

**Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft**

**Fachgebiet Wasserbau**

Prof. Dr.-Ing. habil. Ulrich C. E. Zanke



**TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT**

Fachgebiet Wasserbau  
Rundeturmstraße 1  
64283 Darmstadt

Telefon (06151) 162523  
Telefax (06151) 163223  
e-mail: wabau@hrzpub.tu-darmstadt.de

## **KFKI Forschungsvorhaben**

# **Morphologische Langfristprognose für das System Tidebecken-Außensände am Beispiel Sylts und der Dithmarscher Bucht**

- Abschlußbericht -  
- Förderkennzeichen MTK 0605 -

Projektleiter: Prof. Dr.-Ing. habil. Ulrich C.E. Zanke

Projektbearbeiter: Dipl.-Ing. Thomas Hirschhäuser

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Kurzfassung</b>	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>Konzeption des Forschungsvorhabens</b>	<b>7</b>
2.1	Zielsetzung . . . . .	7
2.2	Voraussetzungen . . . . .	7
2.3	Zeitlicher Ablauf . . . . .	7
<b>3</b>	<b>Das Untersuchungsgebiet Hörnumbecken</b>	<b>9</b>
<b>4</b>	<b>Datenanalyse</b>	<b>10</b>
4.1	Topographische Daten . . . . .	10
4.2	Differenzdarstellungen . . . . .	10
4.2.1	Differenzen 1955-1974 . . . . .	11
4.2.2	Differenzen 1974-1978 . . . . .	11
4.2.3	Differenzen 1978-1981 . . . . .	12
4.2.4	Differenzen 1981-1986 . . . . .	12
4.2.5	Differenzen 1986-1987 . . . . .	13
4.2.6	Differenzen 1987-1997 . . . . .	13
4.2.7	Rückschlüsse auf die Fehlerhaftigkeit der einzelnen Datensätze . . . . .	13
4.2.8	Morphologische Veränderungen an einem exemplarischen Ausschnitt . . . . .	15
4.3	Weitergehende Analyse der topographischen Daten . . . . .	16
4.3.1	Standardabweichung der Peildaten . . . . .	16
4.3.2	Trend der Tiefenänderungen . . . . .	19
4.4	Sedimentologische Daten . . . . .	20
4.4.1	Bearbeitung der sedimentologischen Daten . . . . .	21
4.5	Einfluß der Anfangskornverteilung . . . . .	23

4.5.1	Örtlich nicht differenzierte Anfangskornverteilung . . . . .	23
4.5.2	Örtlich differenzierte Anfangskornverteilung . . . . .	24
<b>5</b>	<b>Morphodynamische Rechnungen ohne Seegang</b>	<b>27</b>
5.1	Eingabefilterung . . . . .	27
5.1.1	Bestimmung einer morphologischen Tide . . . . .	27
5.1.2	Bestimmung des morphologischen Zeitstreckungsfaktors . . . . .	31
5.2	Abschließender Rechenlauf ohne Seegang . . . . .	33
5.3	Prinzipstudie an einem künstlich verkleinerten Tidebecken . . . . .	37
<b>6</b>	<b>Seegangmodell SWAN</b>	<b>41</b>
6.1	Seegangmodell SWAN und seine Kopplung mit TIMOR . . . . .	41
6.2	Anwendung des Seegangmodells SWAN auf das Hörnumbecken . . . . .	43
6.2.1	Seegangereignis 19.09.96 . . . . .	44
6.2.2	Seegangereignis 3.10.96 . . . . .	46
<b>7</b>	<b>Morphodynamische Modellierung Hörnumbecken</b>	<b>52</b>
7.1	Bedeutung des Seegangs im Hörnumbecken . . . . .	52
7.2	Eingabefilterung Seegang . . . . .	53
7.2.1	Bestimmung der Referenzmorphologieänderung . . . . .	54
7.2.2	Bestimmung repräsentativer Ereignisse . . . . .	59
7.2.3	Bestimmung dominanter Windsituationen . . . . .	63
7.3	Morphodynamische Modellierung mit Seegangereignissen . . . . .	68
7.3.1	Rechnungen mit einzelnen Seegangereignissen . . . . .	68
7.3.2	Rechnungen mit repräsentativen Seegangereignissen . . . . .	73
<b>8</b>	<b>Teilmodell Außensände</b>	<b>77</b>
<b>9</b>	<b>Dithmarscher Bucht</b>	<b>84</b>

9.1	Projektgebiet Dithmarscher Bucht . . . . .	84
9.2	Differenzendarstellungen . . . . .	84
9.2.1	Differenzen 1969 - 1976 . . . . .	84
9.2.2	Differenzen 1976 - 1985 . . . . .	85
9.2.3	Differenzen 1969 - 1985 . . . . .	86
9.3	Volumenbilanz . . . . .	86
9.4	Morphodynamische Modellierung Dithmarscher Bucht . . . . .	88
9.5	Morphodynamische Modellierung Dithmarscher Bucht - Bereich vor dem neuen Deich	95
9.5.1	Qualitativer Fehler . . . . .	96
9.5.2	Quantitativer Fehler . . . . .	97
9.6	Vergleich mit Naturdaten für den Zeitraum eines Sommerhalbjahres . . . . .	98
9.7	Erste Rechnungen mit Berücksichtigung eines steigenden Meeresspiegels . . . . .	100

## 1 Kurzfassung

Ziel des Forschungsvorhabens *Morphologische Langfristprognose für das System Tidebecken-Außensände am Beispiel Sylts und der Dithmarscher Bucht* war es, die derzeitigen Möglichkeiten und Grenzen der morphodynamischen Modellierung von großen morphologischen Einheiten und für lange Zeiträume aufzuzeigen.

Zentrale Fragestellung war hierbei, ob und gegebenenfalls in welchem Grade, bzw. mit welchen Einschränkungen, die berechnete morphologische Entwicklung eines derart komplexen Gebietes auf naturähnliche Ergebnisse führt und welche Parameter (Seegang, Zeitstreckung, Randbedingungen, Sediment, ...) hierbei einen besonderen Einfluß haben.

Projektgebiete waren hierbei das Hörnumbecken und die Dithmarscher Bucht. In der Dithmarscher Bucht sollte nach Empfehlung der Beratergruppe des KFKI der Seegang unberücksichtigt bleiben.

Wichtigste Projektergebnisse waren folgende:

- Im Projektgebiet **Hörnumbecken** können bei Vernachlässigung des Seegangs nur Aussagen für ruhigere Perioden getroffen werden. Auffälligste morphologische Erscheinungen sind hierbei eine leichte Erosion in den Rinnen und eine leichte Sedimentation auf den rinnennahen Wattflächen, die während Springtide höher ausfällt als bei Nipptide. Dieses Ergebnis deckt sich mit der Schichtung in von Wattflächen während ruhigerer Perioden entnommenen Bohrkernen.
- Verfahren zur Eingabefilterung sind für Langfristprognosen derzeit noch zwingend, um Rechenzeit zu sparen und wurden daher im Rahmen des Vorhabens angewendet. Als morphologische Tide, also als diejenige Tide, die aus morphologischer Sicht den natürlichen Zyklus der Tiden am besten repräsentiert, ergab sich die gegenüber der mittleren Tide um 2%-5% erhöhte Tide bestimmt. Es wurden morphologische Zeitstreckungsfaktoren von über 200 getestet. Die Stabilität des Verfahrens hängt hierbei stark von den maximal im Gebiet auftretenden Umlagerungen ab.
- Ein wichtiger Schritt des Forschungsvorhabens war die instationäre Kopplung des morphodynamischen Modells TIMOR mit dem spektralen Wellenenergiemodell SWAN. Bei Berücksichtigung des Seegangs berechnet das gekoppelte Modell in einem Gebiet, das sich annähernd im morphologischen Gleichgewicht befindet, naturähnliche Ergebnisse. Insbesondere werden morphologisch aktive Bereiche gut getroffen und Rinnenverlagerungen dort berechnet, wo sie auftreten. Unschärfen gibt es in der Quantität des umgelagerten Materials und dem zeitlichen Ablauf der Umlagerungen.
- Dort wo ein eindeutiger morphologischer Trend besteht, wie beispielsweise bei der Verlagerung des Ebbdeltas in südliche Richtung, wird dieser vom Modell auch wiedergegeben.

- Weiterhin wurden morphologisch dominante Windsituationen bestimmt. Diese können als Basis zur Wahl repräsentativer Ereignisse genutzt werden.
- Solche repräsentativen Ereignisse wurden dann für das Hörnumbecken bestimmt. Dabei erwiesen sich 4 zu berücksichtigende Ereignisse als sinnvolle Wahl, um die Gesamtheit der auftretenden Ereignisse abzudecken. Die beste Übereinstimmung mit einem Referenzzustand wurde mit folgenden Ereignissen erreicht: Südwind, 7.5 m/s, Wichtungsfaktor 0.3; Südwestwind, 12.5 m/s, Wichtungsfaktor 0.05, Westwind, 12.5 m/s, Wichtungsfaktor 0.1, Nordwestwind, 7.5 m/s, Wichtungsfaktor 0.35.
- Die durch die Vordeichung in der *Dithmarscher Bucht* ausgelösten Sedimentationen in unmittelbarer Dammnähe werden vom Modell wiedergegeben. Das hierzu benötigte Material wird teilweise aus den Rinnen erodiert, zu einem anderen Teil wird es als feinkörniger Schwebstoff in das Gebiet eingetragen.
- Das Maß der ins Gebiet strömenden Schwebstoffe und die Wahl einer Anfangskornverteilung erweisen sich als sensitive Faktoren.
- Berechnete Anlagerungsbereiche von feinkörnigem Material korrespondieren gut mit während einer Sommerperiode kartierten Sedimentationsbereichen.

Als Gesamtergebnis ist festzuhalten, daß morphodynamische Modelle zusammen mit der Erfahrung des Modellbetreibers wichtige Hilfestellungen bei der Beurteilung von langfristigen morphodynamischen Entwicklungen geben können.

## 2 Konzeption des Forschungsvorhabens

### 2.1 Zielsetzung

Ziel des Forschungsvorhabens *Morphologische Langfristprognose für das System Tidebecken - Außensände am Beispiel Sylts und der Dithmarscher Bucht* war es, die Möglichkeiten und Grenzen der morphodynamischen Modellierung für große morphologische Einheiten und große Zeiträume aufzuzeigen.

Zentrale Fragestellung war hierbei, ob und gegebenenfalls in welchem Maß bzw. mit welchen Einschränkungen die berechnete morphologische Entwicklung eines derart komplexen Gebietes auf naturähnliche Ergebnisse führt und welche Parameter (Seegang, Zeitstreckung, Randbedingungen, Sediment, ...) hierbei einen besonderen Einfluß haben.

### 2.2 Voraussetzungen

Als Untersuchungsgebiet wurde das Hörnumbecken gewählt. Die Entwicklung des Gebietes sollte ab Bau des Hindenburgdammes 1935 nachvollzogen werden. Zu diesem Zweck sollten verschiedene historische Vermessungszustände herangezogen werden.

Die Datenrecherche zeigte, daß nur wenige historische Vermessungen des Hörnumbeckens vorlagen, die für das Projekt nutzbar waren. Insbesondere lagen keine Daten aus der Zeit vor Bau des Hindenburgdammes vor. Die erste flächendeckende Vermessung des Gebietes stammt aus dem Jahr 1955. Der Bau des Hindenburgdammes lag also zum Vermessungszeitpunkt bereits 20 Jahre zurück. Somit fehlte eine Ausgangstopographie. Das morphodynamische Signal, welches durch einen solchen Eingriff hervorgerufen wird, war daher nur sehr beschränkt aus den Vermessungszuständen nachzuvollziehen, da die Anpassung des Gebietes bereits in den ersten 20 Jahren nach Bau des Hindenburgdammes stattgefunden hat und sich das Gebiet somit seitdem mehr oder weniger in einem morphologischen Gleichgewicht befindet.

Aus diesem Grund wurde ein Aufstockungsantrag gestellt, der die Dithmarscher Bucht als zusätzliches Untersuchungsgebiet vorsah. Hier wurden in den Jahren 1972 und 1979 insgesamt zwei Vordeichungen ausgeführt. Die morphologischen Änderungen, die sich durch diesen Eingriff ergeben haben, sind in insgesamt 9 Peilaufnahmen gut dokumentiert [13].

### 2.3 Zeitlicher Ablauf

Das Forschungsvorhaben wurde vom 01.06.1997 bis zum 31.5.2000 gefördert.

In der ersten Hälfte des Förderzeitraumes standen Datensichtung und -analyse sowie morphodynamische Parameterstudien im Vordergrund, bei denen der Seegang noch unberücksichtigt blieb. In der

zweiten Hälfte wurde dann eine Kopplung zwischen dem morphodynamischen Modell TIMOR und dem Seegangmodell SWAN hergestellt und morphodynamische Rechnungen mit Berücksichtigung des Seegangs durchgeführt.

Die Aufstockung für das Projektgebiet Dithmarscher Bucht wurde bewilligt und lief vom 01.09.1998 bis 01.09.1999. Hier wurde der Seegang auf Empfehlung der Beratergruppe des KFKI aufgrund der kurzen Bearbeitungszeit nicht berücksichtigt.

### 3 Das Untersuchungsgebiet Hörnumbecken

Das Hörnumbecken liegt in der inneren Deutschen Bucht. Es wird im Norden und Westen von der Insel Sylt, sowie im Süden von der Insel Föhr und im Osten vom Festland begrenzt. Im Jahre 1935 wurde die Insel Sylt durch den Hindenburgdamm mit dem Festland verbunden. Dadurch wurde eine rückwärtige Umströmung Sylts unterbunden. Das Gebiet mit seiner Tiefenverteilung aus dem Jahr 1974 ist in **Abbildung 1** dargestellt.

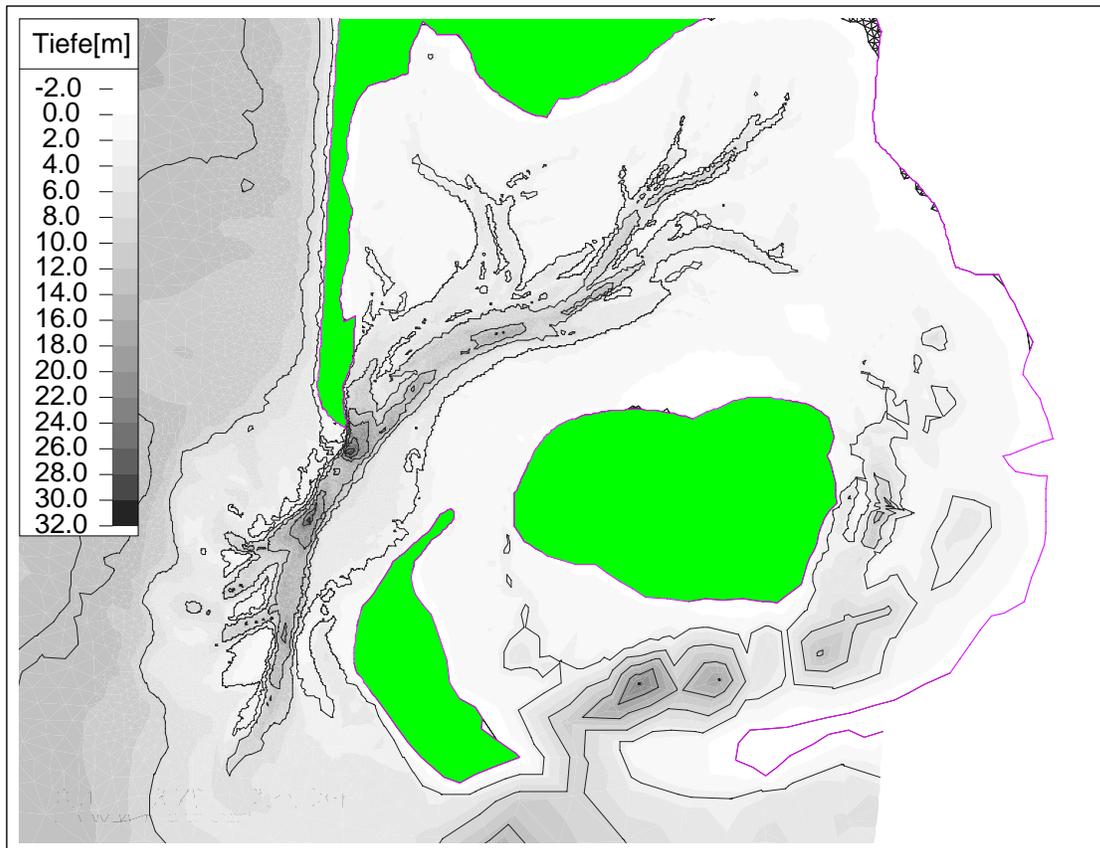


Abbildung 1: Tiefenverteilung Hörnumbecken 1974

Die Verbindung zur offenen See wird durch das Hörnumtief hergestellt, das an der Südspitze Sylts eine Tiefe von über 30m erreicht. Kleinere Verbindungen mit dem Tidebecken der Norderaue bestehen über die Föhrer Schulter zwischen Föhr und Festland, sowie das Amrumtief, einen kleineren Priel zwischen Amrum und Föhr. Unter mittleren Verhältnissen tragen diese beiden Verbindungen jedoch nur zu weniger als 10 % zum Tideprisma bei. Vom Hörnumtief zweigen drei weitere Prielsysteme ab: östlich von Sylt verläuft die Rantumlohe, der westliche Wattbereich wird durch das Eidumtief und die nordöstlichen Bereiche durch die Priele Oster- und Westerley gespeist.

Ca. 50 % des Beckens sind intertidale Flächen, was ein sehr geringer Wert für Tidebecken in der Deutschen Bucht ist.

Südwestlich von Sylt schließt sich das Ebbdelta mit den Außensänden Theeknobssand, Hörnumknobsand, Holtknobsand und Jungnamensand an.

Der Tidehub im Becken beträgt ca. 2m, so daß das Becken gerade noch dem mesotidalen Bereich zuzuordnen ist. Der Seegang im Hörnumbecken ist größtenteils durch lokale Wellengenerierung geprägt, da höhere Wellen bereits am Ebbdelta brechen. Hier und an der Westküste von Sylt ist hingegen der Seegang der offenen Nordsee prägend. Die vorherrschende Windrichtung sind Winde aus westlichen Richtungen.

## 4 Datenanalyse

### 4.1 Topographische Daten

Für das Hörnumbecken wurden im Laufe des Projektzeitraums insgesamt sieben quasisynoptische Vermessungen vom ALR (vormalig ALW) Husum zur Verfügung gestellt. Die Datensätze stammen aus den Jahren 1955, 1974, 1978, 1981, 1986, 1987 und 1997. Dabei mußten Teilbereiche durch zeitlich nahegelegene Vermessungen ersetzt werden. Die Datensätze bestehen alle aus Meßpunkten mit Ausnahme des 1955er-Datensatzes, der aus digitalisierten Isolinien erzeugt wurde.

Insgesamt wird auf die Analyse der Daten ein großes Gewicht gelegt. Vor allem der Identifikation eines morphodynamischen Signals wird ein hoher Wert beigemessen.

### 4.2 Differenzendarstellungen

Für die einzelnen Vermessungen wurden Differenzendarstellungen erstellt. Hierbei traten auffällige systematische Fehler zu Tage, die in großer Ausführlichkeit im gleichzeitig laufenden KFKI-Forschungsvorhaben *Morphologische Gestaltungsvorgänge im Küstenvorfeld* erkannt wurden:

- **Fehler durch die Umrechnung von Wasserständen von Bezugspegel zu Meßpunkt.** Dieser Fehler macht sich durch auffällige Streifenmuster in den Differenzendarstellungen bemerkbar (vgl. **Abbildungen 3 und 4**).
- **Fehler durch die Beschickung über verschiedene Bezugspegel.** Dieser Fehler macht sich in einer scheinbaren Zweiteilung des Beckens bemerkbar: Während eine Hälfte flächendeckend leichte Erosion aufweist, zeigt sich in der anderen Hälfte flächendeckend eine leichte Sedimentation. Da dieses Problem in den Datensätzen 1974, 1986 und 1987 (vgl. **Abbildung 6**) jeweils gegeneinander auftritt, ist der Fehler nicht vollständig zu korrigieren.
- **Fehler während individueller Meßfahrten.** Diese Fehler machen sich durch auffällige fleckige Strukturen innerhalb einzelner Datensätze bemerkbar und sind auf Eingabefehler zurückzuführen (zum Beispiel ein Vorzeichenfehler in den 1986er Daten in einem kleinen Bereich im

noröstlichen Teil des Beckens, vgl. **Abbildungen 5 und 6**). Soweit diese Fehler nicht ohnehin schon vom BSH behoben waren, wurde sie im Rahmen des Projektes berichtigt.

Berücksichtigt man diese Aspekte und bedenkt zusätzlich, dass durch zufällige Fehler und die Genauigkeit der Vermessung, die prinzipiell für die angewandten Meßmethoden bei nicht mehr als  $\pm 0.2\text{m}$  liegt, zusätzliche Ungenauigkeiten in die Daten eingebracht werden, so kann nur bei Tiefendifferenzen, die über  $0.5\text{m}$  hinausgehen, sicher gesagt werden, daß sie in der Natur auch aufgetreten sind. Dies ist beim späteren Vergleich zwischen Berechnungsergebnissen und Naturdaten zu beachten.

Auf den folgenden Seiten sind die Differenzen aufeinanderfolgender Datensätze zueinander dargestellt.

#### 4.2.1 Differenzen 1955-1974

**Abbildung 2** zeigt die Tiefenänderungen, die sich zwischen 1955 und 1974 ergeben haben. Blaue Bereiche kennzeichnen hier wie auch im folgenden Erosionsbereiche. Es ist zu erkennen, daß die Umlagerungen fast ausschließlich in den Rinnenbereichen stattgefunden haben. Eine Ausnahme stellt hier eine Wattfläche zwischen Rantumlohe und Eidumtief dar. Wahrscheinlich ist dies auf die Isolinien-darstellung des 1955er-Datensatzes zurückzuführen (vgl. Kapitel 4.3.1). Die Tiefenänderungen übersteigen  $5\text{m}$  nur an der Südspitze Sylts sowie an der Prielverzweigung zwischen Hörnumtief und Ley. Die Priele Wester- und Osterley, deren Arme sich bis an den Hindenburgdamm erstrecken, weisen in den Endbereichen Sedimentationserscheinungen auf. Hier zeigt sich außerdem eine Tendenz zur Verschmälerung und gleichzeitigen Vertiefung. Es lassen sich weiterhin einige Rinnenverlagerungen ausmachen. Beispielfhaft sei hier der Nord-Ost-Schwenk des Ley gegenüber dem Hörnumtief genannt. Die im Küstenvorfeld vor Sylt auszumachenden Tiefenänderungen sind vornehmlich auf die Darstellung der 1955er-Daten zurückzuführen. Die lineare Interpolation zwischen der  $5\text{m}$ - und der  $10\text{m}$ -Tiefenlinie entspricht hier nicht der natürlichen Küstenquerprofilform.

#### 4.2.2 Differenzen 1974-1978

**Abbildung 3** zeigt die Tiefenänderungen, die sich zwischen 1974 und 1978 ergeben haben. Insgesamt bewegen sich die Tiefenänderungen in einem Rahmen bis zu  $2\text{m}$ , der nur an einigen Stellen im Hörnumtief überschritten wird. Westlich von Sylt ist es zu einer Verlagerung des Riff-Rinne-Systems gekommen. Die räumliche Auflösung der Peilvermessung ist allerdings nicht ausreichend, um detaillierte Aussagen über das morphologische Verhalten dieser kleinräumigen Struktur zu treffen. Nördlich von Amrum ist eine flächige Erosion von knapp  $1\text{m}$  in einem rechteckigen Bereich von ca.  $1\text{ km mal } 2\text{ km}$  Ausdehnung zu erkennen. Die Ursache hierfür ist nicht geklärt, es dürfte sich aber um einen Fehler in den Peilungen von 1974 handeln. An den Außensänden ist eine Verlagerung der Rinnen nach Süden zu erkennen. Eine weitere Prielverlagerung ist an der Prielverzweigung zwischen Hörnumtief und Eidumtief auszumachen. Auffällig sind die Streifenmuster in **Abbildung 3**, die sich über den gesamten

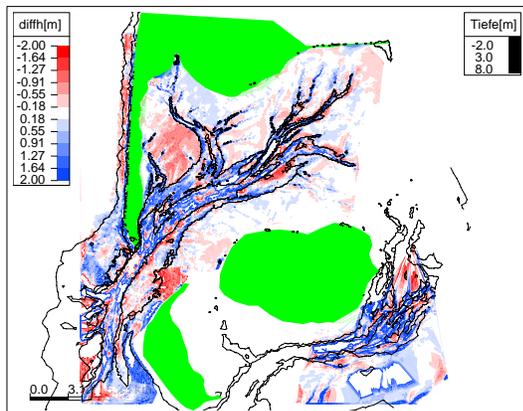


Abbildung 2: Tiefenänderungen 1955-1974  
(blau:Erosion)

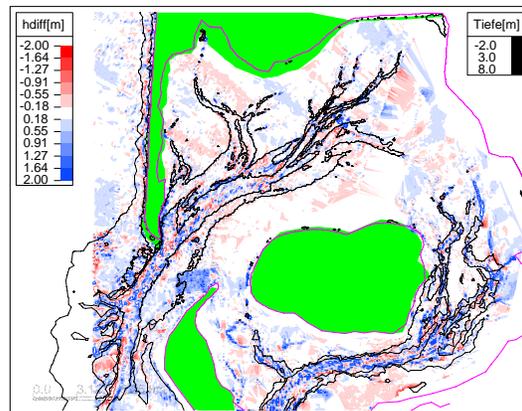


Abbildung 3: Tiefenänderungen 1974-1978  
(blau:Erosion)

nördlichen Teil des Hörnumbeckens erstrecken. Sie weisen auf Ungenauigkeiten in der Beschickung, wahrscheinlich in der Umrechnung von Wasserstand des Bezugspegels zum Meßpunkt hin.

#### 4.2.3 Differenzen 1978-1981

**Abbildung 4** zeigt die Tiefenänderungen, die sich zwischen 1978 und 1981 ergeben haben. Auch hier übersteigen die maximalen Tiefenänderungen nur selten 2m. Auffällig ist die flächendeckende Sedimentation im nordöstlichen Teil des Beckens, die wieder auf eine systematische Ungenauigkeit in der Beschickung hindeutet. Der Endbereich des Hörnumtiefs hat sich nach Norden verlagert. Auffällig ist weiterhin eine Sedimentation im Osterley.

#### 4.2.4 Differenzen 1981-1986

**Abbildung 5** zeigt die Tiefenänderungen, die sich zwischen 1981 und 1986 ergeben haben. Auffällig ist eine flächendeckende Erosion im gesamten Hörnumbecken und Küstenvorfeld. Auch diese Erscheinung ist auf eine abweichende Beschickung der 1981er- und 1986er-Daten zurückzuführen. Auf den roten Bereich östlich des Osterley wurde bereits im 1. Zwischenbericht hingewiesen. Hier liegt ein Vorzeichenfehler in den Rohdaten vor. Der Datensatz wurde vom BSH nicht in eine Arbeitskarte überarbeitet. Um die Konsistenz der Datensätze innerhalb von KFKI-Projekten zu gewährleisten, wurde innerhalb dieses Projektes der Datensatz nicht verändert, es wird lediglich auf den Fehler, der beim BSH bekannt ist, hingewiesen.

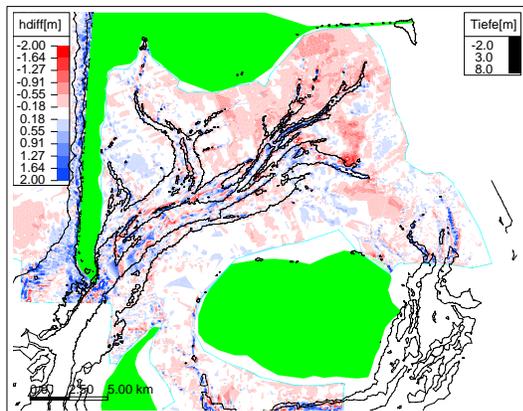


Abbildung 4: Tiefenänderungen 1978-1981  
(blau:Erosion)

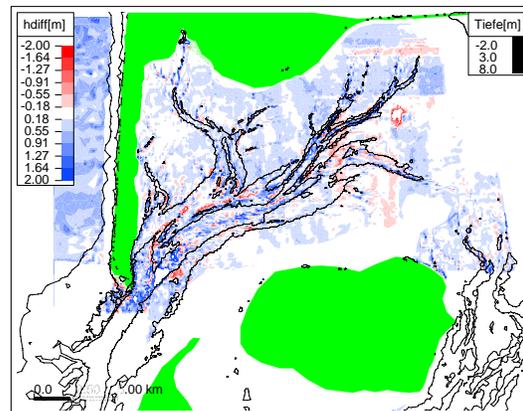


Abbildung 5: Tiefenänderungen 1981-1986  
(blau:Erosion)

#### 4.2.5 Differenzen 1986-1987

Eine Differenzbildung der Vermessungsdaten von 1986 und 1987 ergab eine flächendeckende 'Sedimentation' (rot) für den östlichen und flächendeckende 'Erosion' (blau) für den westlichen Teil des Hörnum-Beckens (vgl. **Abbildung 6**). Diese Veränderungen sind unrealistisch und müssen auf einen systematischen Fehler zurückgeführt werden. Um die Frage zu klären, welcher der beiden Datensätze zuverlässiger ist, wurden Differenzen zum System '70er' gebildet, was im ersten Zwischenbericht beschrieben wurde. Es zeigte sich, daß beide Vermessungen die selben systematischen Fehler aufweisen, in 1986 allerdings schwächer ausgeprägt als 1987. Erklärung hierfür könnten Fehler in der Beschickung oder eine ungenaue Einmessung der Bezugspegel sein. Es wird deutlich, daß dieser systematische Fehler nicht auf *eine* fehlerhafte Vermessung zurückzuführen sein kann, da der von Nord nach Süd verlaufende Sprung in allen drei erwähnten Differenzbildungen auftritt.

#### 4.2.6 Differenzen 1987-1997

Auch die Tiefendifferenzen zwischen 1987 und 1997 ergeben die bekannten systematischen Fehler. Diese Fehler, die in diesem Fall zum Großteil aus der 1987er Vermessung stammen, überlagern kleinere morphologische Veränderungen, so daß nur lokal Rinnenverlagerungen zu beobachten sind.

#### 4.2.7 Rückschlüsse auf die Fehlerhaftigkeit der einzelnen Datensätze

Um die stärksten systematischen Fehler zu quantifizieren, werden zwischen allen Datensätzen Differenzen erstellt und die umgelagerten Volumina im westlichen und im östlichen Teil des Hörnumbeckens bestimmt. Die Unterteilung verläuft auf der Trennungslinie zwischen den Beschickungspegeln Hörnum

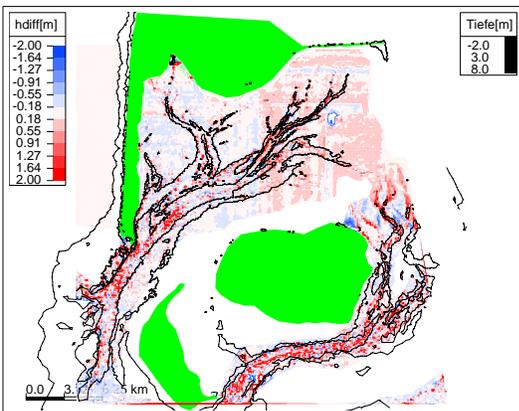


Abbildung 6: Tiefenänderungen 1986 -1987

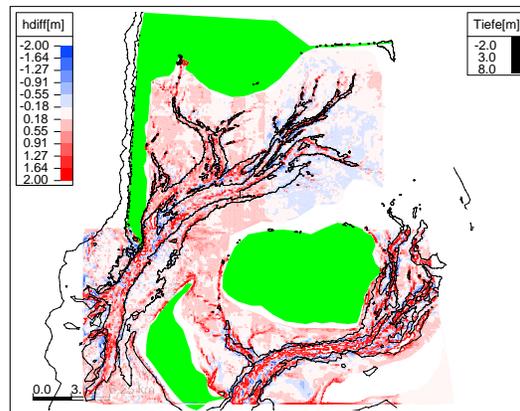


Abbildung 7: Tiefenänderungen 1987 -1997

und Dagebüll, die aus den Differenzdarstellungen bekannt ist.

Die Ergebnisse sind in der folgenden Tabelle 1 dargestellt. Hierbei stehen unterhalb der Diagonale die Differenzvolumen in Mio.  $m^3$ , oberhalb der Diagonale die korrespondierenden mittleren relativen Tiefenänderungen. Sie stellen unter der Annahme, daß die Volumenbilanz der Teilgebiete ausgeglichen ist, den mittleren relativen Versatz zueinander dar.

Die Volumen sind nicht immer in identischen Gebieten ermittelt worden, da in einzelnen Datensätzen nicht alle Bereiche vermessen wurden. Aus der Tabelle geht unter der Voraussetzung, daß sich das Sedimentvolumen einer Beckenhälfte nicht geändert hat und der Datensatz von 1997 verlässlich ist, der Versatz der einzelnen Datensätze zueinander hervor. Beispielsweise ergibt sich aus der rechten Spalte, daß der Ostteil des Beckens 1997 um 11.5 cm höher liegt als 1955, somit der 1955er-Datensatz in diesem Bereich also im Mittel um 11.5cm zu tief eingemessen oder beschickt worden wäre. Gerade hier kann natürlich auch davon ausgegangen werden, daß es (als Nachwirkung des Hindenburgdammbaus) zu Sedimentationen gekommen ist. Es wird schnell deutlich, daß man ohne festen Bezugspunkt nur eingeschränkte Aussagen über globale (d. h. das Gesamtgebiet betreffende) Volumenänderungen machen kann. Es sei an dieser Stelle noch einmal betont, daß dieser Analyse die Annahme zugrunde liegt, daß sich das Sedimentvolumen einer Beckenhälfte nicht geändert hat.

Aus der Tabelle geht weiterhin hervor, daß die Bruttoumsatzmengen für den 21-Jahreszeitraum 1955 - 1974 nicht wesentlich höher liegen als in den wesentlich kürzeren Folgezeiträumen. Dies weist darauf hin, daß in weiten Teilen des Gebiets kein eindeutiger Trend vorhanden ist und die morphologischen Veränderungen reversibler Natur sein können, da ansonsten ja die Bruttoumsatzmengen für einen längeren Zeitraum deutlich höher wären. Insgesamt läßt sich festhalten, daß sich das Gesamtgebiet in einem morphologischen Gleichgewicht befindet, d.h. daß es über längere Zeiträume eine ausgeglichene Sedimentbilanz hat und nur interne Umlagerungen stattfinden. Dies deckt sich mit dem optischen

		1955		1974		1978		1981		1986		1987		1997	
		$\Delta h$		$\Delta h$		$\Delta h$		$\Delta h$		$\Delta h$		$\Delta h$		$\Delta h$	
1955	O	-X-	-X-	-2.7cm		+9.0cm		+26.9cm		+10.3cm		+23.0cm		+11.5cm	
	W	Sed	Ero	-5.9cm		-0.1cm		+6.8cm		-13.6cm		-27.6cm		-2.3cm	
1974	O	24.6	27.8	-X-	-X-	+5.6cm		+27.2cm		+12.4cm		+26.3cm		+13.2cm	
	W	42.8	50.5	Sed	Ero	+5.6cm		+11.3cm		-5.2cm		-21.0cm		+9.8cm	
1978	O	37.0	26.1	16.0	9.3	-X-	-X-	+20.1cm		+5.1cm		+17.5cm		+4.6cm	
	W	47.0	47.6	23.4	16.1	Sed	Ero	+4.7cm		-10.8cm		-25.4cm		-2.4cm	
1981	O	51.4	19.1	36.8	4.2	33.8	9.7	-X-	-X-	-12.9cm		-0.7cm		-14.2cm	
	W	50.0	41.2	29.9	15.2	21.6	15.5	Sed	Ero	-19.1cm		-33.9cm		-11.0cm	
1986	O	36.5	24.1	25.0	10.1	21.0	14.9	9.3	24.8	-X-	-X-	+10.4cm		-0.1cm	
	W	54.4	36.7	20.1	27.1	14.8	28.8	10.6	35.4	Sed	Ero	-11.0cm		+8.0cm	
1987	O	46.0	18.4	35.8	4.2	29.6	8.6	13.0	13.9	22.2	9.7	-X-	-X-	-13.5cm	
	W	31.0	66.9	17.1	44.4	12.7	45.7	8.8	52.9	8.7	23.0	Sed	Ero	+23.1cm	
1997	O	60.0	46.2	27.1	11.3	25.0	19.5	9.1	26.1	16.1	16.2	7.0	23.2	-X-	-X-
	W	48.0	51.0	44.0	31.2	28.0	31.1	22.0	36.3	28.4	18.0	43.9	13.9	Sed	Ero

Tabelle 1: Differenzvolumen in Mio.  $m^3$  und gemittelte Tiefenänderungen (positives Vorzeichen entspricht Sedimentation) zwischen unterschiedlichen Datensätzen, O=Ostteil des Beckens, W=Westteil des Beckens

Eindruck der Tiefendifferenzen, in denen neben systematischen Fehlern hauptsächlich lokal Rinnenverlagerungen auszumachen waren.

Zusammenfassend lassen sich folgende Aussagen treffen:

- Im Hörnumbecken liegt nur ein schwaches morphodynamisches Signal vor, welches stark von Meßfehlern überlagert ist, die in der selben Größenordnung liegen wie die in der Natur auftretenden morphologischen Veränderungen. Insbesondere finden sich viele Bereiche, wo eine morphologische Entwicklung nicht fortwährend in die gleiche Richtung geht, das heißt, daß die Morphologieänderungen temporärer und reversibler Natur sind.
- Angesichts von großflächigen systematischen Ungenauigkeiten sind Volumenbilanzen, die über große Gebiete erstellt werden, nur begrenzt aussagefähig.

#### 4.2.8 Morphologische Veränderungen an einem exemplarischen Ausschnitt

**Abbildung 8** zeigt die 4m-, 8m-, und 12m-Tiefenlinien der Peiljahre 1974, 1978, 1981 und 1986 an der Prielverzweigung zwischen Hörnumtief und Eidumtief. Die 1955er-Aufnahme wurde wegen ihrer Isoliniendarstellung ausgelassen (vgl Kapitel 4.3.1). Weiterhin wurde der Übersichtlichkeit halber auf den 1987er-Datensatz verzichtet, der nur ein Jahr von der 1986er Aufnahme entfernt liegt und auch vom BSH nicht in eine Arbeitskarte überarbeitet wurde.

