1956.** Density and Porosity of Sea-floor Surface Sediments off San Diego, California. *AAPG bulletin*, 40. 1956, S. 754 – 761.
- Hamilton, L.J. 2005.** *A Bibliography of acoustic seabed classification. Tech. Rep. 27, CRC for Coastal Zone Estuary & Waterway Management.* Australia : s.n., 2005.
- Hansen, R.D. 2008.** Änderung der Strömungsverhältnisse im System Medem Rinne - Medem Sand - Klotzenloch. *Gewässerkundlicher Bericht.* 2008, Bd. 2.
- Haralick, R.M., Shanmugam, K. und Dinstein, I.H. 1973.** Textural features for image classification. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics.* 1973, Bd. 6, S. 610-621.
- Heinrich, C., Feldens, P. und Schwarzer, K. 2013.** Impact of the tubeworm *Lanice conchilega* on the interpretation of side scan sonar backscatter data. *Continental Shelf Research (eingereicht).* 2013.
- Hervouet, J.M und Bates, P. 2000.** The TELEMAC Modelling System. *Special Issue of Hydrological Processes 14.* 2000.
- Heyer, H. und Schrottke, K. 2011.** *AufMod-Zwischenbericht .* 2011.
- Hirschhäuser, T., Mewis, P. und Zanke, U. 1998.** *Determination of the Initial Distribution of Particle Size in Morphodynamic Modelling in Tidal Areas.* 1998.
- Hochbrügge, R. 2012.** *Kartierung quartärer Untergrundstrukturen anhand von flachseismischen Messungen westlich von Sylt. Bachelor-Arbeit, Inst. f. Geowissenschaften, Univ. Kiel, 88 S. (unveröff.).* 2012.
- Holland, K.T. und Elmore, P.A. 2008.** A review of heterogeneous sediments in coastal environments. *Earth Science Reviews.* 2008, Bd. 89, S. 116-134.
- Hoth, A.M. 2013.** *Der sedimentologische Aufbau des Seegebietes westlich von Sylt dargestellt an drei Sedimentkernen. Master-Arbeit, Inst. f. Geowissenschaften, Univ. Kiel, 92 S. (unveröff.).* 2013.
- Hunke, D., Schüler, V. und Winter, C. 2009.** *Morphologische Stabilitätskarte für die Kabelanbindung von Offshore-Windparks in den Flussmündungen von Elbe, Weser, Jade und Ems. Endbericht Ecofys.* 2009.
- Irion, G., Wunderlich, F und Schwedhelm, E. 1987.** 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, London, Vol. 144.* 1987, S. 153-160.
- Janssen, F., Schrum, C. und Backhaus, J.O. 1999.** A Climatological Data Set of Temperature and Salinity for the Baltic Sea and the North Sea. *Journal of Hydrography* 9. 1999.
- Jones, S.E. und Jago, C.F. 1993.** In situ assessment of modification of sediment properties by burrowing invertebrates. *Marine Biology.* 1993, Bd. 115, S. 133-142.
- Julien, P.Y. und Klaassen, G.J. 1995.** Sand-Dune Geometry of Large Rivers During Floods. *Journal of hydraulic engineering*, 121(9). 1995, S. 657-663.
- Kastens, M. 2007.** Tidewasserstandsanalyse in Ästuaren am Beispiel der Elbe. *Dei Küste.* 2007, Bd. 72.

- Kenny, A. J., et al. 2002.** An overview of seabed-mapping technologies in the context of marine habitat classification. *ICES Journal of marine Science*. 2002, Bd. 60, S. 411-418.
- Köster, R. 1979.** Dreidimensionale Kartierung des Seegrundes vor den Nordfriesischen Inseln. . [Buchverf.] Deutsche Forschungsgemeinschaft. *Sandbewegung im Küstenraum - Rückschau, Ergebnisse und Ausblick*. Boppard : Harald Boldt Verlag, 1979, S. 146–168.
- Köster, R. 1974.** Geologie des Seegrundes vor den Nordfriesischen Inseln Sylt und Amrum. *Meyniana*. 1974, Bd. 24, S. 27-41.
- Kuiry, S.N., Ding, Y. und Wang, S.S.Y. 2009.** Numerical Model Study of Morphodynamics of a Coastal Inlet due to Storm Surge and Wave. 2009.
- Le Bas, T.P., Huvenne, V.A.I und . 2009.** Acquisition and processing of backscatter data for habitat mapping - Comparison of multibeam and sidescan systems. *Applied Acoustics*, 70 (10). 2009, S. 1248-1257.
- Lesser, G.R., et al. 2004.** Development and validation of a three-dimensional morphological model. *Coastal Engineering* 51. 2004, S. 883-915.
- Lieberman, N.V., Pasche, E. und Albers, T. 2007.** *Naturmessprogramm und Modellbildung zur Analyse morphodynamischer Veränderungen im Neufelder Watt. Abschlussbericht Phase 1.* s.l. : TUHH – Institut für Wasserbau, 2007.
- Linke, P., McGinnis, D., Reitz, A., Rovelli, L., et al. 2010.** *Fluid- and gas seepage in the South German North Sea (SDNS), final report, 111 p. (unpublished)*. 2010.
- Loewe, P. (Ed.). 2009.** System Nordsee – Zustand 2005 im Kontext langzeitlicher Entwicklungen. [Hrsg.] Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie. *Berichte des BSH*. 2009, 44.
- Lurton, X. 2002.** *An introduction to underwater acoustics*. Berlin, Heidelberg, New York : Springer, 2002.
- Lyard, F., et al. 2006.** Modelling the global ocean tides: modern insights from FES2004. *Ocean Dynamics* 53. 2006, S. 394-415.
- Maerker, C. und Malcherek, A. 2011.** *Die Untersuchung von Unterhaltungsstrategien im Bereich des WSA Cuxhaven mit dem Software-Paket DredgeSim im Rahmen des aktuellen Sedimentmanagementkonzepts für die Tideelbe. Abschlussbericht*. München : Institut für Wasserwesen, Universität der Bundeswehr München, 2011.
- Maerker, C., Deussfeld, N und Malcherek, A. 2006.** Simulation von Bagger- und Verklappstrategien mit morphodynamisch-numerischen Modellen. 2006.
- Malcherek, A., Piechotta, F und Knoch, D. 2005.** *Mathematical Module SediMorph. Technical report*. Hamburg : Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), 2005.
- Mayerle, R. und Zielke, W. 2005.** Promorph - predictions of medium-scale morphodynamics: Project overview and executive summary. *Die Küste*, 69. 2005, S. 3 -23.
- McManus, John. 1988.** Grain Size Determination and Interpretation. [Buchverf.] Maurice Tucker. *Techniques in Sedimentology*. Blackwell Scientific Publications. Boston : Blackwell Scientific Publications, 1988.

- Meier, D. 2006.** *Die Nordseeküste, Geschichte einer Landschaft.* Heide : Boyens Buchverlag, 2006. ISBN 3-8042-1182-8.
- Micallef, A., et al. 2012.** A multi-method approach for benthic habitat mapping of shallow coastal areas with high-resolution multibeam data. *Continental Shelf Research.* 2012, Bde. 39-40, S. 14-26.
- Milbradt, P. 2011.** Analyse morphodynamischer Veränderungen auf der Basis zeitvarianter digitaler Bathymetriem. *Die Küste.* 2011, Bd. 78, S. 33-58. ISSN 0452-7739.
- Milbradt, Peter, Dorow, C. und Asche, Ch. 2009.** *ImTG - Abschlussbericht.* Leibniz Universität Hannover : s.n., 2009.
- Milbradt, Peter, Sellerhoff, Frank und Krönert, N. 2005.** *KODIBA - Abschlussbericht.* Hannover : smile consult GmbH, 2005.
- Murray, A. B. und Thieler, E.R. 2004.** A new hypothesis and exploratory model for the formation of large-scale inner-shelf sediment sorting and "rippled scour depressions". *Continental Shelf Res.*, 24 (3. 2004, S. 295 – 315.
- Nasner, H. 1978.** Time-lag of dunes for unsteady flow conditions. *Proc. of 16th International Conference on Coastal Engineering (ICCE).* 1978.
- Nittrouer, C.A. und Wright, L.D. 1994.** Transport of particles across continental shelves. *Rev. Geophys.* 32(1), 1994, S. 85-113. doi:10.1029/93RG02603.
- NLWKN. 2006.** *Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch - Weser- und Emsgebiet, Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN).* 2006.
- Nommensen, B. 1982.** *Die Sedimente des südlichen Nordfriesischen Wattenmeeres (Deutsche Bucht): Ergebnisse geologisch-sedimentologischer Untersuchungen an pleistozänen und holozänen Sedimenten und an Schwebstoffen der Gezeitenströme. Dissertation.* Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel : Kiel, 1982.
- OSPAR. 2000.** Quality Status Report 2000 - Region II - Greater North Sea. [Hrsg.] OSPAR Commission. 2000.
- Otto, L., et al. 1990.** Review of the physical oceanography of the North Sea. *Netherlands Journal of Sea Research.* 1990, Bde. 26 (2-4), S. 161-238.
- Paarlberg, A.J., et al. 2007.** A parameterization of flow separation over subaqueous dunes. *Water Resources Research*, 43 (12). 2007.
- Pawlowicz, R., Beardsley, B. and Lentz, S. 2002.** Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T TIDE. *Computers and Geosciences*, 28. 2002, pp. 929–93.
- Plüß, A. und Heyer, H. 2007.** Morphodynamic Multi-Model approach for the Elbe estuary. 2007, S. 113-117.
- Poerbandono und Mayerle, R. 2005.** Composition and Dynamics of Sediments in Tidal Channels of the German North Sea Coast. *Die Küste*, 69. 2005, S. 63 – 91.
- Postma, L., Stelling, G.S, Boon, J. 1999.** Three-dimensional water quality and hydrodynamic modelling in HongKong. 1999, S. 43-49.

- Puls, W., Heinrich, H. und Mayer, B. 1997.** Suspended Particulate Matter Budget for the German Bight. *Marine Pollution Bulletin*. 1997, Bd. 34, S. 398-409.
- Putzar, B. 2003.** *Prognose von Dünenstrecken und Tidekennwerten*. Hamburg : Technische Universität Hamburg-Harburg, 2003.
- Rabaut, M., Guilini, K., et al. 2007.** A bio-engineered soft-bottom environment: The impact of *Lanice conchilega* on the benthic species-specific densities and community structure. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 2007, Bd. 75, S. 525-536.
- Rabaut, M., Vincx, M. und Degraer, S. 2008.** Do *Lanice conchilega* (sandmason) aggregations classify as reefs? Quantifying habitat modifying effects. *Helgol Mar Res*. 2008, Bd. 63, S. 37-46.
- Rees, H. L., et al. 2007.** Structure and dynamics of the North Sea benthos. *ICES Cooperative Research Report*. 288, 2007, S. 1-258.
- Reimers, H.-C. 2003.** *Sedimentverteilung und Benthosverbreitung in den Watten der Dithmarsche Bucht als Indikator für morphodynamische Veränderungen – Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben SEDIMORV im GKSS-Hochschulprogramm. Berichte GKSS-Forschungszentrum Geesthacht GmbH*, 2003.
- Reineck, H.-E. 1984.** *Aktuogeologie klastischer Sedimente*. Frankfurt am Main : Verlag W. Kramer. S. 348, 1984.
- Ricklefs, K. und Asp, N. 2005.** Geology and Morphodynamics of a Tidal Flat Area along the German North Sea Coast. *Die Küste*, 69. 2005, S. 93-127.
- Ricklefs, K., Lehner, S. und Rausch, J. 2005.** Morphological changes in a tidal flat area: A comparison of radar, optical and in-situ data. *Die Küste*, 69. 2005, S. 379 – 391.
- Rooper, C. N. und Zimmermann, M. 2007.** A bottom-up methodology for integrating underwater video and acoustic mapping for seafloor substrate classification. *Cont. Shelf Res.*, 27. 2007, S. 947-957.
- Scheuerle, Carolyn. 2004.** Climate development and its effect on the North Sea environment during the Late Holocene. *Dissertation an der Universität Bremen*. 2004.
- Scheurle, C. 2004.** *Climate development and its effect on the North Sea environment during the Late Holocene. Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades der Naturwissenschaften am Fachbereich Geowissenschaften der Universität Bremen*. Bremen : s.n., 2004.
- Schneggenburger, C. 1998.** *Spectral Wave Modelling with Nonlinear Dissipation*. Hamburg : Dissertation, Universität Hamburg, FB Geowissenschaften, 1998.
- Schrottke, K., Bartholomä, A. und Becker, M. 2005.** Bed mobility in the Weser estuary turbidity zone. *Hydro Int.*, 9. 2005, S. 27-29.
- Schrottke, K., Bartholomä, A. und Papenmeier, S. 2011.** Auswirkungen von Wasserinjektionsbaggerungen subaquatischer Dünen auf Sedimentcharakteristik und -Dynamik in der Tideweser. 2011, S. 42-54.
- Schrottke, K., Bartholomä, A. und Stegmann, S. 2005.** 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*. 2005, S. 45-52.

