

Langfristige Sedimentdynamik des Systems Tidebecken-Ebbdelta unter besonderer Berücksichtigung von verändertem Seegang und Wasserständen

Von THOMAS HIRSCHHÄUSER und ULRICH ZANKE

Zusammenfassung

Ziel des Forschungsvorhabens *Langfristige Sedimentdynamik des Systems Tidebecken-Ebbdelta unter besonderer Berücksichtigung von verändertem Seegang und Wasserständen* war es, die derzeitigen Möglichkeiten der morphodynamischen Modellierung des Systems Tidebecken-Ebbdelta aufzuzeigen.

Zentral sollte hierfür eine morphologische Matrix erstellt werden. Die morphologische Matrix setzt sich aus den morphodynamischen Wirkungen verschiedener Einzelereignisse zusammen. Durch Kombination und Wichtung dieser Einzelereignisse sollte eine bestmögliche Annäherung an einen natürlichen Referenzzustand erreicht werden.

Weitere Untersuchungsschwerpunkte lagen auf Sensitivitätsstudien bezüglich eines steigenden Meeresspiegels und eines veränderten Seegangs. Zusätzlich wurden die im System Tidebecken-Ebbdelta zurückgelegten Sedimenttransportpfade aufgezeigt.

Summary

The project long-term sediment-dynamics in tidal basins with special consideration of an increase of the mean sea-level and water level variations was carried out in order to demonstrate the present capabilities of morphodynamic models.

The main part was to develop a morphological matrix, which consists of the morphodynamic effects of different hydrodynamic conditions. By combining and weighting these situations a best-possible agreement with a reference condition was to be fulfilled.

Furthermore, the morphodynamic effect of an increase of the mean sea level and wave conditions was investigated, and the transport paths of sediment within the tidal basin were pointed out.

Keywords

Morphodynamische Modellierung, morphologische Matrix, Sensitivitätsanalyse, Referenzzustand, Langzeitprognose, Schwebstoffe, Sedimenttransportpfade, Kornverteilung, Nordsee

Morphodynamic modelling, morphological matrix, sensitivity analysis, reference conditions, long-term prognosis, suspended sediment, sediment transport paths, grain distribution, North Sea

Inhalt

1. Einleitung	202
2. Morphologische Matrix	203
2.1 Projektgebiet Dithmarscher Bucht	203
2.2 Ermittlung des Referenzzustandes	204
2.3 Ermittlung der sedimentologischen Randbedingung	207

2.4 Erstellung der morphologischen Matrix	207
2.4.1 Rechnungen mit der Variation der ins Gebiet strömenden Feinstschwebstoffe	209
2.4.2 Rechnungen mit parametrisierter Sekundärströmung	210
2.4.3 Rechnungen mit Variation des Seegangs	211
2.5 Prognosezeitraum	216
3. Sensitivitätsstudien mit verändertem Seegang und Wasserstand	218
3.1 Anstieg des mittleren Meeresspiegels	218
3.2 Veränderter Seegang	218
3.3 Kombination aus Meeresspiegelanstieg und verändertem Seegang	222
4. Alternative Berücksichtigung der Seegangswirkung	223
5. Sedimenttransportpfade	224
5.1 Akkumulation von feinkörnigem Sediment im Hörnumbecken	224
5.1.1 Untersuchungsgebiet	225
5.1.2 Sedimentbedarf im Hörnumbecken bei steigendem Meeresspiegel	226
5.1.3 Modellierung der Akkumulation von feinkörnigem Material im Hörnumbecken	228
5.1.4 Bestimmung der akkumulationsrelevanten Konzentration unter verschiedenen hydrodynamischen Bedingungen	236
5.2 Sedimenttransportpfade Hörnumbecken unter Tidebedingungen	238
5.3 Identifikation verschiedener Kornverteilungstypen	240
6. Zusammenfassung	246
7. Danksagung	247
8. Schrifttum	247

1. Einleitung

Die Beschreibung der großräumigen Sedimentdynamik und der steigende Prognosezeitraum lassen die Anforderungen an den Betrieb eines morphodynamischen Modells wachsen. Die Qualität der von einem morphodynamischen Modell zu erwartenden Ergebnisse hängt für längere Zeiträume vor allem von drei Faktoren ab, die möglichst vollständig erfasst und mit teilweise erweiterten Methoden beschrieben werden müssen und somit zentrale Forschungsaufgaben darstellen:

- Sedimentströme am offenen Rand
- Seegangsbedingter Transport
- Auswahl und Bestimmung der zu berücksichtigenden Ereignisse.

Repräsentative Ereignisse ergeben bei einer entsprechenden Wichtung dieselben Morphologieänderungen wie die Gesamtheit der in der Natur auftretenden Ereignisse. Hierzu wird eine morphologische Matrix mit den Morphologieänderungen verschiedener Einzelereignisse erstellt. Durch Kombination und Wichtung der Einzelereignisse werden repräsentative Ereignisse gefunden, die möglichst nahe an die Morphologieänderungen eines Referenzzustandes kommen.

Die Erstellung einer morphologischen Matrix bietet gegenüber bisher angewandten Verfahren der Eingabefilterung den Vorteil, dass die Auswahl der zu berücksichtigenden Ereignisse nicht auf der Basis von Häufigkeiten auftretender hydrodynamischer Situationen (DE VRIEND et al., 1993) sondern von zu erwartenden Morphologieänderungen getroffen wird und somit aus morphologischer Sicht die bestmögliche Annäherung an die Natur erreicht wird.

Darüber hinaus sollten Aussagen zur morphologischen Entwicklung bei verändertem Seegang und Wasserständen erarbeitet und im System Tidebecken-Ebbdelta zurückgelegte Sedimenttransportpfade aufgezeigt werden.

Zur Anwendung kam das mit dem spektralen Seegangmodell SWAN (RIS, 1997) gekoppelte morphodynamische Modell TIMOR (ZANKE, 1995; HIRSCHHÄUSER u. ZANKE, 2001).

2. Morphologische Matrix

Eines der Hauptziele des Forschungsvorhabens war die morphodynamische Modellierung unter Anwendung einer morphologischen Matrix.

Die Beschränkung auf eine bestimmte Anzahl Ereignisse, die sogenannte Eingabefilterung (Input-Filtering), ist unerlässlich, da es aus rechenzeittechnischen Gründen derzeit noch nicht möglich ist, alle in der Natur auftretenden Ereignisse zu berücksichtigen. Die Auswahl ist allerdings sehr komplex, weil einzelne Ereignisse in gegensätzlicher Weise zueinander wirken können. Beispielsweise wird durch Tidebeeinflussung Material aus den Rinnen auf die Wattflächen verlagert, wohingegen einzelne Seegangereignisse Material von den Wattflächen in die Rinnen verlagern. Daher muss das Gewicht einzelner Ereignisse im Hinblick auf den langfristigen Gesamteffekt gewahrt bleiben. Die Auswahl solcher Ereignisse muss sehr sorgfältig durchgeführt werden, weil das Ergebnis durch die Vorgabe der zu berücksichtigenden Ereignisse beeinflusst werden kann. Daher stellt sie einen wesentlichen Schritt bei der Erstellung von Langfristprognosen dar. Bei der Auswahl der Ereignisse für Langfristprognosen wird das folgende Konzept der morphologischen Matrix angewandt werden:

Repräsentative Ereignisse ergeben bei einer entsprechenden Wichtung dieselben Morphologieänderungen wie die Gesamtheit der in der Natur auftretenden Ereignisse. Hierzu wird eine morphologische Matrix mit den Morphologieänderungen verschiedener Einzelereignisse erstellt. Durch Kombination und Wichtung der Einzelereignisse werden repräsentative Ereignisse gefunden, die möglichst nahe an die Morphologieänderungen eines Referenzzustandes kommen. Hierzu werden alle in einem bestimmten Zeitraum auftretenden Ereignisse hinsichtlich Windrichtung und -stärke klassifiziert. Für alle klassifizierten Ereignisse werden dann morphodynamische Rechnungen durchgeführt und die Morphologieänderungen der einzelnen Rechnungen entsprechend ihrer Auftretenswahrscheinlichkeit gewichtet und anschließend linear superponiert. Als repräsentativ werden nun diejenigen Kombinationen von Einzelereignissen, die unter Einhaltung einer Fehlertoleranz die beste Näherung an den Referenzzustand erzeugen, aufgefasst. Daher liegt auch allen berechneten Einzelereignissen die gleiche Ausgangstopographie zugrunde.

Ein optimaler Referenzzustand muss für das Untersuchungsgebiet Dithmarscher Bucht zunächst gefunden werden.

Die Erstellung einer morphologischen Matrix bietet gegenüber bisher angewandten Verfahren der Eingabefilterung den Vorteil, dass die Auswahl der zu berücksichtigenden Ereignisse auf der Basis von zu erwartenden Morphologieänderungen getroffen wird und somit aus morphologischer Sicht die bestmögliche Annäherung an die Natur erreicht wird.

2.1 Projektgebiet Dithmarscher Bucht

Das Projektgebiet Dithmarscher Bucht ist in seiner Lage innerhalb der Deutschen Bucht in Abb. 2.1 dargestellt. Das Gebiet schließt sich nördlich an die Mündung der Elbe an. Im Zuge des Generalplans Deichverstärkung, Deichverkürzung und Küstenschutz in Schleswig-Holstein wurden insgesamt 34 km² in zwei Teilabschnitten abgedeicht: 1972 wurden 11,5 km² im Südosten der Bucht aus dem Einzugsgebiet des Sommerkoog-Steertlochs abgedeicht. 1978 kamen noch 22,5 km² aus dem Einzugsgebiet der Priele Wöhrdener Loch und Kronenloch hinzu.

Der Tidehub am Pegel Büsum beträgt 3,30 m.

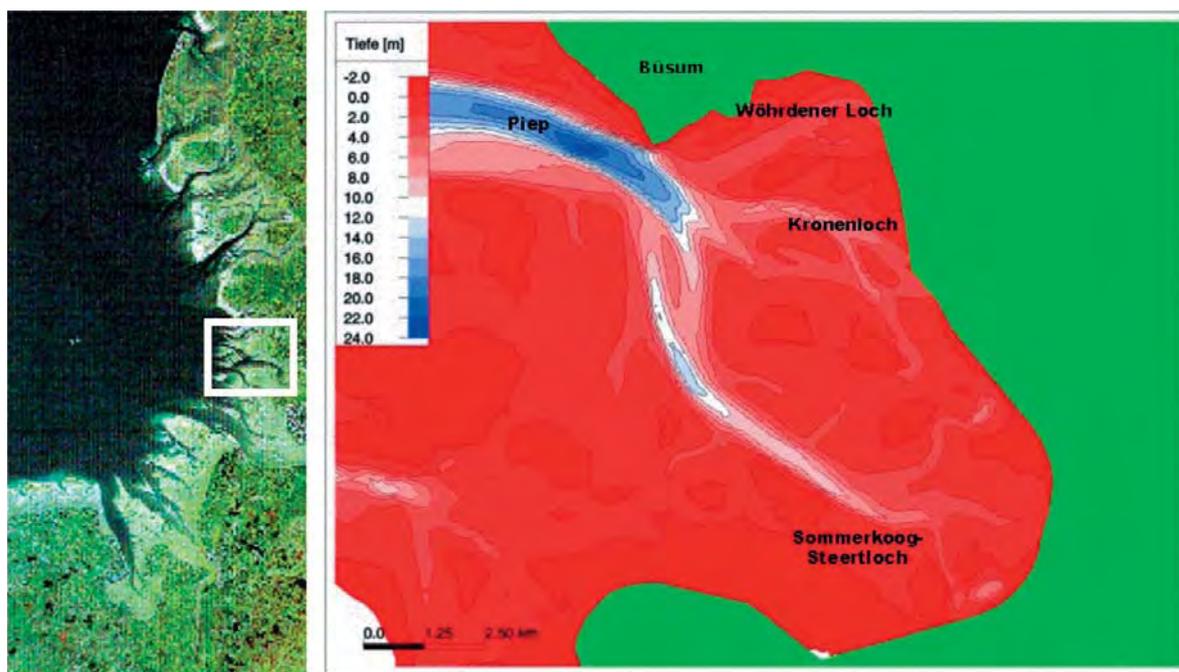


Abb. 2.1: Lage des Projektgebiets Dithmarscher Bucht

2.2 Ermittlung des Referenzzustandes

Zunächst muss ein Referenzzustand ermittelt werden, mit dem die Modellierungsergebnisse verglichen werden. Dieser sollte sich möglichst gut dazu eignen, das morphodynamische Modell zu kalibrieren. Die Analyse der Tiefendifferenzen zeigte, dass die Zustände bis 1979 aus verschiedenen Gründen als Referenzzustände ungeeignet sind. Es stellte sich heraus, dass der Datensatz von 1976 offensichtlich fehlerhaft beschickt wurde. Zwischen 1973 und 1976 wurde demnach in allen Tiefenschichten Material erodiert (vgl. Abb. 2.3). Dies erscheint auch vor dem Hintergrund der Fertigstellung des ersten Dammschnittes 1972 unglaublich. 1979 ist das Material in etwa denselben Tiefenschichten wieder vorhanden. Dies deutet darauf hin, dass der Datensatz von 1976 zu tief eingemessen bzw. fehlerhaft beschickt wurde.

Diese Inkonsistenz ist aus Abb. 2.2 oben rechts klar zu erkennen. Weiterhin sind Tiefendifferenzen, in deren Zeitraum ein Teil des Damms fertig gestellt wurde, ungeeignet, da sich nicht eindeutig zwischen natürlichen und bauwerksinduzierten morphologischen Veränderungen unterscheiden lässt.

Die Tiefendifferenzen nach 1979 eignen sich als Referenzzustände. Sie sind in Abb. 2.2 dargestellt. Schlussendlich wurde der Zustand von 1979–1982 gewählt, weil in diesen Zeitraum die morphologische Initialanpassung an den zweiten Dammschnitt fällt und sich außerdem ein möglichst langer Differenzzeitraum erzeugen lässt, so dass Aussagen über den möglichen Prognosezeitraum eines 2D-morphodynamischen Modells gemacht werden können.

Für alle Tiefendifferenzen wurde das Umlagerungsvolumen pro m Tiefenschicht bestimmt und in Abb. 2.3 für den Zeitraum 1969–1979 und in Abb. 2.4 für den Zeitraum 1979–1990 dargestellt. Diese Darstellung ermöglicht eine Interpretation, in welchen Tiefenschichten Material umgelagert wurde. Beispielsweise lässt sich erkennen, dass die morpho-

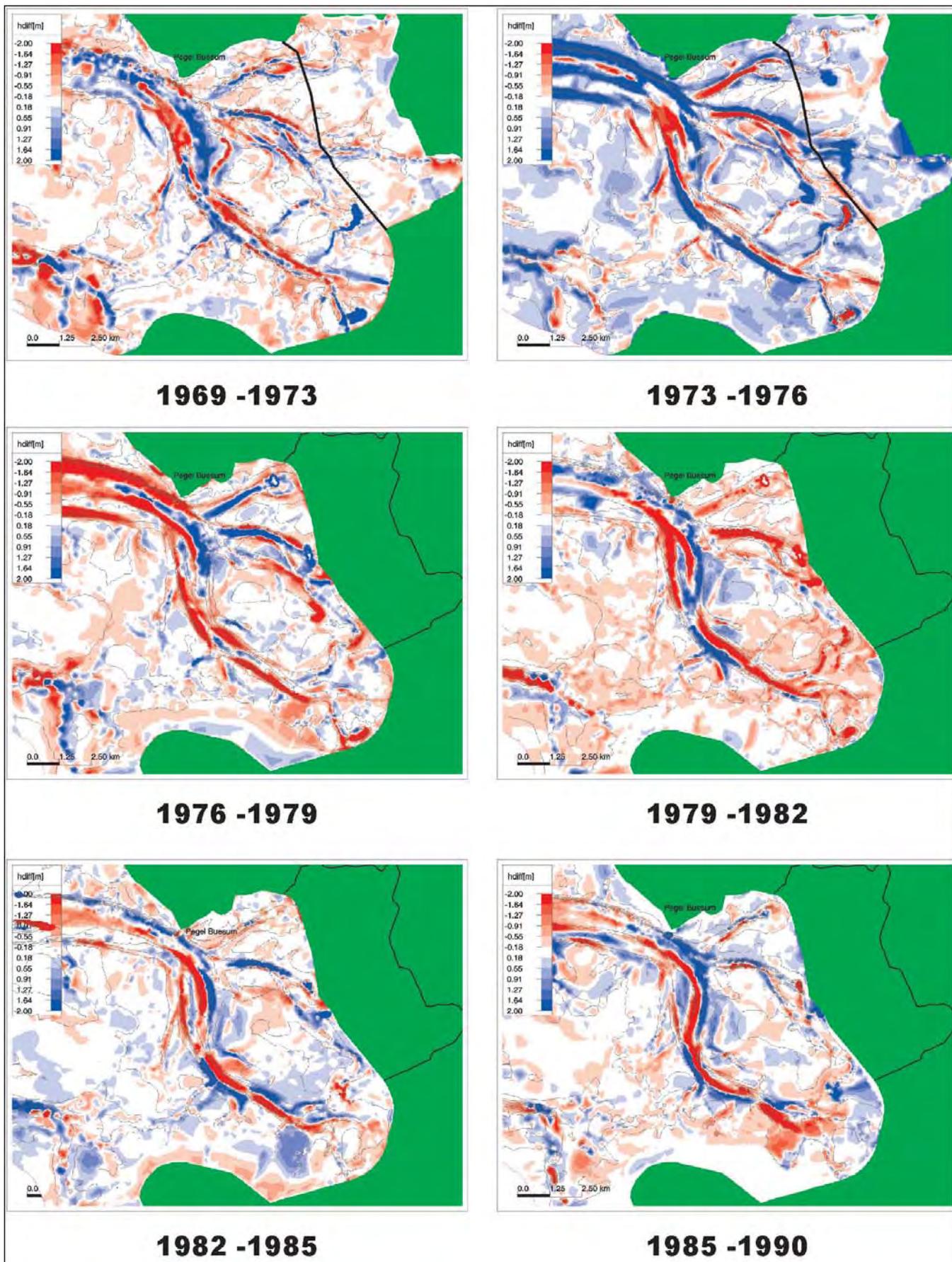


Abb. 2.2: Gemessene Tiefendifferenzen für unterschiedliche Zeiträume (blau: Erosion)

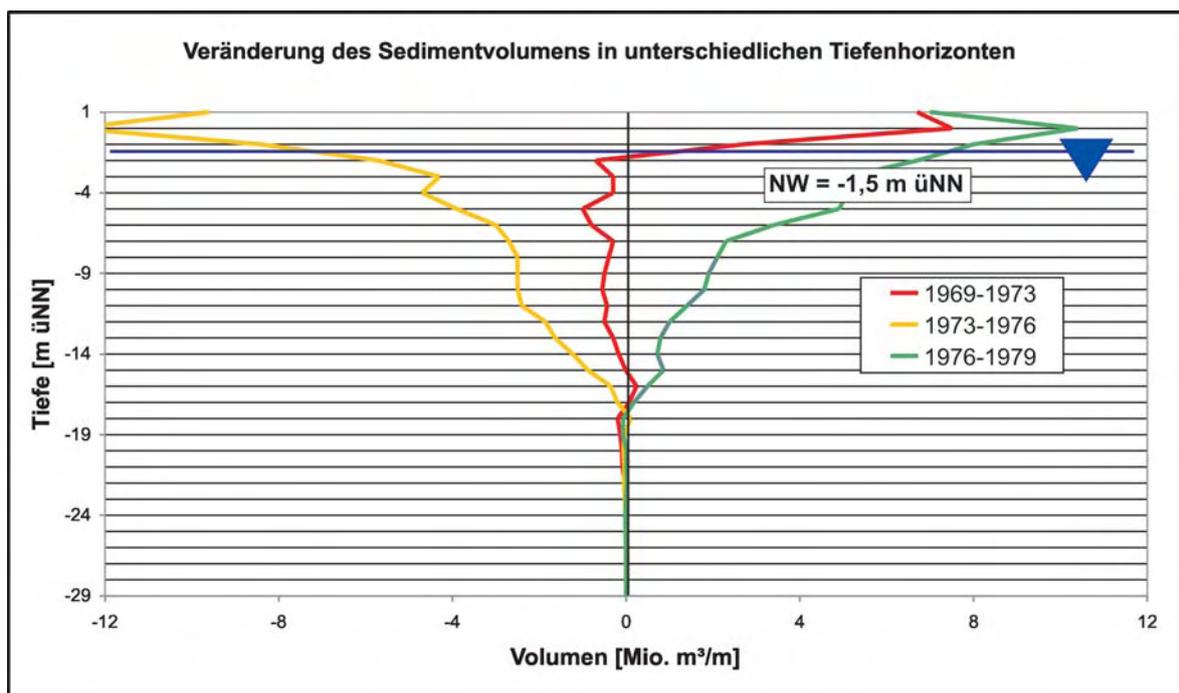


Abb. 2.3: Umgelagertes Sedimentvolumen pro m Tiefenschicht 1969–1979

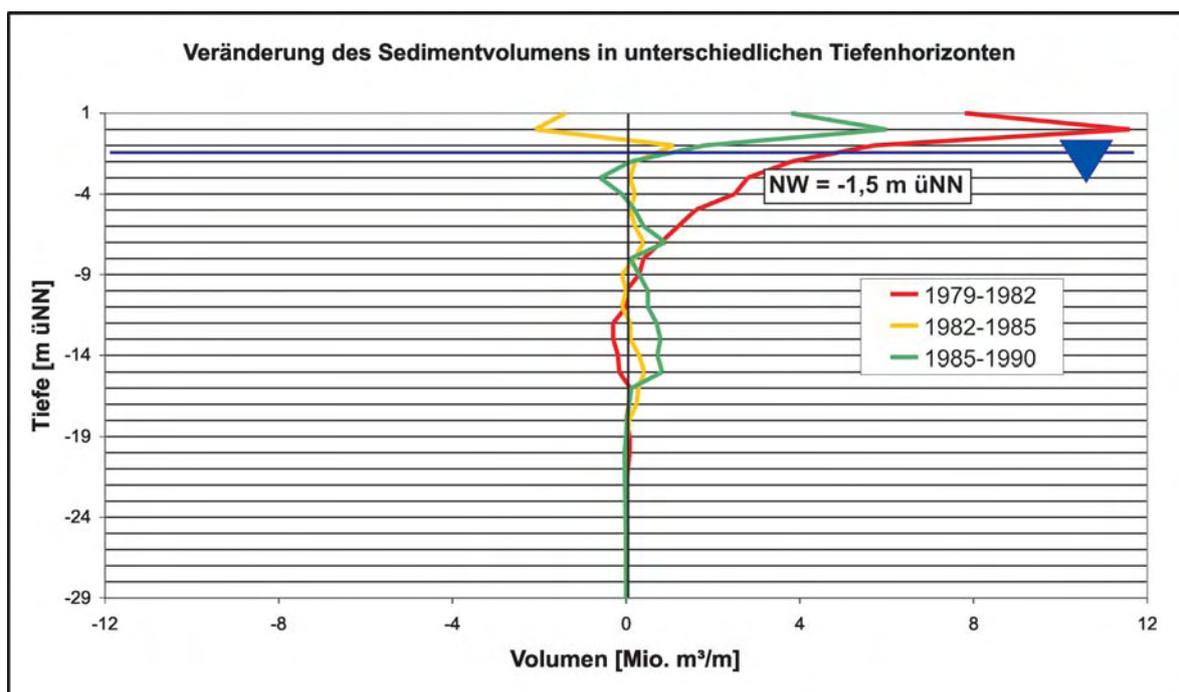


Abb. 2.4: Umgelagertes Sedimentvolumen pro m Tiefenschicht 1979–1990

logische Entwicklung zwischen 1979 und 1990 keineswegs einheitlich verlief. So findet zwischen 1979 und 1982 eine ausgeprägte Initialanpassung an das veränderte Tidebecken statt. Vor allem auf den Wattflächen, aber auch in den Rinnenbereichen bis 10 m kommt es zu Sedimentationen. Dieses Material wird größtenteils über die Gebietsgrenzen, wahrscheinlich als feinkörniger Schwebstoff, in das Modellgebiet eingetragen. Nur ein kleiner Teil des sedimentierenden Materials stammt aus den tieferen Rinnenbereichen.

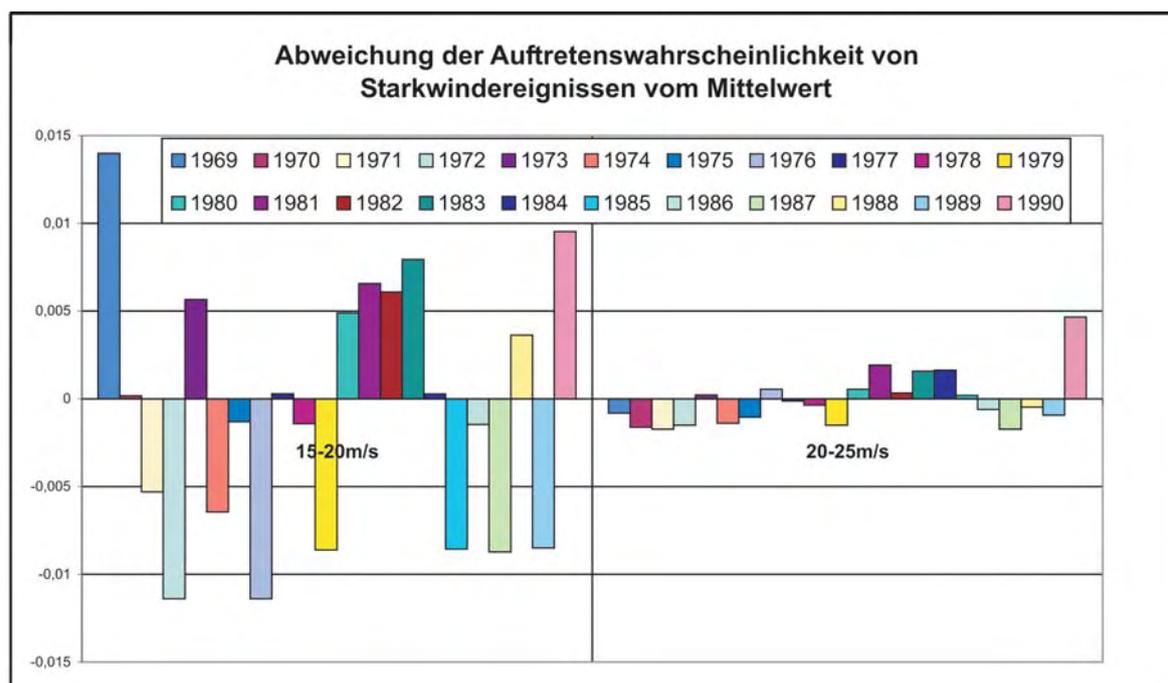


Abb. 2.5: Abweichung der Auftretenswahrscheinlichkeit von Starkwindereignissen vom Durchschnittsjahr

Von 1982 bis 1985 kommt es zu Erosionen auf den Wattflächen. Das Material wird in den Rinnenbereichen abgelagert, wo es zwischengespeichert und von dort zwischen 1985 und 1990 wieder auf die Wattflächen verlagert wird. Die zwischenzeitliche Verlagerung von Material von den Wattflächen in die Rinnen dürfte mit einer erhöhten Seegangsbelastung in diesem Zeitraum erklärt werden können. Aus Abb. 2.5 ist zu entnehmen, dass der Anteil an Starkwindereignissen in diesem Zeitraum deutlich über dem langjährigen Mittel lag.