Auffallend ist die Stabilität des tiefsten Bereiches. Er hat sich in dem 12-Jahres-Zeitraum nur un-

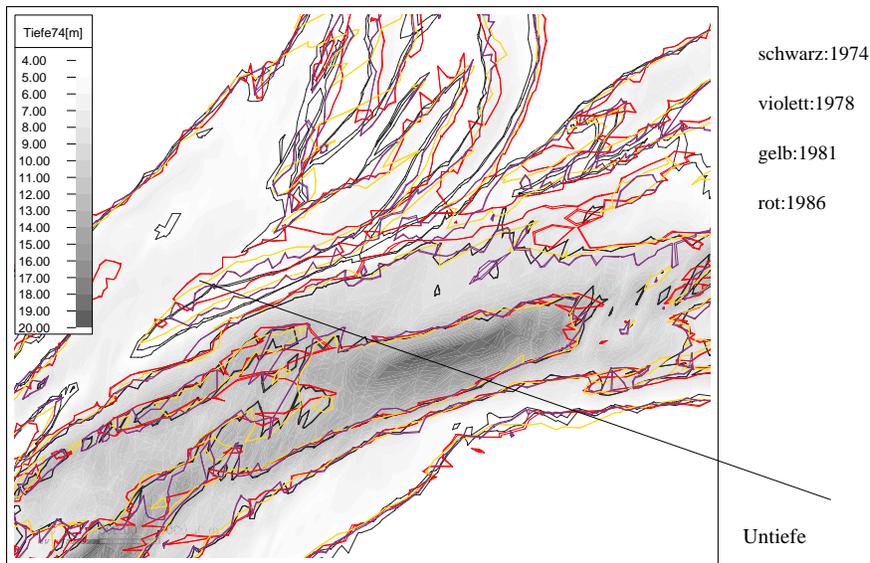


Abbildung 8: Verschiebungen der 4m-, 8m- und 12m-Linie zwischen 1974 und 1986

wesentlich verlagert. Auch die südliche und östliche Begrenzung zum Watt ist sehr lagestabil. Im Gegensatz dazu wandert das zentral gelegene Flach kontinuierlich nach Norden. Weiter östlich und in den tieferen Bereichen des Eidumtiefs hingegen finden unsystematische Änderungen statt.

Über die Ursachen für die genannten Erscheinungen Stabilität, systematische Veränderung, unsystematische Veränderung können keine abschließenden Aussagen getroffen werden. Einerseits spielt der Seegang hier lokal sicher eine große Rolle, andererseits können auch biologische Faktoren eine nicht zu unterschätzende Rolle spielen. Um dies zu klären, könnten nur häufigere Aufnahmen, beispielsweise nach Sturmereignissen, Aufschluß geben.

### 4.3 Weitergehende Analyse der topographischen Daten

#### 4.3.1 Standardabweichung der Peildaten

Um ein Maß für die morphologische Aktivität des Gebietes zu bekommen, wurde die Standardabweichung der Tiefenlage bestimmt. Hierzu wurden die Datensätze auf ein regelmäßiges Quadratgitter interpoliert. Zu jedem dieser Knoten wurde die Standardabweichung vom Mittelwert bestimmt. Eine hohe Schwankung in der Tiefenlage deutet auf einen morphologisch aktiven Bereich hin: Die Standardabweichung ist also ein Maß für die morphologische Aktivität. Zu berücksichtigen bleibt dabei, daß es in Bereichen mit hohen Tiefengradienten aufgrund der Interpolation und der Ungenauigkeiten bei der Lagebestimmung von Meßpunkten zu einer hohen Standardabweichung kommen kann, ohne daß die morphologische Aktivität hoch sein muß. Da die Standardabweichung ein absolutes Maß ist, treten in tiefen Bereichen im allgemeinen höhere Standardabweichungen auf als in flachen.

Im KFKI-Projekt Morphologische Analysen Nordseeküste (MORAN) [19] wurde zur Beschreibung der

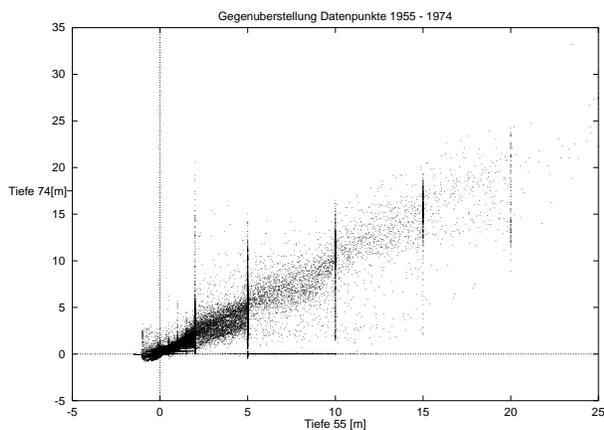


Abbildung 9: Gegenüberstellung der Tiefen der Datenpunkte 1955 (x-Achse) und 1974 (y-Achse)

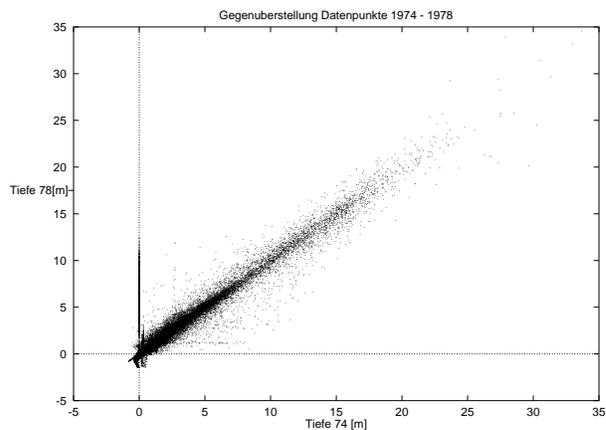


Abbildung 10: Gegenüberstellung der Tiefen der Datenpunkte 1974 (x-Achse) und 1978 (y-Achse)

morphologischen Aktivität die Umsatzhöhe definiert. Das MORAN-Verfahren bietet sich insbesondere bei einer hohen Anzahl von Peilaufnahmen in relativ kurzer zeitlicher Abfolge an, anhand derer die Umsatzmengen von einem Zeitraum zum andern gut bilanziert werden können. Im Falle des Hörnumbeckens liegen teilweise sehr lange Zeiträume ohne Vermessung vor (z.B. von 1955 bis 1974). Es kann hier nicht davon ausgegangen werden, daß der wahre Umsatz des Zeitraums durch eine Differenzbildung ermittelt wird; das wäre nur der Fall, wenn an jedem Punkt eine eindeutige Entwicklung, d. h. nur Erosion oder nur Sedimentation stattgefunden hätte. Aus diesem Grund wurden die Vermessungsdaten gleichberechtigt behandelt, d. h. ohne Berücksichtigung des dazwischenliegenden Zeitraums, was aufgrund der wenigen Datensätze und der oben beschriebenen Schwierigkeiten als der praktikabelste Weg erschien.

Aufgrund seiner Sonderstellung wurde der 1955er-Datensatz bei der Bestimmung der Standardabweichung einmal berücksichtigt und einmal vernachlässigt. Die Sonderstellung des 1955er-Datensatzes sei an folgendem Beispiel erläutert:

In den **Abbildungen 9 und 10** sind die Datenpunkte von 1955 mit 1974 sowie 1974 mit 1978 gegenübergestellt.

Deutlich wird hierbei der Einfluß der Isolinienkarte von 1955. Durch die lineare Interpolation zwischen zwei Isolinien gleicher Höhe liegen alle dazwischenliegenden Punkte auf gleichem Niveau. Kleinere morphologische Strukturen werden nicht aufgelöst. Dies führt zu Punktansammlungen auf 2m-, 5m-, 10m-, 15m-, 20m- und 25m-Niveau. Diese Erscheinung führt lokal zu erhöhten Standardabweichungen und täuscht eine morphologische Aktivität vor, die in Wahrheit auf Interpolationsfehler im 1955er-Datensatz zurückzuführen ist.

Die Gegenüberstellung zwischen den Datenpunkten 1974 und 1978 ergibt ein wesentlich realistischeres Bild. Die Datenpunkte liegen hier sehr dicht an der Geraden, die durch die Gleichung  $y=x$  beschrieben

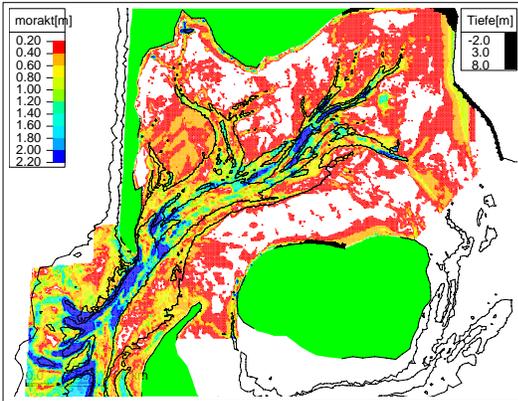


Abbildung 11: Standardabweichung der Peildaten Hörnumbecken (blau: Hohe morphologische Aktivität)

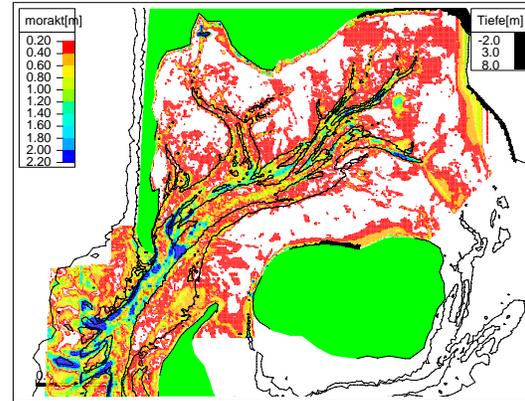


Abbildung 12: Standardabweichung der Peildaten Hörnumbecken ohne 1955er Datensatz

wird. Der Korrelationskoeffizient beträgt 0.97.

In **Abbildung 11** ist die Standardabweichung der Peildaten im Hörnumbecken ohne Berücksichtigung des 1955er-Datensatzes dargestellt.

Wie erwartet ist die morphologische Aktivität in den Rinnen besonders hoch. Im besonderen fallen folgende morphologisch aktive Bereiche auf:

- Die Außensände und im besonderen der Grenzbereich zwischen Außensänden und den angrenzenden Rinnen
- Östlich von Sylt im Übergang zur Rantumlohe
- Übergangsbereich Hörnumtief - Eidumtief
- Endbereich Hörnumtief
- Endbereich Wester- und Osterley
- Der westlich an Amrum angrenzende Bereich

Eine auffallend niedrige morphologische Aktivität liegt im Zentralbereich des Hörnumtiefs und im Eidumtief vor.

Zieht man den 1955er Datensatz noch zusätzlich in Betracht ändert sich das qualitative Erscheinungsbild nur unwesentlich. Auffallendste Veränderungen sind der Wattbereich zwischen Eidumtief und Rantumlohe, und eine erhöhte morphologische Aktivität im Bereich von Wester- und Osterley, was möglicherweise auf den Bau des Hindenburgdammes zurückzuführen ist.

Auffällig bleibt die erhöhte Aktivität im Bereich des Westerley und des Osterley, was eine Spätfolge des Hindenburgdammbaus sein könnte. Angesichts der Datenlage und der Meßungenauigkeiten kann dies aber nicht erschöpfend geklärt werden.

### 4.3.2 Trend der Tiefenänderungen

Zusätzlich zur Standardabweichung der Datenpunkte, die ein Maß für die morphologische Aktivität ist, interessiert, ob die morphologischen Veränderungen systematisch sind, ob es einen Trend gibt. Dies interessiert insbesondere im Hinblick auf die Herausfilterung eines morphodynamischen Signals. Aus diesem Grund wird mit der Methode der kleinsten Quadrate eine Regressionsgerade durch die Datenpunkte gelegt, deren Steigung den Trend der Tiefenänderungen in Meter pro Jahr angibt.

In **Abbildung 13** ist der Trend der Tiefenänderungen in den Datensätzen von 1955-1997 flächenhaft dargestellt.

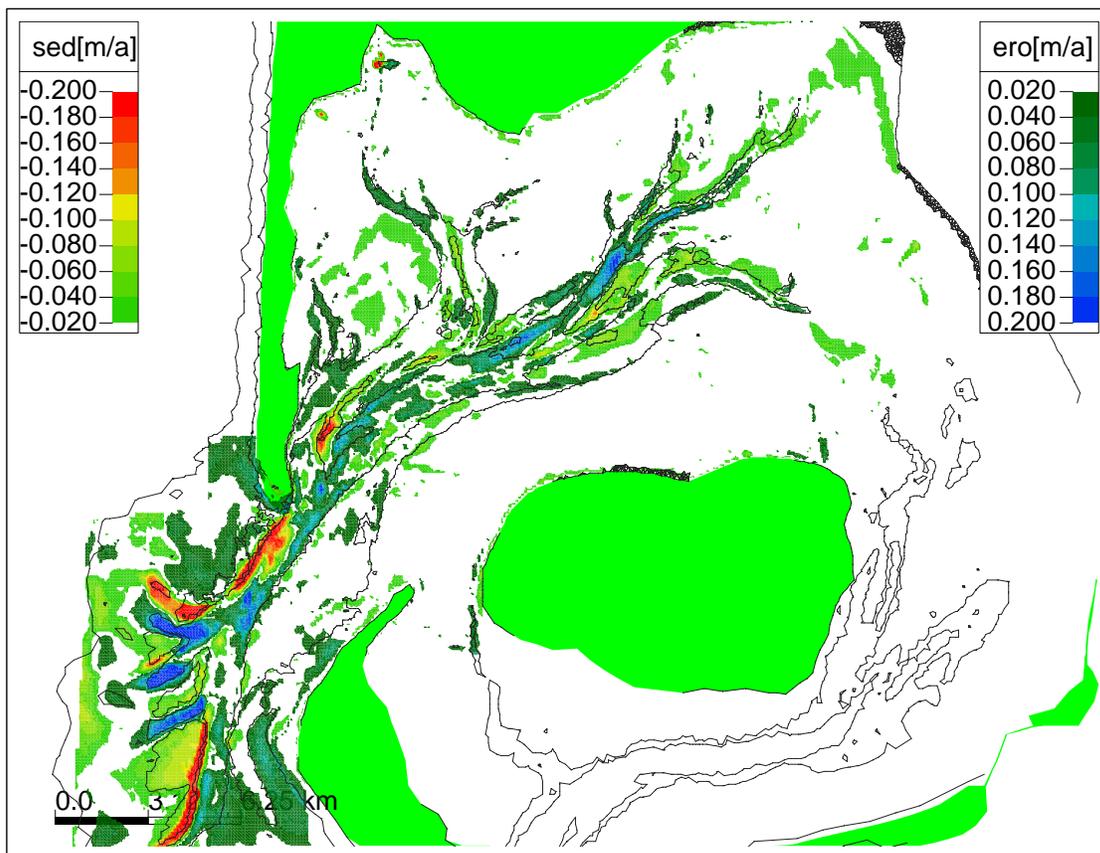


Abbildung 13: Trend der Peildaten in m/a (rot bis grün:Sedimentation, grün bis blau: Erosion)

Der Trend der Tiefenänderungen für den Gesamtzeitraum wird durch die Veränderungen zwischen 1955 und 1974 besonders geprägt, da hier ein langer Zeitraum mit dem entsprechenden Gewicht in die Ermittlung des Trends eingeht.

Folgende Teilbereiche fallen besonders auf:

- Bereich Außensände: Hier findet eine Südwärtsbewegung der Außensände statt. Gleichzeitig verlagert sich der Theeknobssand in südöstliche Richtung. Der Trend zur Bewegung in Südrichtung legt die Vermutung nahe, daß der Küstenlängstransport entlang der Westküste Sylts verantwortlich für diese Bewegung ist: Das System lagert das eingebrachte Material von Norden her an. Aufgrund des unveränderten Tidevolumens erhalten sich aber auch die Rinnenquerschnitte, weswegen sich die Rinne dann nach Süden verlagert. Der Jungnamensand wandert in westliche Richtung.
- In den Endbereichen von Wester- und Osterley ist ein schwacher Trend zur Sedimentation auszumachen. Dies könnte eine Spätfolge des Hindenburgdammbaus sein. Südwestlich dieses Bereichs liegt ein spürbarer Trend zur Erosion vor.
- Der Endbereich des Hörnumtiefs verschiebt sich in südliche Richtung und verringert dabei sein Volumen.
- Im tiefsten Bereich des Hörnumtiefs wird das östliche Ufer erodiert.
- Die bereits erwähnte Prielverzweigung zwischen Hörnum- und Eidumtief wandert in südliche Richtung.
- Eidumtief und Rantumlohe vertiefen sich in ihren Endbereichen, während auf der Wattfläche dazwischen ein Trend zur Sedimentation vorliegt. Diese Erscheinung ist auf die Isoliniendarstellung des 1955er-Datensatzes zurückzuführen.
- Östlich der Südspitze von Sylt vergrößert sich eine Sandbank.

Wird der 1955er Datensatz bei der Ermittlung des Trends aus bereits genannten Gründen weggelassen, so bestätigt sich die bereits getroffene Aussage, daß sich das Hörnumbecken seit den 70er Jahren weitgehend in einem morphologischen Gleichgewicht befindet. Außer den bereits oben angeführten Bereichen, fallen nur noch zwei Sedimentationsbereiche auf der Föhrer Schulter und zwischen Osterley und Hörnumtief und ein Erosionsbereich westlich der Amrum-Odde ins Auge, die auf Meßfehler zurückzuführen sind.

Generell stellt diese Methode in Gebieten mit zahlreichen Peilaufnahmen einen Weg dar, ein morphodynamisches Signal herauszufiltern.

#### 4.4 Sedimentologische Daten

- Beim ALW Husum liegen punktuell Bohrproben vor. Diese Bohrungen sind für das Projekt jedoch ungeeignet, da sie einerseits nicht flächendeckend, andererseits fast ausschließlich in ufernahen Wattgebieten genommen worden sind.

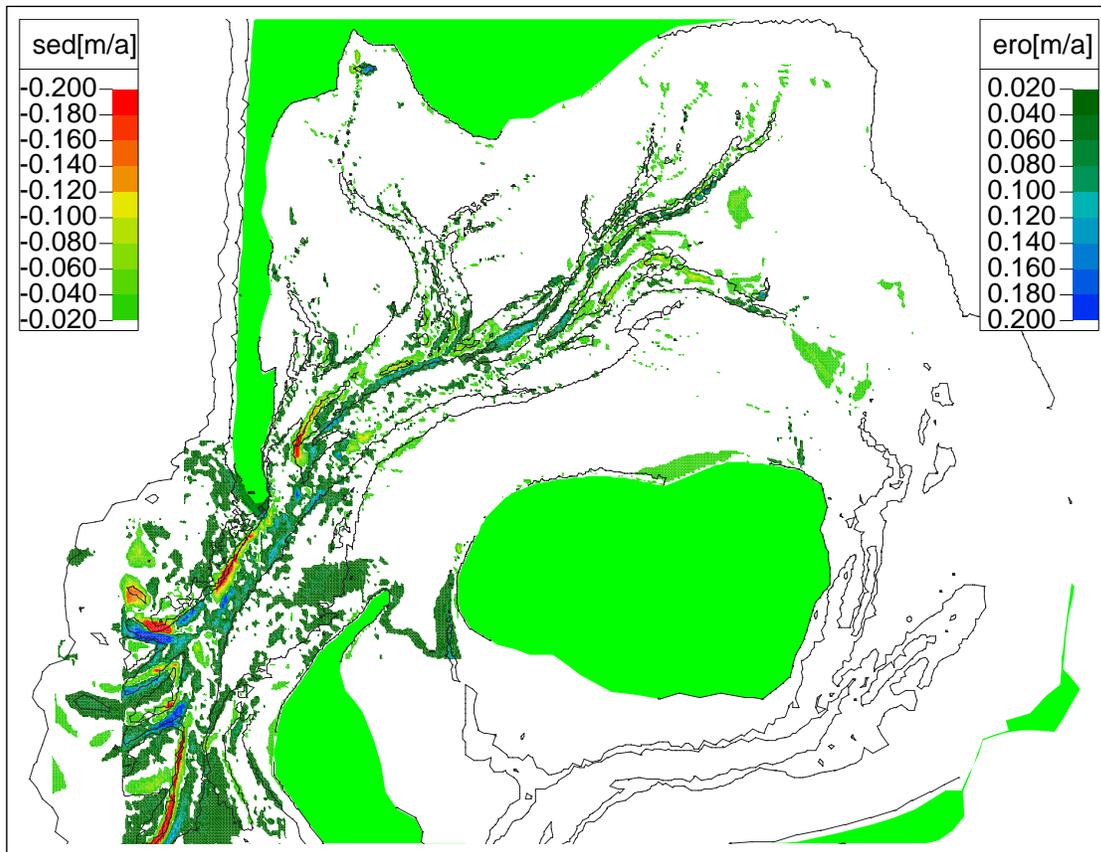


Abbildung 14: Trend Peildaten ohne 1955er Datensatz in m/a (rot bis grün: Sedimentation, grün bis blau: Erosion)

- Beim BSH Hamburg liegt eine Sedimentdatenbank für die Deutsche Bucht vor. Die Verteilung der für die Projektarbeiten verwendbaren Baggergreiferprobennahmestellen ist in **Abbildung 15** dargestellt. Es liegen zwar flächendeckend Korngrößenverteilungen vor, die Probennahmestellen haben jedoch in der Regel einen Abstand von mindestens 1km zueinander.

#### 4.4.1 Bearbeitung der sedimentologischen Daten

Um eine morphodynamische Modellierung möglichst naturnah durchzuführen, besteht die Notwendigkeit der Vorgabe einer realitätsnahen Anfangskornverteilung.

Es existieren im vorliegenden Fall vier Möglichkeiten eine Anfangskornverteilung vorzugeben:

1. Das Modell mit den BSH-Daten zu betreiben
2. Das Modell eine eigene Sortierung aus einer anfangs gleichförmigen Verteilung der Korngrößen vornehmen zu lassen

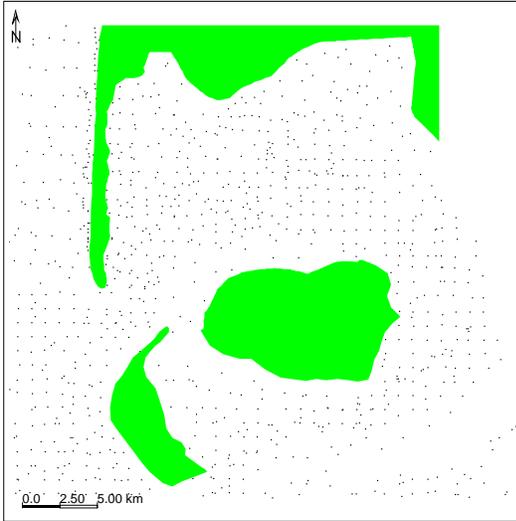


Abbildung 15: Positionen mit Sedimentdaten des BSH

3. Eine Transportsortierung anzunehmen, d.h. auftretende Geschwindigkeiten mit charakteristischen Korndurchmessern zu korrelieren
4. Eine Anfangskornverteilung über eine zu erstellende Korrelationsbeziehung zwischen aufgetretenen Geschwindigkeiten und gemessenen Korndurchmessern zuzuweisen.

Die Verwendung der BSH-Daten ist problematisch, da die Daten über einen Zeitraum von 30 Jahren erhoben wurden, und an einigen Stellen erhebliche 'Ausreißer' aufweisen, wie zum Beispiel Daten, die seinerzeit in Rinnenbereichen erhoben wurden, heute aber in Wattbereichen liegen (vgl. **Abbildung 16**). Diese Ausreißer (schwarz umrandete weiße Flecken, die aus dem Skalierungsbereich herausfallen) werden bei einer Punktdichte von ca. einem Meßpunkt pro Quadratkilometer auf weite Bereiche ausgedehnt.

Bei einer solchen Anfangskornverteilung ist damit zu rechnen, daß das Modell erhebliche Anfangsumlagerungen prognostiziert, die nicht realitätsnah sind, da die vorgegebene Kornverteilung vermutlich nicht realitätsnah ist.

Eine zweite Möglichkeit besteht darin, das Modell aus einer anfangs über das gesamte Berechnungsgebiet gleichmäßigen Anfangskornverteilung, eine eigene Sortierung vornehmen zu lassen. Dies erfordert sehr viel Rechenzeit und wurde innerhalb der Projektarbeiten noch nicht durchgeführt.

Eine dritte Möglichkeit ist, einen analytischen Vorsortierungsmechanismus anzusetzen, das heißt, an Orten mit höheren auftretenden Geschwindigkeiten gröberes Sediment anzusetzen. Dies kann zum Beispiel über die Hjulstrom- oder die Shields-Kurve realisiert werden, die einen Zusammenhang zwischen Geschwindigkeit und Korndurchmesser herstellen. Ein auf solche Weise bestimmter charakteristischer

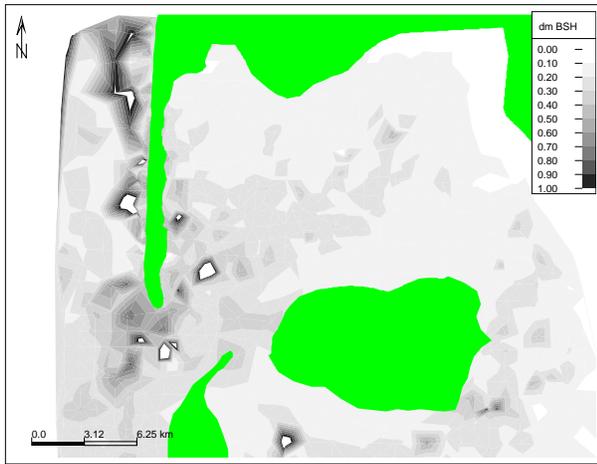


Abbildung 16: Mittlerer Korndurchmesser BSH

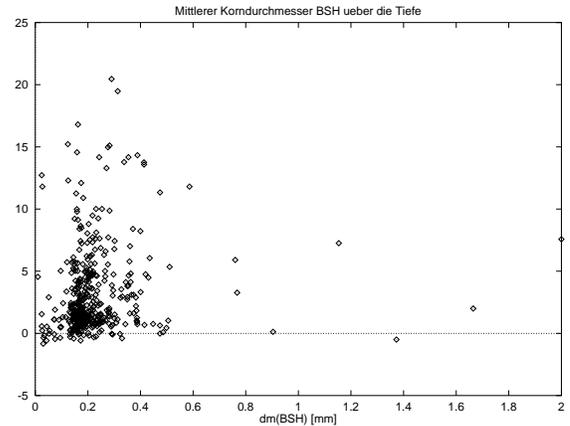


Abbildung 17: Mittlerer Korndurchmesser nach BSH-Daten über die Tiefe

Korndurchmesser, kann bei Annahme einer affinen Kornverteilung in eine Kornverteilung umgewandelt werden. Mehrere Kornverteilungen werden als affin bezeichnet, wenn das Verhältnis  $d_{50}/d_i$  immer etwa den gleichen Wert annimmt. Diese Verhältniswerte sind für Flachlandflüsse in Tabelle 2 angegeben und [25] entnommen.

$d_i$	$d_5$	$d_{20}$	$d_{30}$	$d_{50}$	$d_{70}$	$d_{80}$	$d_{95}$
Verhältnis $d_{50}/d_i$	0.6	0.85	0.9	1.0	1.2	1.3	2.2

Tabelle 2: Affine Kornverteilung in Flachlandflüsse aus [25]

## 4.5 Einfluß der Anfangskornverteilung

Die Anfangskornverteilung spielt für morphodynamische Rechnungen mit Transport in mehreren Kornklassen eine große Rolle. Häufig liegen jedoch nicht genügend Daten vor, um aus Messungen eine naturähnliche Anfangskornverteilung zu erzeugen.

### 4.5.1 Örtlich nicht differenzierte Anfangskornverteilung

Um den Einfluß einer örtlich nicht differenzierten Anfangskornverteilung aufzuzeigen werden 2 Rechnungen durchgeführt. Rechnung DM25 basiert auf einem mittleren Korndurchmesser von 0.25mm, wohingegen in Rechnung DM30 ein mittlerer Korndurchmesser von 0.3mm angesetzt wird. In beiden Rechnungen wird mit insgesamt 6 Kornklassen gerechnet. Diese Kornverteilungen korrespondieren mit Kornverteilungen wie sie in norddeutschen Tideflüssen auftreten.

In **Abbildung 18** und **Abbildung 19** sind die Änderungen des mittleren Korndurchmessers innerhalb des zweiten Berechnungsjahres dargestellt. In beiden Rechnungen wird deutlich, daß feines Material in den Prielen, weshalb dort der mittlere Korndurchmesser anwächst, erodiert wird und zum Teil auf

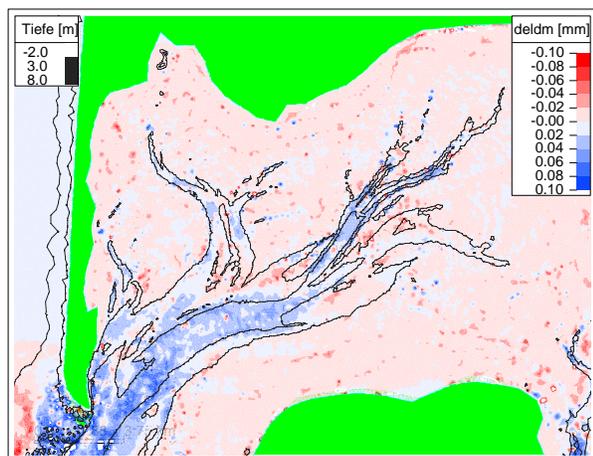


Abbildung 18: Änderungen des mittleren Korndurchmessers im zweiten Berechnungsjahr DM25

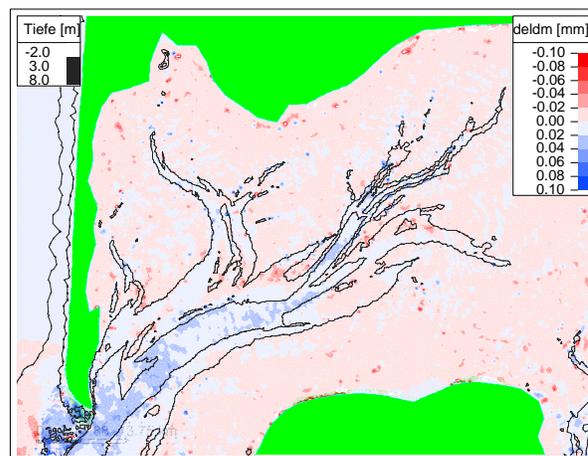


Abbildung 19: Änderungen des mittleren Korndurchmessers im zweiten Berechnungsjahr DM30

den Wattflächen sedimentiert, wo sich der mittlere Korndurchmesser verringert. Diese Erscheinung ist in DM25 weit ausgeprägter. Hier erhöht sich der mittlere Korndurchmesser um mehr als 0.1mm an der Südspitze Sylts. Die sich in beiden Rechnungen ergebenden Veränderungen sind nicht realitätsnah. Die Annahme einer örtlich nicht differenzierten Anfangskornverteilung muß daher als für die Ansprüche einer morphodynamischen Rechnung nicht ausreichende Annahme angesehen werden.

#### 4.5.2 Örtlich differenzierte Anfangskornverteilung

Mit einer örtlich differenzierten Anfangskornverteilung werden 2 Rechnungen durchgeführt. In Rechnung DATA werden Daten aus der Sedimentdatenbank des BSH zur Erzeugung einer Anfangskornverteilung verwendet. Die Daten werden über einen Zeitraum von 30 Jahren erhoben. Darüber wurde bereits im 1.Zwischenbericht berichtet. In Rechnung HJUL wird die Anfangskornverteilung mit einer im 1.Zwischenbericht beschriebenen Methode anhand von lokal auftretenden Geschwindigkeiten bestimmt. Wie in **Abbildung 20** und **Abbildung 21**, in denen die Tiefenänderungen dieser beiden Rechnungen dargestellt sind, zu erkennen ist, sind die sich ergebenden Tiefenänderungen in beiden Rechnungen sehr ähnlich. Die stärksten Veränderungen finden im Hörnumtief statt. Auf den Wattflächen ergeben sich nur sehr schwache Veränderungen. Schaut man sich die Veränderungen des mittleren Korndurchmessers nach 2 Berechnungsjahren an (**Abbildung 22** und **Abbildung 23**), so stellt man hier große Unterschiede fest, die in der Inhomogenität der Sedimentdaten begründet liegen. Während in Rechnung HJUL nur sehr schwache Umsortierungen stattfinden, ist der Umsortiervorgang in Rechnung DATA nach 2 Jahren noch nicht abgeschlossen. Die Rechnungen demonstrieren, daß es gut möglich ist, eine Anfangskornverteilung aufgrund von lokal auftretenden Geschwindigkeiten zu bestimmen. Die Berechnungsergebnisse unterscheiden sich bezüglich der Tiefenänderungen nur unwesentlich von denen, die unter Zugrundelegung einer Anfangskornverteilung nach BSH-Sedimentdaten

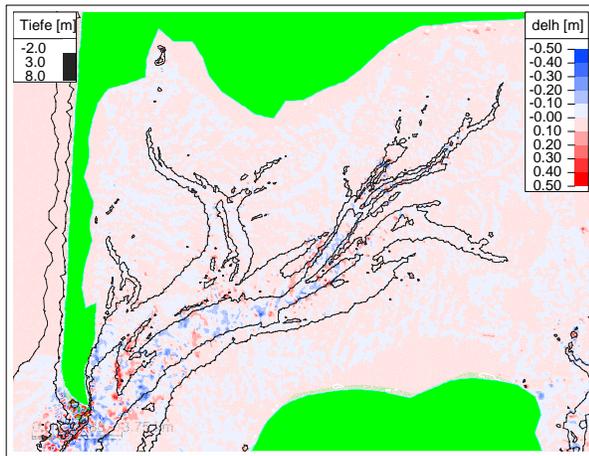


Abbildung 20: Tiefenänderungen innerhalb des zweiten Jahres DATA (rot:Sedimentation)

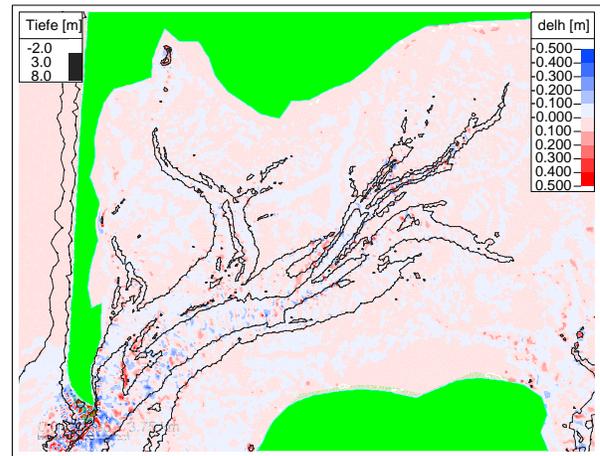


Abbildung 21: Tiefenänderungen innerhalb des zweiten Jahres HJUL (rot:Sedimentation)

berechnet werden. Örtlich kommt es sogar in Rechnung DATA zu starken Umlagerungen, die auf die Inhomogenitäten in der Anfangskornverteilung beruhen und die nicht naturähnlich sind.

Eine vierte Möglichkeit besteht darin, aufgetretene Geschwindigkeiten mit den vom BSH gemessenen Korndurchmessern zu korrelieren. Dadurch bekäme man die Ausreißer aus den gemessenen Daten. Eine solche Korrelationsbeziehung wurde zwischen den gemessenen mittleren Korndurchmessern und den aufgetretenen maximalen Geschwindigkeiten aufgestellt.

Sie lautet :  $d_m = 0.7445 * v_{max}^{1.6}$

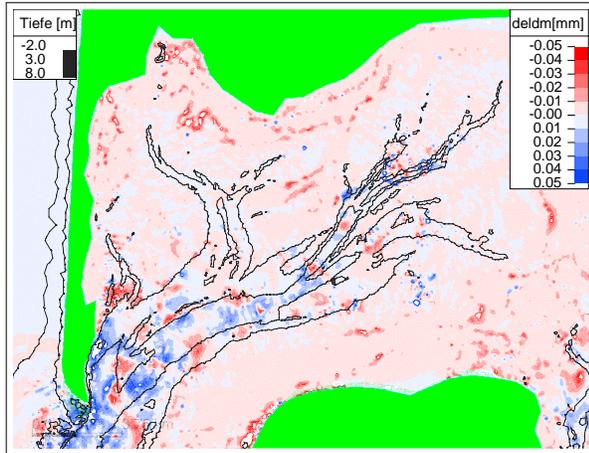


Abbildung 22: Änderungen des mittleren Korn-durchmessers innerhalb des zweiten Jahres DA-TA (rot:Verfeinerung)

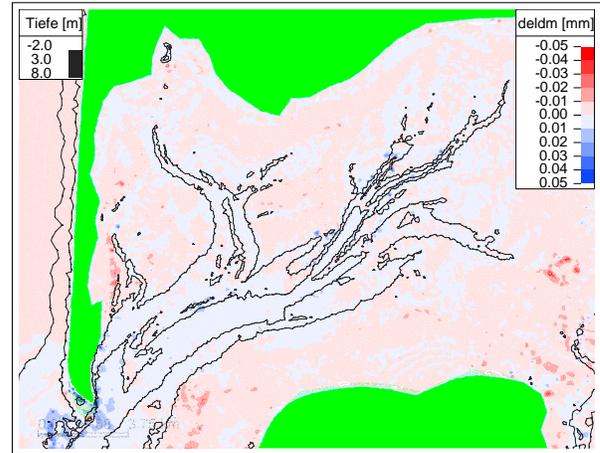


Abbildung 23: Änderungen des mittleren Korn-durchmessers innerhalb des zweiten Jahres HJUL (rot:Verfeinerung)

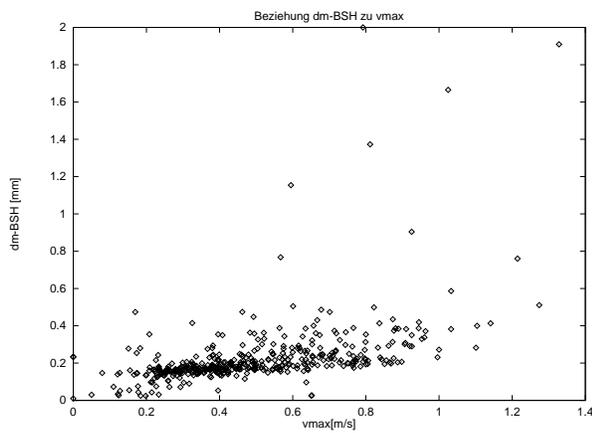


Abbildung 24: Korrelation  $d_m(\text{BSH})-v_{max}$

## 5 Morphodynamische Rechnungen ohne Seegang

### 5.1 Eingabefilterung

Für Langfristprognosen mit real-time-Modellen ist es unerlässlich, Eingabefilterung (Input-Filtering) zu vorzunehmen. Unter Eingabefilterung versteht man die Beschränkung der Eingangsgrößen auf die für den Untersuchungszweck relevanten [7], in diesem Falle also die Beschränkung auf verursachende Faktoren, die langfristig morphologisch bedeutsam sind. Obwohl die astronomische Tide deterministisch ist und genau berechnet werden kann, unterliegt sie signifikanten Modulationen in längeren Zyklen. Beispielfhaft seien hier nur der Spring-Nipp-Zyklus als eine Modulation mit einer wahrscheinlich starken morphologischen Wirkung und der Nodal-Zyklus, der sich über eine Periode von 18.2 Jahren erstreckt und damit zeitlich die längste Modulation darstellt, genannt. Solche langperiodischen Modulationen können in einem real-time-Modell nicht mit vertretbarem Aufwand repräsentiert werden. Das Filtern des Inputs im Hinblick auf morphodynamisch signifikante Prozesse bleibt daher unerlässlich. Insbesondere stellt sich die Frage, ob sich eine repräsentative, sogenannte morphologische Tide [11] finden läßt, die annähernd dieselben morphologischen Veränderungen bewirkt, wie die in der Natur auftretenden Zyklen.