- Schrottke, K., et al. 2006.** Fluid Mud dynamics in the Weser estuary turbidity zone tracked by high-resolution side-scan sonar and parametric sub-bottom profiler. *Geo-Mar. Lett.*, 26. 2006, S. 185-198.
- Schwarzer, K. und Diesing, M. 2003.** Erforschung der FFH Lebensraumtypen Sandbank und Riff in der AWZ der deutschen Nord- und Ostsee. *FKZZ*, 80. 2003, S. 270 – 285.
- Schwarzer, K. und Diesing, M. 2004.** *Erforschung der FFH Lebensraumtypen Sandbank und Riff in der AWZ der deutschen Nord- und Ostsee. 4. Zwischenbericht, (S. 31).* 2004.
- Schwarzer, K. und Diesing, M. 2007.** Kartierung mariner Sedimente in der deutschen Nord- und Ostsee als Basis für die Erfassung benthischer Lebensräume. 17. *Meeresumweltsymposium*. 2007, S. 13 – 28.
- Son, C.S. 2009.** *Sediment dynamic processes and products on the shoreface of the East Frisian barrier-island system, southern North Sea. Dissertation (S. 109).* Universität Bremen. Bremen : s.n., 2009.
- Soulsby, R. 1997.** *Dynamics of marine sands. A manual for practical applications XXI*, 249. London : Telford, 1997.
- Stanev, E., et al. 2009.** Bed shear stress in the southern North Sea as an important driver for suspended sediment dynamics. *Ocean Dynamics* 59 (2). 2009, S. 183-194.
- Stelling, G.S. 1984.** *On the construction of computational methods for shallow water flow problems.* Rijkwaterstaat, The Netherlands : Technical Report 35., 1984.
- Stelling, G.S., Wiersma, A.K., Willemse, T. M. 1986.** Practical aspects of accurate tidal computations. 1986, S. 802-817.
- Streif, H. 1996.** *Die Entwicklung des südlichen Nordseebeckens im Quartär-Geowissenschaftliche Ausgangsbasis des „EG-Southern North Sea Projects“: Geol. Jb., Deutsche Beiträge zur Quartärforschung in der südlichen Nordsee, A. 146.* Hannover : s.n., 1996.
- Streif, H. und Köster, R. 1978.** Zur Geologie der deutschen Nordseeküste. *Die Küste*, 32. 1978, S. 30-50.
- Swift, D.J.P, et al. 1987.** Shoreface-connected sand ridges on American and European shelves, a comparison. *Estuarine and Coastal Marine Sciences*, 7. 1987, S. 257-273.
- Tabat, W. 1979.** Sedimentologische Verteilungsmuster in der Nordsee. *Meyniana*, 31. 1979, S. 83-124.
- Temmler, H. 1995.** Neue Ergebnisse zum Aufbau des Eem-Interglazials in Nordfriesland. *Meyniana*, 47. 1995, S. 83-100.
- Uffenrode, H. 1982.** Zur Gliederung des klastischen Holozäns im mittleren und nordwestlichen Teil der Deutschen Bucht (Nordsee) unter besonderer Berücksichtigung der Foraminiferen. *Eiszeitalter u. Gegenwart*, 32. 1982, S. 177 – 202.
- Uittenbogaard, R.E, Blumberg, A. F. 2000.** 3D modelling of horizontal transport and vertical mixing in Lake Victoria. 2000.

- Ulrich, J. 1975.** Bodenrippeln als Indikator für Sandbewegung. [Buchverf.] Deutsche Forschungsgemeinschaft. *Sandbewegung im Küstenraum, Rückschau, Ergebnisse und Ausblick*. Boppard : Harald Boldt Verlag, 1975.
- Ulrich, J. 1971.** Die Verbreitung submariner Riesen- und Großrippeln in der Deutschen Bucht. *Ergänzungsheft zur Deutschen Hydrographischen Zeitschrift*, 4(14). 1971, S. 1-31.
- van de Meene, J.W.H. und van Rijn, L.C. 2000.** The shoreface-connected ridges along the central Dutch coast - part 1: field observations . *Continental Shelf Research*, 20. 2000, S. 2295-2323.
- Van Hoey, G., et al. 2008.** Ecological implications of the presence of the tube-building polychaete *Lanice conchilega* on soft-bottom benthic ecosystems. 2008, Bd. 154, S. 1009-1019.
- Van Lancker, V., Lanckneus, J. und Hearn, S. 2004.** Coastal and nearshore morphology, bedforms and sediment transport pathways at Teignmouth (UK). *Continental Shelf*. 2004, Bd. 24, 11, S. 1171-1202.
- Van Landeghem, K.J.J., et al. 2009.** Post-glacial sediment dynamics in the Irish Sea and sediment wave morphology: Data-model comparisons. *Continental Shelf Research*, 29 (14). 2009, S. 1723-1736.
- Van Overmeeren, R., et al. 2009.** Acoustic habitat and shellfish mapping and monitoring in shallow coastal water - Sidescan sonar experiences in The Netherlands. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 85. 2009, S. 437-448.
- Van Rein, H., et al. 2011.** An evaluation of acoustic seabed classification techniques for marine biotope monitoring over broad-scales (>1 km²) and meso-scales (10 m²– 1 km²). *Estuarine, Coastal and Shelf Sciences*, 93 (4). 2011, S. 336 – 349.
- Van Rijn, L.C. 1993.** *Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas. Part I: Edition 1993*. Amsterdam : Aqua Publications, 1993.
- Van Rijn, L.C. 1984.** Sediment transport, Part III: Bed forms and alluvial roughness. *Journal of hydraulic engineering*, 110 (12). 1984, S. 1733-1754.
- Wasser- und Schifffahrtsamt (WSA) Cuxhaven. 2012.** Elbe. [Online] 2012. <http://www.wsa-cuxhaven.de>.
- Werner, F. 2004.** Coarse sand patterns in the southeastern German Bight and their hydrodynamic relationships. *Meyniana*, 56. 2004, S. 117 – 148.
- Wetzel, V. 1987.** Der Ausbau des Weserfahrwassers von 1921 bis heute. *Jahrbuch der Hafenbautechnischen Gesellschaft, Band 42*. 1987, S. 83-105.
- Wheatcroft, R.A. 2002.** In Situ Measurements of Near-Surface Porosity in Shallow-Water Marine Sands. . *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, Vol. 27, No. 3. 2002.
- Wille, P.C. 2005.** *Sound images of the ocean in research and monitoring* (S. 471). s.l. : Springer, 2005.
- Willems, T. 2013.** *Analyse der geotrischen Form von "Sorted Bedforms" auf dem Schelf westlich der Nordseeinsel Sylt. Bachelor-Arbeit*. Institut für Geowissenschaften, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel. S. 46 (unveröffentl.) : s.n., 2013.

- Willems, W., et al. 2008.** Where is the worm? Predictive modelling of the habitat preferences of the tube-building polychaete *Lanice conchilega*. *Ecological Modelling*. 2008, Bd. 212, S. 74-79.
- Winter , Christian, et al. 2006.** Observed Storm Surge Morphodynamics and Implications to Numerical Modelling Schemes. 2006.
- Winter, C. 2011.** Macro scale morphodynamics of the German North Sea coast. *Journal of Coastal Research*. 2011, Bd. 64, S. 706-710.
- Witez, P. 2002.** *GIS-gestützte Analysen und dynamische 3D-Visualisierungen der morphologischen Entwicklung schleswig-holsteinischer Tidebecken. Dissertation.* s.l. : Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Kiel, 2002.
- Wosniok, C. und Lehfeldt, R. 2012.** *Metadaten für die MDI-DE: Die Entwicklung des Küstenzonenprofils.* Hamburg : Symposium für Geoinformation für die Küstenzone - Beiträge zum 4. Hamburger Symposium "Geoinformationen für die Küstenzone", 2012.
- Wosniok, C., Valerius, J. und Lambers-Huesmann, M. 2012.** *Das Projekt AufMod in der Marinen Dateninfrastruktur Deutschland.* Hamburg : Symposium für Geoinformation für die Küstenzone, 2012.
- Yalin, M.S. 1964.** Geometrical properties of sand waves. *Journal of the Hydraulics Division*, 90. 1964, S. 105-119.
- Zeiler, M., et al. 2004.** Regenerierung von Materialentnahmestellen in Nord- und Ostsee. *Die Küste*, 78. 2004, S. 67-98.
- Zeiler, M., Lambers-Huesmann, M. und Schulz-Ohlberg, J. 2007.** Das Continental Shelf Informationssystem (CONTIS) und der Shelf Geology Explorer. [Buchverf.] K.-P. Traub und J. Kohlus. *Geoinformation für die Küstenzone*. S. 125-132. 2007.
- Zeiler, M., Schulz-Ohlberg, J. und Figge, K. 2000a.** Materialinventur an der deutschen Nordseeküste. *Die Küste*, 62. 2000a, S. 53-87.
- Zeiler, M., Schulz-Ohlberg, J. und Figge, K. 2000b.** Mobile sand deposits and shoreface sediment dynamics in the inner German Bight (North Sea). 2000b, S. 363-380.
- Zeiler, M., Schulz-Ohlberg, J. und Figge, K. 2000.** Mobile sand deposits and shoreface sediment dynamics in the inner German Bight (North Sea). *Marine Geology*. 2000, Bd. 170, S. 363-380.
- Zeiler, M., Schwarzer, K. und Ricklefs, K. 2008.** Seabed Morphology and Sediment Dynamics. 2008, S. 31-44.
- Ziegelmeier, V.E. 1952.** Beobachtungen über den Röhrenbau von *Lanice conchilega* (Pallas) im Experiment und am natürlichen Standort. *Helgol Mar Res*. 1952, Bd. 4, S. 107-129.
- Zorndt, A., et al. 2010.** Dune migration and sand transport rates in tidal estuaries: the example of the river Elbe. 2010.

8 Anhang

8.1 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.

Vorhaben: **AufMod-A**

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

Projektleitung: Dr. Manfred Zeiler (Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie [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 in die MDI-DE eingebunden sein werden.

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 - Zentrum für marine Umweltwissenschaften – 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 und stationären Experimenten im Strömungskanal und wenigen Felddaten.

Vorläufige Untersuchungen in Tidekanälen an der deutschen und dänischen Küste ((Ernstsens, 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, 1971) (Ulrich, 1975) 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 (Bundesanstalt für Wasserbau [BAW] – 03KIS084)

Hauptziele des Teilprojekts:

Skalenübergreifende, prozessbasierte 3D-Modellierung des Gesamtsystems Nordsee, Deutsche Bucht, Wattenmeer und Ästuar 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 Geschwin-

digkeiten 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 und Vorstrand: Dr. Klaus Schwarzer (Universität Kiel, Institut für Geowissenschaften [IFG])

Leitung Subprojekt: Watten: Dr. Klaus Ricklefs (Universität Kiel, Forschungs- und Technologiezentrum [FTZ] Büsum)

Leitung Subprojekt Ästuar: Prof. Dr. Kerstin Schrottke (Universität Kiel, Exzellenzcluster „Future Ocean“ [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 Ästuare, 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 Metadaten 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 am Meer [SaM] – 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 Metadaten in der MDI-DE 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.

8.2 Im Rahmen von **AufMod** durchgeführte Veranstaltungen

- **Doktorandenseminar „Datenbasierte Modellierung“**, September 2011, BSH Hamburg
- **„Telemac Seminar“**, Dezember 2011, Uni BW München
- **Doktorandenseminar „Messverfahren“**, Mai 2012, FTZ Büsum
- **AufMod – Workshop**, Juli 2011, HWK Delmenhorst

