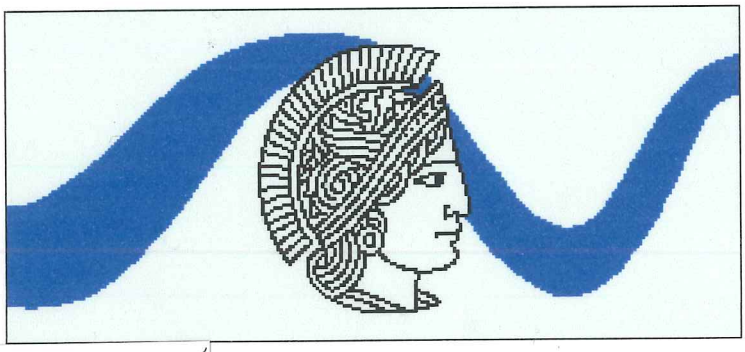
Forschungsvorhaben

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

Förderkennzeichen KIS 028

- Abschlussbericht -



Bundesanstalt für Wasserbau
KFKI — Bibliothek
Wedeler Landstraße 157
22559 Hamburg

Eingang:
Signatur: E 35034 Zit

Projektleiter: Prof. Dr.-Ing. habil. Zanke
Projektbearbeiter: Dipl.-Ing. Thomas Hirschhäuser

Institut für Wasserbau TU Darmstadt

INHALTSVERZEICHNIS

1 KURZFASSUNG 1

2 KONZEPTION DES FORSCHUNGSVORHABENS 3

2.1 ZIELSETZUNG 3
2.2 FÖRDERDAUER 4

3 PROJEKTGEBIET DITHMARSCHER BUCHT 5

4 MORPHOLOGISCHE MATRIX 6

4.1 ERMITTLUNG DES REFERENZZUSTANDES 6
4.2 ERMITTLUNG DER SEDIMENTOLOGISCHEN RANDBEDINGUNG 9
4.3 ERSTELLUNG DER MORPHOLOGISCHEN MATRIX 10
4.3.1 Rechnungen mit Variation der ins Gebiet strömenden Feinstschwebstoffe 11
4.3.2 Rechnungen mit parametrisierter Sekundärströmung 12
4.3.3 Rechnungen mit Variation des Seegangs 13
4.4 PROGNOSEZEITRAUM 17

5 SENSITIVITÄTSSTUDIEN VERÄNDERTER SEEGANG UND WASSERSTAND 20

5.1 ANSTIEG DES MITTLEREN MEERESSPIEGELS 20
5.2 VERÄNDERTER SEEGANG 21
5.3 KOMBINATION AUS MEERESSPIEGELANSTIEG UND VERÄNDERTEM SEEGANG 24

6 KÜSTENLÄNGSTRANSPORT 26

7 SEDIMENTTRANSPORTPFADE 29

7.1 AKKUMULATION VON FEINKÖRNIGEM SEDIMENT IM HÖRNUMBECKEN 29
7.1.1 Das Untersuchungsgebiet 29
7.1.2 Sedimentbedarf im Hörnumbecken bei steigendem Meeresspiegel 30
7.1.3 Modellierung der Akkumulation von feinkörnigem Material im Hörnumbecken . 32
7.1.3.1 Morphologieänderungen 33
7.1.3.2 Reaktion der feinkörnigen Sedimentfraktion I 34
7.1.3.2.1 Simulation TIDE 35
7.1.3.2.2 Simulation WELLE 36
7.1.3.2.3 Simulation STURM 37
7.1.3.3 Verteilung der Fraktion II in Suspension 38
7.1.4 Bestimmung der akkumulationsrelevanten Konzentration unter verschiedenen hydrodynamischen Bedingungen 39
7.1.5 Zusammenfassung 41
7.2 SEDIMENTTRANSPORTPFADE HÖRNUMBECKEN UNTER TIDEBEDINGUNGEN 42
7.3 IDENTIFIKATION VERSCHIEDENER KORNVERTEILUNGSTYPEN 44

8 MORPHODYNAMISCHE MODELLIERUNG DER BIODEPOSITION IN EINEM TESTFELD DER DITHMARSCHER BUCHT 50

8.1 BERECHNUNG DER BIOFILTRATION UND -DEPOSITION 50
8.2 ZERFALL DER KOTPILLEN 51
8.3 KONSOLIDIERUNG DER ZERFALLENEN KOTPILLEN 53
8.4 MODELLGEBIET DITHMARSCHER BUCHT 57
8.4.1 Sedimentverteilung in der Dithmarscher Bucht 59
8.4.2 Biodeposition 60

8.4.2.1 Gemessene Biodeposition 61
8.5 RECHENPARAMETER 62
8.5.1 Bathymetrie und Sedimentverteilung *62*
8.5.2 Modellgitternetz *62*
8.5.3 Wasserstand und Windgeschwindigkeit Büsum *63*
8.5.4 Besiedelungsdichte mit cerastoderma edule *63*
8.5.5 Parameter für das Teilmodul Biodeposition *66*
8.5.6 Parameter für das Teilmodul Konsolidierung *66*
8.6 ERGEBNISSE DER MORPHODYNAMISCHEN RECHNUNGEN 66
8.6.1 Einfluss der Biodeposition *68*
8.6.2 Einfluss des Zerfalls von Kotpillen *69*
8.6.3 Einfluss der kritischen Geschwindigkeit für Erosion $v_{cr,E,bio}$ *70*
8.6.4 Einfluss der Besiedelungsdichte *73*
9 LITERATURVERZEICHNIS **77**

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

ABBILDUNG 3.1: LAGE DES PROJEKTGEBIETES DITHMARSCHER BUCHT 5
ABBILDUNG 4.1: GEMESSENE TIEFENDIFFERENZEN FÜR UNTERSCHIEDLICHE ZEITRÄUME (BLAU: EROSION) 7
ABBILDUNG 4.2: UMGELAGERTES SEDIMENTVOLUMEN PRO M TIEFENSCHICHT 1969 – 1979 8
ABBILDUNG 4.3: UMGELAGERTES SEDIMENTVOLUMEN PRO M TIEFENSCHICHT 1979 - 1990 8
ABBILDUNG 4.4: ABWEICHUNG DER AUFTRETENSWAHRSCHEINLICHKEIT VON STARKWINDEREIGNISSEN VOM DURCHSCHNITTSJAHR 9
ABBILDUNG 4.5: GLOBALE SEDIMENTBILANZ DITHMARSCHER BUCHT 10
ABBILDUNG 4.6: LINKS: GEMESSENE TIEFENÄNDERUNGEN 1979 – 1982; RECHTS: BERECHNETE TIEFENÄNDERUNGEN 1979 – 1982 (BLAU: EROSION); SCHWEBSTOFFEINTRAG ÜBER OFFENEN RAND 60 MG/L 11
ABBILDUNG 4.7: LINKS: BERECHNETE TIEFENÄNDERUNGEN 1979 - 1982 OHNE PARAMETRISIERTE SEKUNDÄRSTRÖMUNG; RECHTS: BERECHNETE TIEFENÄNDERUNGEN 1979 – 1982 MIT PARAMETRISIERTER SEKUNDÄRSTRÖMUNG 12
ABBILDUNG 4.8: MITTLERE AUFTRETENSWAHRSCHEINLICHKEIT VERSCHIEDENER WINDSITUATIONEN AN DER WINDMEßSTATION BÜSUM VON 1967 – 2001 13
ABBILDUNG 4.9 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 14
ABBILDUNG 4.10 EINZELEREIGNISSE MORPHOLOGISCHE MATRIX. VON OBEN NACH UNTEN: LINKS NO 12.5 M/S (6.9 TIDEN, WST – 0.47 M, THB X 1.03), SO 12.5 M/S (22.1 TIDEN, WST – 0.41 M, THB X 0.99), SW 12.5 M/S (111.8 TIDEN, WST + 0.3 M, THB X 1.03), NW 12.5 M/S (107.0 TIDEN, WST + 0.22 M, THB X 1.0); RECHTS: O 12.5 M/S (31.6 TIDEN, WST – 0.64 M, THB X 1.0), S 12.5 M/S (42.5 TIDEN, WST + 0.28 M, THB X 1.05), W 12.5 M/S (107.0 TIDEN, WST + 0.27 M, THB X 1.0), N 12.5 M/S (4.6 TIDEN, WST + 0.28 M, THB X 1.0). ROT: SEDIMENTATION 15
ABBILDUNG 4.11: EINZELEREIGNISSE MORPHOLOGISCHE MATRIX. OBEN LINKS SW 17.5 M/S (111.8 TIDEN, MITTLERER WASSERSTAND + 0.72 M, TIDEHUB X 1.05), OBEN RECHTS W 17.5 M/S (107.0 TIDEN, MITTLERER WASSERSTAND + 0.94 M, TIDEHUB X 0.97), UNTEN LINKS: NW 17.5 M/S (107.0 TIDEN, MITTLERER WASSERSTAND + 0.63 M, TIDEHUB X 1.05). ROT: SEDIMENTATION 16
ABBILDUNG 4.12: MORPHOLOGISCHE MATRIX. LINKS: GEMESSENE TIEFENDIFFERENZEN 1979 – 1982, RECHTS: MIT MORPHOLOGISCHER MATRIX BERECHNETE TIEFENÄNDERUNG (KOMBINATION AUS: W 7.5 M/S X 3.25, SO 7.5 M/S X 0.5, N 12.5 X 5.0) 17
ABBILDUNG 4.13: 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 X 3.25, SO 7.5 M/S X 0.5, N 12.5 X 5.0) 17
ABBILDUNG 4.14: LINKS: GEMESSENE TIEFENÄNDERUNGEN 1979 – 1990; RECHTS: BERECHNETE TIEFENÄNDERUNGEN 1979 – 1990 (BLAU: EROSION) 18
ABBILDUNG 4.15: LINKS: GEMESSENE SEDIMENTUMLAGERUNGEN PRO M TIEFENSCHICHT FÜR DEN BEREICH WESTLICH DES NEUEN DEICHS 1979-1990, RECHTS: BERECHNETE SEDIMENTUMLAGERUNGEN PRO M TIEFENSCHICHT FÜR DEN BEREICH WESTLICH DES NEUEN DEICHS 1979-1990 18
ABBILDUNG 5.1: MORPHODYNAMISCHE WIRKUNG EINES MITTLEREN MEERESSPIEGELANSTIEGS VON 10 CM 21
ABBILDUNG 5.2: TREND VON WINDSTÄRKEKLASSEN AN DER WINDMESSSTATION BÜSUM 23

Abbildung 5.3: Morphodynamische Wirkung einer relativen Erhöhung der Auftretenswahrscheinlichkeit der Windsituation SW 17.5 m/s um 25 % 24
Abbildung 5.4: 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 25
Abbildung 6.1: Berechnete Tiefenänderungen nach zwei Tiden bei NW 15 m/s 27
Abbildung 6.2: Verlagerung der Kornfraktion 0.21 mm innerhalb von zwei Tiden bei NW 15 m/s 28
Abbildung 7.1: Tiefenverteilung Hörnumbecken mit Lage der Schnitte I-III 29
Abbildung 7.2: Mittlere Kornverteilung Hörnumbecken, erstellt aus mehr als 500 Sedimentproben aus der Sedimentdatenbank des BSH 31
Abbildung 7.3: Berechnete Tiefenänderungen in 3 Tiden (blau:Erosion); links: TIDE, Mitte: WELLE, rechts: STURM 33
Abbildung 7.4: Links: Anteil Fraktion I in der obersten Bodenschicht nach 3 Tiden (Rechnung TIDE), rechts: Änderung des Anteils Fraktion I in der obersten Bodenschicht in der dritten Tide (Rechnung TIDE) (rot: Zunahme) 35
Abbildung 7.5: Anteil Fraktion I in der obersten Bodenschicht an einigen ausgewählten Rinnenknoten 36
Abbildung 7.6: Links: Anteil Fraktion I in der obersten Bodenschicht nach 3 Tiden (Rechnung WELLE), rechts: Änderung des Anteils Fraktion I in der obersten Bodenschicht in der dritten Tide (Rechnung WELLE) (rot: Zunahme) 36
Abbildung 7.7: Links: Anteil Fraktion I in der obersten Bodenschicht nach 3 Tiden (Rechnung STURM), rechts: Änderung des Anteils Fraktion I in der obersten Bodenschicht in der dritten Tide (Rechnung STURM) (rot: Zunahme) 37
Abbildung 7.8: Suspensionskonzentrationen bei Hochwasser. Links: Rechnung TIDE (rot: 100 mg/l); Mitte: Rechnung WELLE (rot: 1000 mg/l); rechts: Rechnung STURM (rot: 1000 mg/l) 38
Abbildung 7.9: Links: hydrodynamische Bilanz, rechts: Sedimentbilanz Fraktion I 39
Abbildung 7.10: Sedimentbilanz Fraktion I nach Schnitten 40
Abbildung 7.11: Sedimentbilanz Fraktion I bei erhöhter Schwebstoffkonzentration in der offenen See für Rechnung WELLE und STURM 41
Abbildung 7.12: Ausgangslage des Tracermaterials; die untersuchten Korngrößen wurden örtlich variabel entsprechend ihrem Vorkommen angesetzt. 43
Abbildung 7.13: 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: 0.6mm 43
Abbildung 7.14: Kornverteilung der Clusterzentren bei Einteilung in fünf bis acht Cluster 46
Abbildung 7.15: Aufteilung der Sedimentproben in Cluster. Farbgebung angepasst an Abbildung 7.14 46
Abbildung 7.16: Klasseneinteilung Sedimentproben Hörnumbecken bei einer Aufteilung in 7 Klassen mit 0m-, 2m- und 5m-Tiefenlinie 48
Abbildung 7.17: Anteil der Sedimentklassen an Kornfraktionen (Summe über eine Fraktion ergibt 1.0) 49
Abbildung 8.1: Approximationsschema zur Berechnung der Kotpillendepositionsrate zum Zeitpunkt t – $T_{ZERFALL}$. BLAU: Die zum Zeitpunkt t – $T_{ZERFALL}$ abgelagerten Kotpillen wurden zwischenzeitlich bereits erodiert, daher kommt es zu keinem Zerfall. ROT: Hier sind die vor der Zerfallszeit abgelagerten Kotpillen noch vorhanden (Der Verlauf der Hilfsgröße $S_{HILF,BIO}$ unterschreitet den damaligen Wert nicht.). Die Zerfallsrate ergibt sich aus der Kotpillendepositionsrate zum damaligen

Zeitpunkt, die aus der Interpolation der vorhergehenden und nachfolgenden Stützstelle errechnet werden kann. 52
Abbildung 8.2: Mehrschichtansatz nach Teisson (1991) zur Berücksichtigung der Konsolidierung mit Angabe der von ihm verwendeten schichtspezifischen Parameter 54
Abbildung 8.3: Schematische Darstellung der Konsolidierung von zerfallenen Kotpillen. Graue Kästen: Masseninhalt; grau melierte Kästen: Hilfsgrößen; weiße Kästen: Sedimentströme; rote Pfeile: Deposition; blaue Pfeile: Erosion .. 56
Abbildung 8.4: Untersuchungsgebiet Dithmarscher Bucht. Links: Lage in der Deutschen Bucht; rechts: Tiefenverteilung 1979 58
Abbildung 8.5: Lage des Testfeldes in der Dithmarscher Bucht begrenzt durch Profil I u. II. Links: Luftbild; rechts: Tiefenverteilung, Wasserbedeckungszeit und Stationsnummerierung 58
Abbildung 8.6: Geologische Karte der Nordhälfte der Dithmarscher Bucht nach den Kriterien von Sindowski (links) und Karte der Wattsedimenttypen (rechts) nach Gast et al. (1984) 59
Abbildung 8.7: Wattsedimenttypen in der Dithmarscher Bucht (Gast et al., 1984)..... 60
Abbildung 8.8: Kotpillenbedeckte Schlickoberfläche (links) und Beeinflussung der Korngrößenverteilung (rechts) nach Gast et al. (1984)..... 61
Abbildung 8.9: Verwendetes Gitternetz Dithmarscher Bucht. Im Testfeld liegt eine hohe räumliche Auflösung vor. 63
Abbildung 8.10: Wasserstand (links) und Windgeschwindigkeit in m/s (rechts) Büsum 21.5. - 18.10.80..... 63
Abbildung 8.11: Besiedlungsdichte von *cerastoderma edule* im Testgebiet. Ein Punkt (.) unter der Grundlinie gibt an, dass keine auswertbare Fotographie vorliegt. Links: 1978: 18.7., 28.8., 11.10., 8.11; 1979: 14.4.; 15.5. Rechts: 1979: 14.6.; 3.7.; 16.8; 10.10; 1980: 4.6.; 15.9. (Thiel et al., 1984)..... 64
Abbildung 8.12: Verlagerung des cerastoderma edule – Feldes im Testgebiet 1978 – 1980 (Thiel et al., 1984) 64
Abbildung 8.13: Verbreitung von *cerastoderma edule* und *arenicola marina* Juni – August 1978 65
Abbildung 8.14: Synthetisch generierte (links) und in den Modellrechnungen angesetzte Besiedelungsdichte (10 mal so hoch) (rechts) mit *cerastoderma edule*. Es wurden unterschiedliche Skalen verwendet. 66
Abbildung 8.15: Lage der ausgewählten Knotenpunkte; rote Umrandung: Lage des *cerastoderma edule* Feldes 1980: Im Modell mit 1000 Ind./m² angesetzt. Knoten 4749 entspricht der von Gast et al. (1984) untersuchten Position. 68
Abbildung 8.16: Einfluss der Biodeposition: Differenz REF_BIO - REF 69
Abbildung 8.17: Einfluss des Zerfalls von Kotpillen: Links: Tiefenänderung innerhalb des Untersuchungszeitraums OZERFALL. Rot: Sedimentation; rechts: Differenz zu REF_BIO. Rot: höhere Biodeposition in OZERFALL. Teilweise Skalenwertüberschreitung. 70
Abbildung 8.18: Biodeposition an ausgewählten Knoten. Links: REF_BIO; rechts: OZERFALL. Dicke vertikale Linien kennzeichnen die Zeitpunkte der Biodepositionsmessung von Gast et al. (1984)..... 70
Abbildung 8.19: Einfluss der kritischen Geschwindigkeit für Erosion $V_{CR,E,BIO}$ der Kotpillen: Links oben: Tiefenänderung innerhalb des Untersuchungszeitraums VCRE015. Rot: Sedimentation; rechts oben: Differenz zu REF_BIO. Rot: höhere Biodeposition in VCRE015. links unten: Tiefenänderung innerhalb des Untersuchungszeitraums VCRE020. Rot: Sedimentation; rechts unten: Differenz zu REF_BIO. Rot: höhere Biodeposition in VCRE020. 72

Abbildung 8.20: Biodeposition an ausgewählten Knoten. Oben links: REF_BIO; oben rechts: VCRE015; unten rechts: VCRE020. Dicke vertikale Linien kennzeichnen die Zeitpunkte der Biodepositionsmessung von Gast et al. (1984). 73
Abbildung 8.21: Einfluss der Besiedelungsdichte: Tiefenänderung innerhalb des Untersuchungszeitraums. Rot: Sedimentation. Oben links: BIODICHTE_I, oben rechts: BIODICHTE_II, unten links: BIODICHTE_III, unten rechts: BIODICHTE_IV. Dunkelrot umrandete weiße Bereiche: Skalenwertüberschreitung 74
Abbildung 8.22: Einfluss der Besiedelungsdichte: Differenz zu REF_BIO. Rot: niedrigere Biodeposition in REF_BIO. Oben links: BIODICHTE_I, oben rechts: BIODICHTE_II, unten links: BIODICHTE_III, unten rechts: BIODICHTE_IV. Teilweise Skalenwertüberschreitung..... 75
Abbildung 8.23: Biodeposition an ausgewählten Knoten. Oben links: BIODICHTE_I; oben rechts: BIODICHTE_II; unten links: BIODICHTE_III; unten rechts: BIODICHTE_IV (andere Skala !). Dicke vertikale Linien kennzeichnen die Zeitpunkte der Biodepositionsmessung von Gast et al. (1984)..... 76

1 Kurzfassung

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 sollten die im system Tidebecken-Ebbdelta zurückgelegten Sedimenttransportpfade aufgezeigt und Sensitivitätsstudien bezüglich einer biologischen Beeinflussung der Morphodynamik angestellt werden.
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, südöslicher 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.

- Eine Analyse der an der Windmeßstation in den letzten 35 Jahren aufgetretenen Windlagen ergab einen Trend zur Erhöhung von Strakwindereignissen aus südlicher und südwestlicher Richtung, wohingegen Starkwinde aus nördlicher Richtung in ihrer Häufigkeit abnahmen. Insgesamt zeigte sich eine Erhöhung von Windgeschwindigkeiten größer als 5 m/s, am stärksten war der Zuwachs in der Geschwindigkeitsklasse von 10 – 15 m/s. 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.

- In einer Studie 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 Matrerialbedarf 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.

- Mit einem Erweiterungsmodul zur Berücksichtigung der Biodeposition wurden Sensitivitätsuntersuchungen durchgeführt. Das Modul ist in der Lage Produktion, Ablagerung und Zerfall von Kotpillen sowie die Konsolidierung von zerfallenen Kotpillen für verschiedene Muschelarten zu berechnen. Es wurde für ein 1 km² großes Testfeld innerhalb der Dithmarscher Bucht angewendet, für das Messungen der Biodeposition vorlagen. Es zeigte sich, dass die Berechnungsergebnisse von der Größenordnung richtig sind und generell plausibel erscheinen. Als entscheidend stellte sich heraus, den Zerfall von Kotpillen mit abzubilden. Es wurden weiterhin Wechselwirkungen zwischen kritischer Geschwindigkeit zur Erosion von Kotpillen und Besiedelungsdichte aufgezeigt, was ohne Modellierung nicht möglich gewesen wäre. Somit liegt ein Werkzeug vor, mit dem bezüglich der morphodynamischen Wirkung der Biodeposition Sensitivitäten aufgezeigt werden können, das bei der Festlegung künftiger Forschungsvorhaben eine wichtige Unterstützung leisten kann.

2 Konzeption des Forschungsvorhabens

2.1 Zielsetzung

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:** 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 Seegangsereignisse Material von den Wattflächen in die Rinnen verlagern und daher das Gewicht einzelner Ereignisse im Hinblick auf den langfristigen Gesamteffekt gewahrt bleiben muß. 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 sollte 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. Dieser Referenzzustand kann in der Dithmarscher Bucht aufgrund der zahlreichen Vermessungen ein natürlicher sein. 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.

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.

2.2 Förderdauer

Das vom BMBF unter dem Förderkennzeichen KIS028 geförderte Forschungsvorhaben *Langfristige Sedimentdynamik des Systems Tidebecken-Ebbdelta unter besonderer Berücksichtigung von verändertem Seegang und Wasserständen* lief vom 1.2.2001 – 30.4.2003.

3 Projektgebiet Dithmarscher Bucht

Das Projektgebiet Dithmarscher Bucht ist in seiner Lage innerhalb der Deutschen Bucht in Abbildung 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.

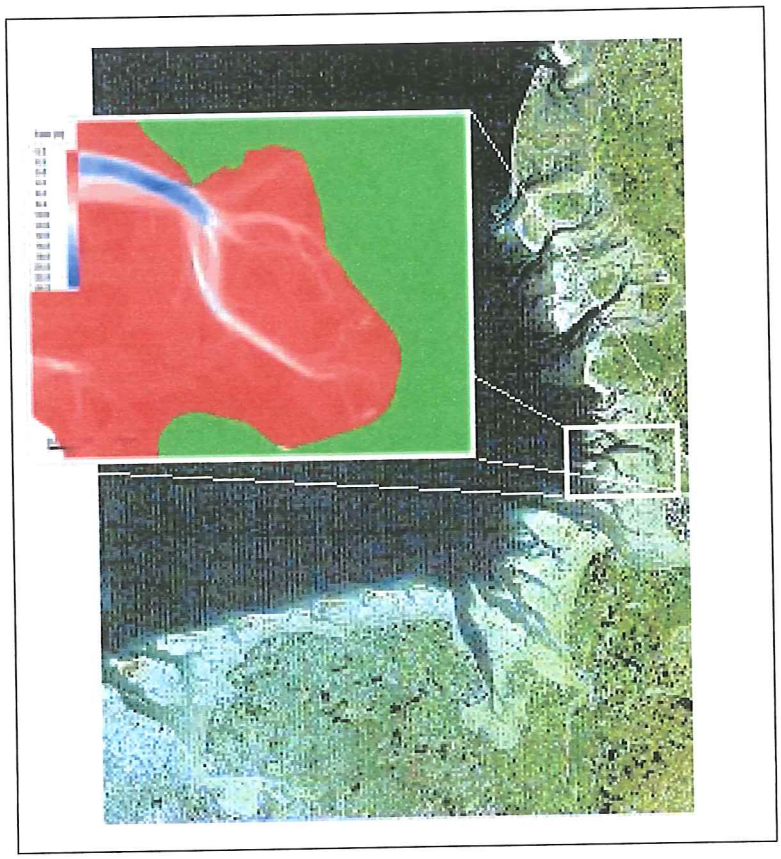


Abbildung 3.1: Lage des Projektgebietes Dithmarscher Bucht

4 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 Seegangsereignisse Material von den Wattflächen in die Rinnen verlagern) und daher das Gewicht einzelner Ereignisse im Hinblick auf den langfristigen Gesamteffekt gewahrt bleiben muß. 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.

4.1 Ermittlung des Referenzzustandes

Zunächst muss ein Referenzzustand ermittelt werden, mit dem die Modellierungsergebnisse verglichen werden. Dieser sollte sich möglichst gut eignen, um 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. Abbildung 4.2). Dies erscheint auch vor dem Hintergrund der Fertigstellung des ersten Dammabschnittes 1972 unglaubwürdig. 1979 ist das Material in etwa den selben Tiefenschichten wieder vorhanden.

Dies deutet darauf hin, dass der Datensatz von 1976 zu tief eingemessen bzw. fehlerhaft beschickt wurde.

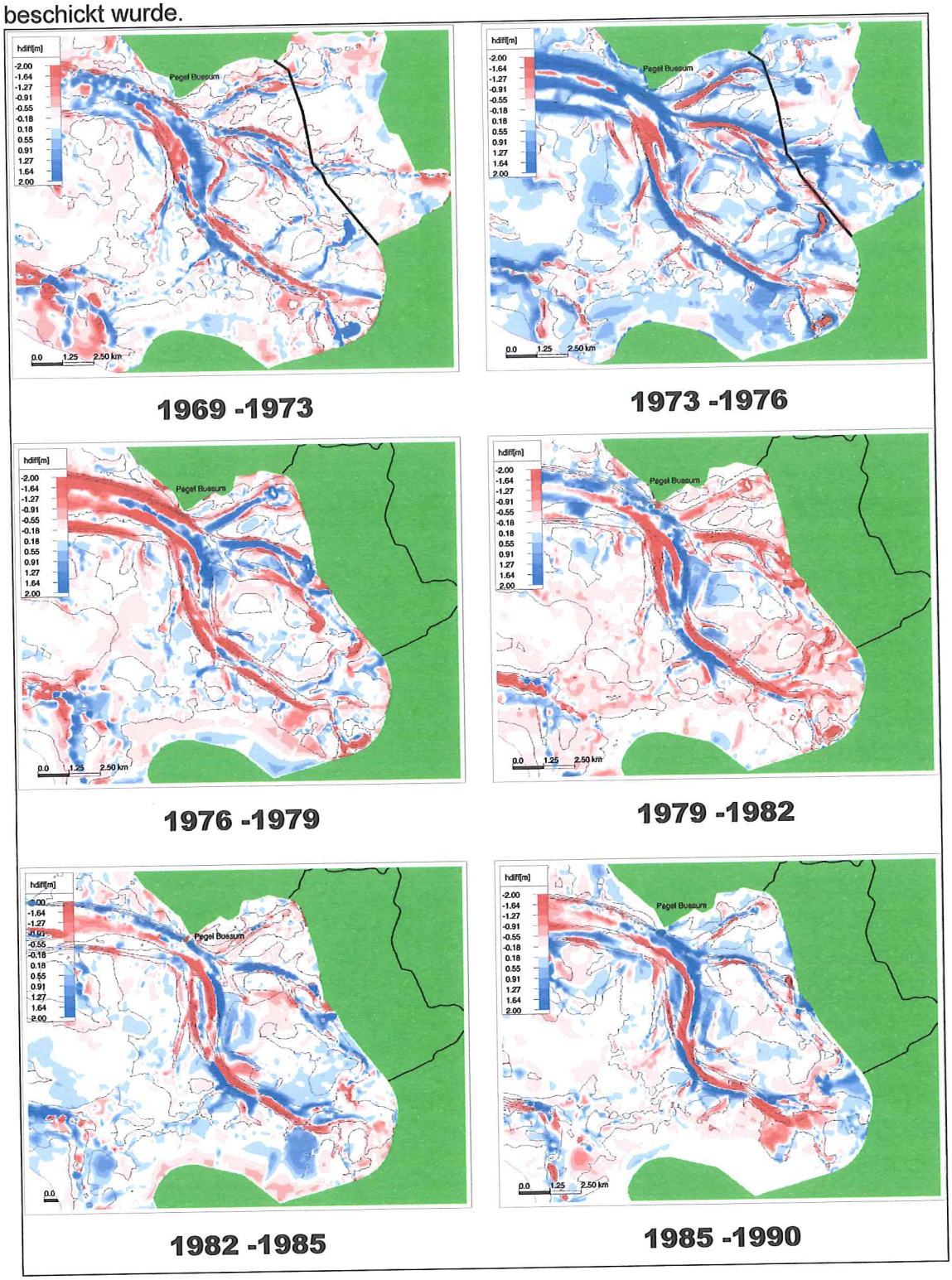


Abbildung 4.1: Gemessene Tiefendifferenzen für unterschiedliche Zeiträume (blau: Erosion)

Diese Inkonsistenz ist aus Abbildung 4.1 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 Abbildung 4.1 dargestellt. Schlussendlich wurde der Zustand von 1979 - 1982 gewählt, weil in diesen

Zeitraum die morphologische Initialanpassung an den zweiten Dammabschnitt fällt und sich außerdem ein möglichst langer Differenzenzeitraum erzeugen lässt, so dass Aussagen über den möglichen Prognosezeitraum eines 2D-morphodynamischen Modells gemacht werden können.

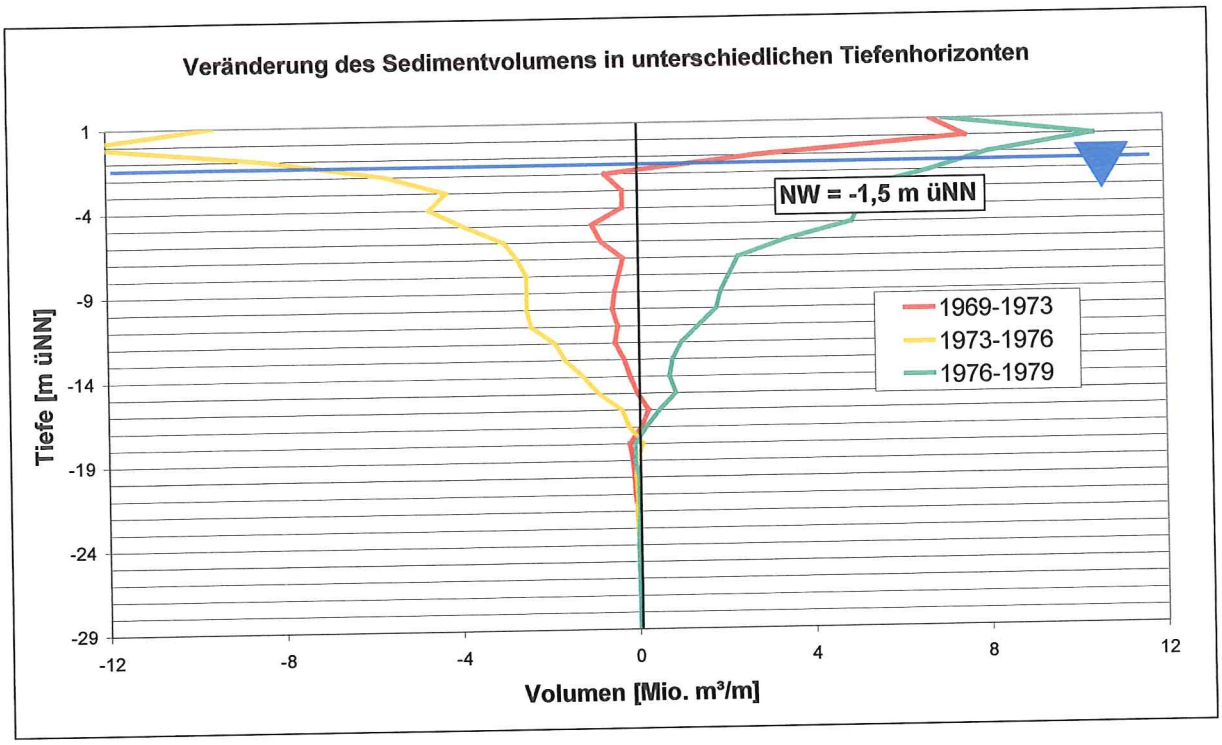


Abbildung 4.2: Umgelagertes Sedimentvolumen pro m Tiefenschicht 1969 – 1979

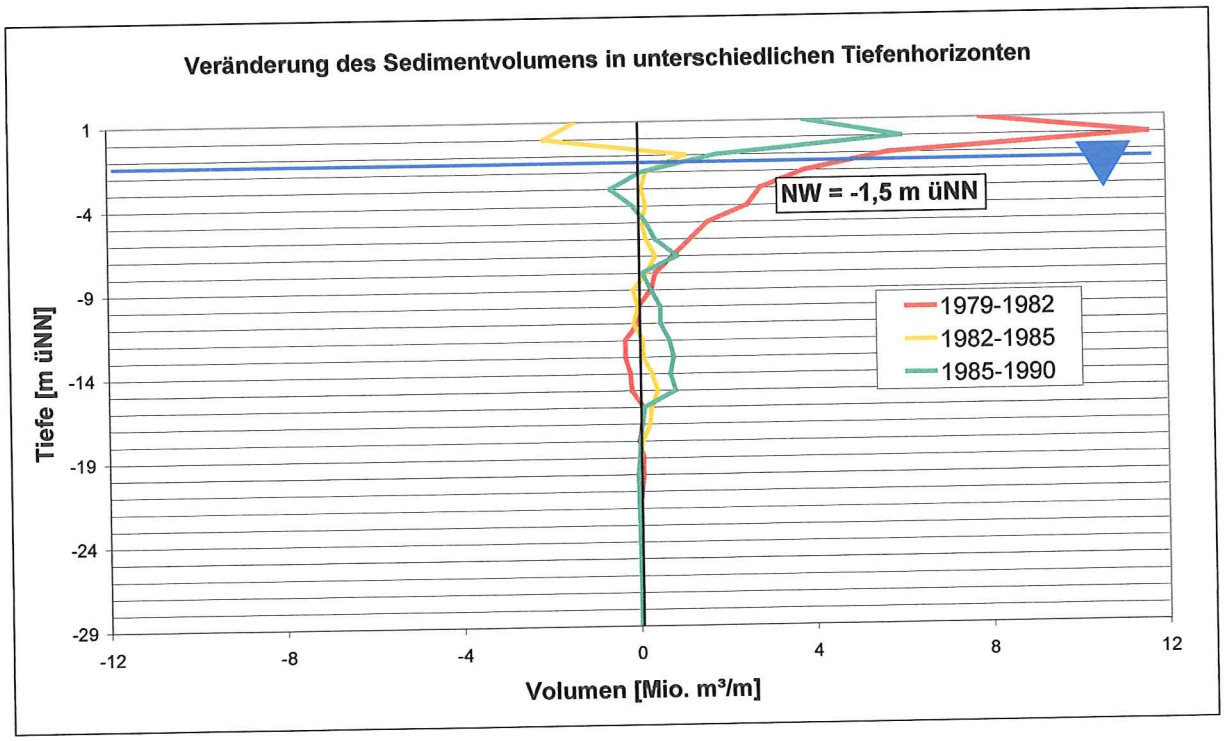


Abbildung 4.3: Umgelagertes Sedimentvolumen pro m Tiefenschicht 1979 - 1990

Für alle Tiefendifferenzen wurde das Umlagerungsvolumen pro m Tiefenschicht bestimmt und in Abbildung 4.2 für den zeitraum 1969 – 1979 und in Abbildung 4.3 für den Zeitraum 1979 – 1990 dargestellt. Diese Darstellung ermöglicht eine Interpretationen, in welchen

Tiefenschichten Material umgelagert wurde. Beispielsweise lässt sich erkennen, dass die morphologische 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.