Wenn eine solche Tide existiert und vor allem der Spring-Nipp-Zyklus als die morphodynamisch wahrscheinlich bedeutendste Modulation, repräsentiert werden kann, stellt sich die Frage, mit welchem morphologischen Zeitstreckungsfaktor man die Veränderungen dieser morphologischen Tide multiplizieren kann, um einen entsprechend längeren Zeitraum zu simulieren und ab welcher Größe des morphologischen Zeitstreckungsfaktors dieses Verfahren instabil wird und unrealistische Ergebnisse erbringt. Letzendlich verlaufen morphologische Veränderungen nicht linear, da Morphologie und Hydrodynamik in stetiger Rückkopplung stehen.

Somit stellen sich für tidedominierte Gebiete vor allem zwei Fragen:

- Welche einzelne Tide (oder Tidezyklen) charakterisiert aus morphologischer Sicht die natürlichen Tidezyklen am besten? In welcher Zeit wird mit dieser einzelnen Tide die minimale Volumenabweichung gegenüber einem Referenzzustand erreicht?
- Bis zu welchem Maß können die Berechnungsergebnisse mittels des morphologischen Zeitstreckungsfaktors extrapoliert werden?

#### 5.1.1 Bestimmung einer morphologischen Tide

Die Frage, welche einzelne Tide aus morphologischer Sicht den natürlichen Zyklus der Tiden am besten repräsentiert, wurde zuerst von Latteux [11] diskutiert. Latteux untersuchte, welche einzelne und welche Kombination von Tiden aus morphologischer Sicht die geringsten Abweichungen gegenüber einem Referenzzustand verursacht.

	< 0.75 $H_{rel}$	0.75-0.85 $H_{rel}$	0.85-0.95 $H_{rel}$	0.95-1.05 $H_{rel}$	1.05-1.15 $H_{rel}$	1.15-1.25 $H_{rel}$	> 1.25 $H_{rel}$
mittleres Jahr	0.05	0.09	0.18	0.28	0.26	0.09	0.03
ruhiges Jahr	0.03	0.07	0.21	0.34	0.25	0.08	0.02
stürmisches Jahr	0.08	0.09	0.16	0.24	0.25	0.12	0.06

Tabelle 3: Auftretenswahrscheinlichkeit  $f_i$  relativer Tidehubklassen für unterschiedliche Szenarien

Um eine vergleichbare Untersuchung für das Hörnumbecken durchzuführen, wird zuerst ein Referenzszenario definiert. Hierzu werden alle auftretenden Ereignisse in Klassen aufgeteilt und die dazugehörige Auftretenswahrscheinlichkeit bestimmt.

Für die Klasseneinteilung werden relative Tidehubklassen definiert:

$$H_{rel} = \frac{H}{H_m} \quad (1)$$

mit:

$H_{rel}$ : relativer Tidehub

H: Tidehub

$H_m$ : mittlerer Tidehub

Diese Größe wird gewählt, da die Tidestromgeschwindigkeiten (und damit der Sedimenttransport) stark vom Tidehub abhängen. Andererseits sollte eine zusätzliche Abhängigkeit vom Wasserstand (z.B. Windstau) bewußt vermieden werden, um die Untersuchung so vergleichbar und eingrenzbar wie möglich zu halten.

Zu diesem Zweck werden die Tidepegel Hörnum, List und Wittdün analysiert und in 7 relative Tidehubklassen mit einer Klassenbreite von  $0.1 \cdot MThb$  unterteilt, die symmetrisch um den mittleren Tidehub verteilt waren.

Folgende Szenarien werden gewählt:

- mittleres Jahr (1987-1996)
- ruhiges Jahr (1996)
- stürmisches Jahr (1990)

Die Häufigkeitsverteilung der einzelnen relativen Tidehubklassen für die unterschiedlichen Szenarien sind in der Tabelle 3 dargestellt.

Der Referenzzustand für jedes der drei Szenarien wird nun mit der Beziehung

$$\Delta h_{ref} = \sum_{i=1}^7 \Delta h_i f_i \quad (2)$$

berechnet. Hierin ist  $\Delta h_{ref}$  die Morphologieänderung an einem Knoten im Referenzzustand,  $\Delta h_i$  die Morphologieänderung an einem Knoten bei einer Rechnung mit der relativen Tidehubklasse  $i$  und  $f_i$  die Auftretenswahrscheinlichkeit der relativen Tidehubklasse  $i$ .

Die Referenzzustände stellen einen Vergleichszustand dar, mit dem die Rechnungen, die nur mit einer morphologischen Tide betrieben werden, verglichen werden. Ein solcher künstlicher Referenzzustand mußte herangezogen werden, da aus den Naturdaten kein zuverlässiger Referenzzustand generiert werden konnte.

Um zu beurteilen wie gut sich eine Rechnung mit nur einer einzelnen Tide an den Referenzzustand annähert, werden drei Parameter bestimmt:

- Volumenabweichung (quantitativer Fehler):

$$\Delta V_{rel} = \sum_{i=1}^n \frac{A_i * |\Delta h_i - \Delta h_{ref,i}|}{\sum (A_i * \Delta h_{ref,i})} \quad (3)$$

Hierin ist  $\Delta V_{rel}$  die Volumenabweichung und  $A_i$  die zu einem Knoten zugehörige Fläche.

- Pattern error (qualitativer Fehler): Anteil der Fläche mit qualitativ falscher Berechnung (Sedimentation anstatt Erosion und umgekehrt)
- Zeitfaktor zum Erreichen des minimalen Volumenfehlers

Die Ergebnisse sind in den **Abbildungen 25 und 26** dargestellt.

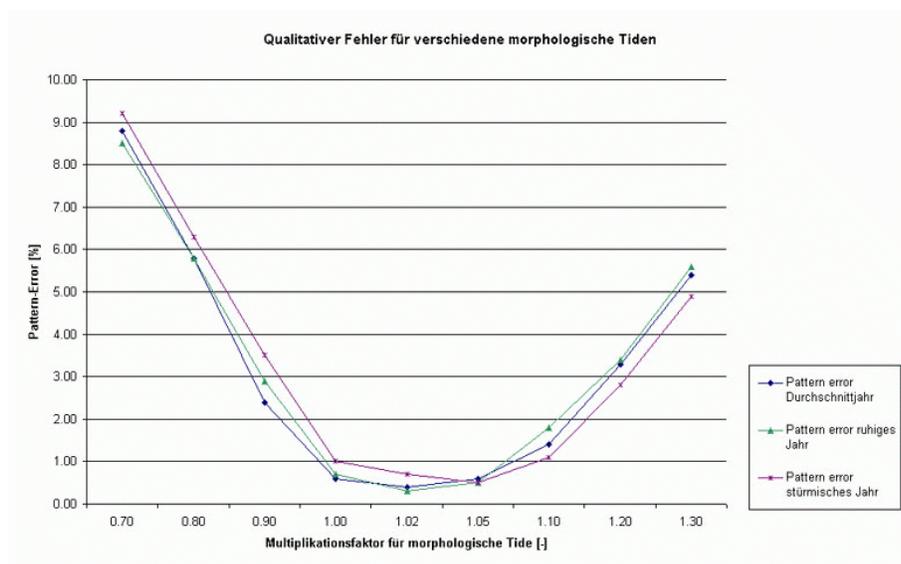


Abbildung 25: Qualitativer Fehler verschiedener morphologischer Tiden

Sowohl für das mittlere Jahr als auch für das ruhige Jahr werden die besten Ergebnisse mit der gegenüber der mittleren Tide um 2 % erhöhten Tide erzielt. Der qualitative Fehler liegt hier unter 0.4

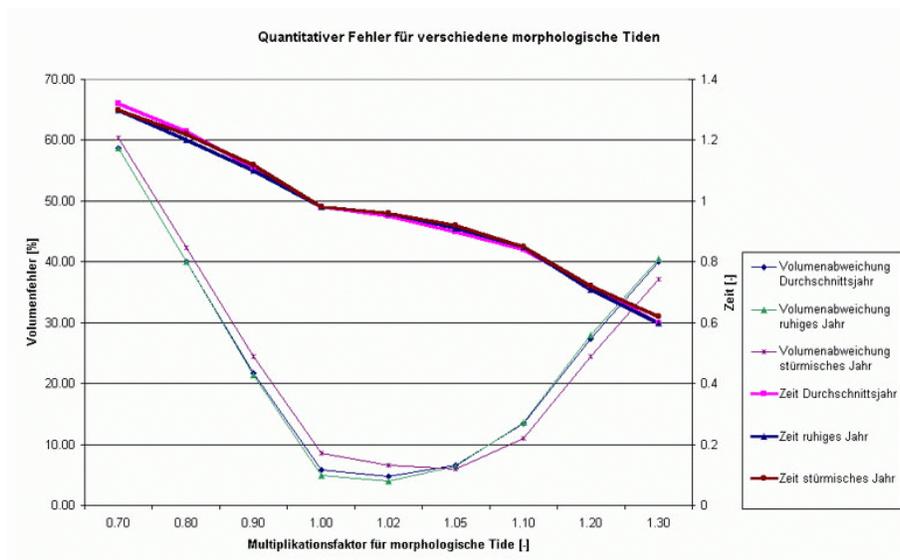


Abbildung 26: Quantitativer Fehler verschiedener morphologischer Tiden

% und der Volumenfehler bei unter 5 %. Die Zeit zum Erreichen der minimalen Volumenabweichung beträgt 95 % der berechneten Zeit für das Durchschnittsjahr und 96 % der Zeit für das ruhige Jahr. Für das stürmische Jahr werden die besten Ergebnisse mit der gegenüber der mittleren Tide um 5 % erhöhten Tide erreicht. Der Volumenfehler erreicht hier mit 6 % einen etwas höheren Wert. Dies ist allerdings zu erwarten, da bei einer höheren Varianz der Tidehübe die Ergebnisse weit gestreuter sind. Außerdem werden weitere Teile des Beckens überflutet. Die Zeit zum Erreichen der minimalen Volumenabweichung beträgt hier 92 %.

### 5.1.2 Bestimmung des morphologischen Zeitstreckungsfaktors

Der morphologische Zeitstreckungsfaktor stellt ein wesentliches Element dar, um die Rechenzeit für morphologische Langfristprognosen zu verkürzen. Die in einem Rechenzeitschritt auftretenden morphologischen Veränderungen werden mit dem morphologischen Zeitstreckungsfaktor multipliziert und dadurch die Morphologieänderungen simuliert, die in einer Zeit, die um den morphologischen Zeitstreckungsfaktor gedehnt ist, aufgetreten wären.

Um den Einfluß unterschiedlicher morphologischer Zeitstreckungsfaktoren zu untersuchen, werden 2 Rechnungen durchgeführt:

- FAK10 verwendet einen morphologischen Zeitstreckungsfaktor von 10
- FAK70 verwendet einen morphologischen Zeitstreckungsfaktor von 70

Die Rechnungen FAK10 und FAK70 werden mit einer mittleren Tide betrieben. Diese wird über ein übergeordnetes Modell (Deutsche-Bucht-Modell) eingesteuert. Die Anfangskornverteilung wird mit der in Kapitel 4.5 beschriebenen Methode aufgrund von lokal auftretenden Geschwindigkeiten zugewiesen.

In **Abbildung 27** sind die Tiefenänderungen, die in Rechnung FAK10 nach einem halben Jahr auftreten, dargestellt.

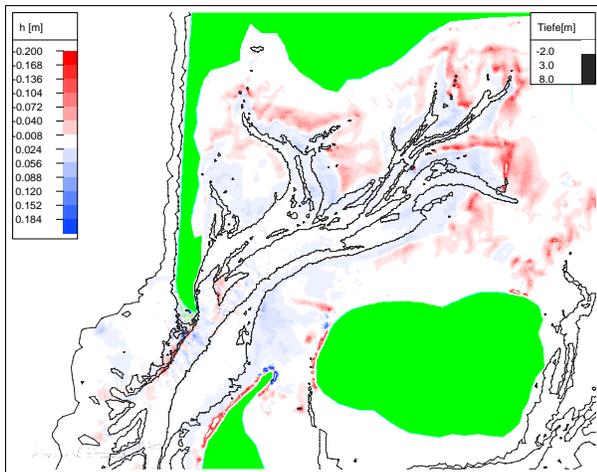


Abbildung 27: Tiefenänderungen nach einem halben Jahr FAK10 (rot:Sedimentation)

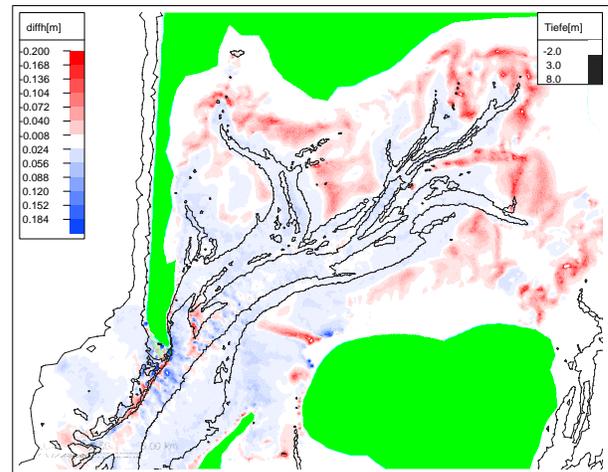


Abbildung 28: Tiefenänderungen nach einem halben Jahr FAK70 (rot:Sedimentation)

In **Abbildung 28**, die Tiefenänderungen nach einem halben Jahr in Rechnung FAK70 darstellt, sind ähnliche Sedimentationsmuster wie in Rechnung FAK10 zu erkennen.

Im allgemeinen sind die morphologischen Veränderungen in Rechnung FAK70 etwas stärker als in FAK10. Ursache hierfür ist, daß im Vergleich zu FAK10 nur 5 gerechnete Tiden berücksichtigt werden. Obwohl schon ein halbes Jahr angerechnet wurde, damit aus Interpolation und ungenauer Vermessung

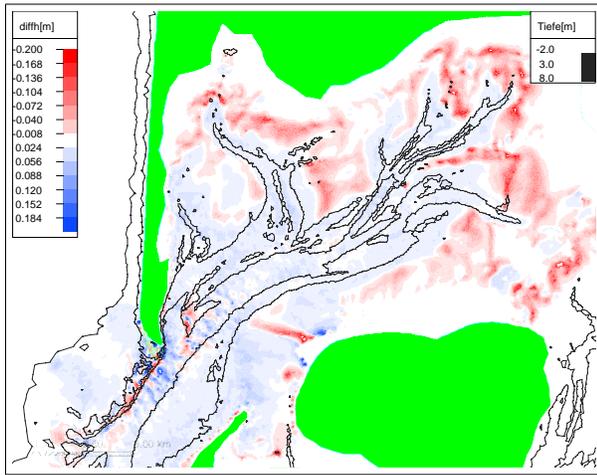


Abbildung 29: Tiefenänderungen innerhalb eines halben Jahres nach 3 Jahren Rechnung FAK70 (rot:Sedimentation)

herrührende Unregelmäßigkeiten geglättet werden, ist die Topographie zu Berechnungsanfang noch nicht vollkommen geglättet und dem natürlichen Zustand angepaßt. Dadurch sind die morphologischen Veränderungen zu Berechnungsbeginn stärker als gegen Ende der Berechnung. Dies verdeutlicht **Abbildung 29**, in der die Tiefenänderungen innerhalb eines halben Jahres nach 3 Berechnungsjahren dargestellt sind.

Da die im Hörnumbecken auftretenden morphologischen Veränderungen generell sehr gering sind, gewinnt der Effekt der Anfangsumlagerungen an Bedeutung. Es ist zu vermuten, daß er in Gebieten mit höherer morphologischer Aktivität eine entsprechend geringere Rolle spielt.

Es ist daher wahrscheinlich, daß unter Vorgabe eines sich in der Nähe eines dynamischen Gleichgewichts befindenden Systems, eine Variation des morphologischen Zeitstreckungsfaktors zu vergleichbaren Resultaten führt. Allerdings ist das am Projektgebiet Hörnumbecken sehr schwer nachzuweisen, da hier nur ein sehr schwaches morphodynamisches Signal existiert. Morphologische Veränderungen von maximal 20cm in einem halben Jahr liegen innerhalb der Meßgenauigkeit.

Generell läßt sich sagen, daß das Verfahren zur Extrapolation von Berechnungsergebnissen gut anwendbar ist. Die Größe des morphologischen Zeitstreckungsfaktors hängt dabei stark von der maximal im Gebiet auftretenden Umlagerungshöhe ab. Somit läßt sich keine allgemeingültige Größe angeben, da diese unter anderem von der Wahl der Randbedingungen (Springtide oder mittlere Tide), aber auch von der Wahl der Anfangskornverteilung abhängt. Später wird gezeigt werden, daß bei Berücksichtigung des Seegangs aufgrund der wesentlich höheren Umlagerungen, der morphologische Zeitstreckungsfaktor wesentlich kleiner gewählt werden muß.

## 5.2 Abschließender Rechenlauf ohne Seegang

Es wird eine abschließende Rechnung durchgeführt. Diese verwendet einen Spring-Nipp-Zyklus als Wasserstandsrandbedingung, die über 8 Tiden mit einem morphologischen Zeitstreckungsfaktor von 8.75 simuliert wird. Nach einem durchlaufenen Spring-Nipp-Zyklus sind mithin morphodynamisch  $8 \cdot 8.75 = 70$  Tiden durchlaufen.

Die berechneten Morphologieänderungen werden nach einem halben Berechnungsjahr diskutiert, da Rechnungen ohne Berücksichtigung des Seegangs nur naturähnliche Ergebnisse für ruhigere Perioden erbringen, und diese im Jahr nicht länger als ein halbes Jahr angesetzt werden können.

In **Abbildung 30** sind die Tiefenänderungen innerhalb eines halben Jahres mit Spring-Nipp-Zyklus dargestellt. Die sich ausbildenden morphologischen Strukturen gleichen denen der Rechnungen FAK 10 und FAK 70. Hier treten etwas stärkere Sedimentationen an den Prielrändern und -enden auf. Insgesamt halten sich die Tiefenänderungen in einem sehr beschränkten Rahmen: Sie übersteigen 20cm in einem halben Jahr nur selten.

Das Material für diese Umlagerungen ist überwiegend Feinkornmaterial, wie später noch gezeigt werden wird. Es stammt aus den Erosionsbereichen in direkter Nachbarschaft der Sedimentationsflächen. In diesen Bereichen liegen zu Beginn der Berechnung geringe Anteile an Feinkornmaterial vor, die dann im Lauf der Rechnung ausgetragen werden. Die Feinkornfraktion wird innerhalb der Rechnung durch die Korngröße 0.08mm abgebildet.

Es lassen sich Sedimentationen insbesondere an den Prielrändern und -enden ausmachen. Die Prielbereiche unterliegen einer leichten Erosion.

Östlich des Eidumtiefs ist eine Sedimentation von ca. 10cm auszumachen. Sie fällt auch flächenmäßig größer aus als am Westufer. Weiterhin tritt eine Sedimentation, die in etwa derselben Größenordnung liegt, im Norden und Osten der Priele Wester- und Osterley auf. Auch an den Watthöhenscheiden über der Föhrer Schulter und zwischen Hörnumtief und Osterley kommt es zu Sedimentationserscheinungen. Weiterhin findet ein leichter Sedimenteintrag am Nordwestufer des Hörnumtiefs südlich von Sylt statt.

Erosionen finden in der unmittelbaren Nachbarschaft der Sedimentationsflächen statt. Die Erosion im Hörnumtief ist hier etwas ausgeprägter als in den beiden vorgenannten Rechnungen. Es ist eine leichte Sedimentation von 10cm am Ostufer des Eidumtiefs auszumachen. Die Rinnen werden leicht erodiert. Insgesamt halten sich die Tiefenänderungen in einem sehr beschränkten Rahmen: Sie übersteigen 20cm in einem halben Jahr nur selten.

Auffällig ist die starke Sedimentation in einem schmalen Bereich nordwestlich von Föhr. Sie trat auch schon in schwächerem Maße in Rechnung FAK10 auf. Die Ursache hierfür ist eine kleine lokale Vertiefung, die auf einen Sielauslaßkanal [15] zurückzuführen ist. Da dieser in der Berechnung nicht berücksichtigt wurde, versandet dieser Bereich.

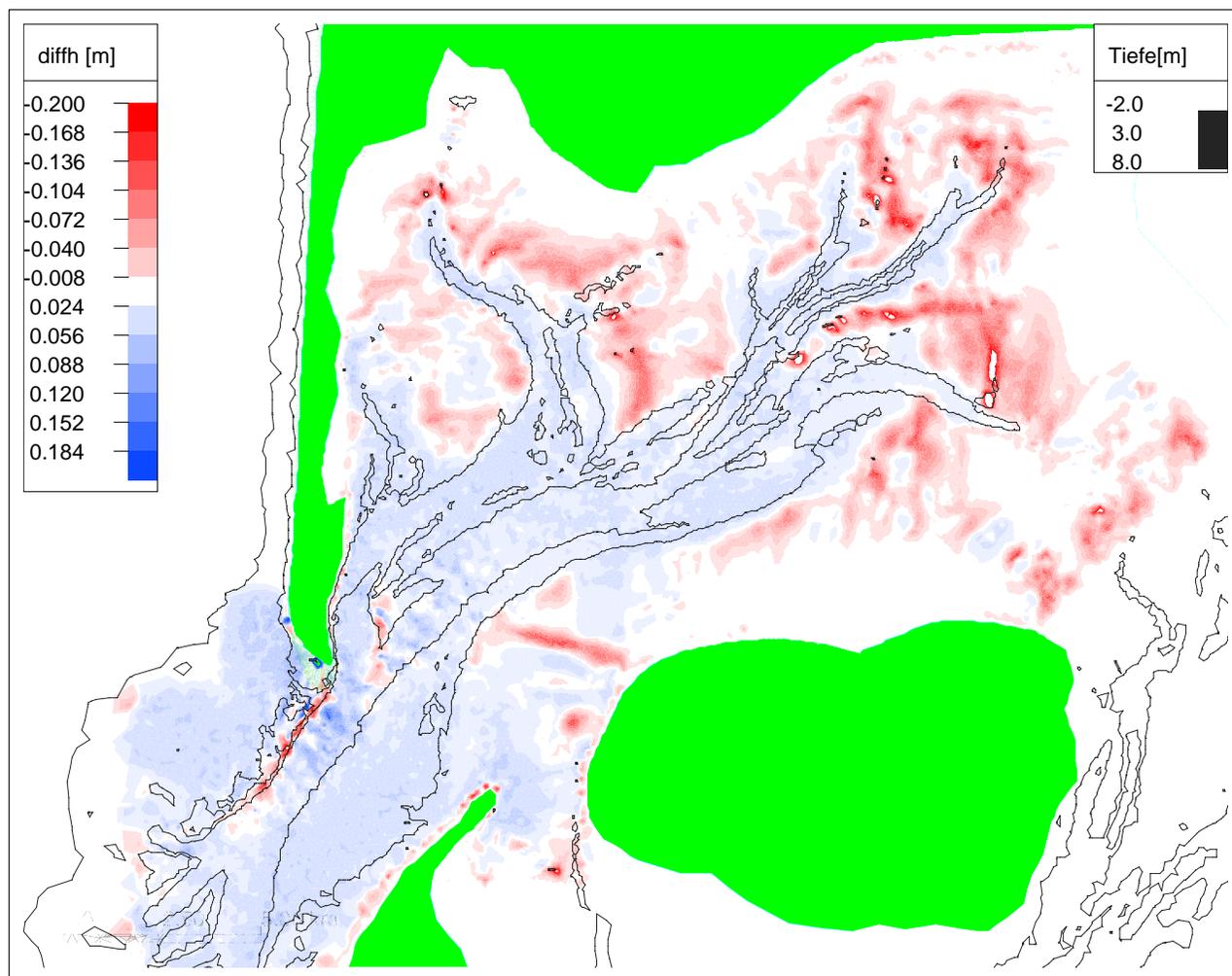


Abbildung 30: Tiefenänderungen nach einem halben Jahr Spring-Nipp (rot:Sedimentation)

Das sedimentierende Material ist Feinkornmaterial, wie es in **Abbildung 31** zu erkennen ist. Hier sind die Änderungen des Feinkornanteils 0.08mm in der obersten Bodenschicht dargestellt.

Überall dort, wo Sedimentation stattfindet steigt der Anteil der Feinkornfraktion 0.08mm. Auch die Versandung des Sielauslaßkanals nordwestlich von Föhr ist auf diese Fraktion zurückzuführen.

Die Sedimentation von feinem Material auf Wattflächen bei ruhiger See steht in guter Übereinstimmung mit genommenen Wattprofilen vom Senckenberg-Institut Wilhelmshaven [18], wie sie beispielhaft in **Abbildung 32** zu erkennen ist. In dieser Abbildung ist die Sedimentation von feinem Material nach jedem Flutereignis zu erkennen.

Die stärkere Deposition korrespondiert mit stärkerem Sedimenttransport während Springtide. In den Ablagerungsringen ist genauso wie in den vom Modell abgebildeten Sedimentationserscheinungen der Spring-Nipp-Zyklus zu erkennen.

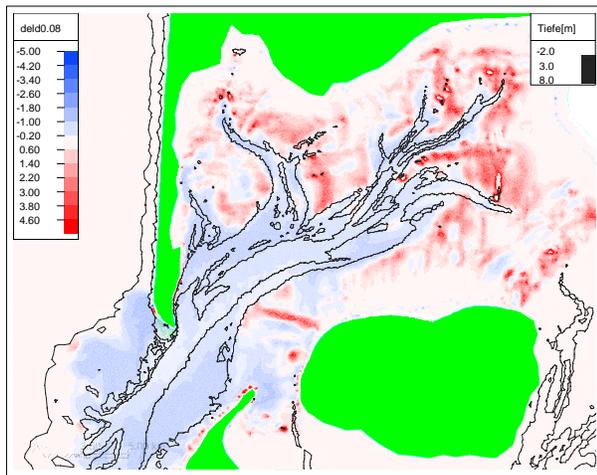


Abbildung 31: Änderungen des Anteils der Kornfraktion 0.08mm nach einem halben Jahr Spring-Nipp

Für drei exemplarische Knoten ist der Anwachs der Feinkornfraktion 0.08mm, die aus der in das Gebiet strömenden Feinkornfraktion stammt, in **Abbildung 33** dargestellt.

Knoten 20059 liegt am Ostufer des Eidumtiefs, Knoten 24335 östlich des Osterleys und Knoten 18958 nördlich des Hörnumtiefs zwischen Hörnumtief und Osterley.

In der Abbildung ist der Spring-Nipp-Zyklus gut zu erkennen: Stärkere Umlagerungen korrespondieren mit Springtide, schwächere entsprechend mit Nipptiden.

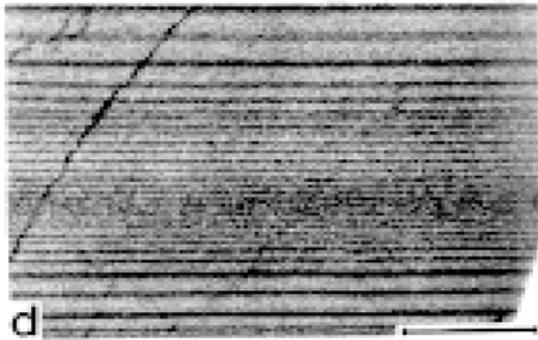


Abbildung 32: Sedimentation auf Wattflächen innerhalb eines Spring-Nipp-Zyklusses

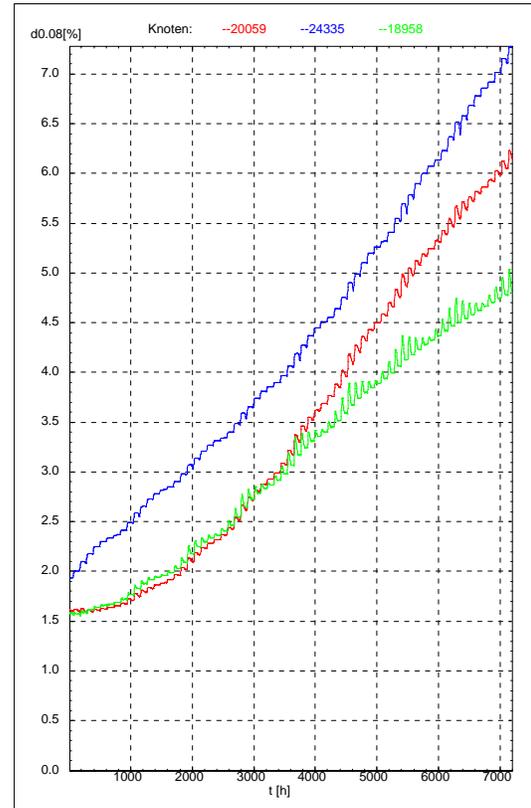


Abbildung 33: Entwicklung des Anteils der Kornfraktion 0.08mm an einigen exemplarischen Knoten SPRNIP (Die Schwankungen korrespondieren mit gerechneten Tiden, die Zeitachse enthält den morphologischen Zeitstreckungsfaktor)

### 5.3 Prinzipstudie an einem künstlich verkleinerten Tidebecken

Im folgenden wird eine Prinzipstudie vorgestellt, deren Zweck es war, zu demonstrieren, ob das Modell TIMOR Sedimentationserscheinungen nach Verkleinerung eines Tidebeckens nachbilden kann. Dies war eine der Grundfragen in der Projektkonzeption und konnte aufgrund der weiter vorne geschilderten Datenlage anhand von Naturdaten nicht nachvollzogen werden. Aus diesem Grund wird das Hörnumbecken durch einen fiktiven Damm um ca. 25% seiner Fläche verkleinert. Insbesondere sollten die folgenden Fragen beantwortet werden:

- Kann das Modell die aus der Literatur [16] und [13] bekannten Sedimentationserscheinungen in verkleinerten Tidebecken prinzipiell nachbilden?
- Welches Material wird für die Sedimentationen verwendet?

In der Modellrechnung werden zusätzliche Bodenschubspannungen aus der Wellenorbitalbewegung einer Welle mit  $H=0.4\text{m}$  und  $T=3\text{s}$  berücksichtigt [23]. Der Reibungskoeffizient wird nach SWART [22] bestimmt.

Außerdem wird mit einem Eintrag von Feinschwebstoffen von  $2 \cdot 10^{-11}$  m Feststoff pro m Wassersäule gerechnet. Die biogene Produktion, also insbesondere Stoffwechselprodukte von Herzmuschel (*cardium edule*) und Sandpierzurm (*arenicola marina*) sind eine wesentliche Quelle des sedimentierenden Materials [8]. Die biogene Produktion wird derzeit im Modell durch eine gleichmäßig verteilte Sedimentquelle berücksichtigt.

Die Reaktion des Gebiets ist in **Abbildung 34** dargestellt.

Auffallend sind starke Sedimentationserscheinungen in den tieferen Bereichen in Dammnähe und eine in immer flachere Bereiche reichende Sedimentation am Südufer des Hörnumtiefs. Dieser ist durch die künstliche Verkleinerung besonders betroffen. Der nordwestliche Teil des Beckens reagiert nur sehr schwach auf die Verkleinerung. Er ist auch weit weniger davon betroffen. Doch auch hier lassen sich im Endbereich des Eidumtiefs Sedimentationserscheinungen ausmachen. Die maximalen Tiefenänderungen betragen 40cm in 2 Monaten, also in etwa das zehnfache der morphologischen Veränderungen im unbeeinflussten System. Das sedimentierende Material stammt überwiegend aus den ins Gebiet strömenden Feinschwebstoffen. Dies ist eine Beobachtung, die in Übereinstimmung mit Bohrkernen aus der unmittelbaren Nähe des Hindenburgdamms [2] und Beobachtungen aus der Dithmarscher Bucht [8] steht. Ein kleinerer Teil des sedimentierenden Materials stammt aus Erosionsbereichen der Wattflächen. Die örtlich nicht differenzierte Vorgabe von 0.4m Wellenhöhe dürfte hier lokal nicht zutreffend sein und in der Modellrechnung Erosion verursacht haben.

Wie in **Abbildung 35**, einem Schnitt nahe des fiktiven Damms zu erkennen ist, prognostiziert das Modell die stärksten Sedimentationen in den tiefsten Bereichen.

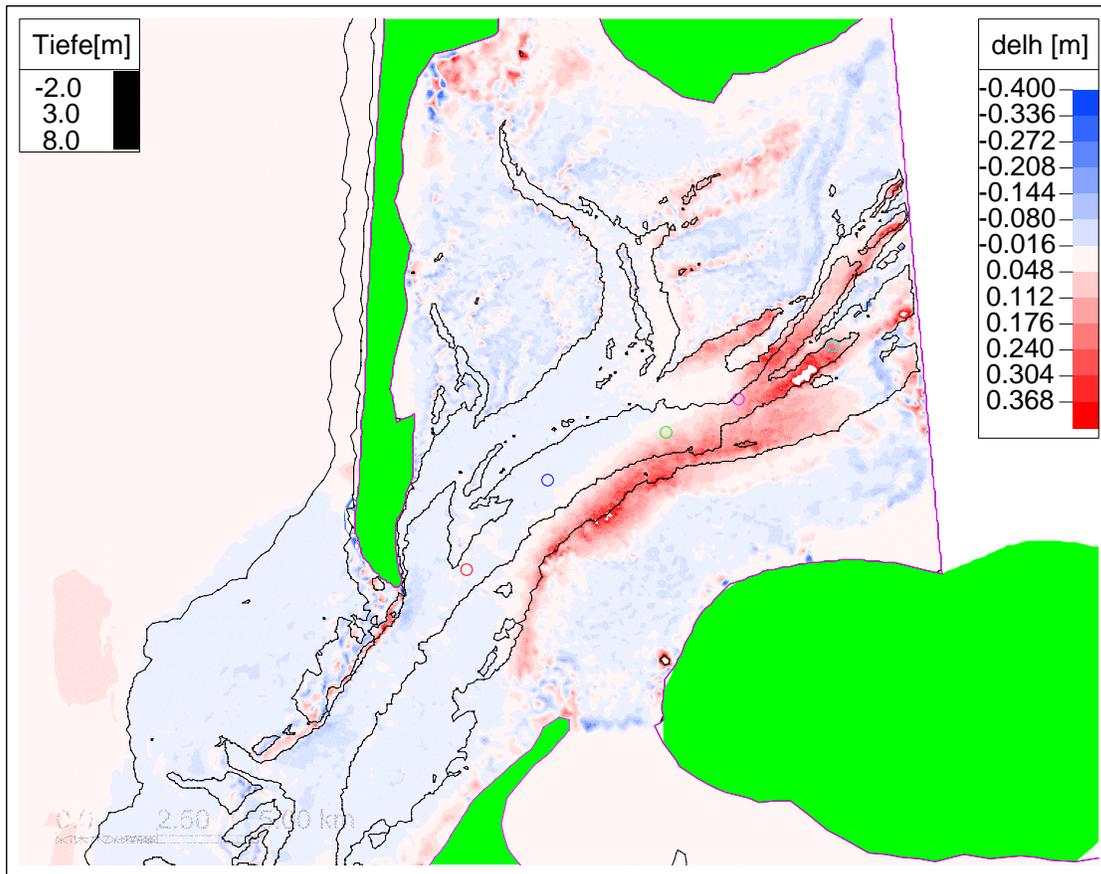


Abbildung 34: Tiefenänderungen im künstlich verkleinerten Tidebecken nach 120 Tiden (rot:Sedimentation), mit Lage der Knoten 13927, 16969, 18616, 19826 und 21885 (sh. Abbildungen 37 und 38)

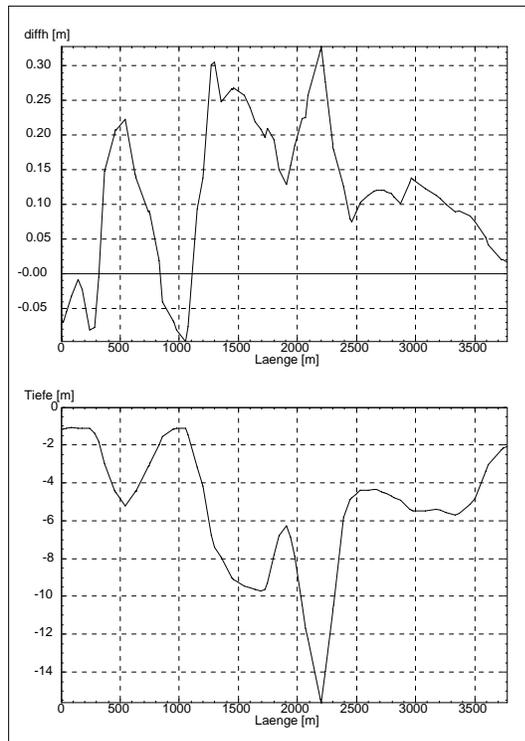


Abbildung 35: Tiefenänderungen in einem Schnitt in der Nähe des fiktiven Damms

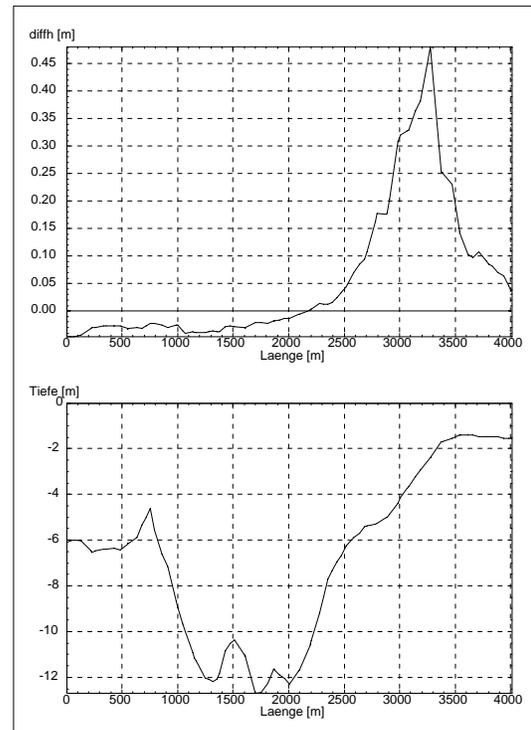


Abbildung 36: Tiefenänderungen in einem Schnitt im Zentralbereich des Hörnumbeckens

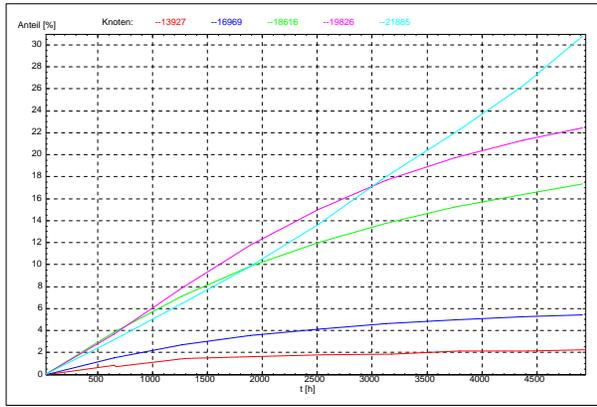


Abbildung 37: Entwicklung der Feinkornfraktion 0.08mm an einigen exemplarischen Knoten (Schwebstoffeintrag= $5 \cdot 10^{-10}$  m Feststoff/(m Wassersäule · s))

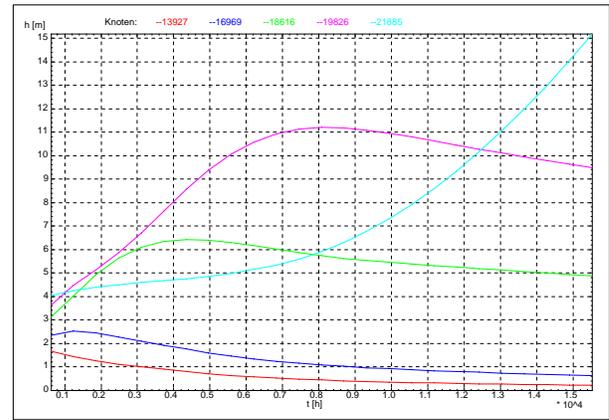


Abbildung 38: Entwicklung der Feinkornfraktion 0.08mm an einigen exemplarischen Knoten (Schwebstoffeintrag= $1 \cdot 10^{-11}$  m Feststoff/(m Wassersäule · s))

Die Rinnen werden verfüllt. In relativ hoch gelegenen Gebieten kommt es sogar zu leichten Erosionen. Diese sind vornehmlich auf die Seegangswirkung zurückzuführen. Die örtlich nicht differenzierten Wellenhöhen von 0.4m dürften in flacheren Wattbereichen zu hoch sein und bewirken eine Erosion. Demgegenüber finden in einem Schnitt im Zentralbereich des Hörnumbeckens, der in **Abbildung 36** dargestellt ist, die Sedimentationen vom Ufer her statt. Der Priel verschmälert sich und verringert dadurch seinen Querschnitt.