8.3 Sedimentologische Auswertung anhand von Querprofilen

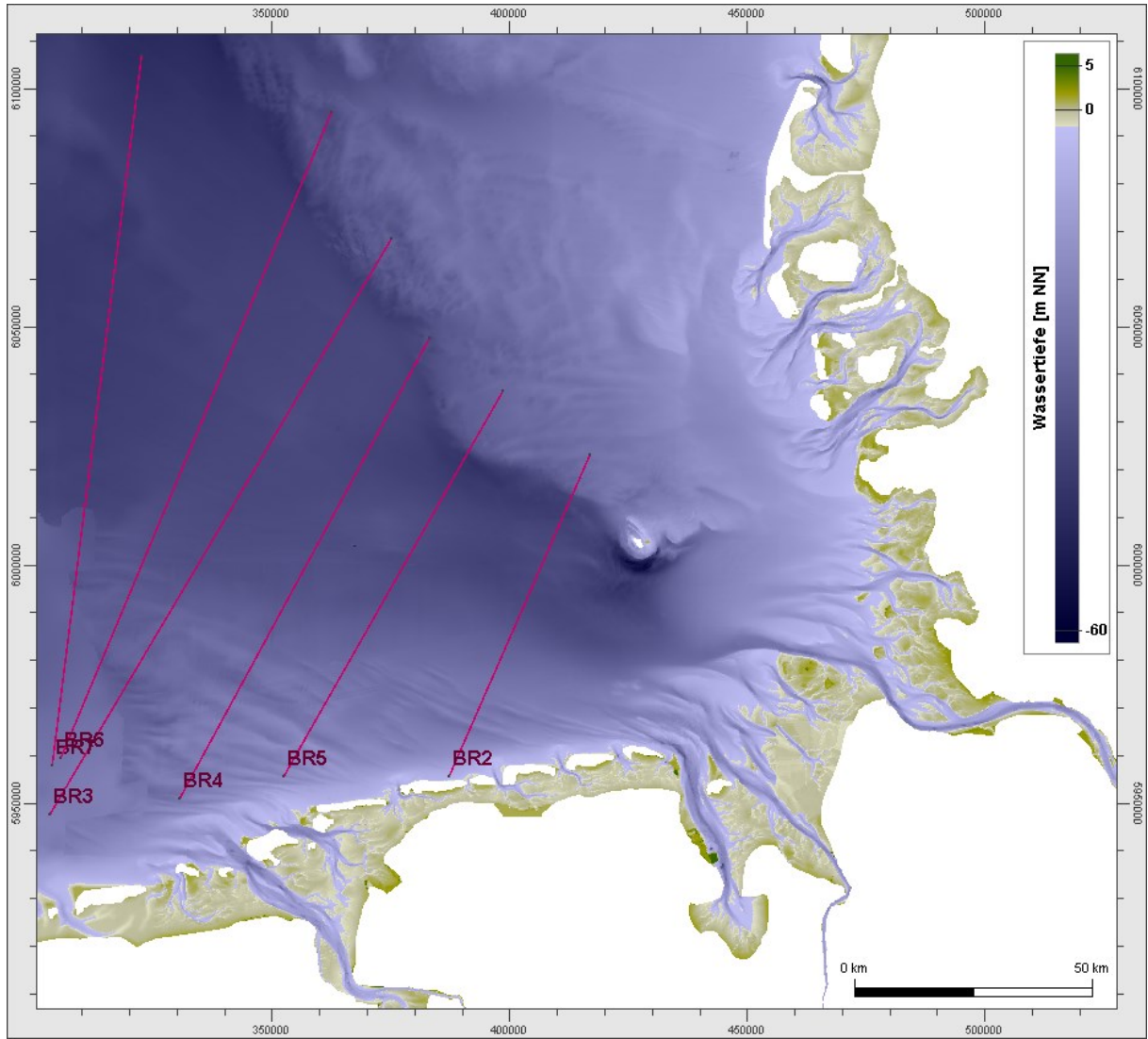
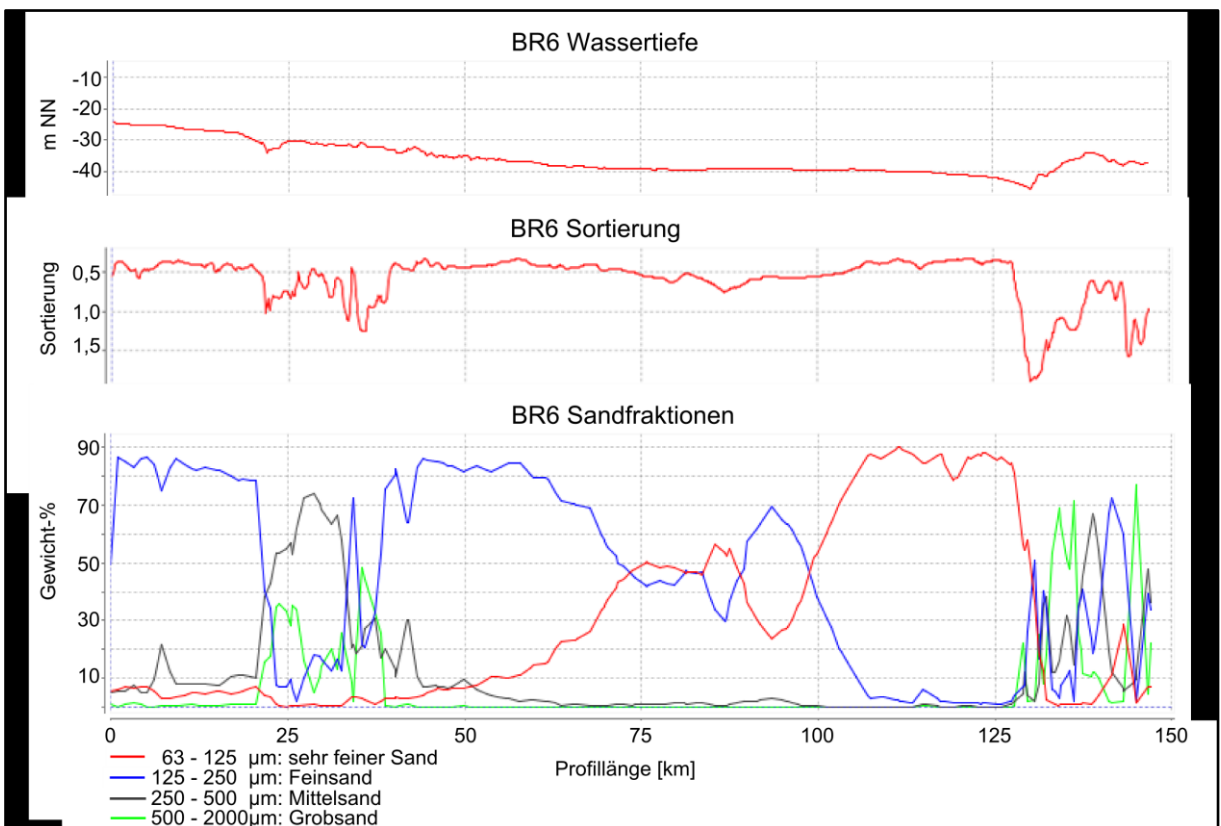
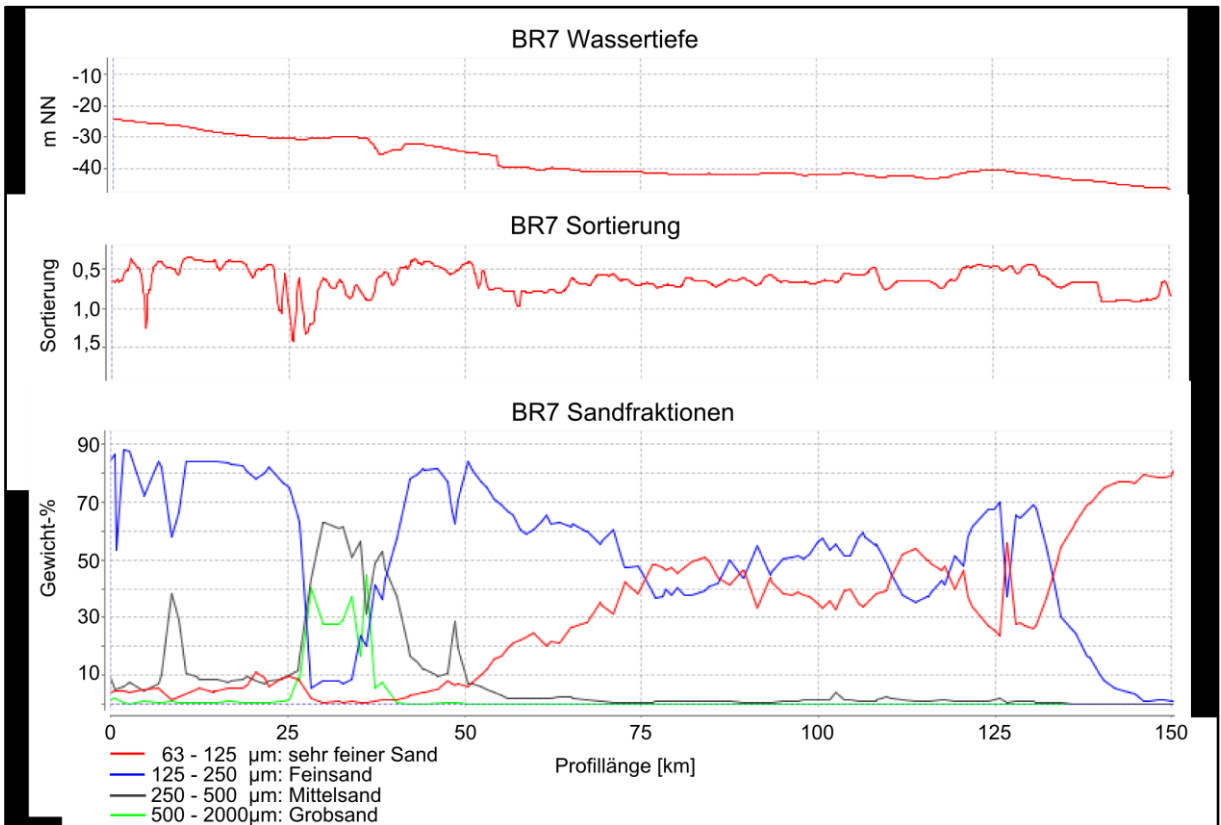
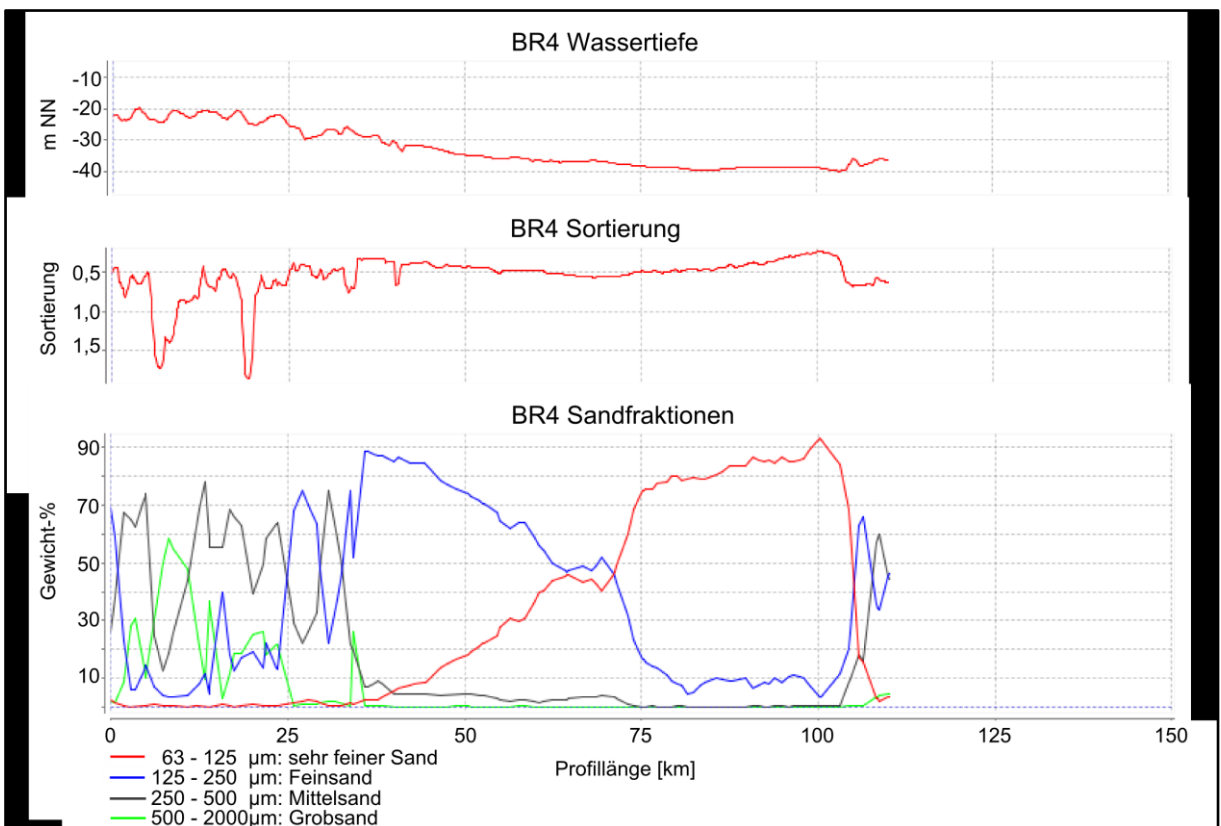
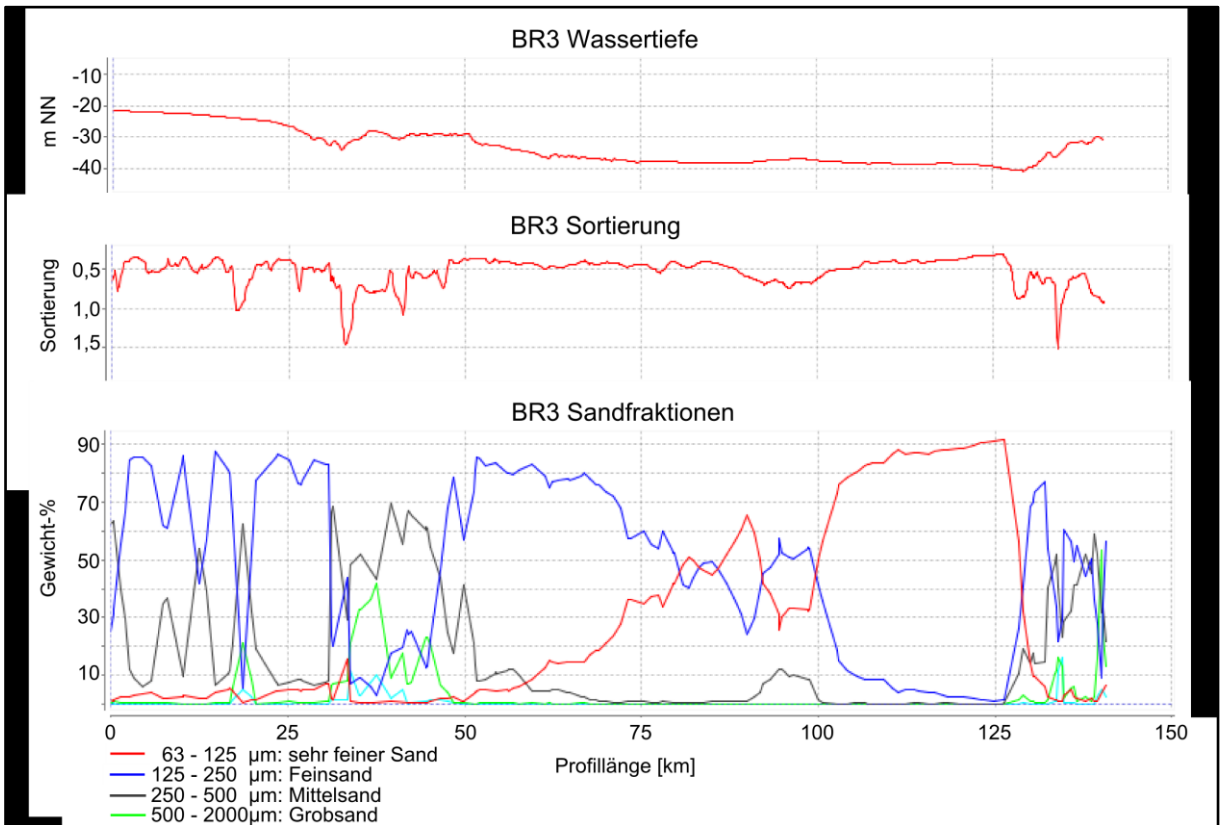


Abbildung 8-1: Querprofile (Magenta) über den südwestlichen Teil der Deutschen Bucht