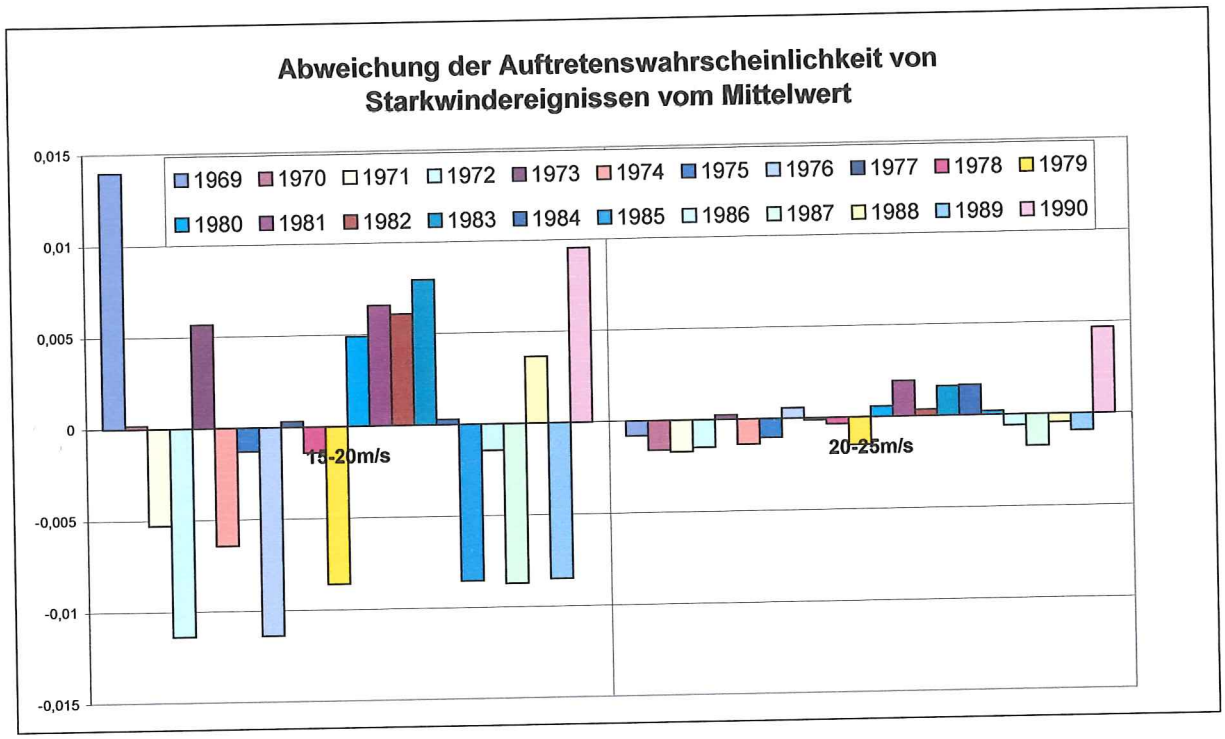


Abbildung 4.4: Abweichung der Auftretenswahrscheinlichkeit von Starkwindereignissen vom Durchschnittsjahr

Von 1982 und 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 Abbildung 4.4 ist zu entnehmen, dass der Anteil an Starkwindereignissen in diesem Zeitraum deutlich über dem langjährigen Mittel lag.

4.2 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 Abbildung 4.5 ist darauf zu achten, dass die Volumina auf die Gebietsgrenzen des jeweils späteren Datensatzes bezogen sind. Somit ist das Gebiet hinter dem zweiten Dammabschnitt, der 1978 fertiggestellt wurde, in den ersten beiden Bilanzen noch vorhanden. Aus Abbildung 4.5 ist die starke Sedimentation nach 1979 zu entnehmen.

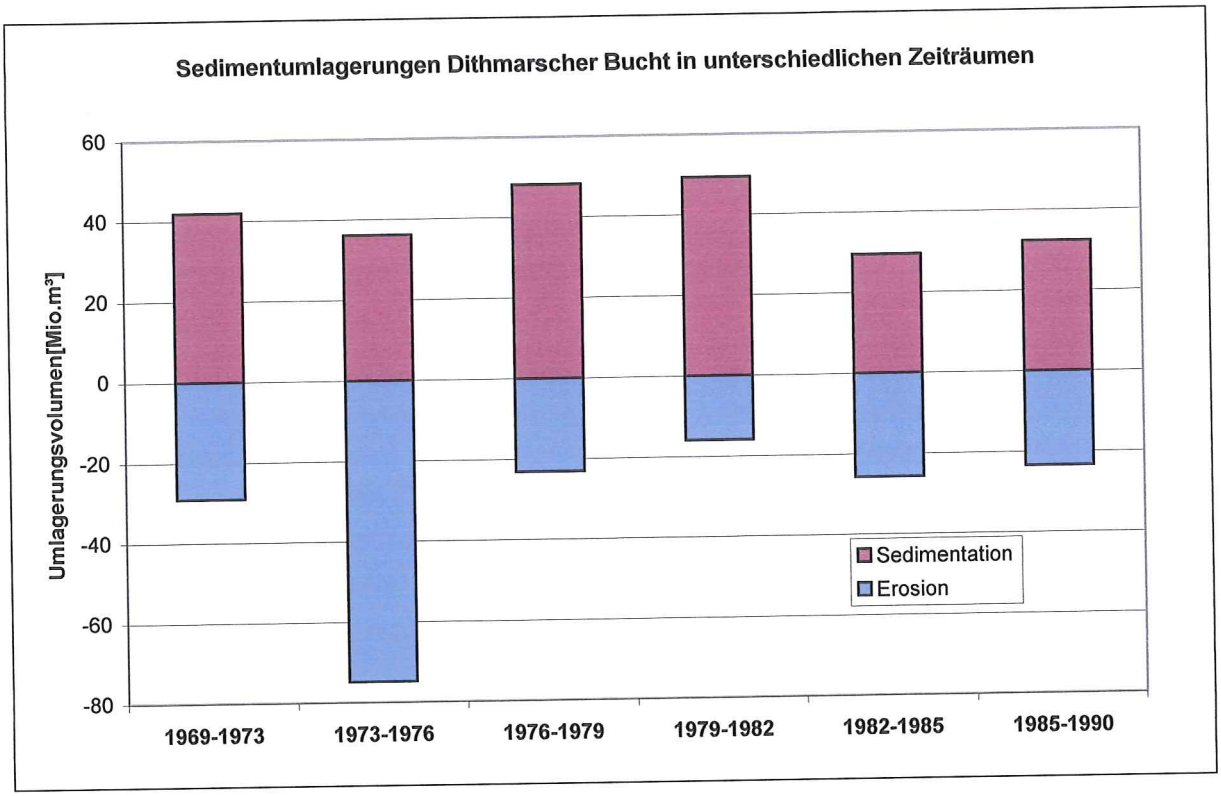


Abbildung 4.5: Globale Sedimentbilanz Dithmarscher Bucht

4.3 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 Annäherung an den Referenzzustand erbringen sollen. Ereignisse die für die morphologische Entwicklung des Gebietes von besonders starker Bedeutung sind, können somit an einem hohen Wichtungsfaktor 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 8 Richtungs- und 5 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 entsprach. Der Simulationszeitraum der anderen Rechnungen betrug 3 Jahre.

4.3.1 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 4.2 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 eine Schwebstoffeintrag von 60 mg/l. Dieser wurde für alle weiteren Rechnungen angesetzt.

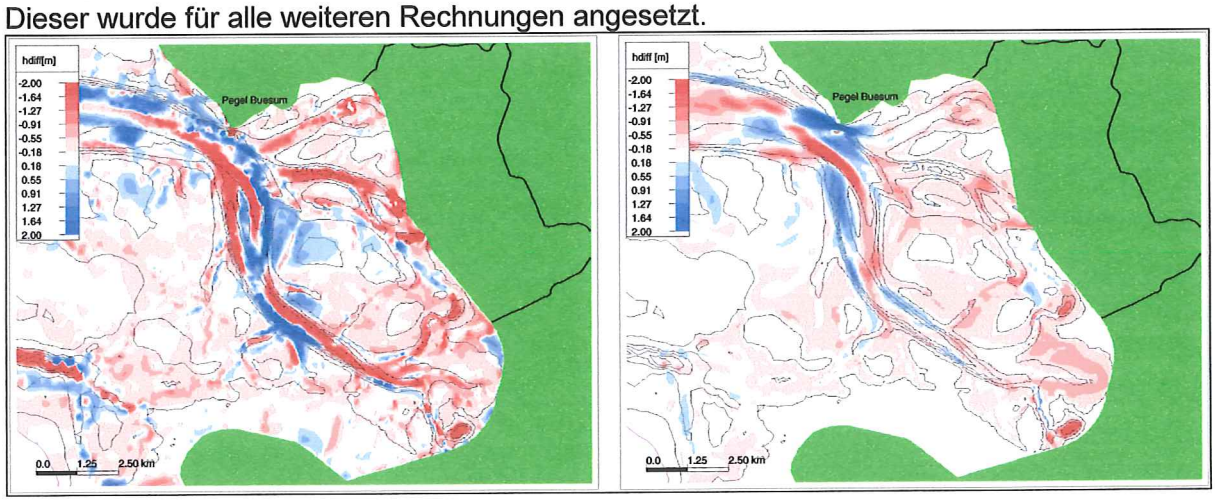


Abbildung 4.6: Links: Gemessene Tiefenänderungen 1979 – 1982; rechts: Berechnete Tiefenänderungen 1979 – 1982 (blau: Erosion); Schwebstoffeintrag über offenen Rand 60 mg/l

Vergleicht man die Berechnungsergebnisse des morphodynamischen Modells TIMOR mit den gemessenen Tiefenänderungen in Abbildung 4.6, 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 ordentlich 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 Watteinzugsgebietsfläche 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 wiedergeben 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.

4.3.2 Rechnungen mit parametrisierter Sekundärströmung

Um die Mäandrierungserscheinungen in den Hauptrinnen 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.

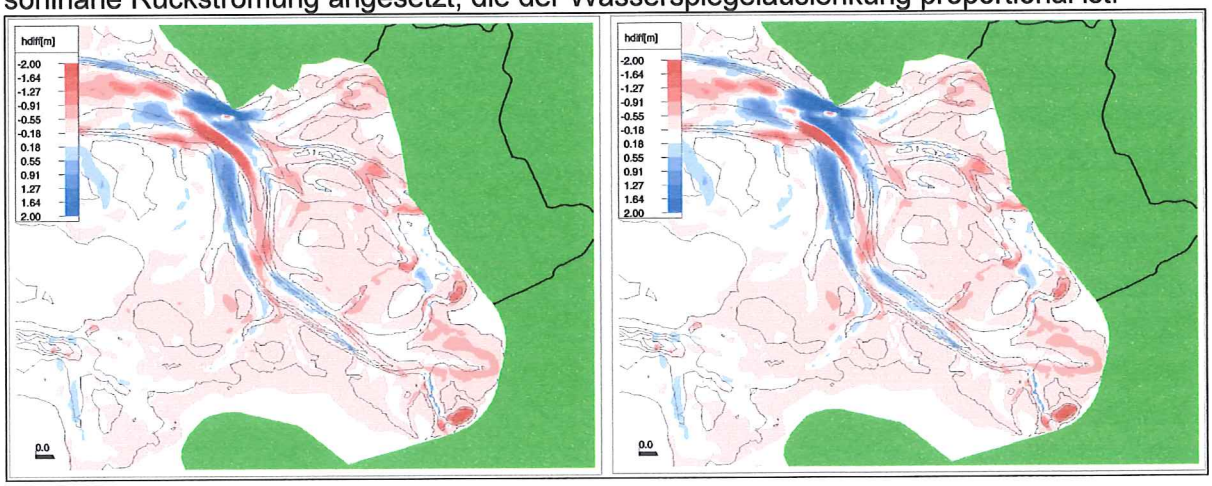


Abbildung 4.7: Links: Berechnete Tiefenänderungen 1979 - 1982 ohne parametrisierte Sekundärströmung; rechts: Berechnete Tiefenänderungen 1979 – 1982 mit parametrisierter Sekundärströmung

Ergebnisse mit Integration dieses Effektes sind vergleichend in Abbildung 4.7 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.

4.3.3 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 Abbildung 4.8 dargestellt.

	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%

Abbildung 4.8: Mittlere Auftretenswahrscheinlichkeit verschiedener Windsituationen an der Windmeßstation Büsum von 1967 – 2001

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, weshalb er berücksichtigt werden sollte. Er wurde über eine Wind – Windstaukorrelation am Pegel Blauort ermittelt. Er 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. Abbildung 4.9), die hauptsächlich in ihrer Stärke variieren, die wiederum stark abhängig von dem Berechnungszeitraum ist. Für Ereignisse der Windgeschwindigkeitsklasse 12.5 m/s (Abbildung 4.10) stellt sich das anders dar, da sich hier neben der Berechnungszeit auch die hydrodynamischen Randbedingungen durch unterschiedliche mittlere Wasserstände und Tidehübe variieren. Bei Starkwindereignissen der Windgeschwindigkeitsklasse 17.5 m/s (Abbildung 4.11) wird durch den stärkeren Seegang besonders an den Rinnenrändern Material erodiert. Dieses wird hauptsächlich in die Rinnen verlagert.

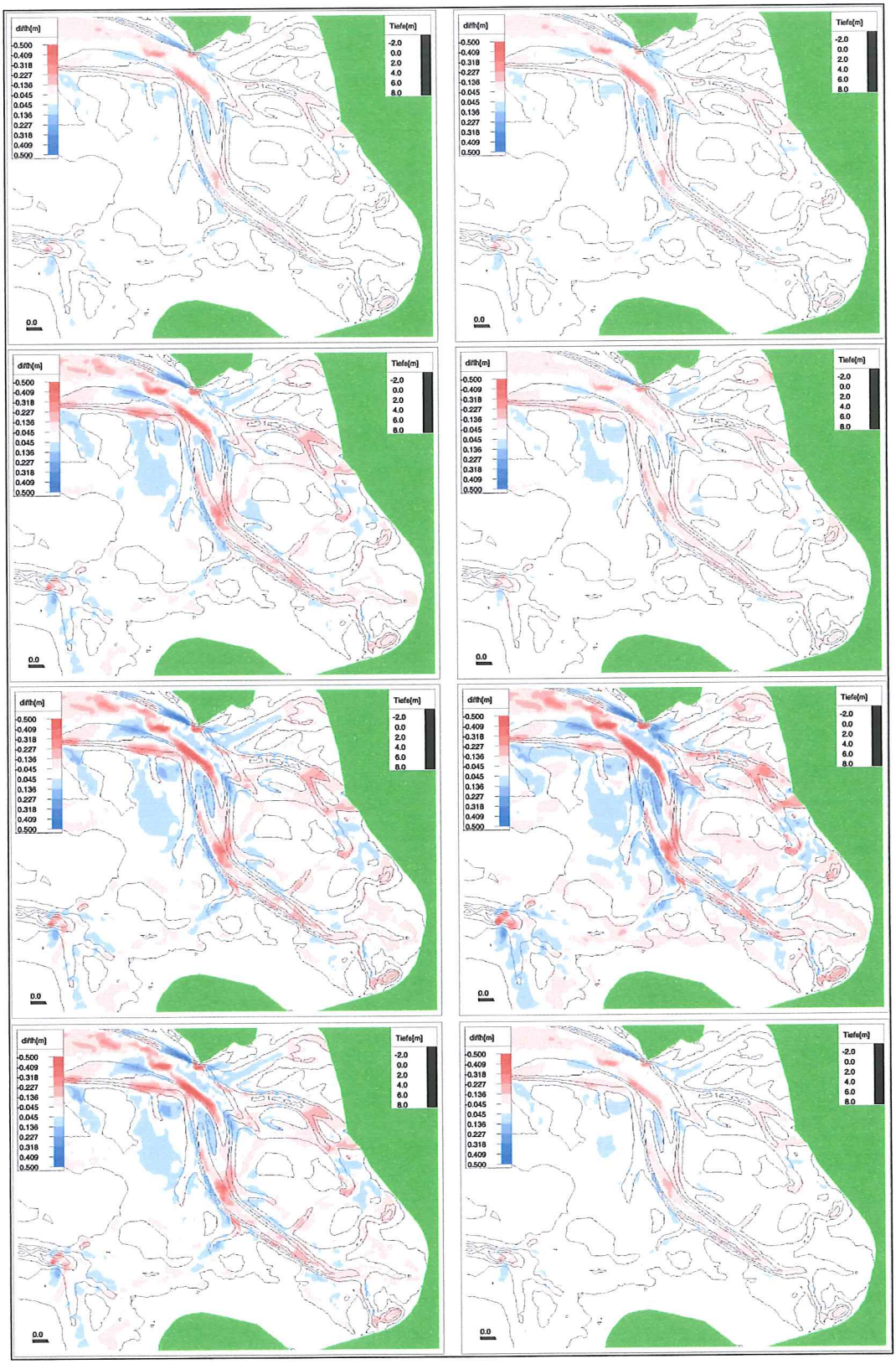


Abbildung 4.9 Einzelereignisse morphologische Matrix. Von oben nach unten: links NO 7.5 m/s (58.3 Tiden), SO 7.5 m/s (146.4 Tiden), SW 7.5 m/s (127.0 Tiden), NW 7.5 m/s (165.9 Tiden); rechts: O 7.5 m/s (61.5 Tiden), S 7.5 m/s (116.0 Tiden), W 7.5 m/s (148.5 Tiden), N 7.5 m/s (139.8 Tiden). Rot: Sedimentation

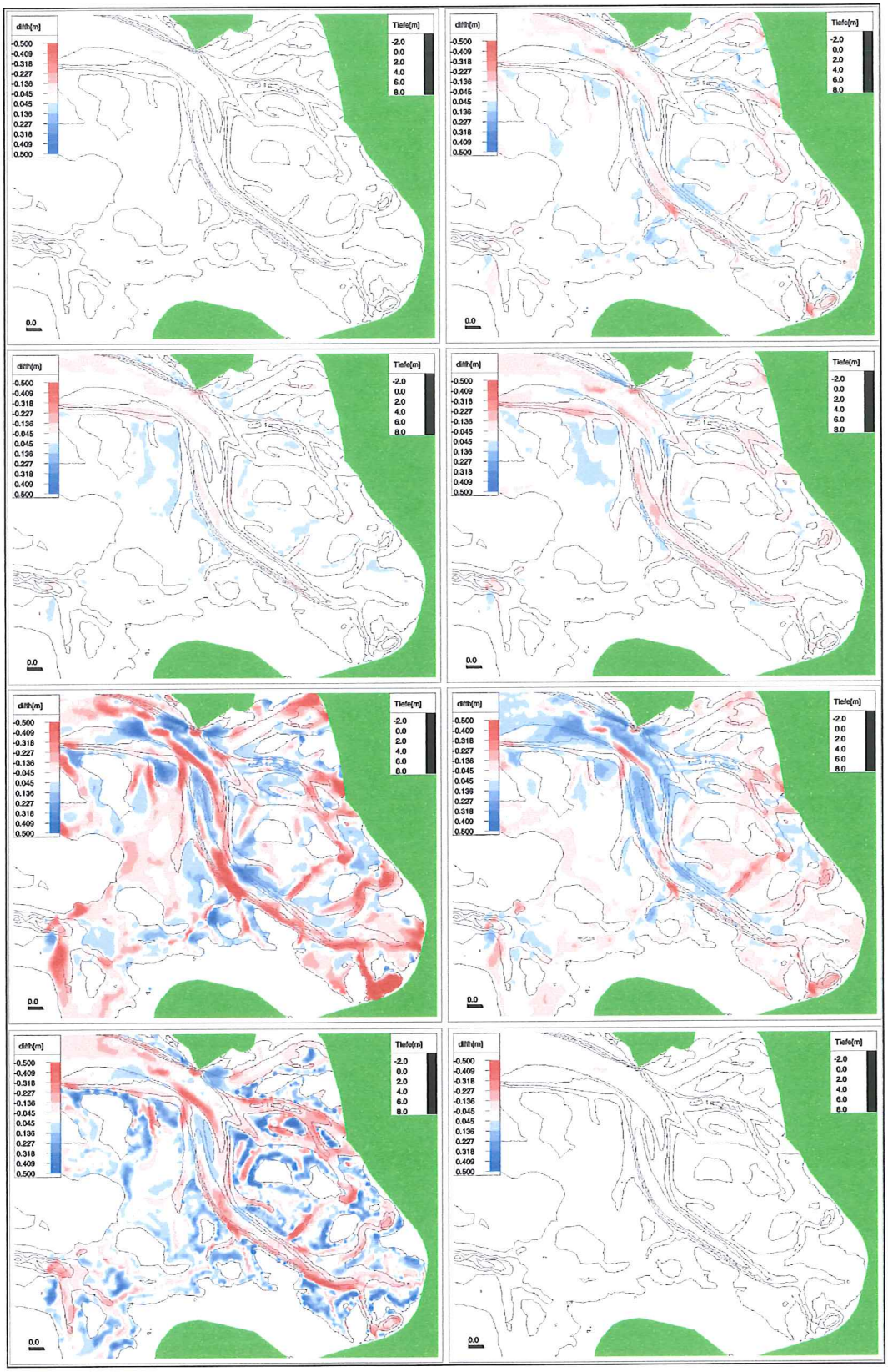


Abbildung 4.10 Einzelereignisse morphologische Matrix. Von oben nach unten: Links NO 12.5 m/s (6.9 Tiden, WST – 0.47 m, Thb x 1.03), SO 12.5 m/s (22.1 Tiden, WST – 0.41 m, Thb x 0.99), SW 12.5 m/s (111.8 Tiden, WST + 0.3 m, Thb x 1.03), NW 12.5 m/s (107.0 Tiden, WST + 0.22 m, Thb x 1.0); rechts: O 12.5 m/s (31.6 Tiden, WST – 0.64 m, Thb x 1.0), S 12.5 m/s (42.5 Tiden, WST + 0.28 m, Thb x 1.05), W 12.5 m/s (107.0 Tiden, WST + 0.27 m, Thb x 1.0), N 12.5 m/s (4.6 Tiden, WST + 0.28 m, Thb x 1.0). Rot: Sedimentation

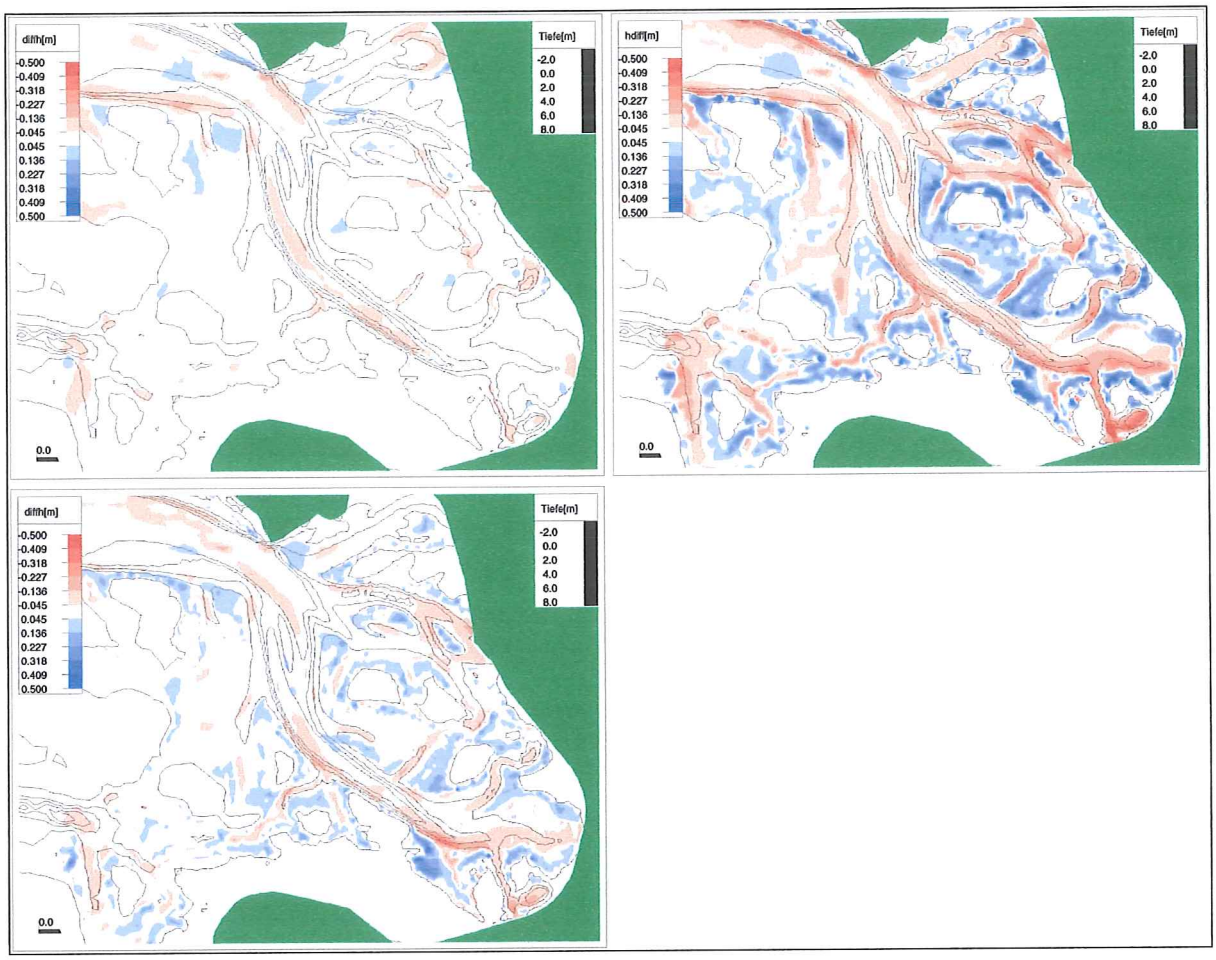


Abbildung 4.11: Einzelereignisse morphologische Matrix. Oben links SW 17.5 m/s (111.8 Tiden, mittlerer Wasserstand + 0.72 m, Tidehub x 1.05), oben rechts W 17.5 m/s (107.0 Tiden, mittlerer Wasserstand + 0.94 m, Tidehub x 0.97), unten links: NW 17.5 m/s (107.0 Tiden, mittlerer Wasserstand + 0.63 m, Tidehub x 1.05). Rot: Sedimentation

Die beste morphologische Übereinstimmung ergab sich schlussendlich durch Anwendung eines Optimierungsverfahrens aus einer Kombination von: W 7.5 m/s x 3.25, SO 7.5 m/s x 0.5 und N 12.5 x 5.0 (siehe Abbildung 4.12).

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.

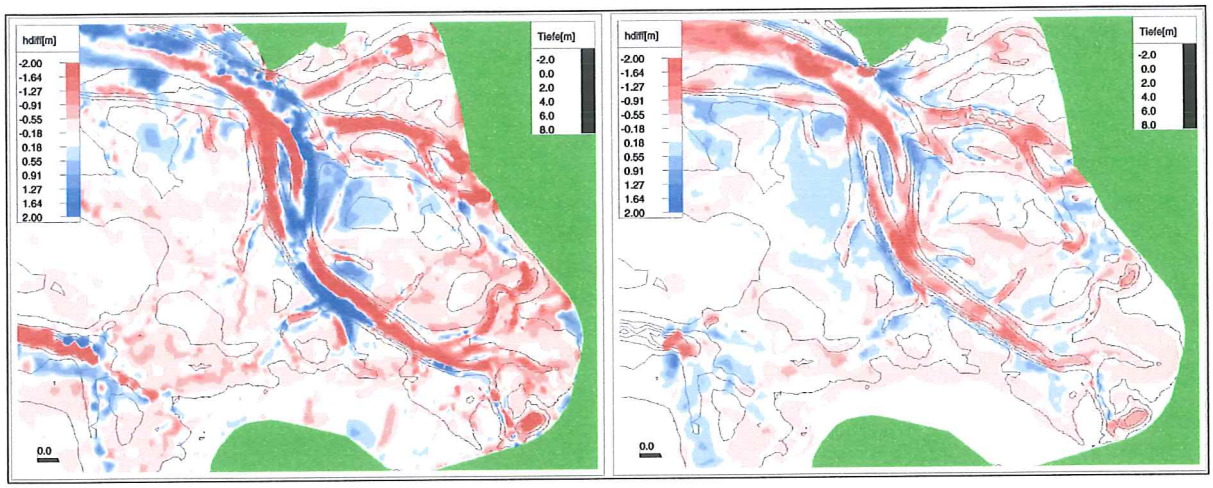


Abbildung 4.12: Morphologische Matrix. Links: Gemessene Tiefendifferenzen 1979 – 1982, rechts: mit morphologischer Matrix berechnete Tiefenänderung (Kombination aus: W 7.5 m/s x 3.25, SO 7.5 m/s x 0.5, N 12.5 x 5.0)

Die morphologische Übereinstimmung mit dem Referenzzustand konnte noch verbessert werden, indem im Bereich des Bielshovensandes die angesetzte Korngröße verdoppelt wurde (siehe Abbildung 4.13). Von GAST ET AL. (1984) wird für diesen Bereich eine Muschelbesiedelung kartiert. Möglicherweise ist diese dafür verantwortlich, dass das Sediemnt 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.

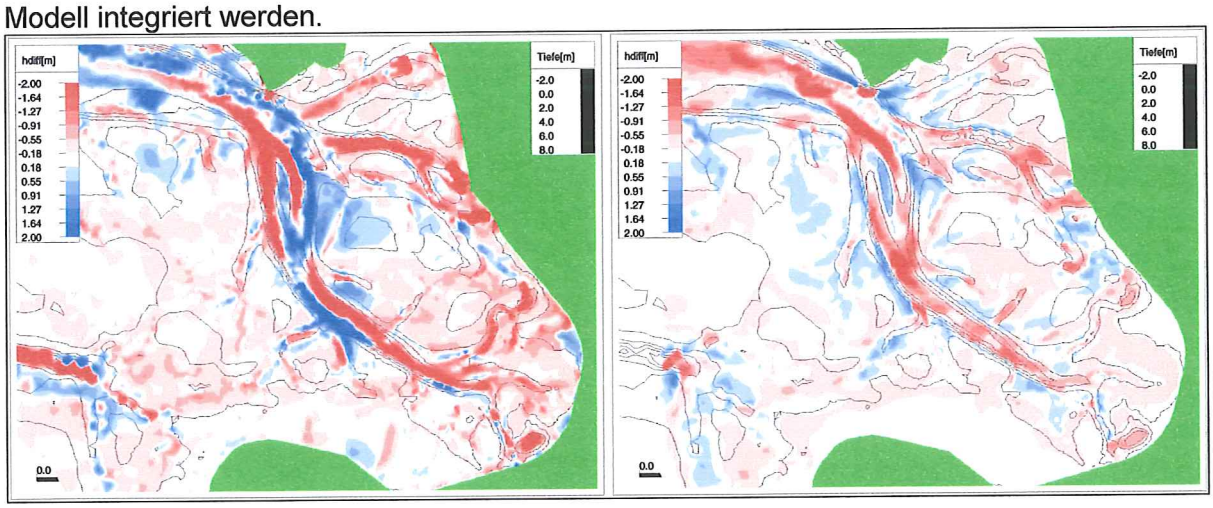


Abbildung 4.13: Morphologische Matrix mit Korngrößenverdoppelung im Bereich Bielshovensand. Links: Gemessene Tiefendifferenzen 1979 – 1982, rechts: mit morphologischer Matrix berechnete Tiefenänderung (Kombination aus: W 7.5 m/s x 3.25, SO 7.5 m/s x 0.5, N 12.5 x 5.0)

4.4 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. Abbildung 4.14). 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.

