

Erste Ergebnisse empirischer Modellierung der Morphodynamik eines Wateinzugsgebietes am Beispiel der Dithmarscher Bucht

Von ROLAND GOLDENBOGEN

Zusammenfassung

Der erreichte Arbeitsstand in der Fortentwicklung eines empirischen morphodynamischen Modells wird dargestellt, mit dem die großräumige morphologische Entwicklung von hierarchisch gegliederten Rinnen-Einzugsgebietssystemen infolge veränderter Tideverhältnisse reproduziert werden kann. Als Testgebiet für dieses Modell wurde die Dithmarscher Bucht gewählt, da dort durch aufeinanderfolgende Abdeichungen im Zeitraum von 1970 bis 1978 großräumige Veränderungen eingetreten sind. Die Ergebnisse der Simulation mit dem neuen Modelltyp zeigen, daß er erfolgreich für die morphodynamische Modellierung der Folgewirkungen von anthropogenen Eingriffen auf tidedominierte Bereiche wie die Dithmarscher Bucht eingesetzt werden kann.

Summary

The present stage of development of an empirical morphodynamic model is described. The model is able to reproduce large scale morphological changes of hierarchically structured channel-basin-systems due to changes in tidal behaviour. Dithmarschen Bay data have been used for verification, since this area has shown large-scale changes as a consequence of successive closures of tidal systems during the period from 1970 to 1978. Simulation results indicate that this type of model is a suitable tool for the reproduction of morphodynamic development as a consequence of human activity in tide-dominated areas such as the Dithmarschen Bay.

Inhalt

1. Einleitung	136
2. Modellkonzept	136
2.1 Gleichgewichtsparameter	136
2.2 Beschreibung des Übergangszustandes	137
2.3 Fortentwicklung des Modells von VAN DONGEREN und DE VRIEND	137
2.4 Diskussion des Modells	140
3. Anwendung auf die Dithmarscher Bucht	140
3.1 Beschreibung des Untersuchungsgebietes	140
3.2 Schematisierung und Eingabedaten	142
3.3 Ergebnisse der Rückrechnung	143
4. Schlußfolgerungen und Ausblick	147
5. Danksagung	148
6. Schriftenverzeichnis	148
7. Symbolverzeichnis	148

1. Einleitung

Im deutsch-niederländischen Forschungsvorhaben WADE (Morphological development of the Wadden Sea region with special emphasis of the impact of an increasing relative sea level rise) wird unter anderem angestrebt, empirisch-konzeptionelle morphodynamische Modelle für Wattengebiete zu entwickeln. Mit ihnen sollen neben Gleichgewichtszuständen auch die Zwischenphasen bei einer Neuanpassung an veränderte Randbedingungen wie beispielsweise einem veränderten Meeresspiegelanstieg modelliert werden (GOLDENBOGEN, SCHROEDER, KUNZ und NIEMEYER, 1994).

Es wird ein Modell vorgestellt, das die großräumige morphologische Entwicklung von hierarchisch gegliederten Rinnen-Einzugsgebieten infolge veränderter Tideverhältnisse beschreibt. Es wurde auf der Grundlage des Speicherbeckenmodells von VAN DONGEREN und De Vriend (1994) entwickelt. Das Modell basiert auf empirisch-statistischen Parametrisierungen von Gleichgewichtszuständen. Die Simulation von Erosions- und Sedimentationsprozessen für bestimmte Zeiträume reproduziert den Übergangszustand zwischen zwei Gleichgewichtszuständen in einem Einzugsgebiet, wobei über veränderte Materialbilanzen eine Wiederherstellung eines Gleichgewichtszustandes angestrebt wird. Das Modell kann somit die morphologischen Folgewirkungen durch Abdeichungen, Meeresspiegelanstieg, Landabsenkungen und Tidehubvariationen bedingter Änderungen lokaler Tidevolumen reproduzieren. Das ursprüngliche Speicherbeckenmodell wurde bei der Forschungsstelle Küste in qualitativer Hinsicht den natürlichen Erosions- und Sedimentationsprozessen angepaßt und dann in ein Netzwerk hierarchisch geordneter Rinnen mit zugehörigen Teileinzugsgebieten als Modell eines Tidebeckens unter der Bezeichnung TIDYN2 fortentwickelt.