2.3 Ermittlung der sedimentologischen Randbedingung

Für das Untersuchungsgebiet wurde eine globale Sedimentbilanz von einem Vermessungszeitpunkt zum jeweils nächsten erstellt. Hiermit sollte ermittelt werden, wieviel Material von außerhalb der Gebietsgrenzen in das Modellgebiet einströmt beziehungsweise es verlässt. Die ermittelten Volumina können einen Hinweis darauf geben, in welchem Maß Sediment in Suspension ins Untersuchungsgebiet einströmt, welches bei der morphodynamischen Modellierung berücksichtigt werden muss. Bei der Darstellung in Abb. 2.6 ist darauf zu achten, dass die Volumina auf die Gebietsgrenzen des jeweils späteren Datensatzes bezogen sind. Somit ist das Gebiet hinter dem zweiten Dammschnitt, der 1978 fertiggestellt wurde, in den ersten beiden Bilanzen noch vorhanden. Aus Abb. 2.6 ist die starke Sedimentation nach 1979 zu entnehmen.

2.4 Erstellung der morphologischen Matrix

Eines der Hauptziele des Forschungsvorhabens war es, die morphologische Entwicklung des Systems Tidebecken-Ebbdelta durch Anwendung einer morphologischen Matrix zu prognostizieren. Die morphologische Matrix setzt sich aus den Morphologieänderungen von Einzelereignissen zusammen, die miteinander kombiniert und gewichtet eine bestmögliche

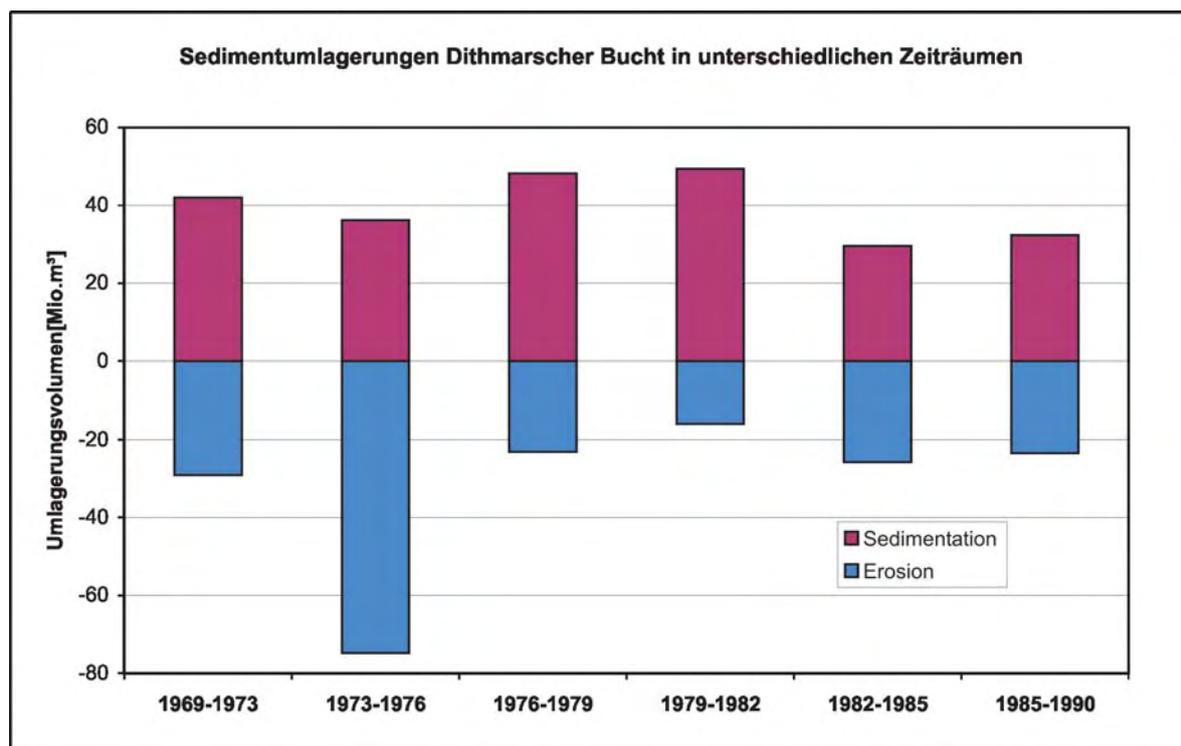


Abb. 2.6: Globale Sedimentbilanz Dithmarscher Bucht

Annäherung an den Referenzzustand erbringen sollen. Ereignisse die für die morphologische Entwicklung des Gebietes von besonders starker Bedeutung sind, können somit an einem hohen Wichtigkeitsfaktor erkannt werden.

Um einen ersten Überblick zu bekommen, welche hydrodynamischen Situationen welche Morphologieänderungen hervorrufen, werden Rechnungen mit Variation einzelner Parameter vorgestellt:

- Rechnungen mit Variation der ins Gebiet strömenden Feinstschwebstoffe.
- Rechnungen mit Variation der Tiderandbedingung: Leichtere Variationen in der Tiderandbedingung blieben ohne nennenswerte Auswirkungen auf die Morphodynamik. Erst bei höherem Windstau zeigten sich signifikante Unterschiede. Daher wird dieser Punkt unter Rechnungen mit Variation des Seegangs berücksichtigt, da erhöhter Windstau immer mit stärkerem Seegang verbunden ist.
- Rechnungen mit Berücksichtigung parametrisierter Sekundärströmungen: Die Rinnen in der Dithmarscher Bucht weisen eine starke Tendenz zur Mäandrierung auf. Die Mäanderbildung ist stark von Sekundärströmungen geprägt, die in einem tiefengemittelten 2D-Modell nicht berücksichtigt werden. Um die offensichtlich vorhandene Wirkung zu berücksichtigen, wurde dieser Effekt parametrisiert in das morphodynamische Modell TIMOR integriert.
- Rechnungen mit Variation des Seegangs: Die auftretenden Situationen werden in acht Richtungs- und fünf Geschwindigkeitsklassen aufgeteilt. Für die stärkeren Windsituationen ab 10 m/s wurde eine Wind-/Windstaukorrelation für den Pegel Blauort erstellt und diese bei der Vorgabe der Wasserstandsrandbedingung berücksichtigt.

Die Rechnungen mit Seegang wurden jeweils über einen Zeitraum ausgeführt, die dem Auftretenszeitraum dieser Situationen in dem Zeitraum 1979–1982 entspricht. Der Simulationszeitraum der anderen Rechnungen betrug 3 Jahre.

2.4.1 Rechnungen mit Variation der ins Gebiet strömenden Feinstschwebstoffe

Es wurde im Rahmen der Konzeption des Forschungsvorhabens als wesentlich angesehen, die sedimentologische Randbedingung für Langfristberechnungen adäquat wiederzugeben. Zusammen mit der in Kapitel 2.3 erstellten globalen Sedimentbilanz wurden Sensitivitätsrechnungen bezüglich des Eintrags von Schwebstoffen über den offenen Rand gemacht. Diese wurden unter reinen Tidebedingungen für den Zeitraum von 1979–1982 durchgeführt. Beste Übereinstimmung ergab sich für einen Schwebstoffeintrag von 60 mg/l. Dieser wurde für alle weiteren Rechnungen angesetzt.

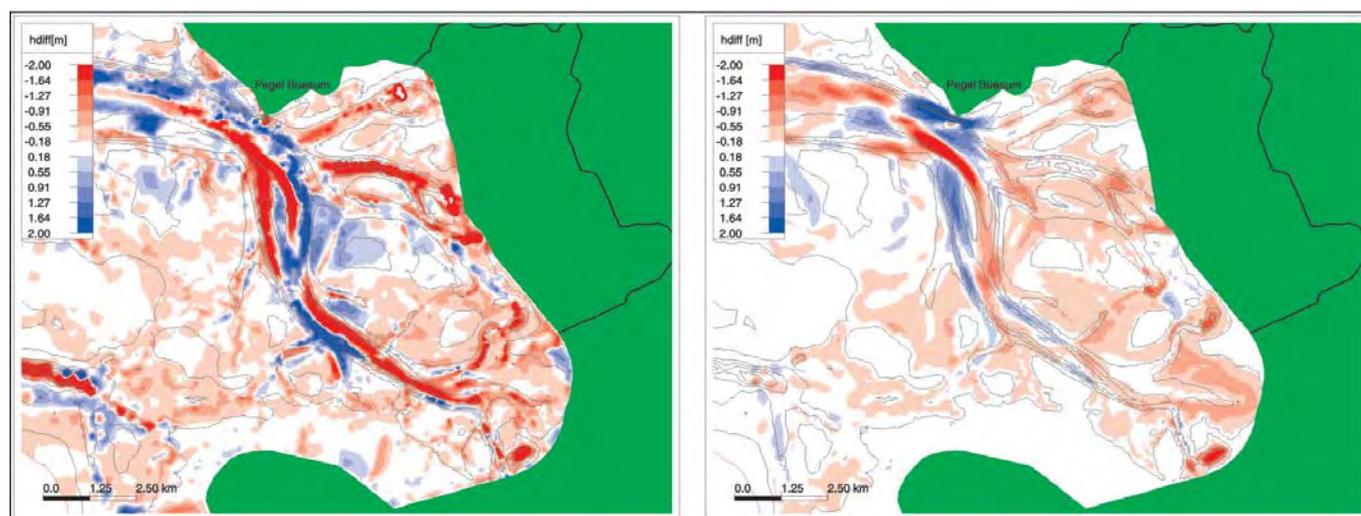


Abb. 2.7: Links: Gemessene Tiefenänderungen 1979–1982; rechts: Berechnete Tiefenänderungen 1979–1982 (blau: Erosion); Schwebstoffeintrag über offenen Rand 60 mg/l

Vergleicht man die Berechnungsergebnisse des morphodynamischen Modells TIMOR mit den gemessenen Tiefenänderungen in Abb. 2.7, so erkennt man, dass das morphodynamische Modell TIMOR die Morphologieänderungen für den betrachteten 3-Jahreszeitraum sowohl von der Tendenz als auch von der Quantität in weiten Bereichen zufriedenstellend wiedergibt, wenn der Schwebstoffeintrag am offenen Rand 60 mg/l beträgt. Die Lage und Quantität der flächenhaften Sedimentationen, die als Anpassung des Gebietes an die verkleinerte Wateinzugsgebietsfläche interpretiert werden müssen, können gut wiedergegeben werden. Die Auffüllung der durch den Dammbau entstandenen Baggerlöcher im südöstlichen Teil wird von der Quantität her gut wiedergegeben. Die morphologische Anpassung in den Endbereichen der Rinnen wird zwar in der Tendenz wiedergegeben, jedoch in einem weit geringeren Umfang als in der Natur. Hier dürfte u. a. die Vernachlässigung des Seegangs eine Rolle spielen, der Material von den Wattflächen erodiert, welches dann in den Rinnen angelagert wird. Eine sich ausbildende Verbindung zwischen Sommerkoog-Steertloch und Kronenloch in der Nähe des neuen Deichs wird vom Modell in der Tendenz wiedergegeben. Sie dürfte eine Reaktion auf die Verkleinerung der Tidebeckenfläche sein.

Die Mäandrierung der Piep südlich Büsums kann nur in Teilen wiedergegeben werden, was auch auf die im Modell nicht berücksichtigten Sekundärströmungserscheinungen zurückzuführen sein dürfte. In einer weiteren Stufe wurden daher quasi 3D-Effekte in das Modell einbezogen, worauf später eingegangen wird.

Der Erosionsbereich auf der Wattfläche zwischen Kronenloch und Sommerkoog-Steertloch kann aufgrund seiner Seegangsexposition nicht wiedergegeben werden. Der Seegang wirkt vor allem in der Gestalt, dass er Material von den Rinnenufern und den Wattflächen erodiert und dieses Material in den Rinnen abgelagert wird. Die Tideströmung hingegen transportiert das Material aus den Rinnen auf die Wattflächen.

Auch die Sedimentation in dem östlich an den Bielshovensand anschließenden Ebbast der Piep kann nicht wiedergegeben werden.

Der globalen Sedimentbilanz war zu entnehmen, dass ein erheblicher Teil des sedimentierenden Volumens über die Gebietsgrenzen ins Untersuchungsgebiet strömt, so dass zu erwarten war, dass die sedimentologische Randbedingung sehr sensitiv ist.

2.4.2 Rechnungen mit parametrisierter Sekundärströmung

Um die Mäandrierungserscheinungen in den Haupttrinnen der Dithmarscher Bucht im tiefengemittelten morphodynamischen Modell besser wiedergeben zu können, wird ein Ansatz zur Berücksichtigung von Sekundärströmungen und deren Einfluss auf den Sedimenttransport in das morphodynamische Modell integriert. Hierbei wird überall dort, wo eine Schiefstellung der Wasseroberfläche existiert, eine für den Sedimenttransport relevante sohlnahe Rückströmung angesetzt, die der Wasserspiegelauslenkung proportional ist.

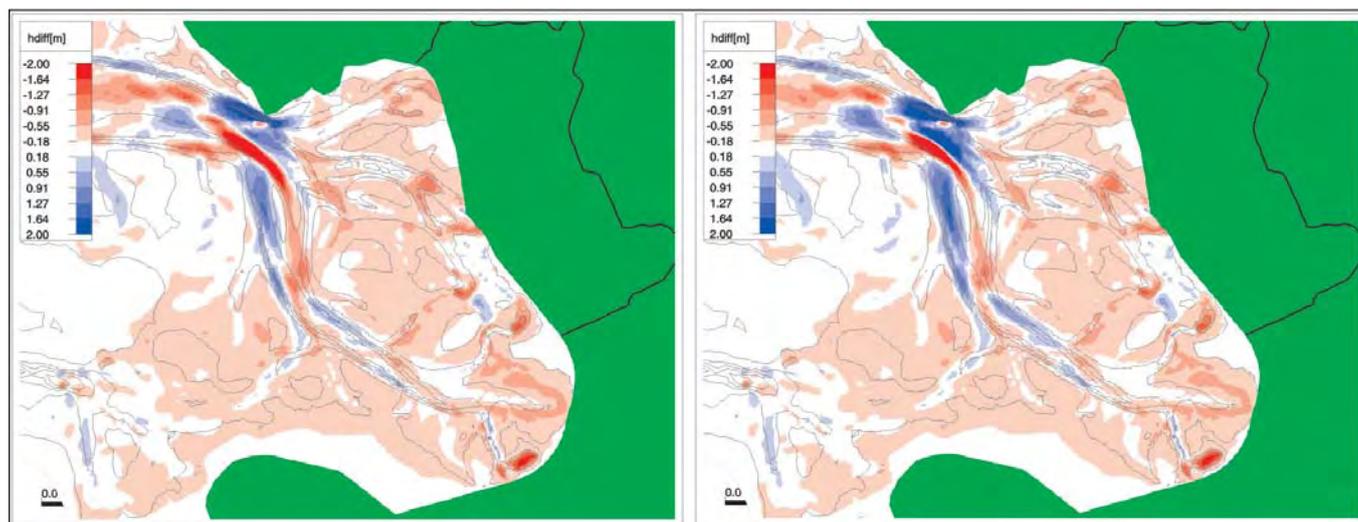


Abb. 2.8: Links: Berechnete Tiefenänderungen 1979–1982 ohne parametrisierte Sekundärströmung; rechts: Berechnete Tiefenänderungen 1979–1982 mit parametrisierter Sekundärströmung

Ergebnisse mit Integration dieses Effektes sind vergleichend in Abb. 2.8 dargestellt. Man erkennt, dass die Erosionserscheinungen an den Außenkurven leicht verstärkt sind. Die in der Natur anzutreffende Sedimentation im östlich an den Bielshovensand angrenzenden Ebbast der Piep konnte allerdings durch diesen Effekt nicht wiedergegeben werden. Der Effekt wurde in allen weiteren Rechnungen mit Berücksichtigung des Seegangs integriert.

2.4.3 Rechnungen mit Variation des Seegangs

Im Folgenden werden Rechnungen mit Berücksichtigung des Seegangs vorgestellt. Diese gehen als Einzelereignisse in die morphologische Matrix ein. Die morphologische Matrix verwendet im Gegensatz zu bisher eingesetzten Verfahren der Eingabefilterung zu erwartende Morphologieänderungen als Grundlage zur Auswahl repräsentativer Ereignisse. Hierzu wurden die an der Windmessstation Büsum gemessenen Windgeschwindigkeiten und -richtungen in acht Richtungs- und fünf Geschwindigkeitsklassen eingeteilt. Dies ist in Tab. 2.1 dargestellt.

Tab. 2.1: Mittlere Auftretenswahrscheinlichkeit verschiedener Windsituationen an der Windmessstation Büsum von 1967–2001

	0–5 m/s	5–10 m/s	10–15 m/s	15–20 m/s	20–25 m/s
N	6,36 %	2,77 %	0,22 %	0,01 %	0,00 %
NO	4,96 %	2,92 %	0,33 %	0,02 %	0,00 %
O	4,97 %	6,95 %	1,50 %	0,08 %	0,00 %
SO	3,56 %	5,51 %	1,05 %	0,04 %	0,00 %
S	3,29 %	6,03 %	2,02 %	0,20 %	0,01 %
SW	2,55 %	7,05 %	5,31 %	0,84 %	0,06 %
W	3,63 %	7,88 %	5,06 %	0,99 %	0,09 %
NW	3,70 %	6,64 %	2,85 %	0,42 %	0,02 %

Die morphodynamischen Rechnungen werden für die aufgeführten Windsituationen jeweils für die Dauer durchgeführt, in der diese Situationen von Juli 1979–Juli 1982 aufgetreten sind. Diese Häufigkeit kann von der über den Zeitraum 1967–2001 gemittelten Häufigkeit abweichen.

Für Rechnungen mit einer Windgeschwindigkeit von mehr als 10 m/s wurde ein zusätzlicher Windstau bzw. -sunk am offenen Rand (Pegel Blauort) angesetzt. In Voruntersuchungen hatte sich gezeigt, dass der Wasserstand erheblichen Einfluss auf den sich ausbildenden Seegang und damit die Sohlbelastung hat und deshalb berücksichtigt werden sollte. Er wurde über eine Wind-/Windstaukorrelation am Pegel Blauort ermittelt und ist in den nachfolgenden Abbildungen vermerkt.

Für Ereignisse der Windgeschwindigkeitsklasse 7,5 m/s stellen sich für alle Windrichtungen ähnliche Verteilungsmuster von Sedimentation und Erosion ein (vgl. Abb. 2.9), die hauptsächlich in ihrer Stärke variieren, die wiederum stark abhängig von dem Berechnungszeitraum ist. Für Ereignisse der Windgeschwindigkeitsklasse 12,5 m/s (Abb. 2.10) stellt sich das anders dar, da hier neben der Berechnungszeit auch die hydrodynamischen Randbedingungen mit unterschiedlichen mittleren Wasserständen und Tidehuben variieren. Bei Starkwindereignissen der Windgeschwindigkeitsklasse 17,5 m/s (Abb. 2.11) wird durch den stärkeren Seegang besonders an den Rinnenrändern Material erodiert. Dieses wird hauptsächlich in die Rinnen verlagert.

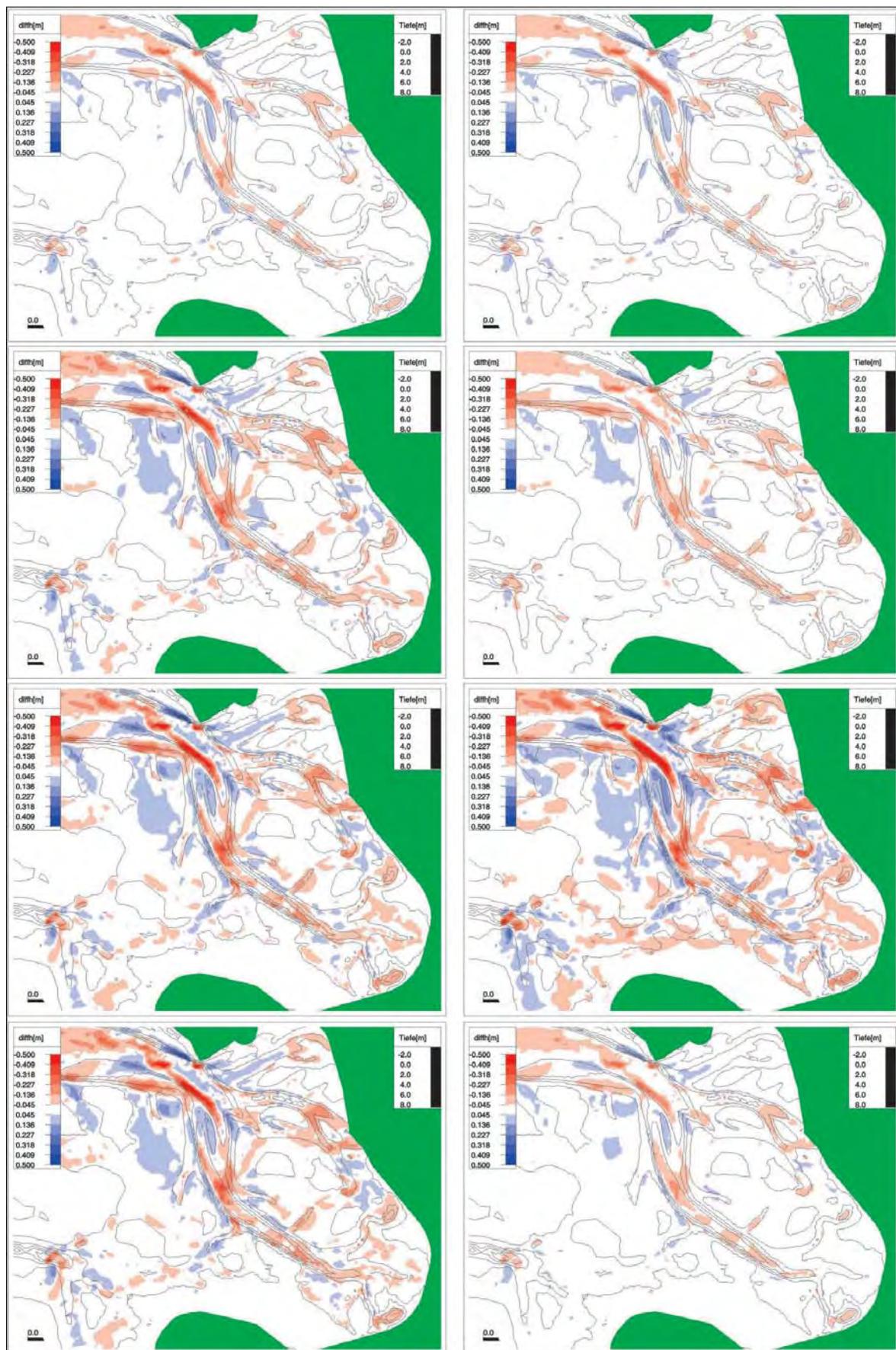


Abb. 2.9: Einzelereignisse morphologische Matrix. Von oben nach unten: links NO 7,5 m/s (58,3 Tiden), SO 7,5 m/s (146,4 Tiden), SW 7,5 m/s (127,0 Tiden), NW 7,5 m/s (165,9 Tiden); rechts: O 7,5 m/s (61,5 Tiden), S 7,5 m/s (116,0 Tiden), W 7,5 m/s (148,5 Tiden), N 7,5 m/s (139,8 Tiden). Rot: Sedimentation

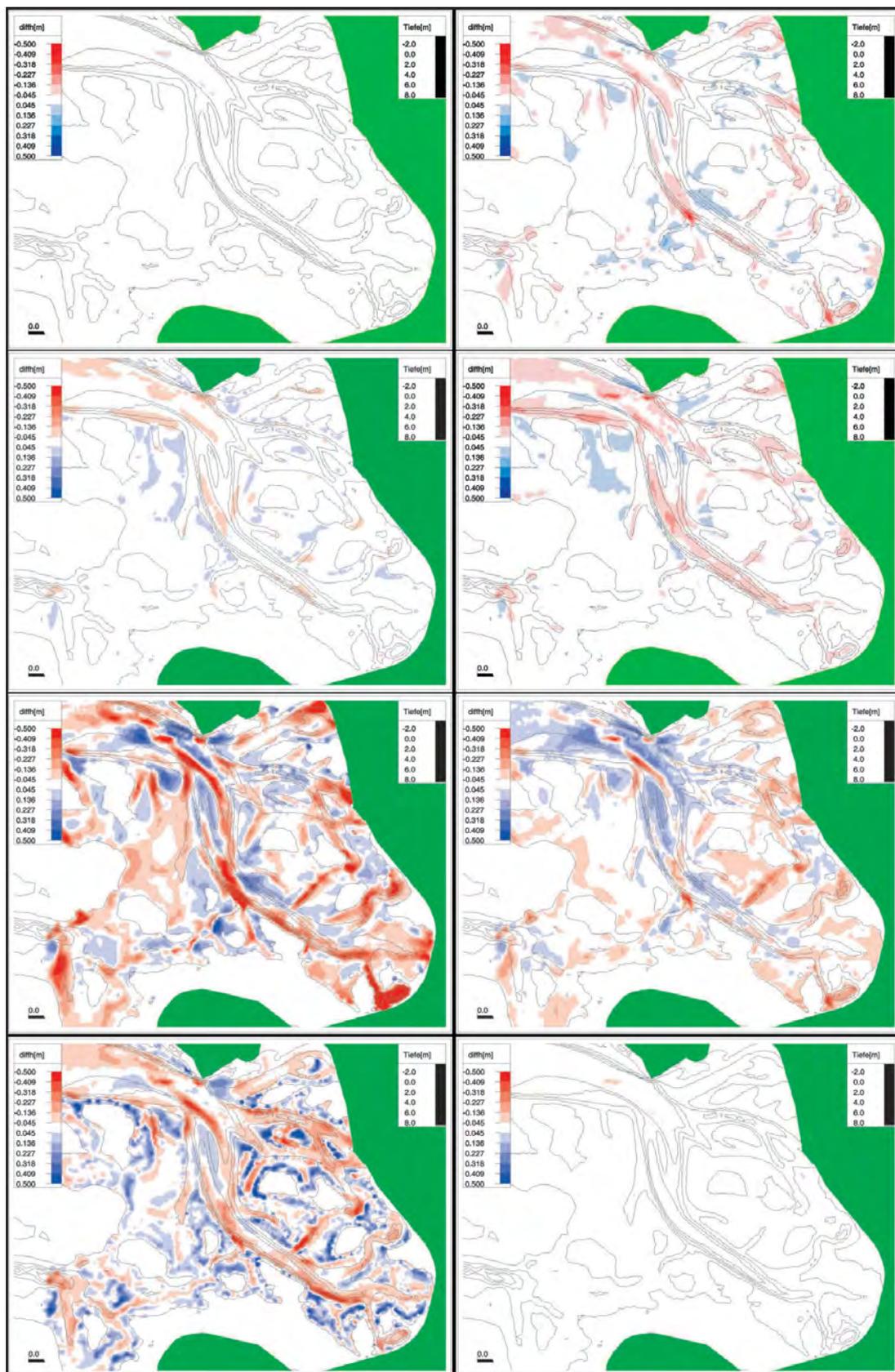


Abb. 2.10: Einzelereignisse morphologische Matrix. Von oben nach unten: Links NO 12,5 m/s (6,9 Tiden, WST -0,47 m, Thb \times 1,03), SO 12,5 m/s (22,1 Tiden, WST -0,41 m, Thb \times 0,99), SW 12,5 m/s (111,8 Tiden, WST +0,3 m, Thb \times 1,03), NW 12,5 m/s (107,0 Tiden, WST +0,22 m, Thb \times 1,0); rechts: O 12,5 m/s (31,6 Tiden, WST -0,64 m, Thb \times 1,0), S 12,5 m/s (42,5 Tiden, WST +0,28 m, Thb \times 1,05), W 12,5 m/s (107,0 Tiden, WST +0,27 m, Thb \times 1,0), N 12,5 m/s (4,6 Tiden, WST +0,28 m, Thb \times 1,0).