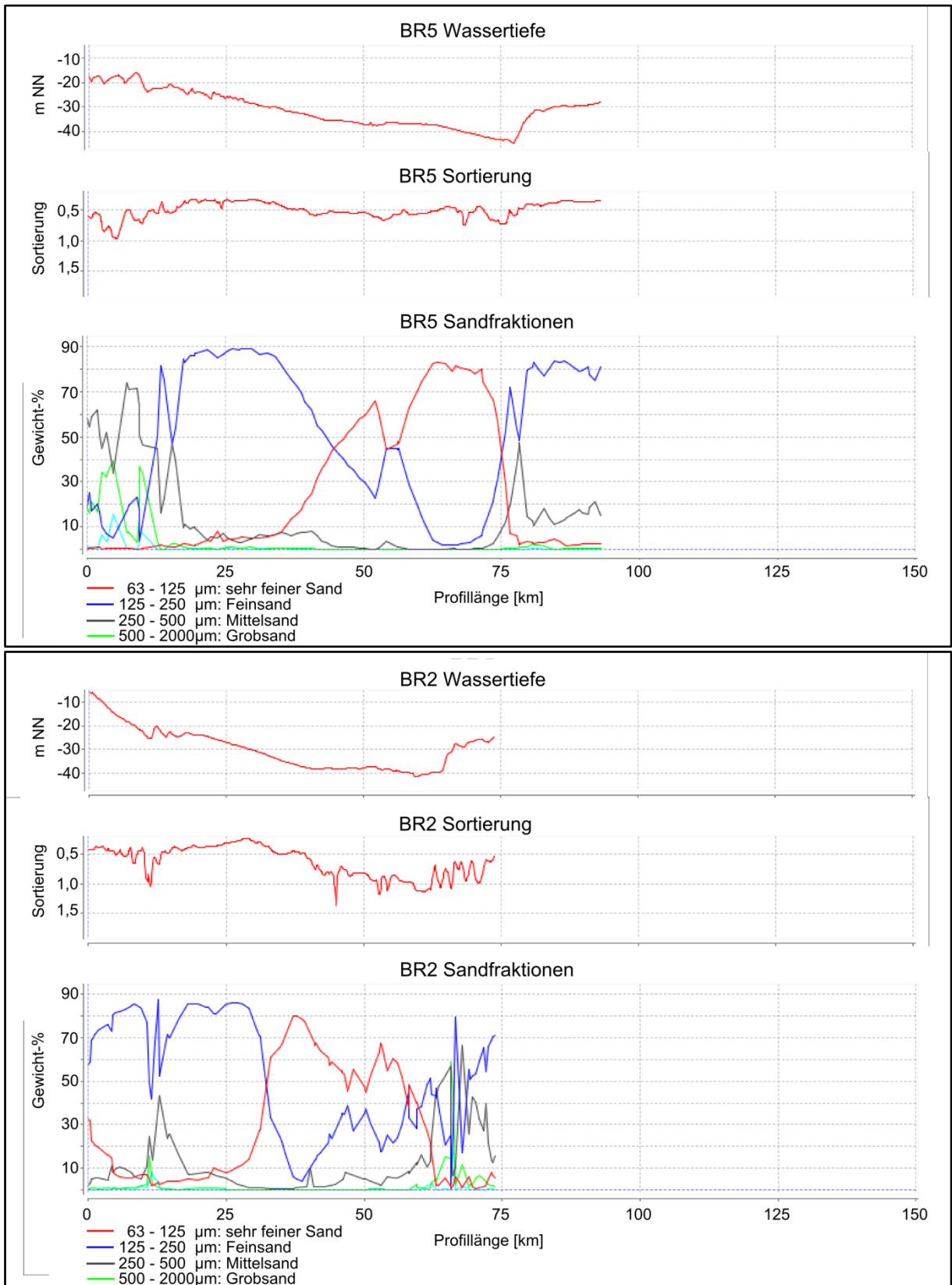


Abbildung 8-2: Querprofile mit aufgetragenen Wassertiefen, Sortierungen und Gewichtsanteilen der Sandfraktionen. Die Lage der Profile in der Deutschen Bucht ist aus Abbildung 8-1 ersichtlich

8.4 Satellitendaten zur Validierung des Schwebstofftransportes

Moderne Fernerkundungsmethoden bieten die Möglichkeit Parameter auf sehr großen Skalen quasi synoptisch zu erfassen. Da die Datengrundlage zur Validierung der Modelle nur aus Punktdaten besteht, die zusätzlich noch in sehr geringer Dichte und mit sehr mäßiger räumlicher Repräsentativität verfügbar sind, ist der Einsatz von Fernerkundungsmethoden zur Validierung – hier zur Validierung des Sedimenttransportes – sehr naheliegend. Neben dem Einsatz zu Validierungszwecken können die Satellitenbilder und Analysen der zugrunde liegenden Daten auch das Systemverständnis erhöhen bzw. weiter untermauern.

8.4.1 Datengrundlage

Innerhalb eines Kooperationsvertrages mit der Firma Brockmann Consult war es möglich Satellitenszenen aus dem Projekt Marcoast sowie an den zugrunde liegenden Daten zu gelangen. Weitere Szenen wurden für die Jahre 2006 und 2007 hinzu gekauft. Die Daten stammen vom Satelliten Envisat und wurden von der ESA und der Firma Brockmann Consult vorprozessiert und aufbereitet, so dass der Parameter Sedimentkonzentration [TSM: total suspended matter in mg/l] sowie exemplarisch (2 Szenen) die Sichttiefe (z_{90} in Meter) sowie farblich kodierte georeferenzierte Bilder (Geo-TIFF) und Abbildungen (RawResolution / PNG) zur Verfügung standen. Die folgende Tabelle 8-1 zeigt eine Übersicht hierzu:

Tabelle 8-1: Anzahl der Fernerkundungsszenen pro Jahr

Jahr	Anzahl (Bild)	RawResolution	Anzahl (300m-Raster)	Datensätze	Bemerkung
2006	352		37 (+1 ^b)		gekauft
2007	358		37		gekauft
2009	363		18		aus Marcoast-Projekt
2010	354		61(+3 ^a +1 ^b)		aus Marcoast-Projekt
2011	349		64 (+2 ^b)		aus Marcoast-Projekt
2012	96		12		aus Marcoast-Projekt, Ausfall Envisat im April
Summe	1872		229 (+3 ^a +4 ^b)		

Bei den Datensätzen handelt es sich um eine Ausdehnung von 3-9.49562° östlicher Länge und 52.0015-56.5° nördlicher Breite. Die Daten liegen im ASCII-Format auf einem Raster von 300x300m vor und enthalten 1616x1722 Punkte. Die Abbildungen der Grobauflösung (RawResolution) enthalten einen größeren Ausschnitt (s. Abbildung 8-3) jedoch geringere Auflösung und sind nur rudimentär prozessiert, so dass sie sich zur Ersteinschätzung eignen, um die Szenen zu identifizieren, die voll prozessiert werden sollen.

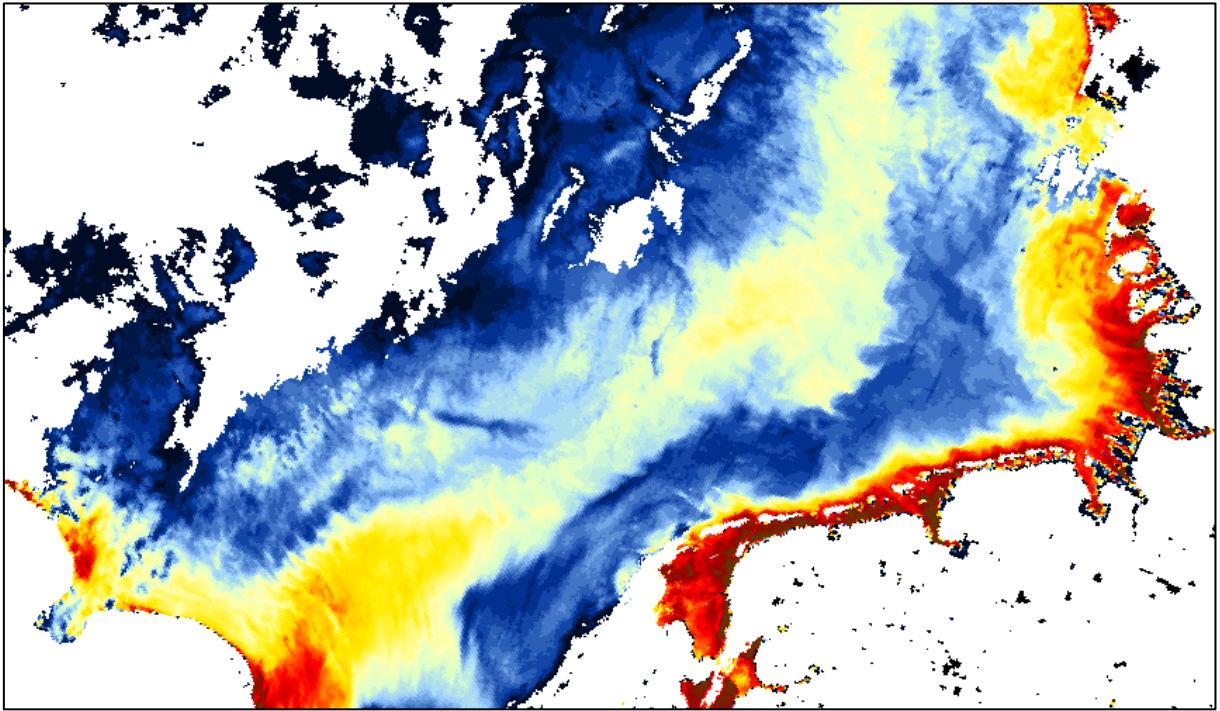


Abbildung 8-3: Beispiel für eine RawResolution-Szene mit höherer Ausdehnung aber geringerer Auflösung

8.4.2 Bearbeitungsmethode

8.4.2.1 Präprozessierung

Die Vorprozessierung stellt sich als Ablauf wie folgt dar:

- L1 (ESA)
- L2 (unverzerrt, mit allen Informationen, Atmosphärenkorrektur und Berechnung des TSM)
- L3 (Projektion, Beschnitt und Parameterauswahl)

Die Land/Wasser Detektion erfolgt über das IR-Spektrum. So kann es vorkommen, dass Landpunkte als Wasser erscheinen. Eine statische Maske wäre hier genauer, muss jedoch einmal angelegt werden, was einen Mehraufwand darstellt.

Informationen zur Berechnung:

- Es gibt ein Extinktionsmodell, das sich zusammen setzt aus der Absorption (Gelbstoff + Plankton) sowie der Streuung (Schwebstoff). Die Streuung wird mit einem Faktor multipliziert ($TSM = 1.73 \cdot \text{Streuung}$)
- Das Streuungsmodell beinhaltet eine Körnungslinie, konstante Monatsmittelwerte der Wassertemperatur und einen konstanten Salzgehalt von 34 PSU.
- Das Extinktionsmodell (oder das Streuungsmodell?) ist ein Neuronales Netz, das mit einem Testdatensatz trainiert wurde. Es findet kein Neutraining des Netzes statt.
- Probleme nahe Land: Landrückstreuung

8.4.2.2 Prozessierung

Die ASCII-Daten wurden in ein HDF5-Format gewandelt (Mathematica-Skript). Diese einmalige Konversion ermöglicht den späteren wiederholten Zugriff mit deutlich mehr Performanz.

Anschließend wurden die Daten visualisiert und mit Kontextinformationen versehen (z. B. Abbildung 8-4). Die Kontextinformationen beinhalten die Überflugzeit und für die letzten drei Tage den Parameter Wasserstand, Mittelwasser, Windrichtung und Windgeschwindigkeit an der Station Helgoland. Der Ausschnitt kann variabel angepasst werden.

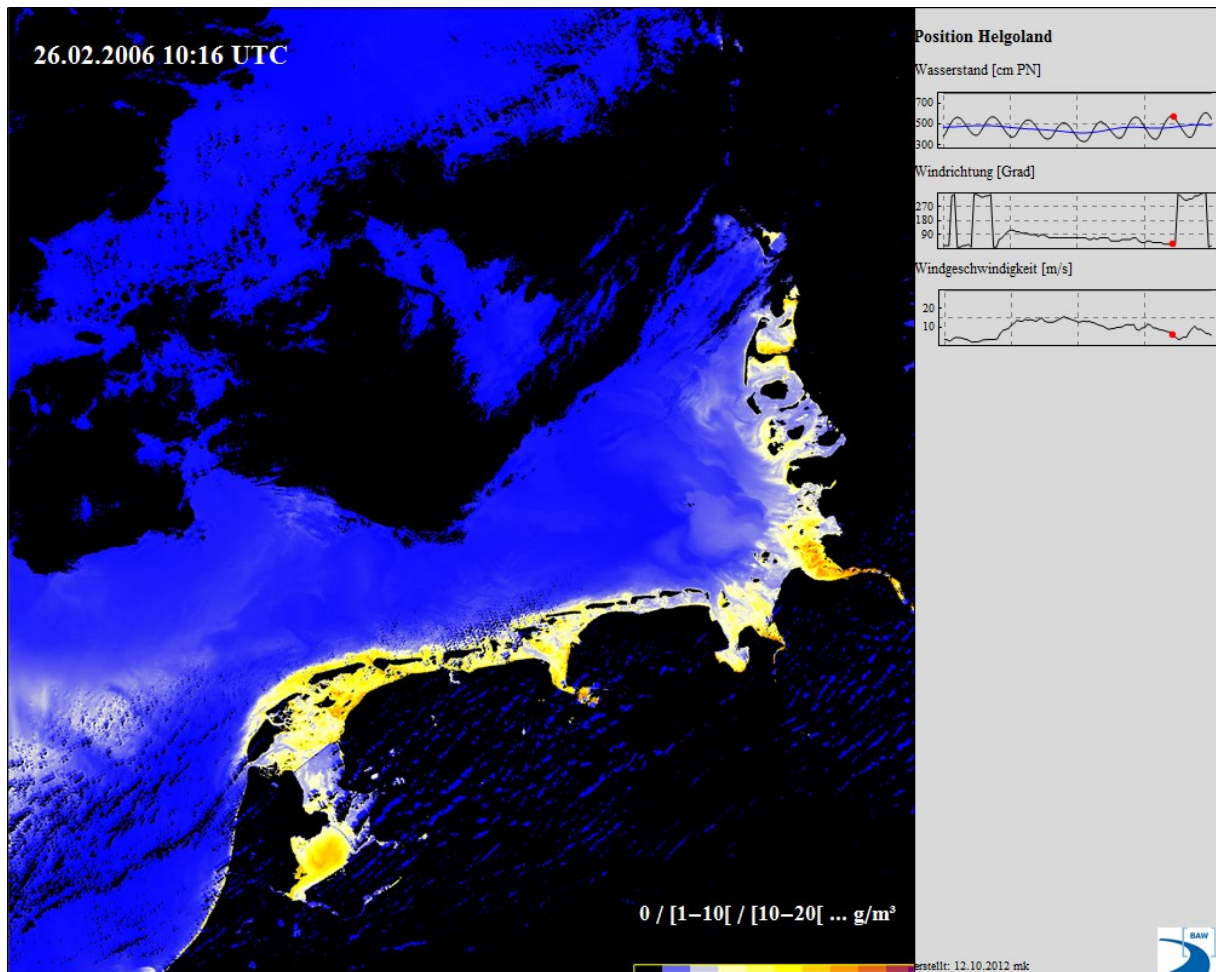


Abbildung 8-4: Datenvisualisierung mit Kontextinformationen der Station Helgoland

8.4.2.3 Plausibilisierung

Während der Prozessierung, der Visualisierung und der Berechnung der Statistik fielen einige Fehler auf, die nach mehreren Iterationen mit der Firma Brockmann Consult schließlich (temporär) behoben wurden. Folgende Fehler traten auf:

- Datenmatrix fehlerhaft -> das ist sofort in der Visualisierung erkennbar
- Versatz -> ein sehr subtiler Fehler, der erst bei der detaillierten Betrachtung der statistischen Größen (Mittel, Max, Standardabweichung und Anzahl) auffiel

Einige Artefakte wie Wolkenschatten können bzw. konnten jedoch noch nicht beseitigt werden.