2. Modellkonzept

2.1 Gleichgewichtsparameter

Das zugrunde gelegte Modell basiert auf empirisch ermittelten Gleichgewichtszuständen für Rinnenquerschnitte A_c und Wattflächen A_i . Das Verhältnis von mittlerem Tidevolumen V_T zum Rinnenquerschnitt A_c wird nach folgender Formel von O'BRIEN (1931) bestimmt, wobei der Parameter b_j [in m^{-1}] empirisch ermittelt wird:

$$A_c = b_j \cdot V_T \quad [m^2] \quad (1)$$

Die statistische Auswertung der Daten aus dem Geographischen Informationssystem (GIS) bestätigt Formel (1) und führt für die Dithmarscher Bucht 1969 zum Parameter $b_j = 6,77 \cdot 10^{-5} m^{-1}$ (GOLDENBOGEN und SCHROEDER, 1993).

Die Wattfläche A_i , begrenzt durch die MThw- und MTnw-Linie, ergibt sich im zugrunde gelegten Modell nach RENGER (1974) aus der Einzugsgebietsfläche A_b unterhalb MThw:

$$A_i = A_b \cdot (1 - 2,5 \cdot 10^{-5} \cdot A_b^{1/2}) \quad [m^2] \quad (2)$$

Diese Beziehung (2) zeigt jedoch für Gebiete mit einer Einzugsgebietsfläche über 100 km^2 deutliche Abweichungen gegenüber den Daten. Es wurde daher die empirische Beziehung

$$A_i = 3,37 \cdot A_b^{0,92} \quad [m^2] \quad (3)$$

für Gebiete mit $A_b > 5 \text{ km}^2$ eingeführt, die auf der Grundlage von Vermessungsdaten von 1942, 1956 und 1969 beruht und somit den Zustand vor den großräumigen Veränderungen im Einzugsgebiet der Piep durch menschliche Eingriffe repräsentiert.

Für die Modellierung war ein repräsentativer Wert für die Höhenlage des Watts erforderlich. Hierzu wurde der Watthöhenkennwert l_i als die Höhenlage definiert, bei der die halbe Wattfläche überflutet ist (SCHROEDER, 1994). Die statistische Auswertung ergab für kleine Gebiete größere Streuungen der Watthöhenkennwerte. Deshalb konnte nur eine Funktion für den oberen Grenzwert des Watthöhenkennwertes l_i bestimmt werden, welche für die Dithmarscher Bucht auf der Grundlage von Meßdaten ermittelt wurde:

$$l_i \leq 0,05 + \frac{0,5}{1 + (3 \cdot 10^{-8} \cdot A_b)^2} \quad [m \text{ NN}] \quad (4)$$

2.2 Beschreibung des Übergangszustandes

Grundlage der beschriebenen empirischen Modellierung ist die Annahme, daß der Rinnenquerschnitt A_c und die Wattfläche A_i jedes Abschnitts das Bestreben haben, sich nach einer Störung wieder ihrem Gleichgewichtszustand \bar{A}_c bzw. \bar{A}_i anzunähern. Diese Annäherung erfolgt asymptotisch nach der Verfallsfunktion mit einer Zeitskala ("Halbwertszeit") τ_c bzw. τ_i , sofern die Materialbilanz des jeweiligen Abschnitts es zuläßt. Diese Funktionen (VAN DONGEREN, 1992) lauten für den Rinnenquerschnitt

$$\frac{\delta A_c}{\delta t} = \frac{\bar{A}_c - A_c}{\tau_c} \quad (5)$$

und für die Wattfläche:

$$\frac{\delta A_i}{\delta t} = \frac{\bar{A}_i - A_i}{\tau_i} \quad (6)$$

Als weiterer Parameter zur Beschreibung dieses Übergangszustandes wird eine jährliche Änderung des Watthöhenkennwertes von $|\Delta l_i| \leq 0,01 \text{ m}$ vorgegeben. Dieser Parameter wurde in Anlehnung an SIEFERT (1987) gewählt, der für die deutsche Nordseeküste aus dem Vergleich der Karten um 1975 mit denen um 1980 eine Bilanzhöhe von 0,013 m ermittelt hat.

Die Anpassung des Watthöhenkennwertes l_i an veränderte Randbedingungen ist von der Materialbilanz des jeweiligen Abschnittes, einer vorgegebenen maximalen jährlichen Änderung und einem oberen Grenzwert (4) abhängig.