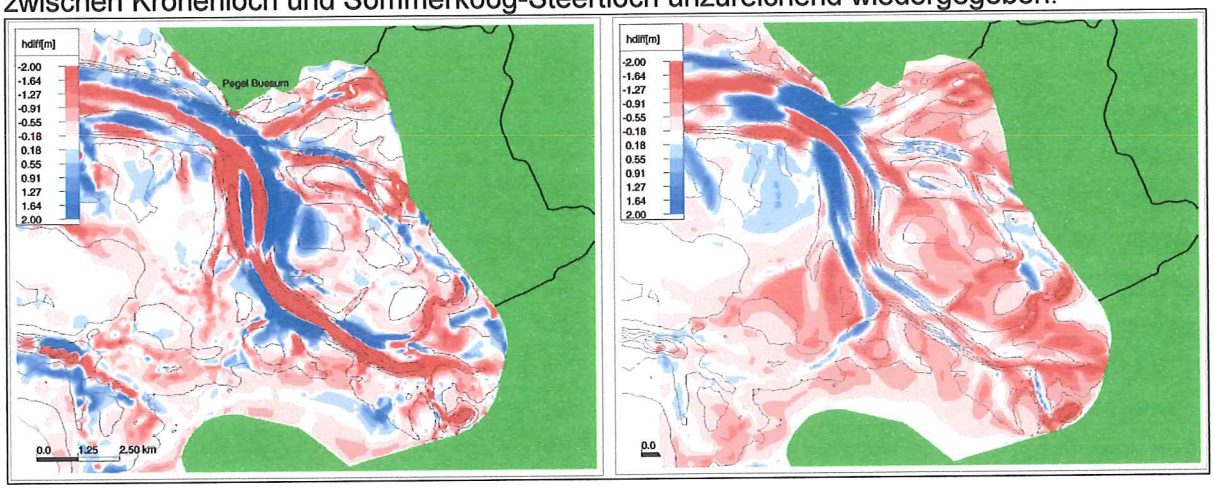


Abbildung 4.14: Links: Gemessene Tiefenänderungen 1979 – 1990; rechts: Berechnete Tiefenänderungen 1979 – 1990 (blau: Erosion)

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 Abbildung 4.15 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 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.

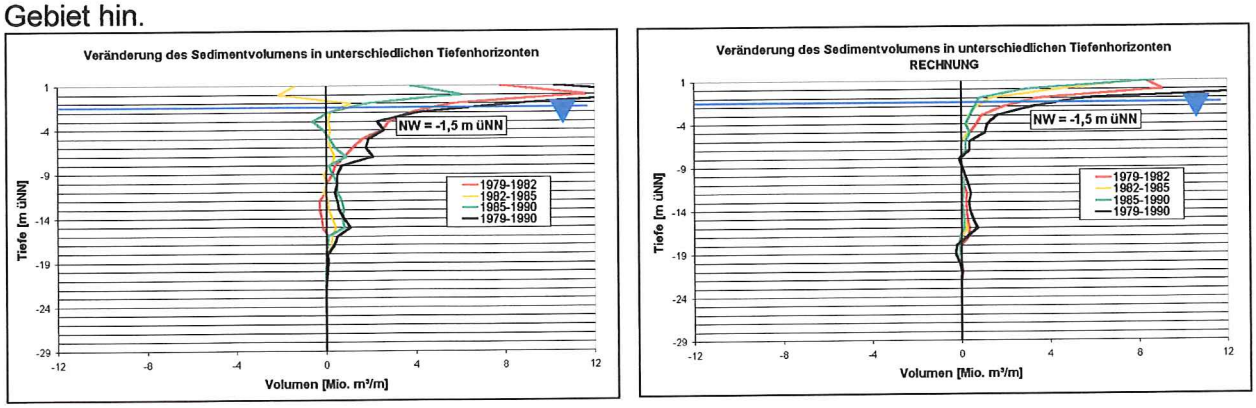


Abbildung 4.15: Links: Gemessene Sedimentumlagerungen pro m Tiefenschicht für den Bereich westlich des neuen Deichs 1979-1990, rechts: Berechnete Sedimentumlagerungen pro m Tiefenschicht für den Bereich westlich des neuen Deichs 1979-1990

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.

5 Sensitivitätsstudien veränderter Seegang und Wasserstand

5.1 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 Tabelle 5.1 dargestellt.

Trends - Steigung in cm/Jahr		Jahr		Jahr	
		MTnw	MThw	Mittelwasser	Tidehub
Büsum	(1940-1998)	0,17	0,31	0,24	0,15
Fridrichskoog	(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
EiderSperrwerk	(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

Tabelle 5.1: Wasserstandsentwicklung an einigen ausgesuchten Pegeln

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.

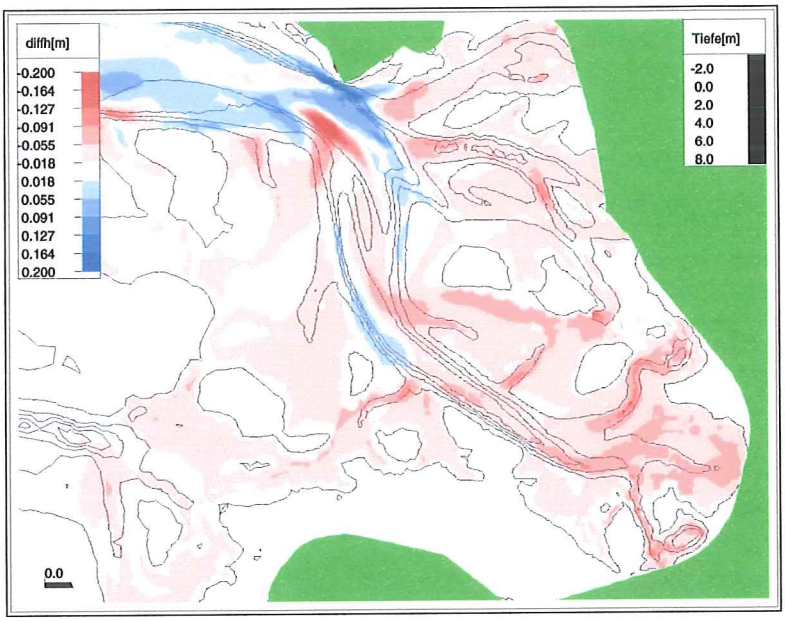


Abbildung 5.1: Morphodynamische Wirkung eines mittleren Meeresspiegelanstiegs von 10 cm

Die Ergebnisse sind in Abbildung 5.1 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 bei höherem Wasserstand mehr Sediment in der Wassersäule. Dies erklärt den Überschuss an Sedimentation bei höherem Wasserstand.

5.2 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 Windaufzeichnugen an der Windmeßstation Büsum für den vorliegenden Zeitraum von 1967 – 2001 analysiert. Hierzu wurden die auftrenden Ereignisse in acht Richtungs- und fünf Geschwindigkeitsklassen unterteilt. Folgende Parameter wurden ermittelt:

- Mittelwert der Auftretenshäufigkeit 1967 – 2001 (Tabelle 5.2)
- Absoluter Trend der Auftretenshäufigkeit (Tabelle 5.3)
- Relativer Trend der Auftretenshäufigkeit (Tabelle 5.4)
- Absoluter Trend von Windstärkeklassen (Abbildung 5.2)
- Relativer Trend von Windstärkeklassen (Tabelle 5.5)

Aus Tabelle 5.4 geht hervor, dass hauptsächlich Starkwindsituationen aus südlicher und südwestlicher Richtung deutlich zunehmen. Starkwindsituationen aus nördlicher Richtung werden hingegen seltener.

	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%

Tabelle 5.2: 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	-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%

Tabelle 5.3: 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	-0,79%	-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%

Tabelle 5.4: Relativer Trend der Auftretenshäufigkeit von Windklassen an der Windmessstation Büsum in % / Jahr; Rot: relative Erhöhung höher als 2%; blau: relative Verringerung höher als 2%

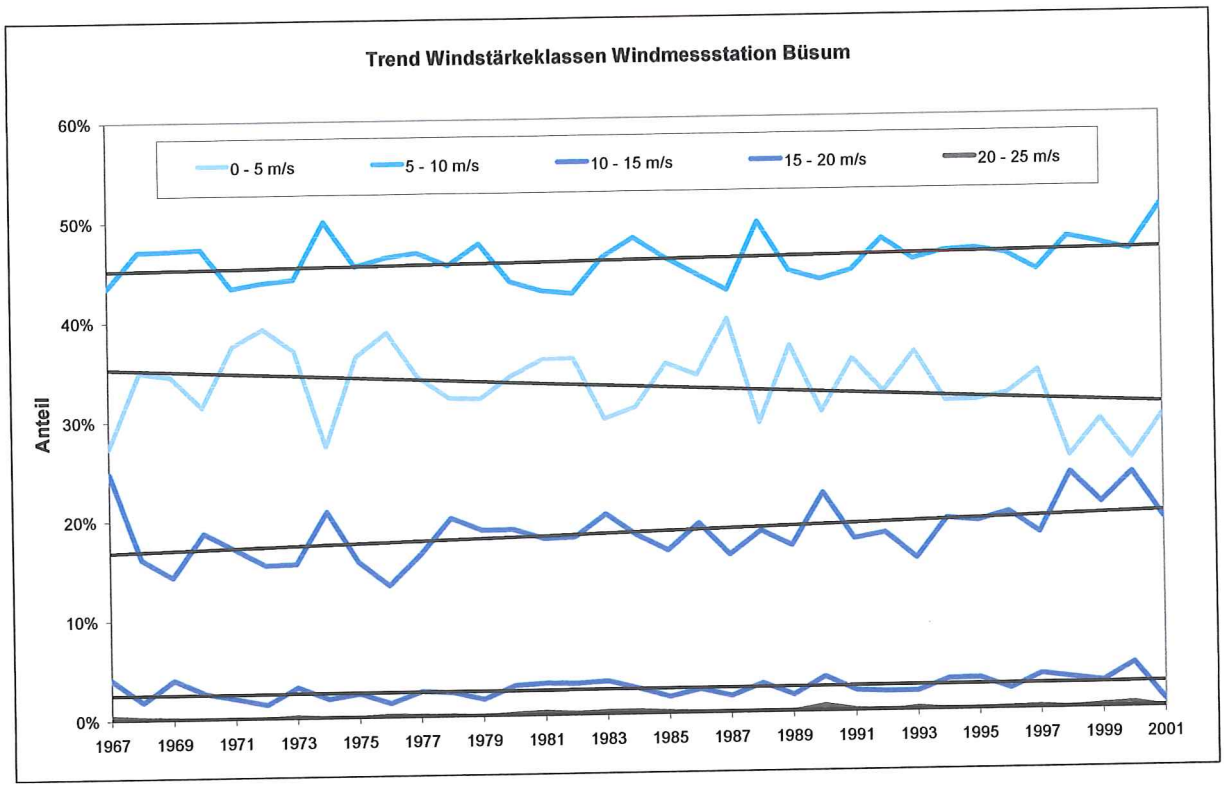


Abbildung 5.2: Trend von Windstärkeklassen an der Windmessstation Büsum

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%

Tabelle 5.5: Relativer Trend der Auftretenshäufigkeit von Windstärkeklassen an der Windmessstation Büsum in % / Jahr

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 Abbildung 5.3 dargestellt. Es zeigt sich, dass es zu einer leicht erhöhten Erosion von Material auf den Wattflächen von ca. 3 cm kommt.

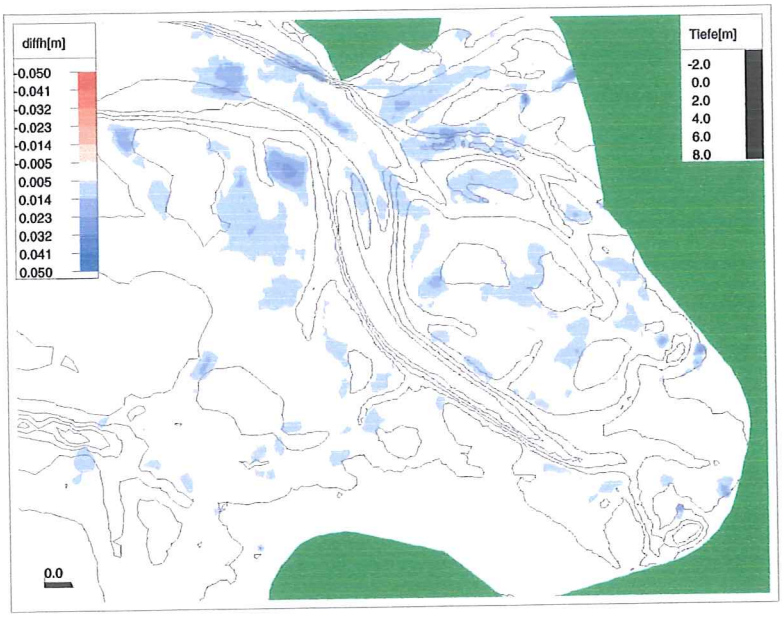


Abbildung 5.3: Morphodynamische Wirkung einer relativen Erhöhung der Auftretenswahrscheinlichkeit der Windsituation SW 17.5 m/s um 25 %

5.3 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 Abbildung 5.4 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 priel verantwortlich. Insgesamt wird die erhöhte Erosion durch verstärkten Seegang durch die verstärkte Sedimentation durch erhöhten Wasserstand mehr als kompensiert.

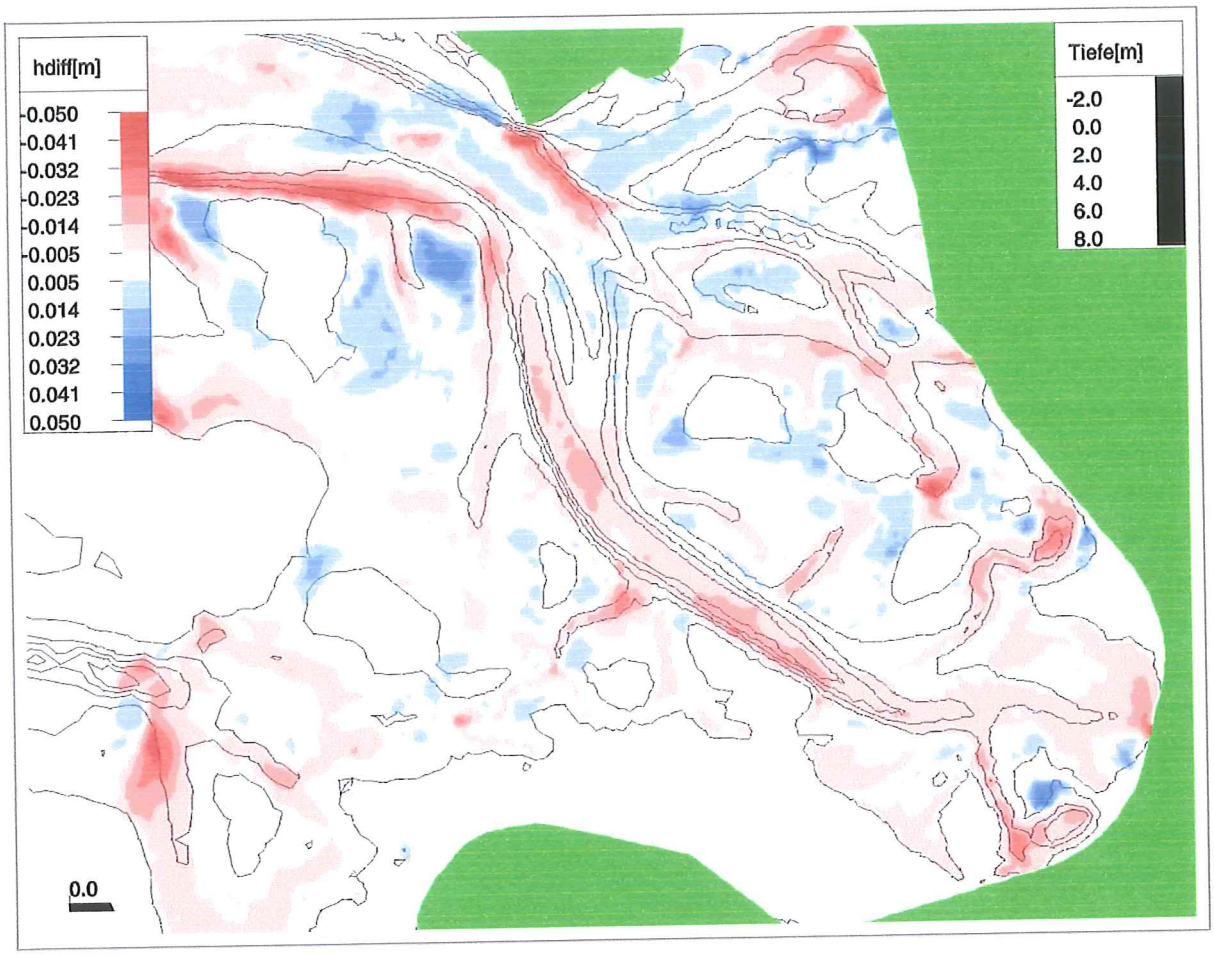


Abbildung 5.4: Morphodynamische Wirkung einer relativen Erhöhung der Auftretenswahrscheinlichkeit der Windsituation SW 17.5 m/s um 25 % und eines Anstiegs des mittleren Meeresspiegels um 10 cm

6 Küstenlängstransport

Es wurde eine morphodynamische Rechnung mit hochaufgelöster Riff-Rinne-Struktur westlich von Sylt durchgeführt.
Es wurde ein Wind mit 15 m/s aus nordwestlicher Richtung angesetzt. Der Berechnungszeitraum betrug zwei Tiden.
Die Morphologieänderung innerhalb von zwei Tiden sind in Abbildung 6.1 dargestellt. Es kommt zu einer starken Erosion oberhalb der 2m Tiefenlinie. Das erodierte Material befindet sich nach dem Berechnungszeitraum teilweise etwas seewärtiger und zu einem anderen teil in Suspension. Die Verlagerung von Material in südliche Richtung wird anhand der Kornfraktion 0.21 mm aufgezeigt. Hierzu wurde diese Fraktion für einen rechteckigen Bereich an der Westküste Sylts markiert. Die Verlagerung ist aus Abbildung 6.2 zu erkennen.

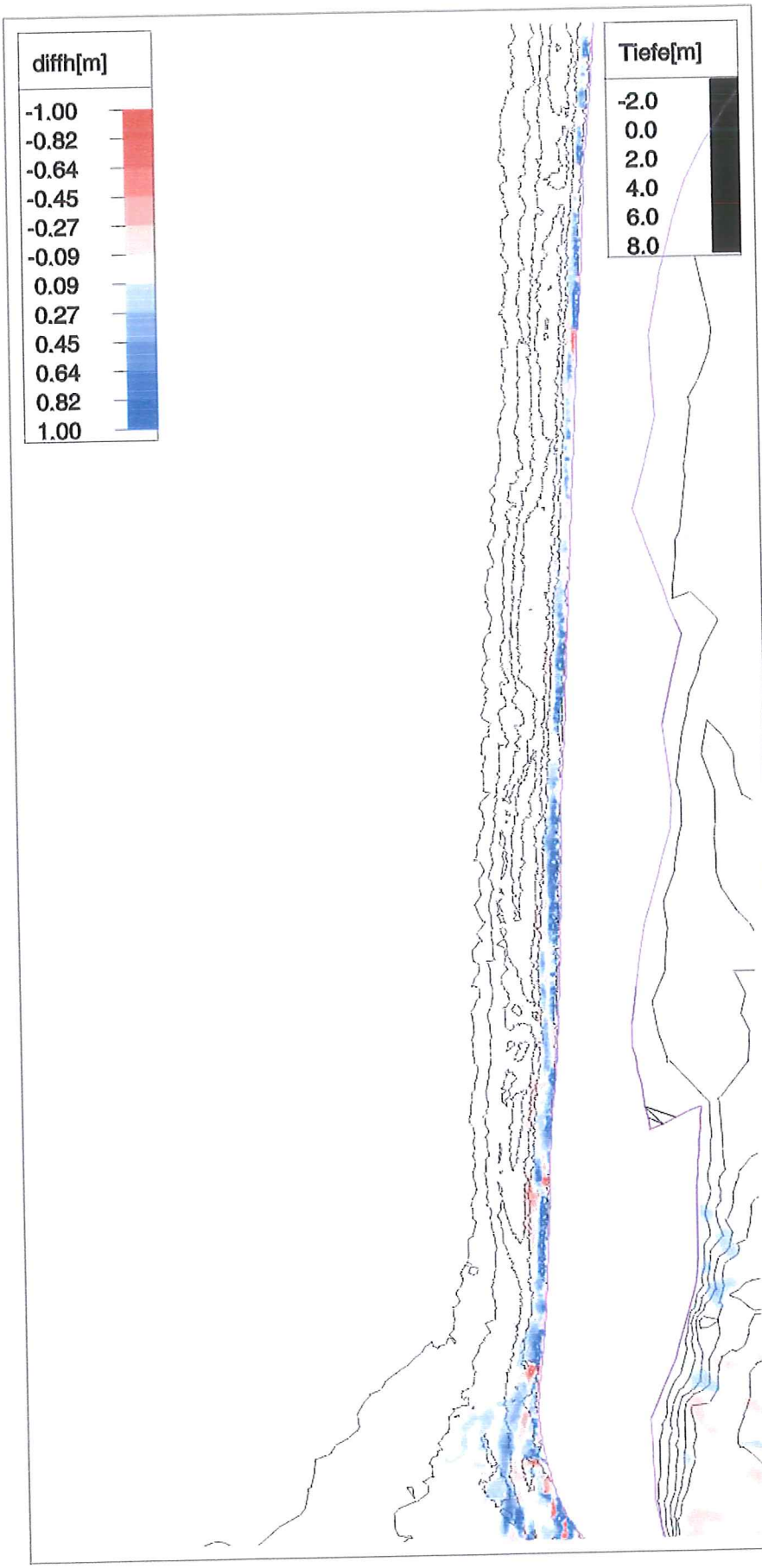


Abbildung 6.1: Berechnete Tiefenänderungen nach zwei Tiden bei NW 15 m/s

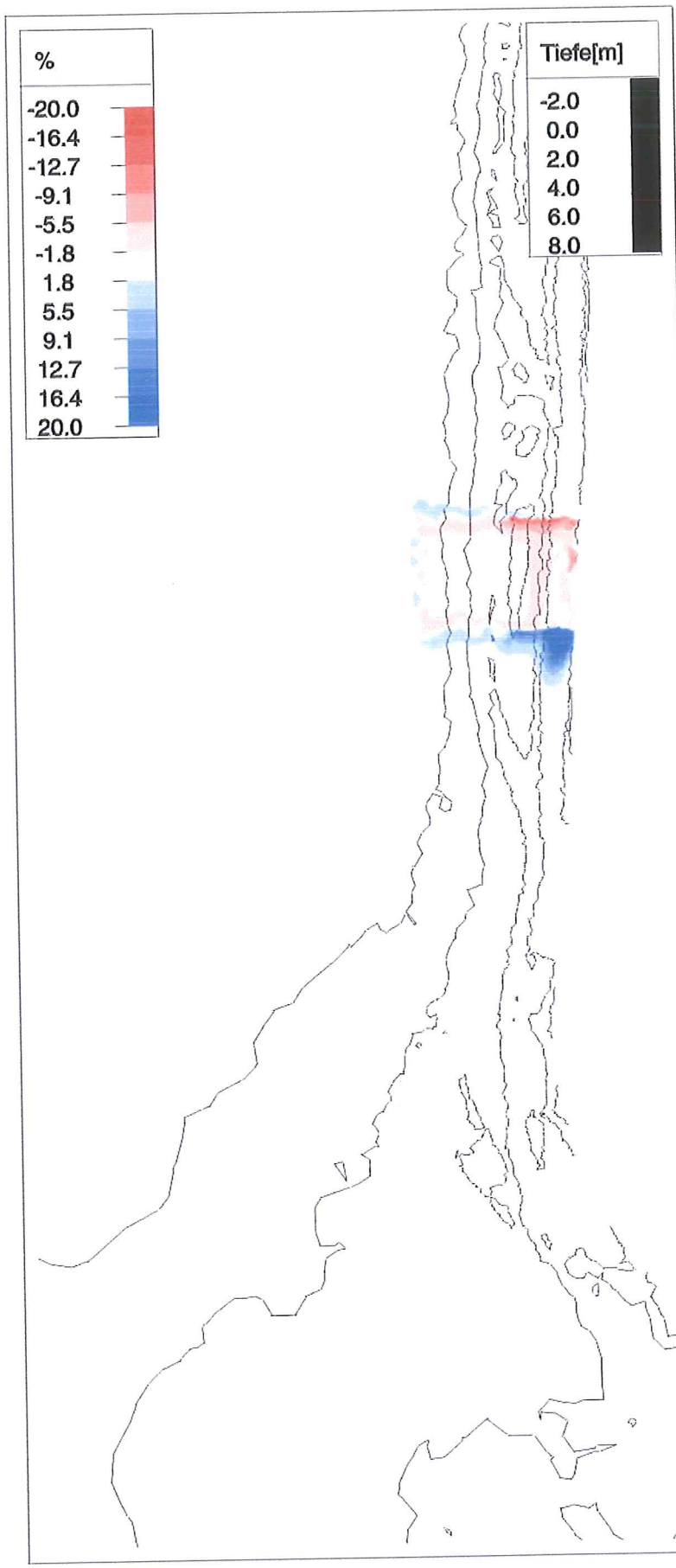


Abbildung 6.2: Verlagerung der Kornfraktion 0.21 mm innerhalb von zwei Tiden bei NW 15 m/s

7 Sedimenttransportpfade

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

7.1 Akkumulation von feinkörnigem Sediment im Hörnumbecken

Zwischen der Nordsee und seinen 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 Ästuare 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.

7.1.1 Das Untersuchungsgebiet

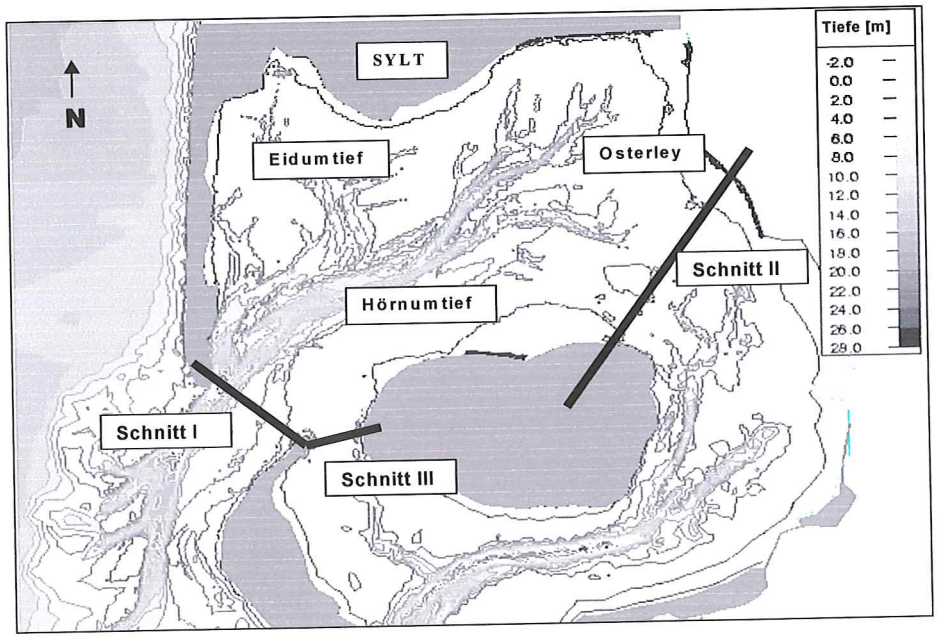


Abbildung 7.1: Tiefenverteilung Hörnumbecken mit Lage der Schnitte I-III

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 Abbildung 7.1) 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 verband. Dieser Damm verringerte das Tideprisma des Beckens, weil es 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 Abbildung 7.1 dargestellten Schnitten für verschiedene morphodynamische Simulationsrechnungen ermittelt.

7.1.2 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 Meersspiegelanstieg in Zukunft ist und ob er befriedigt werden kann. Hierbei wurde ausschließlich der feinkörnige Anteil betrachtet. Dieser ist wesentlich mobiler als gröberes Material, da es über weite Distanzen in Suspension transportiert werden kann. Als mögliche Quellen solchen Materials können der Schwebstoffeintrag über die Ästuare sowie organisches Material 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 angenommen 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), 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 UND PHEIFFER MADSEN (1995) kann für ρ^*p ein Wert von 1000kg/m³ gut für derartiges Material angesetzt werden. Somit ergibt sich:

$$c_a = \frac{S}{P} = \frac{9Mio.m^3}{520Mio.\frac{m^3}{Tide} \cdot 705\frac{Tiden}{a} \cdot 40a} \cdot 1000\frac{kg}{m^3} = 0.65mg/l$$

In der folgenden Tabelle 1 sind gemessene akkumulationsrelevante Konzentrationen c_a aus anderen Teilen des Wattenmeeres zusammengestellt.

Tidebecken	ca [mg/l]	Autor
Dollart	3,1	Van Es [1977]
Niederländisches Wattenmeer	0,35-1,04	Delft Hydraulic Laboratorium [1980]
Jade	1,8	Eisma[1981]
Gradyb	1,5	Bartholdy and Pheiffer Madsen [1985]

Tabelle 7.1: Aus Messungen bestimmte akkumulationsrelevante Konzentrationen c_a

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.

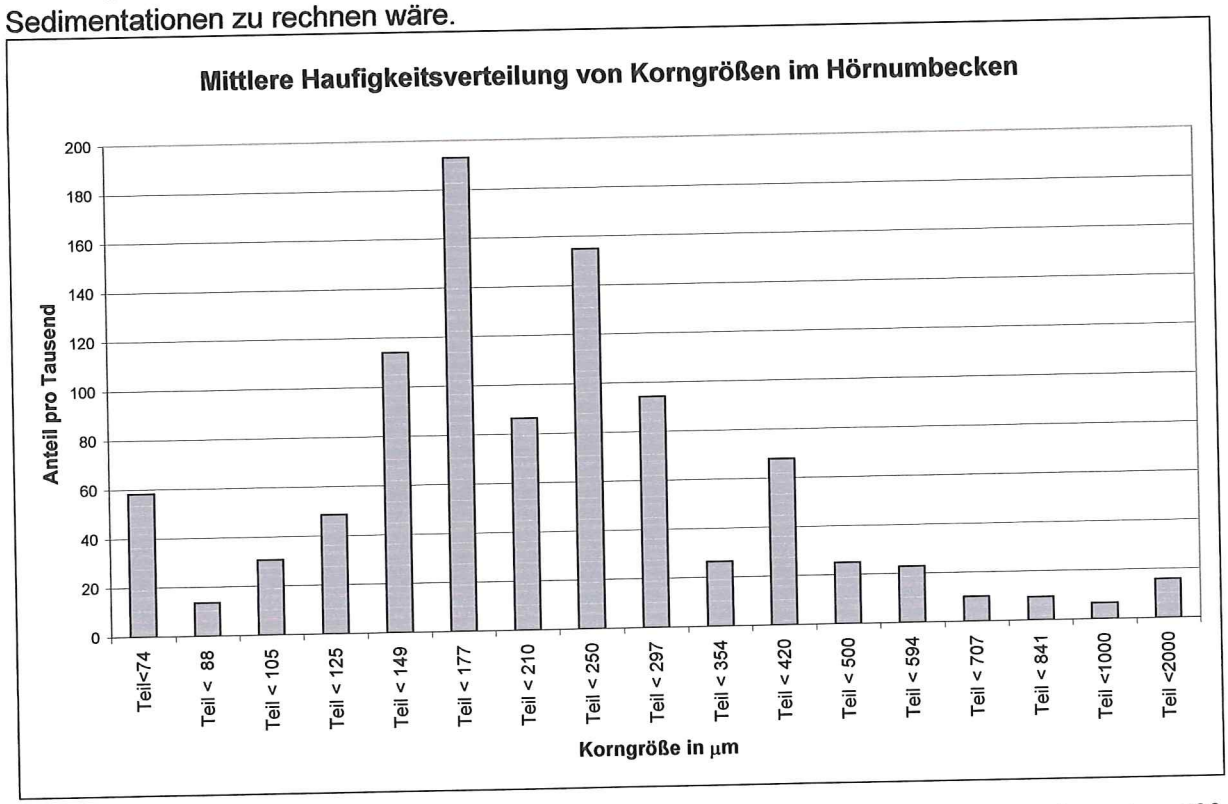


Abbildung 7.2: Mittlere Kornverteilung Hörnumbecken, erstellt aus mehr als 500 Sedimentproben aus der Sedimentdatenbank des BSH

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 Abbildung 7.2, 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 kann man schlussfolgern, 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 akkumulationsrelevanten Konzentrationen des niederländischen Wattenmeeres (vgl. Tabelle 1) einzuordnen ist. Damit reichte der Import an feinem Material nicht aus, um den Sedimentbedarf bei steigendem Meeresspiegel zu decken.

7.1.3 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, was 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 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.

7.1.3.1 Morphologieänderungen

Die Berechnungsergebnisse werden für den Zustand nach 3 Tiden diskutiert, um eine Vergleichsmöglichkeit zur Simulation STURM zu ermöglichen.
In Abbildung 7.3 links sind die Morphologieänderungen nach 3 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, liegt seine Wirkung vor allem in der langfristigen Beeinflussung der Morphodynamik des Beckens.