Entscheidend für die Intensität der Sedimentation ist jedoch die Vorgabe der biogenen Schlickproduktion. Sie wird im Modell derzeit noch als ein bestimmtes Volumen pro Meter Wassersäule und Sekunde vorgegeben. Die Entwicklung der Kornfraktion, die aus der biogenen Produktion stammt, ist für zwei verschiedene Schlickproduktionsraten an 5 exemplarischen Knoten im Hörnum Becken dargestellt. Die Knoten liegen in etwa gleichen Abständen von West nach Ost im Hörnumtief verteilt.

Während die Knoten 13927 und 16969 bereits relativ früh einen Gleichgewichtsanteil in der obersten Bodenschicht erreicht haben, steigt dieser an den restlichen, weiter ostwärts gelegenen Knoten länger und auf höhere Werte an. Zu berücksichtigen ist, daß in **Abbildung 37** nur 4500 Stunden, also ca. ein halbes Jahr, dargestellt sind, wohingegen in **Abbildung 38** die Entwicklung über fast 2 Jahre dargestellt ist. Knoten 21885 erreicht bei einem Schwebstoffeintrag von  $5 \cdot 10^{-10}$  m Feststoff pro Meter Wassersäule bereits nach 3000 Stunden im Vergleich mit den anderen Knoten den höchsten Anteil an Schlick, während es bei einem Schwebstoffeintrag von  $1 \cdot 10^{-11}$  m Feststoff pro Meter Wassersäule 13000 Stunden dauert bis an diesem Knoten der höchste Anteil vorliegt. Die Entwicklungen des Anteils der biogenen Schlickfraktion unterscheiden sich je nach Vorgabe eines bestimmten Schwebstoffeintrags sowohl in ihrer Stärke als auch in der zeitlichen Entwicklung ihres Anteils. Der Vorgabe des Schwebstoffeintrags kommt somit besondere Bedeutung zu.

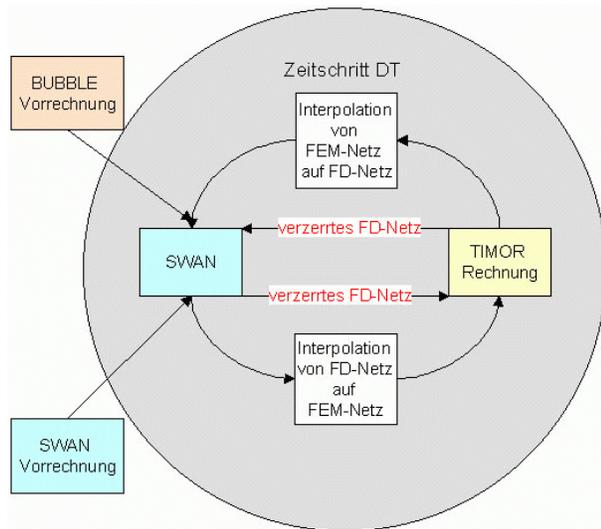


Abbildung 39: Interpolation zwischen TIMOR und SWAN

## 6 Seegangmodell SWAN

### 6.1 Seegangmodell SWAN und seine Kopplung mit TIMOR

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde eine instationäre Kopplung zwischen dem spektralen Wellenenergiemodell SWAN und dem morphodynamischen Modell TIMOR hergestellt.

Die Kopplung stellt aus Sicht der Modellierung einen zentralen Schritt des Forschungsvorhabens dar, weil es dadurch möglich wurde, den Einfluß des Seegangs auf die Morphodynamik des Tidebeckens zu berücksichtigen.

Die Kopplung ist in den folgenden **Abbildungen 39 und 40** dargestellt.

Innerhalb eines zu wählenden Zeitschrittes  $DT$  werden die Berechnungsergebnisse des Finite-Differenzen-Netzes (FD) Modells SWAN auf das Finite-Element (FE) Netz von TIMOR interpoliert. Das gleiche geschieht in umgekehrter Weise mit den Ergebnissen von TIMOR.

SWAN übergibt berechnete Radiation-Stress-Gradienten an das hydrodynamische Modul von TIMOR. Gleichzeitig werden Bodenorbitalgeschwindigkeit, signifikante Wellenhöhe und Peak-Periode an das Morphodynamik-Modul zur Bestimmung der Sedimentaufwirbelung übergeben. Von TIMOR werden wiederum Wasserstand und Strömung an SWAN übergeben, die sich auf das Wellenfeld auswirken.

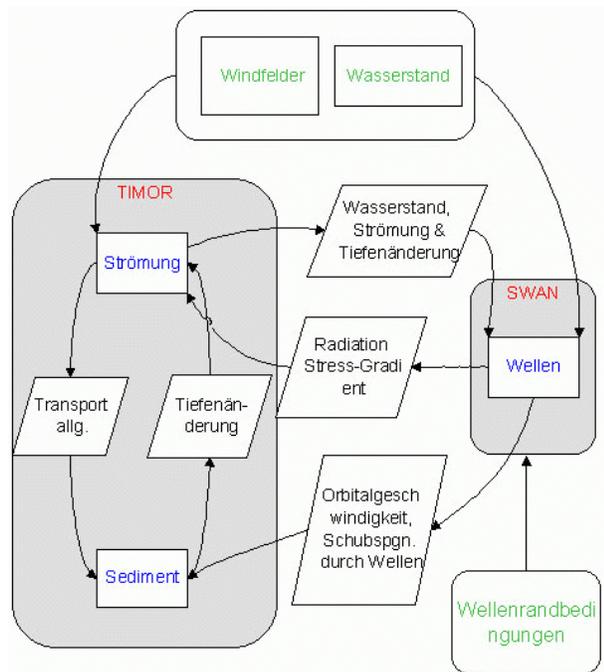


Abbildung 40: Kopplungsschema zwischen TIMOR und SWAN

Die im Modell berücksichtigte zusätzliche Schubspannung durch Wellenwirkung berechnet sich nach einem Ansatz von van Rijn [23] folgendermaßen:

$$\tau'_W = \tau_W * \mu_{W,A} \quad (4)$$

$$\tau_W = \frac{1}{4} \rho f_W \hat{U}_\delta^2 \quad (5)$$

$$f_W = e^{[-6 + 5.2(\text{frac} \hat{A}_\delta k_{SW})^{-0.19}] } \quad (6)$$

$$\mu_{W,A} = \frac{0.6}{D^*} \quad (7)$$

$$D^* = d_{50} \left[ \frac{(S-1)}{g\nu^2} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (8)$$

$$\hat{A}_\delta = \frac{H_s}{2 \sinh\left(\frac{2\pi h}{L}\right)} \quad (9)$$

mit:

$\tau'_W$ : resultierende zusätzliche Schubspannung durch Wellenwirkung,  $\tau_W$ : zusätzliche Schubspannung durch Wellenwirkung,  $\mu_{W,A}$ : Efficiency factor,  $f_W$ : Reibungsfaktor,  $D^*$ : Kornparameter,  $\hat{A}_\delta$ : Auslenkung,  $\hat{U}_\delta$ : Bodenorbitalgeschwindigkeit,  $k_{SW}$ : Bodenrauheit,  $\nu$ : kinematische Viskosität,  $H_s$ : signifikante Wellenhöhe,  $h$ : Wassertiefe,  $L$ : Wellenlänge

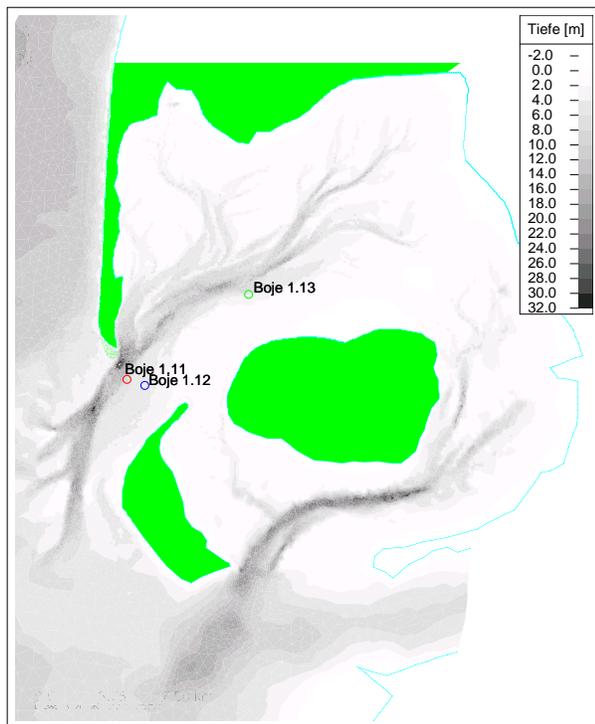


Abbildung 41: Lage der Bojen im Hörnumbecken

## 6.2 Anwendung des Seegangsmodells SWAN auf das Hörnumbecken

Bei der Anwendung des Seegangsmodells SWAN auf das Hörnumbecken ging es um die Frage, mit welchen physikalischen Parametern das Modell für das Hörnumbecken zu betreiben ist. Dabei sollte ein Parameterdatensatz gefunden werden, mit dem ein möglichst weites Feld an auftretenden Situationen abgedeckt werden kann.

Zur Kalibrierung Seegangsmessdaten zum Einsatz, die im KFKI-Projekt *Der Wasseraustausch im Tidebecken Hörnumtief* erhoben wurden. Es standen von 3 Meßstationen Wellenparameter für die Frühjahrsperiode 1996 und die Herbstperiode 1996 zur Verfügung. Die Lage der Meßstellen ist in **Abbildung 41** dargestellt. Bei der Boje 1.11 handelt es sich um eine Richtungsmeßboje, die Stationen 1.12 und 1.13 sind Seegangsmessdrähte.

Zuerst werden quasistationäre Ereignisse gesucht, um den Einfluß der Instationarität möglichst weit auszuschalten. Exemplarisch werden hier zwei Ereignisse näher beschrieben werden:

- lokaler Seegang: 19.9.96 mit 9.2m/s aus Ost ( $92^\circ$ )
- dünungsgeprägter Seegang: 3.10.96 - 5.10.96; 15.0m/s aus SSW ( $204^\circ$ )

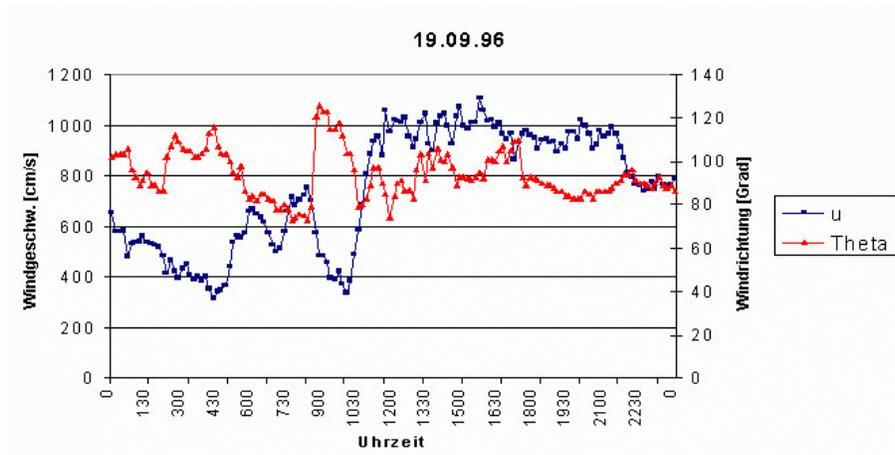


Abbildung 42: Windsituation 19.9.96

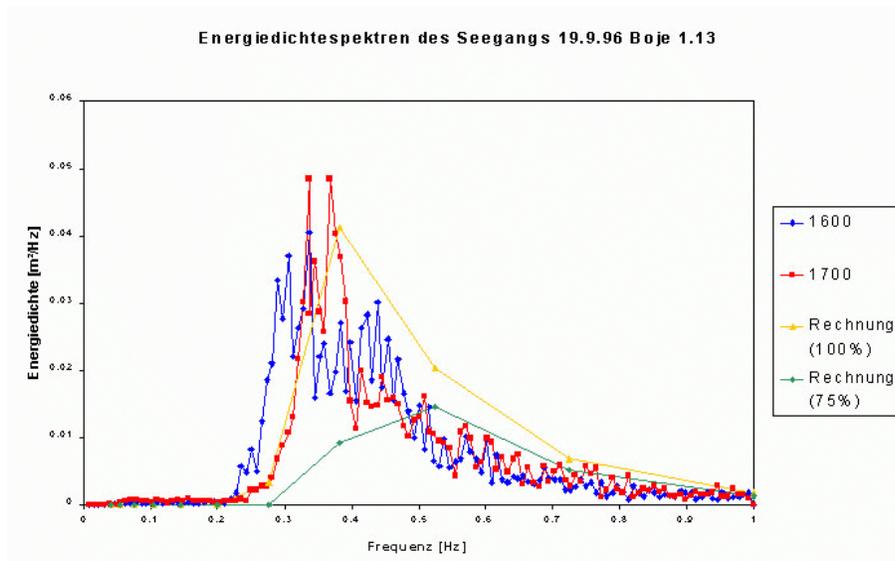


Abbildung 43: Berechnetes und gemessenes Spektrum Boje 1.13

### 6.2.1 Seegangereignis 19.09.96

In **Abbildung 42** sind die Windgeschwindigkeit und -richtung für den 19.09.96 dargestellt. Deutlich zu erkennen ist ein Anstieg der Windgeschwindigkeit von 4m/s auf 10m/s, wobei der Wind von Südost auf Ost drehte. Von 12 bis 22 Uhr bleiben Windgeschwindigkeit und -richtung ungefähr konstant.

Das gemessene und berechnete Spektrum für die lokale Boje 1.13 ist in **Abbildung 43** dargestellt. Naturdaten lagen für diesen Zeitpunkt an Boje 1.13 nur um 16.00 und um 17.00 Uhr vor. Innerhalb dieses Zeitraums bildete sich aus einem Doppelpeakspektrum um die Frequenzen 0.3 Hz und 0.45 Hz ein stärker ausgeprägtes Maximum um 0.35 Hz. Die Form des Spektrums wird von SWAN angesichts der recht geringen spektralen Auflösung gut wiedergegeben.

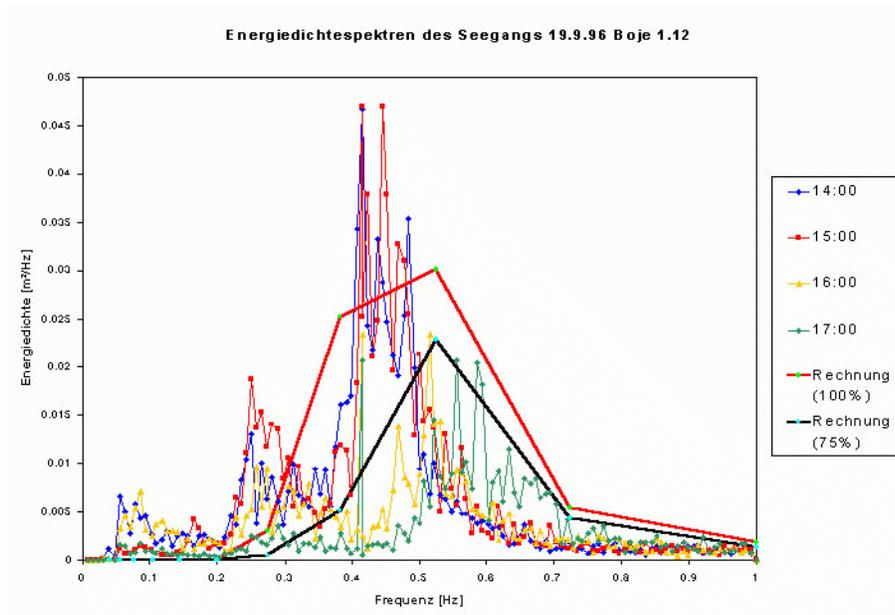


Abbildung 44: Berechnetes und gemessenes Spektrum Boje 1.12

	signifikante Wellenhöhe [m]1.12	signifikante Wellenhöhe [m]1.13
14.00	0.3	
15.00	0.3	
16.00	0.23	0.34
17.00	0.23	0.34
SWAN 100 %	0.41	0.43
SWAN 75 %	0.32	0.30

Tabelle 4: Berechnete und gemessene signifikante Wellenhöhe 19.9.96

Die Wellenhöhen, insbesondere im höheren Frequenzbereich werden jedoch überschätzt. Hierfür gibt es zwei Ursachen:

- Die Annahme eines konstanten Windfeldes mit den Werten von Westerland dürfte den Windeintrag in das Gebiet überschätzen
- Für kleine Fetchlängen wird der Windeintrag in SWAN überschätzt

Um den Einfluß einer zu hohen Windvorgabe abschätzen zu können, wird die Windstärke auf 75% herabgesetzt. Ähnliche Erfahrungen mit einer Überschätzung des Windeintrages bei Ansetzung des Windes auf offener See sind im KFKI-Forschungsvorhaben *Untersuchung regionaler Windwirkungen auf das Sturmflutgeschehen in Tide-Ästuaren* gemacht worden. Die signifikante Wellenhöhe wird dann zwar besser berechnet, jedoch wird das Spektrum im niederfrequenten Bereich stark unterschätzt. Die zugehörigen signifikanten Wellenhöhen sind in Tabelle 6.2.1 dargestellt.

Das gemessene und berechnete Spektrum für die Boje 1.12 ist in **Abbildung 44** dargestellt. Boje

1.12 liegt im Hörnumtief. Hier ist der Einfluß der Strömung auf die Wellenhöhen deutlich zu erkennen. Zwischen 14 und 17 Uhr kommt es zu einer allmählichen Steigerung der Wellenhöhen durch eine gegenläufige Strömung. Gleichzeitig ist eine Frequenzverschiebung in den höherfrequenten Bereich zu beobachten. Auch hier wird das windgeprägte Spektrum gut getroffen. Der dünnungsgeprägte Peak wird allerdings nicht getroffen, da keine äußere Randbedingung vorgegeben ist.

### 6.2.2 Seegangereignis 3.10.96

Das zweite betrachtete Ereignis war ein leichter Sturm aus SSW. Charakteristisch für dieses Ereignis war eine sehr konstante Windrichtung. Gleichzeitig ist die Windgeschwindigkeit sehr gleichmäßig gestiegen.



Abbildung 45: Windgeschwindigkeit und -richtung 3.10.96

In **Abbildung 45** sind die Windgeschwindigkeit und -richtung für den 3.10.96 dargestellt. Deutlich zu erkennen ist ein Anstieg der Windgeschwindigkeit von 12 m/s auf 17 m/s, wobei der Wind relativ konstant aus SSW blies.

Hier zeigte sich, daß sowohl Boje 1.11 als auch 1.12 sehr stark von der Dünnung geprägt sind. Für diese Bojen sind jeweils die Berechnungsergebnisse mit Dünnung und Wind, bzw. ohne Wind nur mit Dünnung den gemessenen Spektren gegenübergestellt.

Durch den lokalen Windeintrag wird der Energieeintrag in das Gebiet überschätzt. Insbesondere die höherfrequenten Bereiche werden überschätzt (vgl. **Abbildung 46**). Demgegenüber wird bei Vernachlässigung des Windes die charakteristische Doppelppeakform des Spektrums durch das Modell sehr gut wiedergegeben. Insbesondere für den Zeitpunkt gegen 18 Uhr sind die Übereinstimmungen sehr groß (vgl. **Abbildung 47**). Zu diesem Zeitpunkt entspricht die Windgeschwindigkeit der im Modell angesetzten.

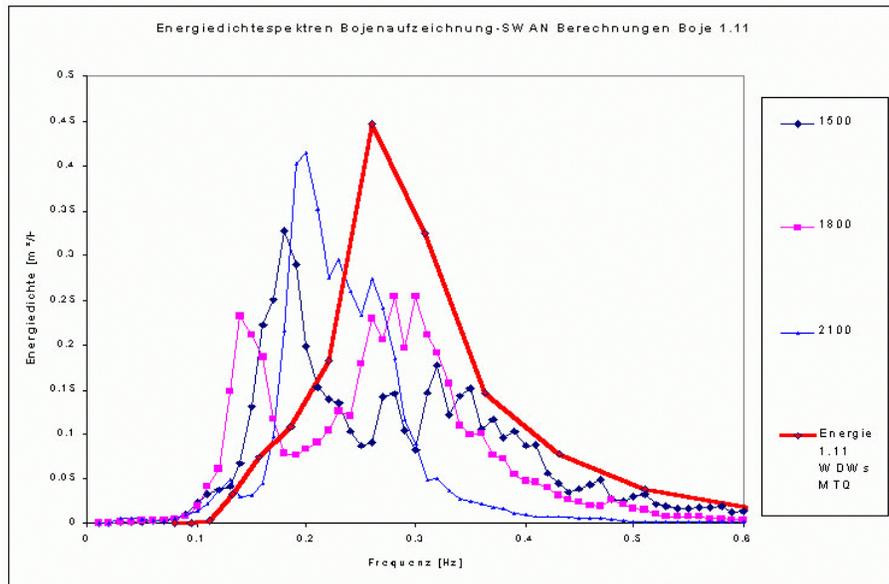


Abbildung 46: Gemessenes und berechnetes Spektrum Boje 1.11 Dünung und Wind

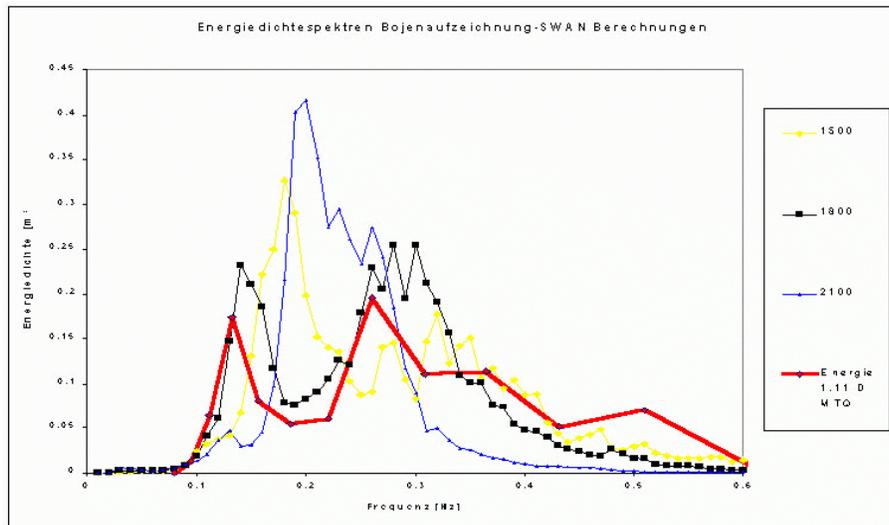


Abbildung 47: Gemessenes und berechnetes Spektrum Boje 1.11 Dünung ohne Wind

	$H_s$ [m] 1.11	$H_s$ [m] 1.12	$H_s$ [m] 1.13
14.00		0.53	0.38
15.00	0.87	0.7	0.47
16.00			0.47
17.00		0.67	0.47
18.00	0.85	0.55	0.52
19.00		0.41	0.46
20.00		0.25	0.50
21.00	0.80		
23.00		0.24	
SWAN 100 %	1.07	0.96	0.6

Tabelle 5: Berechnete und gemessene signifikante Wellenhöhen 3.10.96

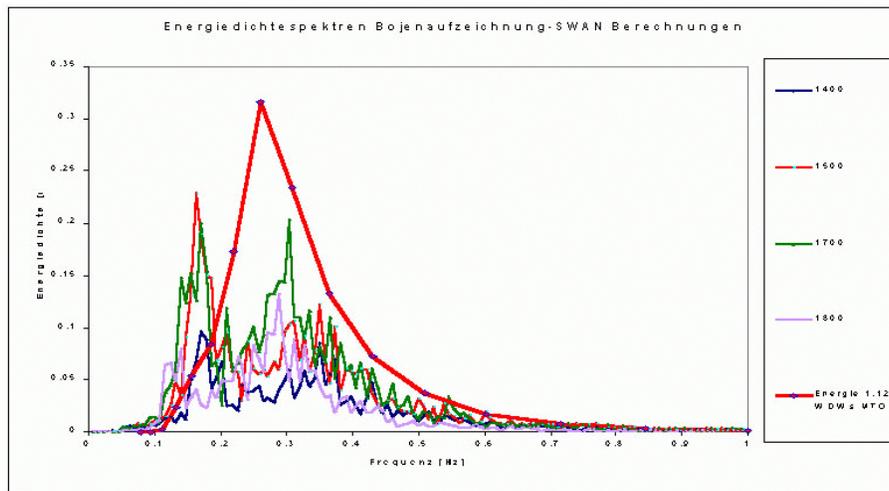


Abbildung 48: Gemessenes und berechnetes Spektrum Boje 1.12 Dünung und Wind 14-18 Uhr

Die signifikanten Wellenhöhen sind in der folgenden Tabelle 6.2.2 dargestellt:

Bei Boje 1.12 stellt sich ein ähnliches Bild dar: Das Spektrum wird ohne Berücksichtigung von Wind besser wiedergegeben (vgl. **Abbildungen 48 und 49**). Hier brechen gegen 20.00 die Wellen jedoch offensichtlich, so daß nur noch sehr wenig Energie an der Boje ankommt. Anders sind bei steigenden Windgeschwindigkeiten die gemessenen Spektren nicht zu erklären (vgl. **Abbildungen 50 und 51**). Bis 19.00 Uhr wird das Spektrum von SWAN bei Vernachlässigung des lokalen Windes gut getroffen.

Bei der lokalen Boje 1.13 wird die signifikante Wellenhöhe und der Frequenzpeak gut getroffen (vgl. **Abbildungen 52 und 53**).

Zusammenfassend läßt sich sagen, daß das Seegangmodell SWAN beste Ergebnisse bei Berücksichtigung eines variablen Brecherkriteriums und nichtlinearer Wellen-Wellen-Interaktion erzeugt. Die Wellenhöhen werden bei einem um 25% gegenüber den Windwerten von Westerland abgemindertem Wind am besten wiedergegeben. Das Seegangsspektrum wird für den lokal geprägten Bereich bei Berück-

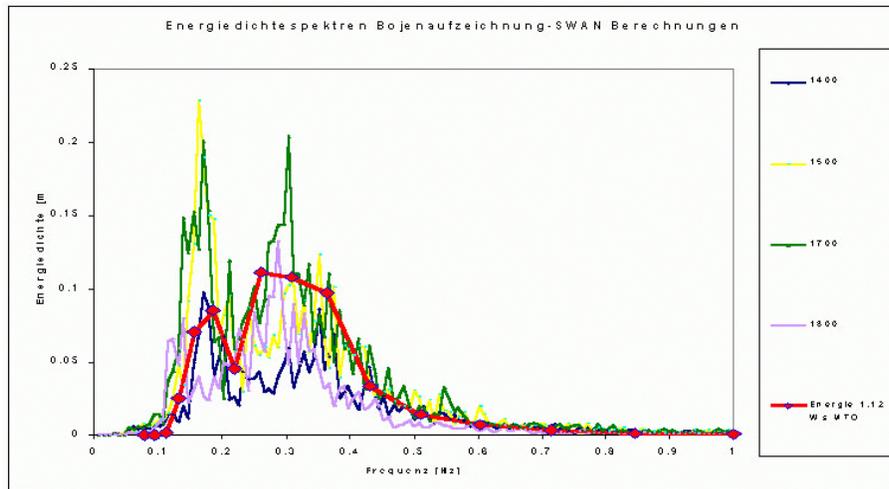


Abbildung 49: Gemessenes und berechnetes Spektrum Boje 1.12 Dünung ohne Wind 14-18 Uhr

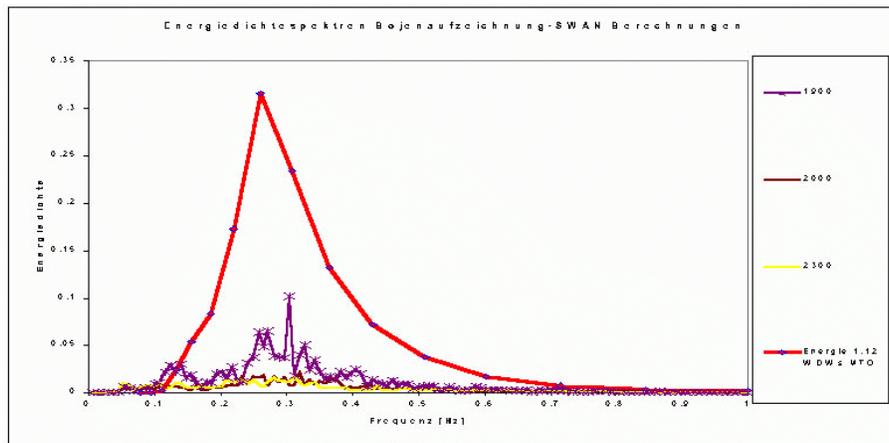


Abbildung 50: Gemessenes und berechnetes Spektrum Boje 1.12 Dünung und Wind 19-23 Uhr

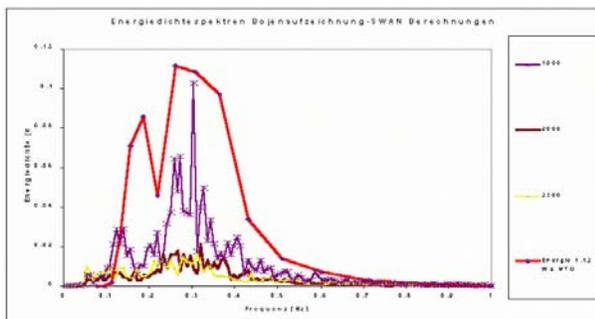


Abbildung 51: Gemessenes und berechnetes Spektrum Boje 1.12 Dünung ohne Wind 19-23 Uhr

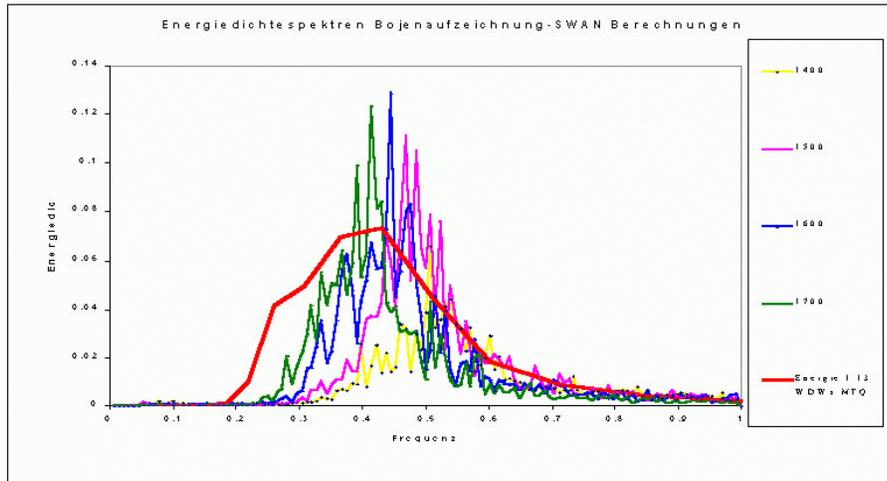


Abbildung 52: Gemessenes und berechnetes Spektrum Boje 1.13 (Dünung) und Wind 14-17 Uhr

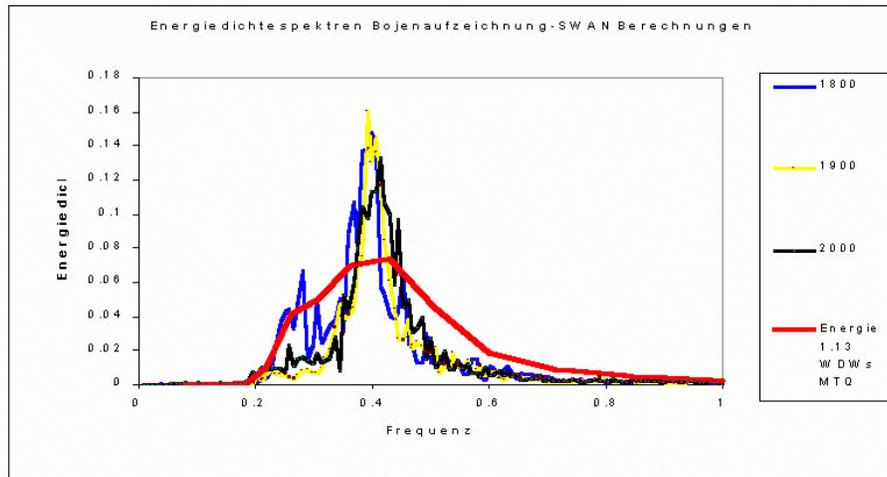


Abbildung 53: Gemessenes und berechnetes Spektrum Boje 1.13 (Dünung) und Wind 18-20 Uhr

sichtigung des Windes gut wiedergegeben, während die im Hörnumtief gelegenen Meßstellen besser durch die vorgegebene Dünung repräsentiert werden. Generell reichen die vorhandenen Daten nicht aus, um das Modell besser für das Hörnumbecken zu kalibrieren. Ziel der Kalibrierung war jedoch auch, einen Parameterdatensatz zu finden, mit dem das Modell für einen weiten Bereich von auftretenden Situationen zu betreiben ist und weiterhin eine Einschätzung zu bekommen, in welcher Genauigkeit die berechneten Ergebnisse liegen.

## 7 Morphodynamische Modellierung Hörnumbecken

### 7.1 Bedeutung des Seegangs im Hörnumbecken

Die Hauptwirkungen des Seegangs auf die Morphologie des Tidebeckens sind folgende:

- Aufwirbeln von Sediment durch Bodenorbitalbewegung
- Küstenlängstransport (Wird im folgenden aufgrund der erforderlichen hohen Auflösung getrennt im Teilmodell Außenbereich (vgl. Kapitel 8) behandelt.)
- Welleninduzierte Strömungen außerhalb der Brandungszone

Örtlich betrachtet sind folgende Teilbereiche besonderer Seegangbelastung ausgesetzt:

- Starke Wirkung des Seegangs an den Außensänden: Hier wird durch Grundberührung und teilweises Brechen der Wellen viel Material in Suspension gebracht und insbesondere während der Flutströmung weitertransportiert.
- Relativ starke Wirkung des Seegangs an den Rinnenrändern: In den Bereichen, wo während ruhiger Wetterlagen Material abgesetzt wird (vgl. Kapitel 5), ist die Wellenwirkung aufgrund des starken Tiefengradienten im Vergleich mit der näheren Umgebung besonders hoch.
- Wirkung des Seegangs auf Wattflächen: Auch auf den Wattflächen, die nur sehr geringen Tidegeschwindigkeiten ausgesetzt sind, wird durch den Seegang Sediment in Suspension gebracht.

Um die Bedeutung des Seegangs für die Morphologie des Hörnumbeckens zu verdeutlichen, wird der Anteil der Ereignisse bestimmt, in denen die Bodenschubspannung der maximalen Tidestromgeschwindigkeit bei mittlerer Tide größer als die Bodenschubspannung aus der Wellenbewegung ist. Hierzu werden auftretende Seegangereignisse in 8 Richtungs- und 5 Windstärkeklassen aufgeteilt. Für jedes dieser Ereignisse wird die Bodenschubspannung aus Seegangswirkung bei einem Wasserstand von 0 müNN bestimmt. Die Dauer der Ereignisse bei denen die Bodenschubspannung aus Tidewirkung überschritten wird, wird entsprechend ihrer Auftretenswahrscheinlichkeit aufsummiert.

Das Ergebnis ist in **Abbildung 54** dargestellt.

Wie zu erwarten, ist in den Tiderinnen die Belastung aus der Tideströmung immer größer als die durch den Seegang. Auf den Wattflächen hingegen zeigt sich ein ganz anderes Bild: Hier überwiegen in 60-70 % der Ereignisse die Belastungen aus Seegang, teilweise sogar, wie im Bereich zwischen Eidumtief und Rantumlohe sowie im Bereich zwischen Wester- und Osterley zu einem noch höheren Prozentsatz. Sehr hohe Seegangbelastungen werden auch im Bereich der Außensände erreicht.