2.3 Fortentwicklung des Modells von VAN DONGEREN und DE VRIEND

Der Kern des Modells von VAN DONGEREN und DE VRIEND (1994) ist ein Bilanzierungsalgorithmus zur Simulation der Materialzu- und -abfuhr (S_i, S_{i+1} , Abb. 1) in einem Ab-

schnitt. Dabei wird in einem Abschnitt der Materialbedarf zum Aufhöhen der angrenzenden Watten (F), das Erosionsvolumen von den Watträndern (E) und die Ablagerung an den Rinnenrändern (D) bestimmt. Dieser Bilanzierungsalgorithmus wurde auch Grundlage des neuen Modells TIDYN2, wobei aber die Richtung der morphologischen Reaktion auf veränderte Randbedingungen geändert wurde. Sie beginnt nun in den landwärtigen Rinnen des Prieleinzugsgebietes und pflanzt sich von dort aus seawärts fort.

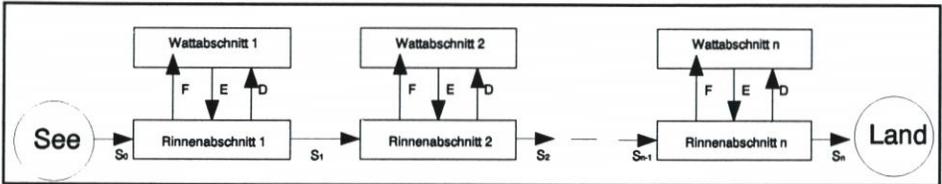


Abb. 1: Schematisierung des Einzugsgebietes im zugrunde gelegten Modell

Um das Modell nicht nur in einer einzelnen Rinne mit Becken anwenden zu können, war es erforderlich, es in ein Netzwerk hierarchischer Rinnen zu überführen: Prieleinzugsgebiete lassen sich im allgemeinen als Verästlungssysteme schematisieren (Abb. 5) und somit als maschenfreies System berechnen. Zur Schematisierung des Rinnensystems werden am Rand des Berechnungsgebietes, an Verzweigungen, an Schnittpunkten mit Abdeichungen und an bekannten Querschnitten Knoten gesetzt. Dort sind die einzelnen Rinnen-Becken-Systeme über definierte Knotenbedingungen (Summierung von Materialzufuhren und Flächen, Mittelung der Wathöhenkennwerte über die Wattflächen) miteinander verknüpft. Der Knoten an der Wurzel des Verästlungssystems, d. h. an der seawärtigen Begrenzung des Einzugsgebietes erhält die Nr. 0. Alle weiteren Knoten werden, beginnend bei der Wurzel, knotenebenenweise durchnummeriert (Abb. 2). Die Rinnen erhalten jeweils die Nummer des nächsten landwärtigen Knotens. Das neue Modell TIDYN2 ist nun in der Lage, Sedimentations- und Erosionsprozesse in Netzwerken hierarchischer Rinnen zu simulieren.

Diese Materialbilanz eines Abschnittes ist im nachstehenden Schema (Abb. 3) dargestellt. Sie muß folgende drei Massenerhaltungsgleichungen erfüllen (VAN DONGEREN, 1992):

– für den Rinnenquerschnitt A_i :

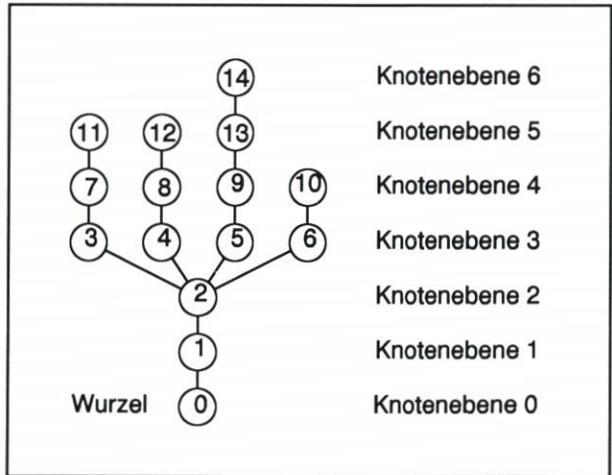


Abb. 2: Schematisierung des Netzwerkes

$$\frac{d}{dt}(A_i) \cdot \Delta t \cdot \Delta x = S_{i+1} + S_i - E + D + F \quad (7)$$