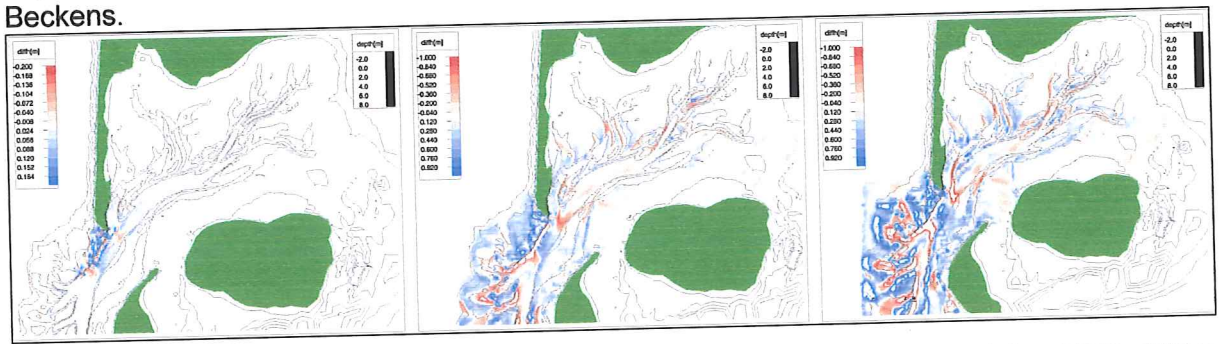


Abbildung 7.3: Berechnete Tiefenänderungen in 3 Tiden (blau:Erosion); links: TIDE, Mitte: WELLE, rechts: STURM

Die berechneten Morphologieänderungen in Simulation WELLE, dargestellt in Abbildung 7.3 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 (siehe Abbildung 7.3 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.

7.1.3.2 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.

7.1.3.2.1 *Simulation TIDE*

Wie Abbildung 7.4 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 Abbildung 7.5 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.

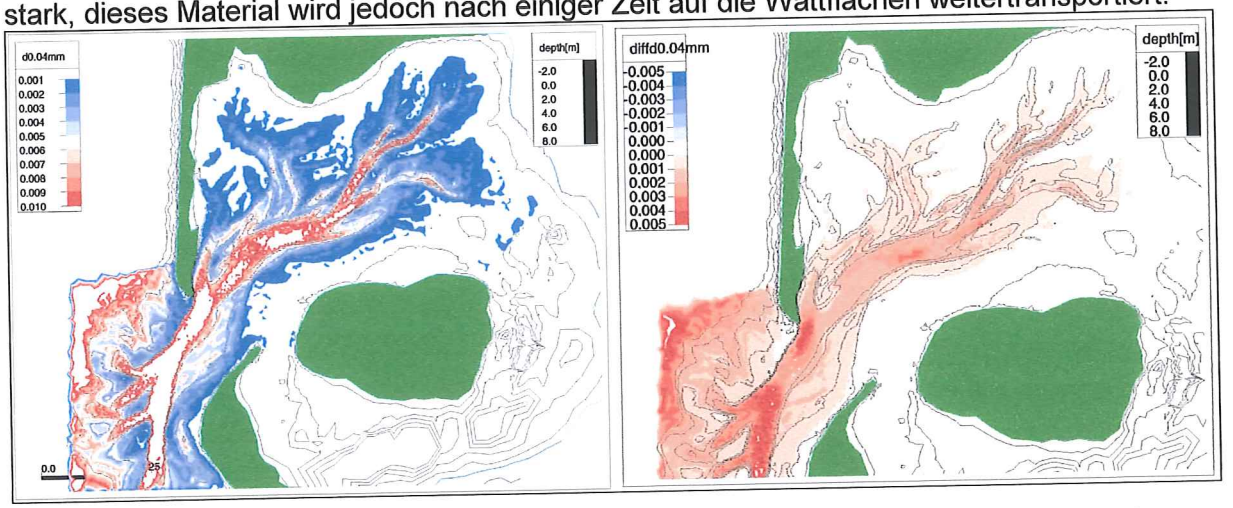


Abbildung 7.4: Links: Anteil Fraktion I in der obersten Bodenschicht nach 3 Tiden (Rechnung TIDE), rechts: Änderung des Anteils Fraktion I in der obersten Bodenschicht in der dritten Tide (Rechnung TIDE) (rot: Zunahme)

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 3 Tiden zu einem Nettoimport von feinkörnigem Material, wobei nur eine sehr kleine Varianz in der Zeit auftritt. Dies kann Abbildung 7.10 entnommen werden.

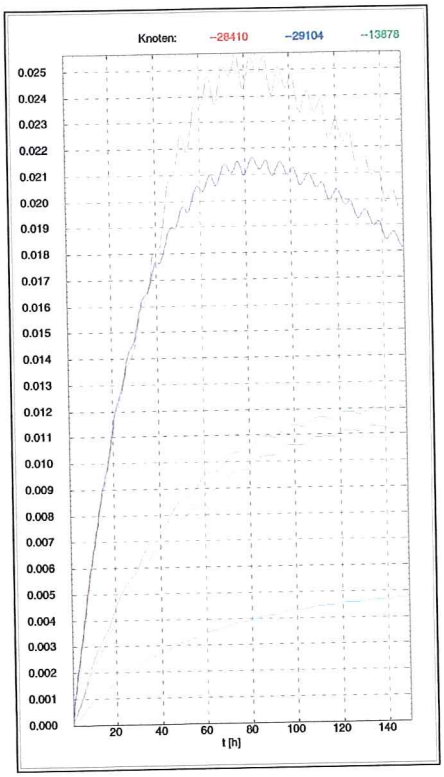


Abbildung 7.5: Anteil Fraktion I in der obersten Bodenschicht an einigen ausgewählten Rinnenknoten

7.1.3.2.2 Simulation WELLE

Aufgrund der Seegangswirkung am Ebbdelta kann sich das feinkörnige Material dort nicht absetzen (siehe Abbildung 7.6). 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.

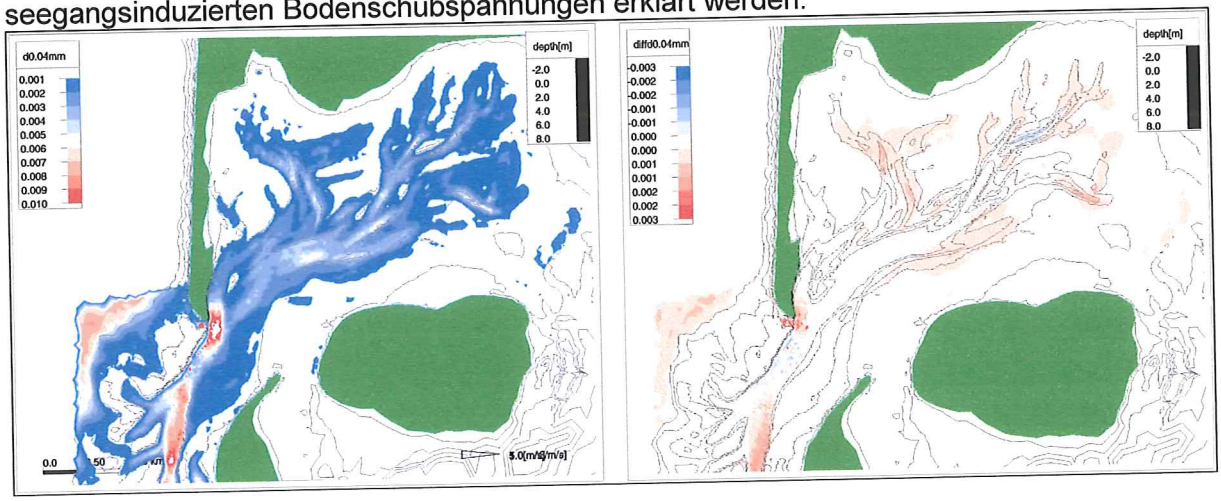


Abbildung 7.6: Links: Anteil Fraktion I in der obersten Bodenschicht nach 3 Tiden (Rechnung WELLE), rechts: Änderung des Anteils Fraktion I in der obersten Bodenschicht in der dritten Tide (Rechnung WELLE) (rot: Zunahme)

Im Allgemeinen wird ein größerer Teil des Materials in Suspension gehalten, wodurch sich weniger Material dieser Fraktion in die oberste Bodenschicht einmischt. Aus Abbildung 7.6 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 Abbildung 7.3). 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 Abbildung 7.10). 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. Abbildung 7.1) hinweg ins Nachbarbecken statt. Dies geschieht aufgrund der leicht ostwärts gerichteten Strömung, welche durch westliche Winde induziert wird (siehe Abbildung 7.9). Während ruhiger Wetterperioden (Berechnung TIDE) gibt es eine Nettoströmung in das Becken durch Schnitt II.

7.1.3.2.3 Simulation STURM

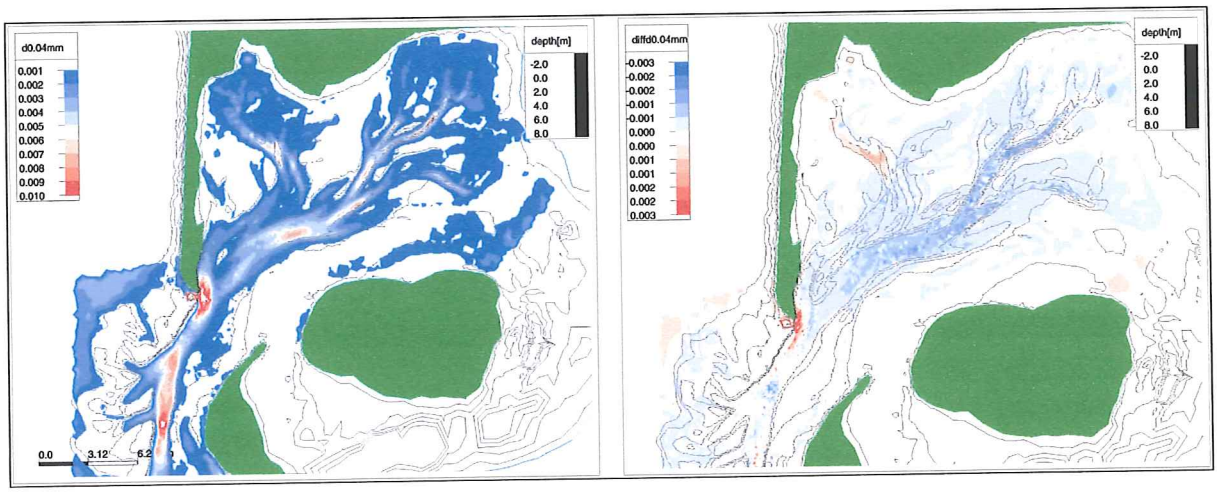


Abbildung 7.7: Links: Anteil Fraktion I in der obersten Bodenschicht nach 3 Tiden (Rechnung STURM), rechts: Änderung des Anteils Fraktion I in der obersten Bodenschicht in der dritten Tide (Rechnung STURM) (rot: Zunahme)

Während der Berechnung STURM unterscheiden sich die Strömungsverhältnisse stark von denen der anderen beiden Simulationen. Ein Vergleich bezüglich der Einteilung in 3 Tiden ist nicht möglich, da die Dauer der ersten Tide durch die angenommen Wasserstandsrandbedingung und den Windeinfluss verlängert wurde. Nach 37,5 h (3 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 (siehe Abbildung 7.9). 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. Abbildung 7.7 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 einem hohen Wasserspiegel, 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 Abbildung 7.7 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 einerseits 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.

7.1.3.3 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 Abbildung 7.8 entnommen werden.

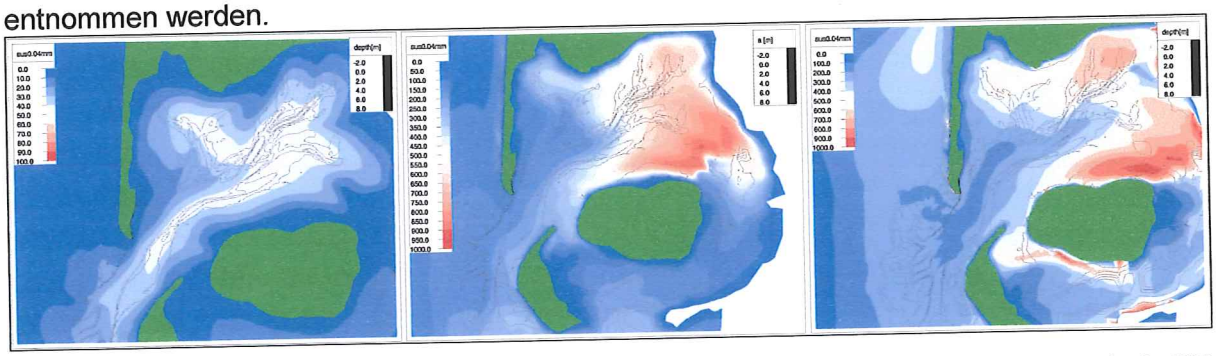


Abbildung 7.8: Suspensionskonzentrationen bei Hochwasser. Links: Rechnung TIDE (rot: 100 mg/l); Mitte: Rechnung WELLE (rot: 1000 mg/l); rechts: Rechnung STURM (rot: 1000 mg/l)

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 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 Abbildung 7.8 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.

7.1.4 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 Abbildung 7.1 dargestellten Schnitte bestimmt. Der Nettosedimenttransport in Suspension wurde für eine Zeitdauer von 3 Tiden (ca. 36,5 h) gemäß der folgenden Beziehung ermittelt:

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

Gleichung 1

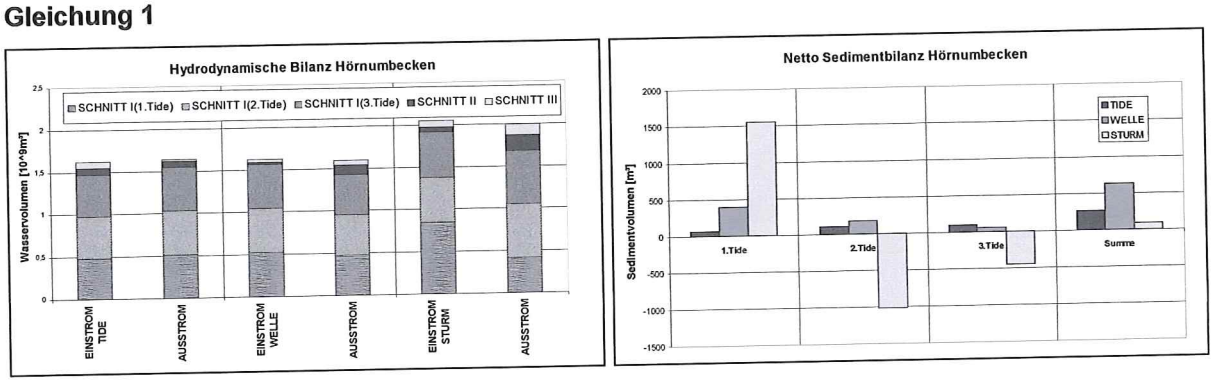


Abbildung 7.9: Links: hydrodynamische Bilanz, rechts: Sedimentbilanz Fraktion I

Die Ergebnisse sind in Abbildung 7.9 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

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

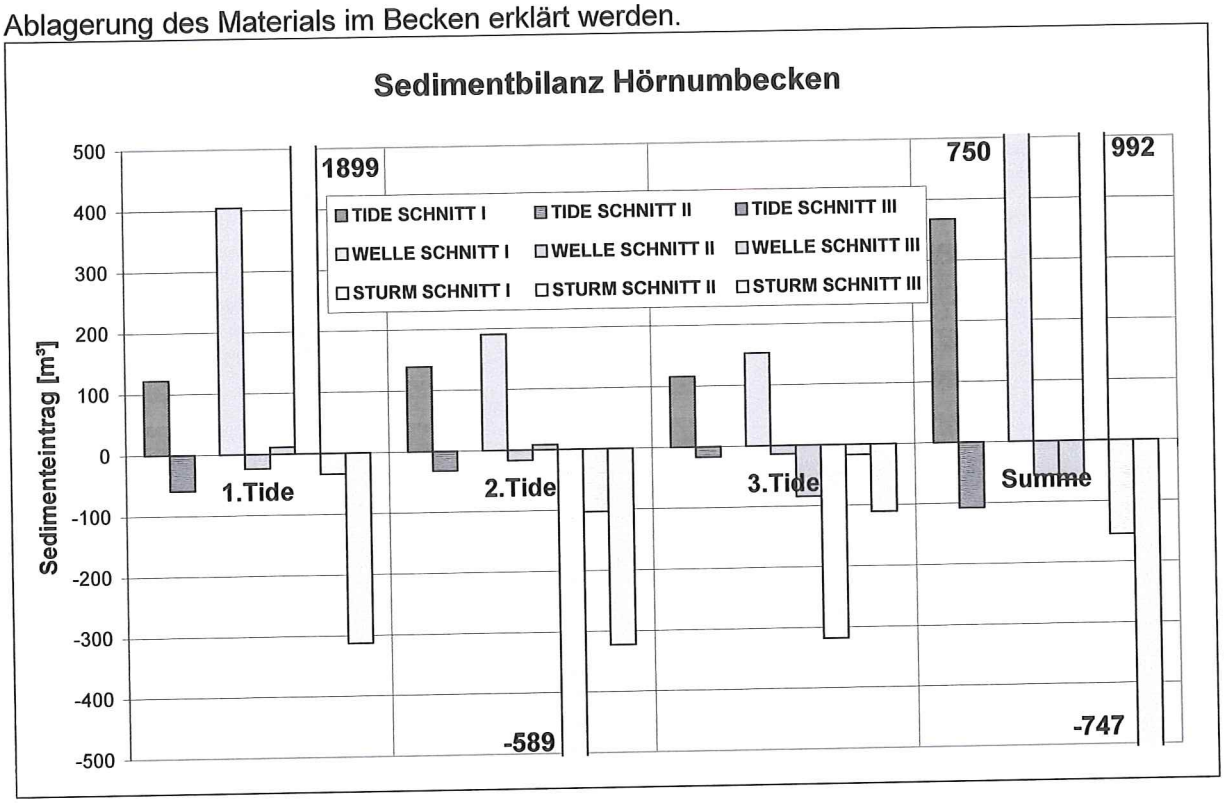


Abbildung 7.10: Sedimentbilanz Fraktion I nach Schnitten

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 Suspensionskonzentration verantwortlich gemacht werden können.
Mit Hilfe des importierten feinkörnigen Sedimentvolumens und dem mittleren Tidevolumen der Berechnung, die in Abbildung 7.9 dargestellt ist, kann die mittlere akkumulationsrelevante Konzentration bestimmt werden.
Diese liegen 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 sich die hydrodynamische Bilanz am Ende der Berechnung noch nicht vollständig im Gleichgewicht befindet, 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 steigenden Meeresspiegel gewährleistet, erreicht. Eine Grund dafür könnte in der vorgegebenen Suspensionskonzentration der Feinkornfraktion im Wasser der offenen Nordsee von nur 7 mg/l sein.
Daher wurden ergänzend für Rechnung WELLE eine Hintergrundkonzentration von 21 mg/l und für Rechnung STURM von 42 mg/l angesetzt.

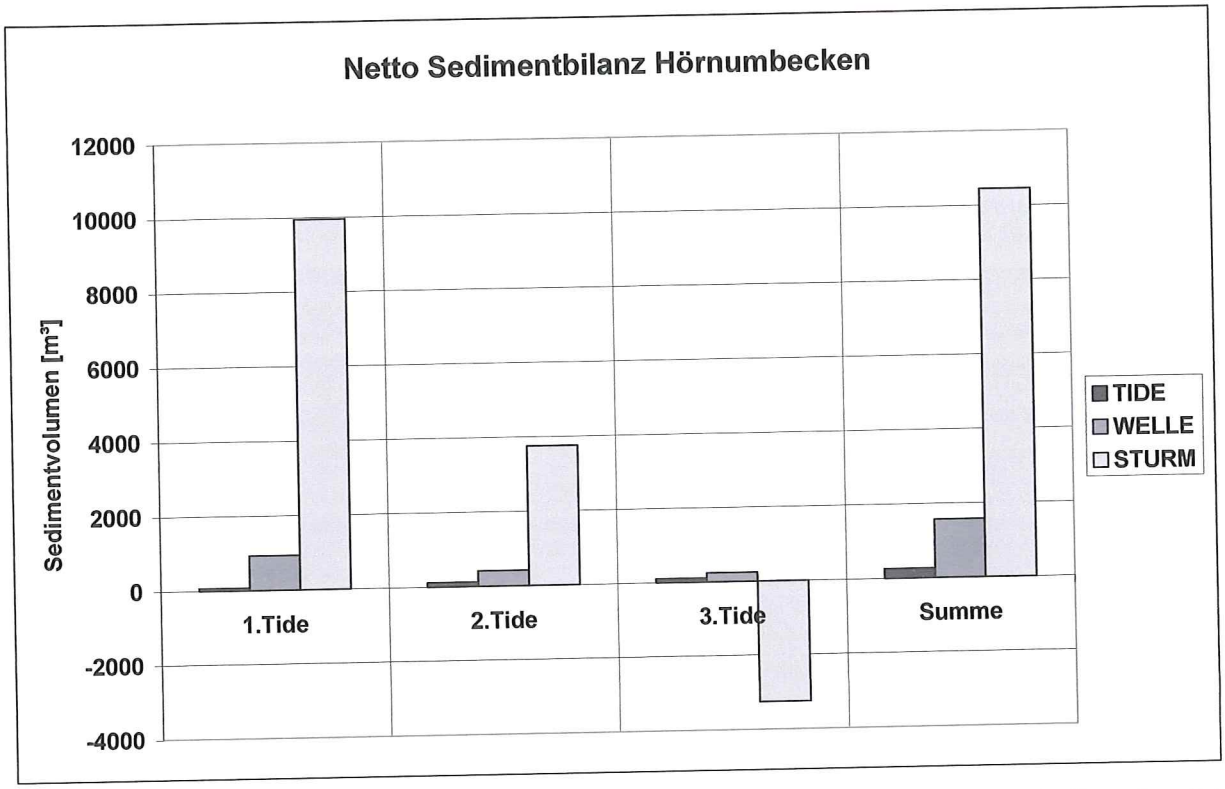


Abbildung 7.11: Sedimentbilanz Fraktion I bei erhöhter Schwebstoffkonzentration in der offenen See für Rechnung WELLE und STURM

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

Tabelle 7.2: Akkumulationsrelevante Konzentrationen für verschiedene Szenarien

7.1.5 Zusammenfassung

Es wurde eine morphologische Studie für das Hörnumbecken durchgeführt, um die Akkumulation von feinkörnigen Sediment unter verschiedenen hydrodynamischen Bedingungen zu untersuchen. Die Akkumulation von feinkörnigem Material ist von großer Bedeutung für das Anwachsen der Wattflächen mit steigendem Meeresspiegel.
Für die kommenden 40 Jahre wurde ein Sedimentbedarf von ca. 9 Mio. m³ abgeschätzt, um das gegenwärtige morphologische Gleichgewicht gemäß der Regime-Theorie zu erhalten. Bezieht man diesen Bedarf auf das Tidevolumen, welches in dieser Zeit in das Hörnumbecken hineingelangt, so führt dies auf eine erforderliche akkumulationsrelevante Konzentration von 0,65 mg/l. Diese ist als die mittlere Differenz der Suspensionskonzentration zwischen ein- und ausströmendem Wasser zu interpretieren. Betrachtet man die gemessene akkumulationsrelevante Konzentration c_a für andere Tidebecken und die Verfügbarkeit an feinem Sediment in der näheren Umgebung des Hörnumbeckens, so ist es fragwürdig, ob im Hörnumbecken Ablagerungen in dieser

Größenordnung stattfinden können. Es wurden daher drei morphodynamische Rechnungen durchgeführt, um den Einfluss von verschiedenen hydrodynamischen Bedingungen auf die Ablagerung von feinkörnigem Material zu untersuchen. Die Berechnungen ergaben eine maximale akkumulationsrelevante Konzentration c_a von 0,42 mg/l unter moderaten Seegangsbedingungen. Hier wurde ein Westwind mit 5-10 m/s als repräsentative Windsituation angesetzt. Die relevante Ablagerungskonzentration c_a in der Berechnung TIDE, wo der Seegangseinfluss vernachlässigt wurde, wurde zu 0,17 mg/l und in der Berechnung STURM zu 0,05 mg/l ermittelt. Die ermittelten Werte sind kleiner als die erforderliche akkumulationsrelevante Konzentration c_a von 0,65 mg/l. Bei einer Erhöhung der Schwebstoffkonzentration in der offenen See um das dreifache für Rechnung WELLE und das sechsfache für Rechnung STURM kann der erforderliche Sedimentbedarf allerdings gedeckt werden.

7.2 Sedimenttransportpfade Hörnumbecken unter Tidebedingungen

Weiterhin sollte untersucht werden, welche Transportpfade von anderen Korngrößen im System Tidebecken-Ebbdelta unter Tidebedingungen (Vernachlässigung des Seegangs) 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 2 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 das physikalische System nicht verändert möglich. 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 Abbildung 7.13 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.
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.

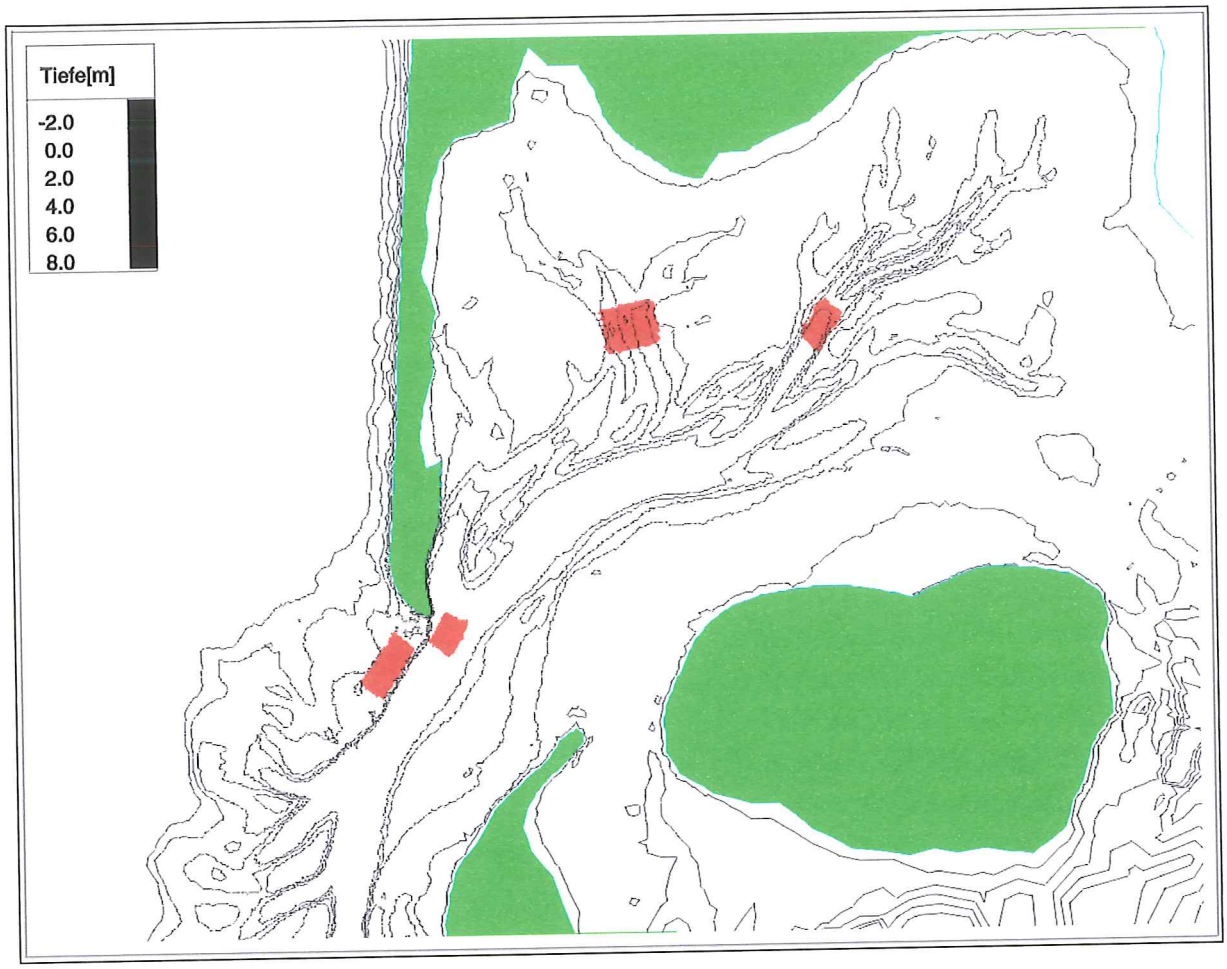


Abbildung 7.12: Ausgangslage des Tracermaterials; die untersuchten Korngrößen wurden örtlich variabel entsprechend ihrem Vorkommen angesetzt.

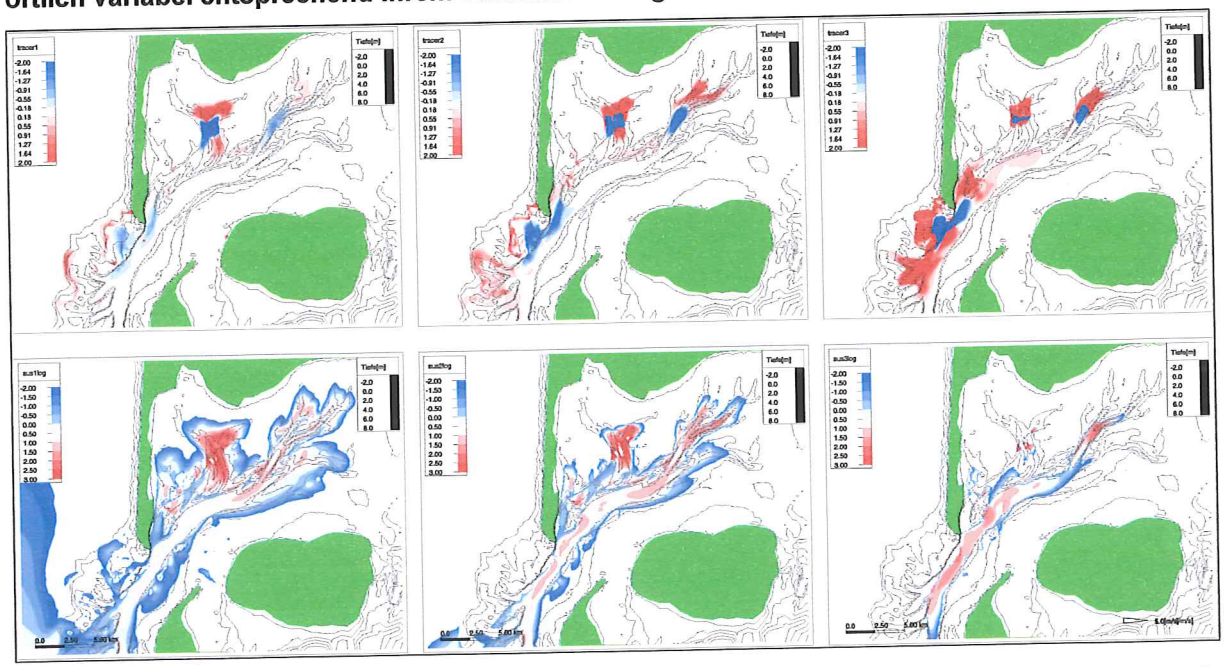


Abbildung 7.13: Oben: Veränderung der Tracerfraktionen in der obersten Bodenschicht nach 20 Tiden (rot: Zunahme); unten: Verteilung der Tracerfraktionen in Suspension während maximaler Ebbstromgeschwindigkeit nach 20 Tiden; links: 0.15 mm, Mitte: 0.3 mm; rechts: 0.6mm

7.3 Identifikation verschiedener Kornverteilungstypen

Für das Hörnumbecken stand eine Datenbasis aus der Sedimentdatenbank des Bundesamtes für Seeschiffahrt und Hydrographie (BSH) zur Verfügung. Der Großteil der Proben wurde als Summengewichtskurven mit einer Abstufung in ¼-PHI-Graden durch Siebanalyse bestimmt, wobei die kleinste Fraktion größer 3.75 PHI (entspricht kleiner 0.074 mm) und die gröbste –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 unbekannt ist. Das dürfte vor allem in den Rinnen von Bedeutung sein, wo sich zur Kenterzeit größere Mengen 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. 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 ¼-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, was realistisch erschien, 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 der folgenden Abbildung 7.14 dargestellt.

