

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

Von THOMAS HIRSCHHÄUSER u. ULRICH C. E. ZANKE

Zusammenfassung

Ziel des vom BMBF geförderten KFKI-Forschungsvorhabens *Morphologische Langfristprognose für das System Tidebecken-Außensände am Beispiel Sylts und der Dithmarscher Bucht* war es, derzeitige 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, beziehungsweise 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.

Die Untersuchungen wurden in Beispielen für die Projektgebiete Hörnumbecken, das südöstlich von Sylt gelegenen ist, und Dithmarscher Bucht ausgeführt.

Die Datenlage im Hörnumbecken ließ es nicht zu, einen natürlichen Referenzzustand heranzuziehen, mit dem das morphodynamische Modell TIMOR hätte verifiziert werden können, da die Vermessungsungenauigkeiten in der Größenordnung morphologischer Veränderungen lagen. Daher wurde die Dithmarscher Bucht als zusätzliches Projektgebiet herangezogen, weil hier eine bessere Datenlage bestand. Die Ergebnisse für das Projektgebiet Hörnumbecken haben daher den Charakter von Sensitivitätsuntersuchungen und dienen zur Identifikation allgemeiner Zusammenhänge. Es konnte gezeigt werden, dass das morphodynamische Modell bei Berücksichtigung des Seegangs in einem Gebiet, das sich annähernd im morphologischen Gleichgewicht befindet, wie es im Hörnumbecken der Fall ist, naturähnliche Ergebnisse berechnet. Insbesondere werden morphologisch aktive Bereiche gut getroffen und Rinnenverlagerungen dort berechnet, wo sie auftreten. Unschärfen existieren in der Quantität des umgelagerten Materials und im zeitlichen Ablauf der Umlagerungen. Es wurden Verfahren der Eingabefilterung angewandt, die für morphologische Langfristprognosen unverzichtbar sind. Bei der Wahl repräsentativer Windlagen ergab eine Kombination aus nordwestlichen, westlichen, südwestlichen und südlichen Windlagen die beste morphologische Übereinstimmung mit einem Referenzzustand. Bei Vernachlässigung des Seegangs sind erwartungsgemäß hingegen nur Aussagen für ruhigere Perioden möglich. Die auffälligsten berechneten morphologischen Erscheinungen sind hierbei leichte Erosionen in den Rinnen und leichte Sedimentation an den Rinnenrändern. Dort, wo ein eindeutiger morphologischer Trend besteht, wie beispielsweise bei der Verlagerung des Ebbdeltas in südliche Richtung, wird dieser vom Modell gut wiedergegeben.

Die durch die Vordeichung in der Dithmarscher Bucht ausgelösten Sedimentationen werden vom Modell in weiten Teilen des Gebietes quantitativ gut wiedergegeben, obwohl der Seegang hier unberücksichtigt bleiben sollte. Das hierzu benötigte Material wird teilweise aus den Rinnen erodiert und zu einem größeren Teil als feinkörniger Schwebstoff in das Gebiet eingetragen. Das Maß der ins Gebiet strömenden Schwebstoffe und die Wahl einer Anfangskornverteilung erweisen sich als sensitive Faktoren.

Summary

The KFKI (GCERC) – funded research project “Long-term prognosis of the morphological development of the system *Tidal Basin – Offshore Sandbanks* demonstrated for the island of Sylt and the Dithmarschen Bay at the North Sea coast” is an example for the capability of morphodynamic models applied to large morphological units for long periods of time. Of particular

interest was the influence of waves, sediment and other boundary conditions on model performance.

Field data available for the Hörnum Basin (Sylt) were not of sufficient quantity and quality as to guarantee a thorough verification of the morphodynamic model TIMOR. Therefore, an additional area with a better data coverage, the Dithmarschen Bay, was chosen to be included in the project.

Results from the Hörnum Basin can be considered adequate for sensitivity analysis and for the identification of general processes involved. From the results we conclude that the morphodynamic model applied to this system, which is in an equilibrium state, can yield reasonable results when waves are included in the simulation. In particular, regions of high morphological activities, e.g. with distinctly moving tidal channels, are reproduced satisfactorily. Inaccuracies exist with respect to sediment quantities and time history of the process.

One cannot do without filtering of input values for long-term simulations. A specific combination of winds from NW, W, SW and S was chosen to represent the best match of results with the reference state.

Disregarding wave activity was valid only for calm periods resulting in minor erosion in the channels and a slight deposition along their edges. Distinct morphological trends as observed in nature were reproduced by the model satisfactorily. Closing of the Dithmarschen Bay with subsequent sedimentation is well reproduced quantitatively even though waves were not included. The deposition material originated from channel erosion as well as from general material input into the area in the form of fine suspended sediments. The magnitude of this material input as well as the initial grain distribution proved to be sensitive factors in the simulation.

Inhalt

1. Einleitung	128
2. Das Untersuchungsgebiet Hörnumbecken	129
3. Datenanalyse Hörnumbecken	130
3.1 Standardabweichung der Peildaten	133
3.2 Trend der Peildaten	134
4. Das 2D-morphodynamische Modell TIMOR	135
4.1 Betrieb des Modells	137
5. Morphodynamische Rechnungen ohne Seegang Hörnumbecken	139
5.1 Eingabefilterung	139
5.2 Berechnungsergebnisse	140
6. Morphodynamische Rechnungen mit Seegang Hörnumbecken	143
6.1 Bedeutung des Seegangs im Hörnumbecken	143
6.2 Eingabefilterung Seegang	144
6.3 Morphodynamische Modellierung mit einzelnen Seegangseignissen	146
7. Teilmodell Außenbereich	148
8. Zusammenfassung der Ergebnisse im Tidebecken Hörnumbecken	150
9. Projektgebiet Dithmarscher Bucht	151
9.1 Datenanalyse	151
9.2 Morphodynamische Modellierung Dithmarscher Bucht	154
10. Zusammenfassung der Ergebnisse im Tidebecken Dithmarscher Bucht	159
11. Schriftenverzeichnis	160

1. Einleitung

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. Die morphodynamische Simulation

eines Gebietes in Eigendynamik ist wesentlich schwieriger als z. B. der morphodynamische Vergleich von Varianten oder die mittelfristige Prognose von Bauwerkswirkungen.

Zentrale Fragestellung war hierbei, ob und gegebenenfalls in welchem Grade, beziehungsweise mit welchen Einschränkungen, die berechnete morphologische Entwicklung eines derart komplexen Gebietes auf naturähnliche Ergebnisse führt und welche Parameter (Seegang, Zeitstreckung, Randbedingungen, Sediment, ...) hierbei in welcher Weise von Einfluss sind.

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

Die Datenrecherche zeigte aber während des Vorhabens, dass nur wenige historische Vermessungen des Hörnumbeckens vorlagen, die für das Projekt nutzbar waren. Insbesondere lagen keine flächendeckenden Daten aus der Zeit vor Bau des Hindenburgdammes vor. Die erste flächendeckende Vermessung stammt aus dem Jahr 1955, also mehr als 20 Jahre nach Bau des Hindenburgdammes. 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 offensichtlich zu einem Großteil bereits in den ersten 20 Jahren nach Bau des Dammes stattgefunden hat und sich das Gebiet seitdem mehr oder weniger in einem morphologischen Gleichgewicht befindet und sich in Eigendynamik weiterentwickelt.

Aus diesem Grund wurde die Dithmarscher Bucht als zusätzliches Projektgebiet einbezogen. Hier wurden in den Jahren 1972 und 1979 insgesamt zwei Vordeichungen ausgeführt. Die morphologischen Veränderungen, die sich nach diesem Eingriff ergeben haben, sind in insgesamt sieben Peilaufnahmen gut dokumentiert. Aus zeitlichen Gründen sollte der Seegang hier jedoch unberücksichtigt bleiben.

2. Das Untersuchungsgebiet Hörnumbecken

Das Hörnumbecken liegt in der inneren Deutschen Bucht. Es wird im Norden und Westen von der Insel Sylt, im Süden von der Insel Föhr und im Osten vom Festland begrenzt. Durch den Bau des Hindenburgdammes wurde eine rückwärtige Umströmung Sylts unterbunden. Das Gebiet mit seiner Tiefenverteilung ist in Abb. 1 dargestellt.

Die Verbindung zur offenen See wird durch das Hörnumtief hergestellt, das an der Südspitze Sylts eine Tiefe von über 30 m erreicht. Kleinere Verbindungen mit dem Tidebecken der Norderaue existieren über die Föhrer Schulter zwischen Föhr und Festland und das Amrumtief, einem kleineren Priel zwischen Amrum und Föhr. Bei mittleren Verhältnissen tragen diese beiden Verbindungen jedoch nur zu weniger als 10 % zum Tideprisma des Hörnumbeckens bei.

Vom Hörnumtief zweigen drei weitere Prielsysteme ab: Östlich von Sylt verläuft die Rantumlohe; der nordwestliche Teil des Hörnumbeckens wird durch das Eidumtief, der nordöstliche durch Wester- und Osterley gespeist.

Etwa 50 % des Beckens sind trockenfallende Wattflächen, was ein vergleichsweise geringer Wert für Tidebecken in der Deutschen Bucht ist. Südwestlich von Sylt schließt sich das Ebbdelta mit den Außensänden Theeknobssand, Hörnumknobssand, Holtknobssand und Jungnamensand an.

Der Tidehub im Becken beträgt ca. 2 m, so dass das Becken gerade noch dem mesotidalen Bereich zuzuordnen ist.

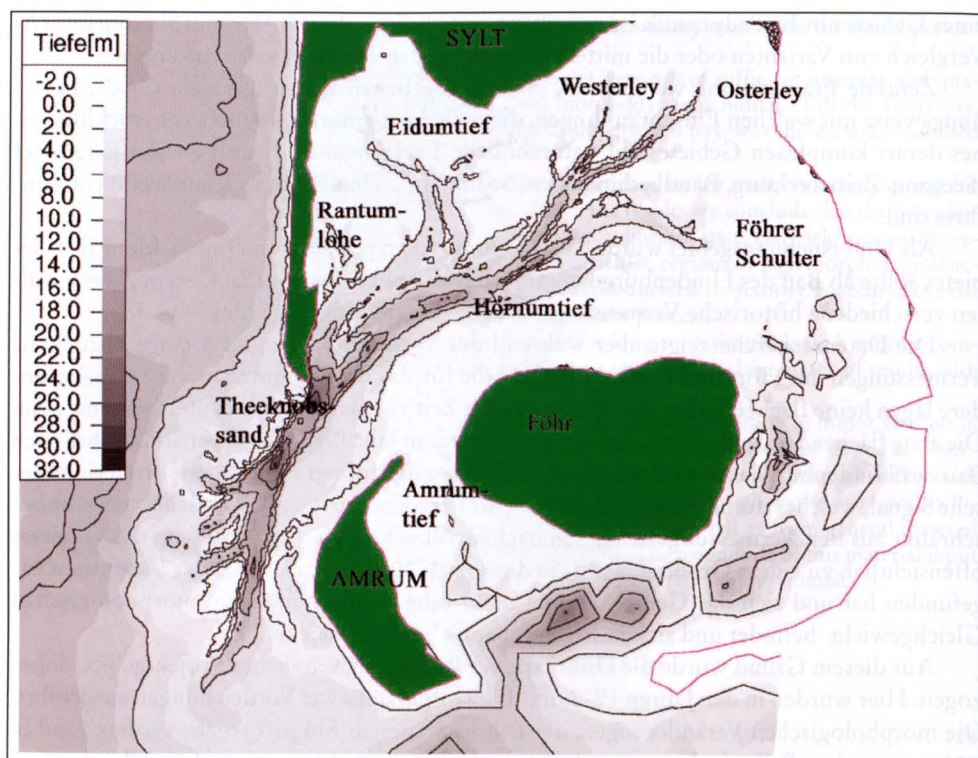


Abb. 1: Tiefenverteilung Hörnumbecken 1974

3. Datenanalyse Hörnumbecken

Für das Hörnumbecken wurden im Laufe der Projektlaufzeit insgesamt 7 quasisynoptische Vermessungen vom ALR 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 bestanden alle aus Messpunkten mit Ausnahme des 1955er Datensatzes, der aus digitalisierten Isolinen erzeugt wurde. Die Analyse der Daten diente vorrangig der Identifikation eines morphodynamischen Signals, welches dann vom morphodynamischen Modell nachgebildet werden sollte.

Differenzendarstellungen

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

Besonders auffällig waren drei Arten von systematischen Fehlern in den Datensätzen:

- **Fehler durch die Beschickung über verschiedene Bezugspegel.** Diese Fehler machen sich in den Differenzendarstellungen durch eine scheinbare Zweiteilung des Beckens bemerkbar. Da dieses Problem in Kombinationen aus 3 Datensätzen (z. B. 1974, 1986 und 1987) jeweils gegeneinander auftritt, ist der Fehler nicht vollständig korrigierbar.

- **Fehler durch die Umrechnung von Wasserständen von Bezugspegel zu Messpunkt.** Diese Fehler machen sich durch auffällige Streifenmuster in den Differenzendarstellungen bemerkbar.
- **Fehler während individueller Messfahrten.** Diese Fehler machen sich durch auffällige fleckige Strukturen innerhalb einzelner Datensätze bemerkbar und sind auf Eingabefehler zurückzuführen, aber aufgrund des Vermerks der Messfahrt in der Datenbank leicht zu identifizieren. Soweit solche Fehler nicht ohnehin vom BSH behoben waren, wurden sie im Rahmen des Projekts berichtigt. (Dies trat nur im 1986er Datensatz auf, der vom BSH nicht in einer Arbeitskarte überarbeitet wurde.)

Exemplarisch sei hier nur die Differenzendarstellung zwischen 1987 und 1997 beschrieben. Für weitergehende Information wird auf (HIRSCHHÄUSER u. ZANKE, 2000) verwiesen.

In Abb. 2 sind die gemessenen Tiefendifferenzen zwischen 1987 und 1997 dargestellt. Blaue Bereiche kennzeichnen hierbei Erosions-, rote Sedimentationsbereiche. Deutlich ist in diesem Fall die bereits angesprochene Zweiteilung des Beckens zu erkennen: Im westlichen Teil findet scheinbar Sedimentation, im östlichen Teil scheinbar Erosion statt. Systematische Fehler überlagern also kleinere morphologische Veränderungen, so dass nur lokal Rinnenverlagerungen zu beobachten sind. Aus diesem Grund werden später bei der Diskussion der Berechnungsergebnisse natürliche Veränderungen, die unter 0,5 m bleiben, ausgeblendet.

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

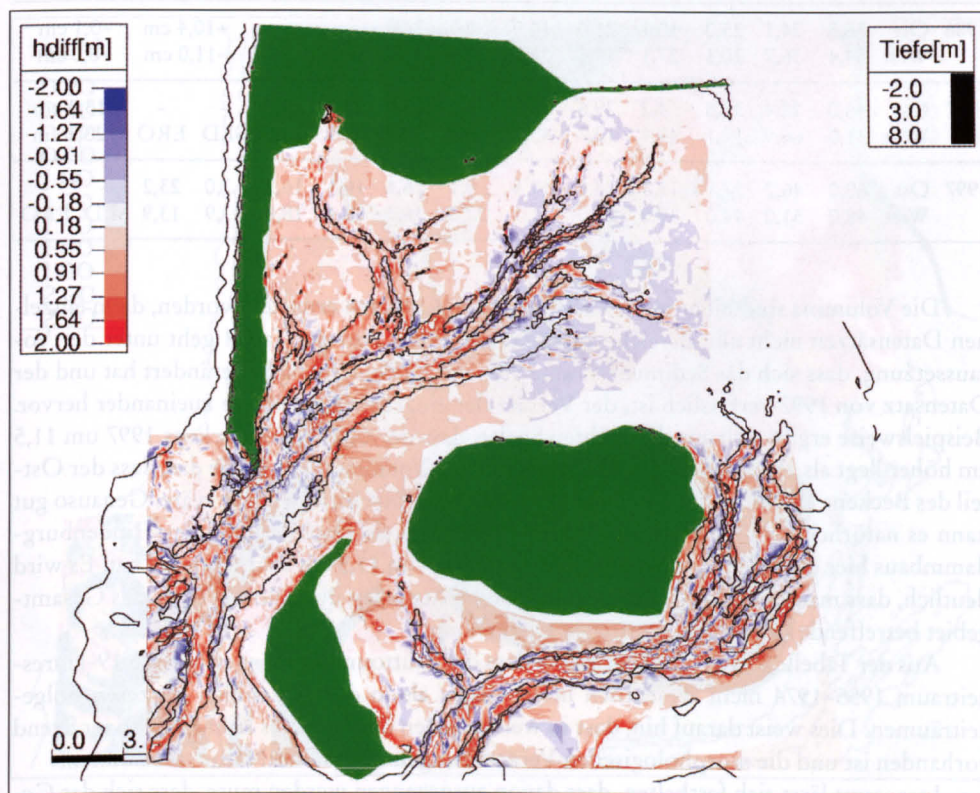


Abb. 2: Gemessene Tiefendifferenzen 1987–1997 (rot: Sedimentation, blau: Erosion)

Bezugspegeln Hörnum und Dagebüll, die aus den Differenzendarstellungen bekannt ist. Die Ergebnisse sind in der folgenden Tab. 1 dargestellt. Hierbei stehen unterhalb der Diagonale die Differenzvolumina in Mio. m³, oberhalb der Diagonalen die korrespondierenden mittleren relativen Tiefenänderungen. Sie stellen unter der Annahme, dass die Volumenbilanz ausgeglichen ist, den mittleren relativen Versatz der Datensätze zueinander dar.