Rot: Sedimentation

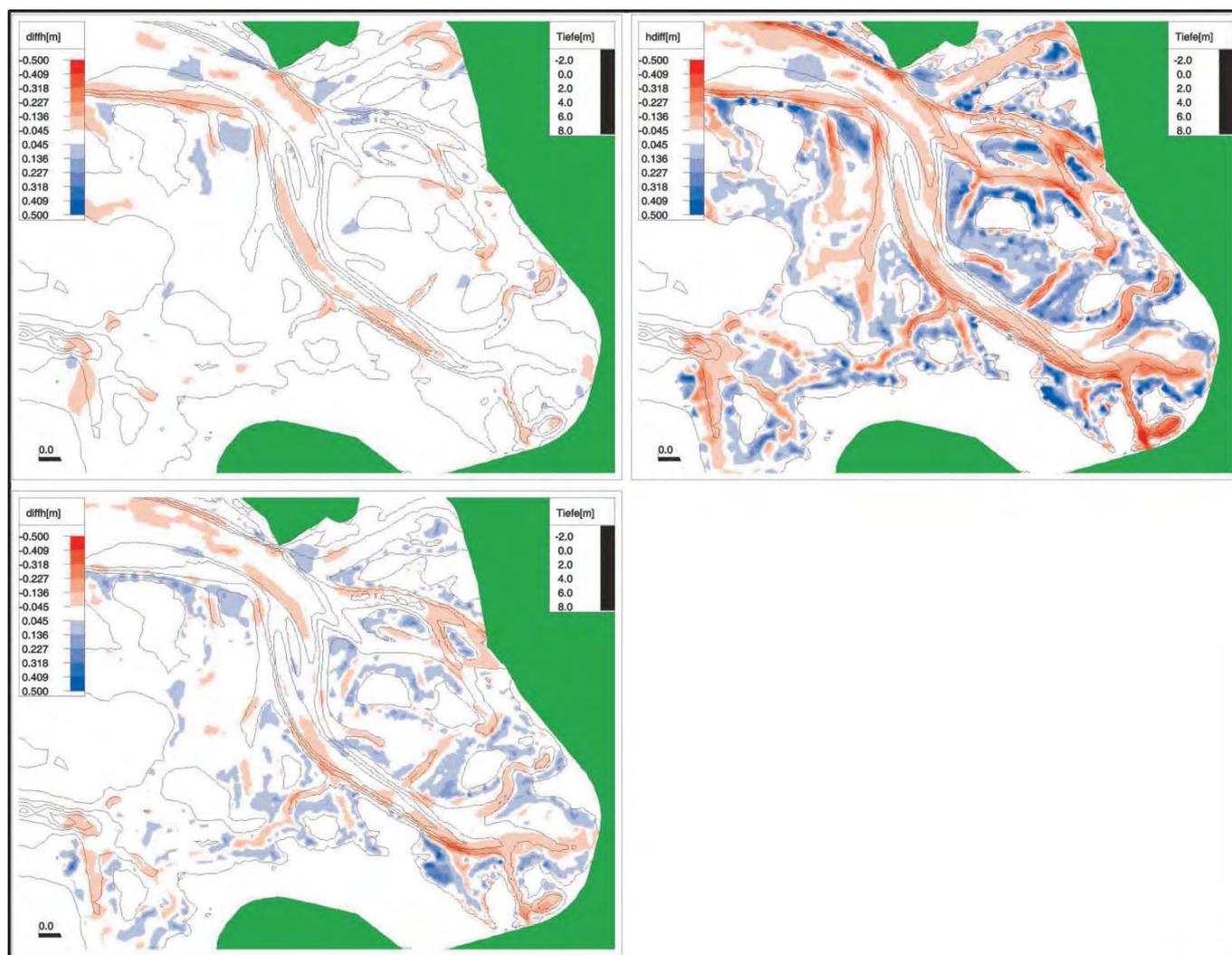


Abb. 2.11: Einzelereignisse morphologische Matrix. Oben links SW 17,5 m/s (111,8 Tiden, mittlerer Wasserstand + 0,72 m, Tidehub \times 1,05), oben rechts W 17,5 m/s (107,0 Tiden, mittlerer Wasserstand + 0,94 m, Tidehub \times 0,97), unten links: NW 17,5 m/s (107,0 Tiden, mittlerer Wasserstand + 0,63 m, Tidehub \times 1,05). Rot: Sedimentation

Die beste morphologische Übereinstimmung ergab sich schlussendlich durch Anwendung eines Optimierungsverfahrens aus einer Kombination von: W 7,5 m/s \times 3,25, SO 7,5 m/s \times 0,5 und N 12,5 \times 5,0 (s. Abb. 2.12).

Generell ist die Übereinstimmung zwischen morphodynamischer Berechnung unter Anwendung einer morphologischen Matrix und den natürlichen Veränderungen in vielen Bereichen sowohl qualitativ als auch quantitativ sehr hoch. Die morphologische Tendenz wurde in mehr als 80 % des Untersuchungsgebietes korrekt wiedergegeben. Viele kleinräumige Strukturen wurden quantitativ und qualitativ gut wiedergegeben.

Es zeigte sich somit für das Untersuchungsgebiet Dithmarscher Bucht, dass im Sinne der Eingabefilterung nicht zwingend solche Ereignisse, die am häufigsten auftreten auch die stärkste morphodynamische Wirkung haben. Vielmehr kann es dadurch, dass verschiedene Ereignisse morphodynamisch gegensätzliche Wirkungen haben können, dazu kommen, dass Ereignisse die stark unterschiedliche morphodynamische Wirkungen haben, in der Kombination die beste Annäherung an die Natur erbringen.

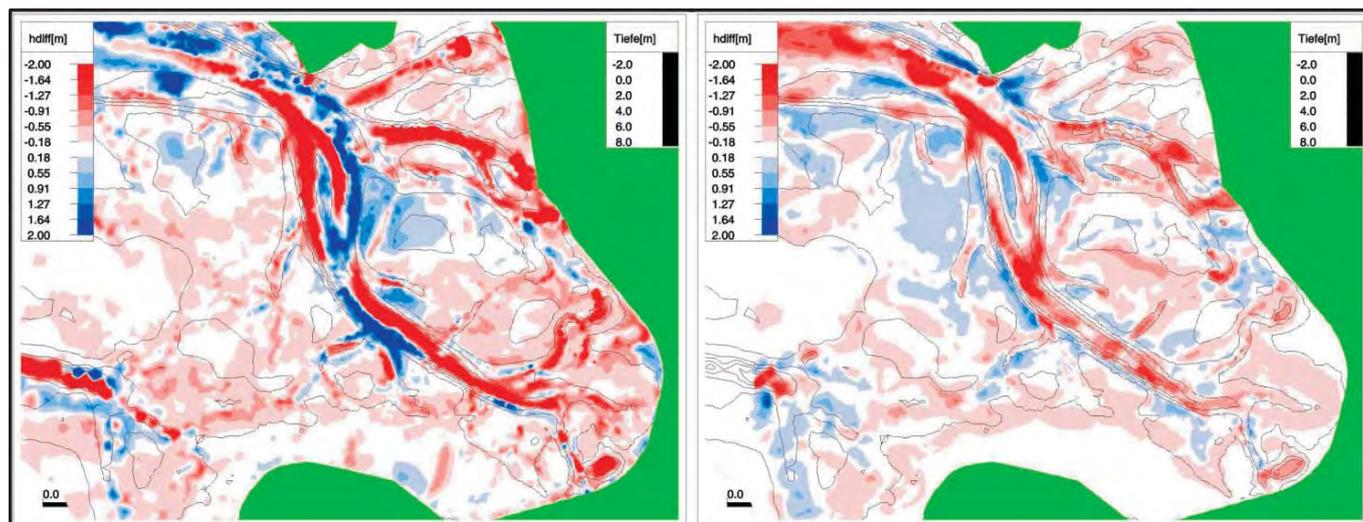


Abb. 2.12: Morphologische Matrix. Links: Gemessene Tiefendifferenzen 1979–1982, rechts: mit morphologischer Matrix berechnete Tiefenänderung (Kombination aus: W 7,5 m/s \times 3,25, SO 7,5 m/s \times 0,5, N 12,5 \times 5,0)

Die morphologische Übereinstimmung mit dem Referenzzustand konnte noch verbessert werden, indem im Bereich des Bielshovensandes die angesetzte Korngröße verdoppelt wurde (s. Abb. 2.13). Von GAST et al. (1984) wird für diesen Bereich eine Muschelbesiedelung kartiert. Möglicherweise ist diese dafür verantwortlich, dass das Sediment in diesem Bereich stabilisiert ist.

Um kleinräumige morphologische Strukturen besser modellieren zu können, sollten daher mittelfristig auch morphologisch relevante biogene Prozesse in ein morphodynamisches Modell integriert werden.

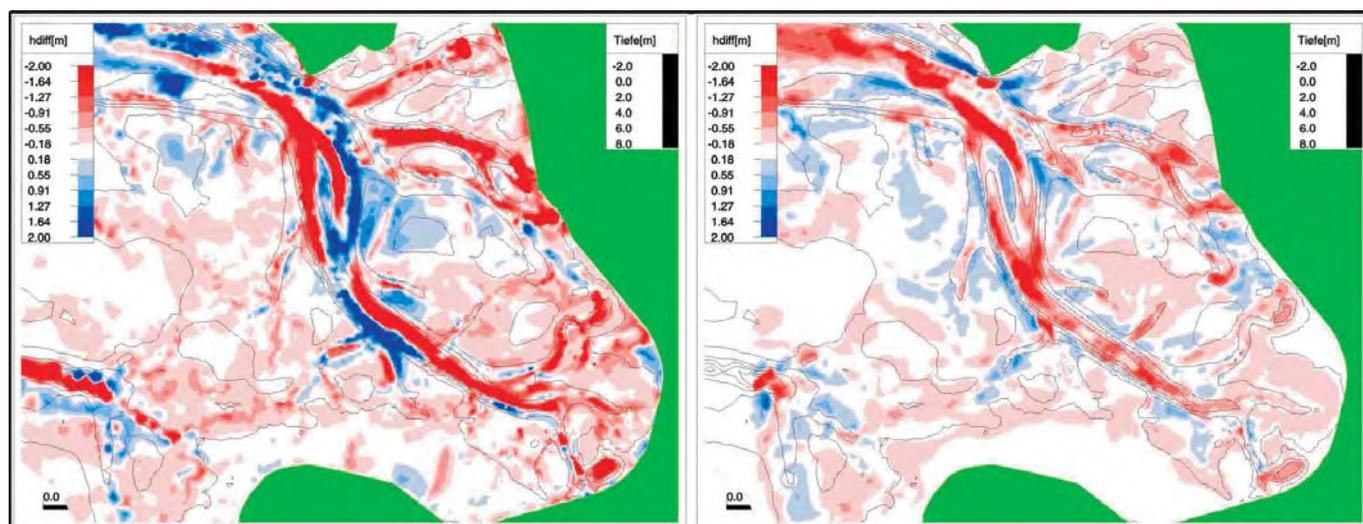


Abb. 2.13: Morphologische Matrix mit Korngrößenverdoppelung im Bereich Bielshovensand. Links: Gemessene Tiefendifferenzen 1979–1982, rechts: mit morphologischer Matrix berechnete Tiefenänderung (Kombination aus: W 7,5 m/s \times 3,25, SO 7,5 m/s \times 0,5, N 12,5 \times 5,0)

2.5 Prognosezeitraum

Es wurde weiterhin untersucht, für welche Prognosezeiträume in einem Gebiet dieser Größe mit komplexer Topographie noch naturähnliche Morphologieänderungen berechnet werden können. Hierzu wurde die Rechnung mit der Ausgangstopographie von 1979 über einen Berechnungszeitraum von 11 Jahren fortgesetzt, so dass der endgültige Berechnungszustand mit der Topographie von 1990 verglichen werden konnte. Die Rechnung wurde unter reinen Tidebedingungen betrieben.

Nach VAN RIJN (1998) ist die Anwendungsgrenze eines 2D-morphodynamischen Modells für ein Gebiet der Größe der Dithmarscher Bucht 5–10 Jahre. Der Berechnungszeitraum liegt somit am oberen Rand der von Van Rijn angegebenen Anwendungsgrenze.

Die Modellergebnisse sind in den meisten Bereichen naturähnlich (vgl. Abb. 2.14). Die morphologische Anpassung auf den Wattflächen wird zufriedenstellend wiedergegeben. Auch die morphologische Anpassung der Rinnen wird von der Quantität gut wiedergegeben. Wie auch schon für den Zeitraum 1979–1982 werden bei ausschließlicher Berücksichtigung der Tide vor allem der Bereich des Ebbastes der Piep und der Bereich der Wattfläche zwischen Kronenloch und Sommerkoog-Steertloch unzureichend wiedergegeben.

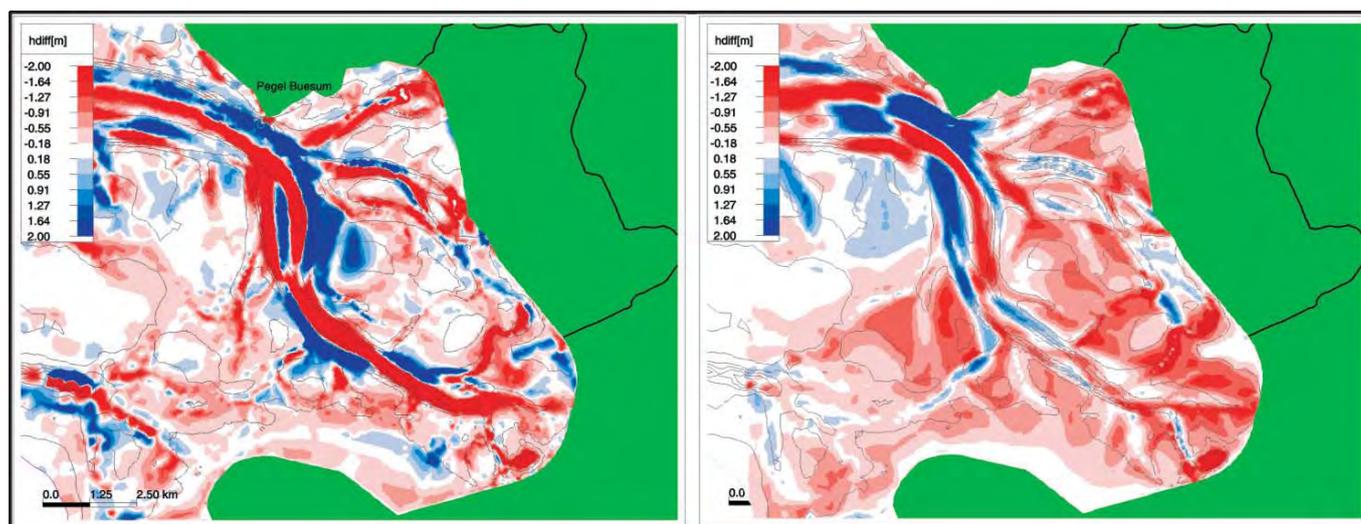


Abb. 2.14: Links: Gemessene Tiefenänderungen 1979–1990; rechts: Berechnete Tiefenänderungen 1979–1990 (blau: Erosion)

In der Natur fand die morphologische Anpassung zum größten Teil bereits in den ersten 3 Jahren statt, während das Modell diese Anpassung über einen längeren Zeitraum berechnet. Dies ist aus Abb. 2.15 zu erkennen. Hier sind gemessene und berechnete Sedimentumlagerungen pro m Tiefenschicht von 1979–1990 dargestellt. Über kürzere Zeiträume kann es bedingt durch Einzelereignisse zu morphologischen Veränderungen kommen, die entgegen dem langfristigen Trend laufen, wie beispielsweise 1982–1985, wo viel Material von den Wattflächen erodiert wurde. Sie werden aber in ihrer längerfristigen Entwicklung durch die Tideströmung wieder ausgeglichen, was daran abgelesen werden kann, dass das Modell, das hier ja nur mit einer morphologischen Tide (LATTEUX, 1995) betrieben wird, über einen Zeitraum von 11 Jahren in ähnlichen Tiefenbereichen Material anlagert, wie das auch in der Natur geschieht. Dies deutet auf die dominierende Rolle der Tideströmung in diesem Gebiet hin.

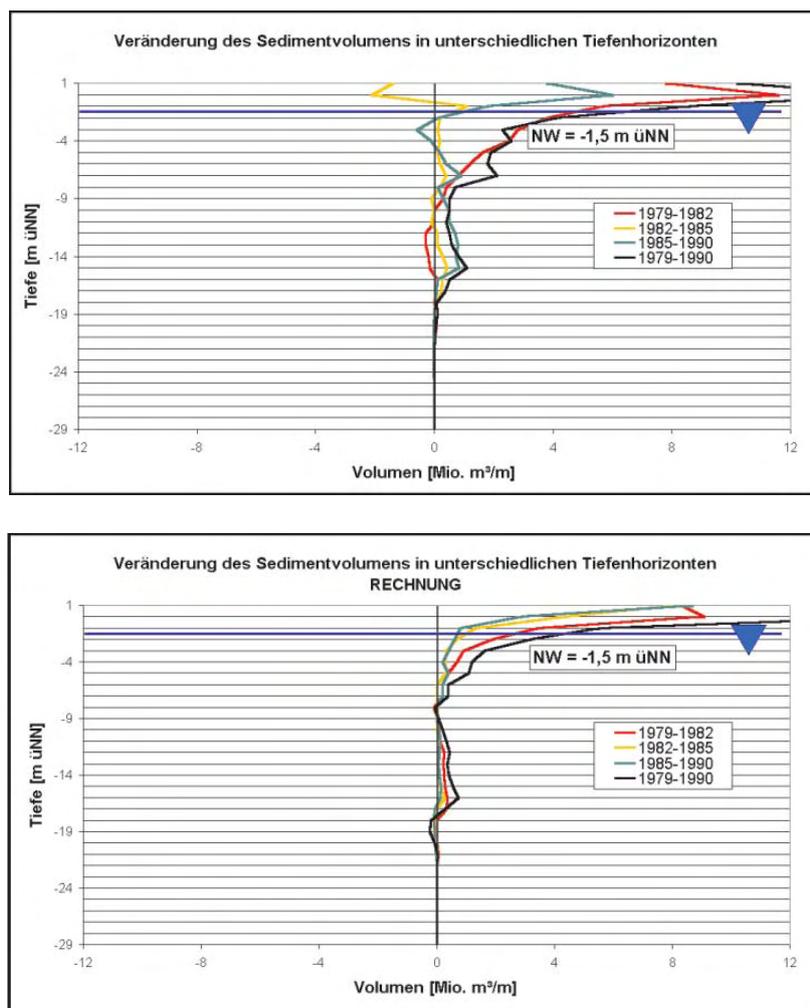


Abb. 2.15: Oben: Gemessene Sedimentumlagerungen pro m Tiefenschicht für den Bereich westlich des neuen Deichs 1979–1990, unten: Berechnete Sedimentumlagerungen pro m Tiefenschicht für den Bereich westlich des neuen Deichs 1979–1990

Generell zeigt sich, dass das Modell für einen Prognosezeitraum von 11 Jahren einen in weiten Teilen naturähnlichen (Gleichgewichts-)Zustand generiert. Die Angabe von zeitlichen Anwendungsgrenzen dürfte daher stark von den die Morphologie bestimmenden Prozessen abhängen. Ist dies wie im Falle der seegangsgeschützten Dithmarscher Bucht die Tideströmung, die nur relativ geringen Schwankungen unterliegt, kann die Anwendungsgrenze für die Bereiche, die durch die Tideströmung dominiert sind, durchaus auch über 10 Jahren liegen. Je stärker jedoch die Rolle des Seegangs wird, desto kürzer wird auch der vertretbare Prognosezeitraum, da es durch Extremereignisse zu Morphologieänderungen wie beispielsweise Rinnenbildungen kommen kann, die das System stark verändern. Im Falle der Dithmarscher Bucht ist davon auszugehen, dass die Prognose bei Berücksichtigung des Seegangs in einigen Bereichen verbessert werden kann, da der Seegang einerseits direkt auf einzelne seegangsexponierte Bereiche einwirkt, andererseits aber auch indirekt Einfluss auf die großräumige Sedimentdynamik hat.

3. Sensitivitätsstudien mit verändertem Seegang und Wasserstand

3.1 Anstieg des mittleren Meeresspiegels

Es wurden Wasserstandsaufzeichnungen an einigen ausgewählten Pegeln des Nordfriesischen Wattenmeeres analysiert. Aus den Aufzeichnungen wurde der jährliche Trend der Niedrig- und Hochwasserstände ermittelt. Daraus wurde ein jährlicher Trend zur Mittelwasserentwicklung und zur Tidehubentwicklung berechnet. Die Ergebnisse sind in Tab. 3.1 dargestellt.

Tab. 3.1: Wasserstandsentwicklung an einigen ausgesuchten Pegeln

Trends – Steigung in cm/Jahr		Jahr		Jahr	
		MTnw	MTnw	Mittelwasser	Tidehub
Büsum	(1940–1998)	0,17	0,31	0,24	0,15
Friedrichskoog	(1951–1998)		0,43		
Blauort	(1981–1998)	–0,37	–0,35	–0,36	0,02
Trischen	(1957–1980)	–0,04	0,48	0,22	0,52
Eider-Sperrwerk	(1973–1998)	0,58	0,10	0,34	–0,47
Hundeknöll	(1954–1972)	0,30	–0,15	0,08	–0,45
Helmsander-Koog	(1982–1998)	0,09	–0,13	–0,02	–0,22
Meldorf Hafen	(1951–1978)	0,66	0,35	0,51	–0,31
Hörnum	(1951–1998)	–0,07	0,38	0,16	0,45

Für den Pegel Büsum beträgt somit der extrapolierte säkulare Meeresspiegelanstieg 24 cm. Um die morphodynamische Wirkung eines solchen Meeresspiegelanstiegs aufzuzeigen, wurde der kalibrierte Zeitraum von 1979–1982 noch einmal mit einem 10 cm erhöhten Wasserstand durchgerechnet. Dies entspricht somit dem zu erwartenden mittleren Meeresspiegel in ca. 40 Jahren. Der Seegang blieb dabei unberücksichtigt. Die relative Änderung gegenüber der ursprünglichen Rechnung ist somit ausschließlich auf den veränderten Wasserstand zurückzuführen.

Die Ergebnisse sind in Abb. 3.1 dargestellt. Auf den Wattflächen kommt es zu stärkerer Sedimentation. Das hierzu erforderliche Material kommt zum Teil aus der Haupttiderinne Piep, wo aufgrund der höheren Strömungsgeschwindigkeiten mehr Material erodiert wird. Insgesamt befindet sich aber bei angenommener gleicher Schwebstoffkonzentration und höherem Wasserstand mehr Sediment in der Wassersäule. Dies erklärt den Überschuss an Sedimentation bei höherem Wasserstand.