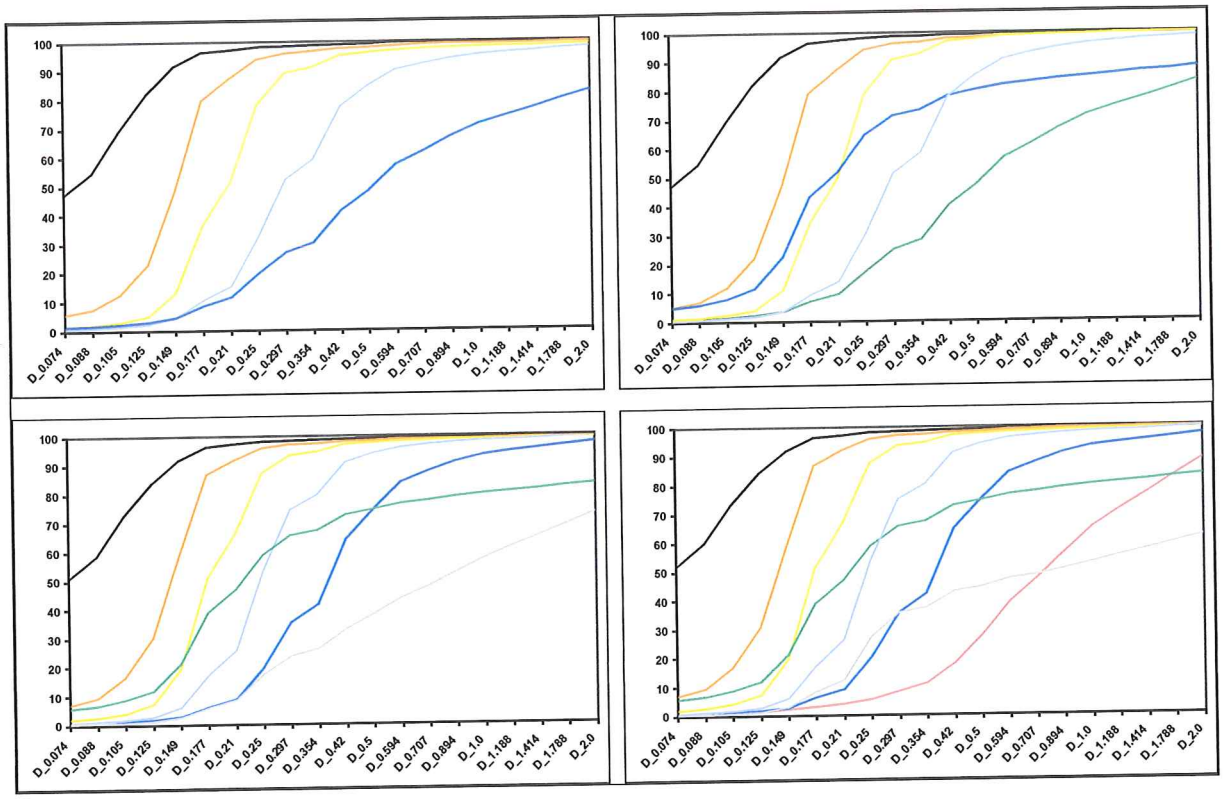


Abbildung 7.14: Kornverteilung der Clusterzentren bei Einteilung in fünf bis acht Cluster

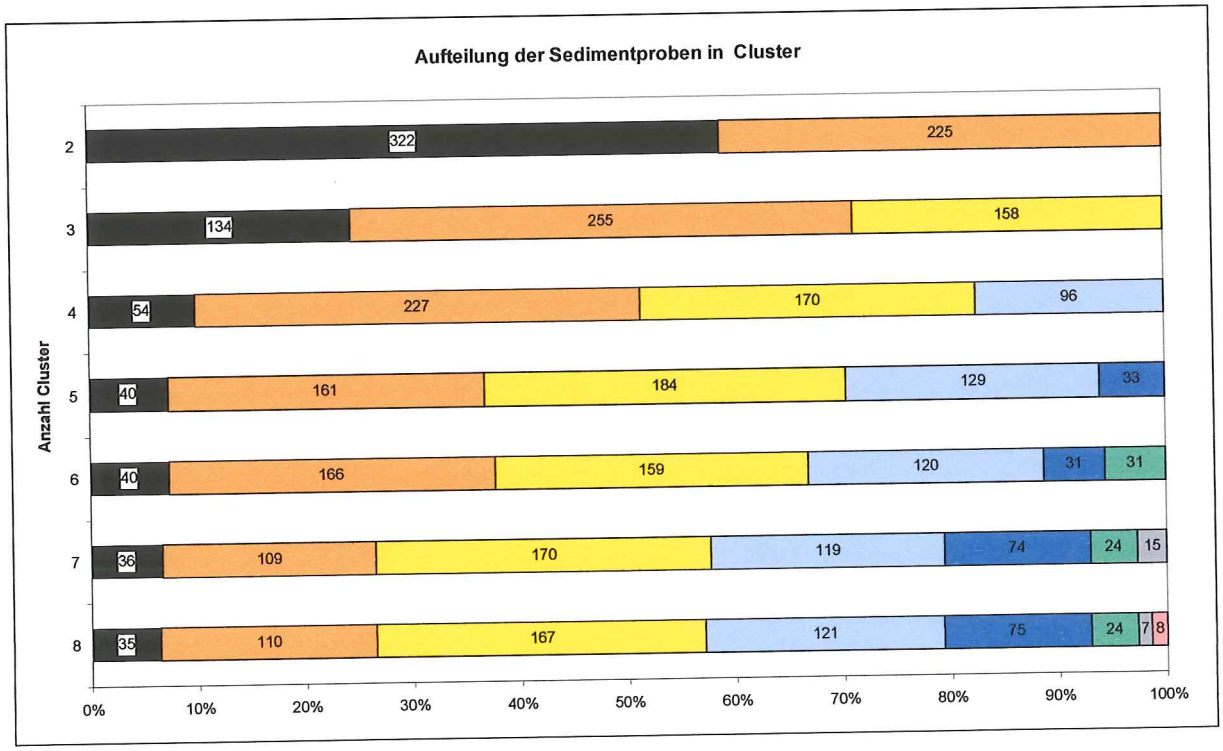


Abbildung 7.15: Aufteilung der Sedimentproben in Cluster. Farbgebung angepasst an Abbildung 7.14

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 gröbste 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 Abbildung 7.15 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.
Die mittlere euklidische Distanz der Sedimentproben zum Clusterzentrum ist in Tabelle 7.3 dargestellt. Sie ist definiert als:

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

Gleichung 7.2

Hierin ist x_{ij} die Merkmalsausprägung des Merkmals j einer Sedimentprobe und $x_{i'j}$ die Merkmalsausprägung im 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

Tabelle 7.3: Mittlere euklidische Distanz der Sedimentproben zum Clusterzentrum

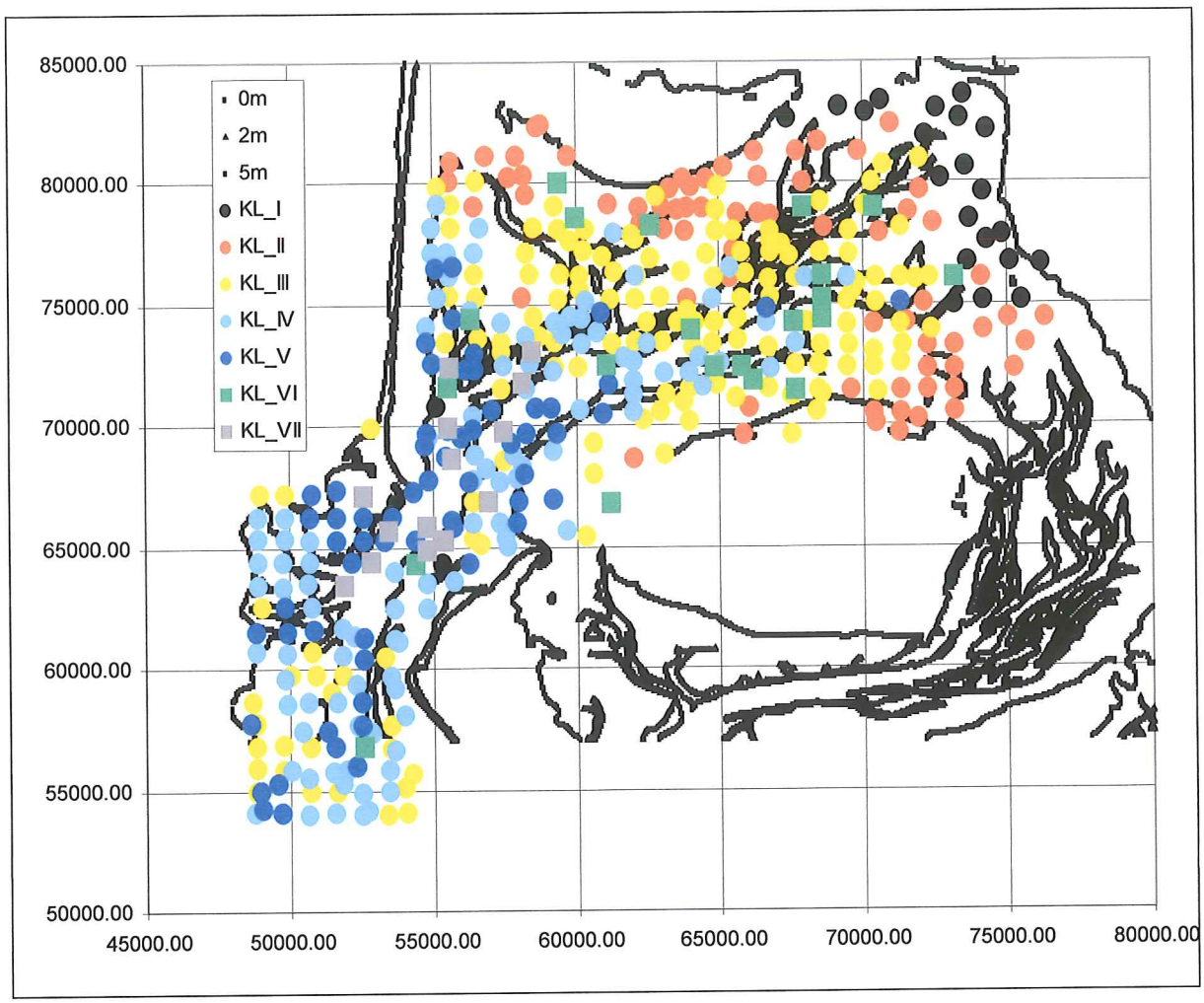


Abbildung 7.16: Klasseneinteilung Sedimentproben Hörnumbecken bei einer Aufteilung in 7 Klassen mit 0m-, 2m- und 5m-Tiefenlinie

Betrachtet man die Lage der Sedimentproben der einzelnen Cluster in Abbildung 7.16 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, 2001b). Ob der hohe Anteil an feinkörnigem Sediment mit diesen Maßnahmen in Verbindung steht, kann nur gemutmaßt werden. Auch biologische Einflüsse wie Muschelbesiedelung 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 (siehe Abbildung 7.14) 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, seegangsgeschützten Bereichen des Ebbdeltas anzutreffen. Derweil die Klassen I und II nur innerhalb des Tidebeckens und mit Entfernungen größer als 10 – 15 km vom Seegat anzutreffen 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 Abbildung 7.14 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 Abbildung 7.15 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 Tideströmung zu großen Variationen führen, die in den Sedimentdaten, da in den meisten Fällen keine genauen Informationen über den Probenahmezeitpunkt vorliegen, nicht differenziert erfasst sind.
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.

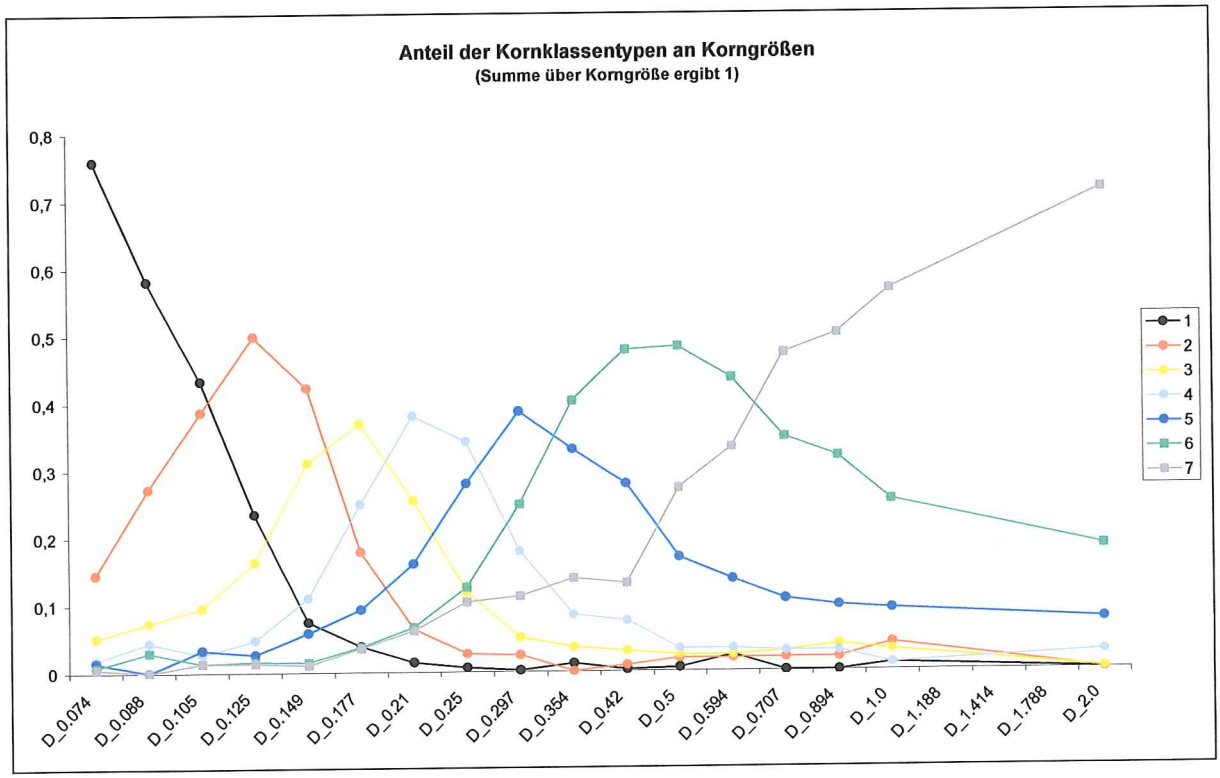


Abbildung 7.17: Anteil der Sedimentklassen an Kornfraktionen (Summe über eine Fraktion ergibt 1.0)

Betrachtet man den Anteil der Sedimentcluster an einer Sedimentfraktion (dargestellt in Abbildung 7.17) 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.

8 Morphodynamische Modellierung der Biodeposition in einem Testfeld der Dithmarscher Bucht

Es wurde ein Modul entwickelt, was in der Lage ist Produktion, Resuspension und Zerfall von Kotpillen sowie die Konsolidierung von zerfallenen Kotpillen zu berechnen. Dieses Modul wurde auf ein 1 km² großes Testfeld in der Dithmarscher Bucht angewendet, in dem von GAST ET AL. (1984) die Biodeposition innerhalb eines fünfmonatigen Zeitraums gemessen wurde.
Zunächst wird das Modul vorgestellt.

8.1 Berechnung der Biofiltration und -deposition

In Tabelle 8.1 sind die für die morphodynamische Modellierung verwendeten Parameter zur artspezifischen Bestimmung der Biodeposition zusammengestellt.

	Macoma balthica	Mytilus edulis	Cerastoderma edule	Mya arenaria
Filtrationsrate f [l/h]	0.2	2	2	2
kritische Geschwindigkeit ucr,bio [m/s]	0.3	0.3	0.3	0.3
Zerfallszeit Kotpillen [d]	14	14	14	14

Tabelle 8.1: Parameter zur Berechnung der Biodeposition

Die Biodeposition errechnet sich volumetrisch als Sohländerung d_{bio} aus der Suspensionskonzentration c, der Filtrationsrate f und der Besiedelungsdichte zu

$$d_{bio} = \frac{c \cdot f \cdot Ind_anz}{\rho_s}$$

Gleichung 8.1

Die in der Kotpillenschicht enthaltene Masse pro m² bestimmt sich zu:

$$Q_{d,bio} = c \cdot f \cdot Ind_anz$$

Gleichung 8.2

Falls die kritische Schubspannungsgeschwindigkeit zur Erosion der Kotpillen $u_{+cr,bio}$ überschritten wird, ergibt sich die Erosionsrate $Q_{e,bio}$, zu:

$$Q_{e,bio} = Q_{e,bio,theo}$$

Gleichung 8.3

falls der Speicherinhalt der Kotpillenschicht $S_{bio} > Q_{e,theo,bio}$ und zu

$$Q_{e,bio} = S_{bio}$$

Gleichung 8.4

falls $S_{bio} < Q_{e,theo,bio}$
Die maximal mögliche Erosionsrate ermittelt sich zu:

$$Q_{e,bio,theo} = M \cdot p_{e,bio}$$

Gleichung 8.5

mit einer Erosionswahrscheinlichkeit von

$$p_{e,bio} = \left(\frac{u_*}{u_{*cr,bio}} \right)^2 - 1$$

Gleichung 8.6

für $u_* > u_{*cr,bio}$

M wurde zu 0.0005 kg/(m² s) angesetzt. Dies entspricht der Obergrenze von VAN RIJN (1993) vorgeschlagenen Werten für Erosionsraten von kohäsivem Sediment. Die Erosionsrate liegt somit an der Obergrenze der zu erwartenden Erosion.
Der Masseninhalt der Kotpillenschicht S_{bio} errechnet sich dabei aus:

$$\frac{S_{bio}}{dt} = Q_{d,bio} - Q_{e,bio} - Q_{zerfal,bio}$$

Gleichung 8.7

8.2 Zerfall der Kotpillen

Um eine größtmögliche Annäherung an die Natur zu erreichen, wurde es als wesentlich angesehen auch den in der Literatur beschriebenen Zerfall der Kotpillen im Modell zu berücksichtigen. Wird dieser nicht berücksichtigt, ergeben sich in vielen Bereichen unrealistisch hohe Mengen an abgelagertem Material, die aufgrund der erhöhten kritischen Schubspannungsgeschwindigkeiten zu permanenter Deposition kommen.
Aus den von BLACK (1980) durchgeführten Untersuchungen an *macoma balthica* geht hervor, dass die Größe der Kotpillen und deren Zerfallszeit nur unwesentlich von der Größe des Individuums beeinflusst wird. Da für andere Arten keine vergleichbaren Untersuchungen vorlagen, die Größe aber scheinbar wenig Einfluss hat und die hier betrachteten Arten ohnehin im gleichen Größenbereich liegen, wurden die von BLACK ermittelten Werte für alle Arten übertragen.
Die von ihm ermittelte Zerfallszeit lag bei 16.3 Tagen bei ruhiger See und 7.6 Tagen bei stärkeren Winden. Da im Modell der Seegang zunächst unberücksichtigt bleiben sollte, wurde die Zerfallszeit $t_{zerfall}$ auf 14 Tage für alle betrachteten Arten festgesetzt.

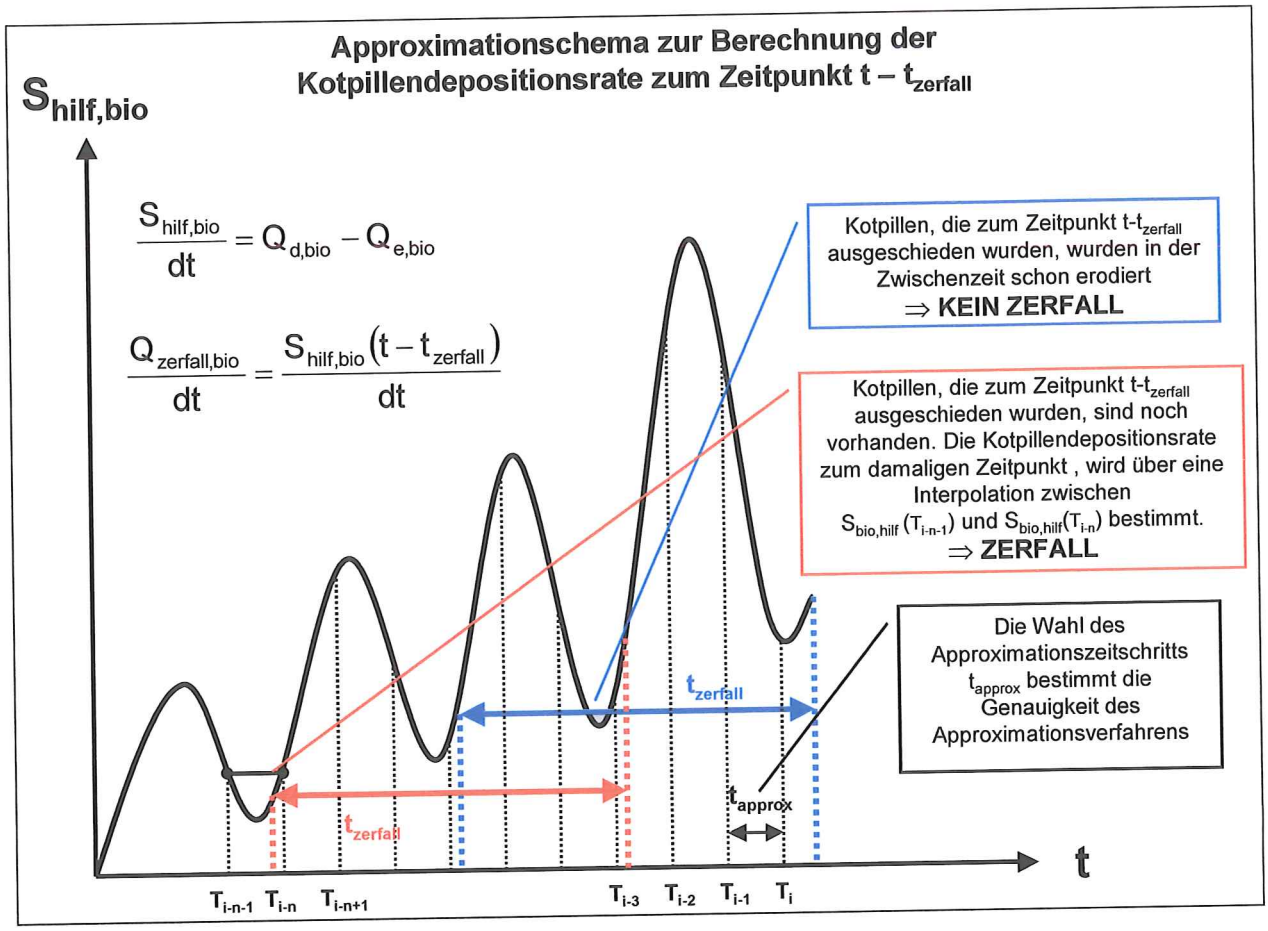


Abbildung 8.1: Approximationsschema zur Berechnung der Kotpillendepositionsrate zum Zeitpunkt t – $t_{zerfall}$. BLAU: Die zum Zeitpunkt t – $t_{zerfall}$ abgelagerten Kotpillen wurden zwischenzeitlich bereits erodiert, daher kommt es zu keinem Zerfall. ROT: Hier sind die vor der Zerfallszeit abgelagerten Kotpillen noch vorhanden (Der Verlauf der Hilfsgröße $S_{hilf,bio}$ unterschreitet den damaligen Wert nicht.). Die Zerfallsrate ergibt sich aus der Kotpillendepositionsrate zum damaligen Zeitpunkt, die aus der Interpolation der vorhergehenden und nachfolgenden Stützstelle errechnet werden kann.

Die Umsetzung in ein morphodynamisches Modell erfordert, dass die Kotpillendepositionsrate zum Zeitpunkt t – $t_{zerfall}$ bekannt ist, die der Menge an Kotpillen entspricht, die zum aktuellen Zeitpunkt zerfallen muss. Allerdings muss geprüft werden, ob die zum Zeitpunkt t – $t_{zerfall}$ ausgeschiedenen Kotpillen überhaupt noch vorhanden sind oder bereits zwischenzeitlich erodiert wurden. Erforderlich ist also, dass man die Sedimentationsgeschichte der Kotpillen im Modell kennen muss. Dies ist aus Speichergründen jedoch nicht für jeden Zeitschritt leistbar.
Daher wurde ein Approximationsverfahren eingeführt. Dieses ist in Abbildung 8.1 dargestellt. Die Grundidee des Verfahrens ist es, die Sedimentationsgeschichte aus einer Reihe von Stützstellen zu berechnen. Dies ist nur dann erfolgversprechend, wenn die Sedimentationsgeschichte vergleichsweise kleinen unsystematischen Fluktuationen unterliegt. Dies dürfte im vorliegenden Fall gegeben sein, da das Absetzverhalten in einem tidegeprägten Gebiet zyklisch verläuft. Erosion von Kotpillen ist nur dann möglich, wenn eine bestimmte kritische Geschwindigkeit überschritten wird, die jedoch aufgrund der Tidebewegung zyklisch auftritt. Das ermöglicht es, die Sedimentationsgeschichte durch eine geringe Anzahl von Stützstellen anzunähern. Die Kotpillendepositionsrate zu einem bestimmten Zeitpunkt kann dann durch lineare Interpolation der vor und nach dem interessierenden Zeitpunkt liegenden Stützstelle ermittelt werden.

Dies ist in Abbildung 8.1 anhand von zwei Beispielen erläutert: Im blau markierten Fall kommt es zu keinem Zerfall von Kotpillen, weil die Kotpillen, die vor der Zerfallszeit (im Modell 14 Tage) abgelagert wurden, bereits zwischenzeitlich erodiert wurden. Dies ist daran zu erkennen, dass der Verlauf der Hilfsgröße, die sich aus der Bilanz aus abgelagerten und erodierten Kotpillen ergibt, zwischenzeitlich den Ausgangswert zum Zeitpunkt $t - t_{zerfall}$ unterschritten hatte. Im rot markierten Beispiel ist dies nicht der Fall. Die Zerfallsrate ist hier gleich der Kotpillendepositionsrate zum Zeitpunkt $t - t_{zerfall}$. Diese kann im Modell aus Speichergründen nicht ständig vorgehalten werden und wird daher durch lineare Interpolation von davor und dahinter gelegenen Stützstellen errechnet.
Erst wenn die Kotpille sich für eine vorher festgelegte Zeit der Kotpillenschicht befunden hat und nicht erodiert wurde, kann sie zerfallen.
Die Kotpillenzerfallsrate ergibt sich also aus:

$$\frac{Q_{zerfall,bio}}{dt} = \frac{S_{hilf,bio}(t - t_{zerfall})}{dt}$$

Gleichung 8.8

falls die Hilfsgröße $S_{hilf,bio}(t\text{-}t_{zerfall})$ das Minimum der Hilfsgröße $S_{hilf,bio}$ für den gesamten Zeitraum von $t\text{-}t_{zerfall}$ bis t ist, was bedeutet, dass die zum Zeitpunkt $t\text{-}t_{zerfall}$ abgelagerte Kotpille in der Zwischenzeit nicht erodiert wurde.
Ansonsten gilt:

$$\frac{Q_{zerfall,bio}}{dt} = 0$$

Gleichung 8.9

Die Hilfsgröße $S_{hilf,bio}$ ermittelt sich als Bilanzgröße aus abgelagerten und erodierten Kotpillen zu:

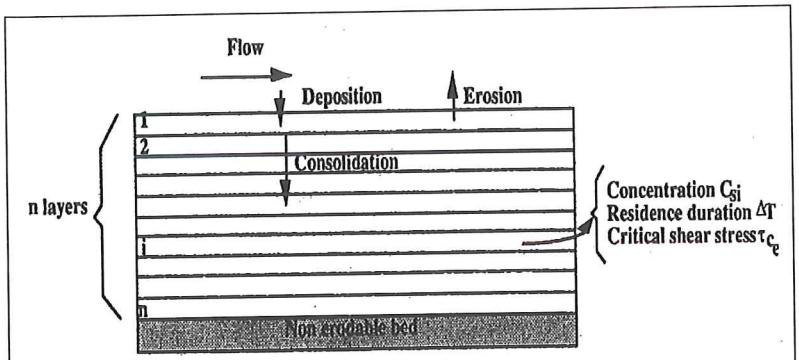
$$\frac{S_{hilf,bio}}{dt} = Q_{d,bio} - Q_{e,bio}$$

Gleichung 8.10

Schließlich wird für jeden Zeitschritt der Masseninhalt der Kotpillenschicht berechnet.

8.3 Konsolidierung der zerfallenen Kotpillen

Weiterhin wurde es als wesentlich angesehen, die Konsolidierung der zerfallenen Kotpillen zu berücksichtigen.
Unter Konsolidierung wird der Vorgang verstanden, dass im kohäsiven Sediment gebundenes Wasser durch Eigengewichtsbelastung ausgetrieben wird. Dadurch verliert der Sedimentkörper an Volumen und ist gleichzeitig schwerer erodierbar. In den meisten Tidebecken hat die Konsolidierung, anders als in Ästuaren, aufgrund der geringen Suspensionskonzentrationen nur eine untergeordnete Rolle. Im Fall der massenhaft produzierten Kotpillen ist dies jedoch anders, da Deposition größerer Mengen häufig auf örtlich eng begrenzten Bereichen stattfindet.



Layer	C_s (g/l)	t (h)	u_{*_e} (cm/s)
1	110	2	0,80
2	126	2	0,94
3	139	2	1,06
4	154	4	1,19
5	172	6	1,36
6	191	8	1,54
7	209	16	1,70
8	226	32	1,87
9	243	54	2,04
10	299	infinite	3,33

Abbildung 8.2: Mehrschichtansatz nach TEISSON (1991) zur Berücksichtigung der Konsolidierung mit Angabe der von ihm verwendeten schichtspezifischen Parameter

Zur Integration der Konsolidierung von kohäsiven Sedimenten in das morphodynamische Modell TIMOR wurde ein Ansatz von TEISSON (1991) gewählt. Dieser unterteilt das Bodenprofil in eine Anzahl von Schichten, die einer Einteilung des Konsolidierungsvorgangs in mehrere Stadien entspricht.

Jede Schicht wird durch die Parameter Sedimentkonzentration, Aufenthaltsdauer $t_{verweil,i}$ und die kritische Schubspannungsgeschwindigkeit für Erosion $u_{*cr,e,i}$ charakterisiert. Diese Werte müssen experimentell bestimmt werden. Die schematische Funktionsweise kann Abbildung 8.2 entnommen werden.

Wesentliches Merkmal des Konsolidierungsmoduls ist, wie auch schon beim Zerfall der Kotpillen, dass die Sedimentationsgeschichte bekannt sein muss, da erst nach einer bestimmten schichtspezifischen Verweilzeit $t_{verweil,i}$ Material in die darunter gelegene, stärker konsolidierte Schicht abgegeben wird. Hierzu ist es notwendig eine Hilfsgröße $S_{hilf,i}$ einzuführen, mit deren Hilfe überprüft wird, ob Material, das vor der schichtspezifischen Verweilzeit zugeführt wurde, noch vorhanden ist. Sie ergibt sich somit aus der Differenz zwischen Zugabe durch Deposition Q_d oder Abgabe aus der höhergelegenen Schicht $Q_{k,i-1}$ und der Erosion $Q_{e,i}$ ergibt. Die Abgabe von Material in die untere Schicht $Q_{k,i}$ bleibt für diese Hilfsgröße logischerweise unberücksichtigt.

Eine Abgabe an die darunter gelegene Schicht ist nur möglich, wenn Material über die gesamte Verweilzeit innerhalb der Schicht vorhanden war. Zusätzlich ist der Verlust an Volumen zu beachten, der mit dem Eintritt in eine neue Phase der Konsolidierung einher geht. Dies wird über die in Abbildung 8.2 angegebenen schichtspezifischen Parameter ermittelt.

Sinkt die Schubspannungsgeschwindigkeit unter die kritische Schubspannungsgeschwindigkeit für Deposition $u_{*cr,d}$, so kann eine Depositionsrate Q_d für die erste Schicht berechnet werden. Im Falle einer Deposition von Sediment gelangt dieses zunächst in die erste Schicht. Wird das abgelagerte Sediment in der darauffolgenden Verweilzeit der ersten Schicht $t_{verweil,1}$ von zwei Stunden nicht erodiert, gelangt es als $Q_{k,1}$ in die zweite, stärker konsolidierte Schicht. Hier wird es zu dem bereits vorhandenen Material hinzugefügt. Solange keine Erosion stattfindet, wird das in jeder Schicht befindliche Material

nach entsprechender Verweilzeit an die untere, stärker konsolidierte Schicht abgegeben. Überschreitet die vorhandene Schubspannungsgeschwindigkeit u_* den kritischen Wert für die erste Schicht $u_{*cr,e,1}$, so kommt es zunächst in Schicht 1 zur Erosion. Die maximal mögliche Erosionsrate $Q_{e,theo,i}$ wird für jede Schicht berechnet. Wurde für Schicht 1 eine höhere Erosionsrate $Q_{e,theo,1}$ berechnet als Material S_1 vorhanden ist, so hat dies zur Folge, dass auch das in Schicht 2 abgelagerte Material S_2 einer möglichen Erosion durch die Strömung ausgesetzt ist. Hier ist die kritische Schubspannungsgeschwindigkeit $u_{*cr,e,2}$ allerdings höher. Ist auch hier die verbleibende Erosionsrate $Q_{e,theo,1} - Q_{e,1}$ größer als der Schichtinhalt S_2, besteht die Möglichkeit einer Erosion von Material in der nächsten Schicht. Dies wird so lange fortgesetzt, bis die mögliche Erosionsrate für eine freigelegte Schicht geringer ist als ihr Inhalt. Damit ist dann das in tieferen Schichten gelagerte Material vor einer Erosion geschützt. Unabhängig vom Speicherinhalt wird der Erosionsvorgang dann beendet, falls die vorhandene Schubspannungsgeschwindigkeit u_* geringer ist als die kritische $u_{*cr,e,i}$.
Somit kann sich die Erosion von Material je nach Erosionsrate und Inhalt der Schichten über mehrere Schichten erstrecken.
Die Schnittstelle zwischen dem Teilmodul Biodeposition und dem Teilmodul Konsolidierung ist die Übergabe der zerfallenen Kotpillen $Q_{zerfall,bio}$ an die erste Schicht des Teilmoduls Konsolidierung.
Dies ist schematisch in Abbildung 8.3 dargestellt.