Tab. 1: Differenzvolumen in Mio. m³ und gemittelte Tiefenänderungen (positives Vorzeichen entspricht Sedimentation) zwischen unterschiedlichen topographischen Datensätzen Hörnumbecken, Ost = Ostteil des Beckens, West = Westteil des Beckens

		1955 Δh			1974 Δh			1978 Δh			1981 Δh			1986 Δh			1987 Δh			1997 Δh
1955	Ost	–	–		–2,7 cm			+9,0 cm			+26,9 cm			+10,3 cm			+23,0 cm			+11,5 cm
	West	SED	ERO		–5,9 cm			–0,1 cm			+ 6,8 cm			–13,6 cm			–27,6 cm			– 2,3 cm
1974	Ost	24,6	27,8	–	–			+5,6 cm			+27,2 cm			+12,4 cm			+26,3 cm			+13,2 cm
	West	42,8	50,5	SED	ERO			+5,6 cm			+11,3 cm			– 5,2 cm			–21,0 cm			+ 9,8 cm
1978	Ost	37,0	26,1	16,0	9,3	–	–				+20,1 cm			+ 5,1 cm			+17,5 cm			+4,6 cm
	West	47,0	47,6	23,4	16,1	SED	ERO				+ 4,7 cm			–10,8 cm			–25,4 cm			–2,4 cm
1981	Ost	51,4	19,1	36,8	4,2	33,8	9,7	–	–					–12,9 cm			– 0,7 cm			–14,2 cm
	West	50,0	41,2	29,9	15,2	21,6	15,5	SED	ERO					–19,1 cm			–33,9 cm			–11,0 cm
1986	Ost	36,5	24,1	25,0	10,1	21,0	14,9	9,3	24,8	–	–						+10,4 cm			–0,1 cm
	West	54,4	36,7	20,1	27,1	14,8	28,8	10,6	35,4	SED	ERO						–11,0 cm			+8,0 cm
1987	Ost	46,0	18,4	35,8	4,2	29,6	8,6	13,0	13,9	22,2	9,7	–	–							–13,5 cm
	West	31,0	66,9	17,1	44,4	12,7	45,7	8,8	52,9	8,7	23,0	SED	ERO							+23,1 cm
1997	Ost	60,0	46,2	27,1	11,3	25,0	19,5	9,1	26,1	16,1	16,2	7,0	23,2	–	–					–
	West	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					–

Die Volumina sind nicht immer in identischen Gebieten ermittelt worden, da in einzelnen Datensätzen nicht alle Bereiche vermessen wurden. Aus der Tab. 1 geht unter der Voraussetzung, dass sich das Sedimentvolumen einer Beckenhälfte nicht verändert 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. Unter der oben angeführten Voraussetzung hieße das, dass der Ostteil des Beckens 1955 11,5 cm zu tief eingemessen bzw. beschickt worden wäre. Genauso gut kann es natürlich gerade bei diesem Beispiel sein, dass als Nachwirkung des Hindenburgdammbaus hier eine flächendeckende Sedimentation von 11,5 cm stattgefunden hat. Es wird deutlich, dass man ohne festen Bezugspunkt keine Aussagen über globale (d. h. das Gesamtgebiet betreffende) Volumenänderungen treffen kann.

Aus der Tabelle geht weiterhin hervor, dass die Bruttoumsatzmengen für den 19-Jahreszeitraum 1955–1974 nicht wesentlich höher liegen als in den wesentlich kürzeren Folgezeiträumen. Dies weist darauf hin, dass in weiten Teilen des Gebietes kein eindeutiger Trend vorhanden ist und die morphologischen Veränderungen reversibler Natur sein können.

Insgesamt lässt sich festhalten, dass davon ausgegangen werden muss, dass sich das Gesamtgebiet mehr oder weniger in einem morphologischen Gleichgewicht befindet, d. h. dass

es über längere Zeiträume keine nachweisbar unausgeglichene Sedimentbilanz aufweist und somit nur interne Umlagerungen stattfinden.

3.1 Standardabweichung der Peildaten

Um ein Maß für die morphologische Aktivität des Gebietes zu gewinnen, wurde die Standardabweichung der Tiefenlage bestimmt. Im KFKI-Projekt *Morphologische Analyse Nordseeküste (MORAN)* wurde zur Beschreibung der morphologischen Aktivität die Umsatzhöhe definiert (SIEFERT, 1987). 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 anderen 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, was ja nur der Fall wäre, wenn an jedem Ort eine eindeutige Entwicklung stattgefunden hätte. Aus diesem Grund wurden die Vermessungszustände gleichberechtigt behandelt, d.h. ohne Berücksichtigung des dazwischen liegenden Zeitraums, was angesichts der weiter oben beschriebenen Schwierigkeiten der praktikabelste Weg war.

In Abb. 3 ist die Standardabweichung der Peildaten im Hörnumbecken dargestellt. Blaue Bereiche kennzeichnen eine besonders hohe morphologische Aktivität.

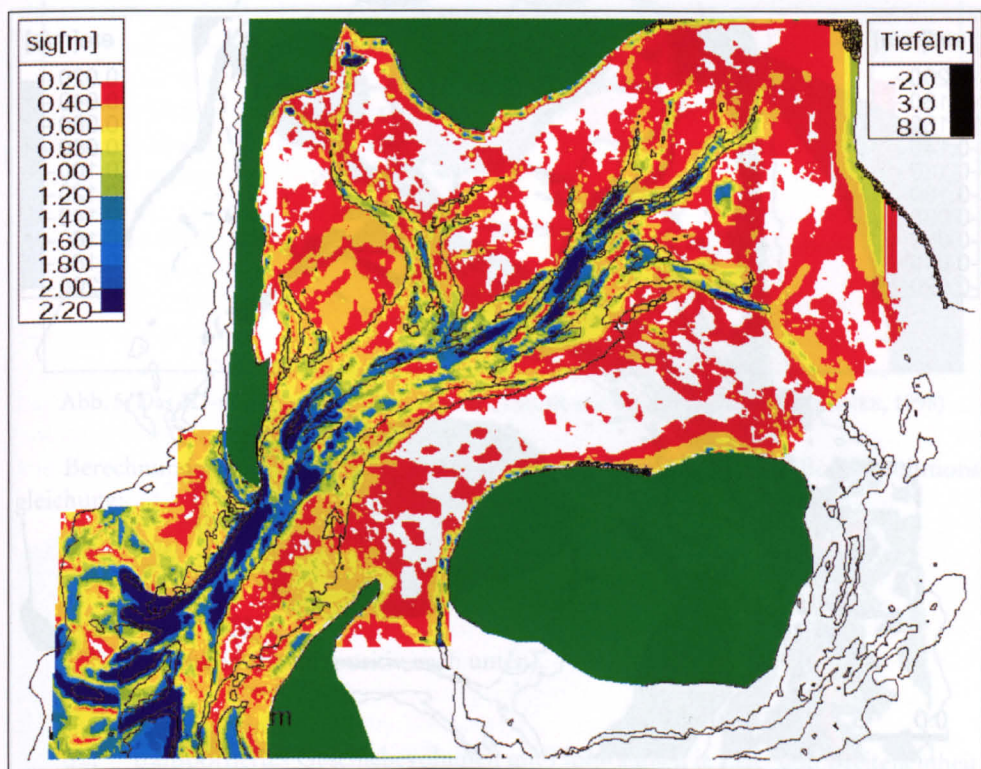


Abb. 3: Standardabweichung der Peildaten als Maß für morphologische Aktivität (blau: hohe morphologische Aktivität)

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

- Die Außensände, insbesondere an den steilen Flanken zu den Rinnen
- Hörnumtief westlich von Amrum
- Prielverzweigung Hörnumtief–Rantumlohe östlich von Sylt
- Prielverzweigung Hörnumtief–Eidumtief
- Endbereich Hörnumtief
- Endbereich Wester- und Osterley

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

3.2 Trend der Peildaten

Zusätzlich zur Standardabweichung wurde der Trend der Peildaten bestimmt, der im Hinblick auf die Herausfilterung eines langfristigen morphodynamischen Signals besonders interessant ist.

Der Trend der Peildaten ist in Abb. 4 dargestellt.

Folgende Teilbereiche weisen einen morphologischen Trend auf:

- Bereich Außensände: Es findet eine Südwärtsbewegung der Außensände statt. Der Theeknobssand verlagert sich in südöstliche Richtung. Der Trend zur Bewegung in Südrichtung legt die Vermutung nahe, dass der Küstenlängstransport entlang der Westküste Sylts

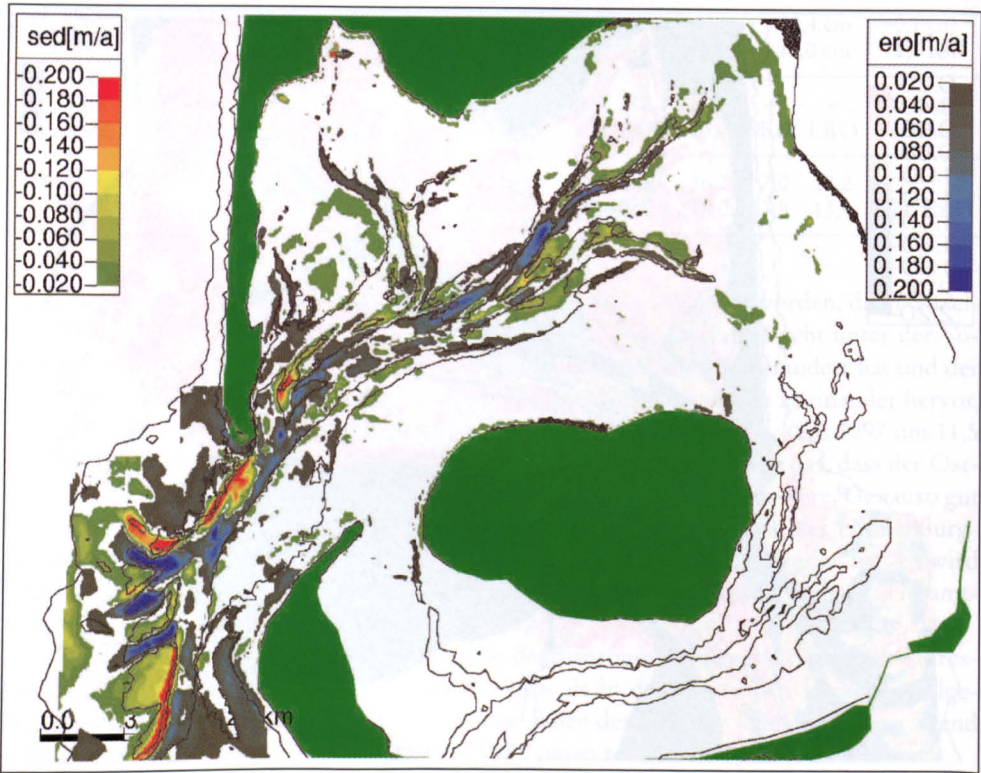


Abb. 4: Trend der Peildaten zur Identifikation eines langfristigen morphodynamischen Signals (rot bis hellgrün: Sedimentation, dunkelgrün bis blau: Erosion)

verantwortlich für diese Bewegung ist, denn das System lagert das Material von Norden her an. Aufgrund des unveränderten Tideprismas erhalten sich jedoch die Rinnenquerschnitte, wodurch es zu einer Südwärtsverlagerung der Rinnen kommt.

- In den Endbereichen von Wester- und Osterley ist ein schwacher Trend zur Sedimentation auszumachen. Dies könnte eine Spätfolge des Hindenburgdamms sein.
- Das Ostufer des Hörnumtiefs verschiebt sich an der Südspitze Sylts in südöstliche Richtung.
- Die Prielverzweigung Hörnumtief–Eidumtief verschiebt sich in südliche Richtung.
- Im Eidumtief verlagern sich zwei flachere Bereiche ostwärts.
- Das Flach zwischen Rantumlohe und Hörnumtief vergrößert sich.

4. Das 2D-morphodynamische Modell TIMOR

Die Komponenten des 2D-morphodynamischen Modells TIMOR sind schematisch in Abb. 5 dargestellt.

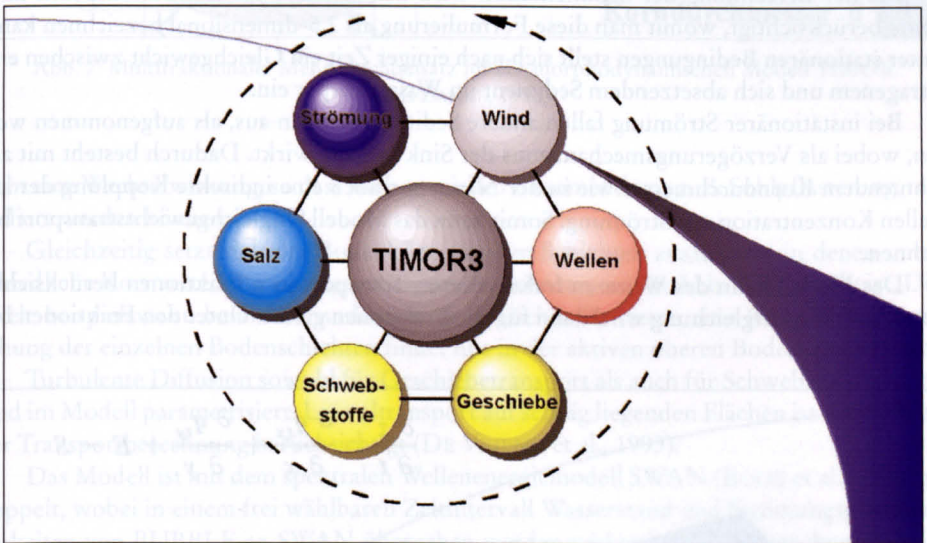


Abb. 5: Das 2D-morphodynamische Modell TIMOR mit seinen Modulen (aus ZANKE, 1998)

Berechnungsgrundlage der morphodynamischen Prozesse ist die Bodenevolutionsgleichung:

$$\frac{\partial z}{\partial t} = \frac{\partial q_G}{\partial s} + E - S$$

mit:

z: Tiefenkoordinate (positiv nach unten),

t: Zeit,

s: Wegkoordinate

q_G : transportiertes Geschiebevolumen mit Hohlräumen je Zeit- und Breitereinheit

E: Entrainment (= aufgewirbeltes Sediment = Senkterm für die Sohle als abgetragene Schichtdicke je Zeiteinheit)

S: Settlement (= sedimentierendes Sediment = Quellterm für die Sohle als aufgeladete Schichtdicke je Zeiteinheit).

Die Gleichung wird für jeden morphologischen Zeitschritt gelöst, der derjenige des hydrodynamischen Modells BUBBLE (MEWIS u. HOLZ, 1993) oder ein Vielfaches dessen sein kann.