3.2 Veränderter Seegang

Eine Änderung der Auftretenswahrscheinlichkeit von Seegangsereignissen ist für das relativ geschützte Tidebecken der Dithmarscher Bucht fast ausschließlich auf eine Veränderung der lokalen Windverhältnisse zurückzuführen.

Daher wurden die Windaufzeichnungen an der Windmessstation Büsum für den vorliegenden Zeitraum von 1967–2001 analysiert. Hierzu wurden die auftretenden Ereignisse in acht Richtungs- und fünf Geschwindigkeitsklassen unterteilt. Folgende Parameter wurden ermittelt:

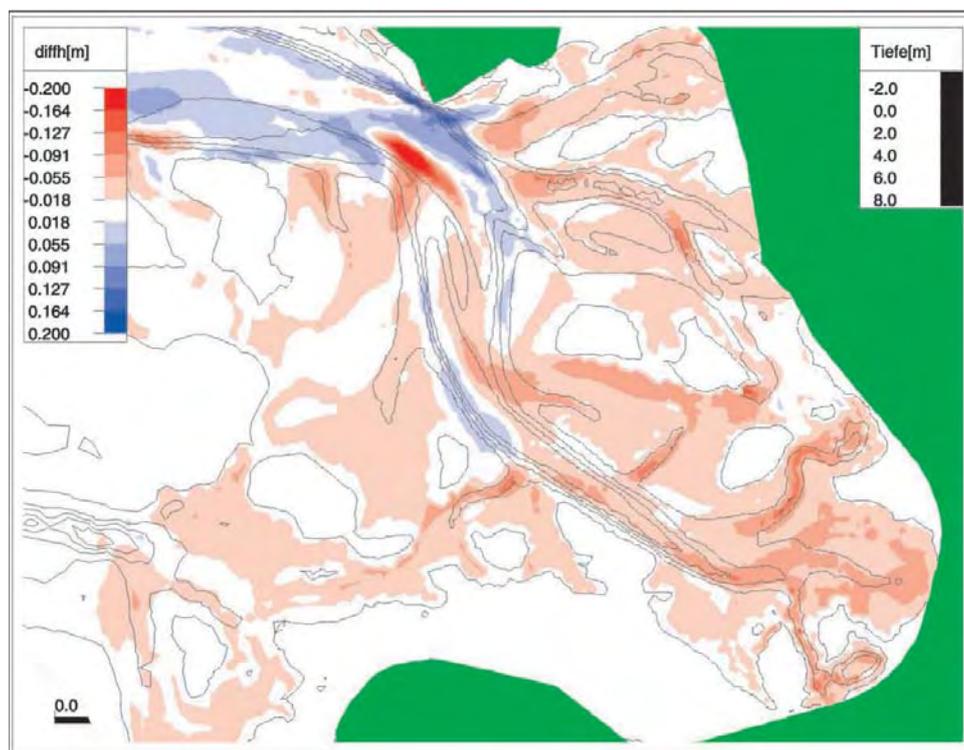


Abb. 3.1: Morphodynamische Wirkung eines mittleren Meeresspiegelanstiegs von 10 cm

- Mittelwert der Auftretenshäufigkeit 1967–2001 (Tabelle 3.2)
- Absoluter Trend der Auftretenshäufigkeit (Tabelle 3.3)
- Relativer Trend der Auftretenshäufigkeit (Tabelle 3.4)
- Absoluter Trend von Windstärkeklassen (Abbildung 3.2)
- Relativer Trend von Windstärkeklassen (Tabelle 3.5)

Aus Tabelle 3.4 geht hervor, dass hauptsächlich Starkwindsituationen aus südlicher und südwestlicher Richtung deutlich zunehmen. Starkwindsituationen aus nördlicher Richtung werden hingegen seltener.

Tab. 3.2: Mittelwert der Auftretenshäufigkeit 1967–2001 Windmessstation Büsum

	0–5 m/s	5–10 m/s	10–15 m/s	15–20 m/s	20–25 m/s
N	6,36 %	2,77 %	0,22 %	0,01 %	0,00 %
NO	4,96 %	2,92 %	0,33 %	0,02 %	0,00 %
O	4,97 %	6,95 %	1,50 %	0,08 %	0,00 %
SO	3,56 %	5,51 %	1,05 %	0,04 %	0,00 %
S	3,29 %	6,03 %	2,02 %	0,20 %	0,01 %
SW	2,55 %	7,05 %	5,31 %	0,84 %	0,06 %
W	3,63 %	7,88 %	5,06 %	0,99 %	0,09 %
NW	3,70 %	6,64 %	2,85	0,42 %	0,02 %

Tab. 3.3.: Trend der Auftretenshäufigkeit von Windklassen an der Windmessstation Büsum in %/Jahr

	0–5 m/s	5–10 m/s	10–15 m/s	15–20 m/s	20–25 m/s
N	–0,0500 %	–0,0700 %	–0,0100 %	–0,0005 %	0,0000 %
NO	–0,0600 %	0,0300 %	0,0200 %	0,0007 %	0,0000 %
O	–0,0400 %	–0,0007 %	0,0500 %	–0,0020 %	0,0000 %
SO	–0,0100 %	–0,0200 %	–0,0080 %	0,0010 %	0,0000 %
S	0,0100 %	0,0800 %	0,0500 %	0,0060 %	0,0006 %
SW	0,0400 %	0,0030 %	–0,0040 %	0,0200 %	0,0020 %
W	0,0300 %	0,0500 %	0,0300 %	0,0040 %	0,0010 %
NW	–0,0060 %	–0,0400 %	–0,0700 %	–0,0300 %	–0,0010 %

Tab. 3.4: Relativer Trend der Auftretenshäufigkeit von Windklassen an der Windmessstation Büsum in % / Jahr; rot: relative Erhöhung höher als 2 %; blau: relative Verringerung höher als 2 %

	0–5 m/s	5–10 m/s	10–15 m/s	15–20 m/s	20–25 m/s
N	–0,79 %	–2,52 %	–4,57 %	–5,36 %	0,00 %
NO	–1,21 %	1,03 %	6,02 %	3,23 %	0,00 %
O	–0,81 %	–0,01 %	3,33 %	–2,50 %	0,00 %
SO	–0,28 %	–0,36 %	–0,76 %	2,66 %	0,00 %
S	0,30 %	1,33 %	2,48 %	2,97 %	7,39 %
SW	1,57 %	0,04 %	–0,08 %	2,39 %	3,58 %
W	0,83 %	0,63 %	0,59 %	0,41 %	1,15 %
NW	–0,16 %	–0,60 %	–2,46 %	–7,06 %	–4,69 %

Tab. 3.5: Relativer Trend der Auftretenshäufigkeit von Windstärkeklassen an der Windmessstation Büsum in % / Jahr

0–5 m/s	5–10 m/s	10–15 m/s	15–20 m/s	20–25 m/s
–0,39 %	0,09 %	0,49 %	0,12 %	1,73 %

Ausgehend von dieser Analyse wurde die morphodynamische Wirkung einer relativen Erhöhung der Auftretenswahrscheinlichkeit der Windsituation SW 17,5 m/s um 25 % untersucht. Dies entspricht bei einem jährlichen relativen Anstieg dieser Windsituation den Verhältnissen nach ca. 10 Jahren. Das Ergebnis ist in Abb. 3.3 dargestellt. Es zeigt sich, dass es zu einer leicht erhöhten Erosion von Material auf den Wattflächen von ca. 3 cm kommt.

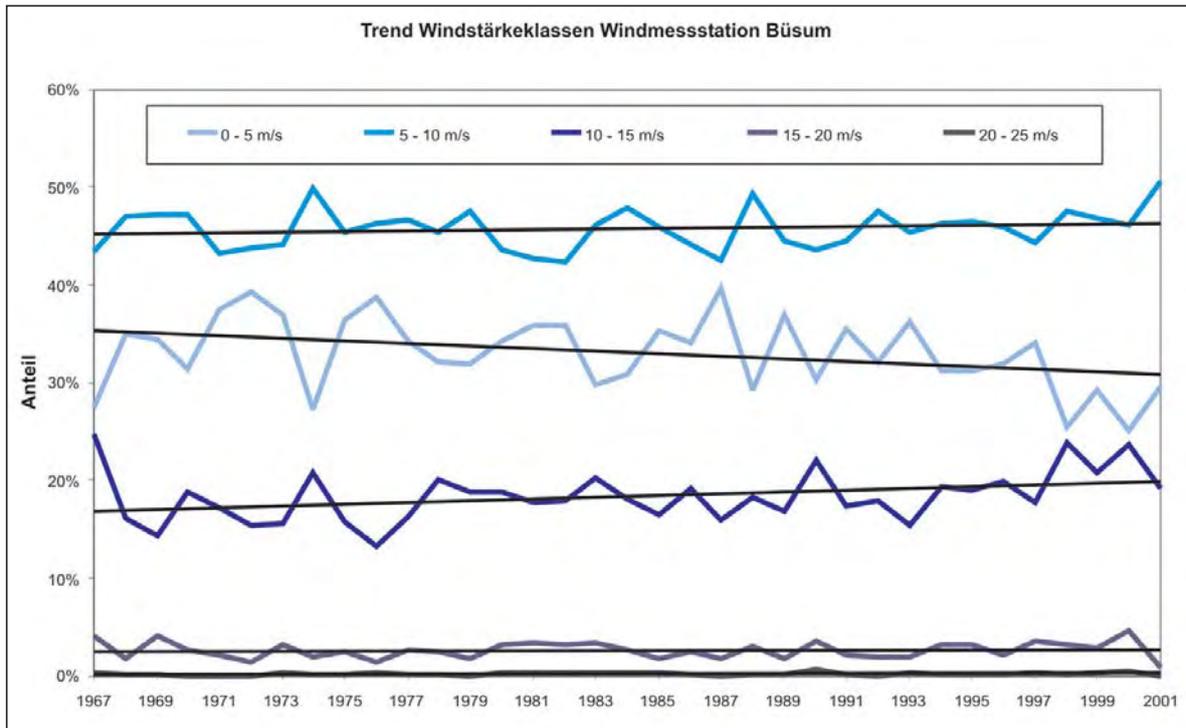


Abb. 3.2: Trend von Windstärkeklassen an der Windmessstation Büsum

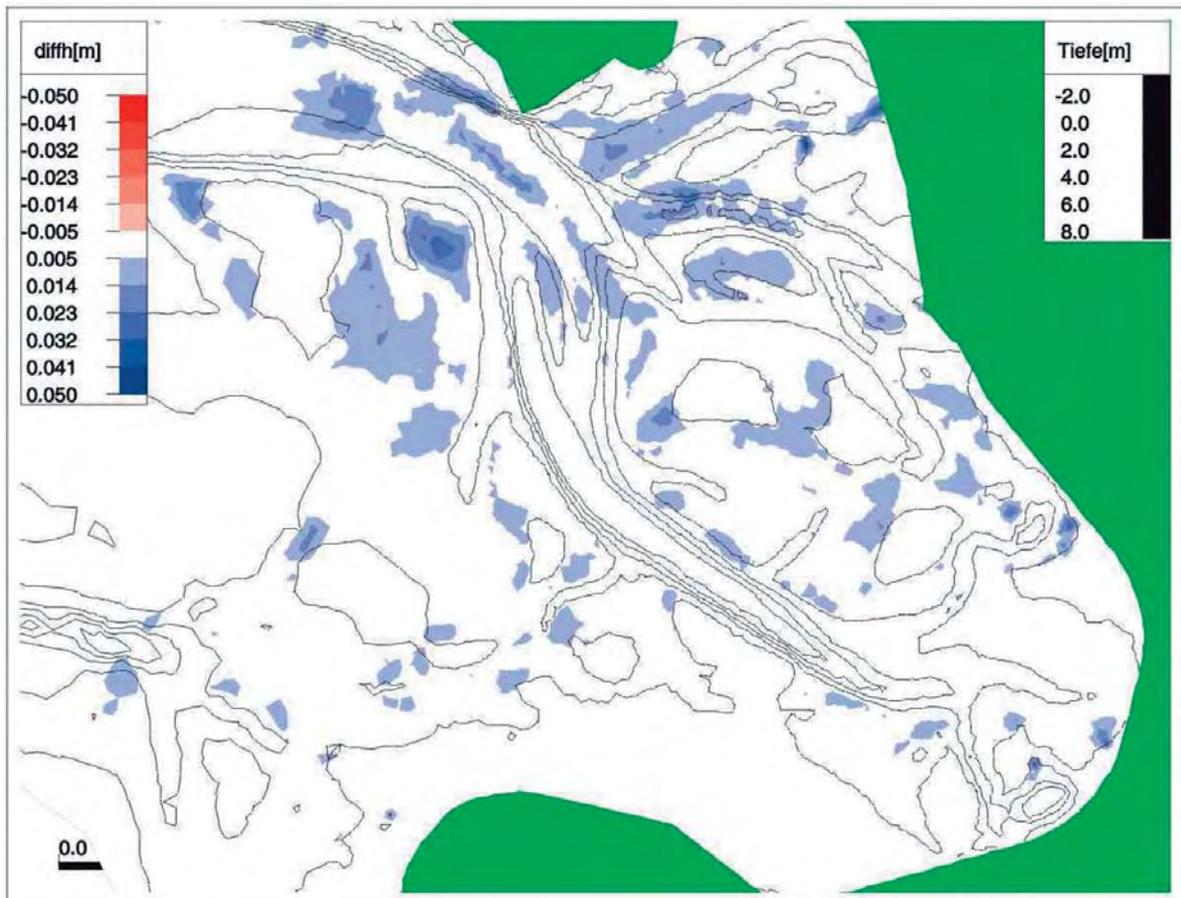


Abb. 3.3: Morphodynamische Wirkung einer relativen Erhöhung der Auftretenswahrscheinlichkeit der Windsituation SW 17,5 m/s um 25 %

3.3. Kombination aus Meeresspiegelanstieg und verändertem Seegang

Neben der getrennten Berücksichtigung von veränderten Wasserständen und Seegang sollte auch eine Kombination dieser Szenarien untersucht werden. Sie stellt das realistischste Szenario dar, da sich beide Einflussfaktoren verändern werden.

Untersucht wurde ein Szenario mit einem um 10 cm erhöhten Meeresspiegel und einer um 25 % erhöhten Auftretenswahrscheinlichkeit der Windsituation 17,5 m/s. Die relative Veränderung zum heutigen Zustand ist in Abb. 3.4 dargestellt. Durch den verstärkten Seegang kommt es in einigen Bereichen der Wattflächen zu einer verstärkten Erosion. Der erhöhte Wasserstand ist jedoch gleichzeitig für eine verstärkte Sedimentation vor allem in den Endbereichen der Priele verantwortlich. Insgesamt wird die erhöhte Erosion durch verstärkten Seegang durch die verstärkte Sedimentation durch erhöhten Wasserstand mehr als kompensiert.

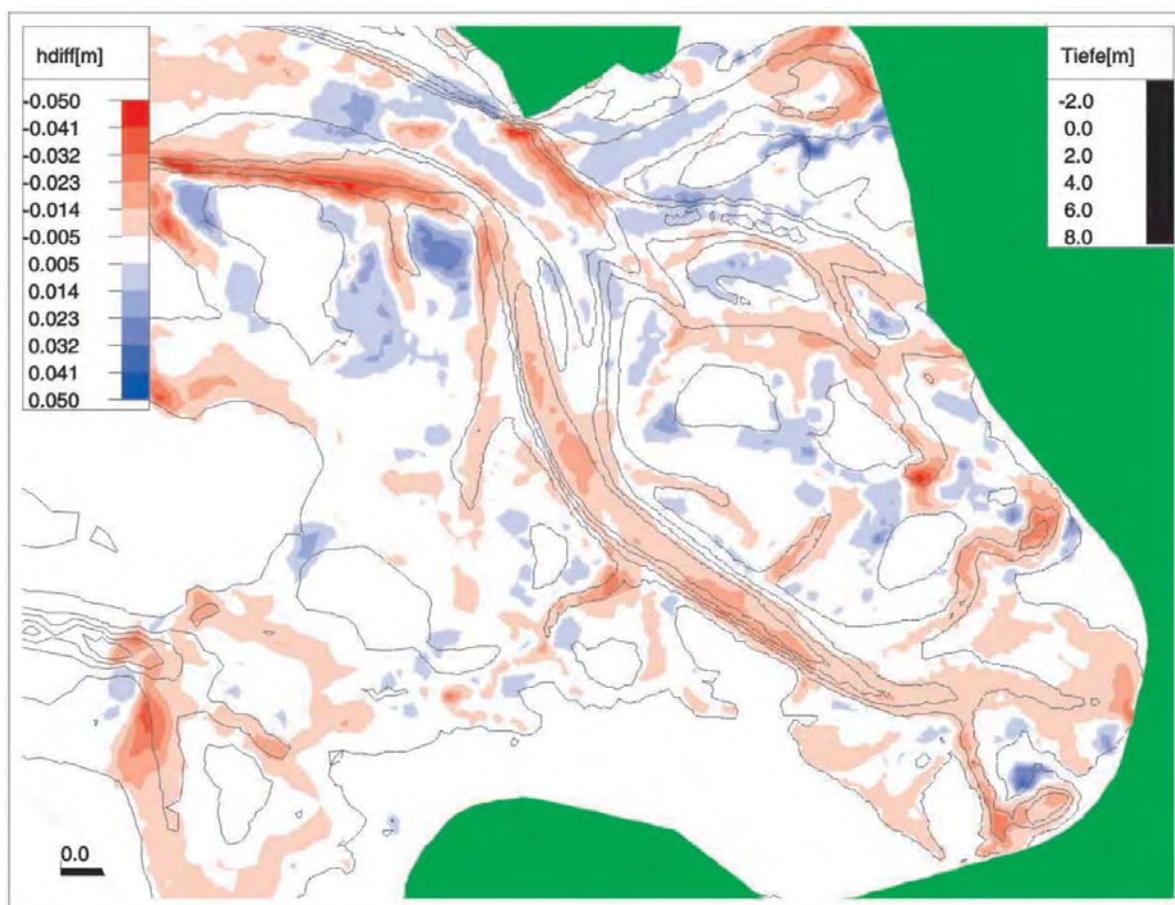


Abb. 3.4: Morphodynamische Wirkung einer relativen Erhöhung der Auftretenswahrscheinlichkeit der Windsituation SW 17,5 m/s um 25 % und eines Anstiegs des mittleren Meeresspiegels um 10 cm

4. Alternative Berücksichtigung der Seegangswirkung

Die Berücksichtigung des Seegangs über die morphologische Matrix ist vergleichsweise zeitaufwendig. Überdies bleiben Fragen nach dem Einfluss der zeitlichen Abfolge. Daher wurde im Nachgang zur Projektlaufzeit ein vergleichsweise einfaches Verfahren zur Berücksichtigung der Seegangswirkung erprobt: Der Seegang wirkt im Wesentlichen durch eine Mobilisierung der Sedimente, hervorgerufen durch die bodennahen Orbitalströmungen. Weitere Effekte sind die erhöhte Durchmischung, ggf. im Zuge der Wellenperiode, Verschwenkungen der Richtung des Tidestroms sowie die mehr oder weniger ausgeprägte Asymmetrie der wellenbedingten Schubspannungen.

Leitgedanke beim Entwurf des alternativen Verfahrens war, dass die mobilisierende Wirkung in Bereichen mit ausgeprägten Tideströmungen dominiert. Seegangsbedingter eigenständiger Transport existiert dagegen vornehmlich auf hochliegenden Watten oberhalb Tmw (NIEMEYER, 1983). Vor diesem Hintergrund wurde die lokale Wellenhöhe in Anlehnung an die Ergebnisse von Naturmessungen im See- und Wattengebiet von Norderney (NIEMEYER, 1979, 1983), in der Leybucht und auf den Groninger Watten (NIEMEYER, 1983) sowie an der Wurster Küste und im Nordfriesischen Watt (NIEMEYER et al. 1995/2) in einen linearen Bezug zur lokalen Wassertiefe gesetzt. Die Orbitalströmungen an der Sohle wurden nach der Wellentheorie 1. Ordnung berechnet und in ihren Beträgen der Tideströmung zuaddiert. Je nach vorgegebener Wellenperiode klingt die Wellenwirkung in bestimmter Tiefe aus. Die Vorgehensweise bewirkt, dass ständig ein „morphologisch wirksamer“ Seegang berücksichtigt wird, der zeitweilig den wirklichen Seegang überschätzt, aber auch Sturmereignisse unterschätzt. Hierbei wurde die phänomenologische Erkenntnis berücksichtigt, dass die morphologische Wirksamkeit des Seegangs am ehesten über normale Starkwindereignisse parametrisiert werden kann (NIEMEYER, 1983).

Dieses Verfahren wurde für die Dithmarscher Bucht auf den Zeitraum 1979–1990 angewandt. Als ‚maßgebende‘ Wellenhöhe wurde $H = 0,4$ m permanent bei 3,5 s Periode vorgegeben. Das Ergebnis zeigt Abb. 4.1, rechts. Im Vergleich mit den Resultaten des Kapitels 2 ergibt die morphodynamische Simulation mit diesem Verfahren deutlich naturnähere Tiefenänderungen als die Simulation allein mit Tide, wie ein Vergleich mit Abb. 2.14 zeigt. Messung und Rechnung stimmen in vielen Details überein, wobei natürlich wegen der Unschärfen in den Messungen und den numerischen Formulierungen keine exakte Übereinstimmung erwartet werden darf. Einzig auffallend nicht gut getroffen ist der Bereich rechts der Stromspaltung am Eingang zum Sommerkoog Steertloch (fehlende blaue Zone etwa Mitte des rechten Bildes).

Das Ergebnis trifft die Natur nicht nur vergleichsweise gut bezüglich der Muster, sondern auch bezüglich des Gesamtniveaus Auflandung-Erosion. Das grundlegende Ergebnisbild erwies sich in Variationstests auch als recht robust gegenüber

- einer Variation der Geschiebformeln von MEYER-PETER/MÜLLER (1948/49) und von ZANKE (1999/2001),
- einer Verschiebung der Korngrößen um 25 % und
- einer mäßigen Änderung der in Ansatz gebrachten Wellenkennwerte.

Höhere Wellen und/oder größere Perioden führten in erster Linie zu Erosionen auf den hohen Watten.

Intermittierendes Zu- und Abschalten der Seegangswirkung resultierte nicht in signifikant anderen Ergebnissen sondern äußerte sich i.W. wie permanent wirkende Wellen mit geringerer Höhe.

Als Tiderandbedingung wurde auch hier eine mittlere Tide zyklisch wiederholt, was

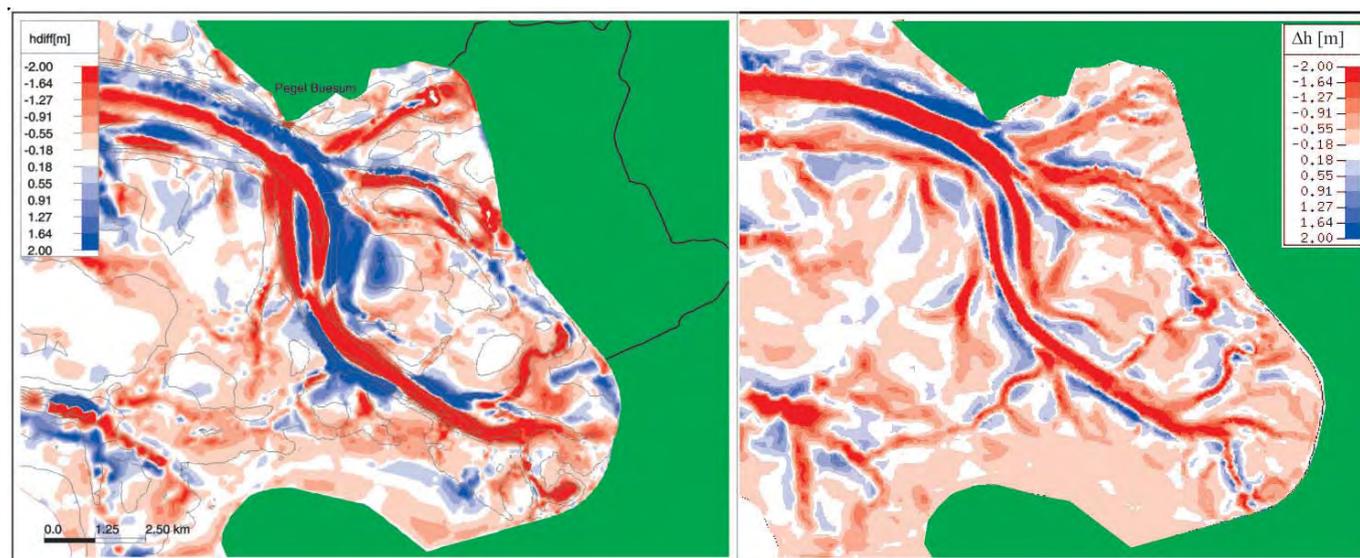


Abb. 4.1: Links: Gemessene Tiefenänderungen 1979–1990; rechts: Mit vereinfachter Berücksichtigung des Seegangs und mit Tidewirkung berechnete Tiefenänderungen 1979–1990 (blau: Erosion)

zum einen die Erkenntnisse von LATTEUX (1995) bestätigt, gemäß derer mittlere Tiden bzw. im Hub leicht erhöhte mittlere Tiden morphologisch wirksam sind und was zum anderen noch weitere Verbesserungen im Detail möglich sein lässt, wenn natürliche Tidezyklen zugrunde gelegt werden.

5. Sedimenttransportpfade

Ein weiterer Schwerpunkt des Forschungsvorhabens war es, Sedimenttransportpfade, die im System Tidebecken-Ebbdelta zurückgelegt werden, aufzuzeigen. Zu diesem Themenkomplex wurden folgende Untersuchungen durchgeführt:

- Morphodynamische Studie über den Verbleib feinkörnigen Sediments unter verschiedenen hydrodynamischen Randbedingungen
- Ermittlung der im System Tidebecken-Ebbdelta von verschiedenen Korngrößen zurückgelegten Transportpfade
- Ermittlung der im Hörnumbecken auftretenden Kornverteilungstypen.