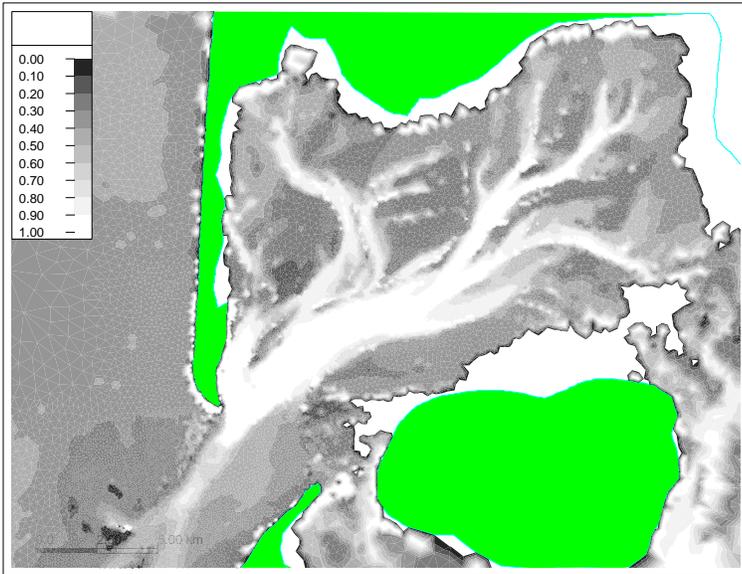


Abbildung 54: Anteil der Zeit, in denen die Belastung aus Tidenströmung größer ist als die durch Seegang

Die Darstellung zeigt örtlich differenziert den morphologisch bestimmenden Faktor. Sie stellt damit eine wesentliche Verbesserung gegenüber Darstellungen wie beispielsweise der von Hayes [9] dar, die in Abhängigkeit von Tidehub und mittlerer Wellenhöhe das dominierende Regime angeben.

## 7.2 Eingabefilterung Seegang

Es besteht für morphologische Langfristprognosen die Notwendigkeit, die Eingabegrößen auf die für den Untersuchungszweck relevanten zu beschränken. Genauso wie nicht alle in der Natur auftretenden Tiden im Rahmen einer Langfristprognose berücksichtigt werden können, können nicht alle auftretenden Seegangseignisse berücksichtigt werden. Erschwerend kommt im Falle des Seegangs hinzu, daß er stark wasserstandsabhängig ist, d.h. daß bei sonst gleichen Randbedingungen (Dünung, Wind, ...) durch die tidebedingten Wasserstandsschwankungen die Bodenschubspannung aus Wellenwirkung variiert.

Es stellt sich also die Frage, welche einzelnen Seegangssituationen aus morphologischer Sicht die Gesamtheit der in der Natur auftretenden Seegangseignisse am besten beschreiben.

Diese Reduktion auf repräsentative Ereignisse stellt sich im Falle des Seegangs als wesentlich komplexer als bei der Tide dar. Die Gründe hierfür sind:

- Der Seegang ist in seiner zeitlichen Variabilität wesentlich größeren Schwankungen unterlegen als die Tidenströmung
- Der morphologische Effekt unterschiedlicher Seegangseignisse erzeugt aus qualitativer Sicht

wesentlich variabelere Ergebnisse als unterschiedliche Tiden

### 7.2.1 Bestimmung der Referenzmorphologieänderung

Es interessiert also vor allem, welche einzelnen Seegangereignisse aus morphologischer Sicht die Gesamtheit der auftretenden Ereignisse für das Gesamtgebiet am besten beschreiben und gleichzeitig welche einzelnen Ereignisse örtlich differenziert die Morphologie am stärksten prägen.

Um diese Fragen näher zu untersuchen wird eine Referenzmorphologieänderung ermittelt, mit der dann der morphologische Effekt einzelner Seegangereignisse verglichen werden soll.

Diese Referenzmorphologieänderung mußte künstlich erzeugt werden, da die topographischen Daten im Hörnumbecken zu hohe Ungenauigkeiten enthielten (vgl. Kapitel 4).

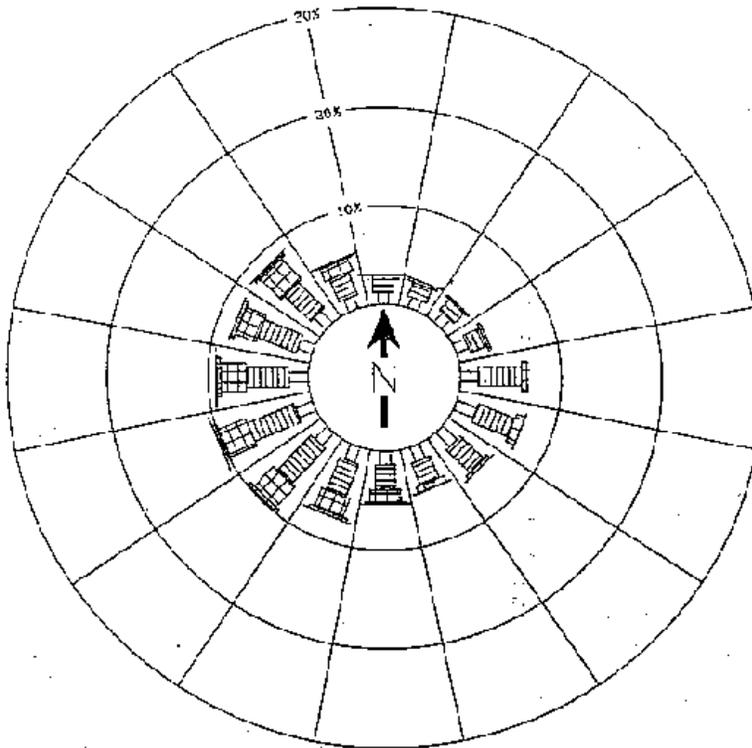
Hierzu wird folgende Vorgehensweise gewählt:

- Einteilung der auftretenden Windsituationen am Windmeßfahl Westerland (vgl. **Abbildung 55**) in 8 Windrichtungsklassen à 45°-Sektoren und 5 Windgeschwindigkeitsklassen, also 40 Windereignisse. Dabei wird davon ausgegangen, daß der Windmeßfahl Westerland als charakteristisch für das Hörnumbecken angesehen werden kann.
- Anschließende mit Seegang gekoppelte morphodynamische Rechnung über eine Tide mit jeder Windsituation (Dadurch wird der verändernden Wirkung des Wasserstandes auf den Seegang Rechnung getragen).
- Ermittlung der Referenzmorphologieänderung durch Superposition der Ergebnisse entsprechend der Auftretenswahrscheinlichkeit der einzelnen Ereignisse:

$$\Delta h_{ref} = \sum_{i=1}^n \Delta h_{if_i} \quad (10)$$

In **Abbildung 56** ist die superponierte Morphologieänderung innerhalb einer Tide dargestellt. Hierbei ist zu beachten, daß jede der Einzelrechnungen mit der gleichen Ausgangstopographie startet. Diese Vorgehensweise wird gewählt, um einen Einfluß der Chronologie der Ereignisse weitestgehend auszuschalten. In der Natur finden die Ereignisse natürlich in einer (nicht prognostizierbaren) Chronologie statt, so daß einmal aufgetretene Morphologieänderungen sich auf nachfolgende Ereignisse auswirken können und sich somit auch die Morphologieänderungen unter Umständen anders verhalten werden. Ziel dieser Vorgehensweise war es aber, einzelne repräsentative Ereignisse zu ermitteln mit denen dann über längere Zeiträume nichtlinear gerechnet werden soll. Die Referenzmorphologieänderung stellt also nur einen Zwischenzustand dar, anhand dessen Ereignisse gefunden werden sollten, die mit der größtmöglichen Wahrscheinlichkeit die langfristige Morphologieentwicklung am besten beschreiben.

MESSPFAHL WESTERLAND/SYLT  
 Häufigkeitsverteilung der Windgeschwindigkeit  
 01.01.1990 - 31.12.1994



U.gren [m/s]	0 - < 5	5 - < 10	10 - < 15	15 - < 20	20 - < 25	≥ 25	Σh	Σ%
0 - 0	498	578	188	9	2		1273	2.9
2.5 - 0	477	633	138	5			1253	2.9
5.0 - 0	532	619	95				1246	2.9
7.5 - 0	556	755	115				1426	3.3
10.0 - 0	733	1803	287				2823	6.6
12.5 - 0	899	1855	383	1			2938	6.9
15.0 - 0	846	1336	195	1			2379	5.6
17.5 - 0	849	1012	293	35			1999	4.6
20.0 - 0	572	1059	513	109	3		2256	5.3
22.5 - 0	690	1300	832	287	2		3111	7.3
25.0 - 0	745	2075	1174	187	16	1	4178	9.8
27.5 - 0	775	2148	1228	169	16	1	4337	10.3
30.0 - 0	922	1823	1073	173	19	1	3911	9.2
32.5 - 0	840	1700	913	177	19		3649	8.3
35.0 - 0	711	1554	1216	165	3		3649	8.6
37.5 - 0	599	1043	551	73	1		2270	5.3
Σh	10715	21356	9139	1262	81	5	22850	
Σ%	25.2	50.1	21.3	3.0	0.2	0.01		100.0

Abbildung 55: Windrose Westerland

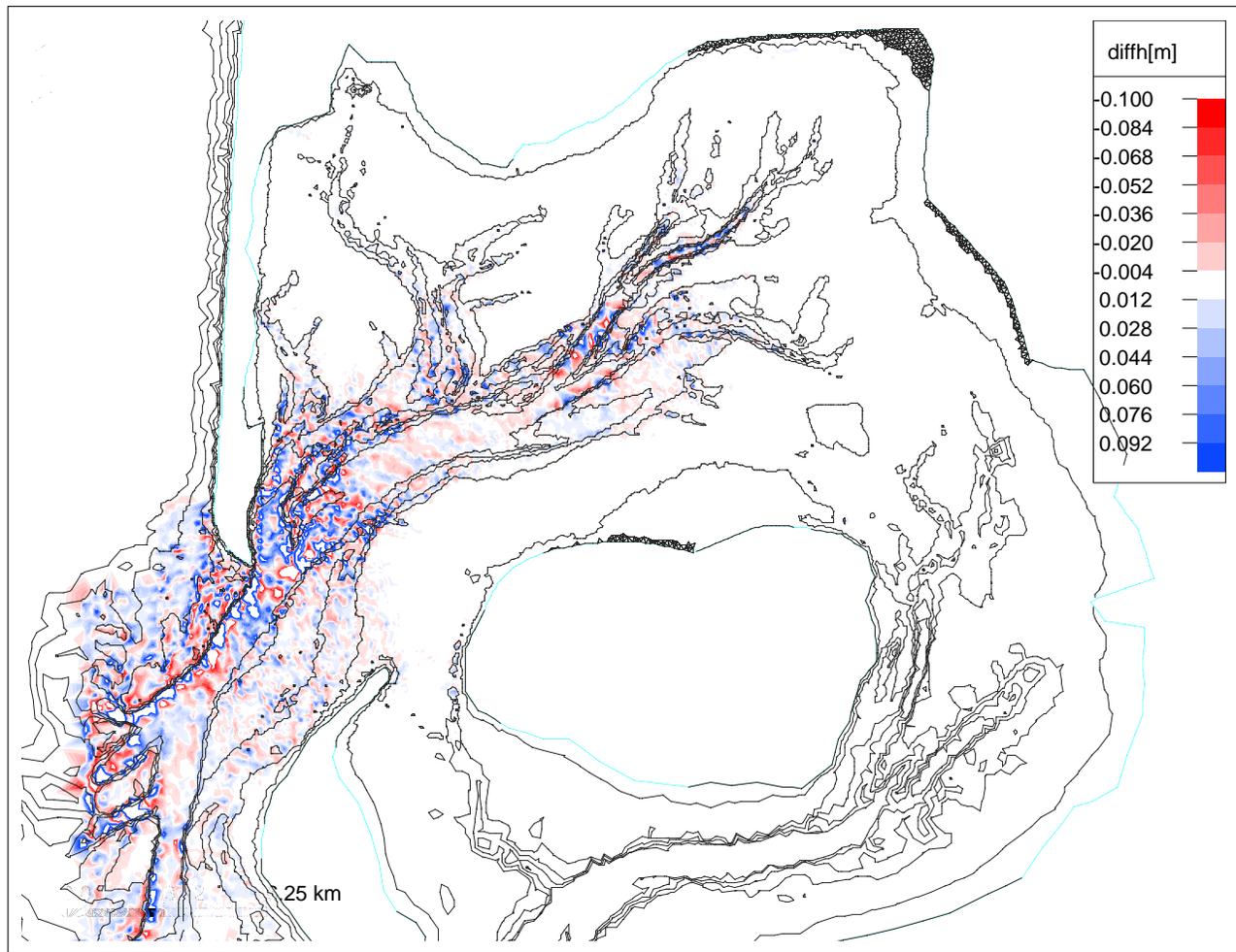


Abbildung 56: Aus 40 Einzelereignissen superponierte Morphologieänderung innerhalb einer Tide

Alle Rechnungen werden mit einem identischen Koeffizientendatensatz durchgeführt. Der Knotenabstand im FEM-Gitter betrug 150 - 200m. Als Übergabezeitschritt zwischen TIMOR und SWAN wird 30 min gewählt.

Die Ausgangstopographie enthält, obwohl bereits morphodynamisch vorgerechnet wurde, um die größten Unregelmäßigkeiten zu glätten, noch immer leichte Unregelmäßigkeiten, die durch die Berechnung geglättet werden. Daher liegen in vielen Bereichen Sedimentation und Erosion eng beieinander: Von einer kleinen lokalen Erhebung wird Material in eine benachbarte Senke transportiert.

Es lassen sich daher wenig systematische Änderungen ausmachen, was auch nicht Ziel der Ermittlung der Referenzmorphologieänderung war. Dies liegt natürlich in erster Linie daran, daß sich das System - wie weiter vorne bereits dargelegt - seit Mitte der 70er Jahre mehr oder weniger in einem morphodynamischen Gleichgewicht befindet, die meisten Morphologieänderungen also temporärer Natur sind und Tiefendifferenzen zwischen zwei Peilungen daher weitestgehend unsystematisch erscheinen.

Dennoch können Aussagen darüber getroffen werden, welche einzelnen Seegangereignisse die Mor-

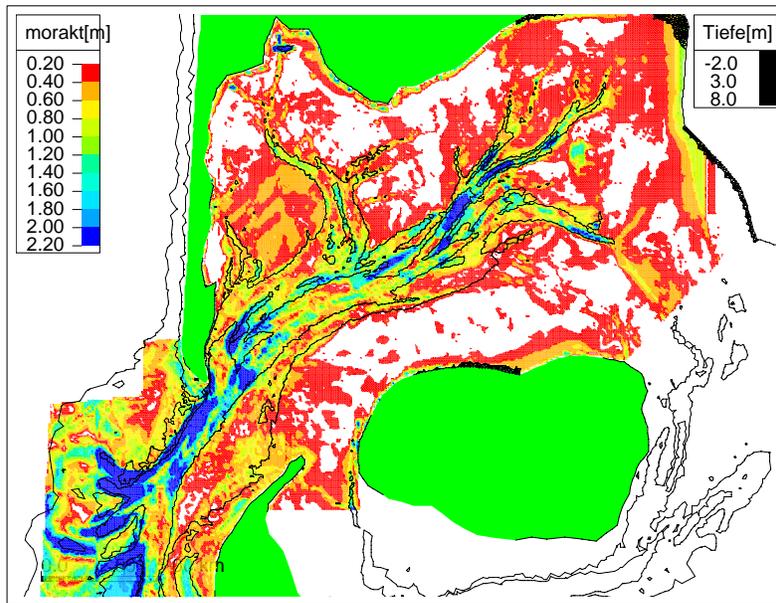


Abbildung 57: Standardabweichung der Peildaten als ein Maß für morphologische Aktivität

phologie am stärksten prägen, weil dies stark von der speziellen Geometrie des Beckens abhängt. Somit bleibt der Aspekt, welches einzelne Ereignis ähnliche morphologische Wirkung hat wie die summierte, nach Auftretenswahrscheinlichkeit gewichtete Morphologieänderung von allen auftretenden Seegangseignissen, unabhängig von den Anfangsumlagerungen.

Die berechneten Tiefenänderungen würden, wenn man sie auf ein Jahr extrapoliert, was ungefähr 700 Tiden entspricht, unrealistisch hohe Werte annehmen. Dies liegt, wie bereits erwähnt, an der Ausgangstopographie, die jeder Rechnung zugrunde liegt: Lokale Unregelmäßigkeiten nehmen in jeder Rechnung eine ähnliche morphologische Entwicklung. Bei einer längeren Rechnung würde sich diese Tendenz abschwächen und allmählich ganz verschwinden. Der Aufwand hierfür wäre allerdings bei 40 Einzelrechnungen erheblich.

Der Einfluß dieser lokalen Unregelmäßigkeiten ist in dem Berechnungsgebiet stärker als eine systematische Entwicklung, was in **Abbildung 56** deutlich erkennbar ist.

Um detailliertere Aussagen zu treffen, wird daher die Referenzmorphologieänderung noch einmal der morphologischen Aktivität gegenübergestellt.

In den **Abbildungen 57 und 58** sind die morphologische Aktivität des Hörnumbeckens in Natur und Rechnung dargestellt.

Die blauen Bereiche sind Bereiche hoher morphologischer Aktivität.

Folgende Bereiche lassen sich übereinstimmend in Natur und Rechnung als Bereiche hoher morphologischer Aktivität identifizieren:

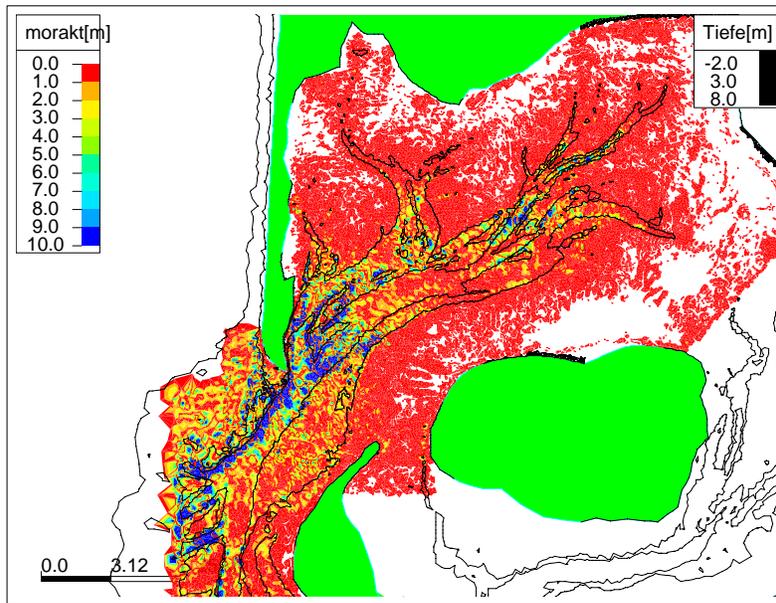


Abbildung 58: Morphologische Aktivität nach TIMOR

- Rinne zwischen Holtknobs- und Jungnamensand
- Rinne zwischen Hörnumknobs- und Holtknobssand
- Rinne zwischen Theeknobs- und Hörnumknobssand
- sämtliche Übergänge der Sände zu den Rinnen
- westliches Ufer Vortrapptief in der Höhe Jungnamensand
- Tiefe Bereiche Hörnumtief zwischen Theeknobssänden und Amrum-Odde
- nördliches Ufer Hörnumtief im Bereich der 3m-Tiefenlinie
- Tiefe Bereiche von Wester- und Osterley

Die Ursachen für die hohe morphologische Aktivität liegen teilweise in einer besonderen Exponiertheit gegenüber dem Seegang wie im Falle der Außensände. Hier brechen die Wellen bei stärkeren Seegangereignissen. Es wird viel Sediment aufgewirbelt und mit der Strömung zum Großteil in Suspension mittransportiert. Gleichzeitig wird aber auch während ruhigerer Zeiträume Material durch die Ebbströmung abgelagert. Im Oster- und Westerley ist ein starker Tiefengradient, der zum Wellenbrechen oder zumindest zur Grundberührung noch relativ hoher Wellen führt, ausschlaggebend für die hohe morphologische Aktivität.

Andere Bereiche haben einen hohen Durchsatz an Sediment, da sie einerseits in unmittelbarer Nachbarschaft der einem starken Seegang ausgesetzten Außensände liegen, andererseits sehr viel Durchfluß

befördern und damit auch viel suspendiertes Material mitführen. Auch Prielverzweigungen sind einer besonders hohen Belastung ausgesetzt, weil hier wieder relativ hohe Wellen auf flachere Bereiche treffen und Material in Suspension bringen, welches mit der Strömung mittransportiert werden kann.

Eine auffallend geringe morphologische Aktivität findet sich in folgenden Bereichen:

- Vortrapptief
- Eidumtief
- Hörnumtief im Bereich südlich des Eidumtiefs

Ursache für die geringe morphologische Aktivität dürfte im Vortrapptief ein relativ guter Schutz gegenüber dem Seegang sein. Im Eidumtief dürfte die geringe Tiefe und der schwache Seegang für die hohe Stabilität verantwortlich sein. Im Hörnumtief kommt es hinter dem Seegat zu einer Erweiterung des Fließquerschnitts und einer damit einhergehenden Verlangsamung der Fließgeschwindigkeit. Die niedrigen Fließgeschwindigkeiten dürften hier für die hohe Stabilität ausschlaggebend sein. Gleichzeitig ist der Bereich relativ tief, so daß die Bodenorbitalgeschwindigkeiten in diesem Bereich auch nur gering bleiben.

Mit der ermittelten Referenzmorphologieänderung können nun:

- Repräsentative Ereignisse
- Dominante Windsituationen

bestimmt werden.

### 7.2.2 Bestimmung repräsentativer Ereignisse

Es können nun durch Wichtung und Kombination beliebig viele repräsentative Seegangereignisse definiert werden, die in ihrem morphologischen Effekt möglichst nahe an die Referenzmorphologieänderung herankommen. Je nach der Anzahl der verwendeten Ereignisse steigt die Genauigkeit.

Die zu ermittelnden repräsentativen Seegangereignisse ergeben sich nach der Gleichung:

$$RS(n, a_j, h_j) = \min\left(\sum_{i=1}^k ((h_{ref,i} \cdot A_i) - \left(\sum_{j=1}^n (a_j \cdot h_{j,i} \cdot A_i)\right))\right) \quad (11)$$

In der folgenden Tabelle 7.2.2 sind die Ergebnisse für bis zu 4 berücksichtigte Ereignisse dargestellt.

Anzahl der Ereignisse	S	SW	W	NW	rel. Volumenfehler
1			0.7 · W7.5		21.2 %
2		0.55 · SW7.5		0.15 · NW12.5	18.7 %
3		0.3 · SW7.5	0.15 · W12.5	0.25 · NW7.5	16.4 %
4	0.3 · S7.5	0.05 · SW12.5	0.1 · W12.5	0.35 · NW7.5	13.0 %

Tabelle 6: Repräsentative Ereignisse für bis zu 4 berücksichtigte Ereignisse

Beste Übereinstimmung mit der Referenzmorphologieänderung ergibt sich, wenn die berücksichtigten Situationen mehr oder weniger um die Westrichtung verteilt sind und eine Kombination aus schwächeren 7.5m/s- und stärkeren 12.5m/s-Ereignissen herangezogen wird. Die 12.5m/s-Ereignisse sollten mit einem Gewicht, daß nicht höher als 15% ist, berücksichtigt werden. Dies erstaunt erst einmal, da sie am Windmeßfahl Westerland weitaus häufiger auftreten. Offensichtlich werden aber die morphologischen Effekte stärkerer Ereignisse durch die häufiger auftretenden schwächeren Ereignisse teilweise kompensiert.

Die mit den jeweils berücksichtigten repräsentativen Ereignissen erreichte Genauigkeit steigt mit der Anzahl der berücksichtigten Ereignisse von 21.2% bei einem auf 13.0% bei 4 berücksichtigten Ereignissen.

Eine Summation der einzelnen Multiplikationsfaktoren führt auf einen Wert, der bei 70 - 80% liegt. Die Abweichung zu 100% erklärt sich durch den zeitlichen Anteil relativ ruhiger Wetterlagen, während derer nur geringe morphologische Veränderungen stattfinden und die daher als repräsentative Ereignisse nicht berücksichtigt werden.

In den folgenden **Abbildungen 59 bis 63** sind die Tiefendifferenzen zwischen dem Referenzzustand und der Morphologieänderung bei 2,3 sowie 4 berücksichtigten Situationen dargestellt. Es fällt auf, daß bereits bei 2 berücksichtigten Situationen ein Großteil des Beckens, insbesondere der hintere Bereich morphodynamisch gut getroffen wird. Lediglich der Bereich östlich der Südspitze von Sylt wird noch nicht so gut getroffen. Dieser Bereich stellt den aus Sicht der Eingabefilterung kritischen Bereich dar.

Durch Berücksichtigung von 3 und 4 Situationen werden die Ergebnisse in diesem kritischen Bereich verbessert. Für die Morphologieänderung haben hier auch Ostwinde ein relativ hohes Gewicht. Sie sind zwar nicht die wichtigsten Ereignisse haben aber eine relativ hohe Bedeutung, was auf die relativ große Fetchlänge in diesem Bereich zurückzuführen ist.

Weitere interessante Schlußfolgerungen können aus der Darstellung der besten Kombination von 4 Windsituationen gezogen werden, die in Tabelle 7 dargestellt sind:

Es treten in diesen Kombinationen keine Nord- oder Ostsituationen auf. Diese können zwar lokal Bedeutung haben, spielen aber für die Morphologieentwicklung des Gesamtgebietes eine untergeordnete Rolle.

Weiterhin wird nur in zwei Fällen eine Sturmsituation berücksichtigt. Dies ist ein Süd Sturm, was

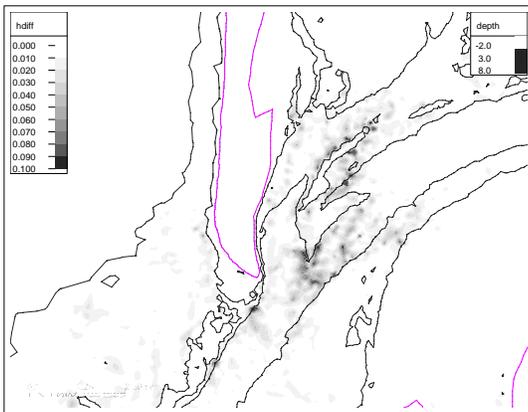


Abbildung 59: Abweichung zur Referenzmorphologieänderung bei Berücksichtigung von 2 Ereignissen

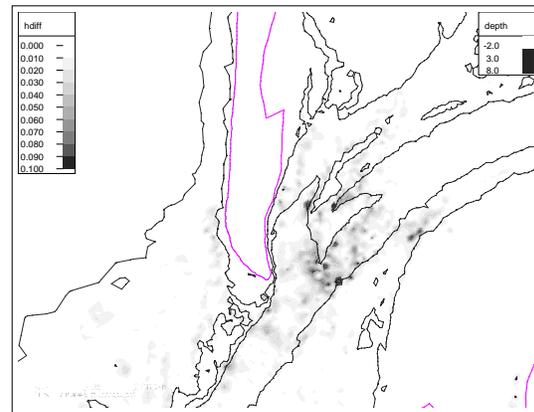


Abbildung 60: Abweichung zur Referenzmorphologieänderung bei Berücksichtigung von 3 Ereignissen

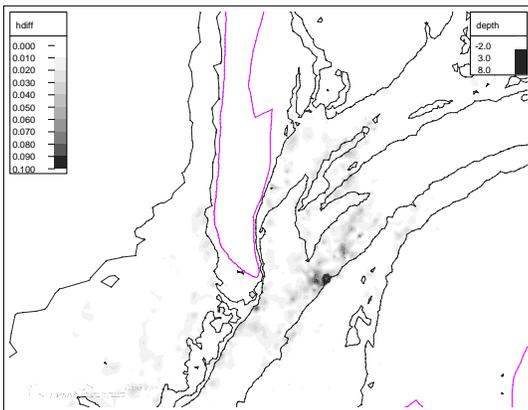


Abbildung 61: Abweichung zur Referenzmorphologieänderung bei Berücksichtigung von 4 Ereignissen

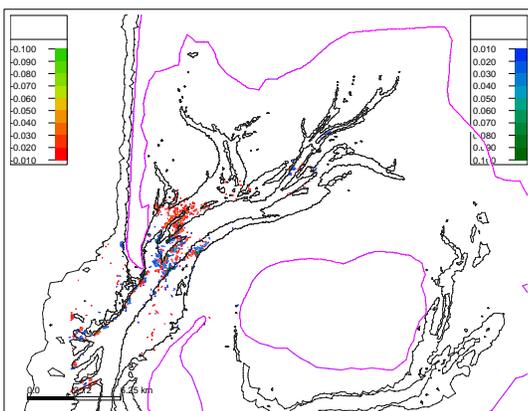


Abbildung 62: Vergleich der Morphologieänderung bei Berücksichtigung von 2 bzw. 3 Ereignissen

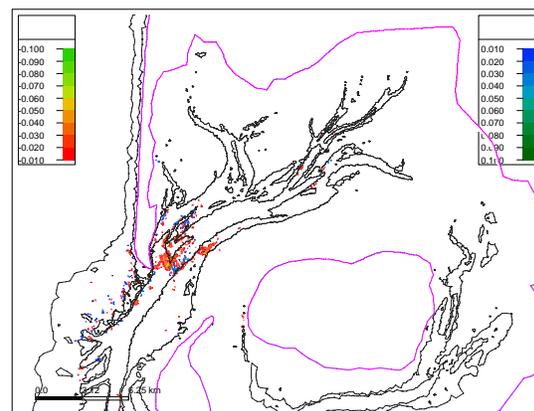


Abbildung 63: Vergleich der Morphologieänderung bei Berücksichtigung von 3 bzw. 4 Ereignissen

Rang	NO12.5	SO12.5	S7.5	S17.5	SW7.5	SW12.5	W7.5	W12.5	NW7.5	NW12.5
1			0.3			0.05		0.1	0.35	
2			0.35			0.05	0.25	0.1		
3					0.35	0.05			0.2	0.1
4					0.35			0.05	0.25	0.1
5			0.4			0.05			0.15	0.1
6	0.05				0.45			0.1		0.05
7	0.05				0.45			0.05		0.1
8	0.1				0.4			0.1		0.05
9				0.05	0.3				0.2	0.1
10			0.4			0.05	0.1	0.1		
11					0.45	0.05			0.1	0.1
12	0.1				0.4			0.05		0.1
13			0.4			0.05	0.2	0.1		
14					0.3			0.1	0.25	0.05
15					0.3			0.1	0.2	0.05
16				0.05	0.35				0.15	0.1
17					0.35			0.1	0.15	0.05
18					0.4	0.05			0.1	0.1
19		0.15				0.05		0.1	0.4	

Tabelle 7: Beste Kombinationen von repräsentativen Ereignissen bei Berücksichtigung von 4 Ereignissen

nocheinmal auf die Schwierigkeit hindeutet, den kritischen Bereich östlich der Südspitze von Sylt zu modellieren.

Das System reagiert sensitiver auf eine Variation in den Richtungen als in der Windgeschwindigkeit.

Generell sind die Windsituationen um West verteilt und es wird eine Kombination aus schwächeren 7.5m/s- und stärkeren 12.5m/s-Ereignissen berücksichtigt.

Die für das Hörnumbecken ermittelten repräsentativen Windereignisse mit ihren zugehörigen Wichtungsfaktoren sind also:

- 0.3· S7.5m/s
- 0.05· SW12.5m/s
- 0.1· W12.5m/s
- 0.35· NW7.5m/s

Zusammenfassend kann folgendes gesagt werden:

- Die Auswahl repräsentativer Ereignisse auf Basis einer morphologischen Matrix verspricht eine gute Wahl von repräsentativen Ereignissen für Langfristprognosen zu sein, da sie begründbar

und nachvollziehbar durchgeführt und auf Basis von morphologischen Veränderungen ermittelt wird.

- Die Prozedur offenbart die aus Sicht der Eingabefilterung kritischen Bereiche.
- Eine Verfeinerung kann nach den vorhandenen Erfordernissen leicht durch eine Berücksichtigung von mehr Ereignissen durchgeführt werden.

### 7.2.3 Bestimmung dominanter Windsituationen

Weiterhin sollte geklärt werden, welche Bereiche des Beckens durch welche Einzelereignisse besonders stark geprägt sind. Hierzu werden dominante Windsituationen definiert: Dominante Windsituationen sind solche, die für die langfristig stattfindenden Morphologieänderungen nach Wichtung mit der Auftretenswahrscheinlichkeit der einzelnen Windsituation, den stärksten Anteil liefern.

Mathematisch ausgedrückt bedeutet dies:

$$W_d = \min(|h_{ref} - h_i|) \quad (12)$$

mit:

$W_d$ : dominante Windsituation,  $h_{ref}$ : Referenzmorphologieänderung,  $h_i$ : Morphologieänderung durch Ereignis  $i$ ,  $i$ : Ereignis

Als Vergleichszustand wird wieder die Referenzmorphologieänderung herangezogen.

Die dominanten Windsituationen beschreiben örtlich differenziert, welche Windsituation am meisten zu der morphologischen Entwicklung beiträgt.

In **Abbildung 64** sind die dominanten Windrichtungen dargestellt. Übersichtshalber ist eine Differenzierung nach der zugehörigen Windgeschwindigkeit hier erstmal weggelassen, dies wird dann in den nachfolgenden Abbildungen dargestellt.

Es zeigt sich, daß für das Hörnumbecken fast ausschließlich die Windrichtungen Südwest, West und Nordwest bestimmend sind.

Der Bereich nördlich des Hörnumtiefs wird durch Südwestwindlagen geprägt. Eine Ausnahme bildet hier das Osterley, in dem Westwindlagen bestimmend sind, weiter südlich, auf den höher gelegenen Flächen zwischen Osterley und Hörnumtief ist jedoch wieder die Südwestwindlage bestimmend. Westwindlagen sind vornehmlich für das Hörnumtief und die östlichen Bereiche des Beckens für die Morphologieänderungen am stärksten verantwortlich. In den tiefsten Bereichen des Hörnumtiefs, südlich von Sylt und im Bereich der Rinne bis zu den Außensänden, sowie in den Wattgebieten westlich der Amrum-Odde und nördlich Föhrs ist der Nordwestwind maßgebend. Die Fetchlänge ist für diese Bereiche bei Nordwestwindlagen am größten. In den Bereichen zwischen Amrum und Föhr sowie

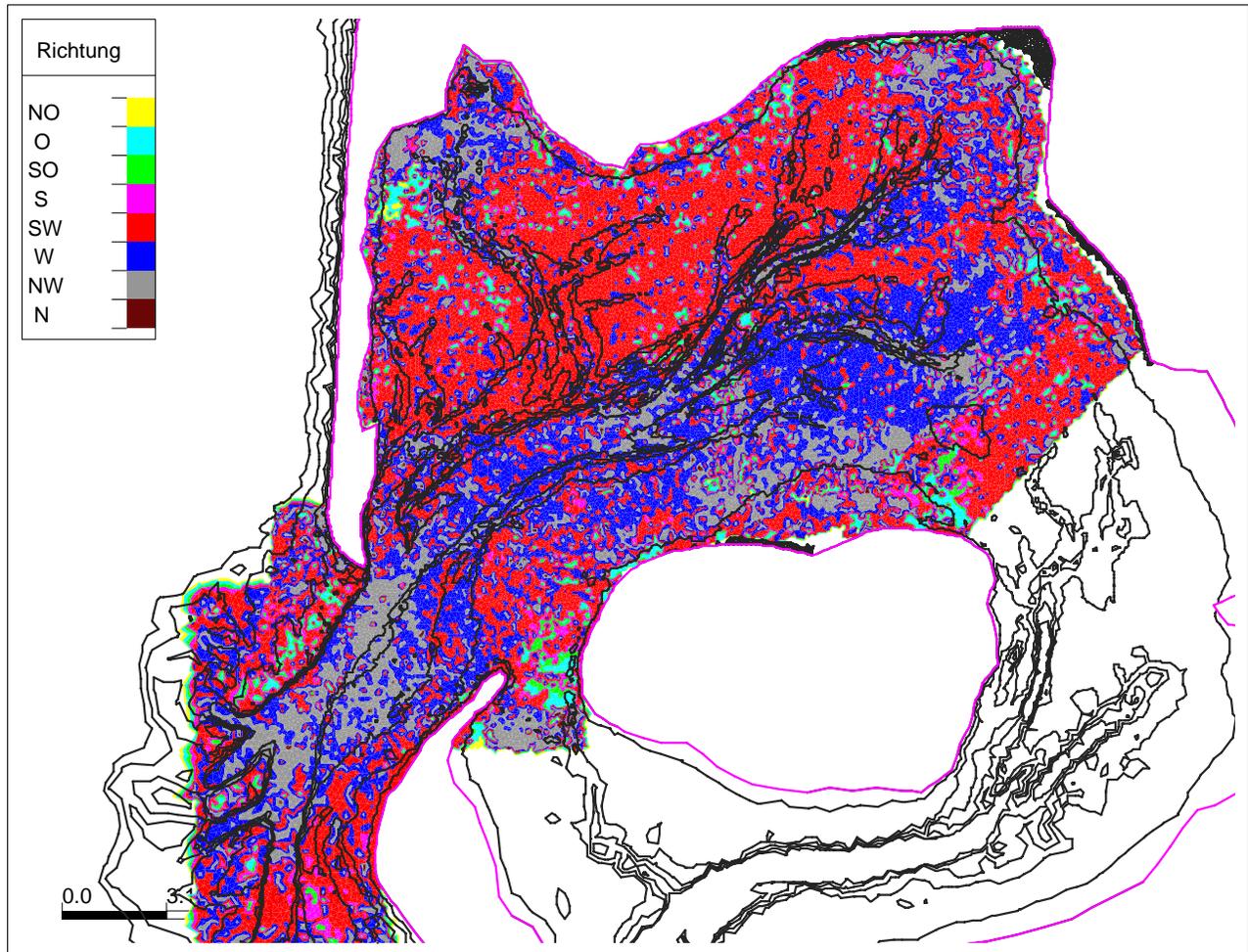


Abbildung 64: Dominante Windrichtungen Hörnumbecken

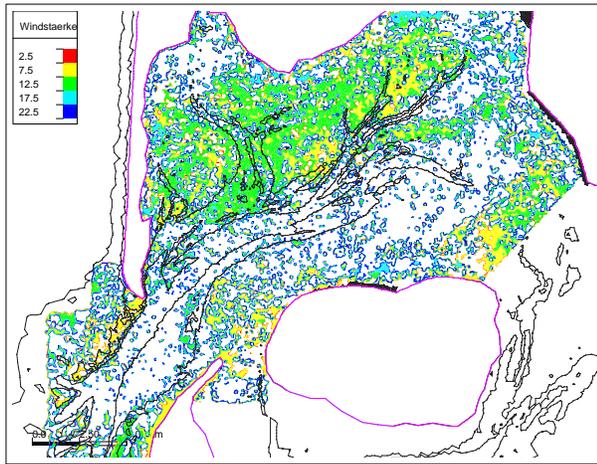


Abbildung 65: Dominante Windsituationen: SW-Lagen

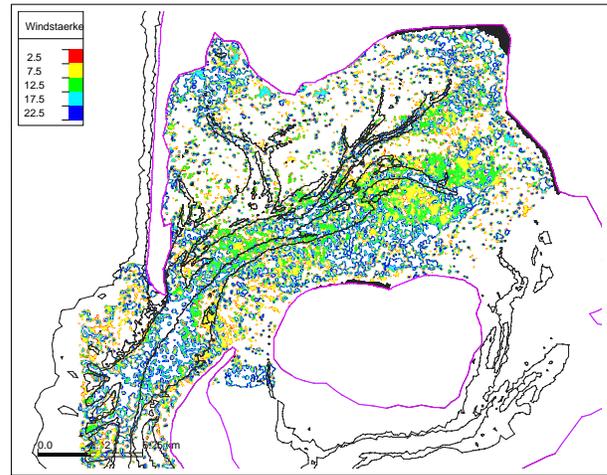


Abbildung 66: Dominante Windsituationen: W-Lagen

zwischen Föhr und Festland gewinnt die Südwestwindlage aufgrund von Einflüssen aus dem südlich angrenzenden Tidebecken an Bedeutung.