Der Gesamtsedimenttransport setzt sich aus dem sohn nahen Geschiebetransport (bed-load) und dem Schwebstofftransport (suspended-load) zusammen. Der Geschiebetransport kann im Modell nach unterschiedlichen Ansätzen berechnet werden. Neben anderen sind die Formulierungen nach MEYER-PETER/MÜLLER (1949), ENGELUND/HANSEN (1967) oder ZANKE (1990) implementiert. In den nachfolgend vorgestellten Rechnungen wird mit dem Ansatz nach Meyer-Peter/Müller gerechnet.

Der aufgenommene Schwebstoff wird nach dem Pick-Up-Ansatz nach VAN RIJN (1984) für rolliges Material berechnet, wohingegen das Entrainment kohäsiven Materials nach einem Ansatz von PARTHENIADES (1965) berechnet wird, was schematisch in Abb. 6 dargestellt ist.

Bei der Berechnung der Sedimentation wird das vertikale Konzentrationsprofil nach Rouse berücksichtigt, womit man diese Formulierung als 2,5-dimensional bezeichnen kann. Unter stationären Bedingungen stellt sich nach einiger Zeit ein Gleichgewicht zwischen eingetragenen und sich absetzendem Sediment im Wasserkörper ein.

Bei instationärer Strömung fallen andere Sedimentmengen aus, als aufgenommen werden, wobei als Verzögerungsmechanismus der Sinkvorgang wirkt. Dadurch besteht mit abnehmendem Korndurchmesser wie in der Natur nur noch eine indirekte Kopplung der aktuellen Konzentration zur Strömung. Somit kann das Modell Ungleichgewichtstransport berechnen.

Das Modell kann des Weiteren fraktionierten Transport in n Fraktionen berücksichtigen. Die Transportgleichung wird dann für alle Fraktionen gelöst. Unter den Fraktionen be-

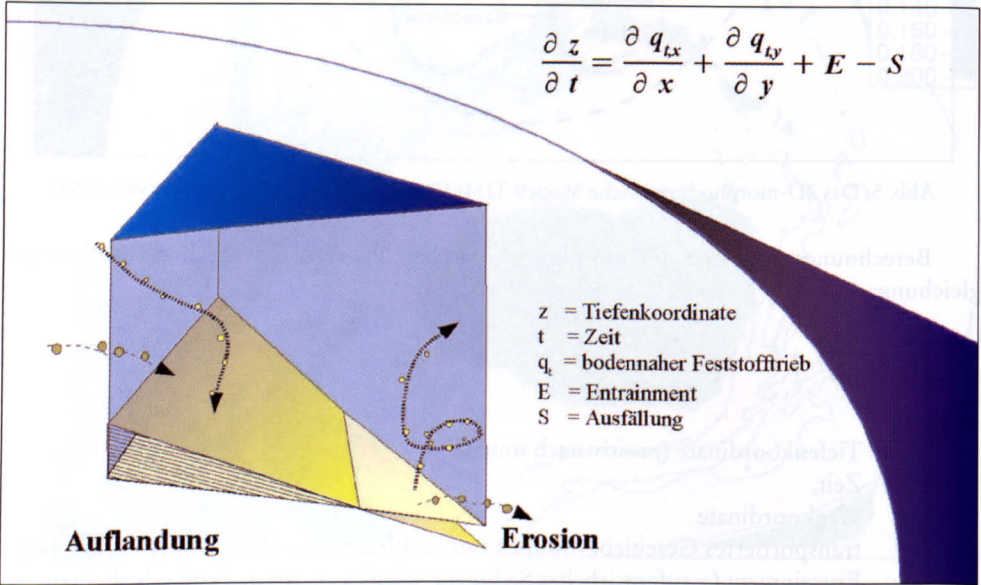


Abb. 6: Dynamische Bodenänderung im 2D-morphodynamischen Modell TIMOR (aus: ZANKE, 1998)

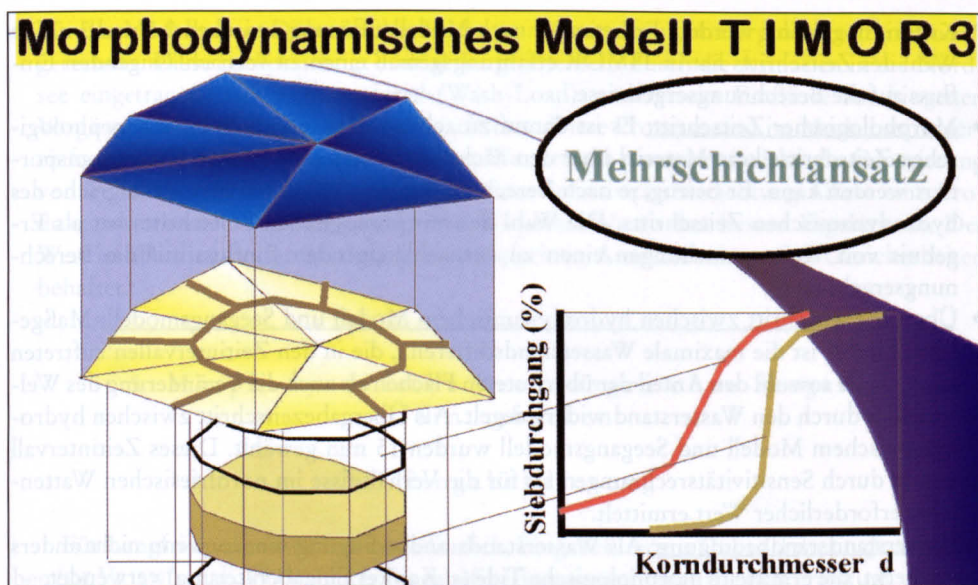


Abb. 7: Multifraktionaler Mehrschichtansatz im 2D-morphodynamischen Modell TIMOR (aus ZANKE, 1998)

steht eine Wechselwirkung, so dass auch spezielle Phänomene, wie z. B. Sohlpflasterung, modelliert werden können.

Gleichzeitig setzt sich der Bodenkörper aus m Schichten zusammen, in denen unterschiedliche Kornverteilungen vorgegeben werden können, was in Abb. 7 dargestellt ist. Dies spielt beispielsweise beim Vorhandensein geologischer Barrieren eine Rolle. Eine Vermischung der einzelnen Bodenschichten findet nur in der aktiven oberen Bodenschicht statt.

Turbulente Diffusion sowohl für Geschiebetransport als auch für Schwebstofftransport sind im Modell parametrisiert. Lateraltransport auf schräg liegenden Flächen ist ebenfalls bei der Transportberechnung berücksichtigt (DE VRIEND et al., 1993).

Das Modell ist mit dem spektralen Wellenenergiemodell SWAN (BOOIJ et al., 1996) gekoppelt, wobei in einem frei wählbaren Zeitintervall Wasserstand und Strömungsgeschwindigkeiten von BUBBLE an SWAN übergeben werden und von SWAN berechnete signifikante Wellenhöhe, Bodenorbitalgeschwindigkeit und Wellenperiode übergeben werden, womit nach VAN RIJN (1993) eine welleninduzierte Bodenschubspannung errechnet werden kann.

4.1 Betrieb des Modells

Im Folgenden sind die verwendeten Parameter zusammengestellt:

- Newton-Taylor-Reibungsbeiwert: Das hydrodynamische Modell BUBBLE wurde für die Untersuchungsgebiete kalibriert. Als Ergebnis wird ein Wert von 0.003 benutzt. Dieser Wert liegt im für derartige Untersuchungsgebiete üblichen Rahmen.
- Dichte Seewasser: Als Dichte des Seewassers wurden 1025 kg/m^3 angesetzt.
- Wassertemperatur: Es wurde eine einheitliche Temperatur von 10°C gewählt.
- Hydrodynamischer Zeitschritt: Der hydrodynamische Zeitschritt muss aufgrund des verwendeten expliziten numerischen Verfahrens entsprechend dem Courant-Friedrich-Levy

Kriterium gewählt werden. Er betrug je nach Modellauflösung zwischen 0,5 und 3 s. Die Wahl des Zeitschritts hat in TIMOR erfahrungsgemäß einen zu vernachlässigenden Einfluss auf die Berechnungsergebnisse.

- **Morphologischer Zeitschritt:** Es ist darauf zu achten, dass innerhalb eines morphologischen Zeitschritts kein Material über den nächsten Berechnungsknoten hinaus transportiert werden kann. Er betrug, je nach Berechnungsgitter, das sechs- bis zwanzigfache des hydrodynamischen Zeitschritts. Die Wahl des morphologischen Zeitschritts hat als Ergebnis von Voruntersuchungen einen zu vernachlässigenden Einfluss auf die Berechnungsergebnisse.
- **Übergabezeitschritt zwischen hydrodynamischem Modell und Seegangmodell:** Maßgebend hierfür ist die maximale Wasserstands Differenz, die in den Zeitintervallen auftreten kann, da sie sowohl den Anteil der überfluteten Flächen als auch die Veränderung des Wellenfeldes durch den Wasserstand widerspiegelt. Als Übergabezeitschritt zwischen hydrodynamischem Modell und Seegangmodell wurden 15 min gewählt. Dieses Zeitintervall wurde durch Sensitivitätsrechnungen als für die Verhältnisse im nordfriesischen Wattenmeer erforderlicher Wert ermittelt.
- **Wasserstandsrandbedingung:** Als Wasserstandsrandbedingung wurde, wenn nicht anders vermerkt, die ermittelte morphologische Tide (s. Kapitel Eingabefilterung) verwendet.
- **Kornfraktionen:** Es wurde in allen Rechnungen mit 8 Kornfraktionen gerechnet. Die Korndurchmesser der verwendeten Fraktionen betrugen 0,06 mm, 0,08 mm, 0,12 mm, 0,2 mm, 0,3 mm, 0,6 mm, 1,2 mm und 2 mm. Auf eine sorgfältige Auswahl der verwendeten Fraktionen ist zu achten, damit den unterschiedlichen Transportarten (bed-load, suspended load) in unterschiedlichen Bereichen des Untersuchungsgebietes Rechnung getragen wird.
- **Sedimentdichte:** Als Dichte wurde die Dichte von Quarzsand, 2650 kg/m^3 angesetzt.
- **Porosität:** Der Hohlraumgehalt im Sediment wurde mit 0,3 angenommen.
- **Sedimentologische Randbedingung:** Die örtlich differenzierte Kornverteilung wurde nach einem Verfahren in Abhängigkeit von der maximalen Tidestromgeschwindigkeit bestimmt (HIRSCHHÄUSER et al., 1998). Hierbei wird der d_{90} als Stützpunkt einer Kornverteilung aus der maximalen Tidestromgeschwindigkeit ermittelt, die Verteilungen werden dann als geometrisch ähnlich, das heißt immer mit identischen Verhältnissen d_{90}/d_i , angesetzt. Eine Analyse vorhandener Sedimentproben ergab dabei eine Abhängigkeit dieser Verhältnisse vom d_{90} , womit der Tatsache Rechnung getragen wird, dass Kornverteilungen auf den Wattflächen besser sortiert sind, als solche in den Rinnen. Die verwendeten affinen Verhältniszahlen sind in den folgenden Tab. 2 und 3 wiedergegeben.
- **Sedimenttransport am offenen Rand:** Am offenen Rand wurde ein Gleichgewichts-sedimenttransport angesetzt.

Tab. 2: Affine Verhältnisse für $d_{90} < 0,8 \text{ mm}$

D_i	D_i/d_{90}
D_5	0,3
D_{20}	0,4
D_{30}	0,45
D_{50}	0,5
D_{70}	0,6
D_{80}	0,65
D_{95}	1,1

Tab. 3: Affine Verhältnisse für $d_{90} > 1,2 \text{ mm}$

D_i	D_i/d_{90}
D_5	0,2
D_{20}	0,35
D_{30}	0,35
D_{50}	0,5
D_{70}	0,75
D_{80}	0,9
D_{95}	1,4

- Für das Modellgebiet Dithmarscher Bucht wurde mit einer „Hintergrundkonzentration“ gerechnet. Diese berücksichtigt einmal das größtenteils durch die Ästuarien in die Nordsee eingetragene Feinstkornmaterial (Wash-Load), andererseits Einflüsse aus biogenen Vorgängen wie Plankton- und Algenwachstum. Diese Prozesse sind im Modell stark vereinfachend als eine in den oberen 3 m der Wassersäule permanent wirkende Generierung von Feinkornmaterial berücksichtigt. In einer Sensitivitätsbetrachtung führte eine Produktionsrate von $5 \cdot 10^{-10}$ m Feststoff/m Wassersäule/s zu den besten Ergebnissen. Der Wert ist allerdings aufgrund des stark vereinfachten Ansatzes mit großen Unsicherheiten behaftet.

5. Morphodynamische Rechnungen ohne Seegang Hörnnumbecken

5.1 Eingabefilterung

Für Langfristprognosen ist es unerlässlich, Eingabefilterung (Input-Filtering) zu betreiben (DE VRIEND et al., 1993). Unter Eingabefilterung versteht man die Beschränkung der Eingangsgrößen auf die für den Untersuchungszweck relevanten, in diesem Falle also auf verursachende Faktoren, die langfristig morphologisch bedeutsam sind.

Für ein von der Tide bestimmtes Gebiet stellt sich insbesondere die Frage, ob sich eine einzelne repräsentative, sogenannte morphologische Tide (LATTEUX, 1995) finden lässt, die annähernd dieselben morphologischen Veränderungen bewirkt, wie die Gesamtheit der in der Natur auftretenden Zyklen, wenn die durch sie verursachten morphologischen Veränderungen auf einen entsprechend längeren Zeitraum extrapoliert werden.

Für tidedominierte Gebiete stellen sich also vor allem zwei Fragen:

- Welche einzelne oder wenigen Tide(n) charakterisieren aus morphologischer Sicht die natürlichen Tidezyklen am besten? In welcher Zeit wird mit dieser Tide eine minimale Volumenabweichung gegenüber einem Referenzzustand erreicht?
- Bis zu welchem Maß können die Berechnungsergebnisse mit dem morphologischen Zeitstreckungsfaktor extrapoliert werden?

Um diese Fragen zu klären, wurden Szenarien für ein ruhiges, ein mittleres und ein stürmisches Jahr definiert, in denen die in diesen Jahren auftretenden Tidehübe in relative Tidehubklassen aufgeteilt wurden, morphodynamische Rechnungen für jede der Tidehubklassen durchgeführt und anschließend entsprechend ihrer Auftretenswahrscheinlichkeit linear superponiert wurden. Als Beurteilungskriterium, welche einzelne Tide sich den Referenzszenarien am besten annähert, wurden drei Parameter bestimmt:

- **Qualitativer Fehler.** Anteil der Flächen mit qualitativ falscher Berechnung (Sedimentation anstatt Erosion und umgekehrt).
- **Quantitativer Fehler.** Anteil der Volumenabweichung zum Referenzzustand zum Gesamtumlagerungsvolumen.
- **Zeitfaktor zum Erreichen des minimalen Volumenfehlers.**

Die Ergebnisse sind in der folgenden Abb. 8 dargestellt.

Sowohl für das mittlere als auch für das ruhige Jahr wurden die besten Ergebnisse mit der gegenüber der mittleren Tide um 2 % erhöhten Tide erzielt. Der qualitative Fehler liegt hier unter 0,4 % und der quantitative Fehler unter 5 %. Die Zeit zum Erreichen der minimalen Volumenabweichung (nicht dargestellt) beträgt 95 % der berechneten Zeit für das ruhige Jahr und 96 % für das mittlere Jahr. Für das stürmische Jahr wurden die besten Er-

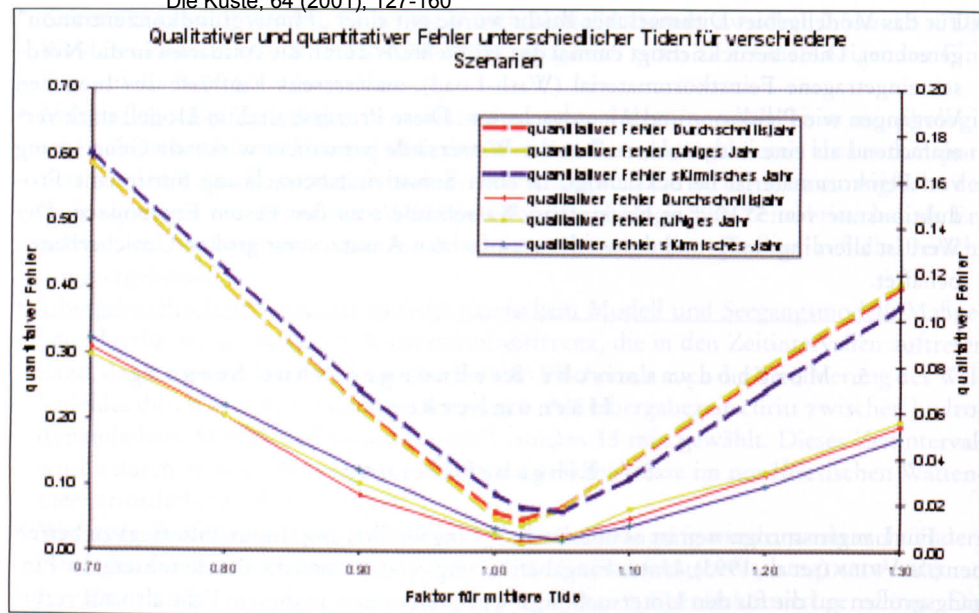


Abb. 8: Qualitativer und quantitativer Fehler verschiedener Tiden für unterschiedliche Szenarien (rot: Durchschnittsjahr, gelb: ruhiges Jahr, blau: stürmisches Jahr)

gebnisse mit der gegenüber der mittleren Tide um 5 % erhöhten Tide erreicht. Der quantitative Fehler liegt hier erwartungsgemäß mit 6 % etwas höher, der qualitative Fehler liegt bei 0,5 %.