- für den Wathöhennwert l_i :

$$\frac{d}{dt}(l_i) \cdot \Delta t = \frac{F}{A_i} \quad (8)$$

- für die Wattfläche A_i :

$$\frac{d}{dt}(A_i) \cdot \Delta t = \frac{D - E}{h} \quad (9)$$

Dabei stellt die Reihenfolge dieser Gleichungen eine Rangordnung dar. In einem Abschnitt wird zuerst dem Materialbedarf zur Rinnenquerschnittsanpassung entsprochen, danach dem zur Aufhöhung des Watts und schließlich dem zum Anwachsen der Wattfläche. Die einzelnen Sedimentvolumen dieser Massenerhaltungsgleichungen werden wie folgt beschrieben:

E quantifiziert das Erosionsvolumen an den Prielrändern, welches sich aus der jeweiligen Prieltiefe h , der Wattfläche A_i und einem Beiwert μ ergibt. Der Beiwert μ ist erforderlich, da auch in einem Netzwerk hierarchischer Rinnen nicht die kleinsten Wattwasserläufe erfaßt werden und somit der Modellansatz eine direkte Ermittlung aller der Erosion ausgesetzten Prieluferflächen nicht hergibt. Da diese Erosion vor allem durch Sturmtiden verursacht wird, ist sie unabhängig von den Zeitskalen τ_c und τ_i :

$$E = \mu \cdot A_i \cdot h \quad [m^3] \quad (10)$$

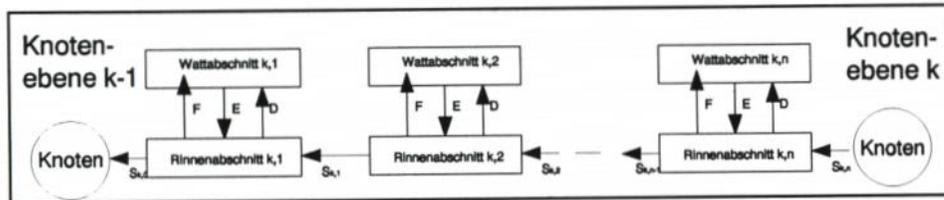


Abb. 3: Schematisierung einer Rinne im neuen Modell

F ist der Sedimentbedarf zum Aufhöhen des Watts. Er ergibt sich aus den Änderungen des Tidehubs und des Mittelwasserstands sowie der Differenz zwischen der Wathöhennenzahl l_i und deren Gleichgewichtswert \bar{l}_i :

$$F = A_i [(1/2 \cdot MThb + MTmw - l_i)_{(t-\Delta t)} - (1/2 \cdot MThb + MTmw - \bar{l}_i)_{(t)}] \quad [m^3] \quad (11)$$

D ist die zum Anwachs an den Watträndern bereitgestellte Sedimentmenge. Um sie zu bestimmen, muß man den eigenen Sedimentbedarf der Rinne Ch und des Watts Fl bestimmen. Diese Größen ergeben sich aus Gleichung (5) und (6):

$$Ch = \frac{\bar{A}_c - A_c}{\tau_c} \cdot \Delta t \cdot \Delta x \quad [m^3] \quad (12)$$

$$Fl = \frac{\bar{A}_i - A_i}{\tau_i} \cdot \Delta t \cdot \Delta x \quad [m^3] \quad (13)$$

Hieraus ergibt sich D wie folgt, wobei γ ein dimensionsloser Parameter ist, welcher die Verteilung der überschüssigen Sedimentmenge auf Wattränder (D) und den nächsten Abschnitt (S_i) festlegt:

$$D = \max [(\gamma \cdot (S_{i+1} + E - F + Ch)), (E + Fl)] \quad [m^3] \quad (14)$$

Die in den nächsten seewärtigen Abschnitt zu transportierende Sedimentmenge S_i ergibt sich folglich aus Formel (7):

$$S_i = S_{i+1} + E - D + \Delta A_c - F \quad \text{mit} \quad \Delta A_c = \frac{d}{dt} (A_c) \cdot \Delta t \cdot \Delta x \quad [m^3] \quad (15)$$

Der Algorithmus zur Erfüllung dieser Gleichungen ist in Abb. 4 dargestellt. Abschließend bleibt als Randbedingung der seewärtige Sedimenteintrag S_0 in das Wateinzugsgebiet zu simulieren:

$$S_0 = \alpha \cdot (\bar{A}_i - A_i)_{(t)} \quad [m^3] \quad (16)$$

2.4 Diskussion des Modells

Im vorgestellten Modell wird nur die Tideeinwirkung auf die morphodynamische Prägung des jeweiligen Einzugsgebietes berücksichtigt, der Einfluß des Seegangs dagegen vernachlässigt. Deshalb ist seine Anwendung auf solche Gebiete beschränkt, welche primär tidegeprägt sind. Ein weiteres Problem ist, daß für die durch eine Kennzahl parametrisierte Wathöhe nur ein oberer Grenzwert bestimmt werden konnte. Daraus ergibt sich, daß im Modell TIDYN2 das Höhenwachstum des Watts vom Sedimentangebot und nicht vom Bedarf abhängig ist, was nicht seinem tatsächlichen Verhalten entspricht. Schließlich bedarf der seewärtige Sedimenteintrag S_0 in das Wateinzugsgebiet einer besseren Vorhersage.