8.4.2.4 Bewertung

Die Ergebnisse sind ohne Validierungsmessungen (in situ) und einer Aufbereitung von Sensitivitäten der Einflussgrößen sowie einer vollständigen Dokumentation von geringem Wert bzw. nicht belastbar. Eine veränderte Atmosphärenkorrektur, die eine nahezu Halbierung der Sedimentkonzentrationen bewirkte, hat das sehr stark verdeutlicht. Im Ausblick sind einige Punkte genannt, deren Umsetzung die Belastbarkeit weiter erhöhen würden.

Eine Validierung des Modells mit den Satellitendaten ist z.Zt. kaum möglich, da:

- die Satellitendaten als Einheit TSM (also anorganischen + organischen Anteil) beinhaltet
- die Sichttiefe sehr unterschiedlich ist (hier müssten unsere Postprozessoren ertüchtigt werden um räumlich differenziert über Teile der Wassersäule zu integrieren)
- Die Validität der Satellitendaten ist selber noch nicht gegeben/gezeigt. Dazu fehlen Vergleiche mit Messungen sowie Sensitivitätsanalysen zum Einfluss der Atmosphärenkorrektur, der Dichte, der Körnungslinie, ...

Ein Vergleich mit Modellergebnissen kann trotzdem erfolgen, muss jedoch qualitativ bleiben und beschränkt sich auf Transportmuster.

8.4.3 Ergebnisse

8.4.3.1 Statistik

Zu Beginn wurden die Parameter maximale Konzentration, mittlere Konzentration (s. Abbildung 8-5) und Standardabweichung sowie Anzahl der Szenen pro Pixel (vgl. Abbildung 8-6) aus den 229 Szenen in knapp sechs Jahren errechnet, um eine Übersicht der Intervallgrenzen und der Variabilität zu bekommen. Aus den Abbildungen lassen sich folgende Aussagen ableiten:

- Eine erhöhte Konzentration (Mittel und Maximum) sowie Variation (Standardabweichung) tritt deutlich im Bereich der Watten auf
- Vor Amrum (Mittel, Maximum und Standardabweichung) gibt es ebenfalls eine deutliche Fläche mit höheren Konzentrationen
- Die „East-Anglian-Plume“ (Mittel, Maximum und Standardabweichung) ist gut erkennbar
- Die größte Datendichte (Anzahl) liegt im Bereich Helgoland (geringste Bewölkung) und die Überflugstreifen sind erkennbar

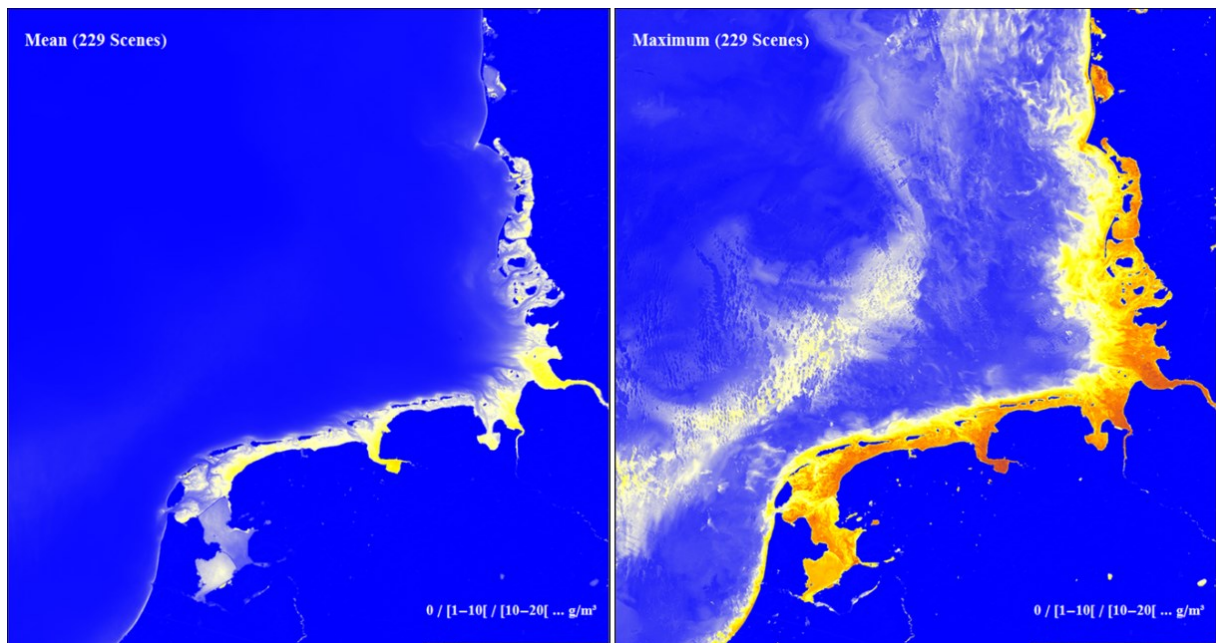


Abbildung 8-5: mittlere und maximale Sedimentkonzentration (TSM in g/m^3)

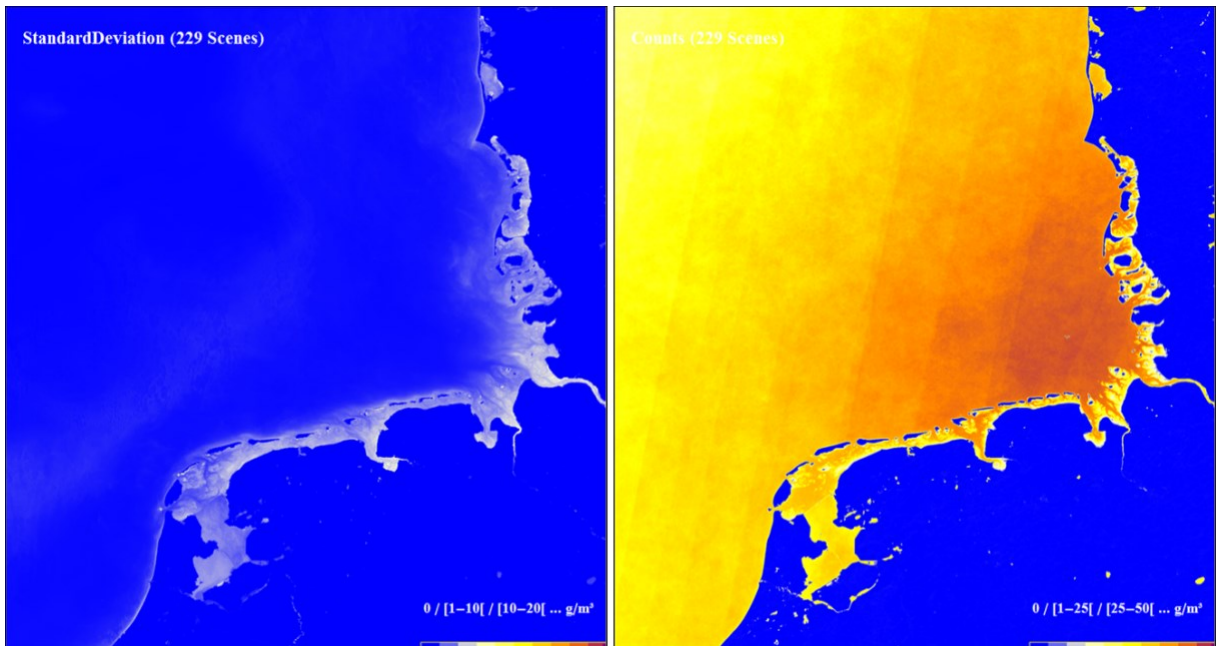


Abbildung 8-6: Standardabweichung (TSM in g/m^3) und Anzahl der Szenen pro Pixel

8.4.3.2 Sichttiefe

Neben der Konzentration stehen auch Daten der Sichttiefe z_{90} zur Verfügung. Diese Tiefen entsprechen 90% der Extinktion (Abschwächung) des Sonnenlichtes. Die folgende Abbildung (Abbildung 8-7) zeigt die Sichttiefen einmal an einer Hochwassersituation (links) und einmal zu einer Niedrigwassersituation (rechts) sowie die zugehörigen Verteilungen (Histogramme, unten im Bild).

Bei hohen Konzentrationen reicht die Sichttiefe bis zu einem Meter (rötliche Farben), der grünliche Bereich steht für einen Bereich von 1-5m, der blaue Bereich schließlich bis 10m.

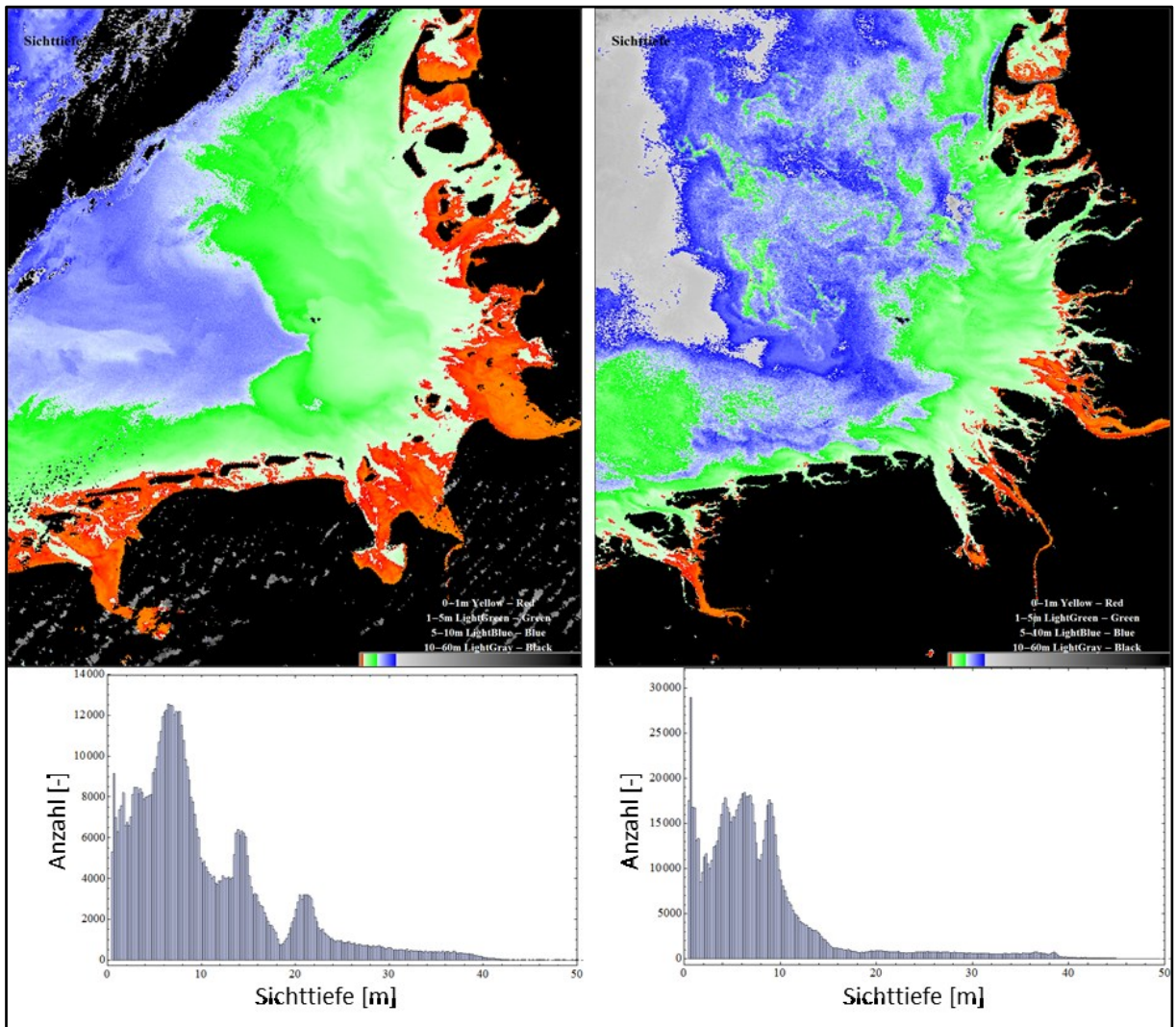


Abbildung 8-7: Sichttiefen bei Hoch- (links) und Niedrigwasser (rechts) mit Verteilungen

8.4.3.3 Charakterisierungen

Bei der Durchsicht aller 229 Szenen fallen besondere Szenen auf, die häufiger wiederkehren oder aber eine besondere Situation darstellen.

Vier Situationen lassen sich klassifizieren (s. Abbildung 8-8):

1. „East Anglian Plume“: gut sichtbar ist eine Art Transportband, das sich von etwa der Them-semündung bis weit nach Dänemark erstreckt
2. „Sturmereignis“: sowohl die East Anglian Plume als auch die Wattbereiche nebst weiterer Umgebung sind extrem rot, haben also hohe Schwebstoffkonzentrationen
3. „Ästuar eintrag“: erkennbar ist eine Schwebstofffahne aus der Elbe, die bis hinaus nach Hel-goland reicht
4. „Wattexport“: es sind Schlieren/längliche Fahnen vor den Ostfriesischen Inseln erkennbar, die sich in Richtung Nordwest erstrecken

In wie fern diese Situationen meteorologisch ausgelöst sind oder einer speziellen Tidephase entsprechen muss noch geklärt werden.