Es wurden weiterhin Sensitivitätsrechnungen bezüglich der Verwendung unterschiedlicher morphologischer Zeitstreckungsfaktoren durchgeführt. Bei jedem morphologischen Berechnungsschritt werden hierbei die auftretenden Morphologieänderungen mit dem morphologischen Zeitstreckungsfaktor multipliziert, um dann nach einer durchlaufenen Tide die morphologischen Veränderungen eines Zeitraums berechnet zu haben, der um den morphologischen Zeitstreckungsfaktor gedehnt ist (HIRSCHHÄUSER u. ZANKE, 2000). Insgesamt stellten sich bei den Sensitivitätsrechnungen nur geringfügige Unterschiede bei der Verwendung unterschiedlicher morphologischer Zeitstreckungsfaktoren heraus. Es wurden morphologische Zeitstreckungsfaktoren von über 200 verwendet. Es lässt sich aber keine allgemeingültige Größe dieses Faktors angeben, da die maximal wählbare Größe stark von der maximal im Gebiet auftretenden Morphologieänderung abhängt. Bei Berücksichtigung des Seegangs muss dieser Faktor aufgrund der wesentlich höheren Umlagerungen kleiner gewählt werden.

5.2 Berechnungsergebnisse

Exemplarisch sei hier eine Rechnung vorgestellt, die als Wasserstandsrandbedingung einen schematisierten Spring-Nipp-Zyklus verwendet, der über 8 Tiden mit einem morphologischen Zeitstreckungsfaktor von 8,75 simuliert wird. Nach einem durchlaufenen Zyklus sind somit morphodynamisch $8 \cdot 8,75 = 70$ Tiden durchlaufen. Die mittlere Tide wird hierbei aus einem übergeordneten Deutsche-Bucht-Modell gewonnen.

Die Anfangskornverteilung wird mit einer von der maximalen Tidestromgeschwindigkeit

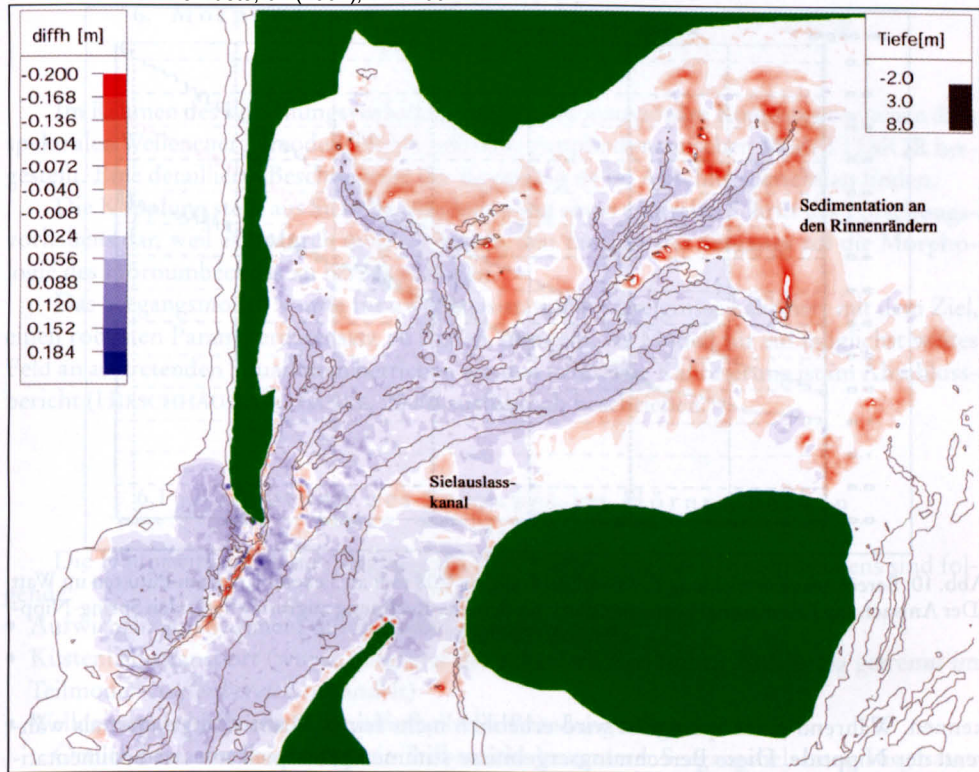


Abb. 9: Berechnete Tiefenänderungen innerhalb eines halben Jahres (Rechnung ohne Seegang) (rot: Sedimentation, blau: Erosion)

keit abhängigen Beziehung über die Hjulström-Kurve bestimmt (HIRSCHHÄUSER, MEWIS u. ZANKE, 1998).

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 Abb. 9 sind die Tiefenänderungen nach einem halben Jahr dargestellt. Rote Bereiche stellen Sedimentationsflächen, blaue Bereiche Erosionsflächen dar. Die sich ausbildenden morphologischen Strukturen sind Anlagerungen an den Rinnenrändern und eine leichte Erosion innerhalb der Rinnen. Insgesamt halten sich die Tiefenänderungen jedoch in einem sehr beschränkten Rahmen: Sie übersteigen 20 cm in einem halben Jahr nur an wenigen Stellen.

Ein Sedimentationsbereich nordwestlich von Föhr ist auf einen dort vorhandenen Siel-auslasskanal zurückzuführen.

Das Material für diese Umlagerungen ist überwiegend Feinkornmaterial. Es stammt aus den Rinnen, wo es zu Beginn der Rechnung in geringem Anteil vorhanden ist, ausgetragen wird und sich zur Kenterzeit auf den Wattflächen absetzt. Die Feinkornfraktion wird innerhalb dieser Rechnung durch die Korngröße 0,08 mm repräsentiert.

Für drei exemplarische Knoten ist der Anwachs der Feinkornfraktion 0,08 mm in der obersten Bodenschicht, die im Modell als in das Gebiet strömende Schwebstofffraktion behandelt wird, in Abb. 10 dargestellt. In den Kurven ist gut der Spring-Nipp-Zyklus zu er-

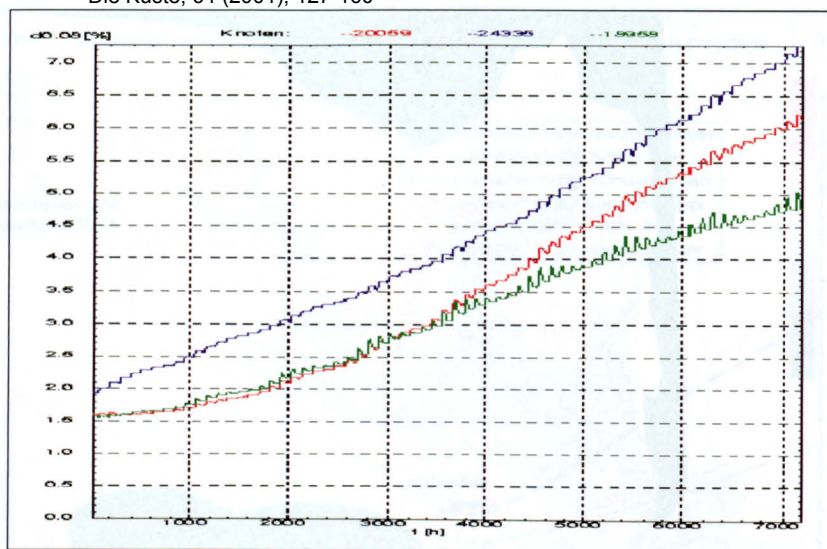


Abb. 10: Berechnete Entwicklung der Feinkornfraktion 0,08 mm an 3 exemplarischen Punkten im Watt (Der Anwachs an Feinmaterial korrespondiert mit dem der Rechnung zugrunde liegenden Spring-Nipp-Zyklus)

kennen. Während einer Springflut wird erheblich mehr feines Material abgelagert als während der Nipptide. Diese Berechnungsergebnisse stimmen prinzipiell mit der Sedimentationsschichtung, wie sie aus Bohrkernen von Wattflächen bekannt ist, überein, wie beispielsweise in Abb. 11 in einem Bohrkern des Senckenberg-Instituts Wilhelmshaven. Auch hier korrespondiert die Sedimentationsschichtung mit dem Spring-Nipp-Zyklus.

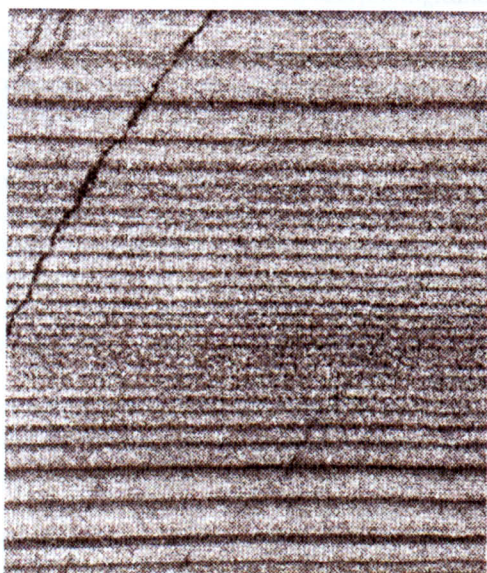


Abb. 11: Bohrkern von Wattoberfläche (Senckenberginstitut Wilhelmshaven)

6. Morphodynamische Rechnungen mit Seegang Hörnumbecken

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde eine instationäre Kopplung zwischen dem spektralen Wellenenergiemodell SWAN und dem morphodynamischen Modell TIMOR hergestellt. Eine detaillierte Beschreibung der Kopplung ist im Abschlussbericht zu finden.

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

Das Seegangsmodell wurde für zwei quasistationäre Ereignisse kalibriert mit dem Ziel, einen robusten Parameterdatensatz zu finden, mit dem das Modell für ein möglichst weites Feld an auftretenden Situationen betrieben werden kann. Die Kalibrierung ist im Abschlussbericht (HIRSCHHÄUSER u. ZANKE, 2000) ausführlich beschrieben.

6.1 Bedeutung des Seegangs im Hörnumbecken

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

- Aufwirbeln von Sediment durch Bodenorbitalbewegung
 - Küstenlängstransport (wurde aufgrund der erforderlichen hohen Auflösung getrennt im Teilmodell *Außenbereich* behandelt)
 - Welleninduzierte Strömungen außerhalb der Brandungszone
- Örtlich betrachtet sind folgende Teilbereiche besonderer Seegangsbelastung ausgesetzt:
- Starke Wirkung auf den Außensänden. Hier wird durch Grundberührung und teilweises Brechen der Wellen viel Material in Suspension gebracht und mit den Tideströmungen weitertransportiert.
 - Relativ starke Wirkung des Seegangs an den Rinnenrändern: In den Bereichen, wo während ruhiger Wetterlagen Material abgelagert wird, 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 geringen Tidestromgeschwindigkeiten ausgesetzt sind, wird durch den Seegang Material in Suspension gebracht.

Um die Bedeutung des Seegangs für die Morphologie des Hörnumbeckens zu verdeutlichen, wurde der Anteil der Ereignisse bestimmt, in dem die Bodenschubspannung der maximalen Tidestromgeschwindigkeit größer als die Bodenschubspannung aus der Seegangswirkung ist. Hierzu wurde für 40 Windlagen (8 Richtungen und 5 Windstärken) die Seegangsbelastung berechnet und die Ereignisse, an denen die Belastung geringer war als durch die Tideströmung, entsprechend ihrer Auftretenswahrscheinlichkeit aufsummiert. Das Ergebnis kann als eine örtlich differenzierte Darstellung des morphologisch dominanten Faktors aufgefasst werden und ist in Abb. 12 dargestellt.

In den Tiderinnen ist die Belastung aus der Tideströmung erwartungsgemäß größer als durch die Seegangswirkung. Auf den Wattflächen ergibt sich ein anderes Bild: Hier überwiegen in 60–70 % der Fälle die Seegangsbelastungen, in Teilbereichen sogar zu einem noch höheren Prozentsatz.

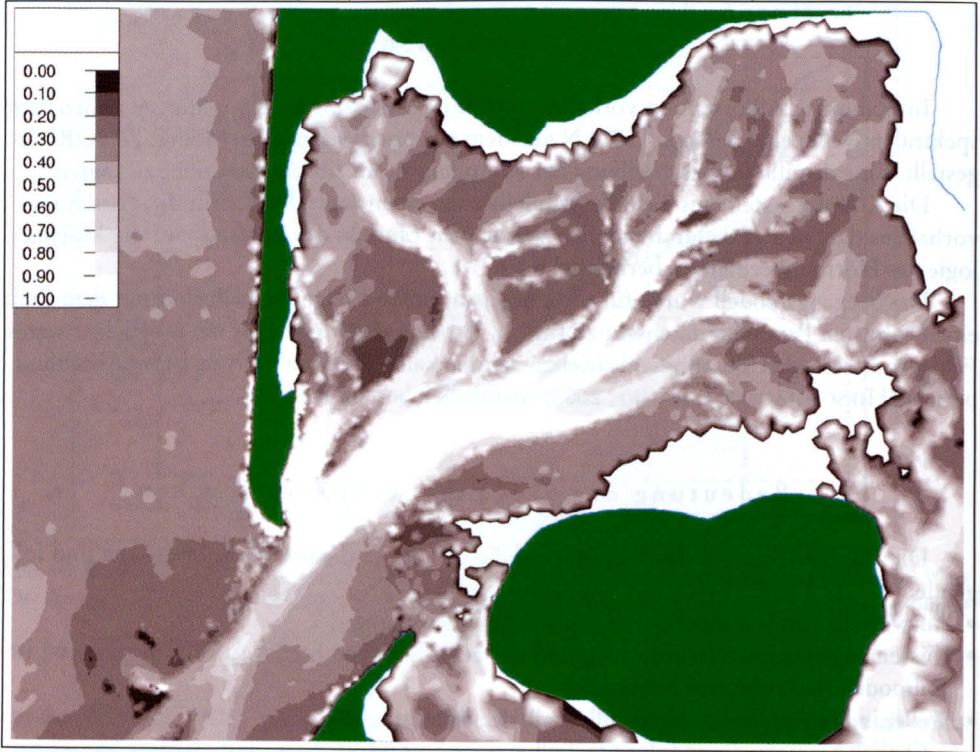


Abb. 12: Anteil der Zeit, in der die Bodenschubspannung aus der maximalen Tidestromgeschwindigkeit die seegangsbedingte Bodenschubspannung bei einem Wasserstand von 0 m üNN übersteigt (hell: tide-dominiert, dunkel: seegangsdominiert)

6.2 Eingabefilterung Seegang

Für morphologische Langfristprognosen besteht die Notwendigkeit, die Eingangsgrößen auf die für den Untersuchungszweck relevanten zu beschränken. Im Falle des Seegangs kommt erschwerend hinzu, dass er stark wasserstandsabhängig ist, das heißt, dass bei sonst gleichen Randbedingungen (Windlage, Dünung, ...) die Bodenschubspannungen durch Wellenwirkung mit den tidebedingten Wasserstandsschwankungen variieren können.