3. Anwendung auf die Dithmarscher Bucht

3.1 Beschreibung des Untersuchungsgebietes

Die Dithmarscher Bucht wird durch die Wattwasserscheiden auf dem Blauortsand im Norden und dem Bielshövensand im Süden und seewärts vom Außensand „Tertiussand“ sowie den Inseln „Blauort“ und „Trischen“ begrenzt. Letztere wirken morphodynamisch wie Düneninseln. Der „Tertiussand“ ist als Ebbdelta der Piep anzusehen. Die Füllung und Entleerung des Wattgebietes erfolgt im wesentlichen durch das Wattstromsystem der Piep. Die Piep spaltet sich bei Büsum in Wöhrdener Loch, Kronenloch, Sommerkoog und Neuschell-Legde auf. 1969 betrug der Inhalt des Untersuchungsgebietes unterhalb + 1,5 m NN rund 157 km². Von 1970 bis 1978 wurde ein neuer Seedeich gebaut. Der Hauptpriel wurde um 4 km gekürzt, womit eine Fläche von 33 km² (11,5 km² im Jahre 1972 und 21,5 km² im Jahre 1978) abgetrennt wurde. Das fortentwickelte Wateinzugsgebietsmodell wird genutzt, um das morphologische Verhalten der Dithmarscher Bucht nach der Abtrennung des „Speicherkoog Dithmarschen“ zu simulieren.

3.2 Schematisierung und Eingabedaten

Das Rinnensystem der Dithmarscher Bucht und dessen Schematisierung sind in Abb. 2 und Abb. 5 dargestellt. Zur Berechnung wurden folgende allgemeine Daten erfaßt:

Beginn der Simulation:	1970	
Simulationszeitraum:	20 Jahre	(1970–1990)
mittlerer Tidehub am Pegel Büsum:	3,26 m	(1966–1970)
Watthöhenkennwert l_i an der Wurzel:	0,076 m	(1969)
Parameter b_i (O'BRIEN, 1931):	$6,77 \cdot 10^{-5} \text{ m}^{-1}$	(1969)

In Übereinstimmung mit der Rückrechnung für die Seegatrinne Zoutkamperlaag im Westfriesischen Wattenmeer (VAN DONGEREN, 1992) wird der Steuerparameter α zur Berechnung des Sedimentaustausches mit dem Ebbdelta mit $40.000 \text{ m}^3/(\text{Jahr} \cdot \text{m}^2)$ angenommen. Die morphologische Zeitskala ist mit $\tau_c = 30$ Jahren für die Rinnen und $\tau_i = 200$ Jahren für die Watten angenommen worden. Für den Koeffizienten μ zur Berechnung des Erosionsvolumens an den Wattändern und γ zur Skalierung des Sedimentaustausches mit dem angrenzenden Abschnitt werden Standardwerte nach VAN DONGEREN (1992) verwendet:

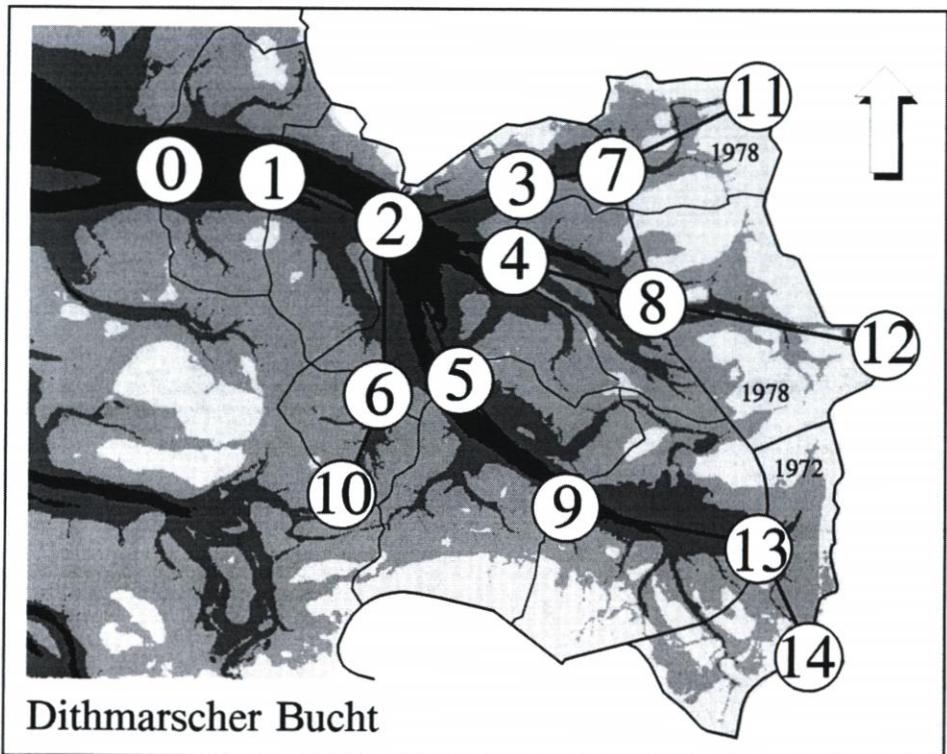


Abb. 5: Netzwerk hierarchischer Rinnen

τ_c :	30 Jahre
τ_i :	200 Jahre
α :	40.000 m ³ /(Jahr · m ²)
γ :	0,3
μ :	0,0005

Die 14 Rinnenabschnitte des Einzugsgebietes sind 1969 durch folgende Parameter gekennzeichnet:

Tabelle 1: Daten für die Modellrechnung

Rinne	Endknoten	Länge	Einzugsgebiet	Wattfläche	Querschnitt	Watthöhenkennwert
		L [m]	A _b [km ²]	A _i [km ²]	A _c [m ²]	l _i [m NN]
1	0	2400	156,80	123,02	19860	0,076
2	1	3000	135,38	106,63	16789	0,078
3	2	2600	17,10	14,08	2029	0,084
4	2	3000	32,32	26,29	3835	0,084
5	2	4400	67,53	53,52	8012	0,084
6	2	4400	6,54	5,62	776	0,084
7	3	3000	14,64	13,01	2002	0,350
8	4	4400	27,68	24,29	3650	0,356
9	5	3600	57,83	49,44	6929	0,163
10	6	2400	5,60	5,19	1706	-0,280
11	7	3000	9,40	8,40		0,350
12	8	5000	12,09	10,61		0,356
13	9	4400	37,14	32,74	3521	0,327
14	13	4000	11,59	10,22		0,327

Folgendes Szenarium wird bei der Modellrechnung vorgegeben:

teilweise Abdeichung: Rinne 14 im Jahr 1972
Rinne 11 im Jahr 1978
Rinne 12 im Jahr 1978

Meeresspiegelanstieg: 0,005 m/Jahr

Mangels zuverlässiger Angaben über den Meeresspiegelanstieg wurde der angenommene Wert am Anstieg des MT^{1/2}w am Pegel Büsum zwischen 1970 und 1990 orientiert. Dies erscheint legitim, da nach LASSEN (1989) der Abstand zwischen MTmw und MT^{1/2}w in der südöstlichen Nordsee mindestens seit 1886 in etwa konstant ist.

3.3 Ergebnisse der Rückrechnung

Die Ergebnisse der Rückrechnung werden in den folgenden Abbildungen den Meßdaten aus dem Beweissicherungsprogramm Dithmarscher Bucht (WIELAND et al., 1987) gegenübergestellt. Die simulierten Rinnenquerschnitte, Wattflächen und Watthöhenkenn-

werte werden an den Knotenpunkten mit denen aus den Karten der Wattaufnahme 1969, 1973, 1976, 1979, 1982, 1985 und 1990 erhaltenen Werten verglichen, welche mit Hilfe des Geographischen Informationssystems Arc/Info[®] gewonnen wurden (LIEBIG, 1993).