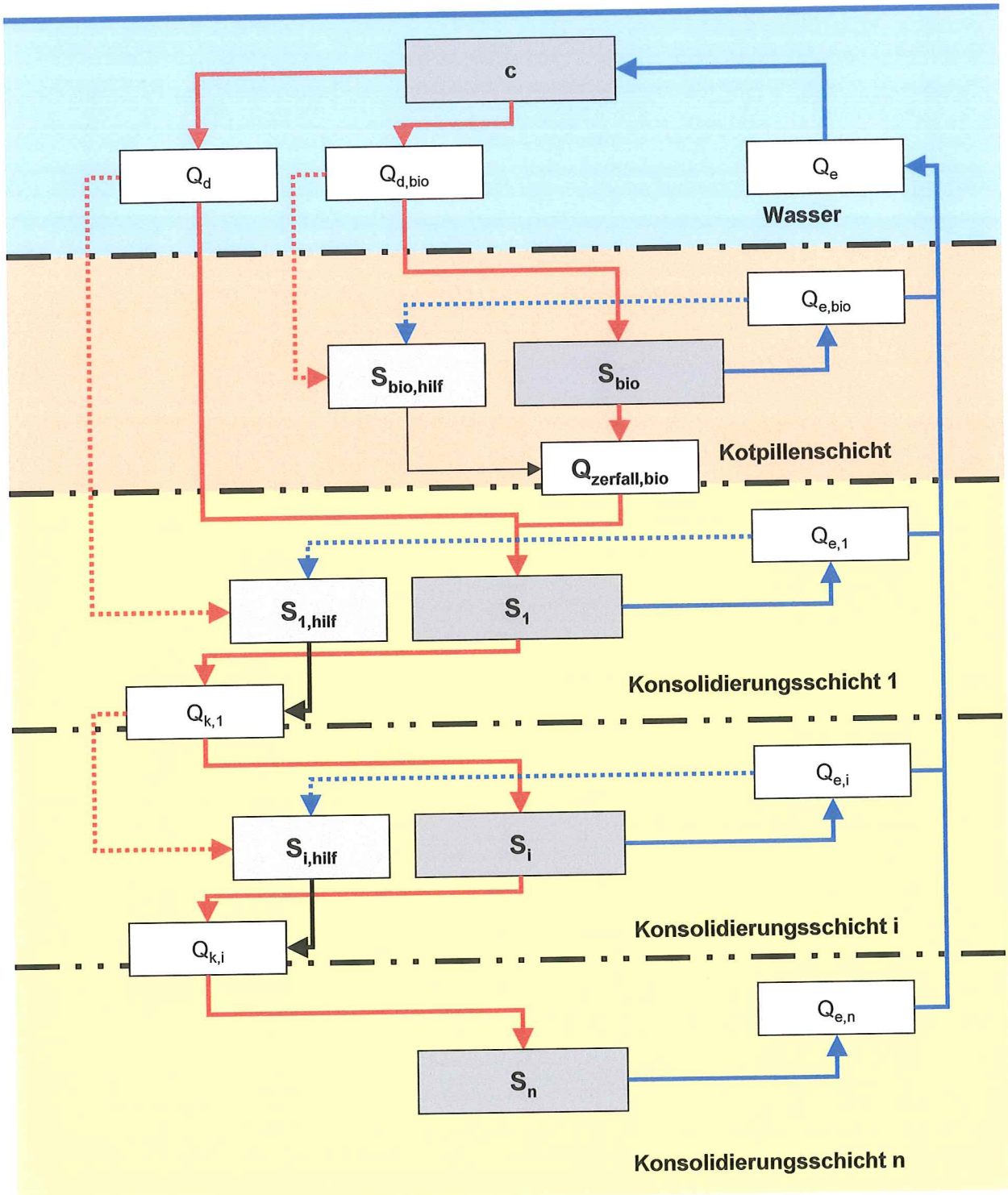


Abbildung 8.3: Schematische Darstellung der Konsolidierung von zerfallenen Kotpillen. Graue Kästen: Masseninhalt; grau melierte Kästen: Hilfsgrößen; weiße Kästen: Sedimentströme; rote Pfeile: Deposition; blaue Pfeile: Erosion

Das in Kapitel 8 beschriebene Modul zur Berechnung der Biodeposition wurde für ein 1 km² großes Testfeld innerhalb der Dithmarscher Bucht angewendet.
Vom 21.5. – 18.10.1980 wurde in diesem Gebiet mehrfach die Biodeposition von GAST ET AL. (1984) aufgenommen. Gleichzeitig wurde der Bestand ausgewählter Spezies überwacht. Für diesen Zeitraum bestand somit die Möglichkeit, berechnete Biodepositionsraten mit natürlichen zu vergleichen.

Aufgrund der Unschärfen in der Bestimmung einzelner Parameter und der Vernachlässigung anderer morphologisch relevanter biogener Prozesse sollten die Rechnungen jedoch nicht dazu benutzt werden, Modellparameter zu kalibrieren. Vielmehr sollten Sensitivitätsstudien durchgeführt werden, in denen verschiedene Einflüsse auf die Ergebnisse der Modellierung untersucht wurden.
Dabei sollten mögliche Einflussfaktoren auf ein Minimum beschränkt bleiben, um Aussagen über sensitive Faktoren treffen zu können. Das führte zu folgenden Vereinfachungen:
Vernachlässigung des Seegangs: Die im Biodepositionsmodul implementierten Beziehungen wurden unter reinen Strömungsbedingungen ermittelt, weshalb eine Übertragung auf Seegangsbedingungen nicht gerechtfertigt erschien. Außerdem erschien der erhöhte Rechenaufwand vor dem Hintergrund, dass das Testgebiet sehr seegangsgeschützt liegt, nicht gerechtfertigt.
Ausschließliche Berücksichtigung von Feinkornmaterial: Zunächst sollte nur Feinkornmaterial berücksichtigt werden, da auch nur dieses Bedeutung für die Biodeposition hat. Dies führt zwar dazu, dass nicht die gesamte morphologische Veränderung im Modell berechnet wird, diese kann aber prinzipiell über lineare Superposition aus einer Biodepositionsrechnung und einer „gewöhnlichen" morphodynamischen Rechnung ermittelt werden. Die prinzipielle Schwierigkeit ist darin zu sehen, dass das Verhalten von Ton-Schluff-Sand-Gemischen bezüglich Deposition und Konsolidierung, aber auch Erosion noch Gegenstand der Forschung ist (VAN LEDDEN, 2002), weshalb auch im morphodynamischen Modell TIMOR kein Ansatz vorliegt, um das Verhalten von solchen Ton-Schluff-Sand-Gemischen zu berücksichtigen.
Daher wurde nur mit einer Kornfraktion gerechnet. Die Ergebnisse spiegeln somit nicht die reale morphodynamische Veränderung sondern nur die Veränderung durch Biodeposition und abiotische Deposition von Feinkornmaterial wieder.
Folgende Sensitivitätsfaktoren wurden untersucht:

- Genereller Einfluss der Biodeposition
- Einfluss des Zerfalls von Kotpillen
- Einfluss der kritischen Geschwindigkeit für Erosion der Kotpillen $v_{cr,E,bio}$
- Einfluss der Besiedelungsdichte

Zur Anwendung kam das morphodynamische Modell TIMOR mit dem in 8 beschriebenen Erweiterungsmodul zur Berücksichtigung von Biodeposition und Konsolidierungsvorgängen.

8.4 Modellgebiet Dithmarscher Bucht

Die Dithmarscher Bucht befindet sich nördlich der Elbmündung an der schleswig-holsteinischen Nordseeküste. Das in der Dithmarscher Bucht gelegene Wattgebiet wird im Norden, Osten und Süden vom Festland begrenzt. Im Zuge der Ausführung des Generalplans *Deichverstärkung, Deichverkürzung und Küstenschutz in Schleswig-Holstein* wurde Anfang der 70er Jahre der östliche Teil der Dithmarscher Bucht durch eine Deichlinie abgegrenzt und der Flutraum um 31 km² verringert. Aufgrund dieses Eingriffs in das Tideregime des Wattstroms Piep und seiner Nebenpriele Wöhrdener Loch, Kronenloch sowie Sommerkoog-Steertloch kam es während der Bautätigkeit und nach Fertigstellung der Deichlinie zu starken morphologischen Veränderungen. Das Untersuchungsgebiet ist in seiner Lage in Abbildung 8.4dargestellt.

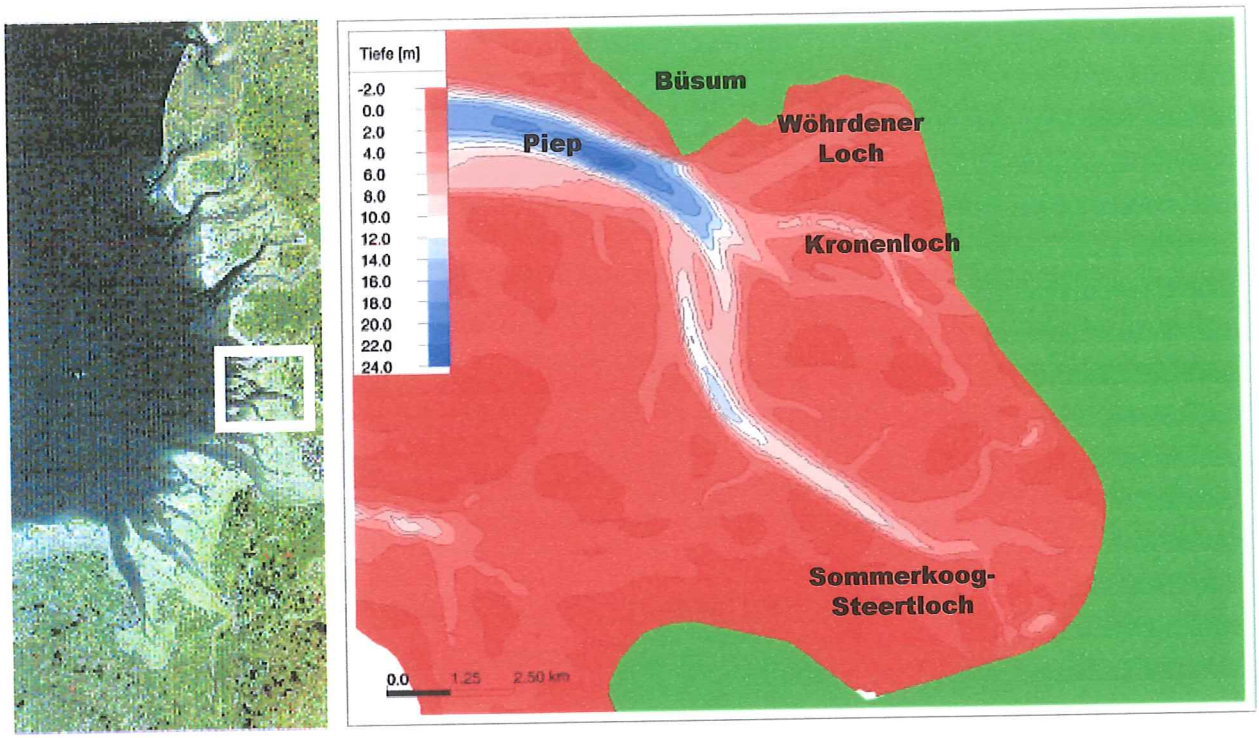


Abbildung 8.4: Untersuchungsgebiet Dithmarscher Bucht. Links: Lage in der Deutschen Bucht; rechts: Tiefenverteilung 1979

Im Wattgebiet östlich von Büsum und nördlich des Wöhrdener Lochs liegt ein ca. 1 km² großes Testfeld, welches im Rahmen des Forschungsprogramms *Schlicksedimentation an der deutschen Nordseeküste* (FIGGE, 1984) Ende der siebziger Jahre intensiv untersucht wurde. Aufgrund der hohen Informationsdichte konzentriert sich die morphodynamische Modellierung auf dieses Testfeld im nördlichen Teil der Dithmarscher Bucht. Es ist in Abbildung 8.5 dargestellt.
Von besonderem Interesse für die Arbeit sind die Untersuchungen von GAST ET AL. (1984) bezüglich Sedimentverteilung und Schlicksedimentation im Testgebiet sowie die Untersuchungen von THIEL ET AL. (1984) mit Schätzungen zu Auswirkungen biogener Prozesse auf die Sedimentdynamik.

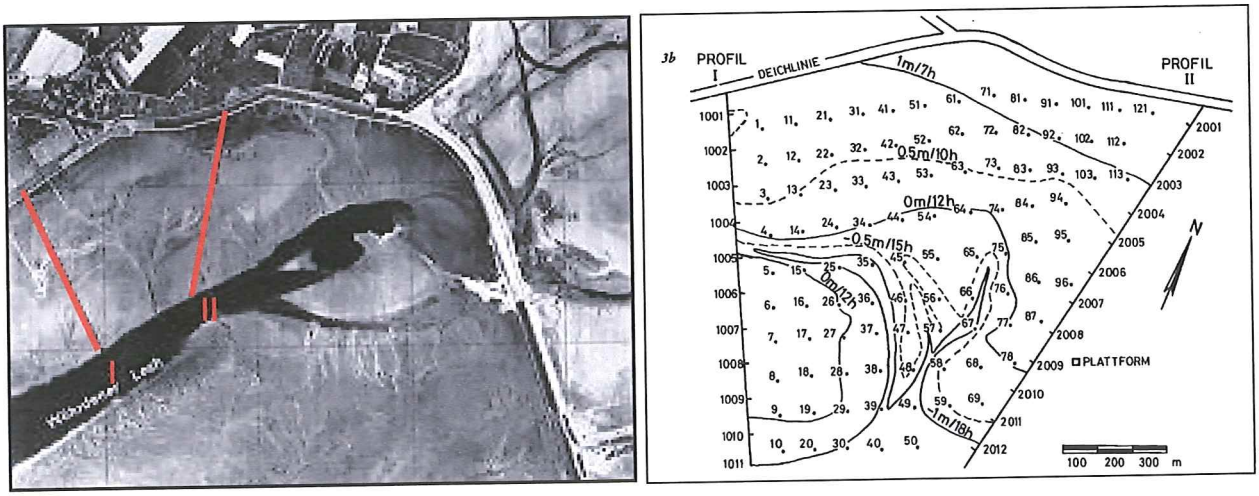


Abbildung 8.5: Lage des Testfeldes in der Dithmarscher Bucht begrenzt durch Profil I u. II. Links: Luftbild; rechts: Tiefenverteilung, Wasserbedeckungszeit und Stationsnummerierung

8.4.1 Sedimentverteilung in der Dithmarscher Bucht

Die Wattsedimente bestehen aus mineralischen und organischen Bestandteilen. Im Schluffbereich (0.002 – 0.063 mm) und besonders im Sandbereich (0.063 – 2 mm) handelt es sich bei den mineralischen Komponenten vorwiegend um Quarz. Mit abnehmender Korngröße wurde von GAST ET AL. (1984) ein zunehmender Anteil an Tonmineralien festgestellt. Die organischen Anteile bestehen im Sandkornbereich aus Muschelschalen und Schalensplittern.
GAST ET AL. (1984) führten eine erste Ansprache der Sedimente im Gelände nach den Kriterien von SINDOWSKI (1958) durch. Die Bodentypen wurden in die Kategorien Wattsand, Schlicksand und Schlick klassifiziert. Die Bodentypen wurden folgendermaßen charakterisiert: Die Oberfläche des Wattsandes ist rauh und hinterlässt beim Begehen keine nennenswerten Fußabdrücke. Der Schlicksand ist an seiner leicht glitschigen Oberfläche zu erkennen und beim Begehen sinkt man knöcheltief ein. Der Schlick hat eine seidig-glänzende Oberfläche und beim Begehen sinkt man knietief ein. Das Ergebnis dieser Grobansprache ist Abbildung 8.6 zu entnehmen.

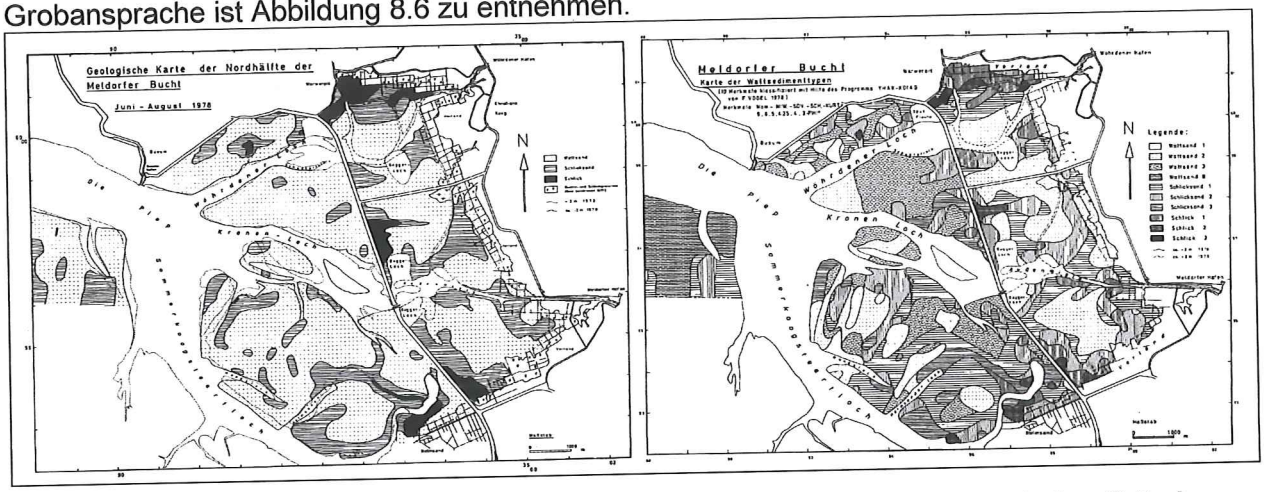


Abbildung 8.6: Geologische Karte der Nordhälfte der Dithmarscher Bucht nach den Kriterien von Sindowski (links) und Karte der Wattsedimenttypen (rechts) nach GAST ET AL. (1984)

Die Dithmarscher Bucht wird von GAST ET AL. (1984) als ein schlickarmes Gebiet bezeichnet. Eine Begehung offenbarte nur zwei größere zusammenhängende Schlickareale mit einer Mächtigkeit von mehr als 30 cm. Eines davon befindet sich im Testfeld als Füllung eines der Baggerlöcher, die im Zuge der Baumaßnahmen zur Materialgewinnung ausgehoben wurden (vgl. Abbildung 8.6). Dieses Baggerloch war 1978 bereits fast vollständig zusedimentiert, konnte jedoch erst ab Mai 1979 gefahrlos betreten werden.

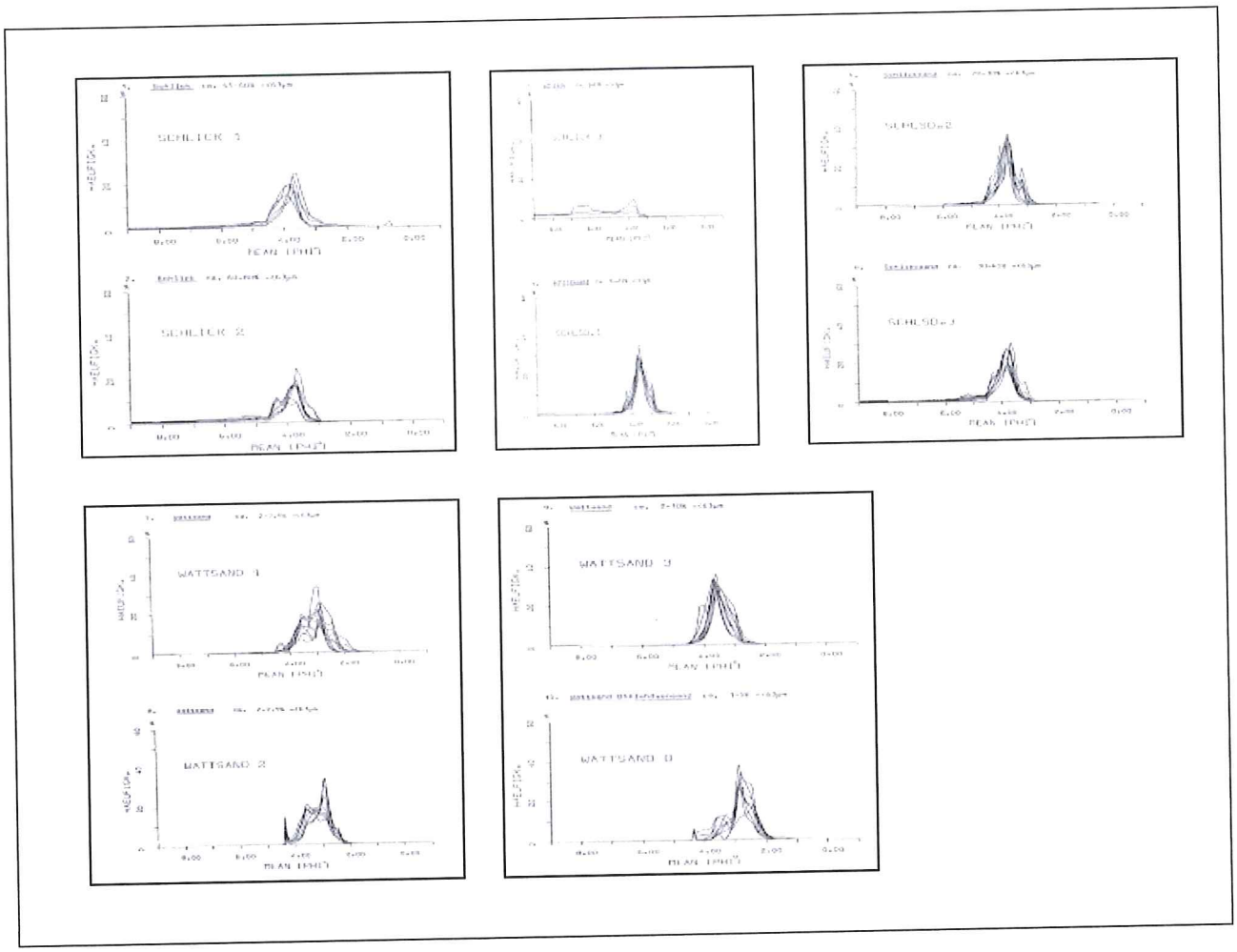


Abbildung 8.7: Wattsedimenttypen in der Dithmarscher Bucht (GAST ET AL., 1984)

GAST ET AL. (1984) kartierten die Wattsedimenttypen der nördlichen Dithmarscher Bucht. Die im Watt entnommenen Proben wurden untersucht und mit Hilfe einer Klassifikationsanalyse in 10 Wattsedimenttypen unterteilt, was in Abbildung 8.7 dargestellt ist.

8.4.2 Biodeposition

GAST ET AL. (1984) führten auch eine mikroskopische Untersuchung der kotpillenbedeckten Wattoberflächen durch. Die Arbeiten erfolgten in dem Testgebiet an den Stationen 53, 54 und 55 (vgl. Abbildung 8.11). Sechs Proben wurden labortechnisch untersucht und Kotpillen einer Größe von 0.1 bis 0.4 mm gefunden. Diese Werte entsprechen einem Vielfachen des Korndurchmessers des Sediments, welches von *cerastoderma edule* filtriert wird. Abbildung 8.8 rechts zeigt deutlich die hervorgerufene Veränderung der lokalen Korngrößenverteilung aufgrund der Biodeposition.

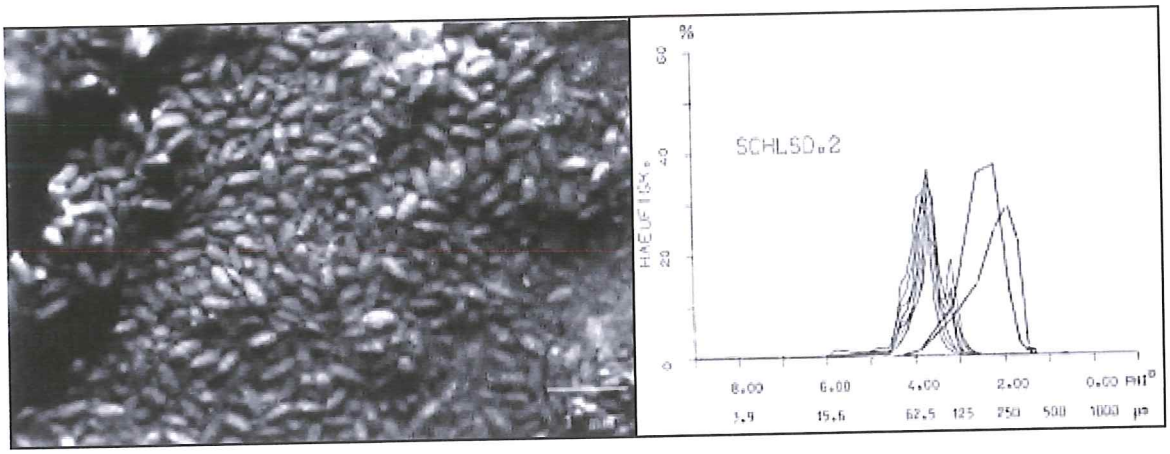


Abbildung 8.8: Kotpillenbedeckte Schlickoberfläche (links) und Beeinflussung der Korngrößenverteilung (rechts) nach GAST ET AL. (1984)

THIEL ET AL. (1984) kartierten in den Jahren 1978 bis 1980 mehrfach die Besiedlungsdichte von insgesamt 29 Tierarten, die einen Einfluss auf die morphologische Entwicklung haben. Die Bestimmung der Besiedlungsdichte erfolgte an 121 Stationspunkten, mit denen das Testgebiet überzogen wurde (vgl. Abbildung 8.11). Es wurden Stechproben für eine Laborauswertung entnommen und zusätzlich fotographische Aufnahmen der Sedimentoberfläche gemacht. Anhand von Kriechspuren, Kothaufen und Löchern konnten durch Fotographien auch tiefer im Watt lebende Organismen erfasst werden. Zudem konnte die Verbreitung höherer Pflanzen und Algen bestimmt werden.
Die Biodeposition im Testgebiet beschränkte sich auf drei Muschelarten: *cerastoderma edule*, *macoma balthica* und *mya arenaria*. Alle drei filtrieren bodennahes Wasser und scheiden die einsaugten Feinsedimente in Form von Kotpillen wieder aus. Es gibt noch eine Vielzahl weiterer Organismen die Biodepositionsraten erbringen, doch kann deren Leistung vernachlässigt werden (THIEL ET AL., 1984). Tabelle 8.2 gibt einen Überblick über die maximale Biodepositionsleistung dieser drei Muschelarten bezogen auf das Testfeld.

Art	Maximale Individuen-dichte [-/m²]	Deposition [g/(m²*d)]	Volumen [cm³]	Schichtzunahme [mm/Monat]
Cerastoderma edule	1400	700	350	10.5
Macoma balthica	1000	43	21.5	0.1
Mya arenaria	100	2.5	1.3	0.04

Tabelle 8.2: Maximale Biodeposition filtrierender Organismen im Testgebiet (THIEL ET AL., 1984)

Die reale Biodepositionsrate wird auf jeden Fall unter den in Tabelle 8.2 angegebenen Werten liegen, da es sich hier um Maximalwerte handelt. Auffällig ist jedoch, dass die Biodepositionsraten von *macoma* balthica und *mya arenaria* im Testgebiet im Vergleich zu der von *cerastoderma edule* vernachlässigbar gering ist, weshalb sie für die Modellierung unberücksichtigt blieben.

8.4.2.1 Gemessene Biodeposition

Die mittelfristige Biodeposition wurde im Zeitraum einiger Wochen von GAST ET AL. (1984) untersucht. In orientierten Stechproben wurde ein später auch in Proben wiederauffindbarer Leithorizont ausgewählt. Von dieser Marke ausgehend ließen sich Sedimentations- oder auch Erosionsereignisse für den Zeitraum zwischen aufeinanderfolgenden Proben feststellen. In unterschiedlich orientierten Proben und an verschiedenen Stationen stellten

die Autoren Sedimentation oder Erosion fest. Für Station 54 lagen folgende Beobachtungen vor:

Datum	Anzahl Tage	Tiefe des Leithorizonts [mm]	Sedimentzunahme aus direkter Beobachtung [mm]	mittlere Zunahme [mm/d]
21.5.80		27		
6.7.80	46	50	23	0.5
1.9.80	101	66	16	< 0.3
18.10.80	148	81	15	> 0.3

Tabelle 8.3: Sedimentation durch Biodeposition an Station 54 nach Beobachtungen von GAST ET AL. (1984)

8.5 Rechenparameter

Der Berechnungszeitraum war für alle durchgeführten morphodynamischen Rechnungen die Zeitspanne vom 7.5.1980 bis 18.10.1980. Morphologieänderungen wurden aber erst ab dem 21.5.80 zugelassen, also zu dem Zeitpunkt, wo die Erhebung der Biodeposition begann. Der Vorlauf von 14 Tagen ergibt sich aus der Notwendigkeit, eine realistische Anfangsbedingung für die Dicke der Kotpillenschicht zur Verfügung zu haben, die sich in diesem Zeitraum einstellen konnte. Gleichzeitig muss auch die Sedimentationsgeschichte der Kotpillen bekannt sein, um von Beginn der von GAST ET AL. (1984) untersuchten Periode Zerfall von Kotpillen zuzulassen.

8.5.1 Bathymetrie und Sedimentverteilung

Die Sohltopographie der Dithmarscher Bucht wurde mit Hilfe einer Bathymetrieaufnahme von 1979 erstellt. Diese Tiefenverteilung wurde im Modell als unerodierbar angenommen, um ausschließlich Veränderungen durch den Eintrag von Feinmaterial und insbesondere die Wirkung der Biodeposition untersuchen zu können.
Einerseits wird durch diese Herangehensweise vermieden, Transport, Erosion und Deposition von Ton-Schluff-Sand-Gemischen zu berechnen, was derzeit noch Gegenstand der Forschung ist (VAN LEDDEN, 2002). Jedoch ist die Annahme, dass ein Großteil der morphologischen Veränderungen auf den Wattflächen durch diese Fraktion verursacht wird nicht unrealistisch. So berichtet RICKLEFS (2002) nach Untersuchung des suspendierten Materials in den Prielen der Dithmarscher Bucht, dass sich oberhalb von 1m über der Sohle ausschließlich Sedimente kleiner als 0.06 mm befinden. Dies steht im Widerspruch zu einer berechneten Gleichgewichtskonzentration, die aus Sohlsediment, Geschwindigkeit und Rouse-Profil ermittelt werden kann. Dennoch wurde diese Erscheinung durch wiederholte Messungen bestätigt. Ähnliches wurde auch für suspendierte Sedimente innerhalb des Hörnumtiefs beobachtet (BERGER ET AL., 1998).
Für das Feinmaterial wurde ein Korndurchmesser von 0.002 mm angesetzt, was der Grenzdurchmesser zwischen Ton und Schluff ist. Als Dichte wurde 1700 kg/m³ angesetzt.
Zu Beginn der Modellrechnung befindet sich das gesamte Feinkornmaterial in Suspension. Während der Modellrechnung entsteht kontinuierlich Feinkornmaterial durch Primärproduktion. Die Größe dieser Parameter wurden im Rahmen der Sensitivitätsuntersuchungen variiert und sind in Tabelle 8.4 zusammengestellt.

8.5.2 Modellgitternetz

Das Modell wurde so aufgebaut, dass im Bereich des Wöhrdener Lochs und des Testfeldes eine hohe räumliche Auflösung vorlag. Da das vorhandene hydrodynamische Modul ein

explizites Verfahren zur Lösung der Flachwassergleichungen einsetzt, unterliegt es dem Courant-Friedrich-Levy-Kriterium. Daher geht mit einer hohen räumlichen Auflösung auch ein kleiner Zeitschritt einher. Es musste also eine Balance zwischen ausreichender Auflösung und vertretbar großem Zeitschritt gefunden werden. Da der Untersuchungszeitraum knapp 6 Monate betrug, hatte dieser Gesichtspunkt Bedeutung. Der erforderliche Zeitschritt für das in Abbildung 8.9 dargestellte Gitternetz betrug 3 s.

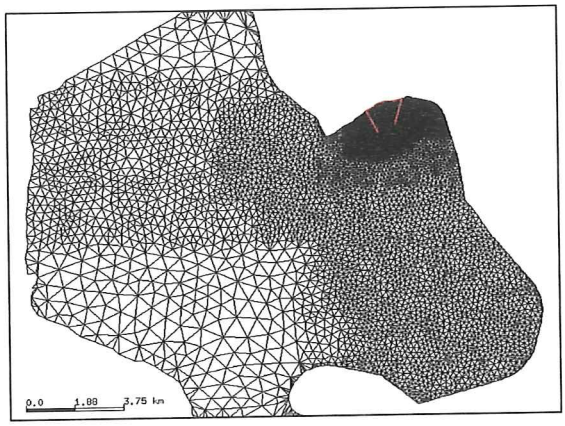


Abbildung 8.9: Verwendetes Gitternetz Dithmarscher Bucht. Im Testfeld liegt eine hohe räumliche Auflösung vor.

8.5.3 Wasserstand und Windgeschwindigkeit Büsum

In Abbildung 8.10 sind die Wasserstandsganglinie am Pegel Büsum und die Windgeschwindigkeit an der Messstation Büsum dargestellt. Wie aus den Abbildungen hervorgeht, war der Zeitraum bis Mitte August relativ ruhig mit zwei leichteren Stürmen Ende Juni und Mitte Juli, die zu erhöhten Wasserständen geführt haben. Das stärkste Ereignis trat Ende August mit Windgeschwindigkeiten von mehr als 20 m/s und einem Windstau von über einem Meter auf. Mitte September trat noch einmal kurzzeitig ein stark erhöhter Wasserstand auf. Ein Datenausfall Anfang Oktober wurde durch die astronomische Tide ersetzt.

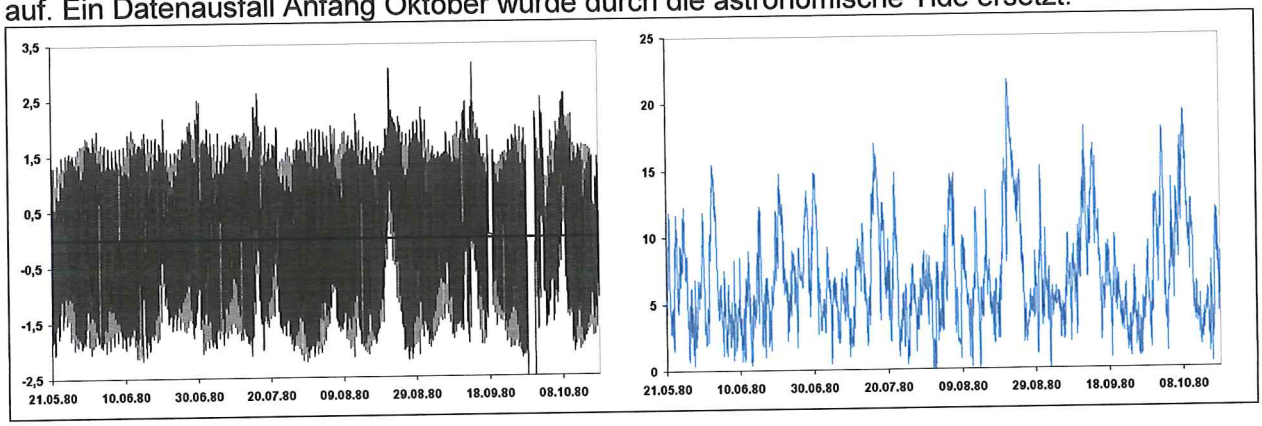


Abbildung 8.10: Wasserstand (links) und Windgeschwindigkeit in m/s (rechts) Büsum 21.5. - 18.10.80

8.5.4 Besiedelungsdichte mit *cerastoderma edule*

Aufgrund der vernachlässigbar geringen Biodepositionsrate anderer Arten wurde für die Modellierung nur die Biodeposition durch *cerastoderma edule* berücksichtigt. In Abbildung 8.11 ist das Ergebnis der von THIEL ET AL. (1984) in den Jahren 1978 bis 1980

durchgeführten Aufnahmen der Besiedlungsdichte von *cerastoderma edule* an 121 Stationen des Testfeldes dargestellt. Die Verwendung dieser Kartierungen zur Bestimmung einer Besiedelungsdichte an den im Testgebiet gelegenen Stationspunkten ist jedoch nur stark eingeschränkt möglich, da für den Zeitraum an dem die Biodeposition erhoben wurde, an vielen Stationen keine auswertbaren Fotographien vorlagen.