Die 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 und lokalen Variabilität wesentlich größeren Schwankungen unterlegen als die Tidestromung.
- Unterschiedliche Seegangereignisse erzeugen qualitativ wesentlich variabelere morphologische Veränderungen als unterschiedliche Tiden.

Ähnlich wie bei der Bestimmung der morphologischen Tide wurde auch hier eine Referenzmorphologieänderung bestimmt. Diese wurde als aus 40 Windlagen (8 Richtungen und 5 Windstärken) resultierende, entsprechend ihrer Auftretenswahrscheinlichkeit superponierte Morphologieänderung ermittelt. Anhand dieser Referenzmorphologieänderung wurden die Berechnungsergebnisse mit einem oder einer Kombination von wenigen Seegangereignissen bewertet. Das Vorgehen ist ausführlich in (HIRSCHHÄUSER et al., 2000) beschrieben, und das Ergebnis ist in Tab. 4 dargestellt.

Tab. 4: Repräsentative Ereignisse mit dazugehörigen Wichtungsfaktoren für bis zu 4 berücksichtigte Ereignisse

Anzahl Ereignisse	Süd	Südwest	West	Nordwest	rel. Volumenfehler
1			0,7 × W 7,5 m/s		21,20 %
2		0,55 × SW 7,5 m/s		0,15 × NW 12,5 m/s	18,70 %
3		0,3 × SW 7,5 m/s	0,15 × W 12,5 m/s	0,25 × NW 7,5 m/s	16,40 %
4	0,3 × S 7,5 m/s	0,05 × SW 12,5 m/s	0,1 × W 12,5 m/s	0,35 × NW 7,5 m/s	13,00 %

Beste Übereinstimmung mit der Referenzmorphologieänderung ergibt sich, wenn die berücksichtigten Ereignisse mehr oder weniger um die West-Richtung verteilt sind und eine Kombination aus schwächeren 7,5 m/s- und stärkeren 12,5 m/s-Ereignissen herangezogen wird. Die 12,5 m/s-Ereignisse sollten mit einem Gewicht, das nicht höher ist als 15 %, berücksichtigt werden. 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. So sinkt der relative Volumenfehler von über 20 % auf 13 % bei 4 berücksichtigten Ereignissen.

Eine Summation der Wichtungsfaktoren 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.

Bestimmung morphologisch dominanter Windsituationen

Weiterhin sollte geklärt werden, welche Bereiche des Beckens durch welche Einzelergebnisse besonders stark geprägt sind. Hierzu wurden morphologisch dominante Windsituationen definiert. Morphologisch dominante Windsituationen sind solche, die für die langfristig stattfindenden Morphologieänderungen nach Wichtung mit ihrer Auftretenswahrscheinlichkeit den stärksten Anteil liefern.

In Abb. 13 sind die morphologisch dominanten Windrichtungen dargestellt. Sie fassen Bereiche mit gleicher Windrichtung aber unterschiedlicher Windstärke zusammen.

Es zeigt sich, dass das Hörnumbecken fast ausschließlich von den Windrichtungen Südwest, West und Nordwest bestimmt wird. Der Bereich nördlich des Hörnumtiefs ist durch Südwestwindlagen geprägt. Eine Ausnahme bildet hier das Osterley, in dem Westwindlagen dominierend sind. Weiter südlich im Bereich zwischen Osterley und Hörnumtief sind wieder Südwestwindlagen dominant. Westwindlagen sind vornehmlich für das Hörnumtief und die östlichen Bereiche des Beckens dominant. In den tiefsten Bereichen des Hörnumtiefs, südlich von Sylt und im Bereich des Vortrapptiefs bis zu den Außensänden sowie im Wattgebiet westlich der Amrum-Odde sind Nordwestwindlagen dominant.

Die lokal differenzierte Kenntnis solcher morphologisch dominanten Windlagen lässt Rückschlüsse auf die morphologische Entwicklung des Beckens bei einer Veränderung der langjährigen Windsituationen zu.

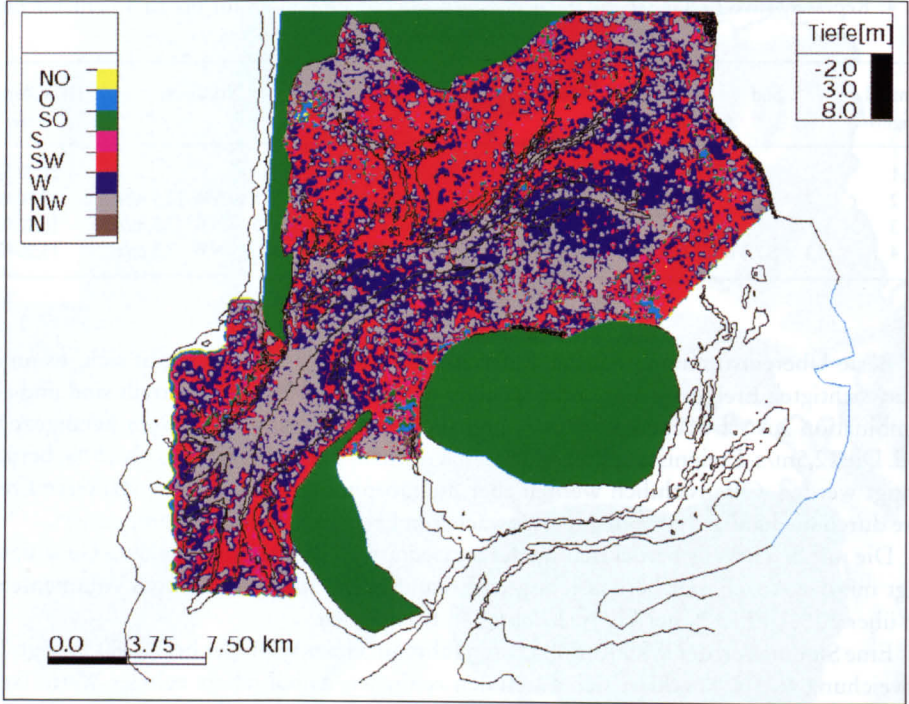


Abb. 13: Morphologisch dominante Windsituationen

6.3 Morphodynamische Modellierung mit einzelnen Seegangsereignissen

Im Folgenden werden Rechnungen, die mit je einer Seegangsrandbedingung betrieben wurden, vorgestellt.

Die schlechte Datenlage gestattete es nicht, eine Zieltopographie vorzugeben. Aufgrund der geringen Häufigkeit und der Qualität der Vermessungen lässt es sich nicht immer entscheiden, in welchen Bereichen langfristige morphologische Entwicklungen stattgefunden haben, wo sie reversibler bzw. temporärer Natur sind und wo Messungenauigkeiten vorliegen, die eine morphologische Entwicklung vortäuschen. Aus diesem Grund sind beim Vergleich mit Naturdaten morphologische Veränderungen, die unter 0,50 m liegen, ausgeblendet.

Die Tiefendifferenzen zwischen 1974 und 1986 sind in Abb. 14 dargestellt.

Als erste Rechnung wird eine Seegangsrandbedingung mit einer Südwestwindlage, 12,5 m/s betrachtet. Die Berechnungsergebnisse für ein halbes Jahr sind in Abb. 15 dargestellt.

In folgenden Bereichen wird in der Rechnung eine den natürlichen morphologischen Entwicklungen qualitativ ähnliche morphodynamische Entwicklung berechnet:

- Erosionsbereich westliche Rantumlohe
- Anlagerungsbereich östliche Rantumlohe
- Rinnenverlagerung in südliche Richtung zwischen Rantumlohe und Eidumtief
- Verlagerung zweier Flachs Eidumtief
- Verlagerung Theeknobssand
- Überwiegende Sedimentation im Endbereich Hörnumtief
- Überwiegende Sedimentation im Endbereich Osterley

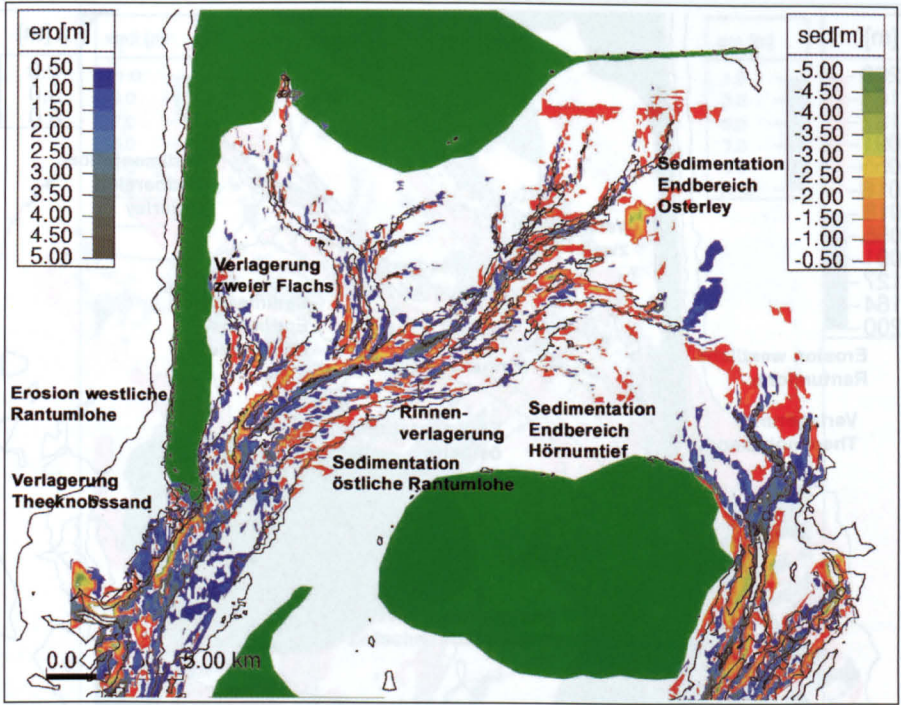


Abb. 14: Gemessene Tiefendifferenzen über 0,5 m 1974–1986 (blau bis dunkelgrün: Erosion, rot bis hellgrün: Sedimentation)

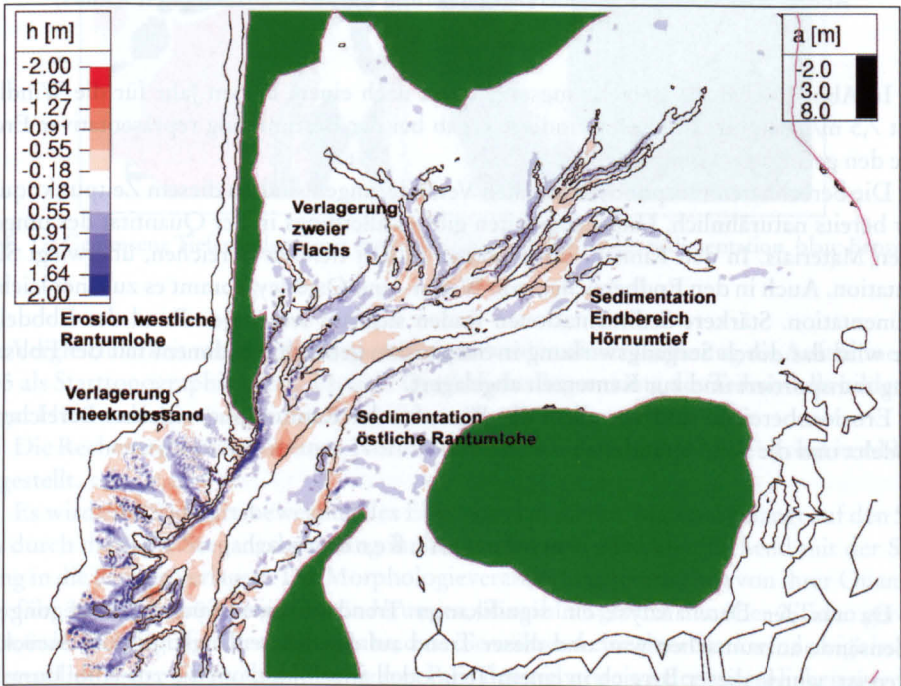


Abb. 15: Berechnete Tiefenänderungen innerhalb eines halben Jahres (Südwest 12,5 m/s) (rot: Sedimentation, blau: Erosion)

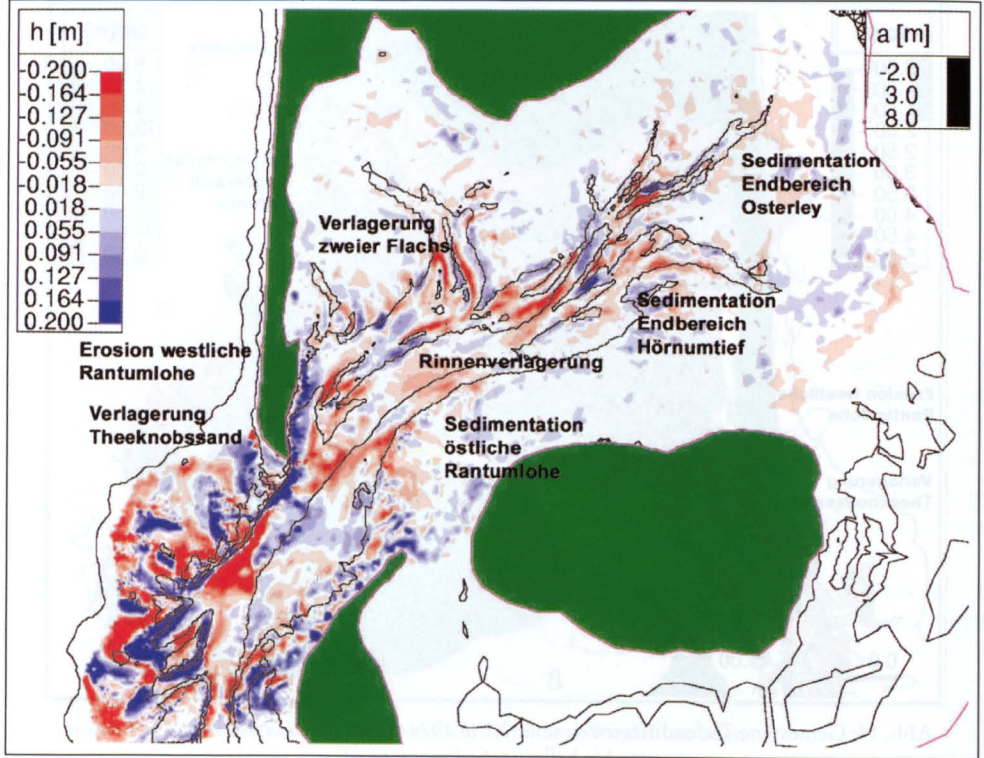


Abb. 16: Berechnete Tiefenänderungen innerhalb eines halben Jahres (West 7,5 m/s)

In Abb. 16 sind die Berechnungsergebnisse nach einem halben Jahr für die Windlage West 7,5 m/s dargestellt. Diese Windlage ergab bei der Bestimmung repräsentativer Ereignisse den geringsten Volumenfehler.

Die berechneten morphodynamischen Veränderungen sind zu diesem Zeitpunkt qualitativ bereits naturähnlich. Ungenauigkeiten gibt es allerdings in der Quantität des umgelagerten Materials. In den Rinnen, insbesondere in den tieferen Bereichen, überwiegt Sedimentation. Auch in den Endbereichen von Wester- und Osterley kommt es zu einer leichten Sedimentation. Stärkere Sedimentationen finden sich am seeseitigen Rand des Ebbdeltas. Hier wird das durch Seegangswirkung in Suspension gebrachte Sediment mit der Ebbströmung transportiert und zur Kenterzeit abgelagert.

Erosionsbereiche sind vor allem das Westufer der Rantumlohe, einzelne Bereiche am Ebbdelta und die Rinnenränder.

7. Teilmodell Außenbereich

Da aus der Datenanalyse ein signifikanter Trend zu einer Südwärtsbewegung der Außensände auszumachen war, und dieser Trend auf den Küstenlängstransport zurückzuführen ist, wurde dieser Bereich in einem Teilmodell abgebildet, um die zur Abbildung des Küstenlängstransportes hohe räumliche Auflösung realisieren zu können.