Die lokal differenzierte Kenntnis solcher dominanten Windlagen läßt Rückschlüsse auf die morphologische Entwicklung des Beckens bei einer Veränderung der langjährigen Windsituationen zu. Beispielsweise sind besonders starke Morphologieänderungen in den Bereichen zu erwarten, die durch Windsituationen bestimmt werden, deren Auftretenswahrscheinlichkeit durch Klimaänderungen besonders verändert wird.

Fälschlich wäre hier allerdings der Schluß, andere Windrichtungen, beispielsweise Ostwinde hätten für das Gebiet keine Bedeutung: Dargestellt werden ja die Windrichtungen, bei denen multipliziert mit der jeweiligen Auftretenswahrscheinlichkeit die Morphologieänderung den langjährig gemittelten am nächsten kommen. Zum Beispiel ist die Südostküste Sylts zwar am stärksten von West- und Südwest- Windlagen bestimmt, die Ostwinde haben hier aber einen weitaus höheren Stellenwert als beispielsweise im Wester- und im Osterley.

In den **Abbildungen 65, 66 und 67** sind die dominanten Windsituationen für die SW, W, und NW-Richtung noch einmal nach Windgeschwindigkeit differenziert dargestellt.

Die fleckige Struktur dieser Darstellungen ist ein Darstellungsproblem: Jeder dominanten Windsituation wird ein Wert zugeordnet; liegt nun an einem benachbarten Knoten ein anderer Wert vor, wird linear interpoliert. (Liegt beispielsweise SW12.5 (Wert 3) neben W12.5 (Wert 8), werden zwischen den beiden Knoten auch die den Werten 4 bis 7 entsprechenden Farben dargestellt.)

Aus der Darstellung ist zu erkennen, daß für Südwestbereiche die 7.5 m/s Ereignisse für die nördlichen Prielränder des Oster- und Westerleys dominant sind. Sie treten weiterhin in den höheren Bereichen zwischen Eidumtief und Rantumlohe, nördlich des Hörnumtiefs zwischen Eidumtief und Westerley

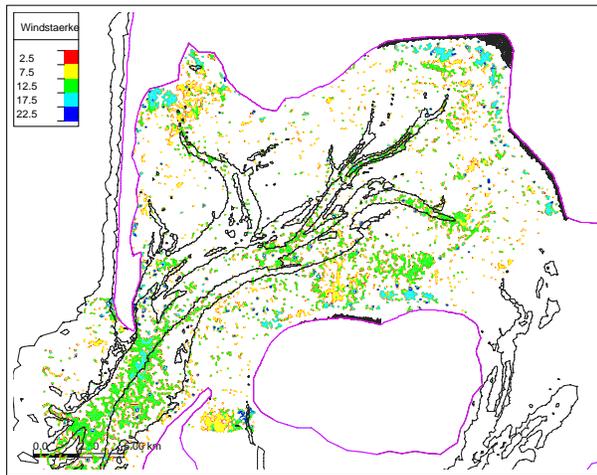


Abbildung 67: Dominante Windsituationen: NW-Lagen

sowie im Einflußbereich des südlich gelegenen Tidebeckens im Bereich der Wattwasserscheiden auf. Auffallend ist auch, daß der Bereich der Theeknobsände durch diese Windsituation geprägt wird. Offensichtlich wird hier schon bei 7.5 m/s Winden relativ viel Material umgelagert, so daß aufgrund ihrer hohen Auftretenswahrscheinlichkeit diese Windsituation für diesen Bereich dominant sind.

Die 12.5 m/s Ereignisse sind vor allem für den Bereich des Eidumtiefs mit seinen östlichen Ausläufern verantwortlich.

In der folgenden **Abbildung 66** ist die dominante Windgeschwindigkeit für W-Bereiche dargestellt. Hier sind die Effekte der unterschiedlichen Geschwindigkeitsbereiche nicht so klar differenziert wie bei den Südwestwindlagen. In den hinteren Bereichen des Hörnumtiefs sind die 7.5 m/s Ereignisse dominant, während in dem Zentralbereich des Hörnumtiefs die 12.5 m/s Bereiche eher dominant sind.

Bei NW-Windlagen ist auffällig, daß hier fast ausschließlich höhere Windgeschwindigkeiten dominant sind. Die Endbereiche der Priele Hörnumtief, Oster- und Westerley werden von diesen Windsituationen dominiert. Auch das Ufer des Hörnumtiefs im Bereich der Amrum-Odde wird von diesen Windsituationen am stärksten geprägt, im Bereich südlich von Sylt ist sogar die sehr selten auftretende Windsituation mit 17.5 m/s dominant.

Zusammenfassend ist folgendes festzuhalten:

- Das Modell berechnet in Bereichen, die nach den Datenauswertungen eine hohe morphologische Aktivität aufweisen, auch besonders starke Veränderungen. Dieses Ergebnis wird erst durch die Kopplung von Seegang und Morphodynamik erreicht.
- Bestimmten Bereichen wurden dominante Windsituationen zugewiesen. Die lokal differenzierte Kenntnis dieser Situationen ist für viele Anwendungen sinnvoll und läßt Rückschlüsse auf das morphologische Verhalten des Beckens bei einer Änderung der langjährigen Windsituationen zu.

- Der nordwestliche Bereich ist von Südwestwindlagen geprägt. Im Bereich des Eidumtiefs sind die 12.5m/s Windlagen dominierend, während an den Nordufern der Oster- und Westerley die 7.5 m/s Situationen, die wesentlich häufiger auftreten, dominant sind.
- Der Zentral- und der Ostbereich sind durch Westwindlagen geprägt.
- Die Bereiche höchster morphologischer Aktivität korrespondieren gut mit von Nordwestwindlagen geprägten Bereichen. Teilweise sind hier auch die Starkwindereignisse 17.5 m/s prägend.

### 7.3 Morphodynamische Modellierung mit Seegangseignissen

Ziel des Forschungsvorhabens ist es, die langfristig im System Tidebecken-Außensände stattfindenden Morphologieveränderungen prognostizieren zu können. Hierzu hat sich folgende Unterteilung als sinnvoll erwiesen:

- Modellierung der morphologischen Reaktion nach einem starken Eingriff
- Modellierung von lokal begrenzten morphologische Strukturen
- Modellierung der großräumigen Sedimentdynamik

Es wurde bereits darauf hingewiesen, daß sich das Hörnumbecken seit Mitte der 70er Jahre mehr oder weniger in einem morphodynamischen Gleichgewicht befindet, das heißt, daß die morphologischen Veränderungen zum überwiegenden Teil temporärer und reversibler Natur sind und keinen ausgeprägten Trend aufweisen. Bei der Datenanalyse sind dennoch Bereiche auffallend hoher morphologischer Aktivität identifiziert worden.

Es konnte bereits gezeigt werden, daß das Modell für ruhigere Perioden gute Ergebnisse bei Vernachlässigung des Seegangs liefert. Die sich hierbei ergebenden Morphologieänderungen waren vornehmlich leichte Sedimentationen an den Rinnenrändern, die aus einer leichten Erosion der Rinnen herrührten. Dieses Verhalten wird auch durch Messungen auf dem Watt während ruhiger Perioden bestätigt [18].

Für längere Perioden ist dies allerdings unrealistisch, da durch Seegangwirkung auch andere Bereiche intensiven Umlagerungen unterliegen.

Es soll die Frage beantwortet werden, welche Möglichkeiten und Grenzen für die morphodynamische Modellierung in einem Gebiet existieren, das sich in einem morphologischen Gleichgewicht befindet.

Hierzu werden verschiedene Rechnungen mit einzelnen Seegangseignissen durchgeführt, ferner eine Rechnung bei der mit vier vorher bestimmten repräsentativen Seegangseignissen gearbeitet wird.

#### 7.3.1 Rechnungen mit einzelnen Seegangseignissen

Im folgenden werden Rechnungen, die nur mit einer Seegangsrandbedingung betrieben werden, vorgestellt. Es wird eine  $W$  7.5 m/s Situation gewählt, weil diese bei der Bestimmung repräsentativer Ereignisse als das Einzelereignis mit dem geringsten relativen Volumenfehler ermittelt wurde. Es wird ein halbes Jahr durchgerechnet. Hiernach haben sich bereits naturähnliche morphologische Veränderungen eingestellt, die sich bei fortgesetzter Rechnung von ihren prinzipiellen Erscheinungen her nicht mehr ändern. Die schlechte Datenlage gestattet es nicht eine Zieltopographie vorzugeben. Aufgrund der Häufigkeit und Qualität der Vermessungen läßt es sich nicht immer eindeutig entscheiden, in

welchen Bereichen langfristige morphologische Entwicklungen stattgefunden haben, wo sie reversibler bzw. temporärer Natur sind und wo Meßungenauigkeiten vorliegen, die eine morphologische Veränderung vortäuschen. Wie bereits weiter vorne erwähnt wurde, kann im Hörnumbecken nicht überall von linearen und eindeutigen morphologischen Entwicklungen ausgegangen werden. Bei dem Vergleich mit den Naturdaten sind Veränderungen, die unterhalb von 50cm liegen aus diesen, bereits erwähnten Gründen, ausgeblendet.

In **Abbildung 68** sind die natürlichen Veränderungen zwischen 1974 und 1986 dargestellt, wobei Veränderungen, die unterhalb von 50cm liegen, aus bereits erwähnten Gründen ausgeblendet bleiben. Sie stellen den Vergleichszustand dar, mit dem die Berechnungsergebnisse verglichen werden sollen. Die Ergebnisse sind in der folgenden **Abbildung 69** dargestellt. Stärkere Umlagerungen finden vor allem westlich des Seegats, östlich der Südspitze Sylts im Eidumtief sowie im Bereich Wester- und Osterley statt.

In den Rinnen, insbesondere in den tieferen Bereichen überwiegt Sedimentation. Eine leichte Sedimentation wird in den Endbereichen von Eidumtief und Osterley berechnet. Stärkere Sedimentationen finden sich am seeseitigen Rand des Ebbdeltas. Hierhin wird das durch Seegangswirkung in Suspension gebrachte Sediment mit der Ebbströmung transportiert und zur Kenterzeit abgelagert.

Erosionsbereiche sind vor allem das Westufer der Rantumlohe und vereinzelt Bereiche an den Außensänden. Leichtere Erosionen finden sich an den Rinnenrändern und auf der Wattfläche nördlich von Föhr.

Generell kann gesagt werden, daß diese morphologischen Veränderungen plausibel erscheinen. Es finden lokal Umlagerungen statt, weiterhin berechnet das Modell in einigen Bereichen Rinnenverlagerungen. Die Umlagerungen werden dort prognostiziert, wo sie auch in der Natur stattfinden.

Als weiteres Ereignis wird eine SW 12.5m/s-Situation betrachtet. Wieder werden die Ergebnisse nach einem berechneten Zeitraum von einem halben Jahr diskutiert. Die Ergebnisse sind in **Abbildung 70** dargestellt. Die sich ausbildenden morphodynamischen Entwicklungen sind eindeutiger zu charakterisieren. In den Rinnen liegt größtenteils eine leichte Sedimentation vor, derweil es an den Rinnenrändern, also dort wo es bei Vernachlässigung des Seegangs zu Sedimentationen kam, zu einer leichten Erosion kommt. Deutlich wird daß die Umlagerungsmengen bei stärkeren Windereignissen überproportional ansteigen.

In folgenden Bereichen wird in beiden Rechnungen eine naturähnliche morphodynamische Entwicklung berechnet:

- Erosionsbereich westliche Rantumlohe
- Rinnenverlagerung in südliche Richtung zwischen Rantumlohe und Eidumtief
- Verlagerung zweier Sandbänke Eidumtief

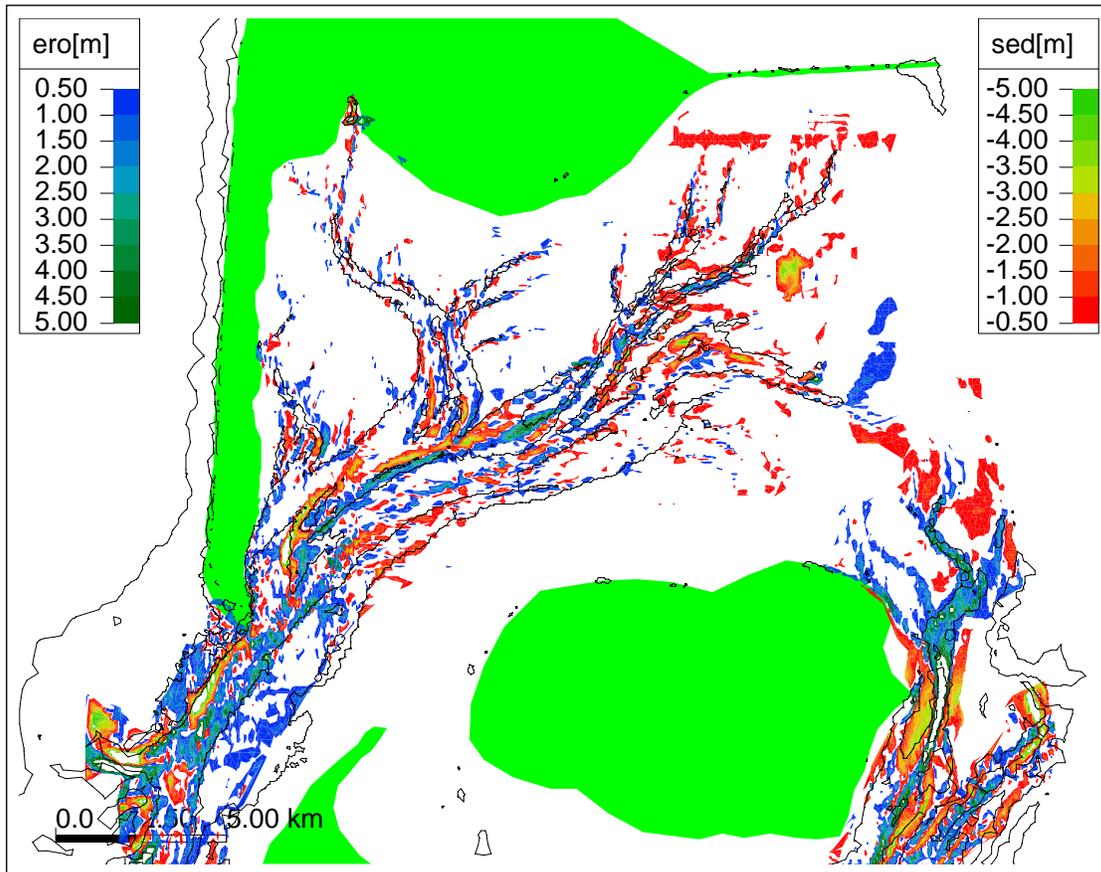


Abbildung 68: Tiefenänderungen zwischen 1974 und 1986

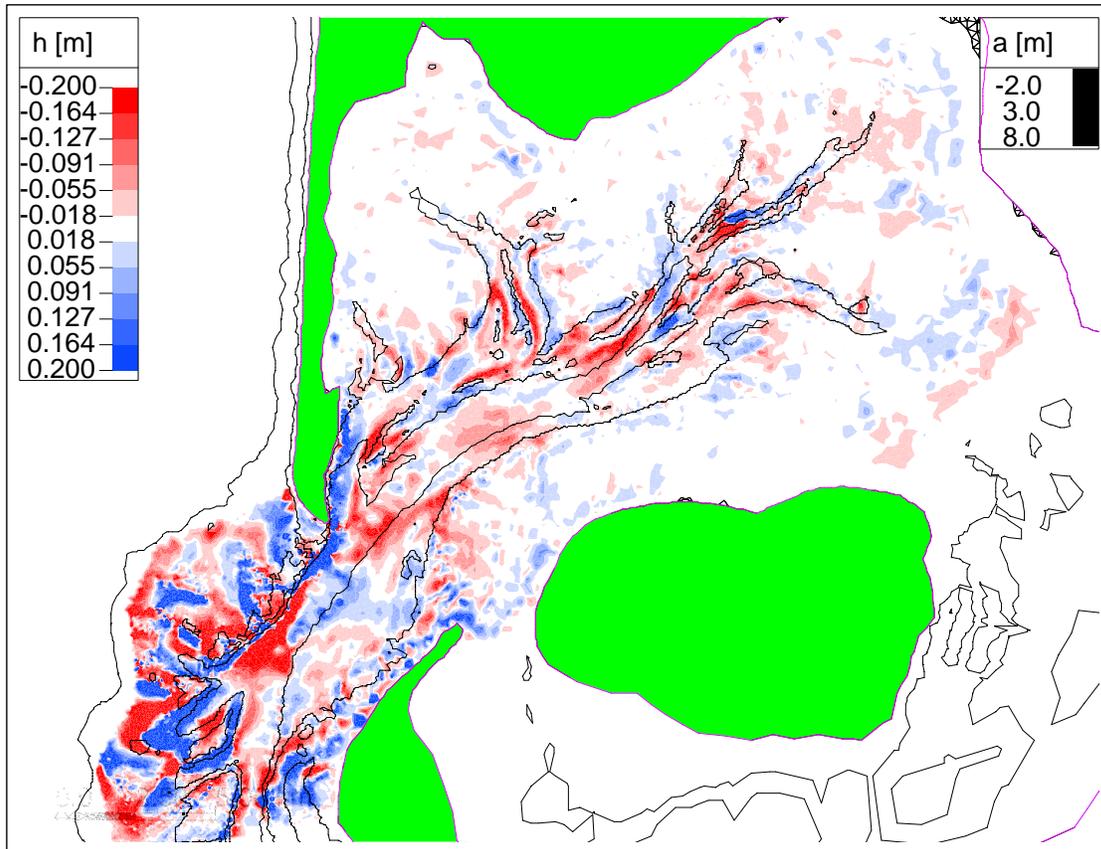


Abbildung 69: Tiefenänderungen innerhalb eines halben Jahres, Rechnung W 7.5m/s, (rot:Sedimentation)

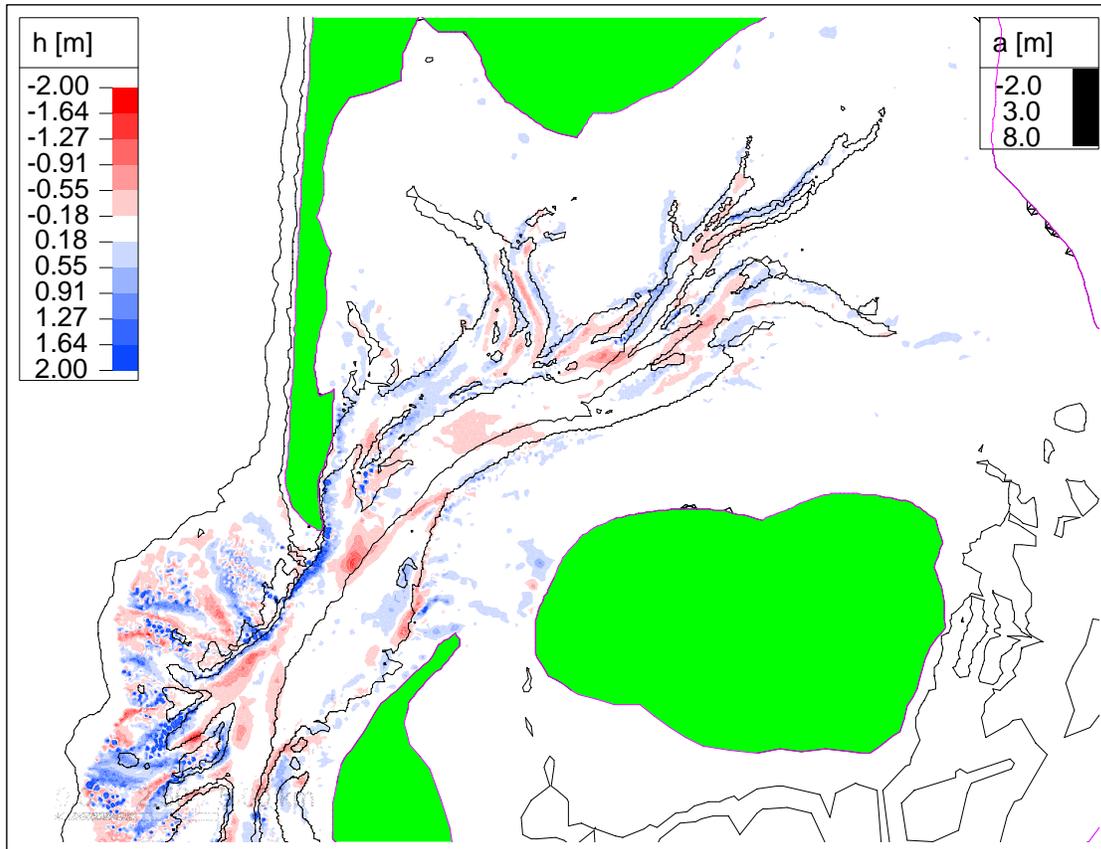


Abbildung 70: Tiefenänderungen innerhalb eines halben Jahres, Rechnung SW 12.5m/s, (rot:Sedimentation)

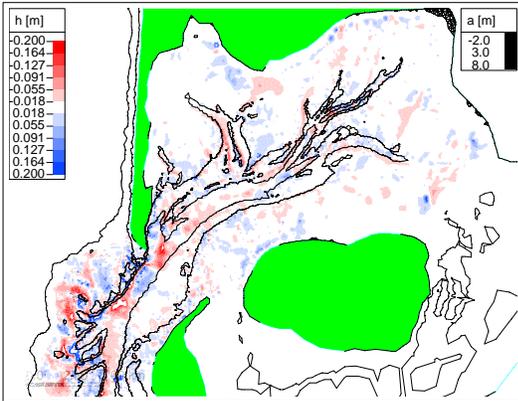


Abbildung 71: Tiefenänderungen innerhalb einer Tide, Rechnung NW 7.5m/s, (rot:Sedimentation)

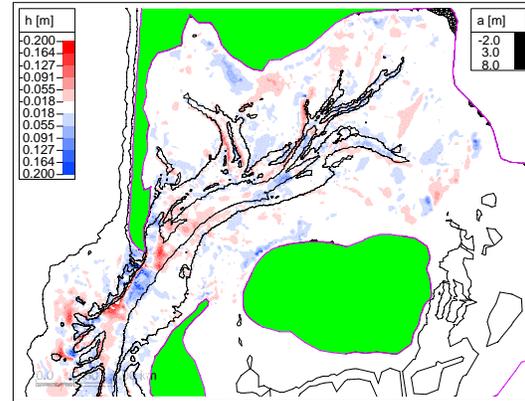


Abbildung 72: Tiefenänderungen innerhalb einer Tide, Rechnung O 7.5m/s, (rot:Sedimentation)

- Rinnenverlagerung in nördliche Richtung zwischen Eidumtief und Westerley
- überwiegende Sedimentation im Endbereich Hörnumtief

Ergänzend seien in den **Abbildungen 71 und 72** noch die Ergebnisse innerhalb einer Tide bei einer NW- und einer Ostwindlage (Windgeschwindigkeit jeweils 7.5 m/s) dargestellt.

Die sich ausbildenden morphologischen Veränderungen gleichen einander aus qualitativer Sicht. Örtlich kann es zu leichten Unterschieden kommen, die sich vor allem auch in ihrer quantitativen Ausprägung äußern können.

### 7.3.2 Rechnungen mit repräsentativen Seegangsereignissen

Aus den in Kapitel 7.2.2 bestimmten repräsentativen Windereignissen wird eine Sequenz von Situationen definiert:

1. S 7.5m/s, Wichtungsfaktor 0.3
2. SW 12.5m/s, Wichtungsfaktor 0.05
3. W 12.5m/s, Wichtungsfaktor 0.1
4. NW 7.5m/s, Wichtungsfaktor 0.35

Die stärksten Morphologieänderungen finden auf den Theeknobssänden und im Rinnenbereich südlich von Sylt statt. Auch in den tieferen Bereichen vom Osterley kommt es zu starken Morphologieänderungen.

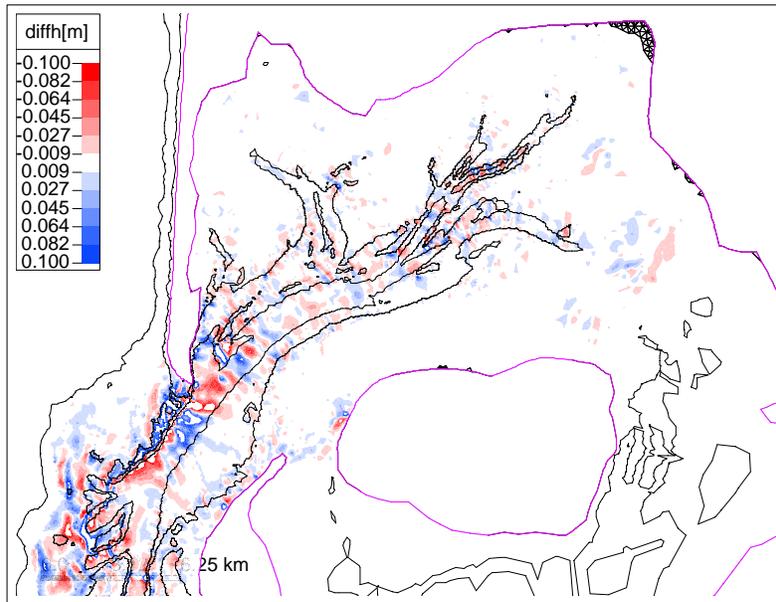


Abbildung 73: Tiefenänderungen innerhalb einer Tide, Wichtungsfaktor 0.3, Rechnung S 7.5m/s, (rot:Sedimentation)

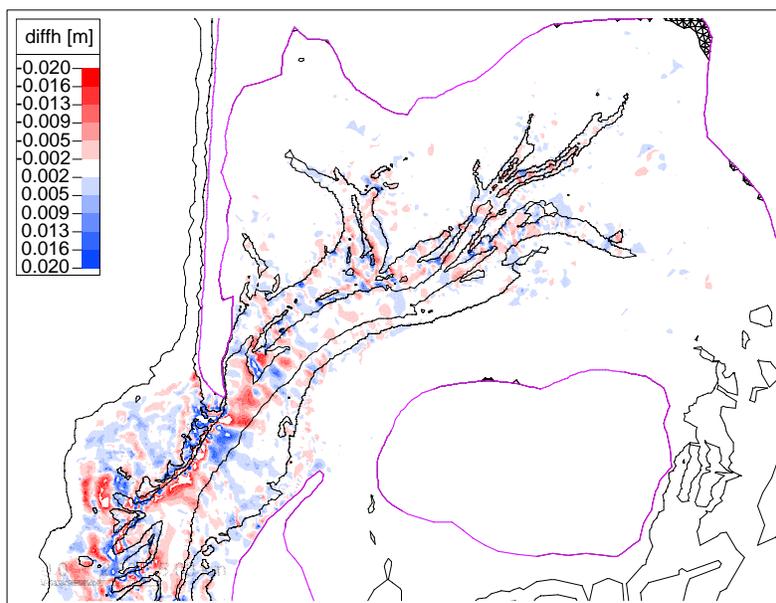


Abbildung 74: Tiefenänderungen innerhalb einer Tide, Wichtungsfaktor 0.05, Rechnung SW 12.5m/s, (rot:Sedimentation)

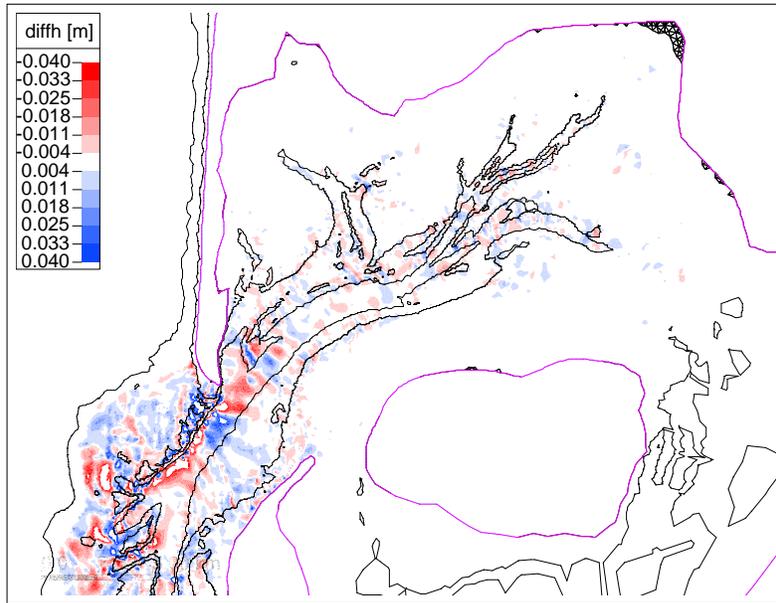


Abbildung 75: Tiefenänderungen innerhalb einer Tide, Wichtungsfaktor 0.1, Rechnung W12.5m/s, (rot:Sedimentation)

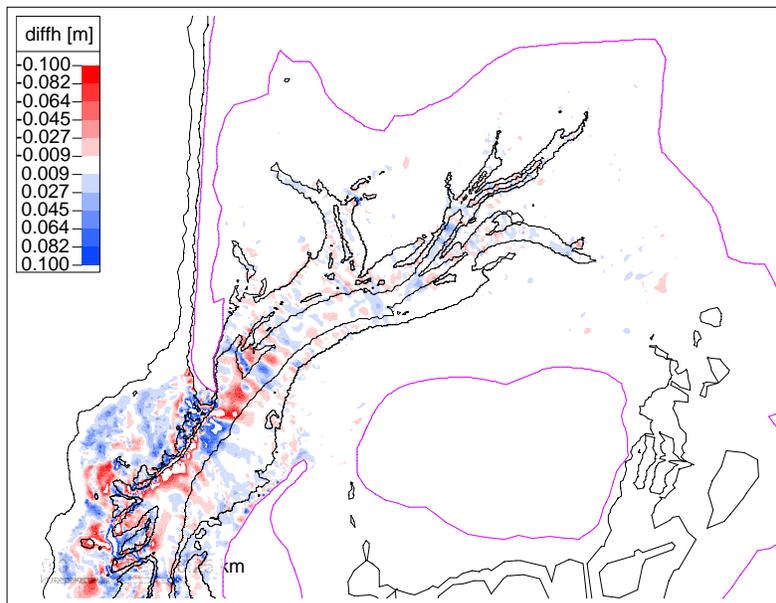


Abbildung 76: Tiefenänderungen innerhalb einer Tide, Wichtungsfaktor 0.35, Rechnung NW 7.5m/s, (rot:Sedimentation)

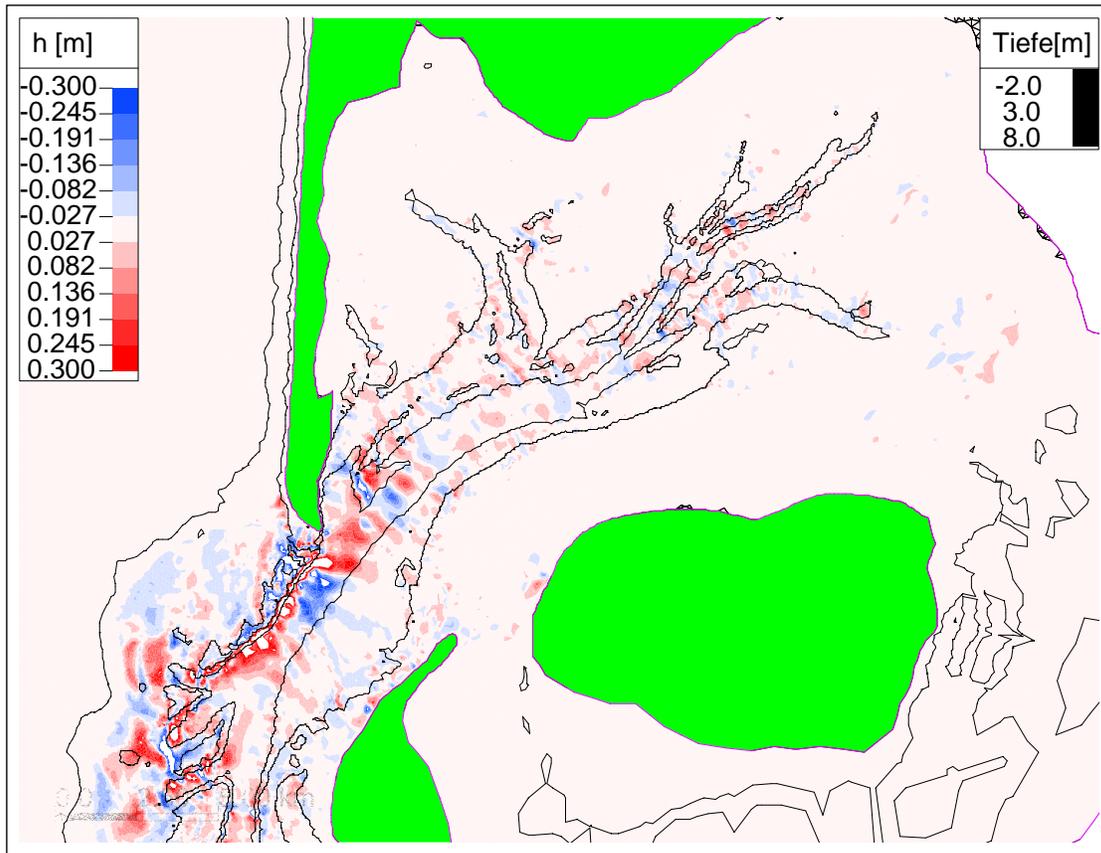


Abbildung 77: Tiefenänderungen innerhalb einer Tide nach Berücksichtigung von 4 repräsentativen Ereignissen, (rot:Sedimentation)

Die stärksten Unterschiede zu den nachfolgenden Rechnungen finden sich im Bereich der Rantumlohe. Durch die Abschattung kommt es hier bei unterschiedlichen Windlagen zu stark variierenden Seegangbelastungen.

Stärkere Unterschiede ergeben sich natürlich an den Außensänden, weil es hier zu stark variierenden Wellenanaufrichtungen kommt.

## 8 Teilmodell Außensände

Da aus der Datenanalyse ein signifikanter Trend zu einer Südwärtsbewegung der Außensände auszumachen war, sollte dieser Abschnitt in einem Teilmodell hochauflösend abgebildet werden. Die in der Natur in diesem Bereich aufgetretenen morphologischen Veränderungen sind in **Abbildung 78** dargestellt.

Die Rinnen zwischen den Sänden haben sich in südliche Richtung verlagert, und zwischen Holtknobsand und Jungnamensand hat sich eine Rinne neu gebildet. Das Hörnumloch unterlag einer Sedimentation.

Um eine Vergleichbarkeit mit der Natur zu erreichen wird für die Rechnung als Ausgangstopographie die Aufnahme von 1955 herangezogen, da im Außenbereich nur 2 Aufnahmen von 1955 und 1974 vorliegen. Eine hohe räumliche Auflösung des Rechengitters ist erforderlich, um dem in diesem Teilbereich bedeutsamen Küstenlängstransport Rechnung zu tragen. Die östliche Begrenzung wird durch das Seegat Hörnumtief gebildet. Die zugehörige Randbedingung wird aus einem übergeordneten Modell bereitgestellt.

Es werden einzelne Sturmrechnungen durchgeführt. Die Berechnung eines längeren Zeitraumes erscheint bei dem begrenzten Modellgebiet nicht sinnvoll, da der mit dem Ebbstrom aus dem Tidebecken heraustransportierte Sedimentstrom nicht exakt berücksichtigt werden kann. Dieser hat aber eine wesentliche Bedeutung beim Aufbau des Ebbdeltas.

Gleichzeitig sollten hier aber auch verschiedene Windrichtungen und ihr morphologischer Effekt untersucht werden.

Im folgenden werden die Rechenergebnisse eines NW-Sturmes mit Windstärke 8 (17.5 m/s) und ein SW-Sturm mit gleicher Windstärke dargestellt.

Die Ergebnisse nach einem Zeitraum von 2 Tiden sind in den **Abbildungen 79 und 80** dargestellt.

Es zeigt sich, daß eine Südwärtsbewegung des Ebbdeltas berechnet wird. Material gelangt auf den Sänden durch die hohe Seegngsbelastung in Suspension und wird anschließend durch die Strömung in die Rinnen verlagert. Dies findet bei NW und SW-Situationen in ähnlicher Weise statt. Dies ist in **Abbildung 81** verdeutlicht, wo die Differenzen der jeweiligen Tiefenänderungen zueinander dargestellt sind.

Die Ursachen dafür sollen im weiteren dargelegt werden: In **Abbildung 82** sind die Wellenanlaufrichtungen für die SW-Situation dargestellt. Es wird deutlich, daß die Wellen refraktionsbedingt selbst bei SW-Situationen aus westlicher bis nordwestlicher Richtung auf die Theeknobssände auflaufen.