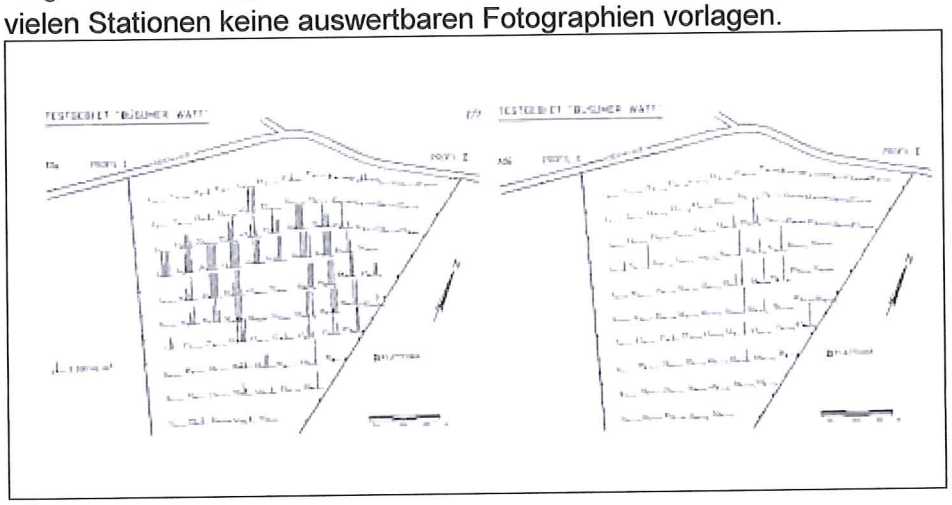


Abbildung 8.11: Besiedlungsdichte von *cerastoderma edule* im Testgebiet. Ein Punkt (.) unter der Grundlinie gibt an, dass keine auswertbare Fotographie vorliegt. Links: 1978: 18.7., 28.8., 11.10., 8.11; 1979: 14.4.; 15.5. Rechts: 1979: 14.6.; 3.7.; 16.8; 10.10; 1980: 4.6.; 15.9. (THIEL ET AL., 1984)

Im Untersuchungszeitraum wurde aber eine Verlagerung der *cerastoderma edule* Besiedelung festgestellt, was in Abbildung 8.12 dargestellt ist. Die maximale Besiedlungsdichte lag für das gesamte 1 km² große Testfeld innerhalb des Untersuchungszeitraums von Juli 1978 bis November 1980 bei 800 Ind./m².

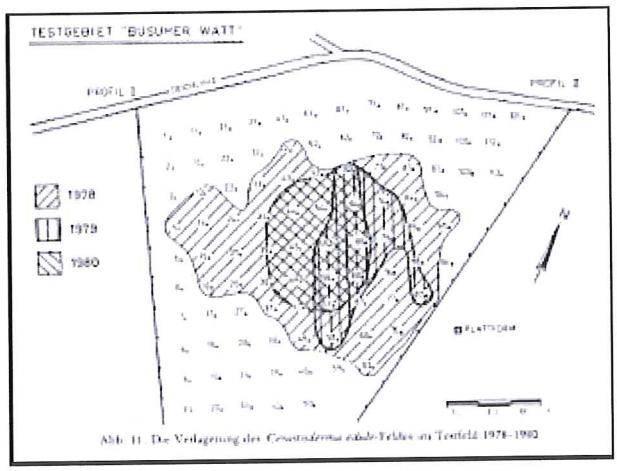


Abbildung 8.12: Verlagerung des cerastoderma edule – Feldes im Testgebiet 1978 – 1980 (THIEL ET AL., 1984)

Aufgrund der verfügbaren Daten wurde die Besiedelungsdichte an alle Modellknoten, die im Bereich des *cerastoderma edule* Feldes des Jahres 1980 liegen, auf 1000 Ind./m² festgelegt. Dies entspricht in etwa der kartierten Besiedelungsdichte an der Station 54 vom 15.9.1980.
Für die Bestimmung der Besiedelungsdichte in der gesamten Dithmarscher Bucht liegen keine detaillierten Kartierungen vor; einzige Informationsquelle ist die qualitative Darstellung der Verbreitung von *cerastoderma edule* in Abbildung 8.13. Informationen über die zugehörige Besiedelungsdichte liegen jedoch nicht vor.

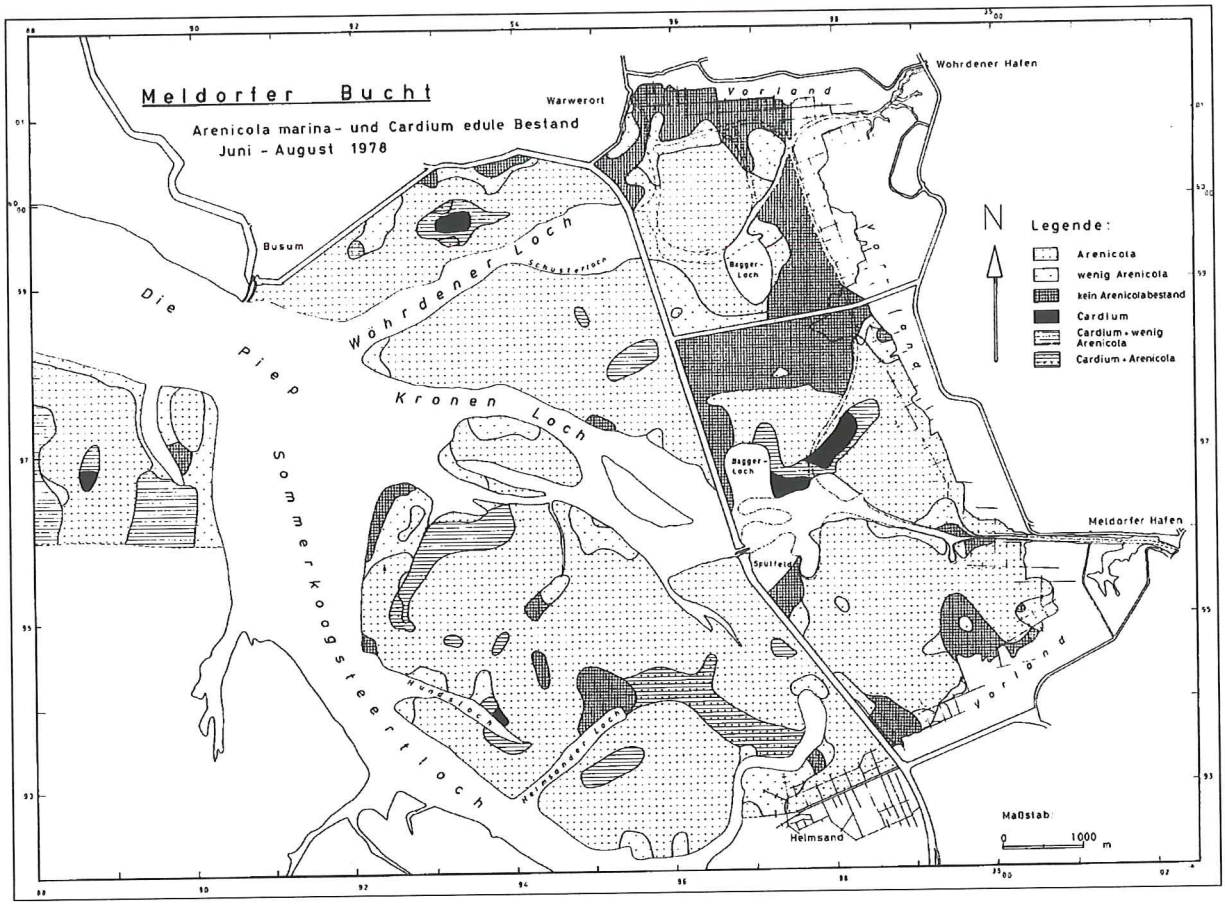


Abbildung 8.13: Verbreitung von *cerastoderma edule* und *arenicola marina* Juni – August 1978

GAST ET AL. (1984) erzielten zwar eine gute Korrelationen zwischen dem Vorkommen von *cerastoderma edule* und dem Sedimenttyp Schlicksand 2 (vgl. Abbildung 8.7). Doch aufgrund der rein qualitativen Angaben bezüglich der Besiedelungsdichte von *cerastoderma edule* und dem vermutlich geringen Stichprobenumfang ist dies nicht ausreichend, um eine Besiedelungsdichte für die außerhalb des Testgebiets gelegenen Knotenpunkte zu quantifizieren.

Innerhalb des in Abbildung 8.12 dargestellten Verbreitungsgebietes von *cerastoderma edule* im Testfeld wurden 1000 Ind./m² angesetzt.

Da für den Rest der Dithmarscher Bucht keine verwertbaren Daten zur Besiedelungsdichte mit *cerastoderma edule* vorlagen, wurde hier ein Ansatz zur synthetischen Generierung einer Besiedelungsdichte auf Basis der hierarchischen Biotopklassifikation angewendet (HIRSCHHÄUSER, 2003). Die Ergebnisse der hierarchischen Biotopklassifikation sind in Abbildung 8.14 (links) dargestellt.

Ausgehend von den von GAST ET AL. (1984) kartierten Wattsedimenttypen und der Bathymetrie des Gebietes konnten mögliche Biotope ermittelt und daraus eine mittlere Besiedelungsdichte mit *cerastoderma edule* abgeleitet werden.

Im südöstlichen Teil der Bucht lagen keine zuverlässigen Sedimentdaten vor, weshalb hier auf eine Biotopzuweisung verzichtet wurde. Dies wurde aber als nicht nachteilig angesehen, da der Schwerpunkt der Untersuchung auf dem 1 km² großen Testfeld nordöstlich von Büsum liegen sollte.

Im Rahmen von Voruntersuchungen zeigte sich jedoch, dass Biodepositionsraten von *cerastoderma edule* erst ab einer Besiedelungsdichte von 100 Ind./m² Bedeutung haben. Da jedoch mit Ausnahme des Testfeldes über die hierarchische Biotopklassifikation im gesamten Gebiet eine maximale Besiedelungsdichte von 23 Ind./m² berechnet wurde, wurde die Besiedelungsdichte um den Faktor 10 erhöht. Dieser kann als der Maximalwert der

Zuweisung über die hierarchische Biotopklassifikation verstanden werden, da die Besiedelungsdichte für ein Biotop im logarithmischen Maßstab beschrieben ist. Die in den Modellrechnungen standardmäßig angesetzte Besiedelungsdichte ist in Abbildung 8.14 (rechts) dargestellt.

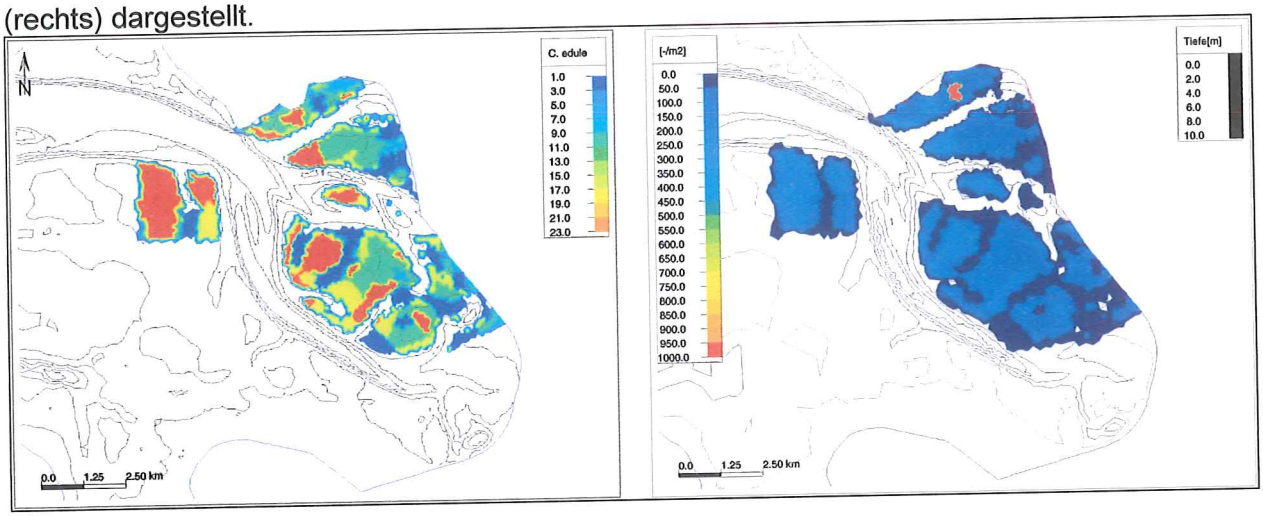


Abbildung 8.14: Synthetisch generierte (links) und in den Modellrechnungen angesetzte Besiedelungsdichte (10 mal so hoch) (rechts) mit *cerastoderma edule*. Es wurden unterschiedliche Skalen verwendet.

8.5.5 Parameter für das Teilmodul Biodeposition

Für *cerastoderma edule* wurde eine Filtrationsrate von 2 l/h angesetzt. Die entstehenden Kotpillen besitzen eine kritische Geschwindigkeit für Erosion $v_{cr,E,bio}$ von 0.3 m/s. Werden Kotpillen nicht erodiert, so zerfallen sie nach einer Zerfallszeit von 14 Tagen in das Ausgangsmaterial.

8.5.6 Parameter für das Teilmodul Konsolidierung

Zur Modellierung der Konsolidierung von Feinkornmaterial, insbesondere der zerfallenen Kotpillen wurden 10 Schichten angesetzt. Die schichtspezifischen Parameter Dichte, Aufenthaltsdauer und kritische Schubspannungsgeschwindigkeit wurden von TEISSON (1991) übernommen, da für die Dithmarscher Bucht keine Daten vorlagen.

8.6 Ergebnisse der morphodynamischen Rechnungen

Ziel der durchgeführten morphodynamischen Rechnungen war es, sensitive Parameter zu identifizieren, die die Biodeposition in Tidebecken maßgeblich beeinflussen, um darauf aufbauend Empfehlungen für künftige Naturuntersuchungen geben zu können. Langfristiges Ziel ist es, durch eine verbesserte Parametrisierung der morphologisch relevanten biogenen Prozesse ein Werkzeug zu schaffen, mit dem die morphologische Entwicklung von Tidebecken prognostiziert werden kann.
Es war nicht davon auszugehen, dass dies bereits mit dem vorliegenden Modul erreicht werden konnte, da die verwendeten Parameter nicht mit dem Ziel erhoben wurden, morphologisch relevante biogene Prozesse in ein morphodynamisches Modul zu integrieren. Außerdem dürften im vorliegenden Fall neben der Biodeposition noch weitere morphologisch relevante biogene Prozesse einen Beitrag zur morphologischen Entwicklung geleistet haben, weshalb die von GAST ET AL. (1984) erhobenen Naturdaten nur zur Abschätzung der Größenordnung und des Trends, nicht aber zur Kalibrierung der Modellparameter herangezogen werden sollten.

Die variierten Parameter der durchgeführten morphodynamischen Rechnungen sind in Tabelle 8.4 zusammengefasst.
Folgende Einflussfaktoren wurden untersucht:

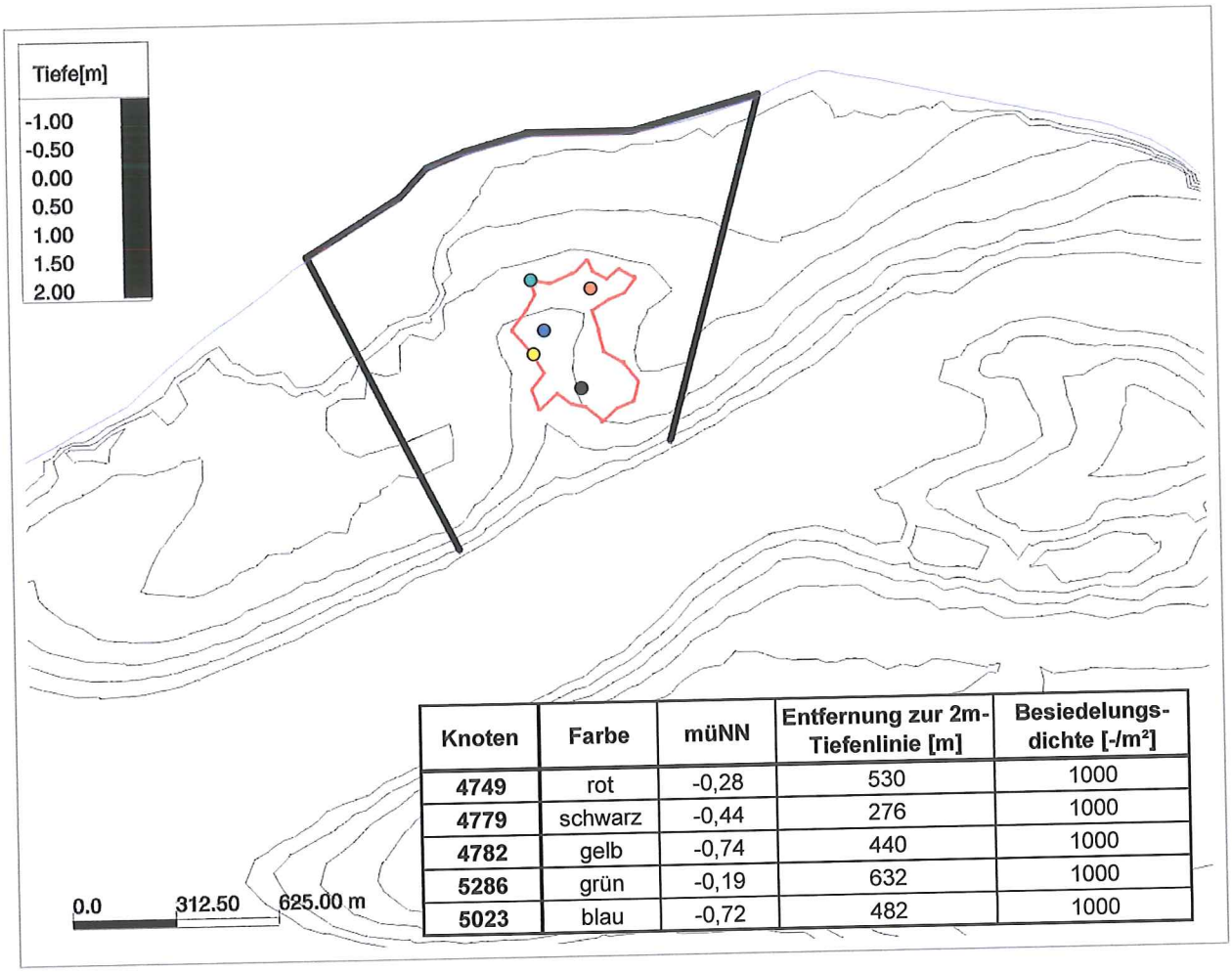
- Genereller Einfluss der Biodeposition
- Einfluss des Zerfalls von Kotpillen
- Einfluss der kritischen Geschwindigkeit für Erosion der Kotpillen $v_{cr,E,bio}$
- Einfluss der Besiedelungsdichte

Zur Anwendung kam das morphodynamische Modell TIMOR mit dem in Kapitel 8 beschriebenen Erweiterungsmodul zur Berücksichtigung von Biodeposition und Konsolidierungsvorgängen.

Rechnung	Zerfall von Kotpillen	Konsolidierung von zerfallenen Kotpillen	$v_{cr,E,bio}$ [m/s]	Besiedelungs-dichte
REF_BIO	ja	ja	0.3	Standard
OZERFALL	nein	nein	0.3	Standard
VCRE015	ja	ja	0.15	Standard
VCRE020	ja	ja	0.2	Standard
BIODICHTE_I	ja	ja	0.3	0.1*Standard
BIODICHTE_II	ja	ja	0.3	0.5*Standard
BIODICHTE_III	ja	ja	0.3	2*Standard
BIODICHTE_IV	ja	ja	0.3	10*Standard

Tabelle 8.4: Parameter der morphodynamischen Rechnungen. Grau unterlegt: Variierter Parameter

Die Rechnungen wurden einerseits flächenhaft ausgewertet, wobei jeweils die absoluten Tiefenänderungen und der auf die Referenzrechnung REF_BIO bezogene Tiefenunterschied im Untersuchungszeitraum herausgearbeitet wurden. Dies ermöglicht einen flächenhaften Überblick über den Einfluss des variierten Sensitivitätsparameters.
Zusätzlich ist die relative Tiefenänderung durch Biodeposition an einigen ausgewählten Knotenpunkten als Zeitreihe dargestellt. Hierdurch entsteht ein Eindruck der lokal sehr unterschiedlichen Auswirkungen bei Variation eines Sensitivitätsparameters. Zusätzlich sind in diese Darstellungen die Ergebnisse der Biodepositionsmessungen von GAST ET AL. (1984) eingefügt. Die Messpunkte wurden durch Geraden verbunden, um einen besseren Eindruck von dem Entwicklungstrend für die entsprechenden Zeiträume zu bekommen. Die Lage der ausgewählten Knotenpunkte ist in Abbildung 8.15 dargestellt. Die zugehörigen Tiefenlagen, Entfernungen zur 2 m–Tiefenlinie und Besiedelungsdichten sind ebenfalls dieser Abbildung zu entnehmen.



Knoten	Farbe	müNN	Entfernung zur 2m-Tiefenlinie [m]	Besiedelungs-dichte [-/m²]
4749	rot	-0,28	530	1000
4779	schwarz	-0,44	276	1000
4782	gelb	-0,74	440	1000
5286	grün	-0,19	632	1000
5023	blau	-0,72	482	1000

Abbildung 8.15: Lage der ausgewählten Knotenpunkte; rote Umrandung: Lage des *cerastoderma edule* Feldes 1980: Im Modell mit 1000 Ind./m² angesetzt. Knoten 4749 entspricht der von GAST ET AL. (1984) untersuchten Position.

Die von GAST ET AL. (1984) untersuchte Position ist am ehesten dem Knoten 4749 (rot) zuzuordnen. Diese Zuordnung ist jedoch mit Unsicherheiten behaftet, da sie den graphischen Darstellungen von GAST ET AL. (1984) entnommen wurde. Lage- und Tiefenkoordinaten waren nicht dokumentiert.

8.6.1 Einfluss der Biodeposition

Die Größenordnung der Biodeposition kann aus einem direkten Vergleich der Rechnungen REF_BIO und REF ermittelt werden. Dieser ist in Abbildung 8.16 dargestellt. Sie liegt für den 5-monatigen Sommerzeitraum für Simulation REF_BIO im Bereich des Testfeldes bei ungefähr 5 cm, was in der Größenordnung der von GAST ET AL. (1984) an Station 54 gemessenen Biodeposition von 5.4 cm liegt. Die Menge der Biodeposition hängt stark von den im folgenden variierten Parametern ab, weshalb ihr absoluter Betrag stets im Zusammenhang mit der Sensitivität der entsprechenden Parameter betrachtet werden sollte.

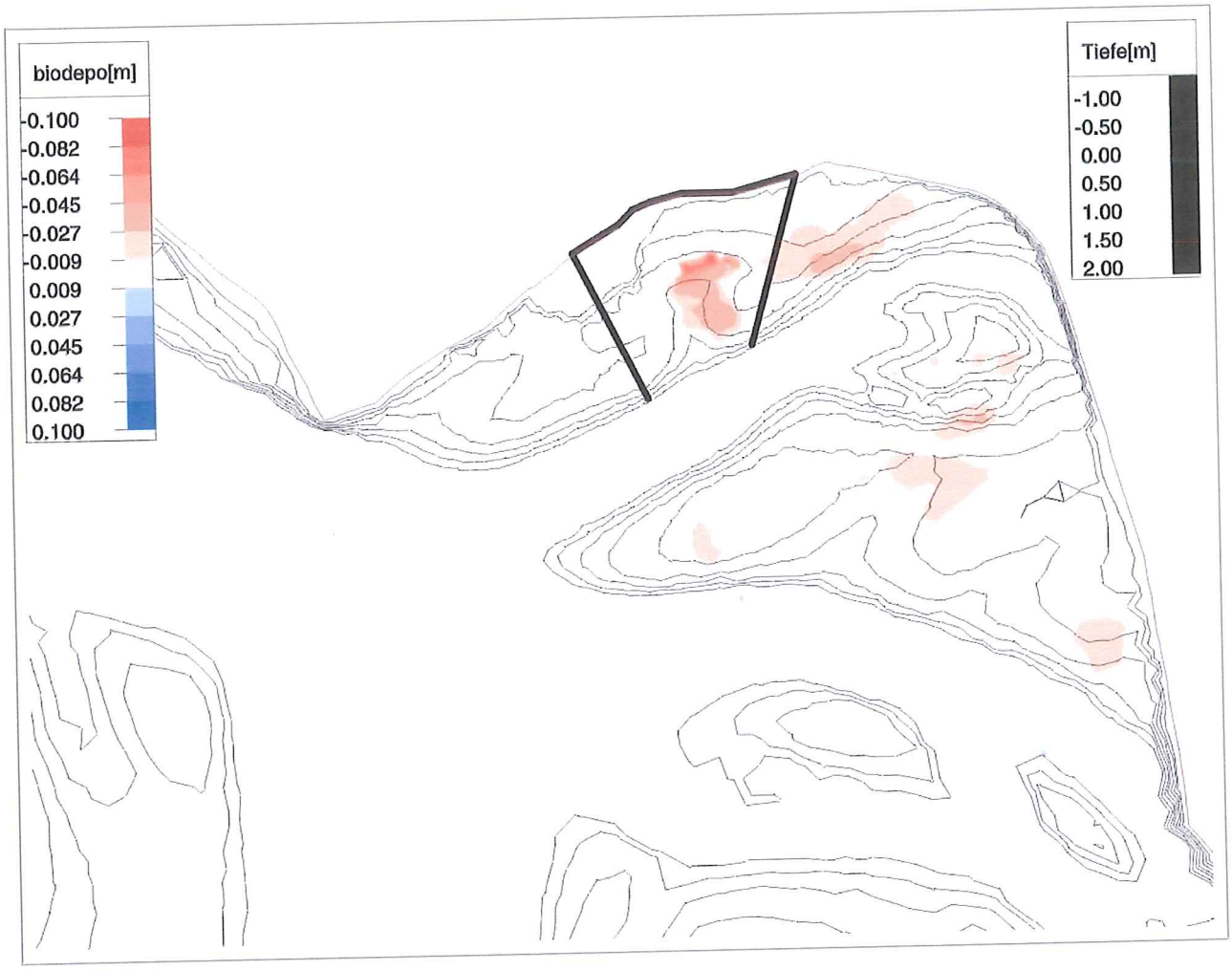


Abbildung 8.16: Einfluss der Biodeposition: Differenz REF_BIO - REF

8.6.2 Einfluss des Zerfalls von Kotpillen

Es wurde als wesentlich angesehen, den Zerfall von Kotpillen im Modell zu berücksichtigen, da ansonsten eine unrealistisch hohe Biodeposition berechnet wird. Dies geht aus Abbildung 8.17 hervor. In weiten Teilen des Wattgebietes zwischen Wöhrdener Loch und Kronenloch wird eine starke Deposition berechnet. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die abgelagerten Kotpillen nicht zerfallen und daher die relativ hohe kritische Geschwindigkeit für Erosion $v_{cr,E,bio}$ von 0.3 m/s beibehalten. Im Bereich des Testfeldes liegt die Größenordnung der Biodeposition ebenfalls deutlich zu hoch im Vergleich zu der gemessenen Biodeposition von 5.4 cm. Es wird ein mehr oder weniger gleichmäßiges Anwachsen berechnet. Dies ist der Tiefenentwicklung an einigen ausgewählten Knotenpunkten zu entnehmen, die in Abbildung 8.18 dargestellt ist. Die Biodeposition wird weder von der Größenordnung noch vom Trend (stärkerer Anstieg im Zeitraum bis zum 6.7.80) wiedergegeben.
Schon TEN BRINKE U. DRONKERS (1993) zeigten, dass die Nettobiodeposition weitaus geringer ist als die über Besiedelungsdichte, Suspensionskonzentration und Filtrationsrate berechnete Bruttobiodeposition, bei der der Zerfall und die Resuspension der Kotpillen nicht berücksichtigt wird. Für den Bereich der Osterschelde ermittelten sie eine gegenüber der gemessenen Akkumulation dreimal so hohe Bruttobiodeposition.
Die Berechnungsergebnisse im Bereich des Testfeldes liegen in einer ähnlichen Größenordnung: Je nach Lokalität erreicht die Biodeposition ohne Berücksichtigung des

Zerfalls das 1.5 – 5-fache der Biodeposition in REF_BIO, was aus Abbildung 8.18 hervorgeht.
Hieraus wird zweierlei deutlich:

- Ein Modell zur Berechnung der Biodeposition muss den Zerfall der Kotpillen berücksichtigen, was im vorliegenden Modell durch das in Kapitel 8.2 beschriebene Approximationsverfahren zur Berechnung der Kotpillendepositionsgeschichte realisiert wurde.
- Ohne ein Modell sind Aussagen über die Größenordnung der Nettobiodeposition nur schwer zu treffen, da die Menge der resuspendierten Kotpillen auf andere Weise kaum ermittelt werden kann.

Die Zerfallszeit wurde im Rahmen dieser Arbeit nicht variiert. Aufgrund der hohen Bedeutung des Zerfalls für die Resuspension wäre es wünschenswert, diese Größe in Naturmessungen detaillierter zu erheben, um die Abbildung des Zerfalls von Kotpillen im Modell verbessern zu können.

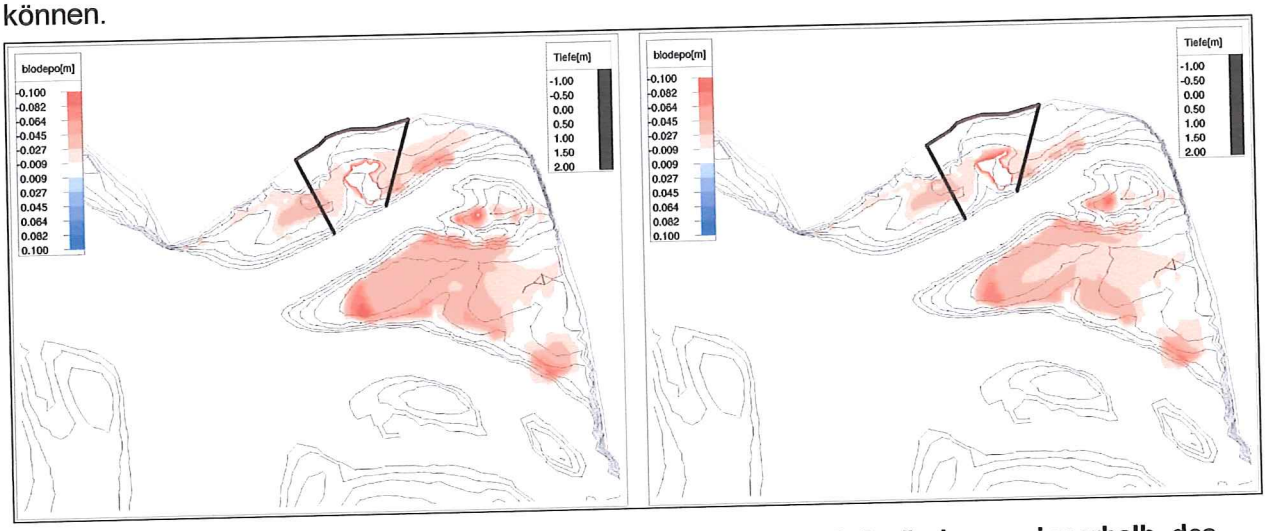


Abbildung 8.17: Einfluss des Zerfalls von Kotpillen: Links: Tiefenänderung innerhalb des Untersuchungszeitraums OZERFALL. Rot: Sedimentation; rechts: Differenz zu REF_BIO. Rot: höhere Biodeposition in OZERFALL. Teilweise Skalenwertüberschreitung.

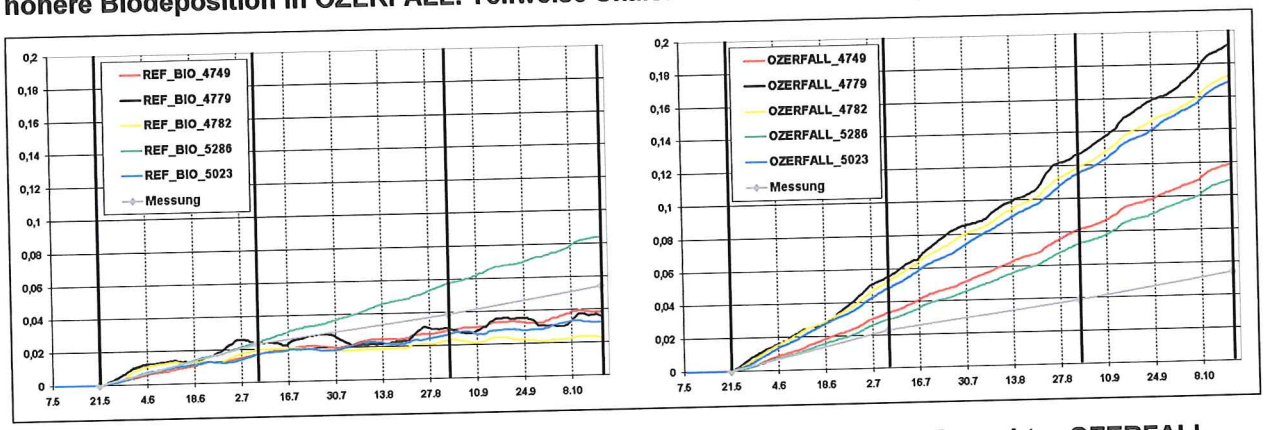


Abbildung 8.18: Biodeposition an ausgewählten Knoten. Links: REF_BIO; rechts: OZERFALL. Dicke vertikale Linien kennzeichnen die Zeitpunkte der Biodepositionsmessung von GAST ET AL. (1984).