Die natürlichen Veränderungen zwischen 1955 und 1974 sind in Abb. 17 dargestellt. Um

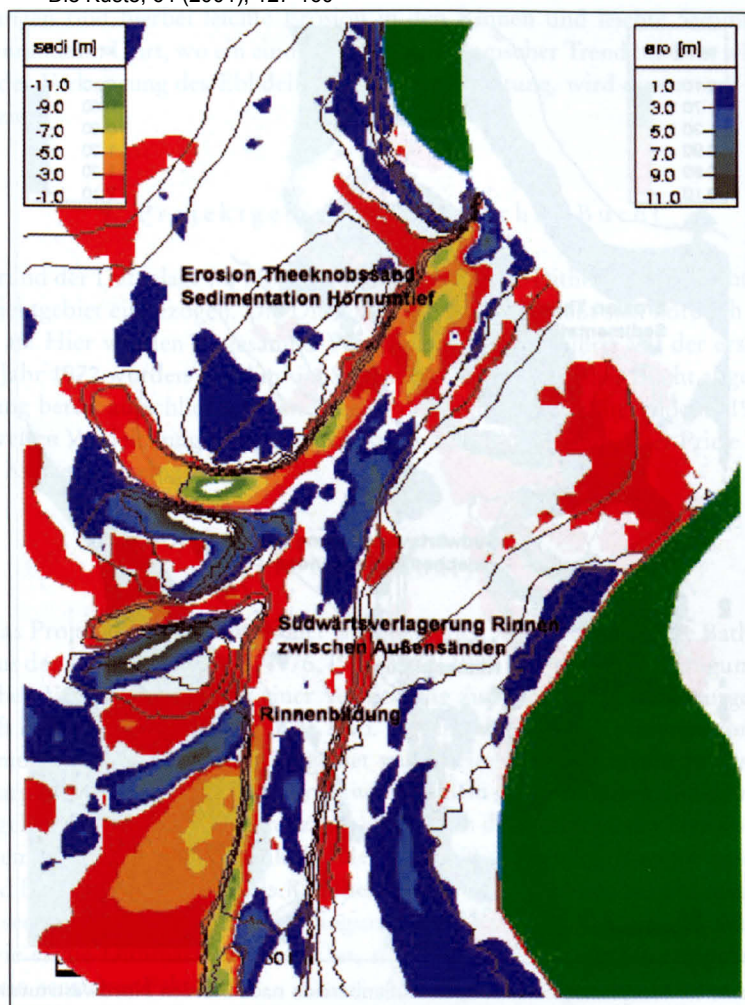


Abb. 17: Gemessene Tiefenänderungen Außenbereich 1955–1974 (rot: Sedimentation, blau: Erosion)

eine Vergleichbarkeit mit der Natur zu erreichen, wird in dieser Rechnung die Aufnahme von 1955 als Starttopographie herangezogen. Die östliche Begrenzung des Teilmodells bildet das Seegat Hörnumtief.

Die Rechenergebnisse für einen Nordweststurm Windstärke 8 (17,5 m/s) sind in Abb. 18 dargestellt.

Es wird eine Südwärtsbewegung des Ebbdeltas berechnet. Material gelangt auf den Sänden durch die hohe Seegangsbelastung in Suspension und wird anschließend mit der Strömung in die Rinnen verlagert. Die Morphologieveränderungen erreichen von ihrer Quantität ungefähr 20 % der langjährigen Veränderungen, obwohl insgesamt nur über 2 Tiden gerechnet wurde. Dies legt die Vermutung nahe, dass die während einzelner Starkwindereignisse erzeugten Umlagerungen während ruhigerer Perioden teilweise wieder ausgeglichen werden.

Es zeigt sich, dass diese in der Natur anzutreffende morphologische Entwicklung vom Modell in der Tendenz nachgebildet werden kann.

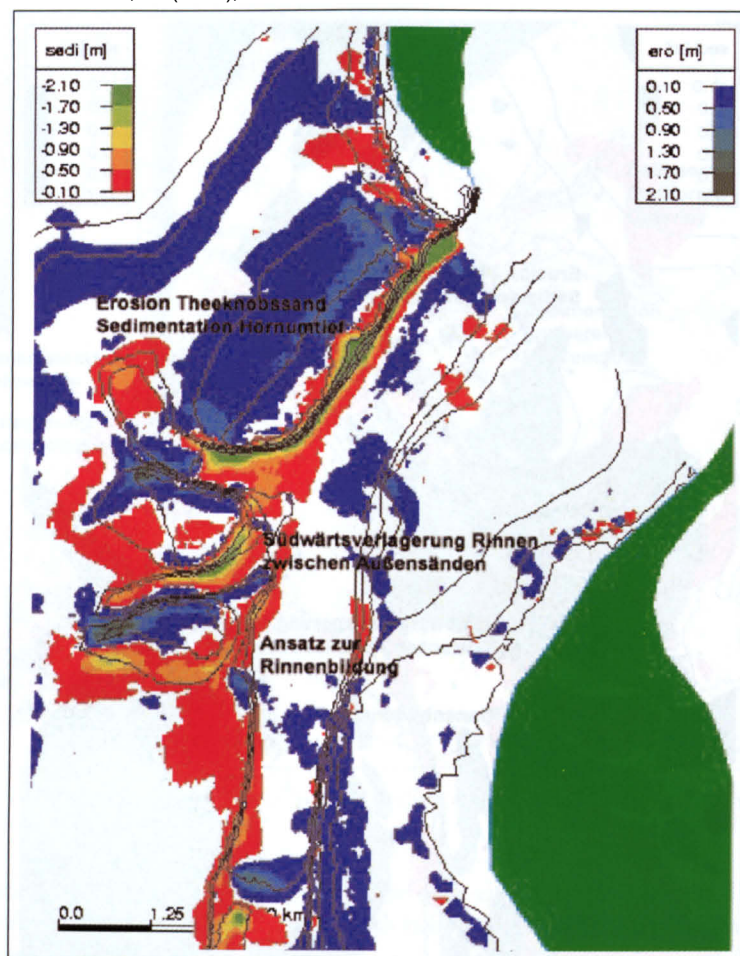


Abb. 18: Berechnete Morphologieänderungen Außenbereich nach 2 Tiden Nordweststurm (17,5 m/s) (rot: Sedimentation, blau: Erosion)

8. Zusammenfassung der Ergebnisse im Tidebecken Hörnumbecken

Es konnte gezeigt werden, dass das morphodynamische Modell bei Berücksichtigung des Seegangs in einem Gebiet, das sich annähernd im morphologischen Gleichgewicht befindet, wie es im Hörnumbecken der Fall ist, naturähnliche Ergebnisse berechnet. Insbesondere werden morphologisch aktive Bereiche gut getroffen und Rinnenverlagerungen dort berechnet, wo sie auftreten. Unschärfen existieren in der Quantität des umgelagerten Materials und im zeitlichen Ablauf der Umlagerungen. Es wurden Verfahren der Eingabefilterung angewandt, die für morphologische Langfristprognosen unverzichtbar sind. Bei der Wahl repräsentativer Windlagen ergab eine Kombination aus nordwestlichen, westlichen, südwestlichen und südlichen Windlagen die beste morphologische Übereinstimmung mit einem Referenzzustand. Bei Vernachlässigung des Seegangs sind erwartungsgemäß hingegen nur Aussagen für ruhigere Perioden möglich. Die auffälligsten berechneten morphologischen

Entwicklungen sind hierbei leichte Erosion in den Rinnen und leichte Sedimentation an den Rinnenrändern. Dort, wo ein eindeutiger morphologischer Trend besteht, wie beispielsweise bei der Verlagerung des Ebbdeltas in südliche Richtung, wird dieser vom Modell gut prognostiziert.

9. Projektgebiet Dithmarscher Bucht

Aufgrund der Datenlage im Hörnumbecken wurde die Dithmarscher Bucht als zusätzliches Projektgebiet einbezogen. Die Dithmarscher Bucht schließt sich nördlich an die Elbmündung an. Hier wurden insgesamt 2 Vordeichungen ausgeführt: Mit der ersten Vordeichung im Jahr 1972 wurden 11,5 km² im Südosten der Dithmarscher Bucht abgetrennt. Die Vordeichung betraf ausschließlich den Bereich des Sommerkoog-Steertlochs. 1978 wurden mit der zweiten Vordeichung weitere 22,5 km² aus dem Einzugsgebiet der Priele Wöhrdener Loch und Kronenloch eingedeicht.

9.1 Datenanalyse

Für das Projektgebiet Dithmarscher Bucht standen 7 quasisynoptische Bathymetriedatensätze aus den Jahren 1969, 1973, 1976, 1979, 1982, 1985 und 1990 zur Verfügung. Die morphologischen Veränderungen von einer Vermessung zur nächsten wurden ausgewertet und flächenhaft dargestellt (vgl. beispielhaft Abb. 23) und dienten als Interpretationsgrundlage für die Simulationen. Für das Gesamtgebiet wurde eine Sedimentbilanz aufgestellt, die in Abb. 19 dargestellt ist. Aus der Differenz zwischen dem sedimentierten und dem erodierten Volumen geht das Sedimentvolumen hervor, welches in den betrachteten Zeiträumen aus anderen Teilen der Deutschen Bucht in das Gebiet der Dithmarscher Bucht eingetragen worden ist und für die Modellierung als Randbedingung berücksichtigt werden muss. Die Vorgabe der sedimentologischen Randbedingung ist besonders in einem geschützten Tidebecken, wie es die Dithmarscher Bucht ist, mit relativer Nähe zu den schwebstoffreichen Ästuaren ein sensibler Faktor.

Weiterhin wurde der Frage nachgegangen, aus welchen Tiefenbereichen Material umgelagert wurde. Dies ist in Abb. 21 und Abb. 22 dargestellt. Aus dieser Abbildung ist zu entnehmen, dass die 1976er Vermessung wahrscheinlich falsch beschickt wurde, da ein großes Sedimentvolumen bezogen auf 1973 fehlt (was gerade vor dem Hintergrund der ersten Vordeichung 1972 als unrealistisch angesehen werden muss), welches bis 1979 in denselben Tiefenlagen in etwa den selben Mengen wieder vorhanden ist. Von 1979 an sind starke Ablagerungen von Material oberhalb der Niedrigwasserlinie aufgetreten. Das Material wird teilweise aus den Rinnenbereichen zwischen 10–15 m Tiefe erodiert. Diese zwischenzeitliche Erosion in den Rinnen wird bis 1990 wieder mehr als ausgeglichen, was in Übereinstimmung mit den durch die Verkleinerung des Wateinzugsgebiets zu erwartenden Verkleinerungen der Rinnenquerschnitte und des Beckenvolumens steht.

Dies legt den Schluss nahe, dass die morphologische Anpassung des Gebietes an das verkleinerte Tidebecken auf den Wattflächen wesentlich schneller fortschreitet als in den Rinnen. Eine Ursache dafür könnte in der Verfügbarkeit von „adäquatem“ Material liegen: Während sich auf den Wattflächen feinkörniges Material, was aus der Deutschen Bucht eingetragen wird, absetzen kann, kann sich in den Rinnen wegen der dort weitaus größeren Tidestromgeschwindigkeiten nur gröberes Material ablageren. Dieses gelangt jedoch, wenn

Die Küste, 64 (2001), 127-160
überhaupt, nur in sehr geringen Mengen aus anderen Teilen der Deutschen Bucht in die Dithmarscher Bucht.

Zwischen 1982 und 1985 wurde Material von den Wattflächen in die flacheren Rinnenbereiche verlagert, welches im Folgezeitraum 1985–1990 wieder auf die Wattflächen transportiert wurde. Eine mögliche Erklärung hierfür ist das erhöhte Auftreten von Starkwindereignissen (vgl. Abb. 20) zwischen 1982 und 1985, während derer durch den verstärkten See-

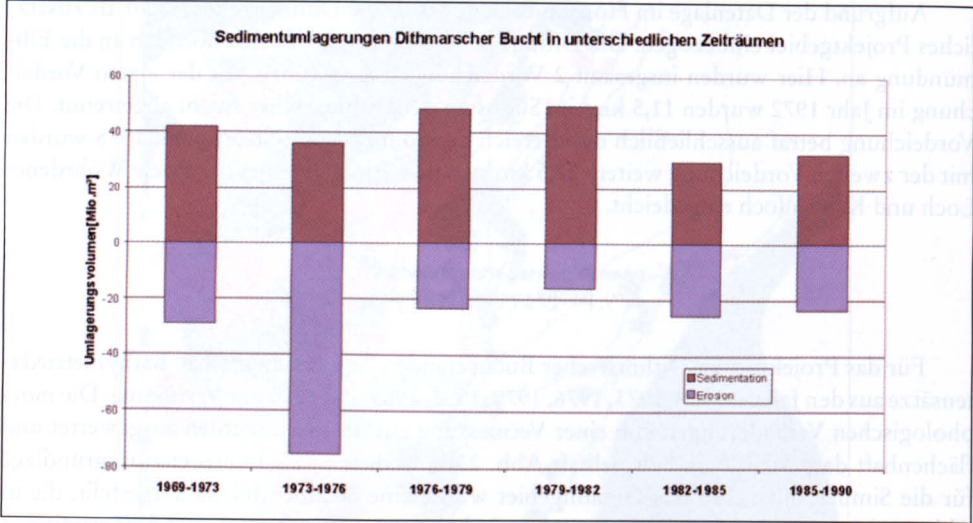


Abb. 19: Globale Sedimentbilanz Dithmarscher Bucht (Differenzen bis 1976 beinhalten noch das Teilgebiet östlich der 2. Abdeichung)

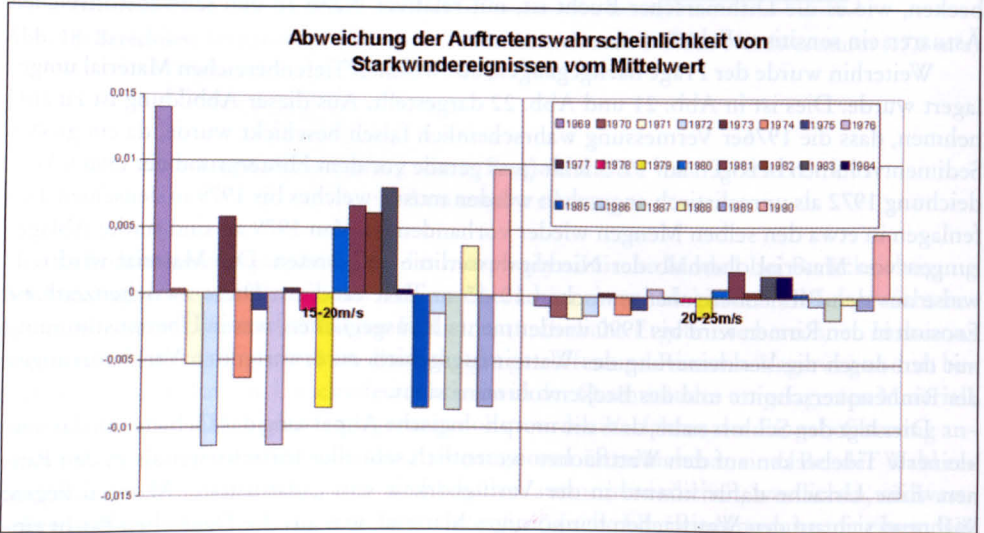


Abb. 20: Abweichung der Auftretenswahrscheinlichkeit von Starkwindereignissen vom Durchschnittsjahr als Gradmesser für die Seegangsbelastung in einzelnen Jahren

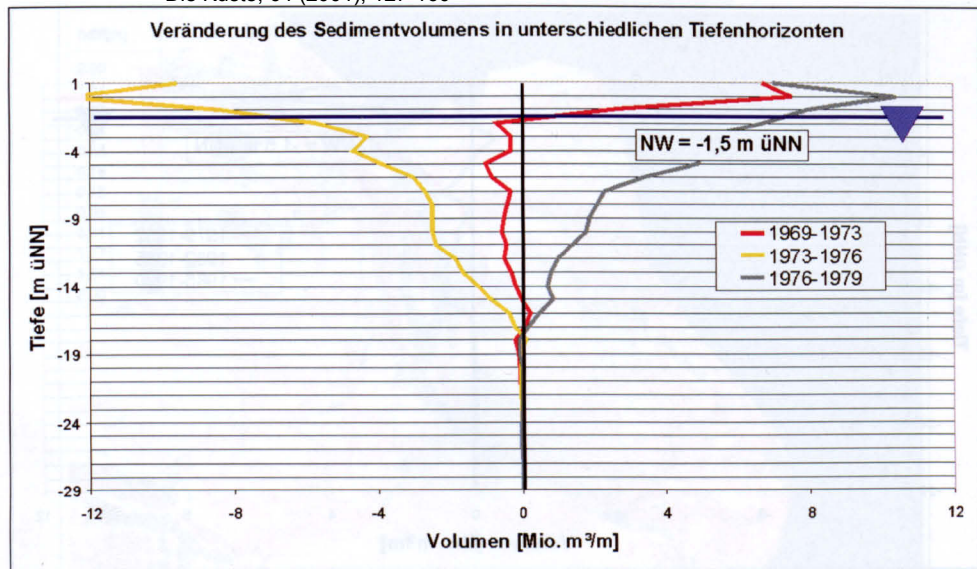


Abb. 21: Sedimentumlagerungen pro m Tiefenschicht für den Bereich westlich des neuen Deichs

gang Material von den Wattflächen erodiert wird und in den Rinnen zur Ablagerung kommt. Der Zeitraum von 1985 bis 1990 kann dagegen als ruhig charakterisiert werden, weshalb das Material wieder auf die Wattflächen verlagert wurde. Diesem Wechselspiel zwischen ruhigen und stürmischen Perioden, der Identifikation der morphodynamisch relevanten Ereignisse und dem Einfluss ihrer Chronologie wird in dem KFKI-Forschungsvorhaben *Langfristige Sedimentdynamik für das System Tidebecken-Ebbdelta unter besonderer Berücksichtigung von verändertem Seegang und Wasserständen* nachgegangen.