5.1 Akkumulation von feinkörnigem Sediment im Hörnumbecken

Zwischen der Nordsee und ihren angrenzenden Tidebecken findet ein beträchtlicher Austausch an Sedimenten statt. Das Ausmaß dieses Austausches bestimmt dabei in entscheidender Weise die Fähigkeit der Wattflächen zu wachsen, da sich feine Sedimente auf den Wattflächen absetzen können.

Die Feststoffe haben zumeist einen hohen organischen Anteil und entstammen in der Regel aus unterschiedlichen Phasen des organischen Stoffkreislaufs oder aber aus einem Eintrag über die Ästuarie Elbe, Weser und Ems in die offene Nordsee. Auf den Wattflächen werden sie teilweise mineralisiert.

Eine wichtige Fragestellung in diesem Zusammenhang ist, ob die Menge der eingetragenen und im Tidebecken verbleibenden Feststoffe ausreichend ist, um die Wattflächen mit steigendem Meeresspiegel mitwachsen zu lassen.

Aus diesem Grund wurde eine morphodynamische Studie durchgeführt, in der die Akkumulation von feinkörnigem Material unter verschiedenen hydrodynamischen Bedingungen untersucht wurde.

5.1.1 Untersuchungsgebiet

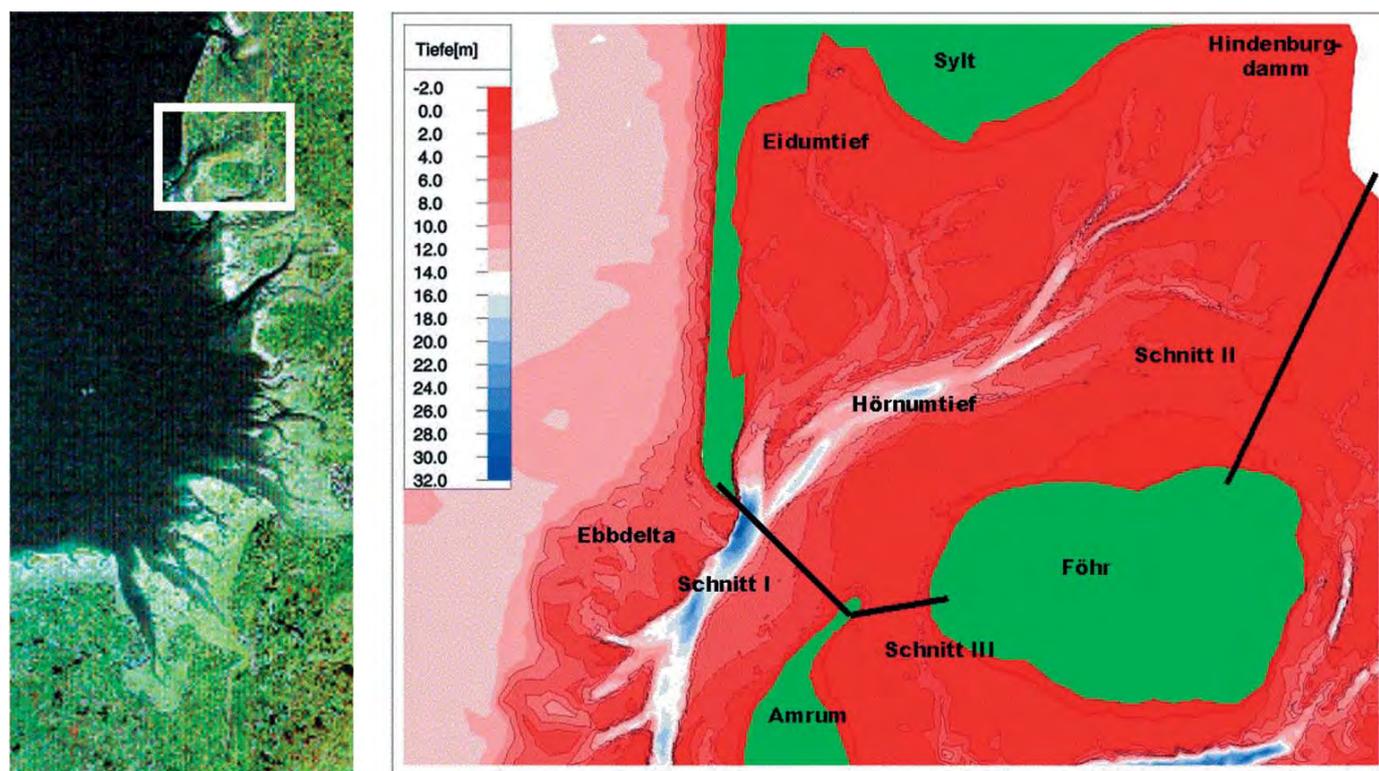


Abb. 5.1: Tiefenverteilung Hörnumbecken mit Lage der Schnitte I–III

Das Hörnumbecken befindet sich südöstlich der Insel Sylt in der Deutschen Bucht. Die Größe des Beckens mit seinem dazugehörigen Ebbdelta umfasst ca. 400 km². Die maximale Tiefe wird im Hörnumtief südlich von Sylt (siehe Abb. 5.1) mit 30 m unter NN erreicht. Ungefähr 50 % des Beckens sind zeitweise trockenfallende Wattflächen, was im Vergleich mit anderen Tidebecken der Deutschen Bucht ein sehr geringer Wert ist. Anthropogene Eingriffe veränderten das Hörnumbecken maßgeblich. So wurde 1927 ein Eisenbahndamm gebaut, welcher Sylt mit dem Festland verbindet. Dieser Damm verringerte das Tideprisma des Beckens, weil er den Tidereststrom in das nördlich angrenzende Lister Tidebecken unterbindet. Der Tidehub beträgt etwa 2 m. Der Seegang innerhalb des Tidebeckens wird hauptsächlich durch lokale Windwellen geprägt, da höhere Wellen am Ebbdelta brechen und danach aufgrund von Refraktion weiter verflachen.

Der Austausch an feinkörnigem Sediment wurde an den drei in Abb. 5.1 dargestellten Schnitten für verschiedene morphodynamische Simulationsrechnungen ermittelt.

5.1.2. Sedimentbedarf im Hörnumbecken bei steigendem Meeresspiegel

Eine wichtige Fragestellung im Zusammenhang mit der Akkumulation von feinkörnigem Material in Tidebecken ist, ob die Menge des eingetragenen feinkörnigen Materials ausreichend ist, um die Wattflächen bei steigendem Meeresspiegel im gleichen Maße mitwachsen lassen zu können.

Daher sollte untersucht werden, wie groß der Sedimentbedarf für das Hörnumbecken bedingt durch den Meeresspiegelanstieg in Zukunft ist und ob er befriedigt werden kann. Hierbei wurde ausschließlich der feinkörnige Anteil betrachtet. Dieses Material ist wesentlich mobiler als gröberes, da es über weite Distanzen in Suspension transportiert werden kann. Als mögliche Quellen können der Schwebstoffeintrag über die Ästuare sowie organische Stoffe genannt werden. Für die gröberen Fraktionen kommt hauptsächlich der von Westerland an im Jahresmittel südlich gerichtete Küstenlängstransport in Frage. Dieser nährt zunächst das Ebbdelta, welches als eine Art Sedimentzwischenpuffer funktioniert. Von hier aus wird Material in das Tidebecken eingetragen oder weiter nach Süden verfrachtet.

Der erforderliche Sedimentbedarf kann bei einem angenommenen Anstieg des Meeresspiegels von 10 cm in 40 Jahren, was einem säkularen Anstieg von 25 cm entspricht, mit Beziehungen der Regime-Theorie abgeschätzt werden:

Zum Ansatz der Regime-Theorie wurden die Beziehungen von NIEMEYER (1995/1), FERK (1995) und RENGER (1976) angewandt. Nach allen drei Autoren ist das Becken derzeit nicht im Gleichgewicht. Aus den Ansätzen ergibt sich aber übereinstimmend ein Sedimentbedarf von ca. 9 Mio. m³, um eine der heutigen Situation geometrisch ähnliche Beckentopographie zu erhalten.

Bei einer angenommenen Akkumulation im gesamten Becken ergibt sich ein Bedarf von 29 Mio. m³, bei angenommener Akkumulation auf den Wattflächen ein Bedarf von 13,7 Mio. m³.

Der Sedimentbedarf (S) kann auf das mittlere Tidevolumen (P), welches in der betrachteten Zeit in das Gebiet strömt, bezogen werden, wodurch man eine erforderliche akkumulationsrelevante Konzentration c_a erhält. Diese kann als die mittlere Differenz der in das Becken ein- und ausströmenden Suspensionskonzentration interpretiert werden. Die Dichte (ρ) des Materials und die Porosität (p) müssen berücksichtigt werden. Nach BARTHOLDY u. PHEIFFER MADSEN (1985) kann für $\rho \cdot (1-p)$ ein Wert von 1000 kg/m³ gut für derartiges Material angesetzt werden. Somit ergibt sich:

$$c_a = \frac{S}{P} = \frac{9 \text{ Mio. m}^3}{520 \text{ Mio.} \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{Tide}} \cdot 705 \cdot \frac{\text{Tiden}}{a} \cdot 40a} \cdot 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 0,65 \text{ mg/l}$$

In der folgenden Tab. 5.1 sind gemessene akkumulationsrelevante Konzentrationen c_a aus anderen Teilen des Wattenmeeres zusammengestellt.

Tab. 5.1: Aus Messungen bestimmte akkumulationsrelevante Konzentrationen c_a

Tidebecken	ca. [mg/l]	Autor
Dollart	3,1	VAN ES [1977] (in BARTHOLDY and PHEIFFER MADSEN, 1995)
Niederländisches Wattenmeer	0,35–1,04	DELFT HYDRAULIC LABORATORY [1980]
Jade	1,8	EISMA [1981]
Gradyb	1,5	BARTHOLDY and PHEIFFER MADSEN [1985]

Für das Hörnumbecken steht kein vergleichbarer Wert zur Verfügung und kann aufgrund der problematischen Qualität der dortigen Vermessungsdatensätze auch nicht bestimmt werden.

Auf den ersten Blick scheint es, dass die erforderliche akkumulationsrelevante Konzentration im Hörnumbecken im Bereich der gemessenen Werte anderer Tidebecken liegt; doch Dollart, Jade und Gradyb sind als Gebiete intensiver Deposition bekannt. Für das Hörnumbecken hingegen ist ein solches Verhalten nicht dokumentiert, obwohl 1927 ein Damm gebaut wurde, der die Fläche des Tidebeckens verringert hat, wonach mit starken Sedimentationen zu rechnen wäre.

Es gibt drei weitere Gründe, die auf eine beschränkte Verfügbarkeit an feinkörnigem Material im Hörnumbecken hindeuten:

- Das Hörnumbecken hat im Vergleich zu anderen Tidebecken einen relativ kleinen Anteil an intertidalen Flächen. Das kann als eine beschränkte Verfügbarkeit an Feinkornmaterial gedeutet werden, da man davon ausgehen kann, dass zum Aufbau von Wattflächen eine große Menge an feinem Material erforderlich ist, welches überwiegend in Suspension transportiert und in geschützten Bereichen des Tidebeckens abgelagert wird.
- Die Distanz zu den Ästuaren Elbe, Weser und Ems, die einen beträchtlichen Anteil an dem in der Nordsee verfügbaren feinen Material beisteuern, ist relativ groß. Dadurch dürfte die Verfügbarkeit an feinem Sediment im Hörnumbecken im Vergleich zu anderen Tidebecken klein sein.
- Die Genese des Hörnumbeckens: Im Gegensatz zu anderen Tidebecken in der Deutschen Bucht besteht der Kern der Barriereinsel Sylt aus relativ grobkörnigem Material. Betrachtet man weiterhin die gemittelte Zusammensetzung aus mehr als 500 Sedimentproben im Hörnumbecken in Abb. 5.2, so wird deutlich, dass im Becken ein Mangel an bestimmten Korngrößen ($d = 0,21$ mm und $d = 0,35$ mm) besteht. Dies ist ein Anzeichen dafür, dass das Sediment des Hörnumbeckens zu einem Großteil aus Material des Sylter Inselkerns besteht, in dem diese Korngrößen ebenfalls unterrepräsentiert sind. Das bedeutet, dass die Transportpfade innerhalb der Deutschen Bucht von nur geringer Ausdehnung sind, denn andernfalls sollten die Fraktionen $d = 0,21$ mm und $d = 0,35$ mm im Hörnumbecken nicht unterrepräsentiert sein.

Zusammenfassend folgt, dass im Hörnumbecken aufgrund des lokalen Mangels an feinkörnigem Sediment, der innerhalb der Deutschen Bucht relativ kurzen Sedimenttransportpfade und der Entfernung zu den schwebstoffreichen Ästuaren eine vergleichsweise geringe Verfügbarkeit an feinkörnigem Material vorliegen dürfte, weshalb es im unteren Bereich der ak-

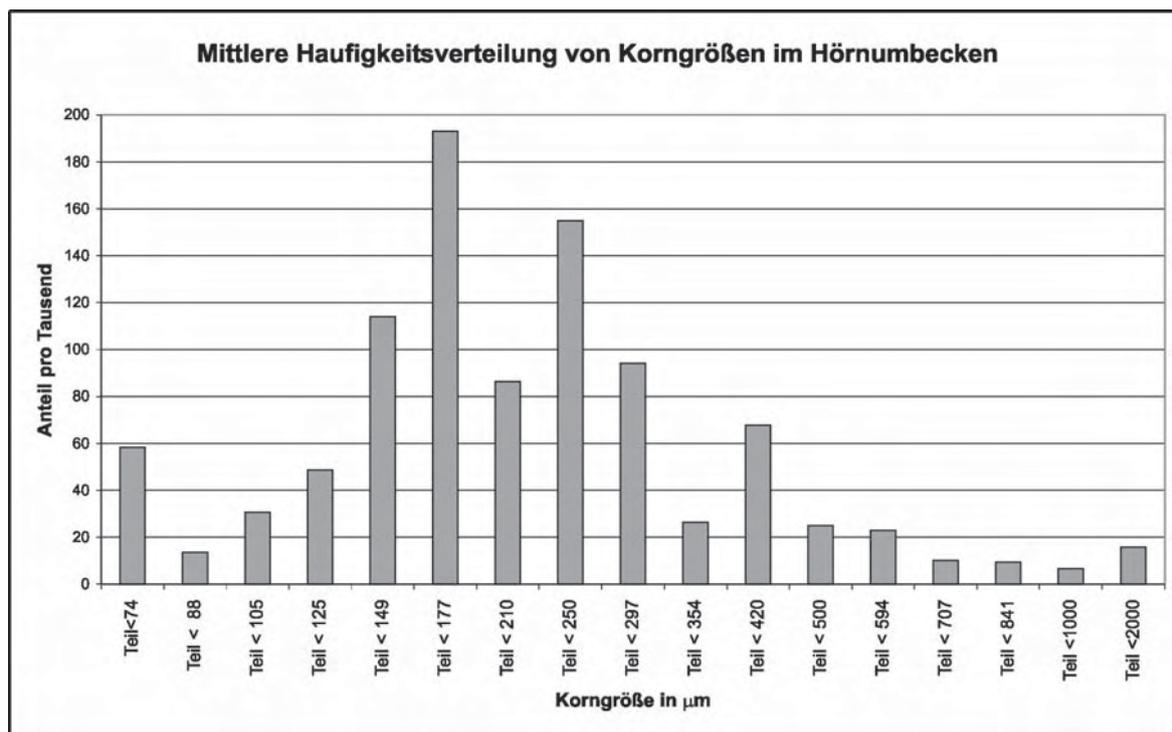


Abb. 5.2: Mittlere Kornverteilung Hörnumbecken, erstellt aus mehr als 500 Sedimentproben aus der Sedimentdatenbank des BSH

kumulationsrelevanten Konzentrationen des niederländischen Wattenmeeres (vgl. Tab. 1) einzuordnen ist. Damit reichte der Import an feinem Material nicht aus, um den Sedimentbedarf bei steigendem Meeresspiegel zu decken.

5.1.3 Modellierung der Akkumulation von feinkörnigem Material im Hörnumbecken

Um die Anlagerung von Feinkornmaterial unter verschiedenen hydrodynamischen Bedingungen zu untersuchen, wurden drei Rechnungen durchgeführt:

- Rechnung **TIDE**: Die Randbedingung für den Wasserstand wurde entsprechend der mittleren Tide gewählt.
- Rechnung **WELLE**: Es wurde eine repräsentative Seegangssituation ermittelt (HIRSCHHÄUSER et al., 2000). Hierbei wurde ein Westwind mit 5–10 m/s angesetzt. Das Seegangsklima kann als moderat beschrieben werden. Die Wasserstandsrandbedingung wurde entsprechend der mittleren Tide gewählt.
- Rechnung **STURM**: Eine stürmische Periode im Oktober 1996 mit Windgeschwindigkeiten von bis zu 25 m/s wurde ausgewählt. Der Windstau am Pegel Hörnum betrug bis zu 2 m.

Ziel der Studie war es zu ermitteln, inwiefern und in welchen Mengen feinkörniges Material, das mit der Tideströmung in das Hörnumbecken gelangt, dort unter verschiedenen hydrodynamischen Bedingungen zur Ablagerung kommen kann. Das morphodynamische Modell TIMOR verfügt, da es den Sedimenttransport in mehreren Kornklassen berechnet, über die Möglichkeit, den Verbleib einzelner Fraktionen nachzuvollziehen, sozusagen Sediment in

der Art eines Tracers „anzufärben“. Dabei verändert das Sediment seine physikalischen Eigenschaften nicht.

Dem feinkörnigen Material, welches in der Folge als Fraktion I bezeichnet wird, wurde eine Sinkgeschwindigkeit von $0,000032 \text{ m/s}$ zugewiesen. Die Anfangssuspensionskonzentration für dieses Material wurde im gesamten Becken zu 7 mg/l gewählt. Dies liegt in der Größenordnung der im KFKI-Forschungsvorhaben *Wasseraustausch Hörnumtief* für die Frühjahrsperiode gemessenen Suspensionskonzentrationen und steht auch in Übereinstimmung mit von POSTMA (1981) zusammengestellten Werten. Zu Anfang der Rechnung befindet sich dieses Material im Modell nicht in der Bodenschicht, so dass sein Verbleib einfach verfolgt werden kann. Die Hintergrundkonzentration dürfte einen spürbaren Einfluss auf die Modellierungsergebnisse haben, ihre quantitative Vorgabe ist allerdings von starken Unsicherheiten behaftet.

Daher werden zum Abschluss noch Ergebnisse bei Variation der Hintergrundkonzentration vorgestellt. Weiterhin wurde ein Material (Fraktion II) mit den gleichen physikalischen Eigenschaften im Boden vorgegeben, welches mit einem räumlich differenzierten Anteil gemäß der örtlichen maximalen Tideströmung angesetzt wurde (HIRSCHHÄUSER et al., 1998). Somit kann das prinzipielle Verhalten des feinkörnigen Materials unter den verschiedenen hydrodynamischen Bedingungen beobachtet werden.

Morphologieänderungen

Die Berechnungsergebnisse werden für den Zustand nach drei Tiden diskutiert, um eine Vergleichsmöglichkeit zur Simulation STURM zu ermöglichen.

In Abb. 5.3 links sind die Morphologieänderungen nach drei Tiden für Rechnung TIDE dargestellt. Die berechneten morphologischen Änderungen in dieser relativ kurzen Zeit sind klein. Nur an der südöstlichen Spitze der Insel Sylt werden Tiefenänderungen von bis zu 20 cm berechnet. Auf den Wattflächen werden nur sehr geringe morphologische Veränderungen berechnet, da die Tideströmungen hier nicht stark genug sind, um größere Mengen an Material zu transportieren. Diese Simulation ist nur für sehr ruhige Bedingungen repräsentativ.

Aufgrund der kurzen Berechnungsdauer trägt die Feinkornfraktion nur in sehr geringem Maße zu den Morphologieänderungen bei. Gleichwohl können Rückschlüsse über die im Gebiet verbleibenden Mengen dieser Fraktion getroffen werden. Da es sich bei der Akkumulation von feinkörnigem Material um einen fortwährend wirkenden Prozess handelt,

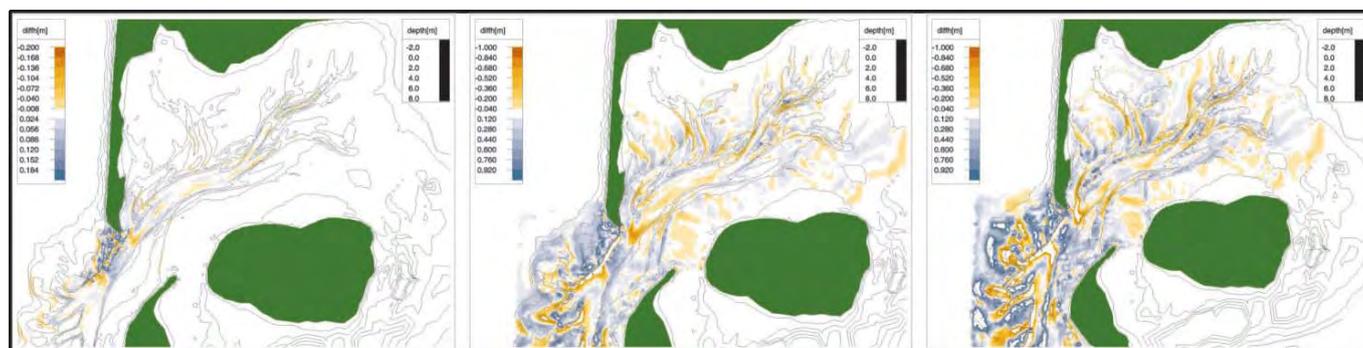


Abb. 5.3: Berechnete Tiefenänderungen in drei Tiden (blau: Erosion); links: TIDE, Mitte: WELLE, rechts: STURM

liegt seine Wirkung vor allem in der langfristigen Beeinflussung der Morphodynamik des Beckens.

Die berechneten Morphologieänderungen in Simulation WELLE, dargestellt in Abb. 5.3 Mitte, übersteigen deutlich die der Rechnung TIDE. Besonders auf dem Ebbdelta, wo die Wellen brechen und viel Material in Suspension gebracht wird, sowie im Hörnumtief sind die morphologischen Änderungen beträchtlich. Der westliche Bereich des Ebbdeltas wird durch die von Westen kommenden Wellen erodiert. Dieses Material wird in Suspension transportiert und kommt zwischen den Flachs aber auch im zentralen Bereich des Hörnumtiefs zur Ablagerung. Nur Bereiche, die nicht tiefer als ca. 8 m unter NN liegen, sind von der Erosion betroffen. Unterhalb dieses Horizonts sind die Bodenorbitalgeschwindigkeiten zu klein, um größere Mengen an Sediment aufzuwirbeln.

Aber auch auf den Wattflächen sind morphologische Änderungen zu beobachten. Einige Rinnenufer driften aufgrund der von Westen kommenden Wellen leicht in Richtung Osten.

Die größten morphologischen Änderungen treten bei der Rechnung STURM auf (s. Abb. 5.3 rechts). Diese Simulation spiegelt die Wirkung extremer Ereignisse wieder. Die Windgeschwindigkeit betrug bis zu 25 m/s am Windmesspfahl Westerland, wobei der Wind von Südwest auf Nordwest drehte; diese Abfolge ist typisch für Sturmereignisse in der Region. Der Windstau am Pegel Hörnum betrug bis zu 2 m.

Am Ebbdelta wurde Erosionen bis zu 1 m berechnet. Die Bodenorbitalgeschwindigkeit ist so groß, das auch Sediment aus Lagen unterhalb von 8 m unter NN aufgewirbelt werden kann. Das erodierte Material lagert sich zum Teil in den Rinnen zwischen dem Ebbdelta ab; ein anderer Teil wird in das Hörnumbecken transportiert und lagert sich hier in den Rinnen ab.

Auch die Wattflächen sind von stärkeren Morphologieänderungen betroffen. Die signifikante Wellenhöhe erreicht im Becken bis zu 1,2 m. Im Allgemeinen werden die Rinnenränder erodiert, und das Material wird in den Rinnen abgelagert, nämlich dort, wo die Bodenorbitalgeschwindigkeiten genügend klein sind. Aufgrund höherer Wasserstände und der daraus resultierenden höheren Wellen wird mehr Material transportiert. Teilweise wird das Material auf den hohen Wattflächen im südlichen Teil des Beckens abgelagert. Im Allgemeinen zeigen die morphologischen Änderungen ein ähnliches Muster wie bei der Rechnung WELLE, sie sind jedoch deutlich stärker ausgeprägt.

Reaktion der feinkörnigen Sedimentfraktion I

Die Analyse der Reaktion der feinkörnigen Sedimentfraktion I unter verschiedenen hydrodynamischen Bedingungen war das Hauptziel dieser Studie. Der Austausch von feinkörnigem Material zwischen Tidebecken und der offenen See spielt eine wichtige Rolle für das Anwachsen der Wattflächen mit steigendem Meeresspiegel. Generell unterliegt dieser Austauschprozess starken saisonalen Schwankungen, was durch die stark schwankende Primärproduktion bedingt ist. Analysiert man das Verhalten dieser Fraktion genauer, so lassen sich bei den untersuchten hydrodynamischen Bedingungen drei verschiedene Wirkungsmechanismen identifizieren:

- Eine Akkumulation von feinkörnigem Material im gesamten Becken, wenn der Einfluss des Seegangs vernachlässigt wird; dies führt zu einem Nettoimport von Material.
- Eine verminderte Deposition von Material westlich des Seegats, wenn der Seegang berücksichtigt wird; dies führt zu einem höherem Nettoimport von Material.

- Eine verstärkte Erosion von Material innerhalb des Beckens, wenn der Seegang berücksichtigt wird; dies führt zu einem größeren Nettoexport von Material.