8.6.3 Einfluss der kritischen Geschwindigkeit für Erosion $v_{cr,E,bio}$

Im Allgemeinen bewirkt eine Verringerung der kritischen Geschwindigkeit für Erosion $v_{cr,E,bio}$, dass es zu geringerer Nettobiodeposition kommt, da die Resuspension von abgelagerten

Kotpillen erleichtert wird. Dies wird in Abbildung 8.19 deutlich. Auf dem Wattgebiet zwischen Wöhrdener Loch und Kronenloch kommt es bei kleinerem $v_{cr,E,bio}$ zu geringerer Biodeposition. Dies kann auch anhand der Zeitreihen der Biodeposition einiger ausgewählter Knotenpunkte beobachtet werden (Abbildung 8.20). Beispielsweise kommt es an den tiefer gelegenen Knotenpunkten 4779 (gelb) und 4782 (schwarz) nur noch temporär zu einer Nettobiodeposition. Die erleichterte Resuspension führt zu einer Erhöhung des Niveaus der Suspensionskonzentrationen. Daher kann es in geschützten Bereichen von Muschelfeldern sogar zu einer leichten Erhöhung der Biodeposition kommen (vgl. Abbildung 8.19). Dies ist im Testfeld beispielsweise an Knotenpunkt 5286 (grün) der Fall. Am Knotenpunkt 4749 (rot), der am ehesten der von GAST ET AL. (1984) untersuchten Position entspricht, wirkt sich eine Variation von $v_{cr,E,bio}$ bezüglich der Nettobiodeposition nicht so stark aus, weshalb auch keine Empfehlung zur Größe von $v_{cr,E,bio}$ gegeben werden kann. Hier machen sich beide angesprochenen Effekte bemerkbar: Je kleiner $v_{cr,E,bio}$ ist, desto größer ist die *Schwankung* in der Nettobiodeposition: Kotpillen werden leichter erodiert, gleichzeitig ist aber auch die Biodeposition aufgrund der höheren Suspensionskonzentrationen höher (vgl. Zeitraum 24.9. – 8.10. für Knoten 4749 in Abbildung 8.20).

Trotz der genannten Unterschiede bestehen in den Verteilungsmustern der Biodeposition bei Variation von $v_{cr,E,bio}$ große Ähnlichkeiten (vgl. Abbildung 8.19 oben und unten links mit Abbildung 8.16). Dies liegt einerseits daran, dass auf den Wattflächen die Tidestromgeschwindigkeiten über die meiste Zeit sehr gering sind und andererseits Kotpillen, selbst wenn sie nicht erodiert werden, nach 14 Tagen zerfallen, wonach sie leicht erodierbar sind.

Die Festlegung eines Wertes für die kritische Geschwindigkeit für Erosion $v_{cr,E,bio}$ ist ein wesentlicher Parameter, um die Resuspension von Kotpillen zu berechnen. Es ist zu vermuten, dass diese Größe in der Natur eine starke Heterogenität aufweist und somit für die Modellierung schwer zugänglich ist. Andererseits konnte gezeigt werden, dass die Verteilungsmuster der Biodeposition bei Variation dieses Parameters starke Ähnlichkeiten zueinander aufwiesen. Dennoch wäre es wünschenswert eine Vielzahl von Untersuchungen zur Messung dieses Parameters zur Verfügung zu haben. Aufgrund der Heterogenität des Parameters wird man aber wahrscheinlich auf absehbare Zeit mit Sensitivitätsuntersuchungen Vorlieb nehmen müssen.

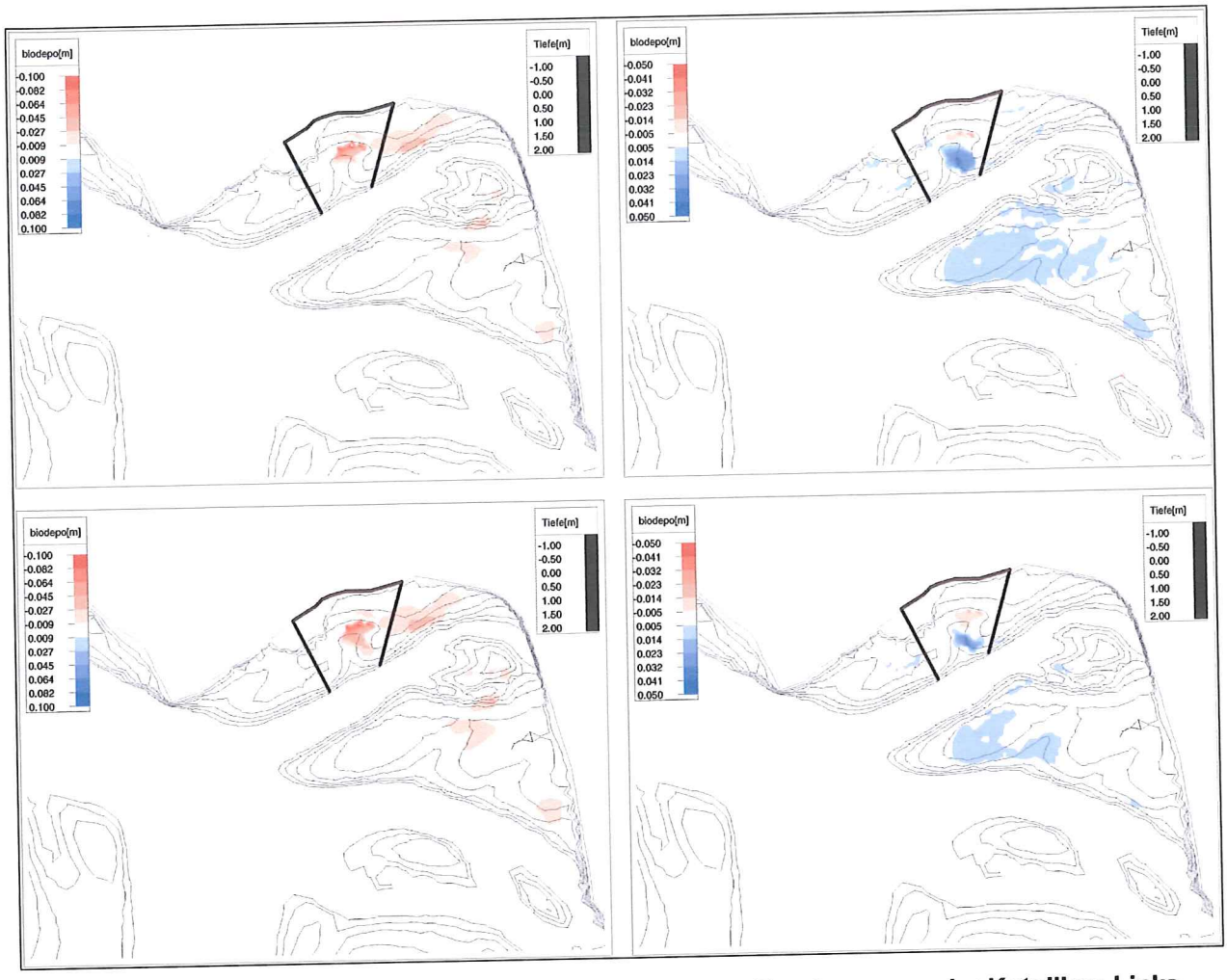


Abbildung 8.19: Einfluss der kritischen Geschwindigkeit für Erosion $v_{cr,E,bio}$ der Kotpillen: Links oben: Tiefenänderung innerhalb des Untersuchungszeitraums VCRE015. Rot: Sedimentation; rechts oben: Differenz zu REF_BIO. Rot: höhere Biodeposition in VCRE015. links unten: Tiefenänderung innerhalb des Untersuchungszeitraums VCRE020. Rot: Sedimentation; rechts unten: Differenz zu REF_BIO. Rot: höhere Biodeposition in VCRE020.

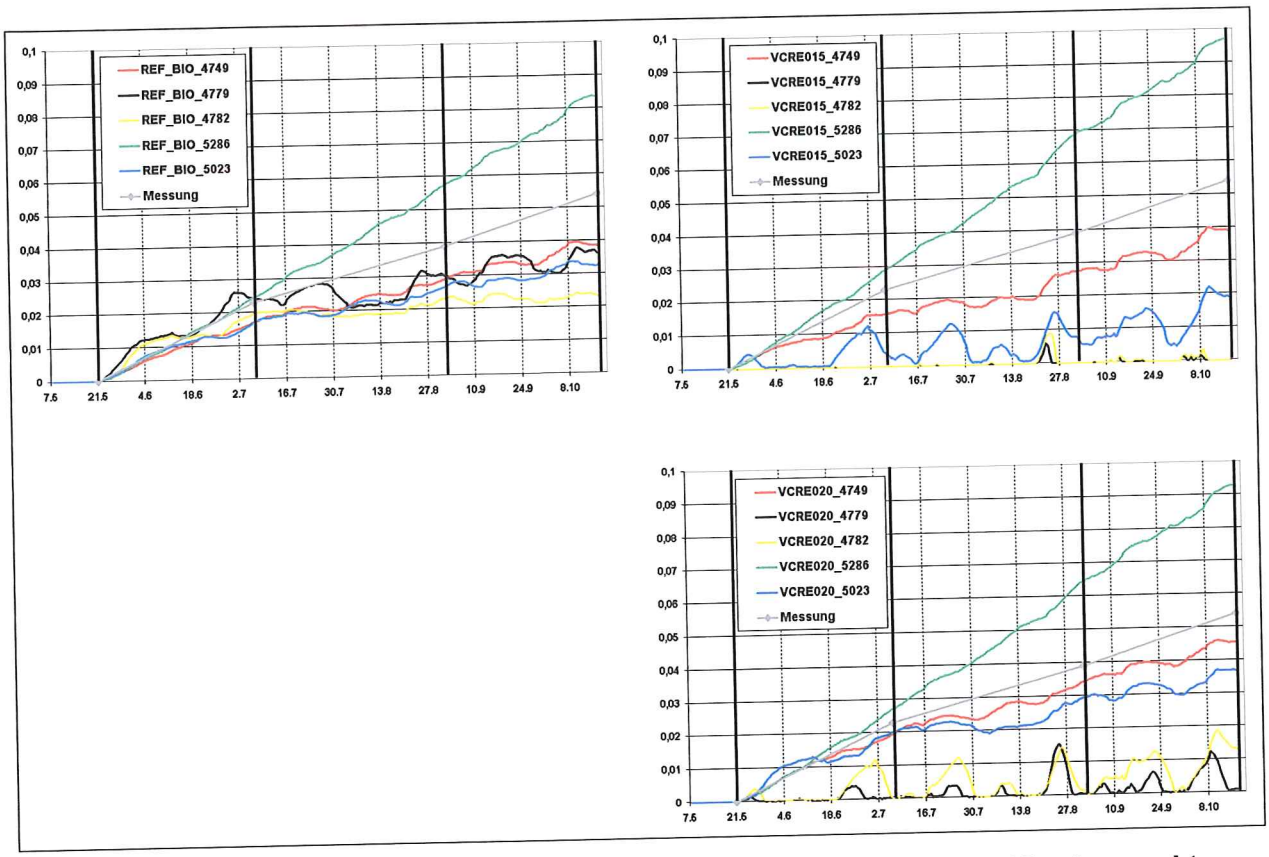


Abbildung 8.20: Biodeposition an ausgewählten Knoten. Oben links: REF_BIO; oben rechts: VCRE015; unten rechts: VCRE020. Dicke vertikale Linien kennzeichnen die Zeitpunkte der Biodepositionsmessung von GAST ET AL. (1984).

8.6.4 Einfluss der Besiedelungsdichte

Die angesetzte Besiedelungsdichte wurde in den Rechnungen BIODICHTE_I bis BIODICHTE_IV variiert. Dabei betrug die angesetzte Besiedelungsdichte im Vergleich zur Referenzrechnung REF_BIO 10% für BIODICHTE_I, 50% für BIODICHTE_II, 200% für BIODICHTE_III und 1000% für BIODICHTE_IV.

Die Besiedelungsdichte kann örtlich stark variieren. Die Variation des Parameters wurde so angesetzt, dass bei einer Erhöhung um den Faktor 10 gegenüber der Referenzrechnung eine maximale Besiedelungsdichte von 10000 Ind./m² erreicht wurde. Dies ist die maximale bisher dokumentierte Besiedelungsdichte von *cerastoderma edule*.

Die Beziehung zwischen Besiedelungsdichte und Nettobiodeposition ist nichtlinear und örtlich sehr variabel. Dies liegt daran, dass die Ablagerung linear abhängig von der Besiedelungsdichte ist, die Erosionsmenge aber unabhängig von ihr bleibt. Dies erklärt, warum beispielsweise in Rechnung BIODICHTE_IV (Abbildung 8.21 unten rechts) eine Nettobiodeposition in Bereichen auftritt, in denen bei geringerer Besiedelungsdichte gar keine Nettobiodeposition auftritt, wie im Falle eines Flachs im Kronenloch. In diesem Fall kann man von einer *Grenzbesiedelungsdichte* sprechen, ab der überhaupt eine Nettobiodeposition auftritt. Hinzu kommen noch indirekte Wirkungen, wie zum Beispiel die Herabsetzung des Niveaus der Suspensionskonzentration bei sehr starker Biodeposition. Teilweise können höhere Besiedelungsdichten sogar zu geringerer Biodeposition führen. Dies ist in Abbildung 8.22 unten rechts im hinteren Teil des Testfeldes zu erkennen. Die Ursache hierfür ist darin zu sehen, dass durch hohe Besiedelungsdichten die Suspensionskonzentration lokal signifikant herabgesetzt wird. Im Modell wirkt dieser Effekt umso stärker, da angenommen wird, dass Muscheln Feststoffe mit konstanter Filtrationsrate

unabhängig von der Suspensionskonzentration beziehungsweise dem Nährstoffangebot aus dem Wasser heraus ziehen. Nach IGLESIAS ET AL. (1992) ist die Filtrationsrate wesentlich konstanter als die Menge der aufgenommenen Fest- oder Nährstoffe. Allerdings kann vermutet werden, dass bei hohen Suspensionskonzentrationen die Filtrationsrate sinkt. Arbeiten, die das belegen, liegen jedoch nach Wissen des Autors zum gegenwärtigen Zeitpunkt nicht vor.

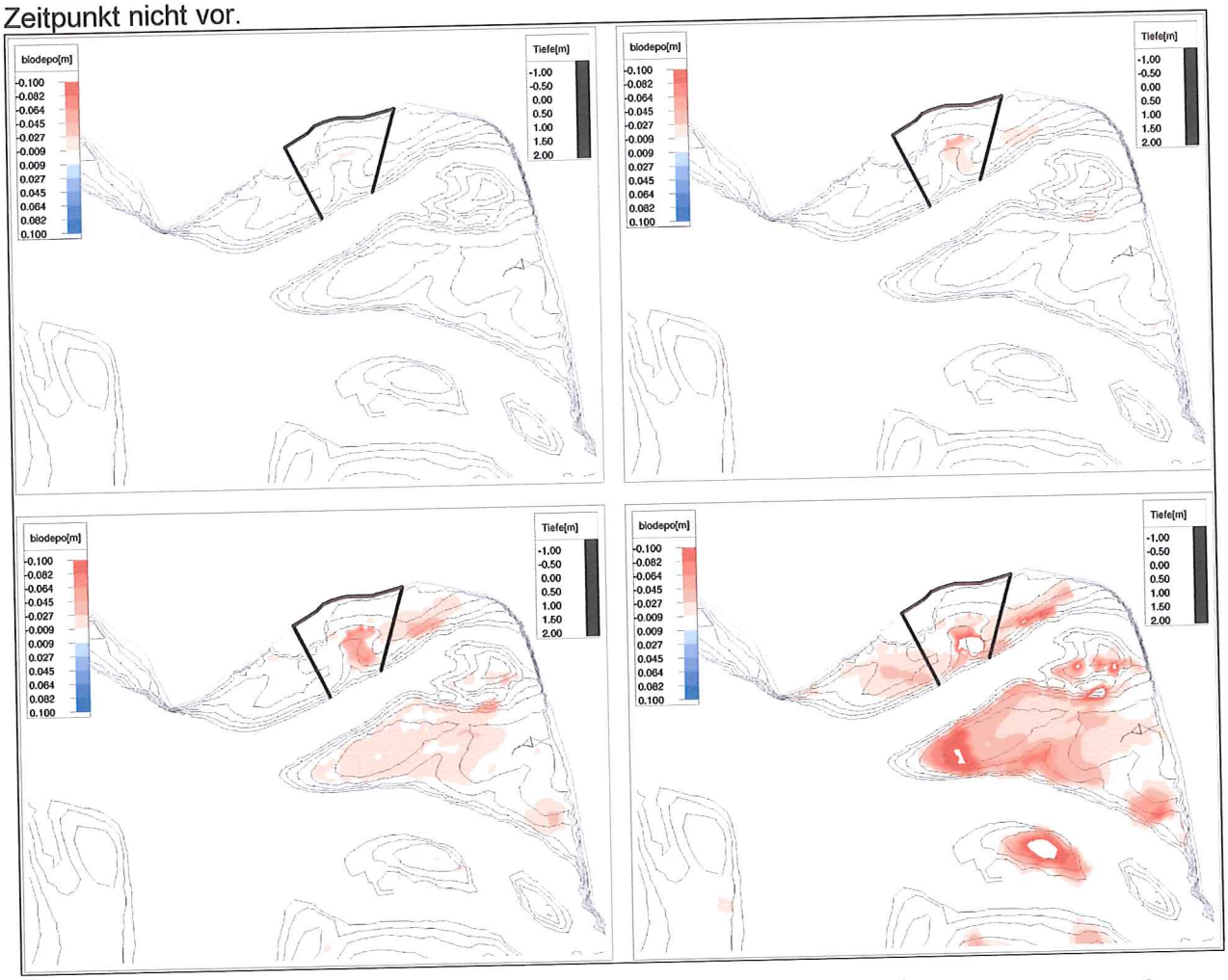


Abbildung 8.21: Einfluss der Besiedelungsdichte: Tiefenänderung innerhalb des Untersuchungszeitraums. Rot: Sedimentation. Oben links: BIODICHTE_I, oben rechts: BIODICHTE_II, unten links: BIODICHTE_III, unten rechts: BIODICHTE_IV. Dunkelrot umrandete weiße Bereiche: Skalenwertüberschreitung

Die als konstant angesetzte Filtrationsrate führt dazu, dass konvektiv transportierte Feststoffe in hinteren Bereichen von Muschelfeldern nicht mehr ankommen. In der Natur ist in einem solchen Fall vorstellbar, dass einzelne Muscheln aufgrund von Nahrungsknappheit absterben. Möglicherweise ist hierin auch ein begrenzender Faktor bei der räumlichen Ausdehnung von Muschelbänken zu sehen. Im Modell ist die Populationsdynamik nicht berücksichtigt. Im Falle von Nahrungsknappheit werden einfach weniger Kotpillen produziert. Ob dieser Effekt in der Natur anzutreffen ist oder nur auf die Modellformulierung zurückzuführen ist, müsste durch Naturmessungen nachgewiesen werden.

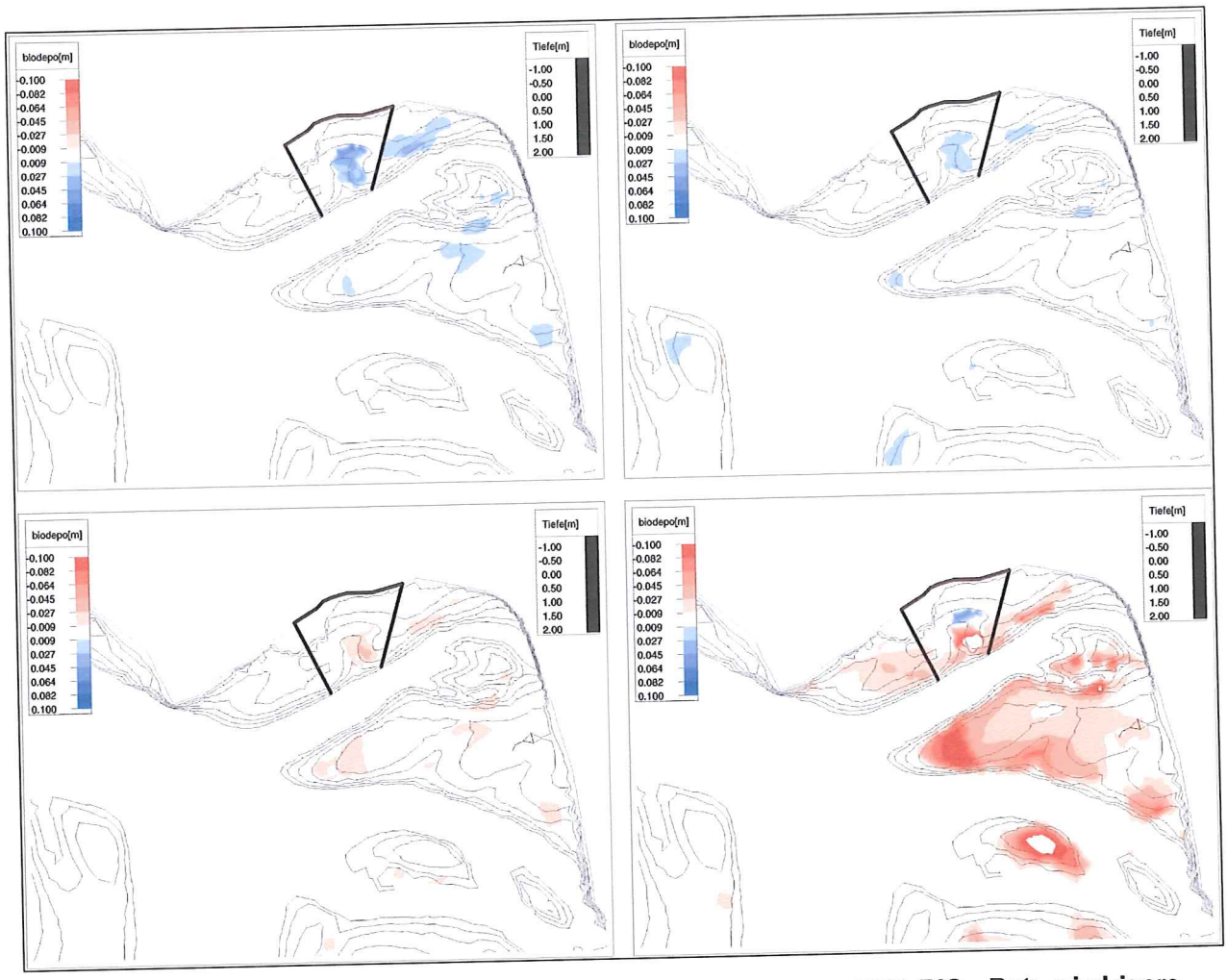


Abbildung 8.22: Einfluss der Besiedelungsdichte: Differenz zu REF_BIO. Rot: niedrigere Biodeposition in REF_BIO. Oben links: BIODICHTE_I, oben rechts: BIODICHTE_II, unten links: BIODICHTE_III, unten rechts: BIODICHTE_IV. Teilweise Skalenwertüberschreitung.

Eine Betrachtung der Entwicklung der Biodeposition an einigen Knoten innerhalb des Testfeldes, die in Abbildung 8.23 dargestellt ist, zeigt, dass bei sehr hohen Besiedelungsdichten insbesondere an den tiefer gelegenen Knotenpunkten (4779 (schwarz) und 4782 (gelb)) ein starker Zuwachs der Nettobiodeposition festzustellen ist. In diesen dem Wöhrdener Loch zugewandten Bereichen wird eine signifikante Menge an Schwebstoffen aus dem Wasser gefiltert, so dass es in weiter entfernt gelegenen Bereichen zu einer Herabsetzung des Niveaus der Suspensionskonzentration und damit schwächerer Biodeposition kommt.

Die Besiedelungsdichte unterliegt einer ausgeprägten Dynamik, die im beschriebenen Modul zur Berechnung der Biodeposition nicht abgebildet ist. Nach Wissen des Autors mangelt es auch an ökologischen Modellen, die die Populationsdynamik in Wattgebieten berechnen können. Was bleibt, ist die Errichtung und der Einsatz von Datenbanken, in denen die Artzusammensetzung und Besiedelungsdichte von Biotopen dokumentiert wird. Solche sind derzeit an einigen Orten im Aufbau. Dennoch besteht auch hier die Gefahr, die Ergebnisse von Einzelerhebungen, die keinen ausreichenden zeitlichen und räumlichen Horizont abdecken, heranzuziehen. Eine Alternative hierzu ist die Ermittlung der Besiedelungsdichte mit der hierarchischen Biotopklassifikation, womit das Problem von Einzelerhebungen umgangen wird. Kritisch muss allerdings angemerkt werden, dass dieses Verfahren dazu neigt, Besiedelungsdichten „klein zu mitteln“. Aus den oben vorgestellten Rechnungen wird deutlich, dass die Biodeposition erst ab Besiedelungsdichten von 50 – 100 *cerastoderma*

edule / m² Bedeutung hat. Für zukünftige Rechnungen wird daher der Einsatz von Datenbanken empfohlen.
Für die vorliegende Modellierung hat dies aber keinen Einfluss, da im Bereich des Testfeldes ohnehin auf Messdaten zurückgegriffen wurde.

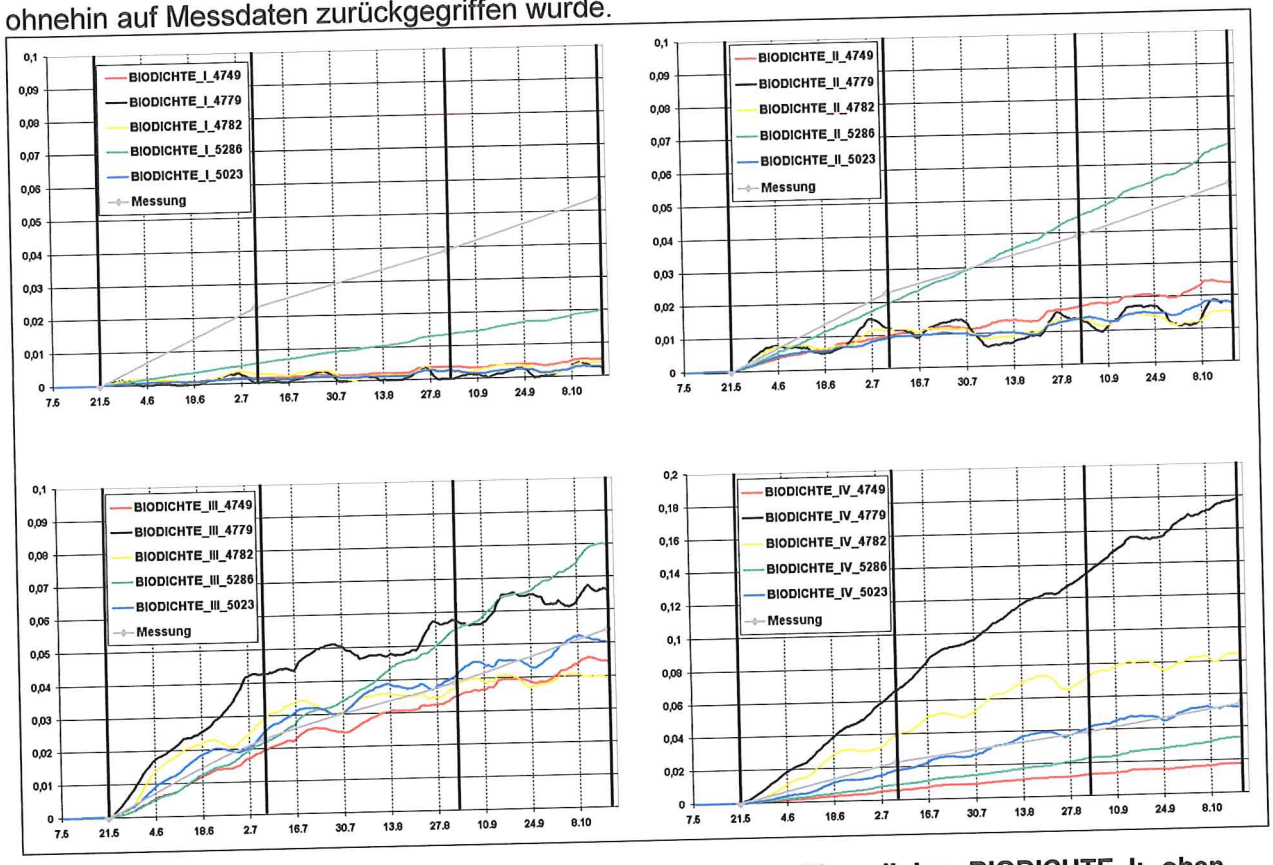


Abbildung 8.23: Biodeposition an ausgewählten Knoten. Oben links: BIODICHTE_I; oben rechts: BIODICHTE_II; unten links: BIODICHTE_III; unten rechts: BIODICHTE_IV (andere Skala !). Dicke vertikale Linien kennzeichnen die Zeitpunkte der Biodepositionsmessung von GAST ET AL. (1984).

9 Literaturverzeichnis

BARTHOLDY, J., PHEIFFER MADSEN, P., 1985. Accumulation of fine grained material in a danish tidal basin, Marine Geology 67, 121-137

BLACK, L. F. 1980. The biodeposition cycle of a surface deposit-feeding bivalve, *Macoma balthica*. In: Kennedy, V., S. (ed.) Estuarine Perspectives. Academic Press, New York, 389-402

BOBERTZ, B., 2001. Regionalisierung der sedimentären Fazies der südwestlichen Ostsee, Dissertation an der mathematisch-naturwissenschaftlichen Fakultät der Ernst-Moritz-Arndt-Universität Greifswald

BOOIJ, J.A., HOLTHUIJSEN,L.H.,RIS,R.C.,1996. The SWAN wave model for shallow water, Proceedings ICCE 1996, 668-676

BORTZ, J., 1977. Statistik für Sozialwissenschaftler, Springer Verlag 1977

Delft Hydraulic Laboratory: Zware metalen in sedimenten van de Waddenzee, Report M 1839, (1980), 88p.

EISMA, D., 1981. 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

FERK, U., 1995. Folgen eines beschleunigten Meeresspiegelanstiegs für die Wattgebiete der niedersächsischen Nordseeküste, Küste 57, 135-156

FIGGE, K., 1984. Das Schlickuntersuchungsprogramm des KFKI – Anlaß und Arbeitskonzept, Die Küste 40, 87-90

GAST, R., KÖSTER, R., RUNTE, K.-H., 1984. Die Wattsedimente in der nördlichen und mittleren Meldorfer Bucht, Die Küste, Heft 40

HIRSCHHÄUSER, T., MEWIS, P., ZANKE, U., 1998. Determination of the initial particle size distribution for morphodynamic modeling in tidal areas, Proceedings of the 3rd ICHE, Cottbus 1998

HIRSCHHÄUSER, T., ZANKE, U., 1999. Long-term morphodynamic modeling of the Hörnum tidal-basin, Proceedings of the 3rd German-Chinese Joint –Seminar on sediment transport, Taipeh 1999

HIRSCHHÄUSER, T., MEWIS, P., ZANKE, U., WITTING, M., 2000. Determination of representative wind situations for the long-term morphology of the Hörnum tidal basin, Proceedings of the 4th ICHE, Seoul 2000

HIRSCHHÄUSER, T., ZANKE, U., 2000. Morphologische Langfristprognose für das System Tidebecken-Außensände am Beispiel Sylts und der Dithmarscher Bucht, Abschlußbericht, (unveröffentlicht)

IGLESIAS, J. I. P., NAVARRO, E., ALVAREZ JORNA, P. & ARMENTIA, I., 1992. Feeding, particle selection and absorption in cockles *Cerastoderma edule* (L.) exposed to variable conditions of food concentration and quality. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 162: 177-198

MEYER-PETER,E., MÜLLER, R., 1949. Eine Formel zur Berechnung des Geschiebetriebes. Schweizer Bauzeitung

NIEMEYER, H. ET AL., 1995. Untersuchungen zur Morphodynamik des Wattenmeeres im Forschungsvorhaben WADE, Küste 57, 65-94

PARTHENIADES, E., 1965. Erosion and deposition of cohesive soils, Journal of the Hydraulic division, ASCE, Vol.91

POSTMA, H., 1981. Exchange of material between the North Sea and the Wadden Sea, Marine Geology 40

RENGER, E., 1976. Quantitative Analyse der Morphologie von Watteinzugsgebieten und Tidebecken, Mitteilungen des Franzius Instituts der TU Hannover, Heft 43, 1-160

RIS, R.C., 1997. Spectral modeling of wind waves in coastal areas, Communications on Hydraulic and Geotechnical Engineering, TU Delft
THIEL, H., ET AL. 1984. Quantitative Erhebungen über die Makrofauna in einem Testfeld im Büsumer Watt und Abschätzung ihre Auswirkungen auf den Sedimentverband, Küste Heft 40, 1984
VAN LEDDEN, M., 2002. Modeling of sand-mud mixtures. Erosion behaviour and application to a tidal basin, Delft Hydraulics Report Z2840
VAN RIJN, L, 1984. Sediment Pick-Up-Function, Journal of Hydraulic engineering, Vol. 110, No.10
VAN RIJN, L, 1998. Principles of coastal morphology, Aqua publications
ZANKE, U., 1995. Sachstandsbericht zur Entwicklung eines numerischen Modells mit beweglicher Sohle, TU Darmstadt (unveröffentlicht)