Die Morphologieänderungen in den Flut- bzw. Ebbphasen sind in den **Abbildungen 83 und 84** dargestellt. Es zeigt sich, daß vornehmlich während der Flutphasen mit hohen Wasserständen Material auf den Sänden erodiert wird und anschließend mit der Strömung in die benachbarten Rinnen verlagert

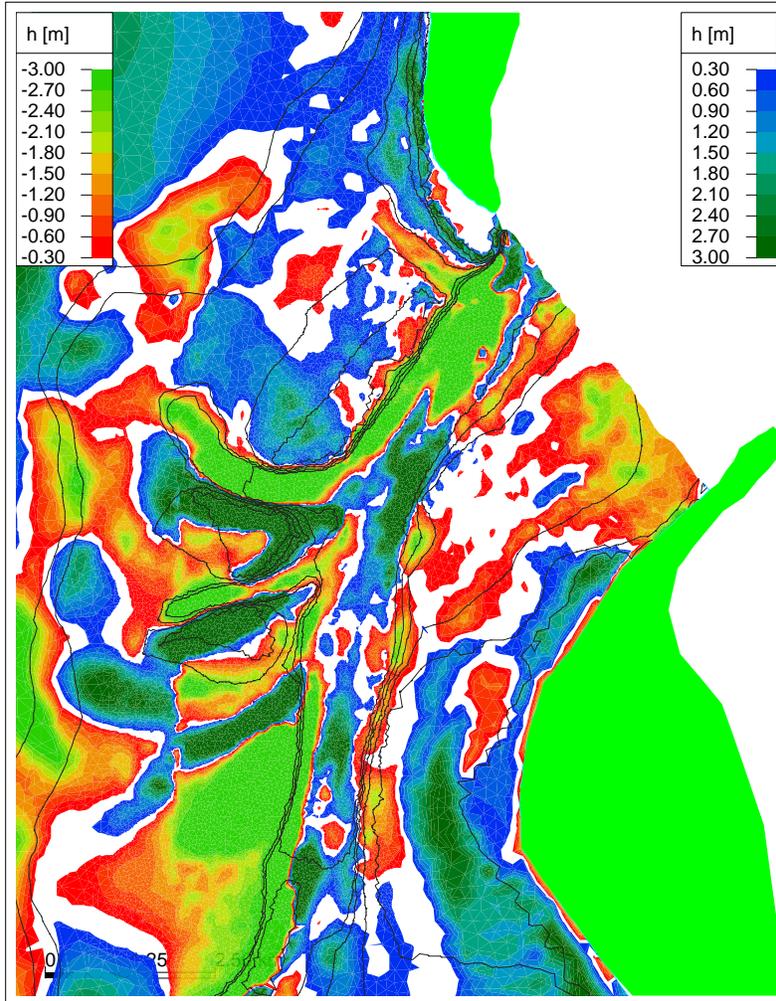


Abbildung 78: Tiefenänderungen im Außenbereich zwischen 1955 und 1974, (grün bis rot: Sedimentation)s

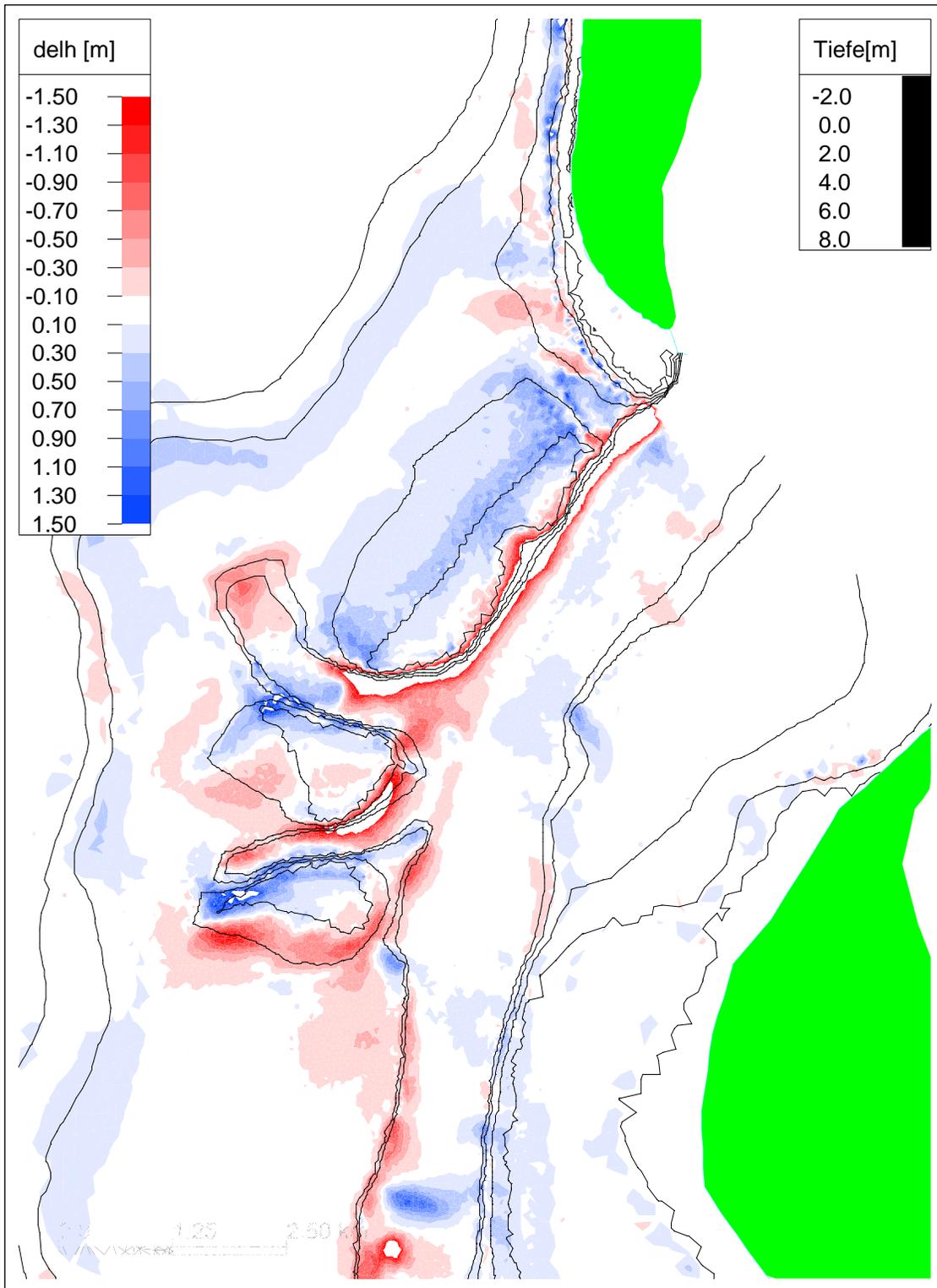


Abbildung 79: Tiefenänderungen innerhalb von 2 Tiden Rechnung NW 17.5m/s

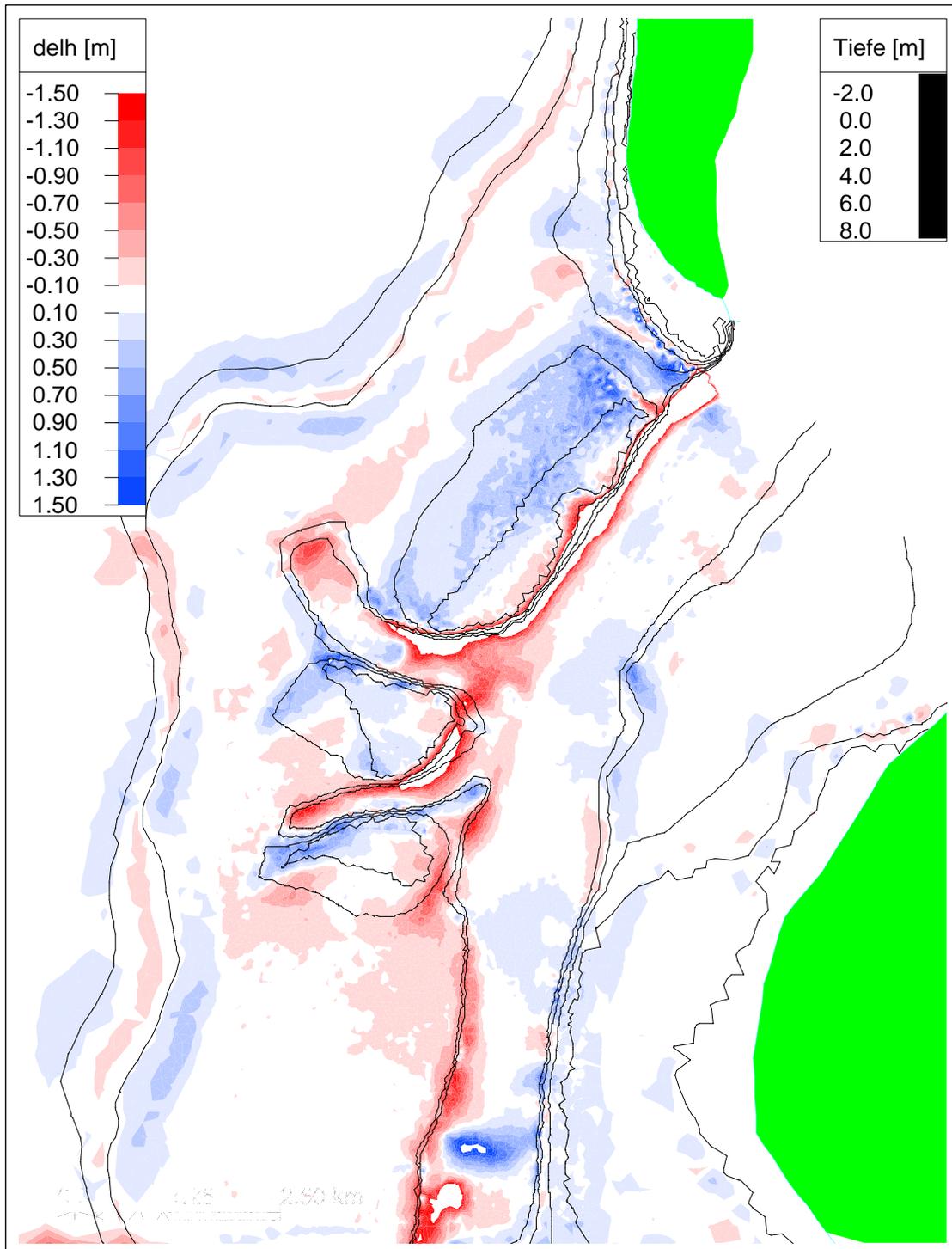


Abbildung 80: Tiefenänderungen innerhalb von 2 Tiden Rechnung SW 17.5m/s

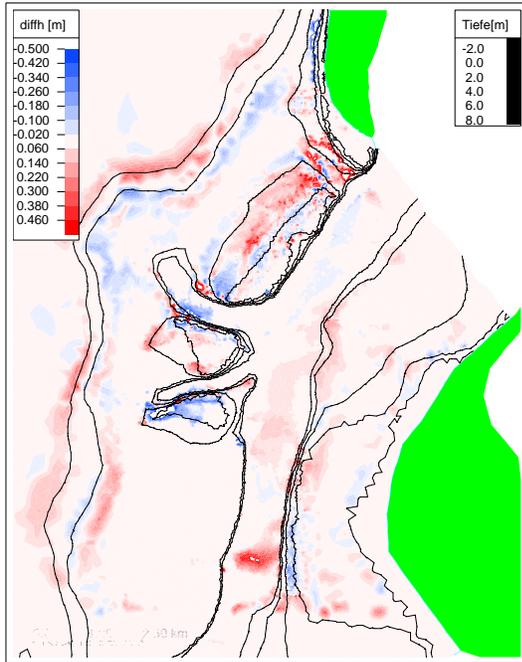


Abbildung 81: Differenz der Tiefenänderungen zwischen Rechnung NW 17.5m/s und Rechnung SW 17.5m/s

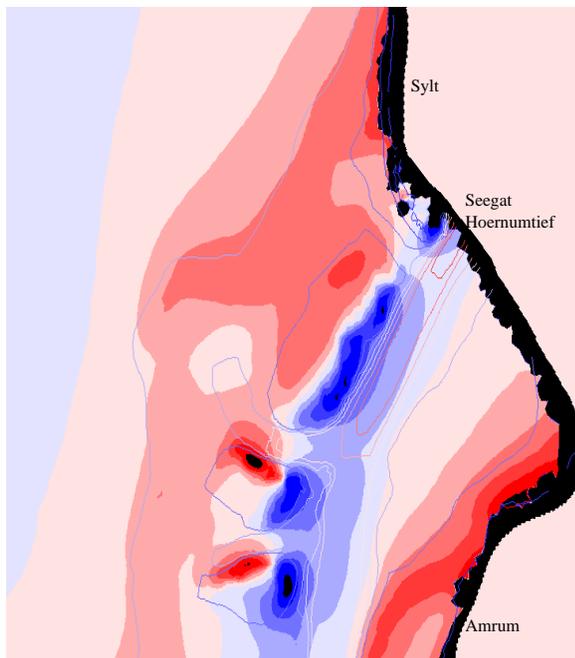


Abbildung 82: Wellenanaufrichtung bei SW 17.5 m/s (Skala von  $180^\circ$  (blau) bis  $280^\circ$  (rot))

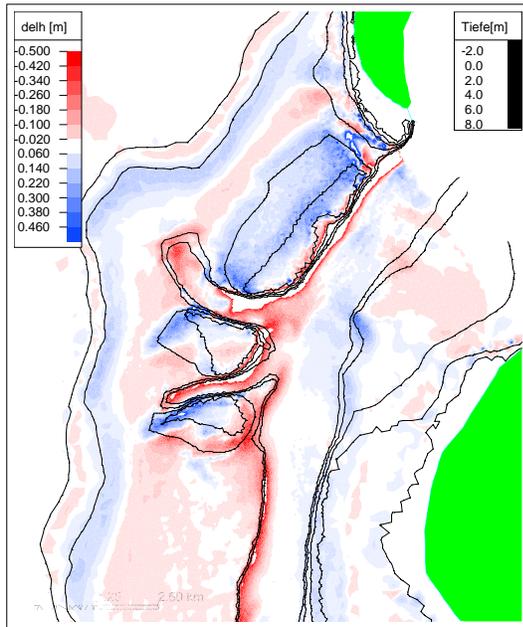


Abbildung 83: Tiefenänderungen innerhalb einer Flutphase Rechnung NW 17.5m/s

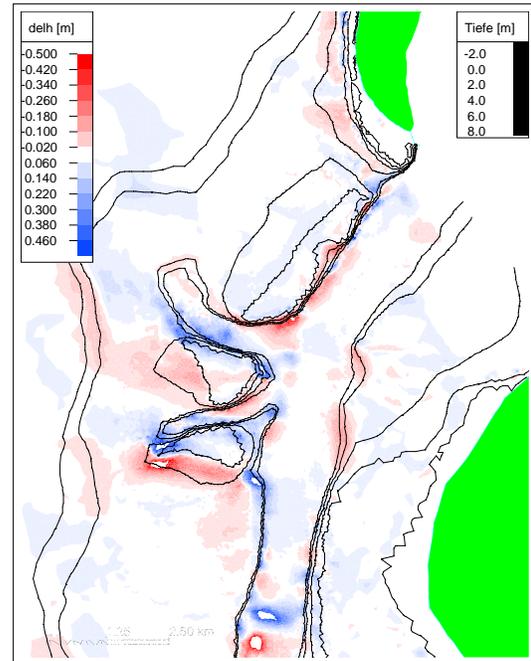


Abbildung 84: Tiefenänderungen innerhalb einer Ebbphase Rechnung NW 17.5m/s

wird. Während der Ebbe werden aufgrund von niedrigeren Wasserständen nur geringere Wellenhöhen erreicht. Daher gerät bedeutend weniger Sediment in Suspension, und die Strömung verläuft fast ausschließlich durch die zwischen den Sänden gelegenen Rinnen, so daß das auf den Sänden suspendierte Material nicht in so starkem Maße wegtransportiert wird.

Generell hat sich gezeigt, daß das morphodynamische Modell TIMOR in der Lage ist, den in diesem Bereich vorhandenen morphodynamischen Trend gut wiederzugeben.

## 9 Dithmarscher Bucht

### 9.1 Projektgebiet Dithmarscher Bucht

Aufgrund der Datenlage im Hörnumbecken wurde die Dithmarscher Bucht als zusätzliches Projektgebiet berücksichtigt. Wegen der kürzeren Förderdauer sollte in diesem Gebiet aber auf eine Berücksichtigung des Seegangs verzichtet werden.

Ausschlaggebend für die Wahl der Dithmarscher Bucht war das morphodynamische Signal, das aufgrund von 2 Vordeichungen, die im Zuge des Generalplans Deichverstärkung, Deichverkürzung und Küstenschutz in Schleswig-Holstein ausgeführt wurden, hier vorhanden war.

Die Lage der Dithmarscher Bucht, ihre Tiefenverteilung und die Fläche des in die Volumenbilanz einbezogenen Bereichs sind in **Abbildung 88** dargestellt.

Mit der ersten Vordeichung im Jahr 1972 wurden  $11.5 \text{ km}^2$  im Südosten der Dithmarscher Bucht abgetrennt. Die Vordeichung betraf ausschließlich den Endbereich des Sommerkoog-Steertlochs. 1978 wurden mit der zweiten Vordeichung weitere  $22.5 \text{ km}^2$  aus dem Einzugsgebiet der Priele Wöhrdener Loch und Kronenloch eingedeicht.

Vom ALR Husum wurden 3 Peildatensätze zur Verfügung gestellt. Der erste Datensatz stammt aus dem Jahr 1969, also aus der Zeit vor der ersten Vordeichung. Er wurde im nordöstlichen Bereich durch Aufnahmen von 1970 ergänzt. Der zweite Datensatz wurde fast vollständig in 1976 aufgenommen. Lediglich ein kleiner Teil im Bereich Tertiusstrand stammt aus dem Jahr 1979. Der dritte Datensatz stammt aus dem Jahr 1985. Hier wurden lediglich einige Bereiche westlich des Tertiusstrandes durch Aufnahmen von 1986 ergänzt.

### 9.2 Differenzendarstellungen

Wie auch schon für das Projektgebiet Hörnumbecken werden Differenzendarstellungen erzeugt, die flächenhaft die morphologische Entwicklung des Gebietes von einem Zeitpunkt zum andern darstellen.

#### 9.2.1 Differenzen 1969 - 1976

In **Abbildung 85** sind die Tiefenänderungen zwischen den Aufnahmen von 1969 und 1976 dargestellt. In diese Zeit fiel die erste Vordeichung im Südosten der Dithmarscher Bucht. Die neue Küstenlinie ist hier deutlich erkennen. In blau sind Bereiche dargestellt, in denen während dieser Zeit Erosion auftrat, in rot entsprechend Sedimentationsflächen.

Die Tiefenänderungen übersteigen teilweise deutlich 5m und erscheinen im Gegensatz zum Hörnumbecken äußerst systematisch. In vielen Abschnitten neigen die Priele zur Mäandrierung: Die Außenkurven werden erodiert. Diese Tendenz läßt sich auch schon aus Isoliniendarstellungen von 1939 und

1959 [24] ausmachen und muß daher als unabhängig vom anthropogenen Eingriff angesehen werden.

Gleichzeitig sind in den Endbereichen des Sommerkoog-Steertlochs deutliche Sedimentationserscheinungen zu erkennen. Diese dürften auf die Vordeichung zurückzuführen sein. In diesem Zeitraum bildete sich auch eine Verbindung vom Einzugsgebiet des Sommerkoog-Steertlochs in das des Kronenlochs aus. Auch das dürfte auf die starken Veränderungen im Tidebecken zurückzuführen sein.

Die Baggerlöcher, aus denen Material zum Dammbau entnommen wurde, sind in der Darstellung als starke Erosionsflächen gut auszumachen. Auffällig sind weiterhin eine Verlagerung des Neumannsloch westlich von Büsum, eine Sedimentation im Russenloch und Mäandrierungserscheinungen im Sandloch.

### 9.2.2 Differenzen 1976 - 1985

In **Abbildung 86** sind die Tiefenänderungen zwischen den Aufnahmen von 1976 und 1985 dargestellt. Die morphologischen Veränderungen der Jahre 1976 bis 1985 weisen ein ähnliches Erscheinungsbild auf. An vielen Stellen läßt sich eine Mäandrierung mit Erosionserscheinungen in den Außenkurven erkennen. Die Sedimentationserscheinungen im Endbereich des Sommerkoog-Steertloch halten an, wenn auch in schwächerem Maße. Aufgrund der zweiten Vordeichung kommt es nun auch vor allem im Bereich des Wöhrdener Lochs zu Sedimentationserscheinungen. Im Bereich der Piep östlich der Vereinigung von Norderpiep und Süderpiep kommt es zu einer Eintiefung und Verschmälerung. Im Sandloch und im Russenloch kommt es zu Mäandrierungserscheinungen.

### 9.2.3 Differenzen 1969 - 1985

In **Abbildung 87** sind die Tiefenänderungen zwischen den Aufnahmen von 1969 und 1985 dargestellt. Betrachtet man den Gesamtzeitraum so fallen hauptsächlich die vielfältigen Mäandrierungen und natürlich die Sedimentationserscheinungen westlich des neuen Deichs auf.

## 9.3 Volumenbilanz

Die abgedichteten Flächen und das damit dem Tidebecken verloren gegangene Volumen sind in **Abbildung 89** dargestellt.

Die Flächen und Volumina sind auf das Tidehochwasser bezogen, welches in der Dithmarscher Bucht bei ungefähr 1.5 müNN liegt. Hier wird der MTHw-Wert gewählt, da die meisten empirischen Beziehungen zwischen beispielsweise Tideprisma und Tidebeckenfläche auf Tidegrößen und nicht auf absolute Größen bezogen sind, da diese ja auch die treibenden Kräfte darstellen. Daher unterscheiden sich die Flächenänderungen leicht von denen weiter oben erwähnten, die auf die Deichlinie bezogen sind.

Zwischen 1969 und 1976 wurde die Tidebeckenfläche unter MTHw um  $13.8 \text{ km}^2$  reduziert, wobei 11.5

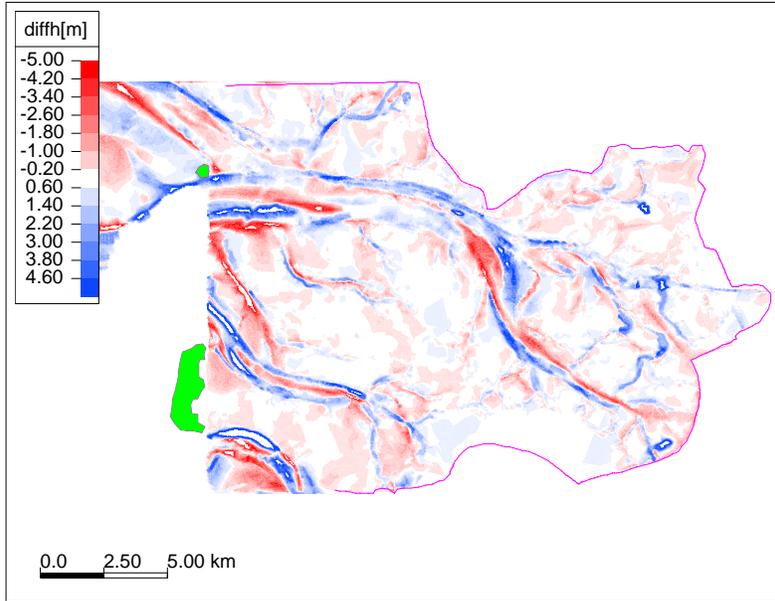


Abbildung 85: Tiefenänderungen 1969 - 1976 (blau: Erosion) mit Lage der Inseln Trischen und Blauort-sand

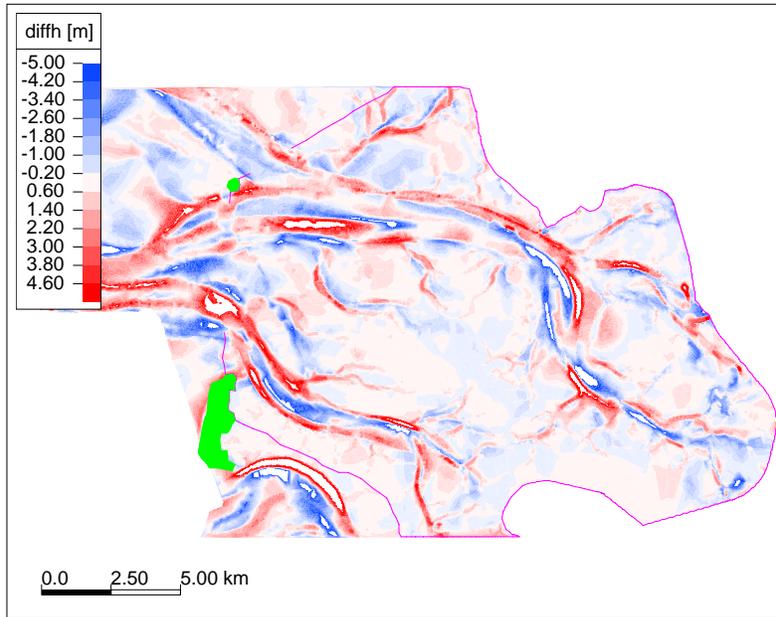


Abbildung 86: Tiefenänderungen 1976 - 1985 (blau: Erosion) mit Lage der Inseln Trischen und Blauort-sand

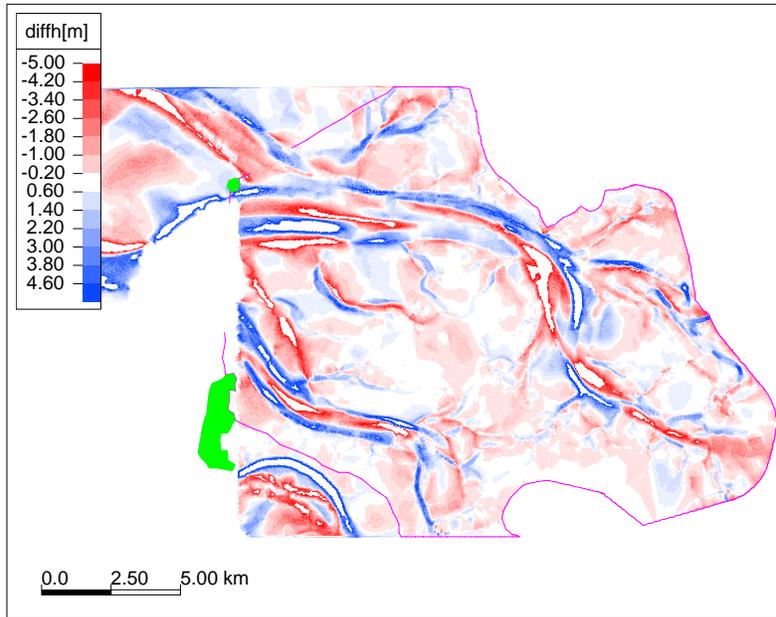


Abbildung 87: Tiefenänderungen 1969 - 1985 (blau: Erosion) mit Lage der Inseln Trischen und Blauort-sand

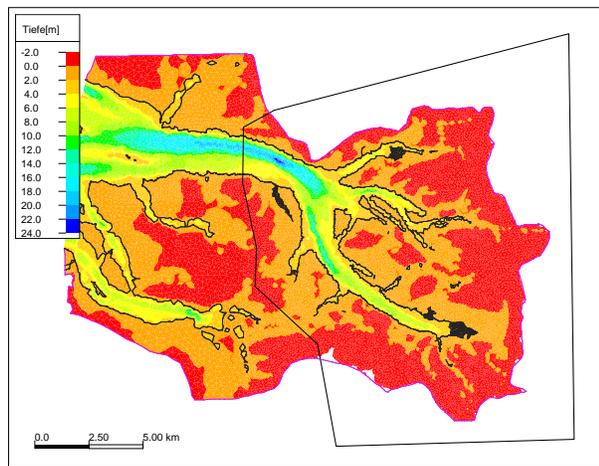


Abbildung 88: Lage des in die Sedimentbilanz einbezogenen Bereichs (umrahmt)

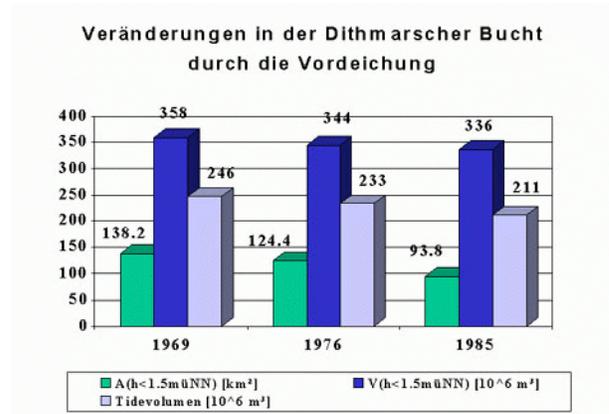


Abbildung 89: Flächen- und Volumenänderung innerhalb der Dithmarscher Bucht durch die Vordeichung

$\text{km}^2$  auf eine Verringerung des vor dem Deich liegenden Gebiets zurückzuführen sind. Die restliche Fläche von  $2.3\text{km}^2$  hat sich also in dieser Zeit über das MTHw erhöht, liegt aber dennoch vor dem Deich.

Zwischen 1976 und 1985 verringerte sich die unter MTHw liegende Fläche noch einmal um  $30.6 \text{ km}^2$ , von denen  $22.5 \text{ km}^2$  auf die vor dem Deich liegende Fläche entfallen. Die restlichen  $8.1 \text{ km}^2$  sind innerhalb dieses Zeitraums auf über  $1.5\text{müNN}$  gestiegen.

Zwischen 1969 und 1976 hat sich das Tidevolumen um  $13 \text{ Mio. m}^3$  verringert, was in etwa der Abnahme des Beckenvolumens entspricht.

Zwischen 1976 und 1985 hat sich das Tidevolumen um  $22 \text{ Mio. m}^3$  verringert, wohingegen sich das Beckenvolumen nur um  $8 \text{ Mio. m}^3$  verringert hat. In dieser Zeit wurden also in großem Maßstab Material aus den tieferen Bereichen in die Intertidalfächen transportiert. Ob dies nur eine vorübergehende Erscheinung ist, kann anhand der 3 Vermessungsdatensätze nicht abschließend beurteilt werden.

Die nach empirischen Gleichgewichtsbeziehungen damit zu erwartenden Sedimentationsmengen sind beispielsweise bei Niemeyer [13] zusammengestellt.

#### 9.4 Morphodynamische Modellierung Dithmarscher Bucht

Im Projektgebiet Dithmarscher Bucht stand die Frage im Vordergrund, ob das in der Natur durch den starken Eingriff hervorgerufene morphodynamische Signal mit dem morphodynamischen Programm TIMOR nachbildbar ist. Diese Fragestellung bildete den Ausgangspunkt, um die Dithmarscher Bucht als zusätzliches Projektgebiet in die Untersuchung einzuschließen. Hierbei sollte der Seegang vernachlässigt werden, seine Rolle wurde im Vorfeld des Projektes als untergeordnet eingeschätzt.

	1969	1976	1985	Damm1	Damm2
69	X				
Damm72	X			X	
76		X		X	
Damm79		X		X	X
85			X	X	X

Tabelle 8: Rechnungen mit unterschiedlicher Ausgangstopographie

Von der innerhalb des Projektes erarbeiteten Strukturierung der Einsatzgebiete morphodynamischer Modelle:

- Modellierung der morphologischen Reaktion nach einem starken Eingriff
- Modellierung von lokal begrenzten morphologische Strukturen
- Modellierung der großräumigen Sedimentdynamik

stand hier also der erste, der einfachste Fall im Vordergrund.

Die Bedeutung des Seegangs sollte im Untersuchungsgebiet Hörnumbecken ausführlich untersucht werden. Wie sich allerdings bei den Untersuchungen im Hörnumbecken zeigte, spielt gerade der Seegang für Umlagerungen innerhalb kleinerer Einheiten eine große Rolle.

Zentrale Fragestellungen im Projektgebiet Dithmarscher Bucht waren folgende:

- Kann das von der Vordeichung ausgelöste morphodynamische Signal vom Modell (auch ohne Seegang) wiedergegeben werden?
- Welche Parameter (Korngrößen, wash-load, ...) haben einen Einfluß?

Zu diesem Zweck werden verschiedene Rechnungen ausgeführt. Die Rechnungen unterscheiden sich durch Ausgangstopographie und die jeweils eingefügten Dammabschnitte. Da keine Vermessung direkt nach Baufertigstellung vorliegt, werden die Dammabschnitte jeweils in die vorhergehende und die nachfolgende Topographie eingefügt.

Diese Rechnungen sollten Aufschluß darüber bringen, inwiefern das Modell in der Lage ist, das aus der Vordeichung resultierende morphodynamische Signal wiederzugeben.

Die Ergebnisse sind in den folgenden

Betrachtet man die Berechnungsergebnisse für die unbeeinflusste Topographie von 1969, so zeigt sich, dass in weiten Teilen der Rinnen Erosion berechnet wird. Nur in den Endbereichen der Priele und im Wattgebiet zwischen Kronenloch und Sommerkoog-Steertloch werden größere Sedimentationen berechnet. Insgesamt ist die Volumenbilanz des Gebietes negativ. Ursachen hierfür können in der gewählten

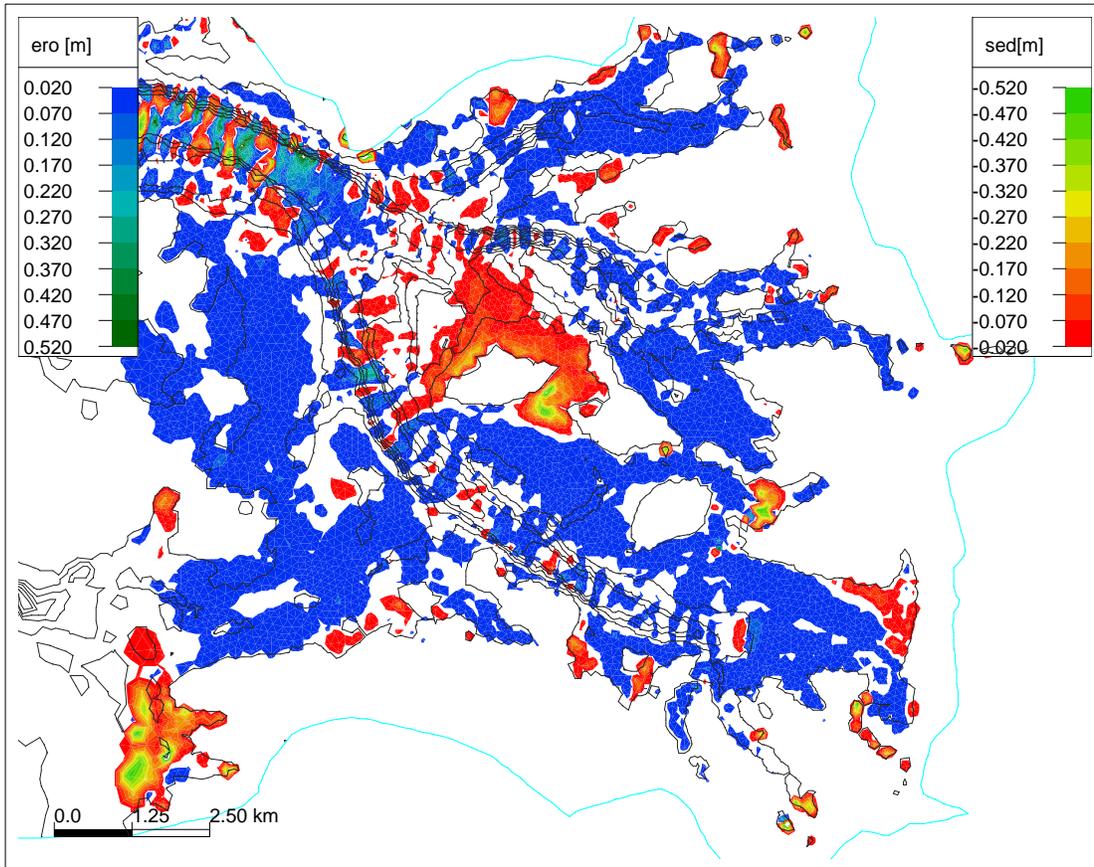


Abbildung 90: Tiefendifferenzen innerhalb von 3 Jahren mit 1969er Ausgangstopographie (grün bis rot: Sedimentation) Sedimentationsvolumen 1.5 Mio.  $m^3$  (41 %)

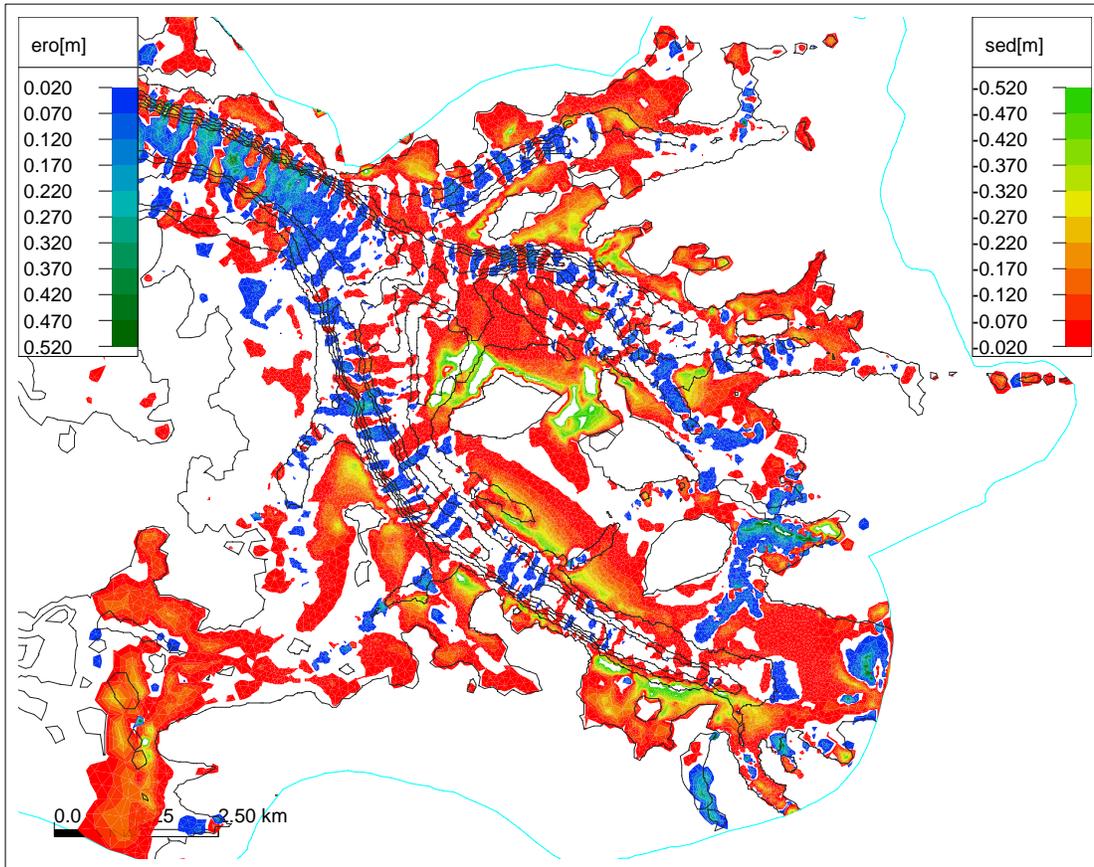


Abbildung 91: Tiefendifferenzen innerhalb von 3 Jahren mit 1969er Ausgangstopographie und eingefügtem ersten Dammschnitt (grün bis rot: Sedimentation) Sedimentationsvolumen 4.5 Mio.  $m^3$  (83 %)

Anfangskornverteilung und der Vernachlässigung des Seegangs liegen (Das Ebbdelta, typischerweise Akkumulationsgebiet während ruhiger Zeiträume, lag außerhalb des betrachteten Gebiets). Das Sedimentationsvolumen liegt bei 1.5 Mio.  $m^3$ , was einem Anteil von 41 % am Gesamtumlagerungsvolumen entspricht.