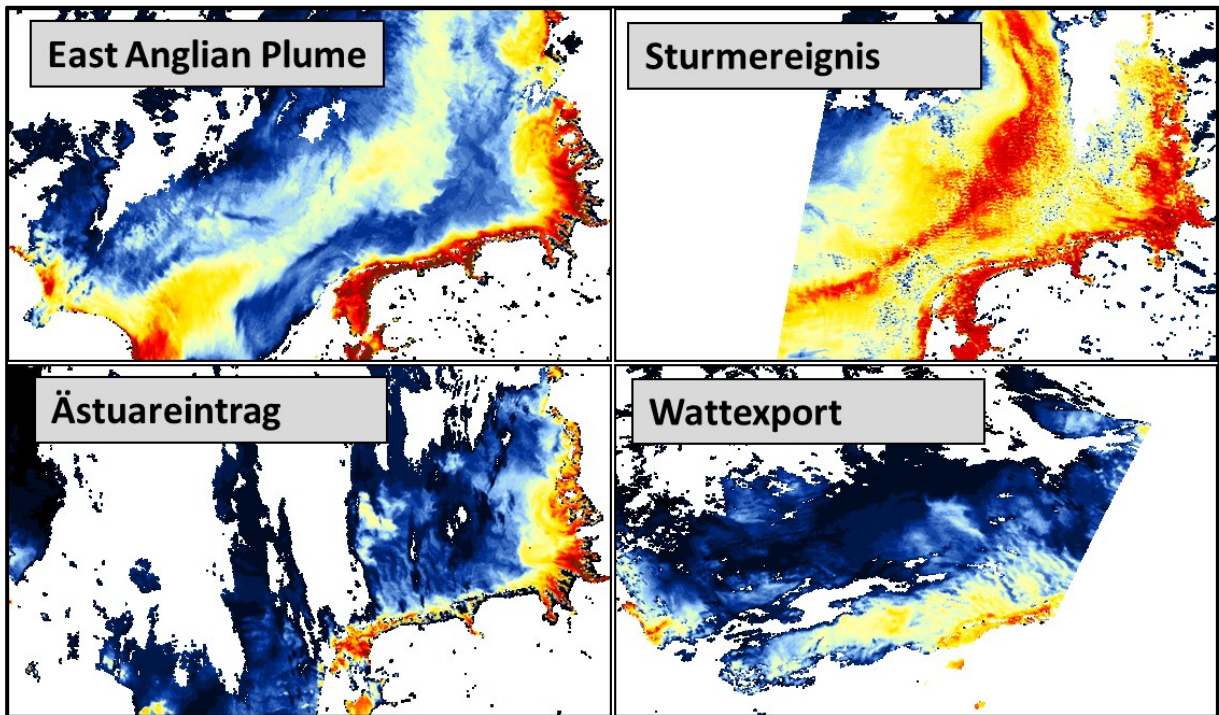


Abbildung 8-8: Charakteristische Szenen

8.4.3.4 Validierung mit Modelldaten

Mittlere Transportbahnen

Im Folgenden wurde der Vergleich einer Satellitenszene mit den Resttransportbahnen aus dem Modell durchgeführt. Die Resttransportbahnen sind die Bahnen, die ein konservativer Tracer über eine Zeitspanne beschreitet, der sich auf einem Feld von Resttransportvektoren über ein Kalenderjahr bewegt. Das daraus entstehende Bild der Resttransportbahnen stellt keine synoptische Situation dar, sondern zeigt eine statistische mittlere Situation – ähnlich dem Vergleich zwischen Wetter und Klima, in der Klima ebenfalls eine statistische Größe mit eigener Aussagekraft darstellt.

Der Vergleich einer synoptischen Satellitenszene mit einer statistischen mittleren Transportsituation aus dem Modell zeigt auffallende Ähnlichkeit (s. Abbildung 8-9). Trotz des methodisch unzulänglichen Vergleiches zeigt sich, dass diese mittlere Situation auch tatsächlich als synoptisches Ereignis existiert. Denkbar sind zwei Möglichkeiten:

- a.) Es gibt viele ähnlich große Signale in der Nordsee, die zusammen eine mittlere Situation ergeben, die der Natur in keiner Weise entspricht. Die Aussage einer mittleren Situation hat nur geringe Aussagekraft, da durch Wegfall eines Signals das mittlere Signal so weit verschoben wird, dass es völlig anders aussieht.
- b.) Es gibt ein starkes Signal mit vielen weiteren kleineren Signalen. Durch die Mittelung wird das starke Signal gegenüber den kleineren verstärkt. Das dominante Signal, das zuvor im Rauschen schwer sichtbar war, tritt deutlich hervor und zeigt seine Dominanz.

Die Tatsache, dass ein Einzelereignis gefunden wurde, das einer mittleren Situation entspricht, spricht für die Möglichkeit b und dafür, dass es kein Zufall ist. Damit gibt es ein starkes Indiz, dass der bevorzugte Transport von suspendiertem Material noch vor Helgoland etwa auf Höhe der Ems nach Norden hin abknickt und nicht die Ästuar- und die Nordfriesischen Inseln erreicht.

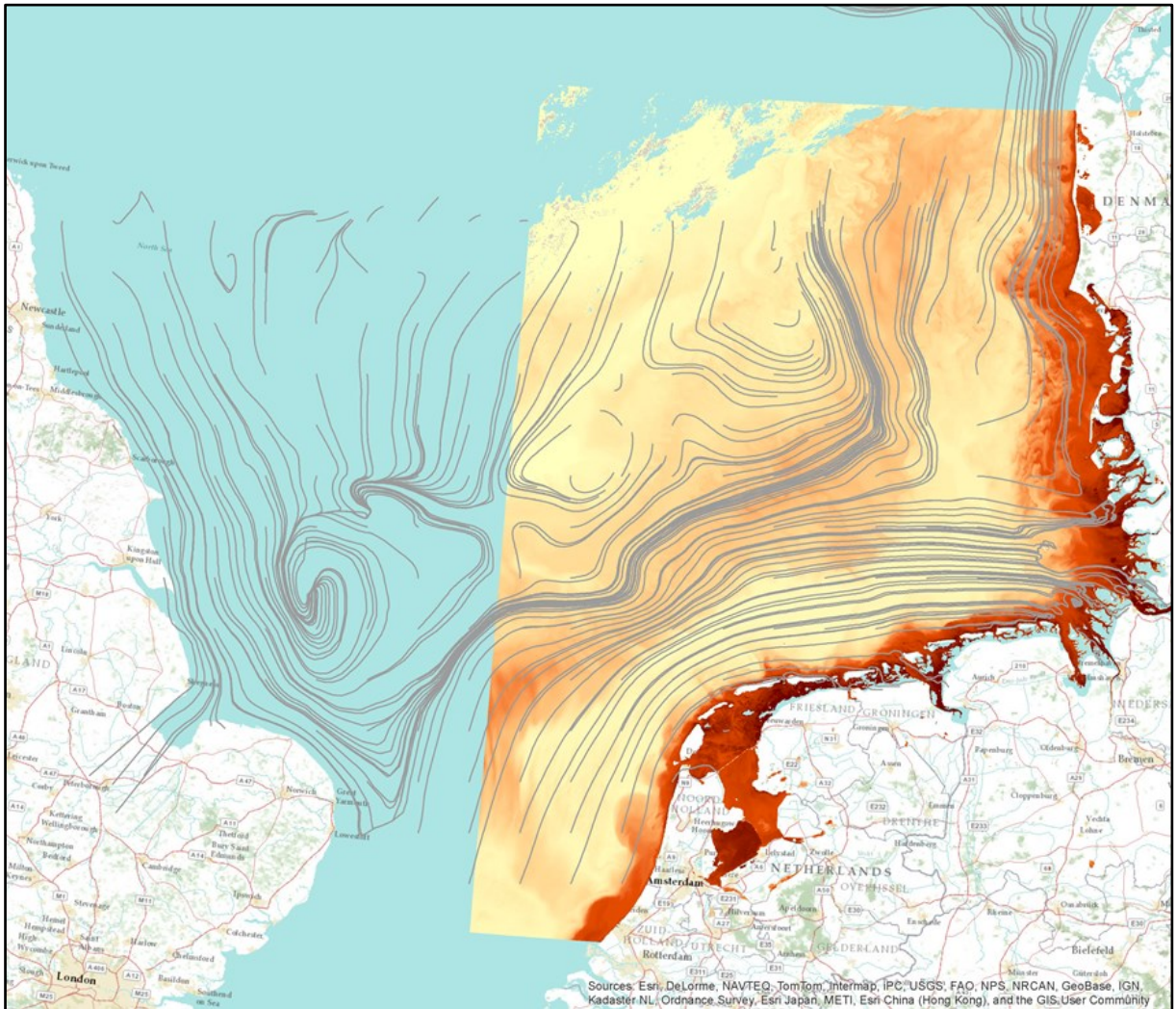


Abbildung 8-9: Resttransport-Bahnlinien im Vergleich mit einer Satelliten-Szene

Einzelereignis

In den vorliegenden Satellitenszenen gab es ein Einzelereignis, das besonders aus den anderen Szenen hervorsticht: am 26. Februar 2006 erreichte eine Schwebstofffahne der Elbe sehr deutlich die Insel Helgoland. Es wurden die Sedimentkonzentrationen zu diesem Zeitpunkt aus dem Modell her-ausgeschrieben und visualisiert. Beide Szenen sind in der folgenden Abbildung 8-10 dargestellt.

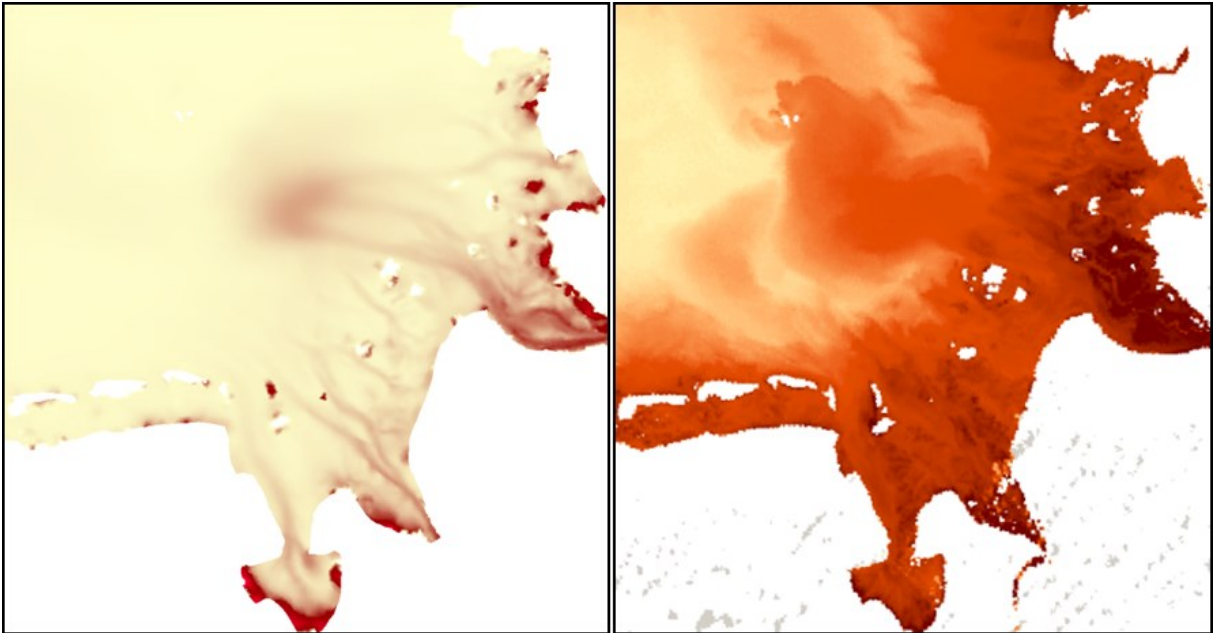


Abbildung 8-10: qualitativer Vergleich der Sedimentkonzentration eines Modellergebnisses (links, 2D tiefengemittelt) und einer Satellitenszene (rechts, variable Tiefen)

Datenarray

Um überhaupt eine Idee zu bekommen wie hoch die Sedimentkonzentrationen im Modell und in den Satellitenszenen liegen, wurde an den Punkten eines Rasters (s. Abbildung 4-26) die Informationen aus beiden extrahiert und verglichen. Dabei wurde aus den Satellitendaten nicht nur der betreffende Punkt extrahiert, sondern eine Teilfläche von 2.25 km², was 25 Punkten in einem 300x300m-Raster entspricht, um zusätzlich die Streubreite abschätzen zu können.

Bei den Modelldaten wurden alle verfügbaren Tiefenschichten extrahiert. Einen beispielhaften Vergleich zeigt Abbildung 4-27. Nach einigen Veränderungen der Modelleinstellungen ist es gelungen, in etwa die Größenordnung der Sedimentkonzentration zu treffen. Bei der Interpretation muss beachtet werden, dass die Einheit TSM sowohl organische als auch anorganische Anteile beinhaltet, während das Modell nur anorganische Anteile transportiert. Die Fernerkundungsdaten sind intrinsisch über die Sichttiefe integriert, während das Modell in Tiefenschichten untergliedert ist.