Simulation TIDE

Wie Abb. 5.4 zu entnehmen ist, lagert sich das feinkörnige Material in dieser Berechnung im gesamten Becken ab. Dargestellt ist der Anteil dieser Fraktion in der durchmischten obersten Bodenschicht, die ungefähr die Höhe von Transportkörpern besitzt. Besonders in den Rinnen setzt sich anfangs viel von diesem Material ab. Das System hat allerdings im Zeitraum von drei Tiden noch kein Gleichgewicht erreicht. Dies ist in Abb. 5.5 zu erkennen, die die Entwicklung dieser Fraktion an einigen ausgewählten Berechnungsknoten zeigt: Anfangs steigt der Anteil an feinkörnigem Material in den Rinnen stark, dieses Material wird jedoch nach einiger Zeit auf die Wattflächen weitertransportiert.

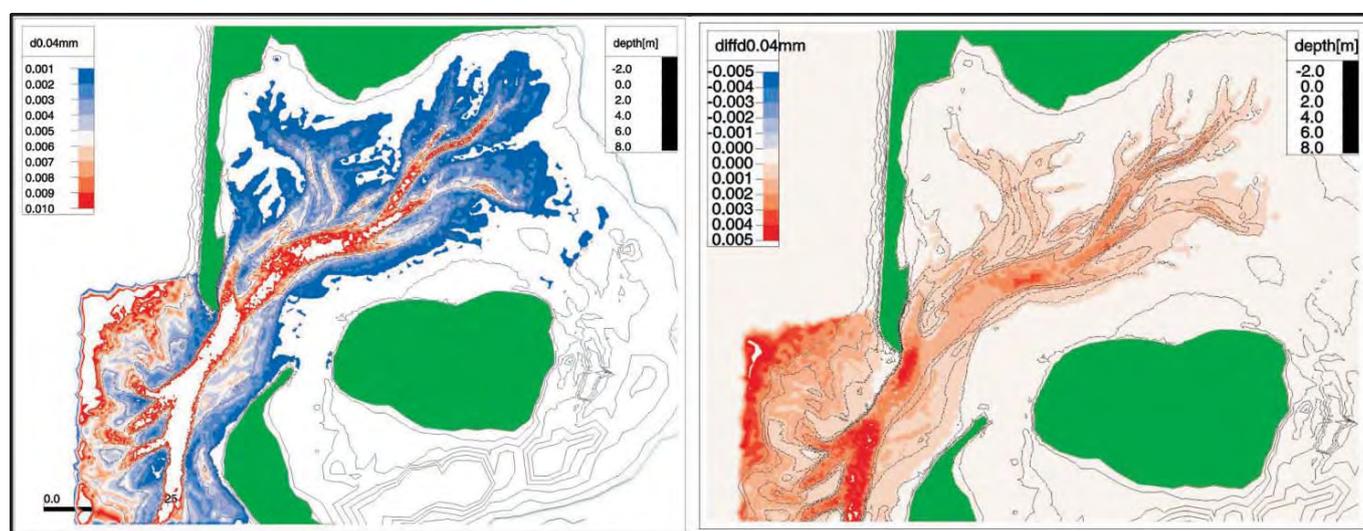


Abb. 5.4: Links: Anteil Fraktion I in der obersten Bodenschicht nach drei Tiden (Rechnung TIDE), rechts: Änderung des Anteils Fraktion I in der obersten Bodenschicht in der dritten Tide (Rechnung TIDE) (rot: Zunahme)

Zu berücksichtigen ist weiterhin, dass die Wattflächen temporär trocken fallen, so dass dort nicht jederzeit eine Ablagerung stattfinden kann. Bemerkenswert ist die Ablagerung westlich des Ebbdeltas. Die Tideströmung ist in diesem Bereich nicht so hoch, so dass bei Vernachlässigung des Seegangs ein Anwachsen des Anteils der Feinkornfraktion zu beobachten ist. Wie zu erwarten kommt es im Zeitraum von drei Tiden zu einem Nettoimport von feinkörnigem Material, wobei nur eine sehr kleine Varianz in der Zeit auftritt. Dies kann Abb. 5.10 entnommen werden.

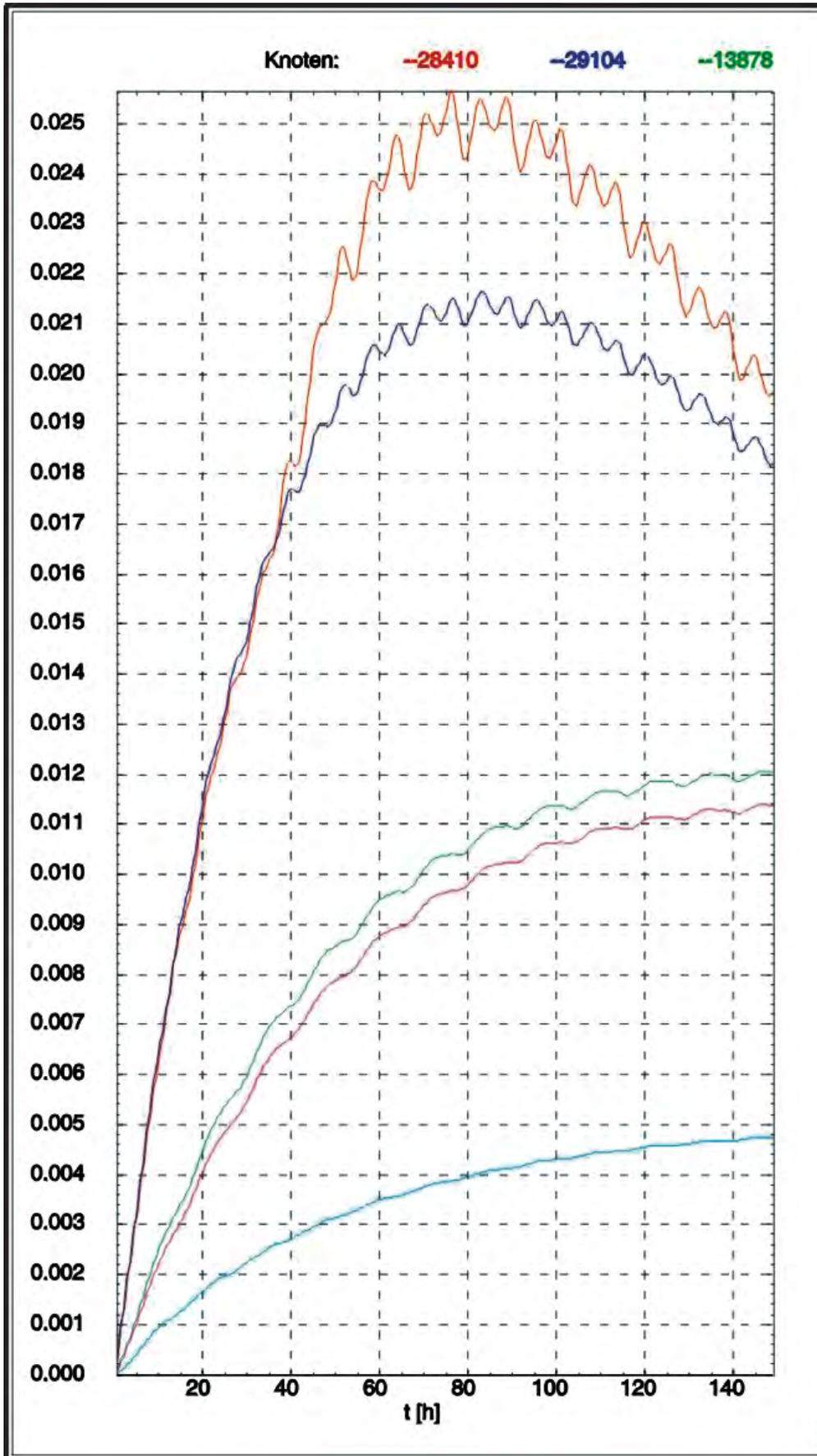


Abb. 5.5: Anteil Fraktion I in der obersten Bodenschicht an einigen ausgewählten Rinnenknoten

Simulation WELLE

Aufgrund der Seegangswirkung am Ebbdelta kann sich das feinkörnige Material dort nicht absetzen (s. Abb. 5.6). Weiterhin ist die Ablagerung westlich des Ebbdeltas im Vergleich mit den Ablagerungen in Simulation TIDE weit geringer. Dies kann durch die seegangsinduzierten Bodenschubspannungen erklärt werden.

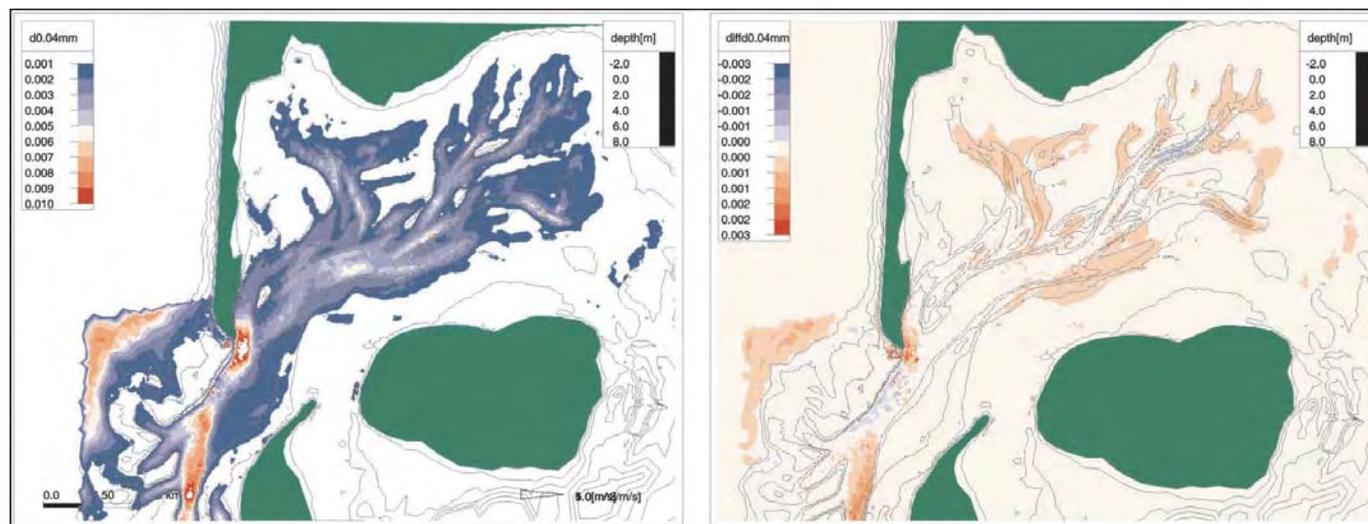


Abb. 5.6: Links: Anteil Fraktion I in der obersten Bodenschicht nach drei Tiden (Rechnung WELLE), rechts: Änderung des Anteils Fraktion I in der obersten Bodenschicht in der dritten Tide (Rechnung WELLE) (rot: Zunahme)

Im Allgemeinen wird ein größerer Teil des Materials in Suspension gehalten, wodurch sich weniger Material dieser Fraktion in die oberste Bodenschicht einmischt. Aus Abb. 5.6 rechts wird deutlich, dass sich das Material während der dritten Tide in den Endbereichen der Rinnen absetzt und sich für den Rest des Beckens eine dynamische Gleichgewichtssituation einstellt.

Ein Grund für den geringeren Anteil an feinem Material auf der Sohle der Rinnen im Vergleich zur Berechnung TIDE kann in der generellen Ablagerung auch anderer Fraktionen liegen, welche in der Berechnung WELLE in diesem Teil des Beckens stattfindet (siehe hierzu Abb. 5.3). Der relative Anstieg an feinen Anteilen ist kleiner, wenn auch anderes Material zur Ablagerung kommt.

In dieser Berechnung kommt es zum stärksten Import von feinkörnigem Material in das Becken (siehe Abb. 5.10). Die Ursache für diesen Import ist in der verminderten Deposition des Materials am Ebbdelta und dessen Transport in Suspension in das Becken zu suchen. Eine Deposition von feinkörnigem Material ist nur innerhalb des Beckens möglich, wo die Bodenschubspannungen kleiner sind.

Weiterhin findet ein Export über die Wattwasserscheide (Schnitt II, vgl. 5.1) hinweg ins Nachbarbecken statt. Dies geschieht aufgrund der leicht ostwärts gerichteten Strömung, welche durch westliche Winde induziert wird (siehe Abb. 5.9). Während ruhiger Wetterperioden (Berechnung TIDE) gibt es eine Nettoströmung in das Becken durch Schnitt II.

Simulation STURM

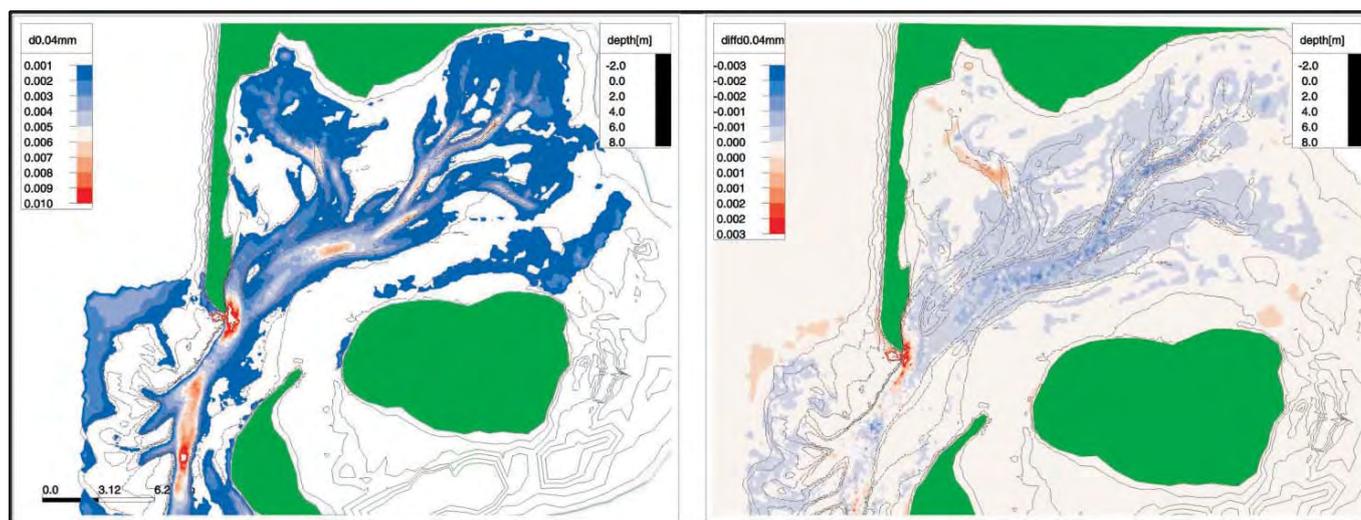


Abb. 5.7: Links: Anteil Fraktion I in der obersten Bodenschicht nach drei Tiden (Rechnung STURM), rechts: Änderung des Anteils Fraktion I in der obersten Bodenschicht in der dritten Tide (Rechnung STURM) (rot: Zunahme)

Während der Berechnung STURM unterscheiden sich die Strömungsverhältnisse stark von denen der anderen beiden Simulationen. Ein Vergleich bezüglich der Einteilung in drei Tiden ist nicht möglich, da die Dauer der ersten Tide durch die angenommenen Wasserstandsrandbedingung und den Windeinfluss verlängert wurde. Nach 37,5 h (drei Tiden) ist die hydrodynamische Bilanz zwischen ein- und ausströmendem Wasser noch nicht ausgeglichen, was bedeutet, dass der mittlere Wasserspiegel in dem Becken am Ende höher ist als zu Beginn der Berechnung. Dies führt zu einem Nettowasservolumentransport in das Becken von über 400 Mio. m³ während der ersten 12,5 h (s. Abb. 5.9). Darum ist es nicht überraschend, dass der Nettoimport von feinkörnigem Sediment während dieser Phase einen Maximalwert erreicht. Aber die Nettoströmung in das Becken ist nicht der einzige Grund für den starken Import von Sediment in das Becken. Abb. 5.7 zeigt, dass sich westlich des Seegats kein Feinkornmaterial ablagern kann, womit es in das Becken hinein transportiert wird. Andererseits bewirkt der stärkere Seegang innerhalb des Beckens eine verstärkte Aufnahme von Sediment. Am Ende des Sturmereignisses mit abflauendem Wind wird das Sediment, welches sich in hoher Konzentration in Suspension befindet, aufgrund der Ebbdominanz der Strömung aus dem Becken hinaus transportiert. Nach drei Tiden ist die hydrodynamische Bilanz wieder fast ausgeglichen. Während der letzten beiden Tiden wird ein Teil des anfangs importierten Materials wieder exportiert, was der aus dem Becken heraus gerichteten Nettoströmung kombiniert mit immer noch großen Suspensionskonzentrationen zugeschrieben werden kann. Neben dem Transport durch das Seegat ist der Transport von Material durch Schnitt II beträchtlich. Dies geschieht aufgrund hoher Wellen und eines hohen Wasserspiegels, die eine starke Strömung über die Wattwasserscheide bewirken.

In der dritten Tide findet ein Export von Material statt, und der Anteil an feinkörnigem Material in der obersten Bodenschicht sinkt, wie Abb. 5.7 rechts zu entnehmen ist. Dies bedeutet, dass der Verlust an Material nicht nur der aus dem Becken heraus gerichteten Nettoströmung zugerechnet werden kann.

Generell deutet die Simulation an, dass die Deposition zu Beginn des Sturms bedingt

durch eine starke Erosion von Material westlich des Seegats und einer innerhalb der ersten Tideperiode positiven hydrodynamischen Bilanz ansteigt; große Mengen dieses Materials werden aber bei fallendem Wasserspiegel wieder exportiert. Am Ende dieses Ereignisses kann nur eine geringe Netto-Deposition des Feinkornmaterials bilanziert werden.

Verteilung der Fraktion II in Suspension

Die Suspensionskonzentration der Fraktion II wurde in den unterschiedlichen Simulationen verglichen. Dieses Material war zu Beginn der Rechnung in der obersten Bodenschicht vorhanden und besitzt ansonsten dieselben physikalischen Eigenschaften, wie das in Suspension zugegebene Material der Fraktion I. Der Anteil von Fraktion II in der obersten Bodenschicht, die in etwa die Stärke von Transportkörpern hat, wurde durch ein Verfahren bestimmt, welches in Abhängigkeit von den Bodenschubspannungen, hervorgerufen durch die maximale Tideströmung, eine ortsvariable Anfangskornverteilung zuweist.

Die Suspensionskonzentration der Fraktion II bei Hochwasser kann Abb. 5.8 entnommen werden.

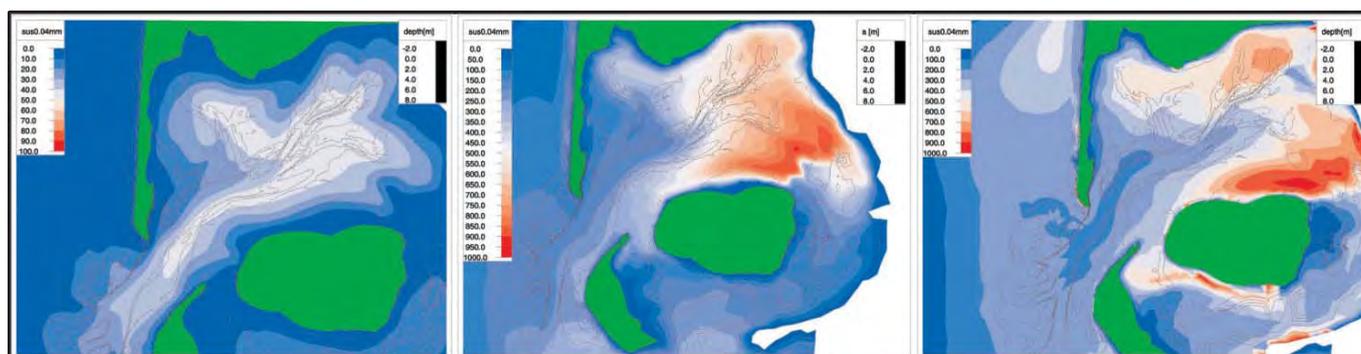


Abb. 5.8: Suspensionskonzentrationen bei Hochwasser. Links: Rechnung TIDE (rot: 100 mg/l); Mitte: Rechnung WELLE (rot: 1000 mg/l); rechts: Rechnung STURM (rot: 1000 mg/l)

Während der Simulation TIDE treten die höchsten Suspensionskonzentrationen in den Rinnen auf, weil dort höhere Geschwindigkeiten zu einer teilweisen Erosion der Fraktion führen. Dieses Material wird konvektiv in Suspension auf die Wattflächen transportiert, wo die Strömung nicht mehr stark genug ist, um Material zu erodieren. Im Vergleich mit den beiden anderen Rechnungen sind die Konzentrationen um eine Größenordnung kleiner.

In der Simulation WELLE wird das feinkörnige Material durch die Wellen auf den Wattflächen dort erodiert, wo die Kornfraktion in genügender Menge verfügbar ist und durch die Flutströmung Richtung Osten transportiert wird. Dies führt zu einem ausgeprägtem Maximum der Suspensionskonzentration im östlichen Teil des Beckens.

Betrachtet man die Suspensionskonzentration in der Simulation STURM (siehe Abb. 5.8 rechts), so wird eine ähnliche Situation deutlich: Die höchsten Konzentrationen sind im östlichen Teil zu finden. Aber ebenso gibt es erhöhte Konzentrationen im nordwestlichen Teil des Beckens, südlich der Insel Föhr (hervorgerufen durch den konvektiven Transport der windinduzierten Strömung) und westlich der Insel Sylt. Die erhöhte Konzentration muss den größeren Bodenorbitalgeschwindigkeiten zugeschrieben werden, welche zu einer verstärkten Erosion des Materials führen.

5.1.4 Bestimmung der akkumulationsrelevanten Konzentration unter verschiedenen hydrodynamischen Bedingungen

Das Ziel dieser Studie war es, die Anlagerung von feinkörnigem Material unter verschiedenen hydrodynamischen Bedingungen zu untersuchen. Um die Ergebnisse der Studie mit Daten anderer Autoren und der aus dem Sedimentbedarf ermittelten erforderlichen akkumulationsrelevanten Konzentration zu vergleichen, wurde eine Sedimentbilanz für das feinkörnige Material erstellt. Der Transport von Sedimenten der feinkörnigen Fraktion wurde für die drei in Abb. 5.1 dargestellten Schnitte bestimmt. Der Nettosedimenttransport in Suspension wurde für eine Zeitdauer von drei Tiden (ca. 36,5 h) gemäß der folgenden Beziehung ermittelt:

$$S = \int q \cdot c \cdot dt$$

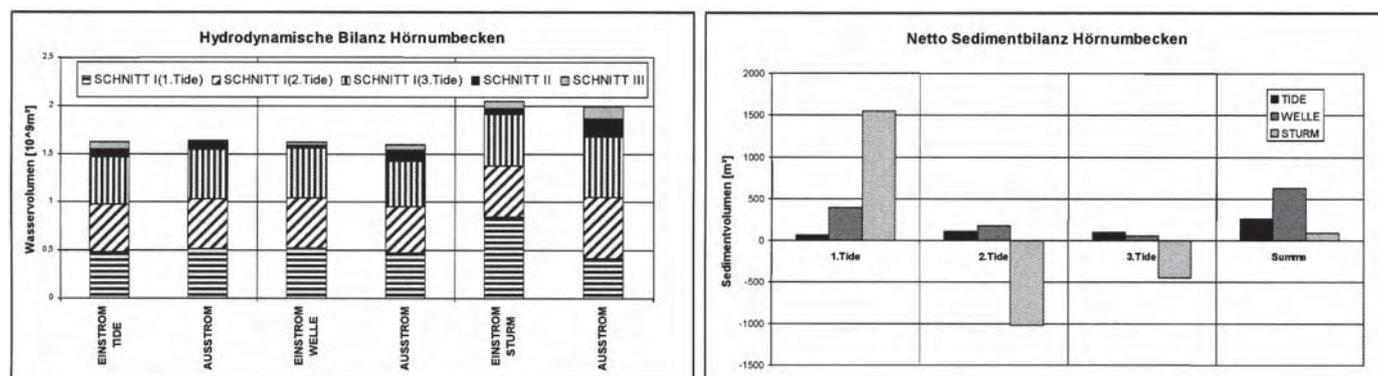


Abb. 5.9: Links: hydrodynamische Bilanz, rechts: Sedimentbilanz Fraktion I

Die Ergebnisse sind in Abb. 5.9 dargestellt. Der größte Nettoimport findet in der Berechnung WELLE statt. Die drei zuvor erwähnten Wirkungsmechanismen müssen berücksichtigt werden, um die Nettosedimentbilanz zu interpretieren:

Der erste Wirkungsmechanismus (Akkumulation von Feinkornmaterial im gesamten Becken bei Vernachlässigung des Seegangs) ist in allen drei Simulationen vorhanden; er kann separat in der Simulation TIDE analysiert werden. Ihm ist ein beträchtlicher Anteil der Akkumulation zuzuschreiben.

Eine Verminderung von Deposition westlich des Seegats ist nur im Falle von ausreichend starkem Seegang möglich. Durch diesen Wirkungsmechanismus wird in der Summe mehr Feinkornmaterial in das Becken hinein transportiert, was grundsätzlich eine stärkere Deposition ermöglicht. Diese wird aber andererseits durch die Wirkung des Seegangs innerhalb des Beckens und der daraus resultierenden Erosion von Material innerhalb des Beckens mit der Möglichkeit zum Export wieder reduziert. Ein Vergleich der Berechnungen WELLE und STURM macht deutlich, dass unter moderaten Bedingungen die Deposition steigt, wohingegen unter extremen Bedingungen der Effekt der Erosion von Material innerhalb des Beckens dominiert. Insgesamt wird in der Berechnung STURM die kleinste Nettodeposition beobachtet.