Als Referenzzustand wurde letztlich die Morphologieänderung von 1979–1982 herangezogen. Zu diesem Zeitpunkt war die Vordeichung bereits abgeschlossen und die morphologische Anpassung an das verkleinerte Tidebecken am stärksten, dessen Nachbildung ein Ziel des Forschungsvorhabens war. Weiterhin war damit die Möglichkeit gegeben, einen möglichst langen Zeitraum morphodynamisch zu modellieren, um Aussagen über den vertretbaren Prognosezeitraum treffen zu können.

Datensätze, in deren Zwischenzeitraum ein Teil des neuen Dammes fertiggestellt wurde, sind als Referenzzustände problematisch, da sich nicht deutlich zwischen den Morphologieänderungen, die vor und die nach der Vordeichung stattgefunden haben, differenzieren lässt.

In dem betrachteten Zeitraum mäandriert der Haupttidestrom Piep, was in Abb. 23 zu erkennen ist. Die Verstärkung der Mäandrierung mit Erosion in den Außenkurven und Sedimentation an den Innenkurven tritt südlich von Büsum und im weiteren Verlauf bei der folgenden 90°-Fließrichtungsänderung auf. Diese Tendenz ist schon für frühere Aufnahmen der Dithmarscher Bucht belegt (WIELAND, 1984) und daher nicht auf den Eingriff zurückzuführen. Sie ist allerdings aufgrund der in den Fließkurven auftretenden Sekundärströmungen eine stark dreidimensional beeinflusste Erscheinung, weshalb sie vom zweidimensionalen Modell nur beschränkt wiedergegeben werden kann.

Es treten flächendeckende Sedimentationen auf, die als Reaktion des Gebiets auf die verkleinerte Einzugsgebietsfläche interpretiert werden müssen. Die Anpassung tritt sowohl auf den Wattflächen als auch in den Rinnen auf.

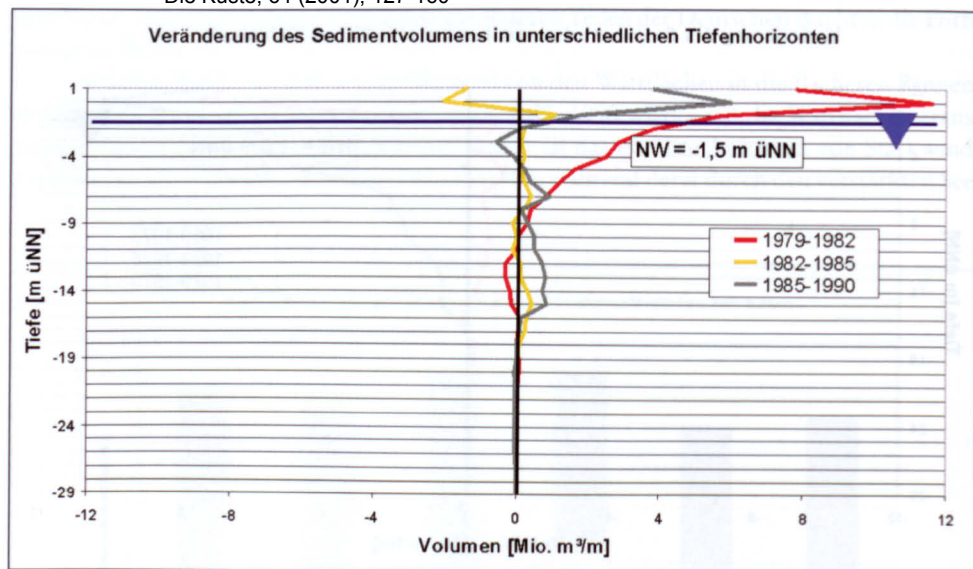


Abb. 22: Sedimentumlagerungen pro m Tiefenschicht für den Bereich westlich des neuen Deichs

9.2 Morphodynamische Modellierung Dithmarscher Bucht

Für die Dithmarscher Bucht stand die Frage im Vordergrund, ob bzw. inwieweit die in der Natur durch den starken Eingriff hervorgerufene morphodynamische Reaktion mit dem morphodynamischen Programm TIMOR nachgebildet werden kann. Von der innerhalb des Projektes erarbeiteten Strukturierung

- Modellierung der morphodynamischen Reaktion auf einen starken Eingriff
 - Modellierung lokal begrenzter morphologischer Strukturen
 - Modellierung der großräumigen Sedimentdynamik
- stand hier also der erste Fall im Vordergrund.

Die Bedeutung des Seegangs sollte im Untersuchungsgebiet Hörnumbecken eingehend untersucht werden. Zentrale Fragestellungen waren in der Dithmarscher Bucht daher folgende:

- Kann die von der Vordeichung ausgelöste morphodynamische Reaktion vom Modell (auch ohne Berücksichtigung des Seegangs) wiedergegeben werden?
- Welche Parameter (Korngrößen, Feinstschwebstoffe, ...) haben einen Einfluss?

Das Modell wurde mit den weiter vorne beschriebenen Parameterdatensätzen betrieben.

Vergleicht man die Berechnungsergebnisse des morphodynamischen Modells TIMOR in Abb. 24 mit den gemessenen Tiefenänderungen, so erkennt man, dass das morphodynamische Modell TIMOR die Morphologieänderungen für den betrachteten 3-Jahreszeitraum sowohl von der Tendenz als auch von der Quantität in weiten Bereichen ordentlich wiedergibt. Die Lage und Quantität der flächenhaften Sedimentationen, die als Anpassung des Gebietes an die verkleinerte Wattenzugsgebietsfläche interpretiert werden müssen, können gut wiedergegeben werden. Die Auffüllung der durch den Dammbau entstandenen Baggerlöcher im südöstlichen Teil wird von der Quantität her gut wiedergegeben. Die morphologische Anpassung in den Endbereichen der Rinnen wird zwar in der Tendenz wiedergegeben, jedoch

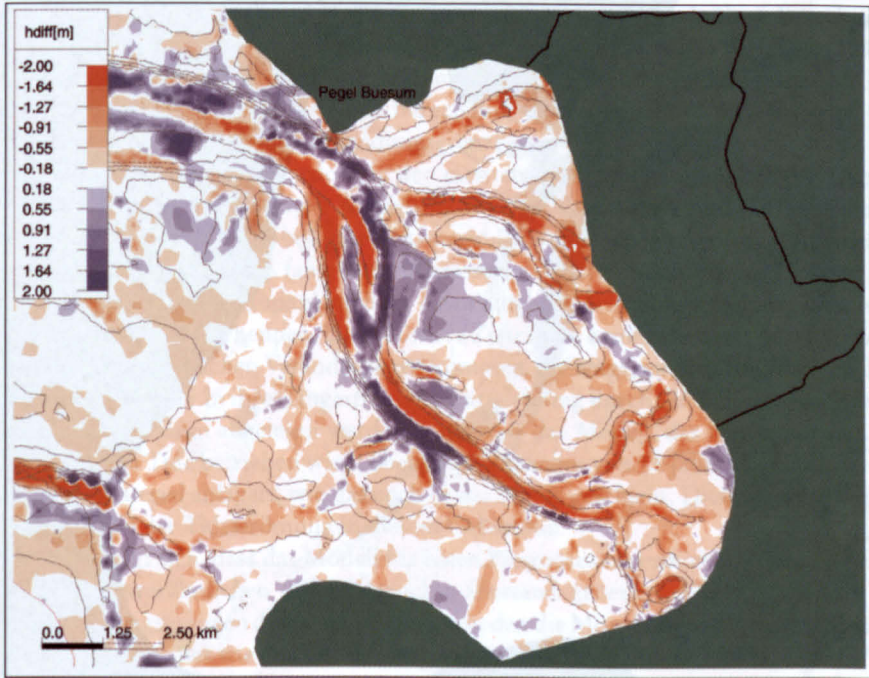


Abb. 23: Dithmarscher Bucht – Gemessene Tiefendifferenzen 1979–1982 (blau: Erosion)

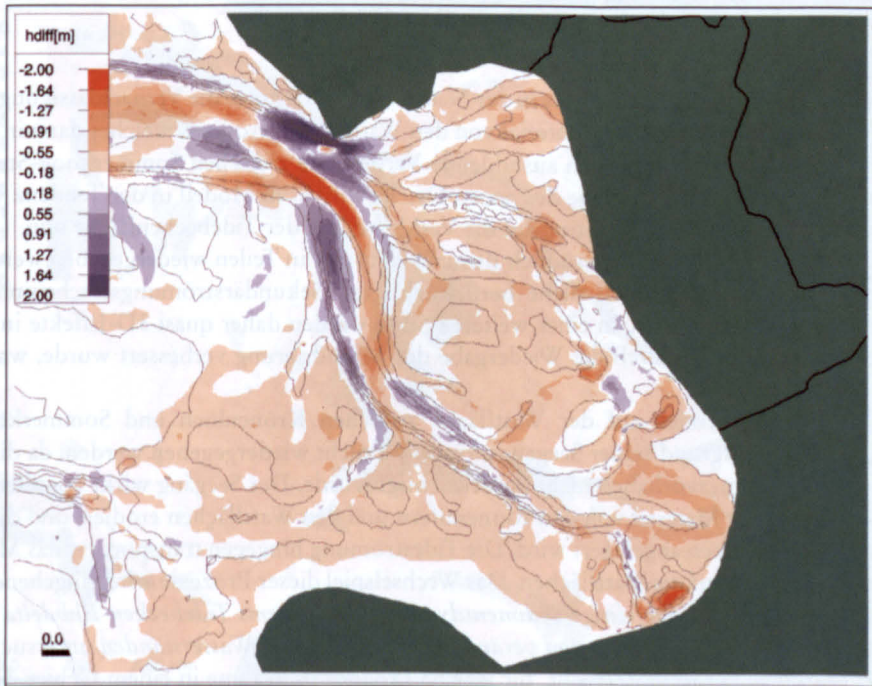


Abb. 24: Dithmarscher Bucht – Berechnete Tiefendifferenzen 1979–1982 ohne parametrisierter Sekundärströmung (blau: Erosion)

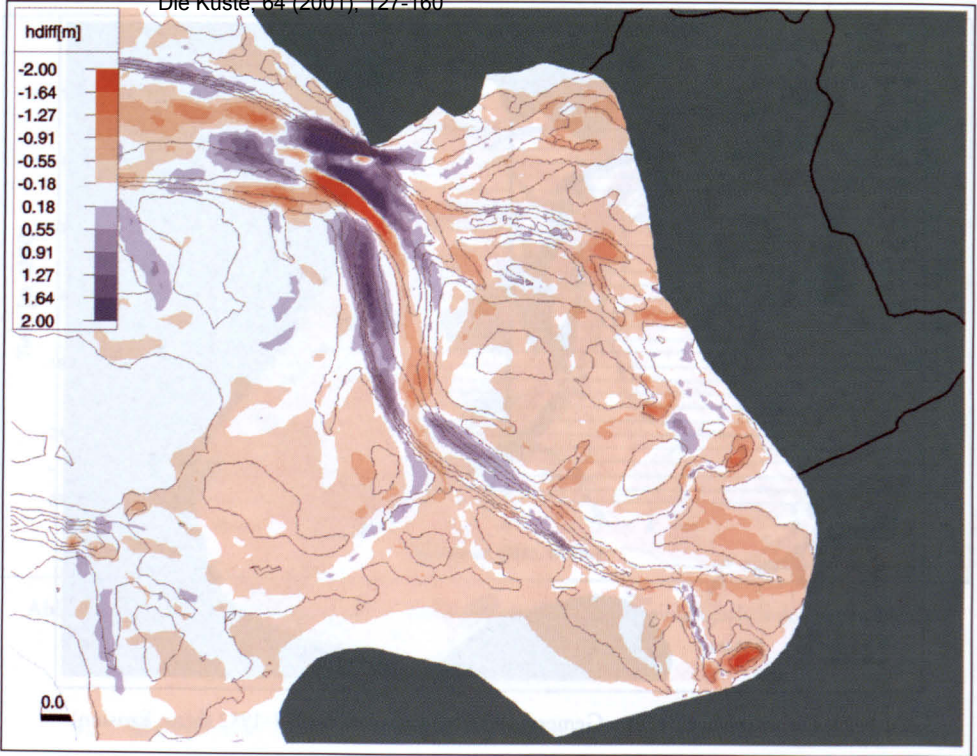


Abb. 25: Dithmarscher Bucht – Berechnete Tiefendifferenzen 1979–1982 ohne parametrisierter Sekundärströmung (blau: Erosion)

in einem weit geringeren Umfang als in der Natur. Hier dürfte u. a. die Vernachlässigung des Seegangs eine Rolle spielen, der Material von den Wattflächen erodiert, welches dann in den Rinnen angelagert wird. Eine sich ausbildende Verbindung zwischen Sommerkoog-Steertloch und Kronenloch in der Nähe des neuen Deichs wird vom Modell in der Tendenz wiedergegeben. Sie dürfte eine Reaktion auf die Verkleinerung der Tidebeckenfläche sein.

Die Mäandrierung der Piep südlich Büsums kann nur in Teilen wiedergegeben werden, was auch auf die im Modell nicht berücksichtigten Sekundärströmungserscheinungen zurückzuführen sein dürfte. In einer weiteren Stufe werden daher quasi 3D-Effekte in das Modell einbezogen, wodurch die Wiedergabe der Mäandrierung verbessert wurde, was in Abb. 25 dargestellt ist.

Der Erosionsbereich auf der Wattfläche zwischen Kronenloch und Sommerkoog-Steertloch kann aufgrund seiner Seegangsexposition nicht wiedergegeben werden, da dieser in diesem Forschungsvorhaben nicht berücksichtigt wurde. Der Seegang wirkt vor allem in der Gestalt, dass er Material von den Rinnenufern und den Wattflächen erodiert und dieses Material in den Rinnen abgelagert wird. Die Tideströmung hingegen transportiert das Material aus den Rinnen auf die Wattflächen. Das Wechselspiel dieser Prozesse wird eingehend im Forschungsvorhaben *Langfristige Sedimentdynamik des Systems Tidebecken-Ebbdelta unter besonderer Berücksichtigung von verändertem Seegang und Wasserständen* untersucht.

Es wurde weiterhin untersucht, für welche Prognosezeiträume in einem Gebiet dieser Größe mit komplexer Topographie noch naturähnliche Morphologieänderungen berechnet werden können. Hierzu wurde die Rechnung mit einer Anfangstopographie von 1979 über

einen Berechnungszeitraum von 11 Jahren fortgesetzt, so dass der endgültige Berechnungszustand mit der Topographie von 1990 verglichen werden konnte. Nach VAN RIJN (1998) ist die Anwendungsgrenze eines 2D-morphodynamischen Modells für ein Gebiet der Größe der Dithmarscher Bucht 5–10 Jahre. Der Berechnungszeitraum liegt somit am oberen Rand der von VAN RIJN angegebenen Anwendungsgrenze.