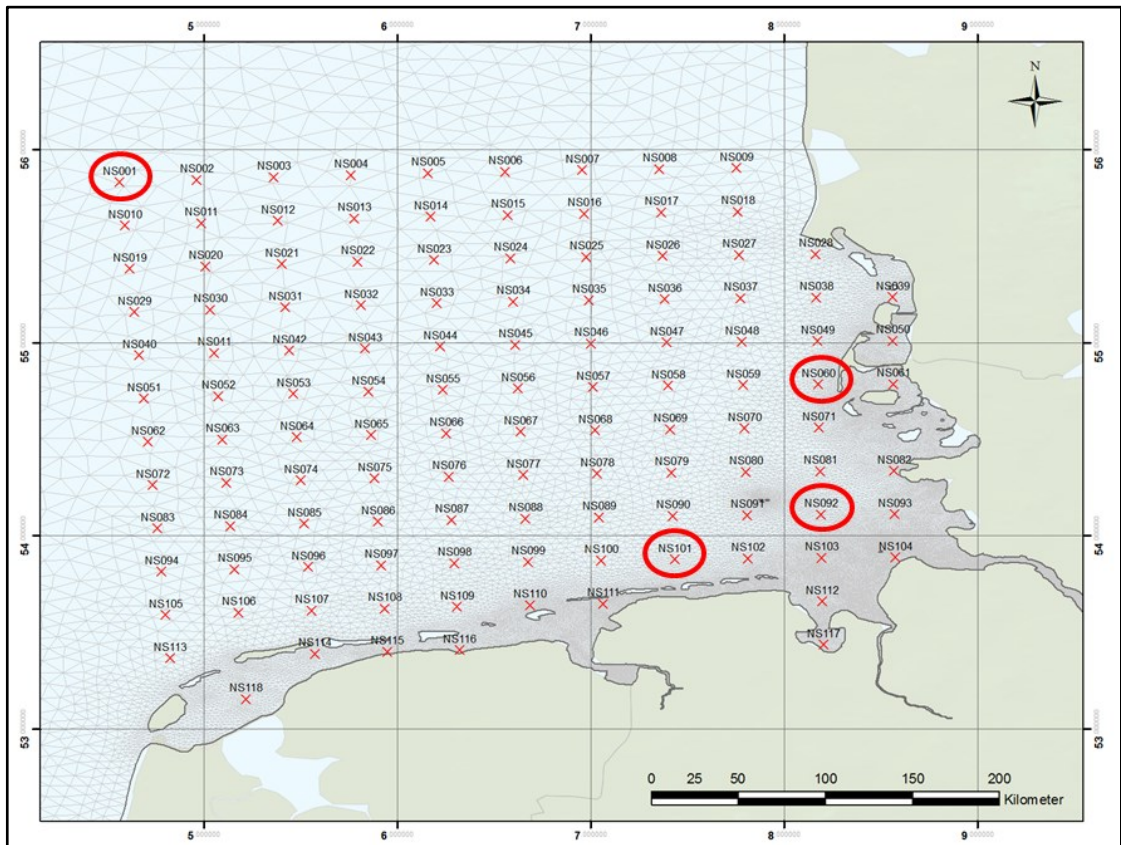


Abbildung 8-11: Analysepunkte für den Vergleich zwischen Konzentrationen aus Fernerkundungsdaten und dem Modell – für die rot markierten Punkte folgen die Diagramme

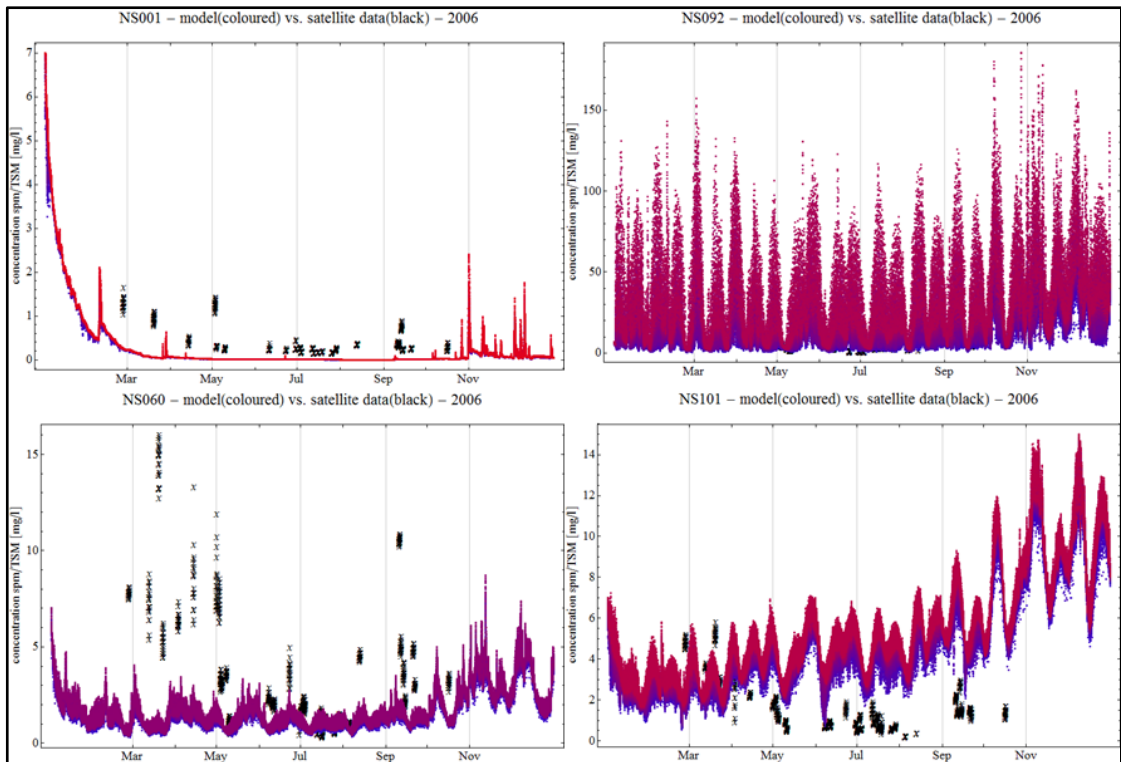


Abbildung 8-12: Vergleich Sedimentkonzentration aus FE-Daten (TSM) mit Modelldaten (SPM) - ausgewählte Positionen; die tiefste Schicht der Modellzeitreihe ist rot, die Höchste blau

8.4.4 Ausblick

Die Fernerkundungsmethoden sind technisch weit fortgeschritten, jedoch sind für den Parameter Sedimentkonzentration und Sichttiefe noch sehr viele Fragen offen, so dass noch nicht von einer konsolidierten Arbeitsweise gesprochen werden kann. Vielmehr ist hier noch viel Forschung und Entwicklung erforderlich. Fragen, die während des Umgangs mit den Daten auftraten sind in der folgenden Liste aufgeführt:

- Wie ist das Modell aufgebaut (Topologie des neuronalen Netzes)?
- Welche Einflussgrößen und Modellparameter gibt es?
- Wie hoch sind die Sensitivitäten der Einflussgrößen (Atmosphärenkorrektur, Wassertemperaturen, Dichte, Körnungslinie)?
- Wie sieht die Validierung mit Messdaten aus? Wie weit erstreckt sich der Gültigkeitsbereich? Wie hoch ist die Streuung?
- Was passiert bei geringer Wasserbedeckung (sobald der Satellit den Boden sieht, geht die Konzentration hoch)? Wie kann man geringe Wasserbedeckung mit hoher Konzentration von einer geringen Wasserbedeckung mit „der Sensor sieht den Boden“ unterscheiden?
- Wie wirken sich Wolken und Wolkenschatten, die Algenblüte, die angenommene Sedimentkurve, der Salzgehalt und der organische Anteil auf das Ergebnis aus?
- Kann man TSM aufteilen in Corg und Sediment (SPM)?

Neben diesen Fragen, die sich an Forschung & Entwicklung orientieren, gibt es noch viele Fragen zum Prozessverständnis, die z.T. schon mit den heute noch nicht sehr sicheren Angaben von Sedi-mentkonzentrationen beantwortet werden können. Diese lauten:

- Wie weit reichen die Ästuarfahnen in die Nordsee?
- Gibt es charakteristische Muster bei „Sturm“ und „ruhiger See“? Sehr grob wurde diese Frage bereits geklärt (s. Kapitel 8.4.3.3) – es gilt das Ergebnis zu untermauern bzw. auszuweiten.
- Wie hoch ist die intratidale Dynamik?
- Wie groß ist die Hintergrundkonzentration und für welche Tiefe ist sie gültig?
- Unter welchen Umständen tritt die „East Anglian Plume“ auf und wie weit reicht sie?
- Lässt sich ein Absinken des Sedimentes über die Zeit erkennen (Voraussetzung sind zeitlich aneinander grenzende Szenen ohne viel Wolkenbedeckung)?

Zahl und Art der Fragen sowie die Prozessierungskette und das komplexe Modell lassen erkennen, dass ein größerer Zeitaufwand mit diesem Thema verbunden ist, um sich tiefer gehend mit dem Thema und ihren Stolperfallen auseinander zu setzen.

8.5 Das prozessorientierte Modellsystem

Zur langfristigen und großräumigen Simulation der Morphodynamik wurde am Anfang des Projektes in der ersten Projektphase ein prozessorientierter Modellansatz verwendet. 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 beinhalten.

Modellkonzept

Das in ersten Projektphase entwickelte prozessorientierte Modell basiert auf einer angepassten Lösung der tiefengemittelten Impulsgleichungen und einer zweidimensionalen, horizontalen Diskretisierung des Modellgebietes, mit der auch komplexe Strukturen berücksichtigt werden können. Zu den Faktoren, die zur Modellierung der Sedimentdynamik in der Deutschen Bucht maßgebend sind, gehören die Gezeiten, der Wind sowie der daraus generierte Seegang, Unterhaltungsmaßnahmen und das Sedimentvorkommen. In ihrer Summe führen sie zu einer Änderung der Sohle, die sich wiederum mathematisch in deterministischer Form als Sohlevolutionsgleichung beschreiben lässt.

Dieses Konzept bildete die Grundlage für das prozessorientierte Modellsystem der ersten Projektphase, das im Folgenden als NSea100 bezeichnet wird. Im Projektverlauf wurden die folgenden Aspekte in NSea100 berücksichtigt:

- Gezeiten: Die Wasserspiegelauslenkung durch die Gezeiten wird im gesamten Modellgebiet zu jedem Zeitschritt der Simulation vorgegeben und daraus eine tiefengemittelte Strömung berechnet. Hierfür wurden flächendeckend analysierte Partialtiden aus dem Modell der BAW übernommen und ergänzt.
- Bodenstruktur: Die initiale Bathymetrie und initiale Sedimentverteilung wurden aus dem Funktionalen Bodenmodell übernommen. Die Bestandteile des anstehenden Bodens wurden durch kohäsive und nicht-kohäsive Sedimentklassen modelliert.
- Sohlevolution: Zur Berechnung des fraktionierten Geschiebetransportes und der Sohlevolution wurde das numerische Verfahren SediMorph (Malcherek, et al., 2005)) in NSea100 integriert. Die Berechnung der Sohlevolution erfolgt durch Lösen der allgemeinen Sohlevolutionsgleichung.
- Unterhaltungsmaßnahmen: Für die im Modell abgebildeten Ästuare Elbe, Ems und Weser wurden vorhandene Bagger- und Verklappstrategien implementiert. Zur numerischen Modellierung wurde das Paket DredgeSim (Maerker, et al., 2006) eingebunden.

Wind- und Seegangseinflüssen wurde in der ersten Projektphase nicht berücksichtigt.

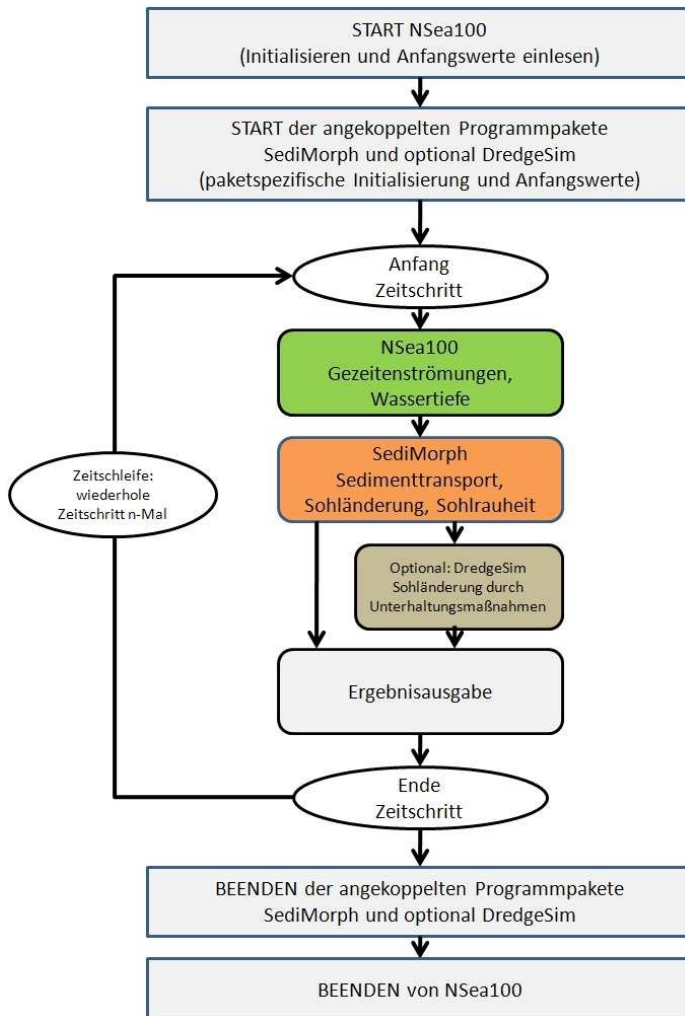
Aufbau und Simulationsablauf

Das Simulationssystem besteht aus einem Hauptprogramm zur Steuerung einer Simulation und zur Berechnung der Hydrodynamik, das in der Entwicklungsphase ebenfalls als NSea100 bezeichnet wurde, dem morphodynamisch-numerische Modell SediMorph, dem Paket DredgeSim sowie paketspezifischen Modulen. Die Simulationsdaten enthalten die

Partialtidenkennwerte, die Sedimentbelegung und die Sohlage sowie ggf. Daten zur Modellierung von Unterhaltungsmaßnahmen. Sie werden für die in **AufMod** verwendeten Gitternetze generiert. NSea100 unterstützt die folgenden Funktionalitäten:

- zeitliche Steuerung des gekoppelten Simulationssystems
- Einlesen der initialen Modelltopographie im selafin-Format
- Partialtidensynthese von beliebig vielen Partialtiden
- Prädiktion der Wassertiefenänderung aufgrund von Gezeiten
- Gezeitenströmungen aus tiefengemittelter Impulsbilanz
- Kopplung mit SediMorph zur Berechnung von Sedimenttransport und Morphodynamik
- wahlweise Kopplung mit DredgeSim zur Berücksichtigung von Unterhaltungsmaßnahmen
- Ergebnisausgabe im selafin-Format

Der Ablauf einer Simulation ist in Abbildung 8-13 dargestellt. 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.



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. Wesentliche Ergebnisse sind die tiefengemittelten Geschwindigkeiten, der Wasserstand, die Sohlage und die Sedimentfraktionen des Bodens.

Abbildung 8-13: Ablauf einer Simulation und schematischer Aufbau des prozessorientierten Simulationssystems NSea100

NSea100 und SediMorph sowie SediMorph und DredgeSim sind direkt miteinander gekoppelt, d. h. ohne morphologische Beschleunigungstechniken, und werden nacheinander ausgeführt. Die Zeitschleife in Abbildung 8-13 skizziert dieses Kopplungsprinzip. 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 nach SediMorph aufgerufen und schließlich beendet. Der Datenaustausch, der für die Simulation von Bagger- und Verklappstrategien notwendig ist, wird zwischen DredgeSim und SediMorph geregelt.