Betrachtet man die Sedimentbilanz in jedem Schnitt wird klar, dass der Hauptanteil des Materials durch das Seegat transportiert wird. Angesichts der negativen hydrodynamischen

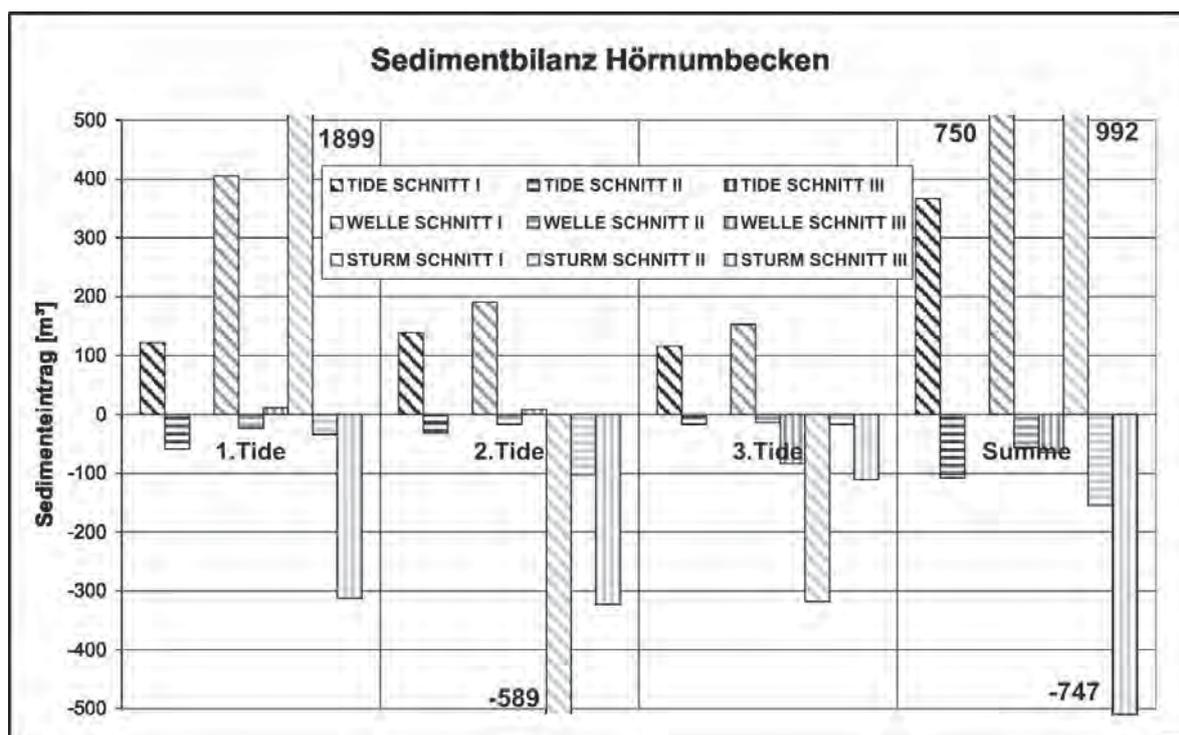


Abb. 5.10: Sedimentbilanz Fraktion I nach Schnitten

Bilanz in diesem Schnitt während einer mittleren Tide kann dies nur mit einer teilweisen Ablagerung des Materials im Becken erklärt werden.

Durch Seegang gewinnt die Verhinderung der Deposition von Material westlich des Seegats an Bedeutung. Dies wird durch den größeren Import von Sedimenten in den Simulationen STURM und WELLE im Vergleich zu TIDE belegt. Auf der anderen Seite führt die veränderte hydrodynamische Situation zu einem Sedimentexport durch Schnitt III zwischen Amrum und Föhr, wofür die relativ hohen, konvektiv vom Ebbdelta heran transportierten Suspensionskonzentrationen verantwortlich gemacht werden können.

Mithilfe des importierten feinkörnigen Sedimentvolumens und des mittleren Tidevolumens der Berechnung, die in Abb. 5.9 dargestellt ist, kann die mittlere akkumulationsrelevante Konzentration bestimmt werden.

Diese liegt bei 0,05 mg/l für die Berechnung STURM, 0,17 mg/l für die Berechnung TIDE und 0,42 mg/l für die Berechnung WELLE. Für die Berechnung STURM muss berücksichtigt werden, dass die hydrodynamische Bilanz am Ende der Berechnung noch nicht vollständig ausgeglichen ist, was bedeutet, dass es eventuell sogar keine Nettodeposition innerhalb des Beckens nach einem Sturmereignis gibt.

Die Akkumulation von feinkörnigen Sedimenten im Hörnumbecken ist unter mäßigem Seegang am größten. Die für Simulation WELLE ermittelte akkumulationsrelevante Konzentration c_a scheint im Vergleich mit Literaturwerten ein realistischer Wert zu sein. Allerdings wurde in keiner der Berechnungen die erforderliche akkumulationsrelevante Konzentration c_a , die ein Anwachsen der Wattflächen mit steigendem Meeresspiegel gewährleistet, erreicht. Ein Grund dafür könnte in der vorgegebenen Suspensionskonzentration der Feinkornfraktion im Wasser der offenen Nordsee von nur 7 mg/l sein.

Daher wurden ergänzend für die Rechnung WELLE eine Hintergrundkonzentration von 21 mg/l und für die Rechnung STURM eine von 42 mg/l angesetzt.

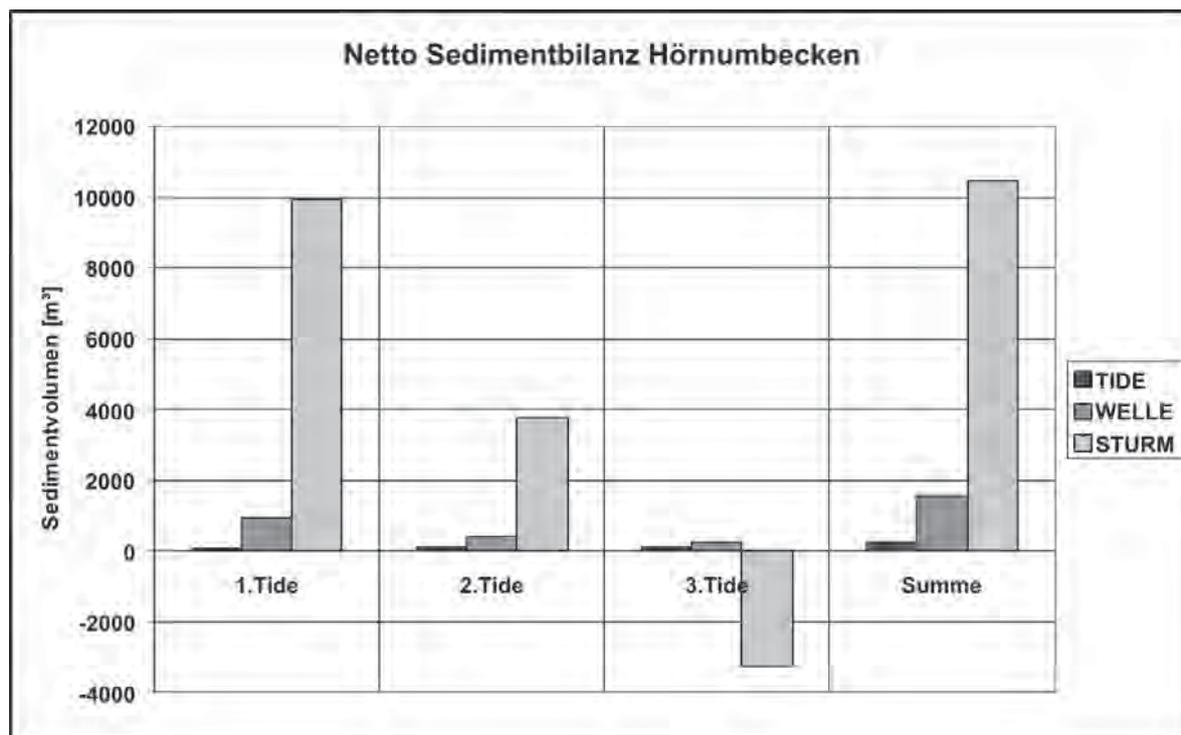


Abb. 5.11: Sedimentbilanz Fraktion I bei erhöhter Schwebstoffkonzentration in der offenen See für Rechnung WELLE und STURM

Tab. 5.2: Akkumulationsrelevante Konzentrationen für verschiedene Szenarien

	Hintergrundkonzentration [mg/l]	akkumulationsrelevante Konzentration [mg/l]
erforderlich		0,65
TIDE	7	0,17
WELLE	7 21	0,42 1,05
STURM	7 42	0,05 5,8

5.2 Sedimenttransportpfade Hörnumbecken unter Tidebedingungen

Weiterhin sollte untersucht werden, welche Transportpfade von anderen Korngrößen im System Tidebecken-Ebbdelta unter Tidebedingungen (Vernachlässigung des Seezugs) zurückgelegt werden. Die Analysen beziehen sich hierbei auf einen Zeitraum von 20 Tiden. Transportpfade, die über einen Zeitraum von Jahren zurückgelegt werden, können nur unter erheblichem Aufwand ermittelt werden, da hier im Gegensatz zu berechneten Tiefenänderungen keine Beschleunigung über den morphodynamischen Faktor möglich ist.

Die Analyse von zurückgelegten Sedimenttransportpfaden ist nur in einem Modell möglich, welches den Sedimenttransport in mehreren Kornklassen berechnet. Dabei wird eine Korngröße mit definierten physikalischen Eigenschaften auf zwei Klassen (A und B) aufgeteilt, wovon eine (A) nur in den interessierenden Bereichen eingesetzt wird, während sie im Rest des Gebietes nicht vorhanden ist. Dort tritt nur die physikalisch identische Kornklasse B auf. Dadurch wird ermöglicht, dass sich das physikalische System nicht verändert. Im Postprocessing sind die Kornklassen A und B jedoch zu unterscheiden.

Es wurden die Korngrößen 0,15 mm (Fraktion I und II), 0,3 mm (Fraktion III und IV) und 0,6 mm (Fraktion V und VI) untersucht. Die Fraktionen I, II und V wurden an vier charakteristischen Stellen (Theeknobssand, Hörnumtief, Eidumtief, Osterley) markiert und in ihrem an diesen Orten vorkommendem Anteil angesetzt. Im Rest des Gebietes sind diese Fraktionen nicht vertreten, sondern nur die physikalisch identischen Fraktionen II, IV und VI.

In Abb. 5.13 sind die Änderungen des Anteils der Tracerfraktionen in der obersten Bodenschicht auf der linken Seite, sowie rechts ihre Konzentration in Suspension nach 20 Tiden zum Zeitpunkt maximaler Ebbstromgeschwindigkeiten dargestellt.

Die blauen Bereiche auf den oberen Abbildungen markieren ungefähr den Bereich in dem das Tracermaterial vorgegeben wurde: Hier ist der Anteil in dem Zeitraum von 20 Tiden gesunken. Das Material wurde in die benachbarten roten Bereiche transportiert, wo der Anteil stieg. Zu beachten ist, dass der Anteil des Ausgangsmaterials örtlich variiert: So ist beispielsweise der Anteil der Fraktion 0,15 mm im Eidumtief höher als im Osterley.



Abb. 5.12: Ausgangslage des Tracermaterials; die untersuchten Korngrößen wurden örtlich variabel entsprechend ihrem Vorkommen angesetzt

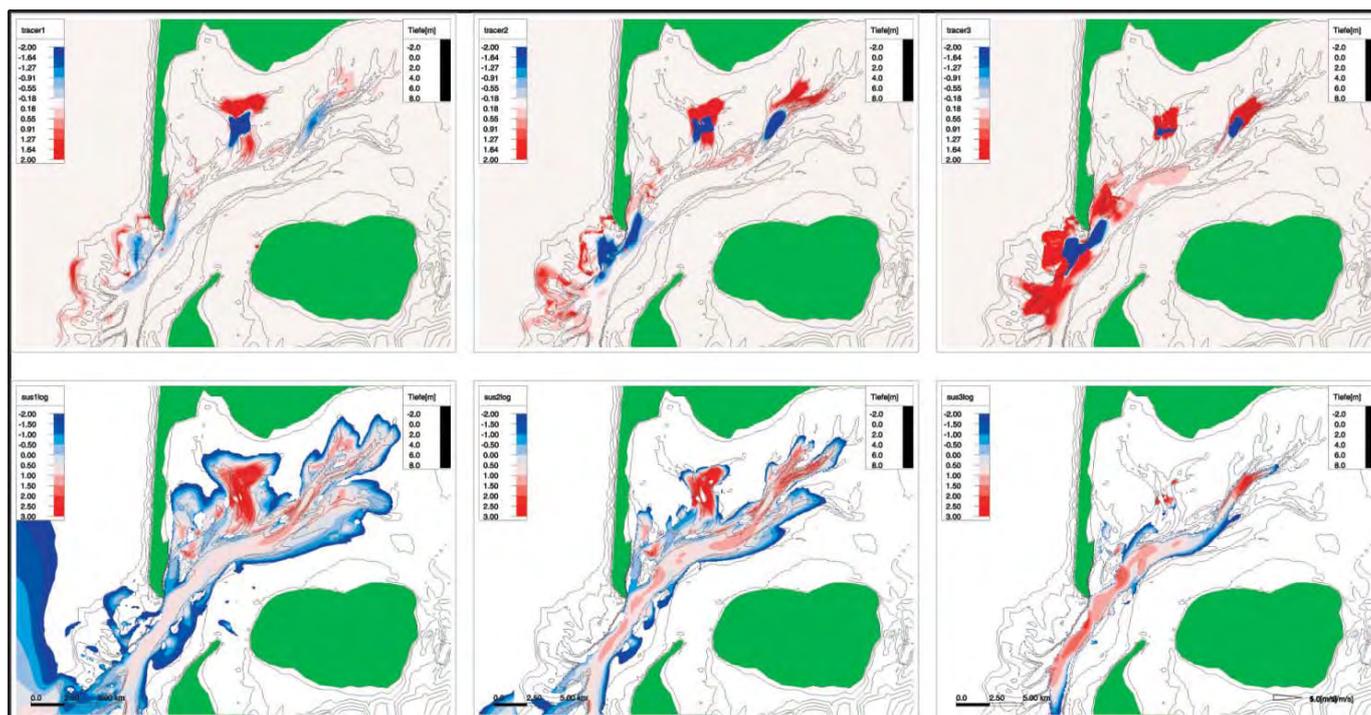


Abb. 5.13: Oben: Veränderung der Tracerfraktionen in der obersten Bodenschicht nach 20 Tiden (rot: Zunahme); unten: Verteilung der Tracerfraktionen in Suspension während maximaler Ebbstromgeschwindigkeit nach 20 Tiden; links: 0,15 mm, Mitte: 0,3 mm; rechts: 0,6 mm

Zu erkennen ist die stärkere Ausbreitung mit kleinerem Korndurchmesser. Die Fraktion 0,15 mm wird nach 20 Tiden sogar im Wasser der freien Nordsee westlich von Sylt angetroffen, allerdings in sehr geringer Konzentration. Die Ausbreitung der Korngrößen 0,15 mm und 0,3 mm in Suspension ist in den Rinnen flächendeckend, jedoch in geringer Konzentration dort, wo die Entfernung zu den Ursprungsorten groß ist.

5.3 Identifikation verschiedener Kornverteilungstypen

Für das Hörnumbecken stand eine Datenbasis aus der Sedimentdatenbank des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) zur Verfügung. Der Großteil der Proben wurde als Summengewichtskurven mit einer Abstufung in $\frac{1}{4}$ -PHI-Graden durch Siebanaalyse bestimmt, wobei die kleinste Fraktion größer 3,75 PHI (entspricht kleiner 0,074 mm) und die größte -1 PHI (entspricht 2 mm) war. Einige Proben waren in einer Auflösung von 1 PHI abgestuft. Hier wurden die Zwischenwerte interpoliert, was vor dem Hintergrund, dass die Distanz der Kornverteilungen zueinander damit nicht verändert wurde, als vertretbar angesehen wurde.

Weiterhin sind in der Datenbank Probenahmetiefe und Datum der Probenahme vermerkt, in wenigen Fällen auch die Uhrzeit, so dass in der Regel das zur Probenahme herrschende Fließregime bekannt ist. Das dürfte vor allem in den Rinnen von Bedeutung sein, wo sich zur Kenterzeit eine größere Menge an feinkörnigem Material absetzen kann, das bei wieder ansteigenden Strömungsgeschwindigkeiten resuspendiert werden kann.

Hinzu kommt, dass die jeweilige Gebietstopographie zum Probenahmezeitpunkt unbekannt ist, da die Proben über einen Zeitraum von 30 Jahren genommen wurden, so dass mit einem numerischen Modell berechnete Fließgeschwindigkeiten gewisse Unsicherheiten enthalten. Weitere chemische und physikalische Parameter, auch die veränderte Kornverteilung nach einer Vorbehandlung mit HCl, die teilweise erhoben wurden, fanden in der vorliegenden Arbeit keine Verwendung.

Insgesamt enthielt der berücksichtigte Datensatz 547 Sedimentproben.

Zunächst sollten verschiedene Kornverteilungstypen, die im Hörnumbecken auftreten, identifiziert werden. Die Identifikation solcher Kornverteilungstypen bildet den Ausgangspunkt zur hydraulischen Interpretation und zur Bestimmung einer Anfangskornverteilung für das morphodynamische Modell, wenn man annimmt, dass ähnliche Kornverteilungen unter ähnlichen hydrodynamischen Bedingungen entstanden sind.

Die Einteilung der Sedimentproben als Objekte in eine Anzahl von Klassen oder Cluster kann mit der Clusteranalyse durchgeführt werden. Prinzipiell stehen auch andere Verfahren zur Verfügung, die sich hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit jedoch nur dann abgrenzen lassen, wenn kausale Einschränkungen der zu klassifizierenden Objekte vorliegen, was hier nicht der Fall ist.

Grundsätzlich kann die Klassifikation mit den fraktionsweisen Siebrückständen beziehungsweise den Summenhäufigkeiten der Fraktionen als Faziesvariable oder aber mit abgeleiteten Parametern wie Median, Sortierung und Schiefe betrieben werden. Beides hat Vor- und Nachteile: Liegen beispielsweise Probe A mit 100 % knapp unterhalb einer Schranke X und Probe B zu 100 % knapp oberhalb einer Schranke X, so sind diese Proben physikalisch sehr ähnlich. Sie werden aber als vollkommen unterschiedlich eingestuft, da bei clusteranalytischen Verfahren die Reihenfolge keine Rolle spielt. Dieser Nachteil fällt weg, wenn die Summenhäufigkeit der Körner, die kleiner oder gleich der betrachteten Korngröße sind, einen bestimmten Grenzwert über-/unterschreiten. Umgehen kann man dieses Problem auch, wenn man abgeleitete Parameter wie Median, Schiefe und Sortierung heranzieht, jedoch geht damit auch ein Verlust der Basisinformation einher (BOBERTZ, 2001). Bei der hier vorliegenden sehr feinen Abstufung in $\frac{1}{4}$ -PHI-Grade wurde es als nicht notwendig erachtet, abgeleitete Parameter heranzuziehen. Es wurde mit den Summenhäufigkeiten gearbeitet.

Bei der Clusteranalyse werden auf der Basis von Ähnlichkeiten (oder Distanzen) die Objekte so gruppiert, dass die Unterschiede der Objekte eines Clusters möglichst klein und die Unterschiede zwischen den Clustern möglichst groß sind (BORTZ, 1977).

Zu unterscheiden sind hierarchische und nicht-hierarchische Verfahren: Die hierarchischen Verfahren beginnen mit der feinsten Partitionierung, bei der jedes Objekt ein eigenes Cluster bildet. Man berechnet dann die paarweisen Distanzen und fusioniert diejenigen beiden Objekte, die die geringste Distanz aufweisen. Mit jedem Schritt reduziert sich die Anzahl der Cluster um 1. In einem Dendrogramm wird zusammenfassend verdeutlicht, in welcher Abfolge die Objekte schrittweise zusammengefasst wurden und wie groß die Distanz zwischen den jeweils zusammengefassten Clustern ist. Ein Nachteil der hierarchischen Verfahren besteht darin, dass die Zuordnung eines Objektes zu einem Cluster im Laufe des Clusterprozesses nicht mehr revidierbar ist.

Für die Fusionierung zweier Cluster existieren unterschiedliche Kriterien:

- Minimum-Methode: Es werden die paarweisen Ähnlichkeiten zwischen den Objekten des einen Clusters zu den Objekten des anderen Clusters gebildet und diejenigen Cluster vereint, welche die zueinander am nächsten liegenden Objekte besitzen (nearest neighbour).

- Maximum-Methode: Hierbei werden für alle Paare von Clustern, die am weitesten entfernten Objekte bestimmt (furthest neighbour). Es werden diejenigen Cluster fusioniert, für die diese Maximal-Distanz minimal ist.
- Durchschnitts-Methode: Für je zwei Cluster wird der Durchschnitt aller Objektdistanzen berechnet. Die Cluster mit der geringsten durchschnittlichen Objektdistanz werden fusioniert.

Dem entgegen stehen die nicht hierarchischen Verfahren, bei denen die Anzahl der Cluster bereits von Beginn an bekannt sein muss. Man gibt die Zugehörigkeit eines Objektes zu einem Cluster vor und versucht, die Startgruppierung durch schrittweises Verschieben einzelner Objekte von einem Cluster zu einem anderen zu verbessern. Für eine vorgegebene Anzahl von Clustern kann man mit diesem Verfahren die tatsächlich beste Aufteilung der Objekte zu einem Cluster zu ermitteln.

Diese Vorgehensweise erschien für die vorliegende Fragestellung die sinnvollste zu sein, da es als Einschränkung angesehen wurde, dass eine einmal vorgenommene Zuordnung zu einem Cluster nicht revidierbar ist. Der Hauptnachteil der nicht hierarchischen Verfahren, nämlich dass die Anzahl der Cluster von Beginn an bekannt sein muss, kann dadurch umgangen werden, dass sie für unterschiedliche Anzahlen von Clustern durchgeführt werden kann. Das erschien realistisch, da davon auszugehen war, dass die Anzahl der Cluster klein ist, wenn diese noch hydraulisch interpretierbar sein sollen.

Als Beurteilungskriterium wurde das Varianz-Kriterium gewählt. Hierbei wird die quadrierte Abweichung aller Objekte eines Clusters vom Clusterdurchschnitt berechnet und über alle Cluster aufsummiert.

Die Clusteranalyse wurde mit der Software SPSS durchgeführt. Das Verfahren wurde zunächst mit einer Wahl von zwei Clustern begonnen. Die Wahl von zwei Clustern ergibt sich aus der Anfangsvermutung, dass zumindest zwischen Sedimentproben auf Wattflächen (eher vom Suspensionstransport geprägt) und solchen in den Tiderinnen (eher vom bodennahen Geschiebetransport geprägt) signifikante Unterschiede bestehen. Biologisch geprägte, von einer geologischen Barriere beeinflusste Proben und Proben des Ebbdeltas wurden als weitere Kandidaten für eigene Cluster angesehen. Es war weiterhin zu vermuten, dass sich weitere Cluster als Differenzierungen aus den hydrodynamischen Bedingungen erklären ließen.

Die Kornverteilungskurven der Clusterzentren für eine Gesamtzahl von fünf bis acht Clustern sind in Abb. 5.14 dargestellt.

Bei einer Einteilung in insgesamt fünf Cluster ergeben sich fünf deutlich voneinander getrennte Kornverteilungen, die sich untereinander (fast) nicht schneiden. Die feinste Klasse dürfte hierbei landnahen Positionen zugeordnet werden, an denen ein hoher Anteil bindigen Materials vorzufinden ist. Eventuell spielen hier auch biologische Prozesse eine Rolle. Die folgenden drei Klassen weisen alle eine gute Sortierung bei steigendem mittleren Korndurchmesser auf. Die größte Klasse ist deutlich schlechter sortiert (flacherer Verlauf der Kornverteilungskurve) und dürfte Proben in den Tiderinnen zuzuordnen sein.

Bei einer Einteilung in sechs Cluster kommt es zu einer Überschneidung der Kornverteilungskurven. Der neu gebildete Cluster speist sich dabei aus Objekten aller bisherigen Cluster, was aus Abb. 5.15 hervorgeht. Dies ändert sich beim Übergang von sieben zu acht Clustern. Hierbei teilt sich lediglich ein Cluster auf, derweil die anderen Cluster fast unverändert bleiben.

Das deutet darauf hin, dass die Grundverteilungen bereits bestimmt sind und sich weitere Cluster nur noch als Aufspaltungen jeweils eines Clusters bilden. Aus diesem Grund wurde die Einteilung der Sedimentproben in sieben Cluster als sinnvoll angesehen.