Die Modellergebnisse sind jedoch in den meisten Bereichen naturähnlich (vgl. Abb. 26 und Abb. 27). Die morphologische Anpassung auf den Wattflächen wird zufriedenstellend wiedergegeben. Auch die morphologische Anpassung der Rinnen wird von der Quantität gut wiedergegeben. In der Natur fand diese Anpassung bereits in den ersten 3 Jahren statt, während das Modell diese Anpassung über einen längeren Zeitraum berechnet. Dies ist aus Abb. 28 und Abb. 29 zu erkennen. Über kürzere Zeiträume kann es bedingt durch Einzelergebnisse zu morphologischen Veränderungen kommen, die entgegen dem langfristigen Trend laufen. Sie werden aber in ihrer längerfristigen Entwicklung durch die Tideströmung wieder ausgeglichen, was daran abgelesen werden kann, dass das Modell, das hier ja nur mit einer morphologischen Tide betrieben wird, über einen Zeitraum von 11 Jahren in ähnlichen Tiefenbereichen Material anlagert, wie das auch in der Natur geschieht. Dies deutet auf die dominierende Rolle der Tideströmung in diesem Gebiet hin.

Generell zeigt sich, dass das Modell für einen Prognosezeitraum von 11 Jahren einen in weiten Teilen naturähnlichen (Gleichgewichts-)Zustand generiert. Die Angabe von zeitlichen Anwendungsgrenzen dürfte daher stark von den die Morphologie bestimmenden Prozessen abhängen. Ist dies wie im Falle der seegangsgeschützten Dithmarscher Bucht die Tide-

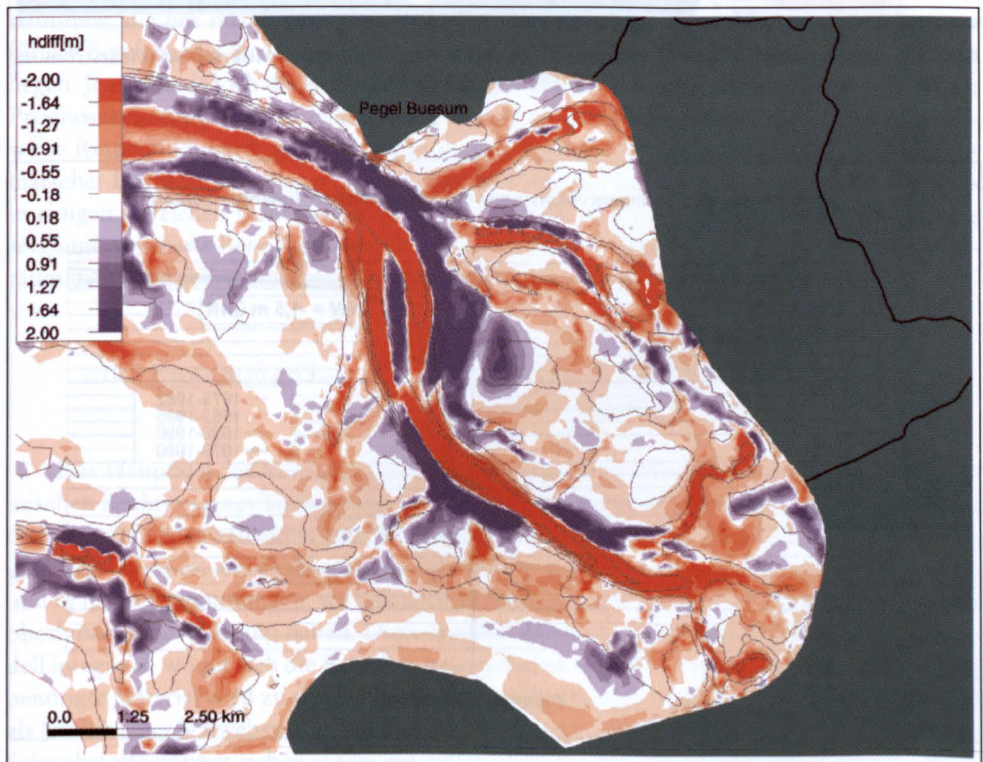


Abb. 26: Dithmarscher Bucht – Gemessene Tiefendifferenzen 1979–1990 (blau: Erosion)

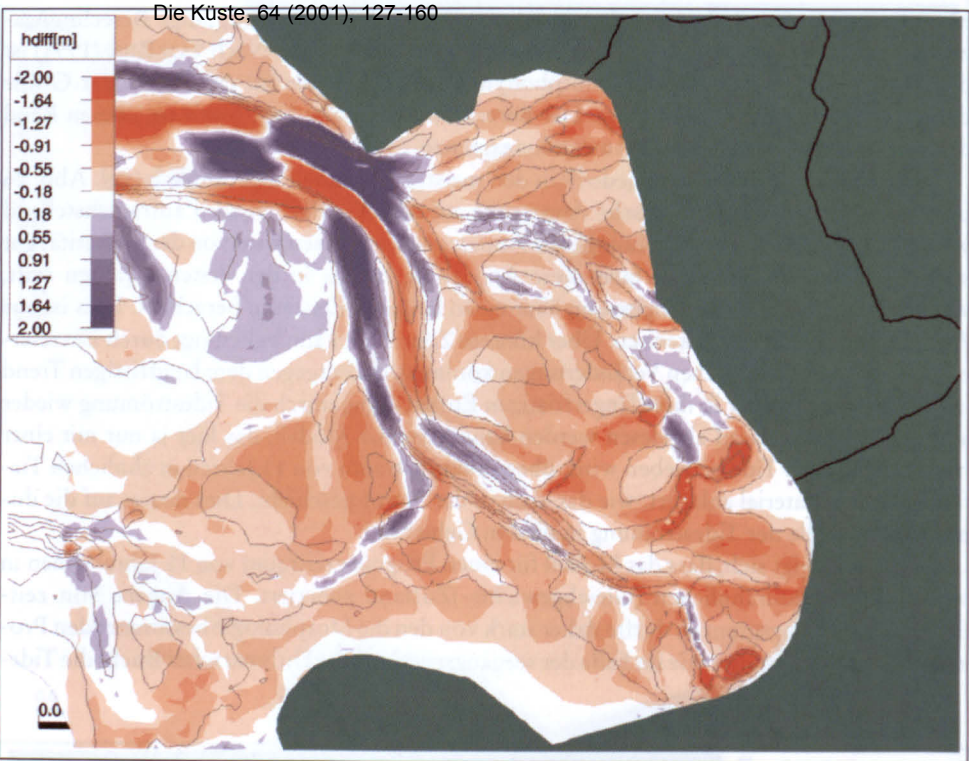


Abb. 27: Dithmarscher Bucht – Berechnete Tiefendifferenzen mit parametrisierter Sekundärströmung 1979–1990 (blau: Erosion)

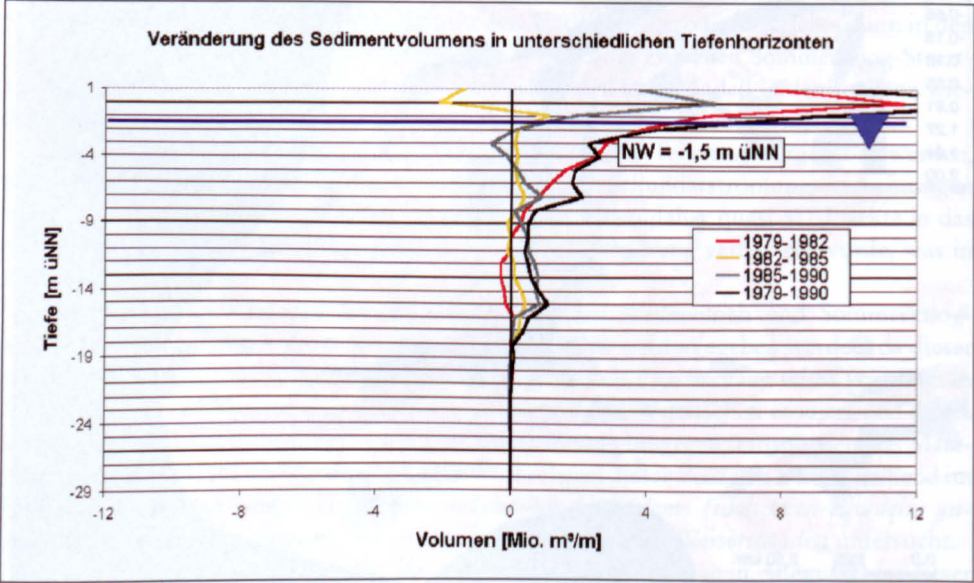


Abb. 28: Gemessene Sedimentumlagerungen pro m Tiefenschicht für den Bereich westlich des neuen Deichs 1979–1990

Veränderung des Sedimentvolumens in unterschiedlichen Tiefenhorizonten RECHNUNG

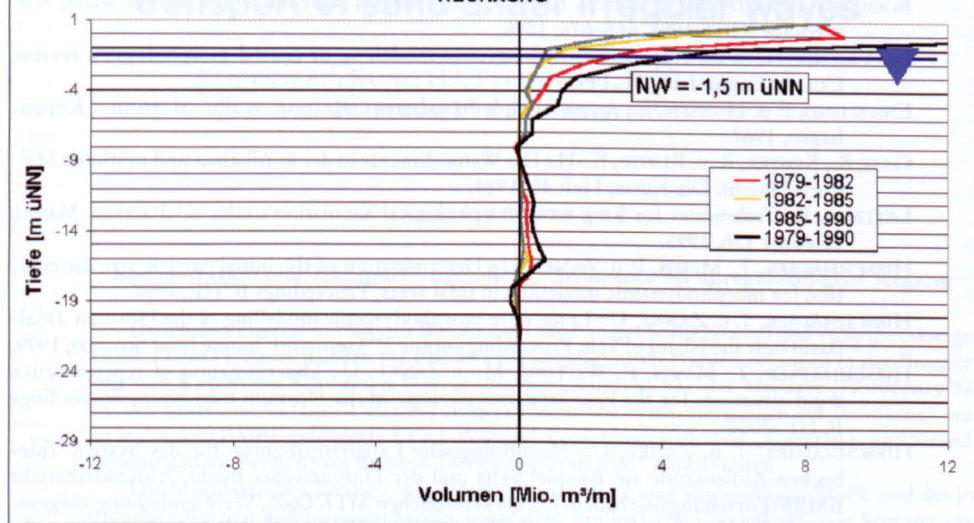


Abb. 29: Berechnete Sedimentumlagerungen pro m Tiefenschicht für den Bereich westlich des neuen Deichs 1979–1990

strömung, die nur relativ geringen Schwankungen unterliegt, kann die Anwendungsgrenze für die Bereiche, die durch die Tideströmung dominiert sind, durchaus auch über 10 Jahren liegen. Je stärker jedoch die Rolle des Seegangs wird, desto kürzer wird auch der vertretbare Prognosezeitraum, da es durch Extremereignisse zu Morphologieänderungen, wie beispielsweise Rinnenbildungen, kommen kann, die das System stark verändern. Im Falle der Dithmarscher Bucht ist davon auszugehen, dass die Prognose bei Berücksichtigung des Seegangs in einigen Bereichen verbessert werden kann, da der Seegang einerseits direkt auf einzelne seegangsexponierte Bereiche einwirkt, andererseits aber auch indirekt Einfluss auf die großräumige Sedimentdynamik hat.

10. Zusammenfassung der Ergebnisse im Tidebecken Dithmarscher Bucht

Das Hauptziel des Forschungsvorhabens, nämlich die Modellierung der morphodynamischen Reaktion eines Tidebeckens auf einen starken Eingriff, wird in weiten Bereichen des Gebietes zufriedenstellend erfüllt. Sowohl in der Tendenz als auch in der Quantität werden gute Ergebnisse erzielt. Diskrepanzen existieren vor allem in seegangsexponierten Bereichen und in Kurvenkrümmungen, wo Sekundärströmungen eine nicht zu vernachlässigende morphodynamische Wirkung haben. Diese wurden daher in parametrisierter Weise in das Modell integriert, womit sich die Berechnungsergebnisse in Teilbereichen verbessert haben. Das benötigte Material wird zu einem kleinen Teil aus den Rinnen erodiert und zum größeren Teil als feinkörniger Schwebstoff in das Gebiet eingetragen. Das Maß der ins Gebiet strömenden Schwebstoffe erweist sich in einem geschützten Tidebecken, wie die Dithmarscher Bucht es ist, mit Nähe zu den schwebstoffreichen Ästuaren als sensitiver Faktor.

11. Schriftenverzeichnis

- BOOIJ, J. A., HOLTHUIJSEN, L. H. u. RIS, R. C.: The SWAN wave model for shallow water, Proceedings ICCE 1996, 668–676, 1996.
- DE VRIEND, H. et al.: Approaches to long-term modelling of coastal morphology: a review, Coastal Engineering 21, 1993.
- ENGELUND, F. u. HANSEN, E.: A monograph on sediment transport in alluvial streams, Kopenhagen, 1967.
- GAST, R., KÖSTER, R. u. RUNTE, K.-H.: Die Wattsedimente in der nördlichen und mittleren Melderder Bucht, Die Küste, Heft 40, 1984.
- LATTEUX, B.: Techniques for long-term morphological simulation under tidal action, Marine Geology 126, 1995.
- HIRSCHHÄUSER, T., MEWIS, P. u. ZANKE, U.: Determination of the initial particle size distribution for morphodynamic modelling in tidal areas, Proceedings ICHE, 1998.
- HIRSCHHÄUSER, T. u. ZANKE, U.: Long-term morphodynamic modelling of the Hörnum Tidal Basin near the Island of Sylt, Proceedings of the 3rd German-Chinese Joint Seminar, 1999.
- HIRSCHHÄUSER, T.; MEWIS, P.; WITTING, M. u. ZANKE, U.: Determination of representative wind-situations for the long-term morphology of the Hörnum tidal basin, Proceedings ICHE, 2000.
- HIRSCHHÄUSER, T. u. ZANKE, U.: Morphologische Langfristprognose für das System Tidebecken-Außensände am Beispiel Sylts und der Dithmarscher Bucht, Abschlussbericht BMBF-Forschungsvorhaben, Förderkennzeichen MTK 0605, Veröffentlichung vorgesehen in Mitteilungen des Instituts für Wasserbau und Wasserwirtschaft der TU Darmstadt, 2000.
- MEWIS, P. u. HOLZ, K. P.: A quasi bubble function approach for shallow water waves, Proceedings of the 1st International Conference on Hydrosience and Engineering, 1993.
- MEYER-PETER, E. u. MÜLLER, R.: Eine Formel zur Berechnung des Geschiebetriebs, Schweizer Bauzeitung, 67 Nr. 3, 1949.
- PARTHENIADES, E.: Erosion and deposition of cohesive soils, Journal of the Hydraulic Division, ASCE, Vol. 91, 1965.
- SIEFERT, W.: Umsatz- und Bilanzanalysen für das Küstenvorfeld der Deutschen Bucht, Die Küste, Heft 45, 1987.
- VAN RIJN, L.: Sediment Transport Part II: Suspended Load Transport, Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 110, No. 11, 1984.
- VAN RIJN, L.: Principles of sediment transport, Aqua publications, 1993.
- VAN RIJN, L.: Principles of coastal morphology, Aqua publications, 1998.
- WIELAND, P.: Untersuchungen über geomorphologische Veränderungen in der Dithmarscher Bucht, Die Küste, Heft 40, 1984.
- ZANKE, U., MEWIS, P., SAENGER, N. u. MONTENEGRO, H.: Prozesse in Oberflächengewässern, im Interstitial und im Grundwasser – Phänomene und numerische Lösungen, Thema Forschung 1998, Heft 2, TU Darmstadt, 1998.
- ZANKE, U.: Der Beginn der Sedimentbewegung als Wahrscheinlichkeitsproblem, Wasser & Boden, Heft 9, 1992, 1990.
- ZANKE, U.: Ein numerisches Modell für bewegliche Sohle, Wasser&Boden, Heft 12, 1994.