Ansatz zur effizienten Berechnung tiefengemittelter Gezeitenströmungen

Die Wirkung der Gezeitendynamik wird über die tiefengemittelten Impulsgleichungen berücksichtigt. Sie lauten in x -Richtung:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -g \frac{\partial z_s}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \nu_D \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\tau_{B,x}}{\rho h} + \frac{\tau_{W,x}}{\rho h} + f_x \quad (1)$$

und in y -Richtung:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -g \frac{\partial z_s}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} \nu_D \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{\tau_{B,y}}{\rho h} + \frac{\tau_{W,y}}{\rho h} + f_y \quad (2)$$

Dabei sind u und v die horizontalen Strömungskomponenten in $[\text{m s}^{-1}]$, t die Zeit in $[\text{s}]$, g die Erdbeschleunigung in $[\text{m s}^{-2}]$, z_s der Wasserspiegelgradient in $[\text{m}]$, ν_D der Dispersionskoeffizient in $[\text{m}^2/\text{s}]$ sowie τ_B und τ_W die horizontalen Sohlschubspannungs- bzw. Windschubspannungskomponenten in $[\text{N m}^{-2}]$ und $f_x = f_{cor}v$ und $f_y = -f_{cor}u$ die Coriolisbeschleunigung in $[\text{m s}^{-2}]$. Der Coriolisparameter f_{cor} (in $[\text{s}^{-1}]$) berechnet sich mit der Erdrotationsgeschwindigkeit ω (in $[\text{s}^{-1}]$) und dem Längengrad λ zu $f_{cor} = 2\omega \sin(\lambda)$.

Zu ihrer Lösung wird ein neuartiger Ansatz verwendet. Berechnungsgrundlage ist der Druckgradient als treibende Kraft, der in den tiefengemittelten Impulsgleichungen als Wasserspiegelgradient $\partial z_s / \partial x$ bzw. $\partial z_s / \partial y$ erscheint. Er wird aus der Wasserspiegelauslenkung z_s durch die Gezeiten berechnet. Die Wasserspiegellage z_s an einem Knoten k wird aus der Partialtidensynthese gewonnen und wird als Summe einer harmonischen Reihe für N Partialtiden berechnet:

$$z_{s,k} = \sum_{n=1}^N A_{n,k} \cos(\omega_{n,k} t - \phi_{n,k}) \quad (3)$$

Die Amplituden A (in $[\text{m}]$) und Phasen ϕ (in $[\text{rad}]$) müssen durch eine Partialtidenanalyse aus simulierten Wasserstandszeitreihen für jeden Knoten des Modellgebietes ermittelt werden, während die Frequenzen ω (in $[\text{s}^{-1}]$) fest definierte Werte besitzen. Die verwendeten Partialtiden und ihre Frequenzen können Tabelle 8-2 entnommen werden.

Tabelle 8-2: Partialtiden des Simulationssystems NSea100 zur Berechnung der Wasserspiegelauslenkung z_s

n	Partialtide	Kreisfrequenz ω $[\text{s}^{-1}]$
1	K1	7.29212e-5
2	M2	1.40512e-4
3	M4	2.81020e-4
4	M6	4.21540e-4
5	M8	5.62050e-4
6	S2	1.45444e-4
7	O1	6.75977e-5

Die Partialtiden aus Tabelle 8-2 wurden durch die BAW bereitgestellt. Naturgemäß kann die Partialtidenanalyse auf trockenfallenden Gitterknoten nicht durchgeführt werden, so dass hier keine Amplituden und Phasen vorlagen. Das führt allerdings zu sehr großen Wasserspiegelgradienten an diesen Knoten und somit zu hohen Schubspannungen. Unatürliche Sohlentwicklungen sind die Folge. Im Projektverlauf wurde ein Verfahren entwickelt, um auch auf trockenfallenden Knoten Partialtidenwerte zu generieren. Zur Erzeugung eines homogenen Datensatzes wurden die originalen BAW-Werte mit den extrapolierten Werten zusammengeführt und für jede Partialtide ein globaler Datensatz aus Amplitude und Phase generiert. Damit kann die Wasserspiegelauslenkung an jeden Gitterknoten des Modellgebiets berechnet werden.

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. Für die erste Projektphase wurden die Impulsgleichungen mit Hinblick auf einen prozessorientierten Ansatz stark vereinfacht und Advektion und Diffusion sowie die windinduzierten Schubspannungen vernachlässigt. Die Impulsbilanz lautet dann für die beiden Raumrichtungen:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -g \frac{\partial z_s}{\partial x} - \frac{\tau_{B,x}}{\rho h} + f_x \quad (4)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -g \frac{\partial z_s}{\partial y} - \frac{\tau_{B,y}}{\rho h} + f_y \quad (5)$$

In den reduzierten Impulsgleichungen werden neben der lokalen Beschleunigung und dem Wasserspiegelgradienten die Coriolisbeschleunigung und die Sohlreibung berücksichtigt. Die letzte Größe sorgt dafür, dass die gezeitengetriebenen Strömungen in direkter Wechselwirkung mit der Sohlrauheit stehen. Eine Erweiterung dieses Ansatzes mit Advektion und Diffusion ist möglich, aber numerisch wesentlich aufwendiger und rechenintensiver.

Die reduzierten Impulsgleichungen (Glg. (4) und Glg. (5)) können nun zur Simulation langfristiger tidegetriebener Morphodynamik komplett explizit gelöst werden. Die nichtlinearen Terme der Sohlreibung und der Coriolisbeschleunigung würden allerdings zu numerischen Instabilitäten führen. Daher wurde in NSea100 ein semi-implizites Verfahren implementiert, mit dem die Gezeitenströmungen auch bei großen Zeitschritten schnell und stabil berechnet werden können. Es lautet zeitlich und räumlich diskretisiert:

$$u^{n+1} = \left(u^n - \Delta t \frac{\Delta z_s}{\Delta x} g + \frac{\Delta t f_{cor} v^n}{\alpha} - \frac{\Delta t^2 f_{cor} g \Delta z_s}{\alpha \Delta y} \right) \beta^{-1} \quad (6)$$

$$v^{n+1} = \left(v^n - \Delta t \frac{\Delta z_s}{\Delta y} g - \frac{\Delta t f_{cor} u^n}{\alpha} + \frac{\Delta t^2 f_{cor} g \Delta z_s}{\alpha \Delta x} \right) \beta^{-1} \quad (7)$$

mit

$$\alpha = 1 + \Delta t \frac{r|\bar{u}|}{h}, \quad r = \frac{\kappa^2}{\log \frac{12h^2}{k_s}}, \quad \beta = \alpha + \Delta t^2 \frac{f_{cor}^2}{\alpha} \quad (8)$$

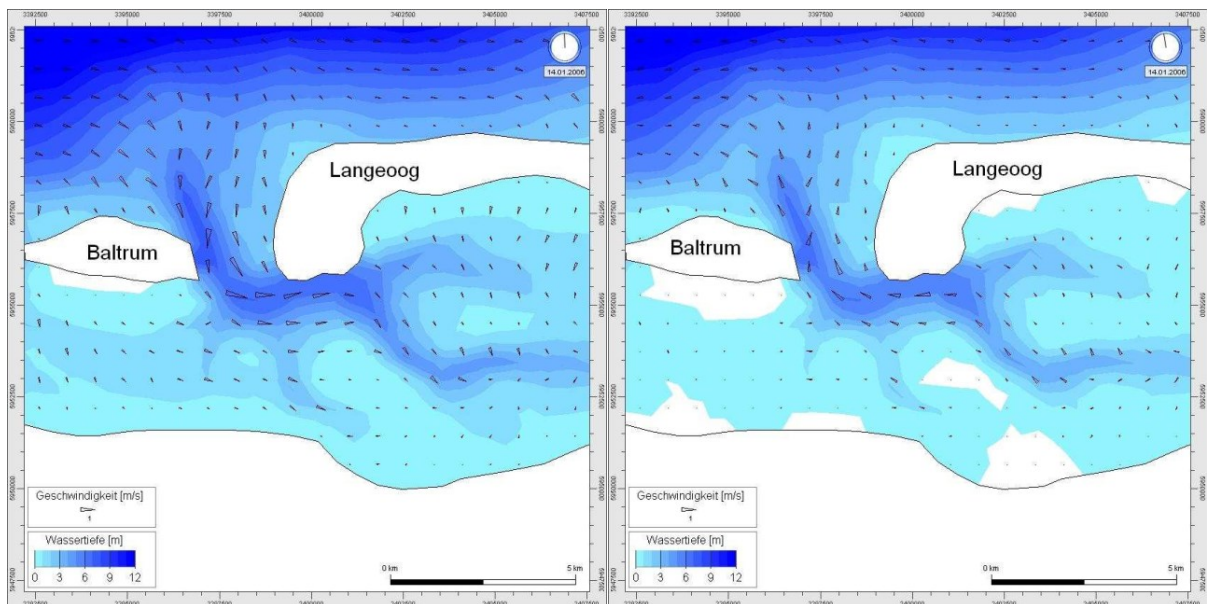
Es sind κ die dimensionslose von Karman-Konstante, h die Wassertiefe in [m] und k_s die Sohlrauheit in [m]. Hierbei wurden nur die Geschwindigkeiten zum neuen ($n+1$) und alten (n) Zeitschritt hervorgehoben, die restlichen Variablen werden zum neuen Zeitschritt berechnet.

Exemplarische Ergebnisse

Im Folgenden werden stellvertretend für das Gebiet der Deutschen Bucht Ergebnisse für den Küstenabschnitt zwischen Baltrum und Langeoog dargestellt. Es wird gezeigt, dass für eine feste Sohle plausible Geschwindigkeitsfelder, insbesondere auch in den Seegatten, mit dem Simulationssystem berechnet werden können. Anschliessend wird auf die mittel- und langfristige Sohlevolution und deren Naturähnlichkeit eingegangen.

Gezeiteninduzierte Strömungen

Exemplarische Strömungsgeschwindigkeiten sind in Abbildung 2 für das Gebiet um Baltrum und Langeoog dargestellt. Für die Berechnung wurden die in Tabelle 8-2 aufgelisteten Partialtiden verwendet. Bei Flut (Abbildung 8-14a) 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 Seegat. 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 8-14b) ergibt sich ein ähnliches Geschwindigkeitsfeld, nur in umgekehrter Strömungsrichtung. Außerdem ist zu erkennen, dass die Wassertiefe abnimmt und Teile der Wattfläche trockenfallen.



a) Exemplarische Ergebnisse für Geschwindigkeiten bei Flut

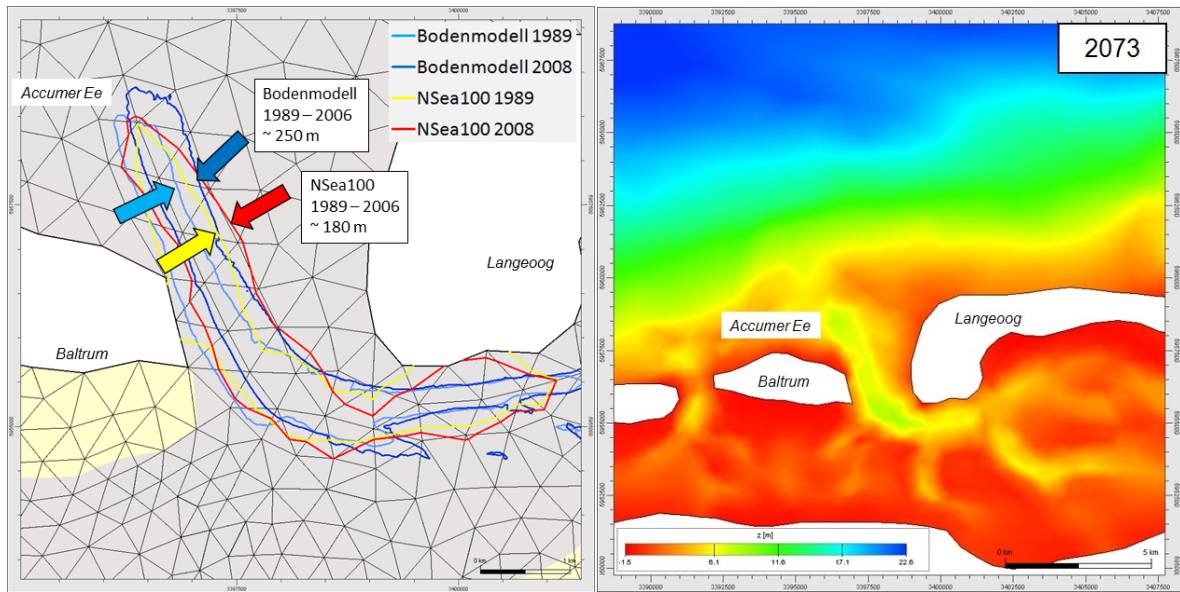
b) Exemplarische Ergebnisse für Geschwindigkeiten bei Ebbe

Abbildung 8-14: Exemplarische Ergebnisse für gezeiteninduzierte Geschwindigkeiten bei a) Flut und b) Ebbe

Tidegetriebene Sohlevolution von 1998 bis 2006

Einen Vergleich zwischen vom Bodenmodell abgeleiteter und simulierter Sohlentwicklung ist in Abbildung 8-15 dargestellt. Die Isolinien kennzeichnen die 8 m-Tiefenlinie. Die Daten des Bodenmodells zeigen eine West-Ost Wanderung der Accumer Ee. Im Zeitraum von 1989 bis 2006 hat sich die Rinne um etwa 250 m verlagert, ausgewertet an den mit Pfeilen gekennzeichneten Positionen. Das entspricht einer Geschwindigkeit von rund 14.7 m/a. Im

Gegensatz dazu prädiziert das numerische Modell eine etwas geringere Verlagerung von 180 m und eine Geschwindigkeit von rund 10.6 m/a.



a) Gemessene und simulierte Rinnenverlagerung von 1989 bis 2006

b) Simulierte Sohlage nach 67 Jahren

Abbildung 8-15: Tidegetriebene Entwicklung der Sohle im Gebiet um Baltrum und Langeoog

Langfristige Sohlevolution

In Abbildung 8-15b ist die simulierte Sohlentwicklung nach 67 Jahren dargestellt. Der Vergleich der Sohlenlagen von 2006 und 2073 zeigt, dass es Bereiche mit sehr unterschiedlicher tidegetriebener morphodynamischer Aktivität gibt. So verlagert sich die Accumer Ee weiter ostwärts und wird tiefer. 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 Sohlveränderung sehr gering. Allerdings sind stellenweise unplausible Sohlentwicklungen zu beobachten. In einigen Rinnen kommt es zu einem Verschluss des Querschnitts, z. B. in der Wichter Ee, die sich westlich an Baltrum anschließt, oder südlich des Langeooger Hafens, der sich im Süden des Westteils Langeoogs befindet.