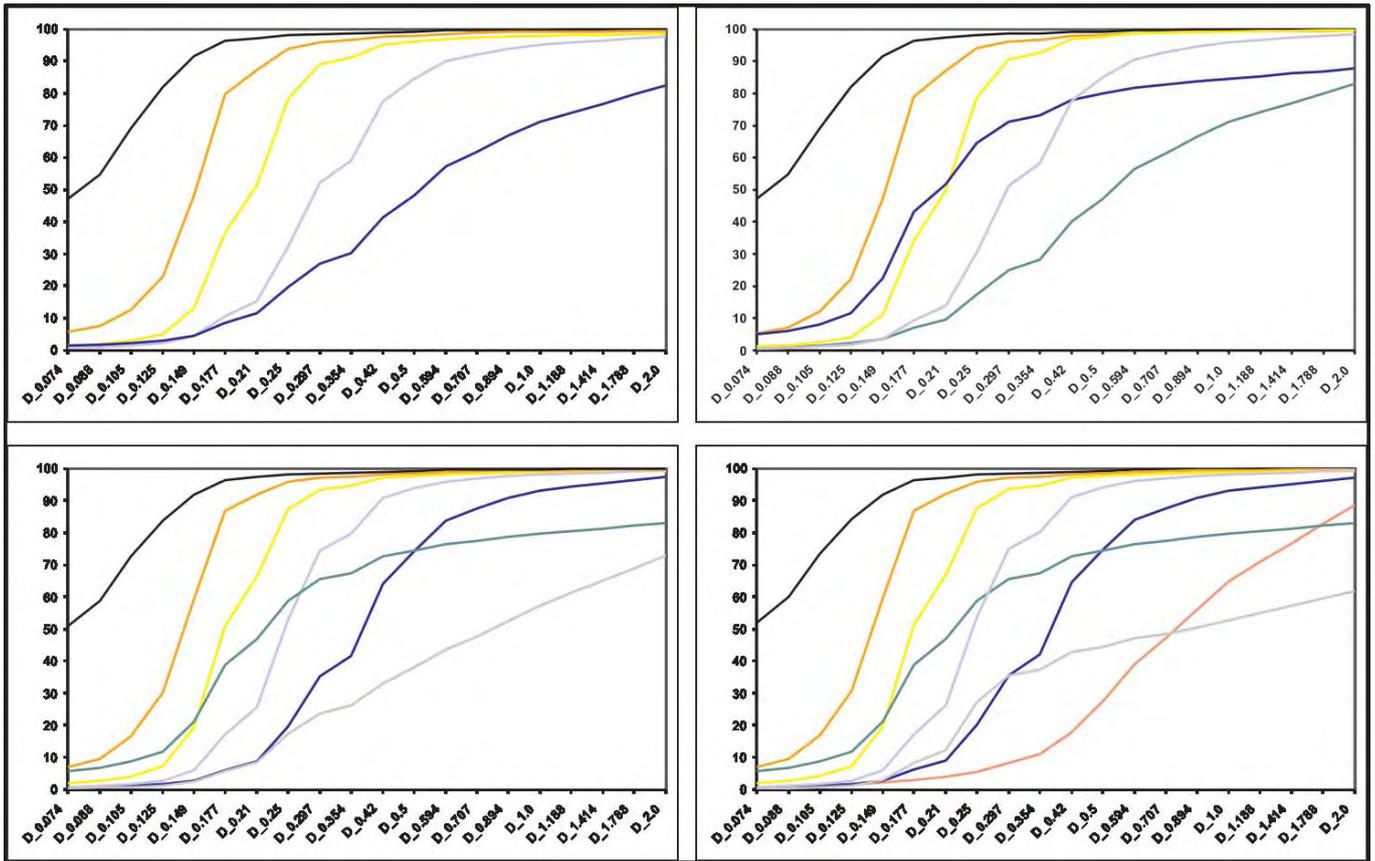


Abb. 5.14: Kornverteilung der Clusterzentren bei Einteilung in fünf bis acht Cluster

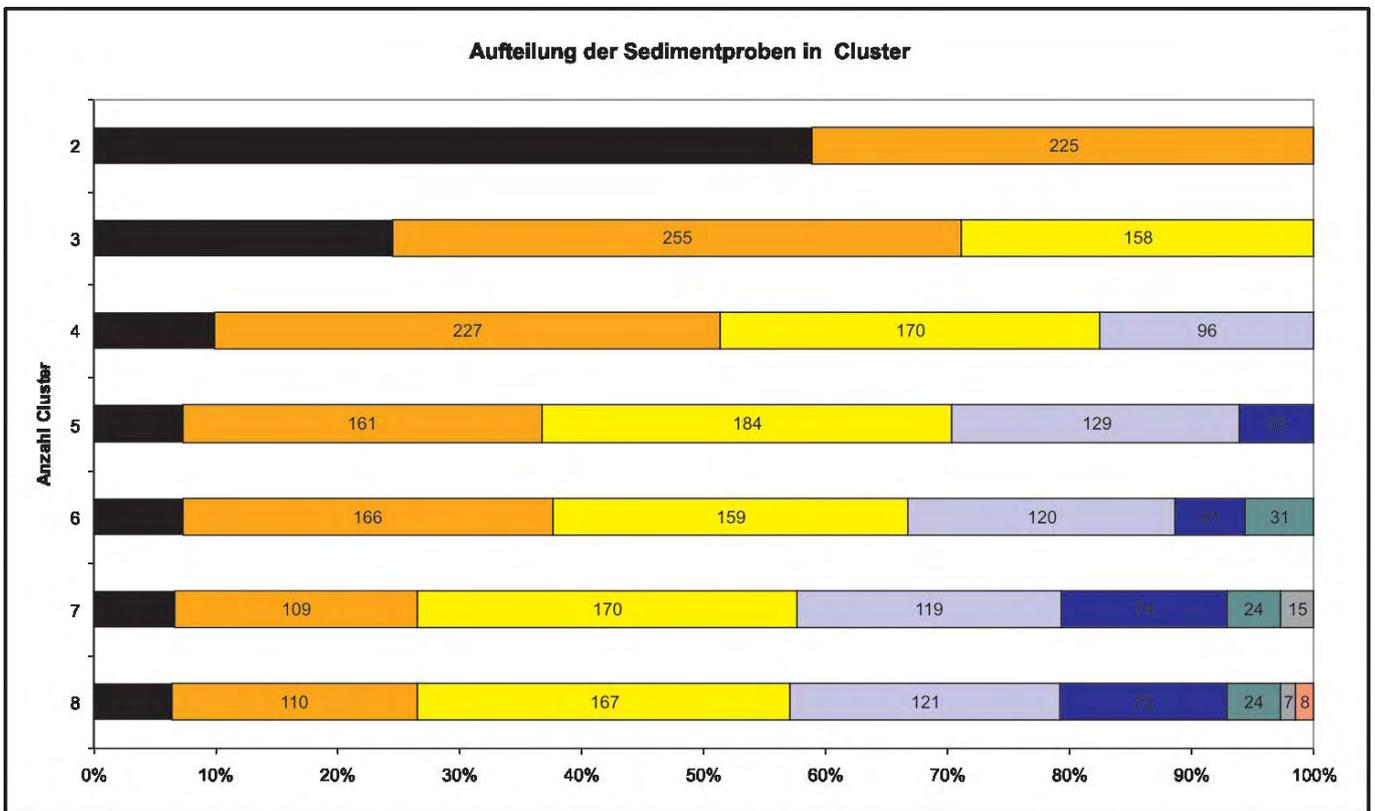


Abb. 5.15: Aufteilung der Sedimentproben in Cluster. Farbgebung angepasst an Abb. 5.14

Die mittlere euklidische Distanz der Sedimentproben zum Clusterzentrum ist in Tab. 5.3 dargestellt. Sie ist definiert als:

$$d_{ii} = \sqrt{\sum_{j=1}^p (x_{ij} - \bar{x}_{i\cdot})^2}$$

Hierin ist x_{ij} die Merkmalsausprägung des Merkmals j einer Sedimentprobe und $\bar{x}_{i\cdot}$ die Merkmalsausprägung im Clusterzentrum.

Tab. 5.3: Mittlere euklidische Distanz der Sedimentproben zum Clusterzentrum

Sedimentklasse	I	II	III	IV	V	VI	VII
mittleres euklidisches Distanzmaß	40,23	26,43	25,32	28,47	31,15	38,27	50,12

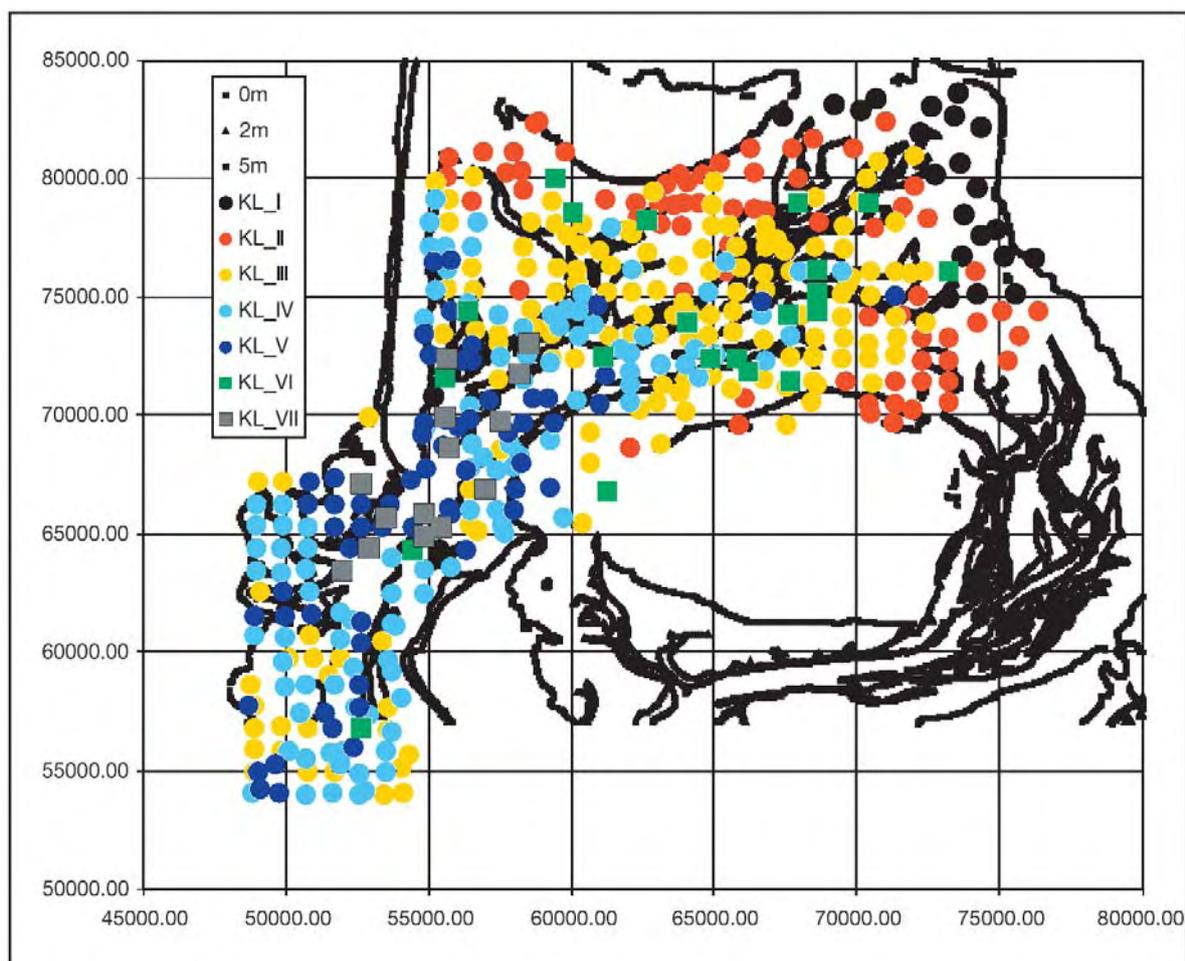


Abb. 5.16: Klasseneinteilung Sedimentproben Hörnumbecken bei einer Aufteilung in sieben Klassen mit 0-m-, 2-m- und 5-m-Tiefenlinie

Betrachtet man die Lage der Sedimentproben der einzelnen Cluster in Abb. 5.16, lässt sich folgende Systematik erkennen:

Klasse I (schwarz): Die Sedimentproben mit einem hohen Anteil an bindigem Material sind fast ausnahmslos im nordöstlichen Teil des Beckens zu finden. Hier fanden mit dem Bau des Hindenburgdammes 1927 und des Friedrich-Wilhelm-Lübke-Koogs 1954 zwei größere anthropogene Eingriffe statt. In einem ähnlichen Fall fand die morphologische Anpassung auf die Deichvorlegung in der Dithmarscher Bucht fast ausschließlich mit feinkörnigem Material statt (HIRSCHHÄUSER u. ZANKE, 2001). Ob der hohe Anteil an feinkörnigem Sediment mit diesen Maßnahmen in Verbindung steht, kann nur gemutmaßt werden. Auch biologische Einflüsse wie z.B. Muschelbesiedelungen können hier eine Rolle spielen.

Klasse II (orange): Diese Sedimentproben finden sich im nördlichen Teil des Beckens im Endbereich des Eidumtiefs sowie auf der Föhrer Schulter. Die gute Sortierung (s. Abb. 5.14) und die zonale Verteilung mit einer optisch gut erkennbaren Abgrenzung zu den Klassen I und III lässt hier auf eine Transportsortierung schließen.

Klasse III (gelb): Diese Sedimentproben sind auf den rinnennahen Wattflächen innerhalb des Hörnumbeckens und in den tiefergelegenen, seeganggeschützten Bereichen des Ebbdeltas anzutreffen. Derweil die Klassen I und II nur innerhalb des Tidebeckens und mit Entfernungen größer als 10–15 km vom Seegat zu finden sind, tritt diese Klasse auch am Ebbdelta auf.

Klasse IV (hellblau) und Klasse V (dunkelblau): Diese Proben sind an den Rinnenrändern anzutreffen. Die Entfernung zum Seegat übersteigt 10 km nur in wenigen Fällen. Die feinere Klasse IV wird weiter transportiert als Klasse V, weshalb auch hier eine Transportsortierung vermutet werden kann.

Klasse VI (grün): Diese Sedimentproben sind in Nachbarschaft von Klasse III anzutreffen. Betrachtet man die Kornverteilung des Clusterzentrums in Abb. 5.14, so ist festzustellen, dass die Zusammensetzung im feineren Bereich (bis zum d_{40}) ähnlich der von Klasse III ist. Der weitere Verlauf ist sehr flach und lässt eine geologische Barriere vermuten. Die Vertreter dieser Klasse sind somit nur teilweise durch Transportsortierung geprägt.

Klasse VII (grau): Die Vertreter dieser Klasse finden sich in direkter Nähe zum Seegat. Hier sind die hydrodynamischen Belastungen am größten. Dies spiegelt sich auch in der hohen Heterogenität dieser Gruppe wieder, denn bei Bildung von acht Clustern teilt sich diese Klasse auf, was in Abb. 5.15 dargestellt ist. In diesem Bereich ist von einer Transportsortierung auszugehen. Die hohe Intensität des Transports einerseits und die Variabilität aufgrund der instationären Strömung andererseits dürften in diesem Bereich aber schon kleinräumig zum Beispiel zwischen Transportkörperkamm und -tal sowie innerhalb einer Tide zwischen Kenterpunkt und maximaler Tidedrömung zu großen Variationen führen. Diese sind in den Sedimentdaten, da in den meisten Fällen keine genauen Informationen über den Probenahmezeitpunkt vorliegen, nicht differenziert erfasst.

Die Klasseneinteilung der Sedimentproben durch eine Clusteranalyse offenbart also mit Ausnahme von Klasse VI eine Systematik, die den Schluss zulässt, dass die Kornverteilungen durch eine Transportsortierung geprägt sind.

Betrachtet man den Anteil der Sedimentcluster an einer Sedimentfraktion (dargestellt in Abb. 5.17) in Verbindung mit der räumlichen Zuordnung, so liegt die Vermutung einer Transportsortierung nahe. Beim Übergang von einer Klasse zur angrenzenden nächst feineren nimmt der Anteil gröberer Fraktionen ab, derweil der Anteil feinerer Fraktionen steigt. Die Länge des Transportweges scheint hier von Bedeutung zu sein.

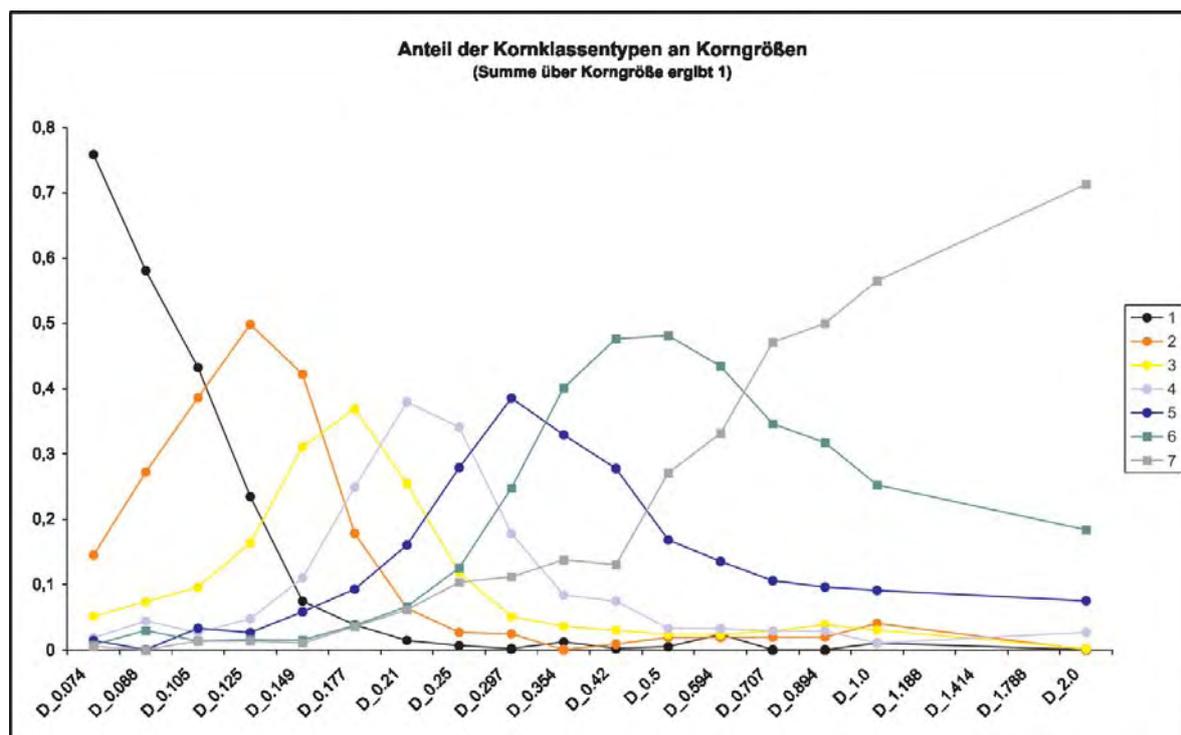


Abb. 5.17: Anteil der Sedimentklassen an Kornfraktionen (Summe über eine Fraktion ergibt 1.0)

6. Zusammenfassung

Ziel des Forschungsvorhabens *Langfristige Sedimentdynamik des Systems Tidebecken-Ebbdelta unter besonderer Berücksichtigung von verändertem Seegang und Wasserständen* war es, die derzeitigen Möglichkeiten der morphodynamischen Modellierung des Systems Tidebecken-Ebbdelta aufzuzeigen.

Zentral sollte hierfür eine morphologische Matrix erstellt werden. Die morphologische Matrix setzt sich aus den morphodynamischen Wirkungen verschiedener Einzelereignisse zusammen. Durch Kombination und Wichtung dieser Einzelereignisse sollte eine bestmögliche Annäherung an einen natürlichen Referenzzustand erreicht werden.

Weitere Untersuchungsschwerpunkte lagen auf Sensitivitätsstudien bezüglich eines steigenden Meeresspiegels und eines veränderten Seegangs. Zusätzlich wurden die im System Tidebecken-Ebbdelta zurückgelegten Sedimenttransportpfade aufgezeigt.

Wichtigste Projektergebnisse waren folgende:

- Die morphodynamische Modellierung der Dithmarscher Bucht unter Anwendung einer morphologischen Matrix erbrachte in weiten Teilen des Gebiets sowohl vom Trend als auch von der Größenordnung eine sehr gute Übereinstimmung mit einem natürlichen Referenzzustand. Die beste Übereinstimmung wurde mit einer Kombination aus Situationen mit Wind aus westlicher, südöstlicher und nördlicher Richtung erreicht.
- Für einen angesetzten Meeresspiegelanstieg ergab sich eine leicht erhöhte Sedimentation auf den Wattgebieten gegenüber den heutigen Verhältnissen. In der Haupttiderinne Piep kam es aufgrund der höheren Tidestromgeschwindigkeiten zu einer verstärkten Erosion.
- Die morphodynamische Folge einer Erhöhung der Auftretenswahrscheinlichkeit von Starkwindereignissen insbesondere aus süd- und südwestlicher Richtung ist eine leicht verstärkte Erosion auf den Wattgebieten.

- Bei Kombination dieser beiden Szenarien ergibt sich eine leicht erhöhte Erosion auf den Wattflächen, die von einer verstärkten Sedimentation in den Endbereichen der Priele mehr als kompensiert wird.
- Es wurde untersucht, ob das unter verschiedenen hydrodynamischen Randbedingungen ins Untersuchungsgebiet Hörnumbecken eingetragene Feinkornmaterial im Becken sedimentieren kann und ob die Größenordnung der Sedimentation ausreichend ist, um den durch einen Meeresspiegelanstieg hervorgerufenen Materialbedarf zu decken. Dies war bei einer angenommenen Suspensionskonzentration in der offenen See von 7 mg/l weder unter reinen Tidebedingungen noch bei mäßiger Seegangsbelastung oder einem Sturm der Fall. Bei einer Erhöhung der Suspensionskonzentration in der offenen See auf 21 mg/l bei mäßigem Seegang und 42 mg/l bei einem Sturm konnte der zusätzliche Materialbedarf bei steigendem Meeresspiegel gedeckt werden. Es wurden weiterhin die im System Tidebecken-Ebbdelta auftretenden Sedimenttransportpfade beispielhaft aufgezeigt.

7. D a n k s a g u n g

Das Forschungsvorhaben Langfristige Sedimentdynamik des Systems Tidebecken-Ebbdelta unter besonderer Berücksichtigung von verändertem Seegang und Wasserständen wurde als Projekt des Kuratoriums für Forschung im Küsteningenieurwesen vom Bundesministerium für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen KIS028 gefördert.

8. S c h r i f t e n v e r z e i c h n i s

- BARTHOLDY, J. u. PHEIFFER MADSEN, P.: Accumulation of Fine Grained Material in a Danish Tidal Basin, *Marine Geology* 67, 121–137, 1985.
- BOBERTZ, B.: Regionalisierung der sedimentären Fazies der südwestlichen Ostsee, Dissertation an der mathematisch-naturwissenschaftlichen Fakultät der Ernst-Moritz-Arndt-Universität Greifswald, 2001.
- BORTZ, J.: Statistik für Sozialwissenschaftler, Springer Verlag 1977.
- Delft Hydraulic Laboratory: Zware metalen in sedimenten van de Waddenzee, Report M 1839, (1980), 88p., 1980.
- DE VRIEND, H. J.; CAPOBIANCO, M.; CHESHER, T.; DE SWART, H. E.; LATTEUX, B. u. STIVE, M. J. F.: Approaches to Long-Term Modelling of Coastal Morphology: a Review, *Coastal Engineering* 21, 1993.
- EISMA, D.: Supply and Deposition of Suspended Matter in the North Sea. In: Nio, Shuttenham and van Weering (Edts.), *Holocene Marine Sedimentation in the North Sea Basin*, Blackwell, London, 415–428, 1981.
- FERK, U.: Folgen eines beschleunigten Meeresspiegelanstiegs für die Wattgebiete der niedersächsischen Nordseeküste, *Küste* 57, 135–156, 1995.
- GAST, R., KÖSTER, R. u. RUNTE, K.-H.: Die Wattsedimente in der nördlichen und mittleren Meldorfer Bucht, *Die Küste*, Heft 40, 1984.
- HIRSCHHÄUSER, T.; MEWIS, P. u. ZANKE, U.: Determination of the Initial Particle Size Distribution for Morphodynamic Modeling in Tidal Areas, *Proceedings of the 3rd ICHE*, Cottbus, 1998.
- HIRSCHHÄUSER, T.; MEWIS, P.; ZANKE, U. u. WITTING, M.: Determination of Representative Wind Situations for the Long-Term Morphology of the Hörnum Tidal Basin, *Proceedings of the 4th ICHE*, Seoul, 2000.
- HIRSCHHÄUSER, T. u. ZANKE, U.: Morphologische Langfristprognose für das System Tidebecken – Außensände am Beispiel Sylts und der Dithmarscher Bucht, *Mitteilungen des Instituts für Wasserbau und Wasserwirtschaft der TU Darmstadt*, Heft 102, 2001.
- LATTEUX, B.: Techniques for Long-Term Morphological Simulation Under Tidal Action, *Marine Geology* 126, 1995.

- MEYER-PETER, E. u. MÜLLER, R.: Eine Formel zur Berechnung des Geschiebetriebes. Schweizer Bauzeitung, 1949.
- NIEMEYER, H. D.: Wave Climate Study in the Region of the East Frisian Islands and Coast. Proc. 16th Int. Conf. Coast. Engg. Hamburg/ Germany. ASCE, New York, 1979.
- NIEMEYER, H. D.: Über den Seegang an einer inselgeschützten Wattküste. BMFT-Forschungsber. MF 203, 1983.
- NIEMEYER, H. D. et al.: Untersuchungen zur Morphodynamik des Wattenmeeres im Forschungsvorhaben WADE, Die Küste, H. 57, 65–94, 1995/1.
- NIEMEYER, H. D.; BRANDT, G.; GÄRTNER, J.; GLASER, D.; GRÜNE, J.; JENSEN, F. u. KAISER, R.: Naturuntersuchungen von Wattseegang an der deutschen Nordseeküste. Ber. Forsch.-Stelle Küste, Bd. 40, 1995/2.
- POSTMA, H.: Exchange of Material Between the North Sea and the Wadden Sea, Marine Geology 40, 1981.
- RENGER, E.: Quantitative Analyse der Morphologie von Wateinzugsgebieten und Tidebecken, Mitteilungen des Franzius Instituts der TU Hannover, Heft 43, 1–160, 1976.
- RIS, R. C.: Spectral Modeling of Wind Waves in Coastal Areas, Communications on Hydraulic and Geotechnical Engineering, TU Delft, 1997.
- VAN RIJN, L.: Principles of Coastal Morphology, Aqua Publications, 1998.
- ZANKE, U.: Sachstandsbericht zur Entwicklung eines numerischen Modells mit beweglicher Sohle, TU Darmstadt (unveröffentlicht), 1995.
- ZANKE, U.: Zur Physik von strömungsgetriebenem Sediment (Geschiebetrieb). Mitt. TU Darmstadt, Inst. für Wasserbau u. Wasserwirtschaft, Heft 106, 1999.
- ZANKE, U.: On the Physics of Flow Driven Sediments. Int. Journal of Sediment Research, Beijing. Vol. 16, No. 1, 2001.