Die morphologische Wirkung eines starken Eingriffs wird deutlich, wenn in die 1969er Ausgangstopographie der erste Dammschnitt eingefügt wird. Dieser Zustand dürfte die morphologischen Gegebenheiten unmittelbar nach Abschluß des ersten Dammschnittes am besten wiedergeben. Es kommt flächenmäßig, aber insbesondere im unmittelbaren Nahbereich des Dammes zu einer intensiven morphologischen Anpassung. Typisch sind die Akkumulationen an den Rinnenrändern, die auch schon im Hörnumbecken bei Vernachlässigung des Seegangs auftraten. Eine auffällige Erscheinung ist eine sich ausbildende Verbindung vom Sommerkoog-Steertloch in das Einzugsgebiet des Kronenlochs. Diese Verbindung hat sich (wahrscheinlich durch die Vordeichung verursacht) im Gebiet zwischen 1969 und 1976 herausgebildet und wird vom Modell wiedergegeben. Das verringerte Tideprisma macht sich auch im Bereich des Kronenlochs und des Wöhrdener Lochs bemerkbar. Auch hier kommt es zu

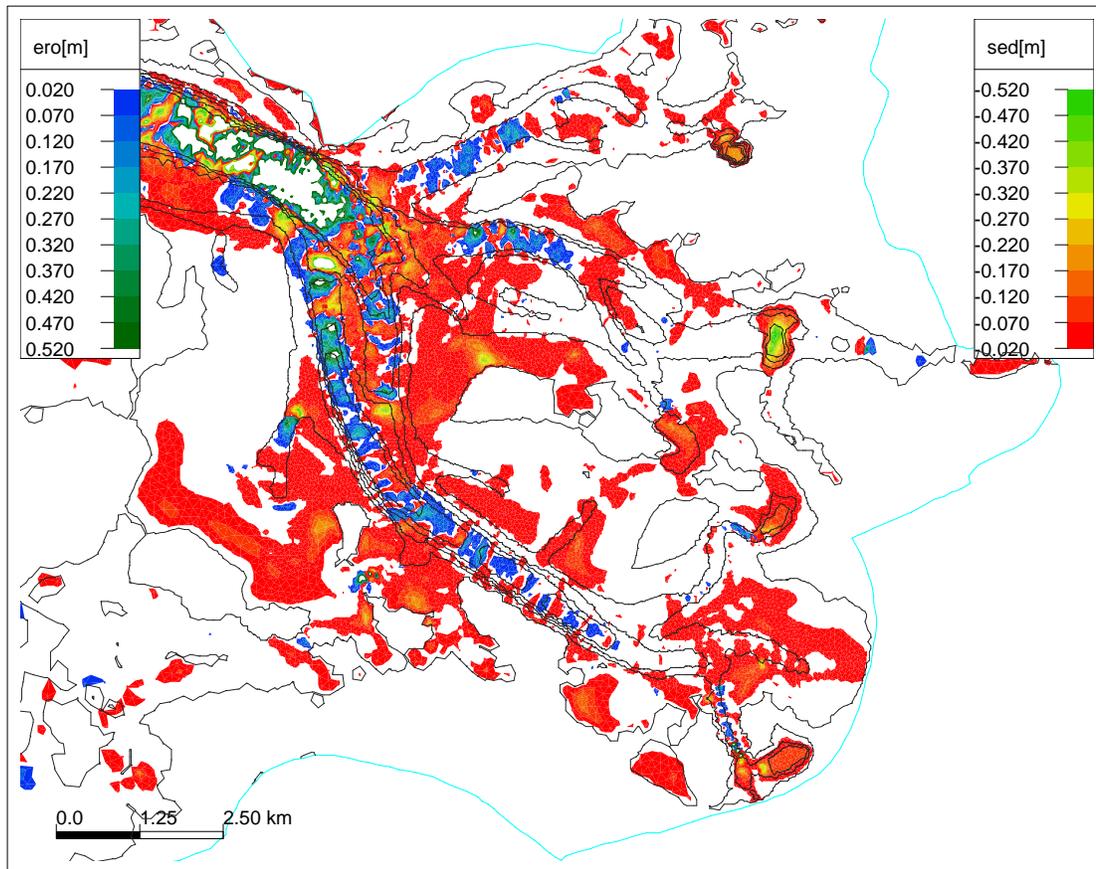


Abbildung 92: Tiefendifferenzen innerhalb von 1.5 Jahren mit 1976er Ausgangstopographie und eingefügtem ersten Dammschnitt (grün bis rot: Sedimentation) Sedimentationsvolumen 2.8 Mio.  $m^3$  (61 %)

Sedimentationen. Ein Teil des sedimentierenden Materials stammt aus den Rinnen, wo eine leichte Erosion festzustellen ist, der andere wird als Schwebstoff über die Gebietsgrenze in das Gebiet transportiert und sedimentiert in strömungsberuhigten Zonen. Die Konzentration des an Wash-Load ins Untersuchungsgebiet strömenden Sediments, ist ein frei wählbarer Parameter des Modells.

Das Sedimentationsvolumen liegt bei 4.5 Mio.  $m^3$  und hat somit einen Anteil von 83 % am Gesamtlagerungsvolumen.

Auch in der Rechnung 76 mit der Ausgangstopographie von 1976 stellt sich eine merkliche Anpassung des Gebiets ein, die allerdings schwächer ausfällt als in Rechnung damm72, was natürlich daran liegt, dass in der Topographie von 1976 bereits die morphologische Anpassung, die sich in den ersten 4 Jahren nach Dammbau eingestellt hat, enthalten ist. Auch in dieser Rechnung wirkt sich das verringerte Tideprisma auf die nördlicher gelegenen Einzugsgebiete von Kronenloch und Wöhrdener Loch aus. Die Verbindung zwischen Sommerkoog-Steertloch und Kronenloch, die sich in den Jahren davor ausgebildet hatte, unterliegt jetzt wieder einer Sedimentation. Das Sedimentationsvolumen beträgt 2.8 Mio.  $m^3$ ,

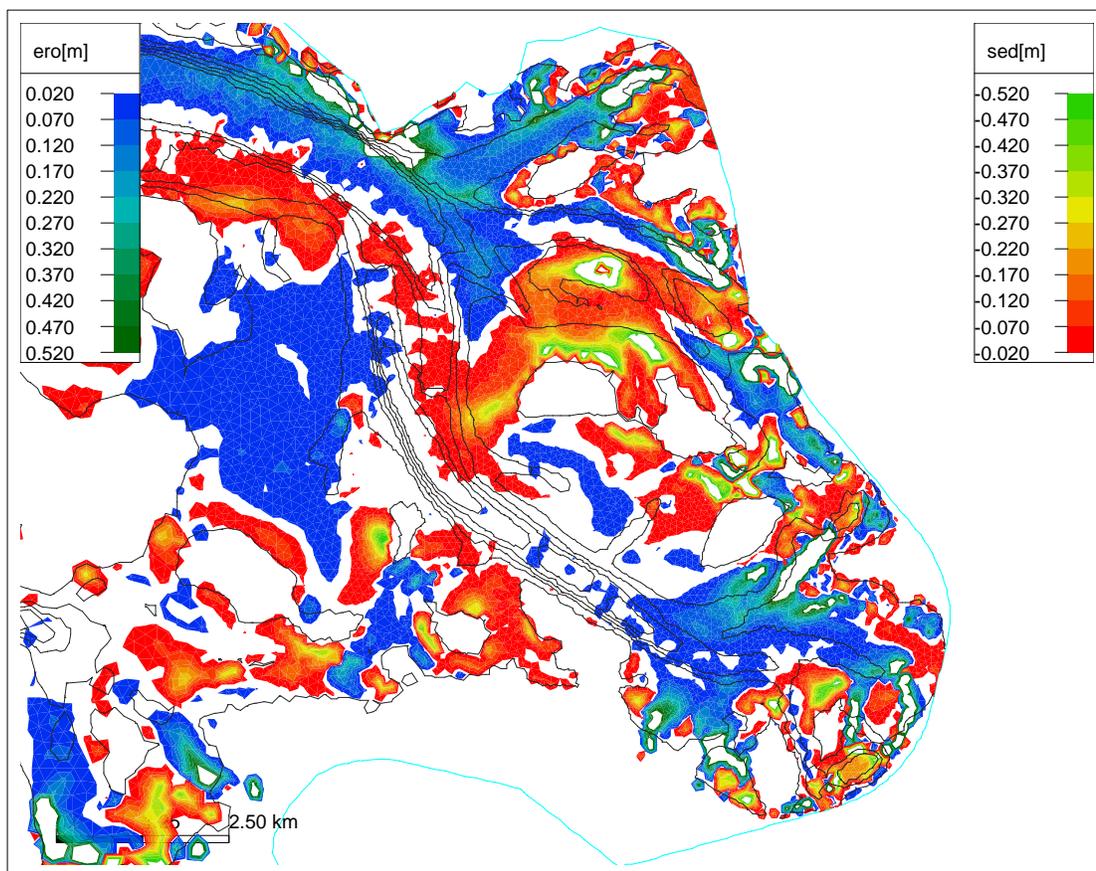


Abbildung 93: Tiefendifferenzen innerhalb von 3 Jahren mit 1976er Ausgangstopographie und eingefügtem zweiten Dammabschnitt (grün bis rot: Sedimentation) Sedimentationsvolumen 1.5 Mio.  $m^3$  (41 %)

was einem Anteil von 61 % am Gesamtumlagerungsvolumen entspricht. Der Berechnungszeitraum betrug hier allerdings nur 1.5 Jahre.

In Rechnung damm79 wird der Einfluß der Vordeichung im Bereich Kronenloch und im Endbereich des Wöhrdener Lochs deutlich. Im Sommerkoog-Steertloch ist die Anpassung schon zu einem großen Teil abgeschlossen. Hier kommt es nur noch zu Sedimentation in unmittelbarer Dammnähe. Das Material für diese Anlagerungen kommt aus den Prielbereichen der näheren Umgebung.

Das Sedimentationsvolumen liegt bei 1.5 Mio.  $m^3$ , was einem Anteil von 41 % am Gesamtumlagerungsvolumen entspricht.

In Rechnung 85 werden starke Sedimentationen auf der Wattfläche zwischen Kronenloch und Sommerkoog-Steertloch berechnet. Auffallend sind weiterhin die starken Sedimentationen in unmittelbarer Deichnähe. Das Material hierzu stammt aus den angrenzenden Prielbereichen, wo eine leichte Erosion berechnet wird.

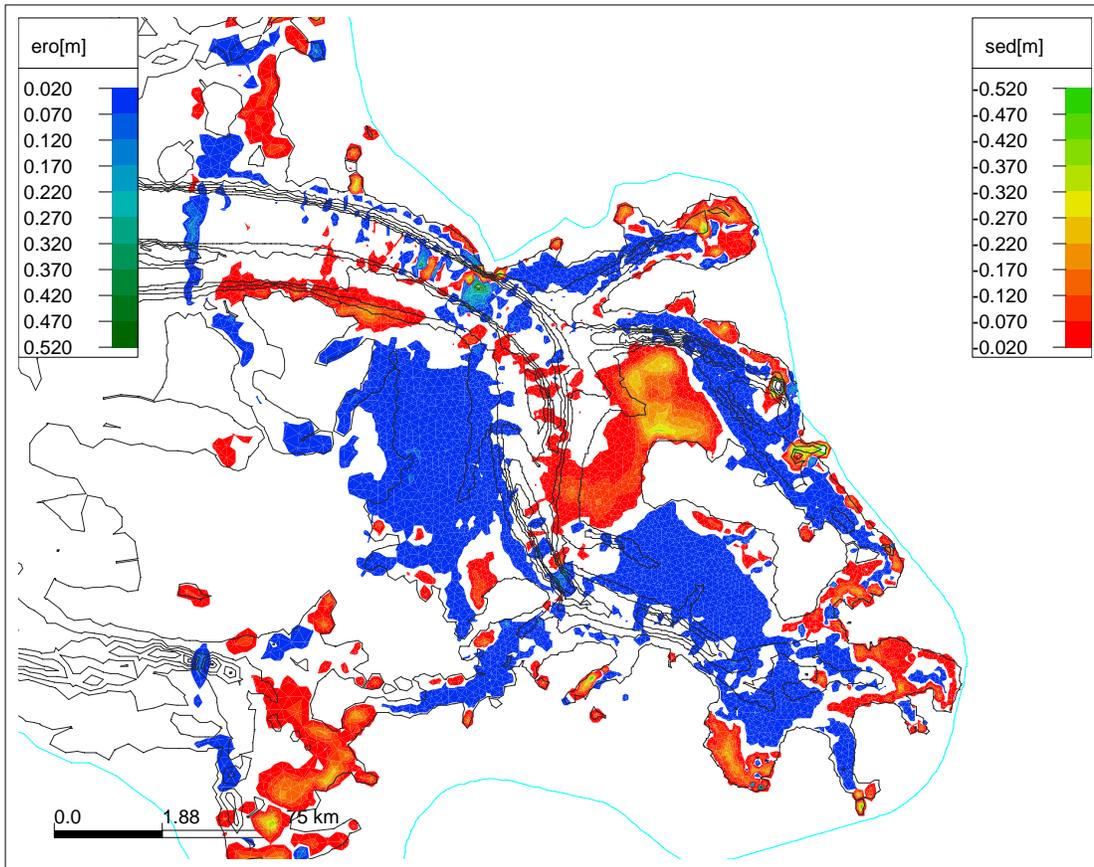


Abbildung 94: Tiefendifferenzen innerhalb von 3 Jahren mit 1985er Ausgangstopographie und eingefügtem zweiten Dammschnitt (grün bis rot: Sedimentation) Sedimentationsvolumen 1.8 Mio.  $m^3$  (59 %)

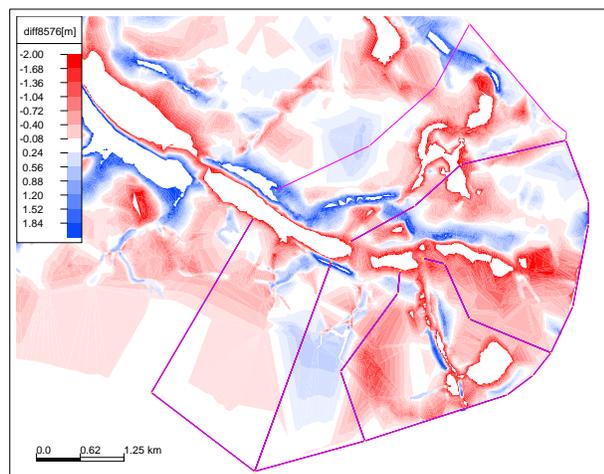


Abbildung 95: Lage der Teilwateinzugsgebiete auf Tiefendifferenzen 1985 - 1976 (rot: Sedimentation)

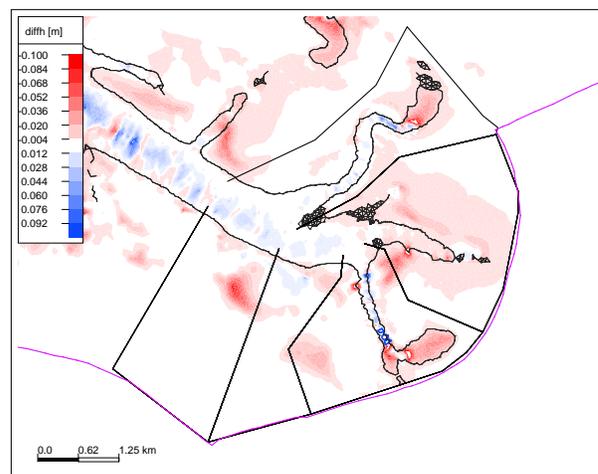


Abbildung 96: Morphologische Veränderungen innerhalb eines halben Jahres Rechnung Bio5Kornsteil (sh. Text)

Das Sedimentationsvolumen liegt bei 1.8 Mio.  $m^3$ , was einem Anteil von 59 % am Gesamtumlagevolumen entspricht.

## 9.5 Morphodynamische Modellierung Dithmarscher Bucht - Bereich vor dem neuen Deich

Zur Beurteilung der Berechnungsergebnisse wird der Bereich vor dem ersten Abdeichungsabschnitt in Teilwateinzugsgebiete eingeteilt. Die Lage dieser Teilwateinzugsgebiete ist in **Abbildung 95** auf den Tiefendifferenzen von 1985 - 1976 dargestellt.

Die Teilwateinzugsgebiete WEG 1 - WEG 5 sind entgegen dem Uhrzeigersinn durchnummeriert. Es ist zu erkennen, daß gerade in WEG 3 und WEG 4, den WEG's direkt vor dem neuen Deich, sehr intensive Sedimentation (rot) stattgefunden hat. In WEG 4 hat sich das Sommerkoog-Steertloch nach Norden hin verschoben. Auch in WEG 3 ist es zu einer kleineren Rinnenverlagerung gekommen. In WEG 1 überwiegt die Sedimentation, jedoch in einem wesentlichen schwächerem Maße als in den WEG's 3 und 4. WEG 2 fällt etwas aus der Reihe, zumal hier noch ein Erosionsbereich der Rinnenverlagerung des Sommerkoog-Steertlochs mitenthalten ist. In WEG 5 ist ein ganzer Prielarm zusedimentiert.

Die morphologischen Veränderungen die innerhalb eines halben Jahres stattfinden, sind in **Abbildung 96** dargestellt. Man erkennt, daß in allen fünf Teilwateinzugsgebieten die Sedimentation dominiert. Insbesondere in den Bereichen direkt vor der Abdeichung (WEG 3 und WEG 4) kommt es zu flächenhaften Sedimentationserscheinungen. Das Sediment hierzu stammt zu einem Teil aus den Rinnen. Dies steht auch in Übereinstimmung mit der Erkenntnis, daß zwischen 1976 und 1985 ein Großteil des in den Intertidalbereichen abgelagerten Materials aus Bereichen stammt, die unterhalb der Niedrigwasserlinie liegen.

In diesen Teilwateinzugsgebieten wird der pattern error als die qualitative und der Anteil des sedimentierten Volumens am Gesamtumlagerungsvolumen als quantitative Beurteilungsgröße herangezogen.

Der Naturwert der qualitativen Beurteilungsgröße entspricht der qualitativen Abweichung (Sedimentation anstelle von Erosion und umgekehrt) der Tiefendifferenzen zwischen 1985-1976 gegenüber denen von 1976-1969. Er stellt somit den Anteil der Flächen, die keinem eindeutigen Trend unterliegen, dar.

Es werden unterschiedliche Simulationen durchgeführt, die sich hauptsächlich in der Form der vorgegebenen Anfangskornverteilung sowie der Intensität der biogenen Produktion unterscheiden. Unter biogener Produktion wird hier einerseits die biogene Produktion von Material durch Primärproduzenten und andererseits die Sedimentation von Material aufgrund biologischer Prozesse verstanden. Auch das an Wash-Load ins Gebiet strömende Material wird hiermit erfaßt. Diese biologischen Prozesse können beispielsweise eine Filteraktivität von Muscheln sein, die Feinstschwebstoffe (Wash-Load) aus dem Wasser saugen. Der Begriff Produktion bezieht sich somit auf die Entstehung eines feinen Sediments, welches zu Beginn der Rechnung im Modellboden noch nicht vorhanden ist, aber im Wasserkörper eintreibt.

Die vorgegebene Anfangskornverteilung ist örtlich variabel jedoch in ihrer Form konstant, das heißt, die Verhältniswerte der Durchmesser bestimmter Perzentilwerte liegen immer in einem konstanten Verhältnis zueinander. Das Verfahren der Vorgabe einer Anfangskornverteilung wurde in Kapitel 4.5 ausführlich dargelegt.

Folgende Simulationen wurden durchgeführt:

- Bio1Kornflach: biologische Produktion  $1 * 10^{-11}$  m/(s\*mWS), Kornverteilung entsprechend der Zuweisung über die Hjulstrøm-Kurve in Abhängigkeit der maximal auftretenden Tidestromgeschwindigkeiten.
- Bio5Kornflach: biologische Produktion  $5 * 10^{-11}$  m/(s\*mWS), Kornverteilung entsprechend der Zuweisung über die Hjulstrøm-Kurve in Abhängigkeit der maximal auftretenden Tidestromgeschwindigkeiten.
- Bio5Kornsteil: biologische Produktion  $5 * 10^{-11}$  m/(s\*mWS), Kornverteilung sehr steil, kommt Einkornverteilung nahe.
- Bio10Kornsteil: biologische Produktion  $10 * 10^{-11}$  m/(s\*mWS), Kornverteilung sehr steil, kommt Einkornverteilung nahe.

### 9.5.1 Qualitativer Fehler

In **Abbildung 97** ist der qualitative Fehler der verschiedenen Simulationen gegenüber der Veränderung zwischen 1976 und 1985 dargestellt.

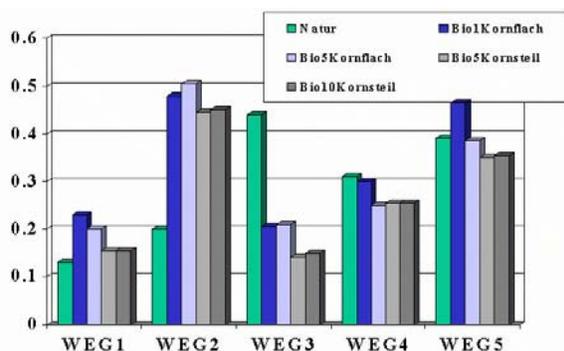


Abbildung 97: Qualitativer Fehler im Bereich vor dem ersten Dammschnitt

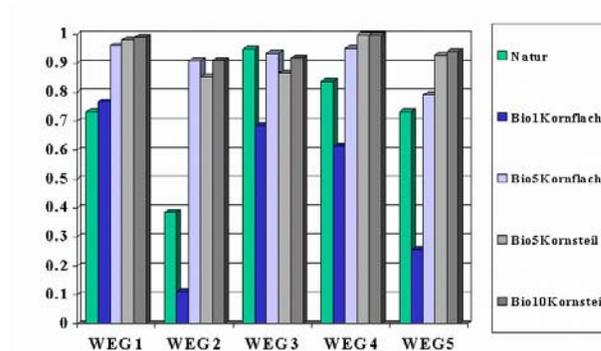


Abbildung 98: Anteil des sedimentierten Volumens am Gesamtumlagerungsvolumen

Generell fällt auf, daß der qualitative Fehler gegenüber der Natur in der selben Größenordnung wie die in der Natur auftretende Zufälligkeit liegt.

In den Teilwateinzugsgebieten 1, 3 und 4 liegt der qualitative Fehler unter 25 %.

Übereinstimmend sind die relativ schwache aber dennoch vorhandene Sedimentation in dem weiter von der Vordeichung entfernten Teilwateinzugsgebiet WEG 1. Der Naturwert des qualitativen Fehlers liegt hier am geringsten, das heißt, daß die Entwicklung hier am eindeutigsten ist. Die Übereinstimmung des Modells mit der Natur sind hier nicht ganz so hoch, weil an der Nordostbegrenzung des WEG 1 noch ein Teil der Rinnenverlagerung des Sommerkoog-Steertlochs mit in das WEG aufgenommen wurde. Solche Rinnenverlagerungen können aber nur mit Berücksichtigung von Seegang modelliert werden, wie sich im Hörnumbecken gezeigt hat.

Auffällig sind die relativ geringen Übereinstimmungen mit WEG 2. Das liegt daran, daß, wie bereits weiter oben erwähnt, dort ein Teil des Erosionsbereiches der Rinnenverlagerung mit in der Abgrenzung des Gebiets enthalten ist. Daher überwiegt in diesem Bereich auch die Erosion. Um diese Erosion auch im Modell zu bekommen, hätte Seegang berücksichtigt werden müssen, da solche Rinnenverlagerungen nur bei Berücksichtigung von Seegang zu modellieren sind, wie sich im Hörnumbecken zeigte.

In WEG 3 erreichen die Simulationen mit steilerer Kornverteilungskurve eine qualitative Übereinstimmung mit der Natur von 85%. Der geringe Naturwert in diesem WEG ist auf ein Baggerloch zurückzuführen, was zwischen 1969 und 1976 wegen des Dammbaus entstand. Aus diesem Grund liegt hier zwischen 1976 und 1969 eine Erosion vor, die aber keine natürliche Ursache hat. In den Jahren danach findet hier natürlich wieder eine Sedimentation statt.

WEG 4 ist von einem Nordschwenk des Sommerkoog-Steertlochs betroffen, der im Modell nicht wiedergegeben wird. Generell werden bessere Ergebnisse mit einer steileren Kornverteilungskurve erreicht. Dies steht auch in Übereinstimmung mit der in der Dithmarscher Bucht dokumentierten relativ einkörnigen Sedimentzusammensetzung.

### 9.5.2 Quantitativer Fehler

Betrachtet man die relative Volumenabweichung in **Abbildung 98** so zeigt sich, daß die Rechnungen mit einer höheren biogenen Produktion in besserer Übereinstimmung mit der Natur liegen. Die Vorgabe einer Rate ist allerdings sehr sensitiv: Während bei einer Vorgabe von  $1 * 10^{-11}$  m/(s\*mWS) der Anteil deutlich unter dem in der Natur auftretenden liegt, erhöht sich dieser Anteil bei der fünffachen Vorgabe auf eine in der Natur auftretende Größenordnung. Gibt man die zehnfache Menge vor, wird der Anteil des sedimentierenden Volumens am Gesamtumlagerungsvolumen zu hoch. Dieser Prozeß ist jedoch hochgradig nichtlinear. Bei einer Berücksichtigung des Seegangs kann sich dieses Ergebnis noch ändern, weil dann Umverteilungsmechanismen innerhalb kleinerer Einheiten eine zunehmende Rolle spielen.

Bezüglich des quantitativen Fehlers spielt also die Intensität biologischer Sedimentationsprozesse eine größere Rolle, derweil der qualitative Berechnungsfehler stärker von der Vorgabe einer Kornverteilung beeinflußt wird.

## 9.6 Vergleich mit Naturdaten für den Zeitraum eines Sommerhalbjahres

Anhand eines weiteren Beispiels sollen die Möglichkeiten des Modells TIMOR, lokal begrenzte morphologische Strukturen zu modellieren, aufgezeigt werden. Gast und Köster [8] dokumentierten Morphologieänderungen, die während der Sommerperiode 1978 aufgetreten sind. Diese Periode ist von einer weitgehend ruhigen Wetterlage mit nur wenigen bedeutenderen Seegangereignissen gekennzeichnet. Für diesen Zeitraum kann von einer klaren Tidedominanz ausgegangen werden.

In **Abbildung 99** sind die von Gast und Köster [8] dokumentierten Morphologieänderungen innerhalb eines Sommerhalbjahres dargestellt. Der südliche Bereich war zu diesem Zeitpunkt bereits abgedeicht. Der nördliche Bereich wurde im Jahr 1978 endgültig abgedeicht, war im Sommer 1978 zu einem Großteil schon abgedeicht. Über den genauen Verlauf der Abdeichung lagen keine Informationen vor. Die vergleichende morphodynamische Rechnung beruht daher auf der Topographie von 1976, wo nur der südliche Bereich abgedeicht war. Die dunklen Flächen in **Abbildung 99** entsprechen hierbei Sedimentationen zwischen 15cm und 30cm. Horizontal gestreifte Bereiche weisen eine Sedimentation kleiner 15cm aus. In Rot sind die Bereiche durchnummeriert, in denen auch mit TIMOR intensive Sedimentationserscheinungen berechnet werden:

- Bereich 1: Südlich des Hundslochs
- Bereich 2: Südlich des Helmsander Lochs
- Bereich 3: Nördlich des Helmsander Dammes
- Bereich 4: Südlich des Kronenlochs in einem Prielzweig

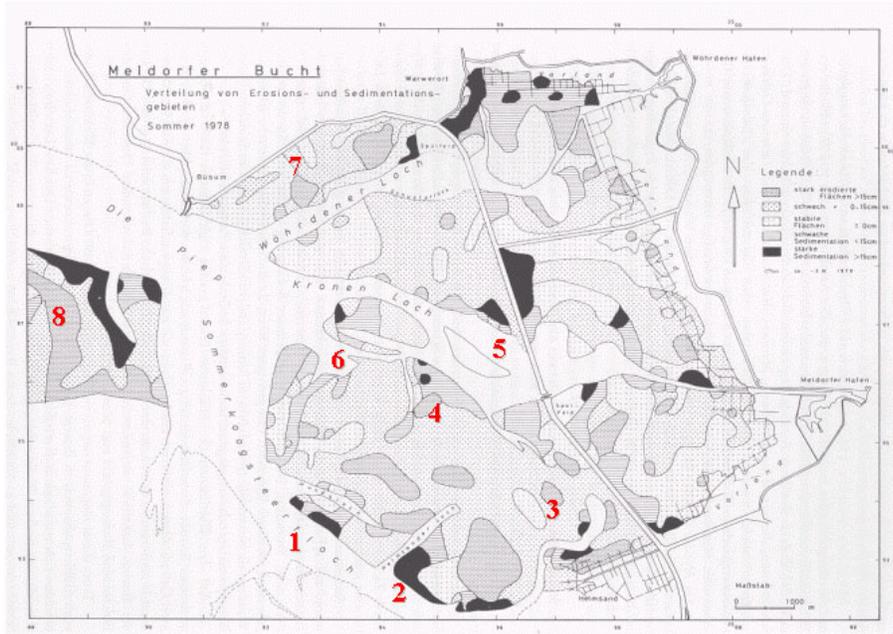


Abbildung 99: Dokumentierte Morphologische Veränderungen innerhalb des Sommers 1978

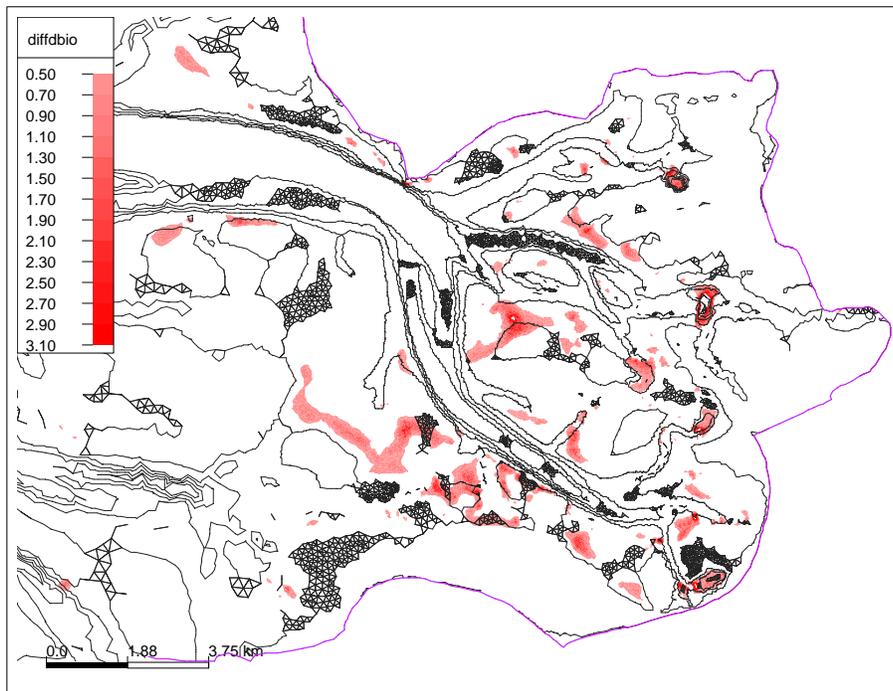


Abbildung 100: Bereiche mit intensiver berechneter Biosedimentation

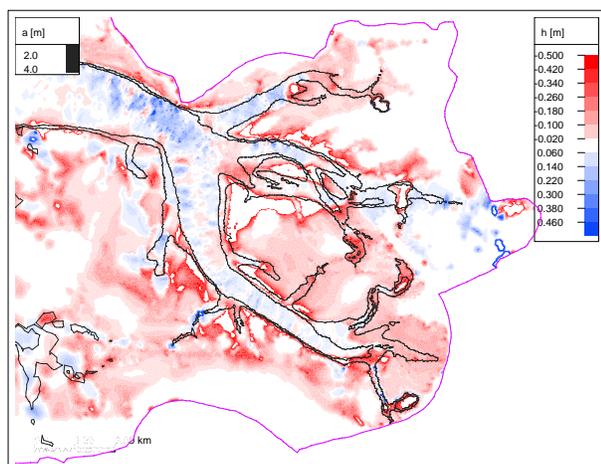


Abbildung 101: Morphologieänderungen bei steigendem Meeresspiegel innerhalb von 50 Jahren

- Bereich 5: nördlicher Endbereich Kronenloch
- Bereich 6: Insel Bereich Kronenloch
- Bereich 7: Prielarm nördlich des Wöhrdener Lochs
- Bereich 8: Südufer der Piep

Die Ursache für diese Sedimentationserscheinungen sind lokal strömungsberuhigte Zonen, die vom Modell auch gut wiedergegeben werden. Während der Sommerperiode traten ja nur schwächere See-gangssituationen auf.

In der Natur dürfte diese Erscheinung einerseits direkt durch die strömungsberuhigten Zonen verursacht sein, andererseits dürfte indirekt in den strömungsberuhigten Zonen auch die Wahrscheinlichkeit der Anwesenheit von bestimmten Ablagerung produzierenden Arten größer sein (z.B. *cardium edule*).

### 9.7 Erste Rechnungen mit Berücksichtigung eines steigenden Meeresspiegels

Zusätzlich sollte in einer ersten Testrechnung der Einfluß eines Meeresspiegelanstiegs simuliert werden. Hierzu werden von Sieffert und Lassen ermittelte säkulare Werte für Tidehubanstieg und Meeresspiegelanstieg für den Pegel Büsum von 16cm Meeresspiegelanstieg und 19cm Tidehubanstieg angesetzt.

Die Ergebnisse sind in **Abbildung 101** dargestellt. Deutlich zu erkennen sind die flächendeckenden Sedimentationserscheinungen auf den Wattflächen. Diese sind im Modell einerseits durch biogene Prozesse bedingt, ein kleinerer Teil des Materials stammt aus den Rinnen. Da mit zunehmendem Meeresspiegel auch die überflutete Fläche steigt, dehnen sich die Sedimentationserscheinungen auch auf weitere Bereiche des Watts aus. An den Rinnenrändern entstehen allerdings unrealistisch hohe Sedimentationen. Dies erklärt sich durch eine Vernachlässigung des Seegangs.

.....  
(Prof. Dr.-Ing. habil. Ulrich C. E. Zanke)

.....  
(Dipl.-Ing. Thomas Hirschhäuser)

## Literatur

- [1] Ahrendt, K., 1994. Geologie und Küstenschutz am Beispiel Sylt. Berichte aus dem FTZ Westküste Büsum, Nr.4
- [2] ALW Husum, 1977. Ergebnisse der im Auftrag der Schleswig im August 1977 durchgeführten Baugrunduntersuchungen südlich des Hindenburgdammes (unveröffentlicht)
- [3] ALW Husum, 1994. Untersuchungen zur Optimierung des Küstenschutz auf Sylt, Abschlußbericht
- [4] ALW Husum, 1995. Auswertung Windmeßpfahl Westerland (unveröffentlicht)
- [5] Chesher, T.J., Miles, G.V., 1992. The concept of a single representative wave. In: Falconer et al., Hydraulic and environmental modelling; Coastal waters. Ashgate, Brookfield, VT, pp.371-380
- [6] Dette, H.H., 1974. Über Brandungsströmungen im Bereich hoher Reynolds-Zahlen, Mitteilungen des Leichtweiß-Instituts für Wasserbau, Heft 41
- [7] De Vriend, H.J., Capobianco, M., Chesher, T., De Swart, H.E., Latteux, B., Stive, M.J.F., 1993. Approaches to long-term modelling of coastal morphology: a review, Coastal Engineering 21
- [8] Gast, R., Köster, R., Runte, K.-H., 1984. Die Wattsedimente in der nördlichen und mittleren Meldorfer Bucht, Die Küste, Heft 40
- [9] Hayes, M.O., 1979. Barrier island morphology as a function of tidal and wave regime. In: S.P. Leatherman: Barrier islands, Academic press, New York
- [10] Hirschhäuser, T., Mewis, P., Zanke, U., 1998. Determination of the initial particle size distribution for morphodynamic modelling in tidal areas, Proceedings of the 3rd International Conference on Hydroscience and Engineering, Cottbus 1998
- [11] Latteux, B, 1995. Techniques for long-term morphological simulation under tidal action, Marine Geology 126
- [12] Niemeyer, H., 1983, Die Küste
- [13] Niemeyer, H., 1995. Untersuchungen zur Morphodynamik des Wattenmeeres im Forschungsvorhaben WADE, Die Küste, Heft 57
- [14] Partenscky, H.W., 1983. Untersuchungen über die Herkunft der Sedimente infolge von flutraumverändernden Baumaßnahmen. Gutachterliche Stellungnahme (unveröffentlicht)
- [15] Petersen, P. Persönliche Mitteilung
- [16] Renger, E., 1976. Quantitative Analyse der Morphologie von Wattenzugsgebieten und Tidebecken, Mitteilungen des Franzius-Instituts, Heft 43

- [17] Schaller, D. Persönliche Mitteilung
- [18] Senckenberg-Institut, 1998. Das Wattenmeer, Ausstellungskatalog
- [19] Siefert, W., 1987. Umsatz- und Bilanzanalysen für das Küstenvorfeld der Deutschen Bucht, Die Küste, Heft 45
- [20] Southgate, H.W., 1995. The effects of wave chronology on medium and long term coastal morphology, Coastal Engineering 26
- [21] SWAN, 1998. User manual, TU Delft
- [22] Swart, H., 1976. Predictive equations regarding coastal transports, Proceedings 15th Conference on Coastal Engineering, Honolulu
- [23] Van Rijn, L. C., 1993. Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas, Aqua publications
- [24] Wieland, P., 1984. Untersuchungen über geomorphologische Veränderungen in der Dithmarscher Bucht, Die Küste, Heft 40
- [25] Zanke, U., 1982. Grundlagen der Sedimentbewegung, Springer Verlag 1982
- [26] Zanke, U., 1995. Sachstandsbericht zur Entwicklung eines numerischen Modells mit beweglicher Sohle, TU Darmstadt (unveröffentlicht)