Erste Ergebnisse bestätigen die grundsätzliche Eignung des Modells. Es muß aber darauf hingewiesen werden, daß der relativ kurze Vergleichszeitraum von 20 Jahren eine abschließende Beurteilung noch nicht zuläßt. Die simulierten Rinnenquerschnitte und Wattflächen zeigen in der Regel in allen Gebieten eine gute Übereinstimmung mit den Meßdaten. In großen Gebieten (Abb. 6 und 7) ist auch eine gute Übereinstimmung von simulierten und aus Vermessungen bestimmten Watthöhenkennwerten zu erkennen. Der Einfluß der Eindeichungen von 1972 (Abb. 9) und 1978 (Abb. 8) ist in den aus Vermessungen bestimmten Watthöhenkennwerten deutlich sichtbar; in den simulierten Werten für diese kleinen deichnahen Gebiete zeigt sich dieser Einfluß dagegen schwächer. Schließlich zeigt sich in Abb. 10, daß die Qualität der Modellrechnungen auch in kleinen deichfernen Gebieten nachlassen kann.

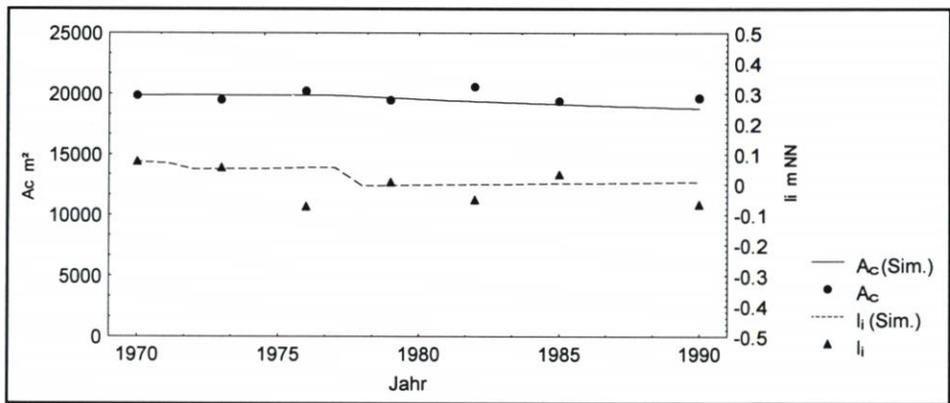


Abb. 6a: Simulationsergebnisse in Knoten 0

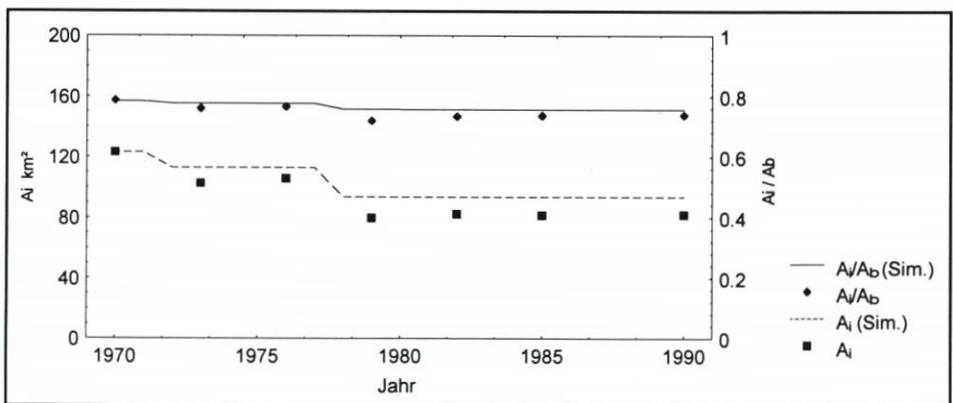


Abb. 6b: Simulationsergebnisse in Knoten 0

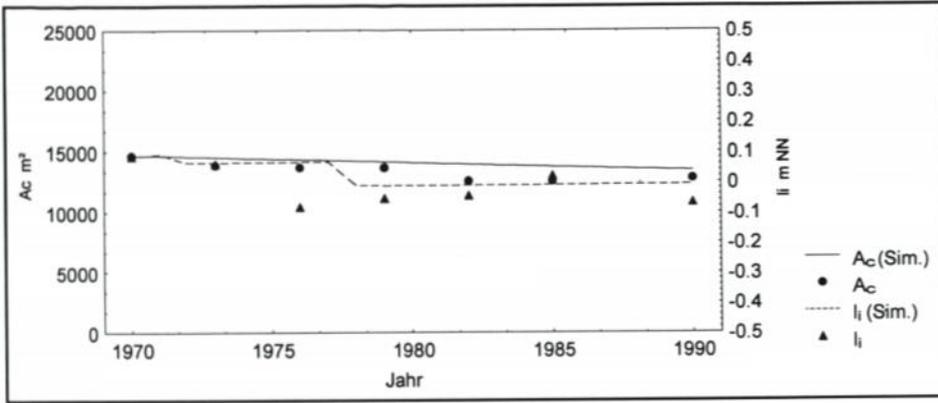


Abb. 7a: Simulationsergebnisse in Knoten 2

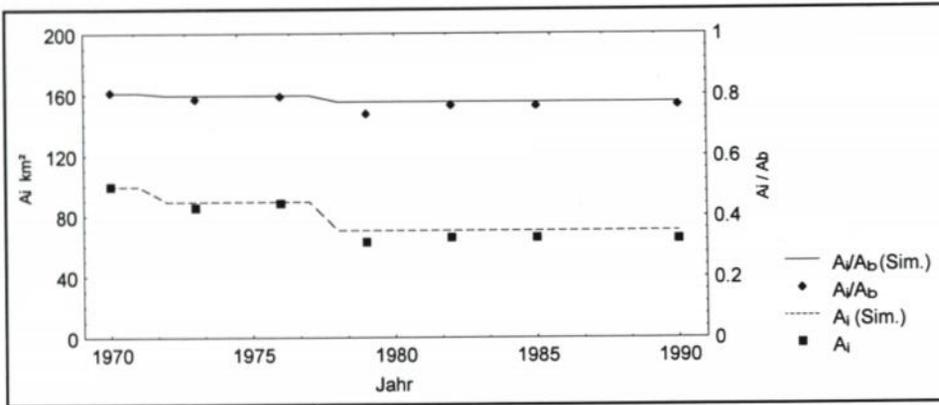


Abb. 7b: Simulationsergebnisse in Knoten 2

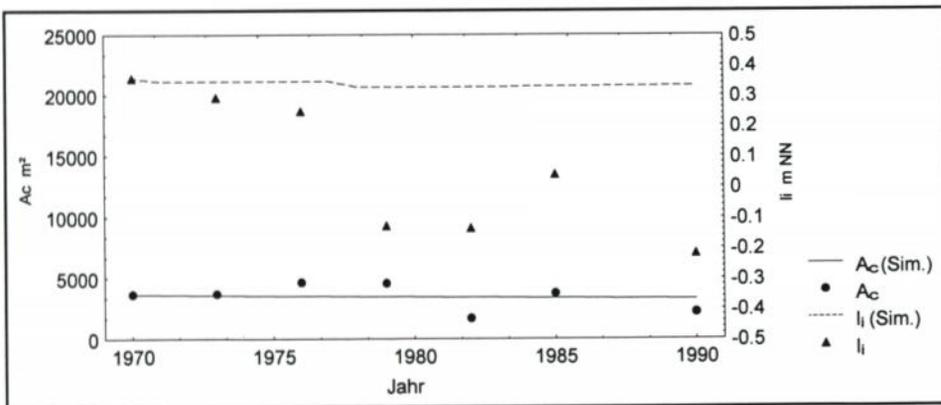


Abb. 8a: Simulationsergebnisse in Knoten 4

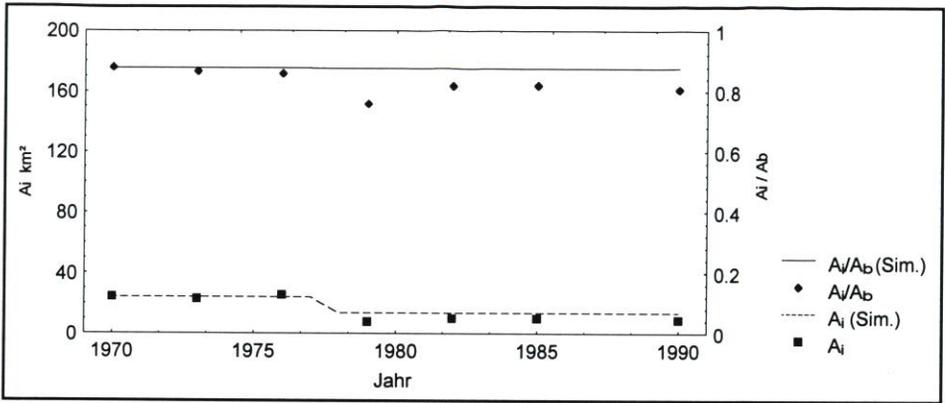


Abb. 8b: Simulationsergebnisse in Knoten 4

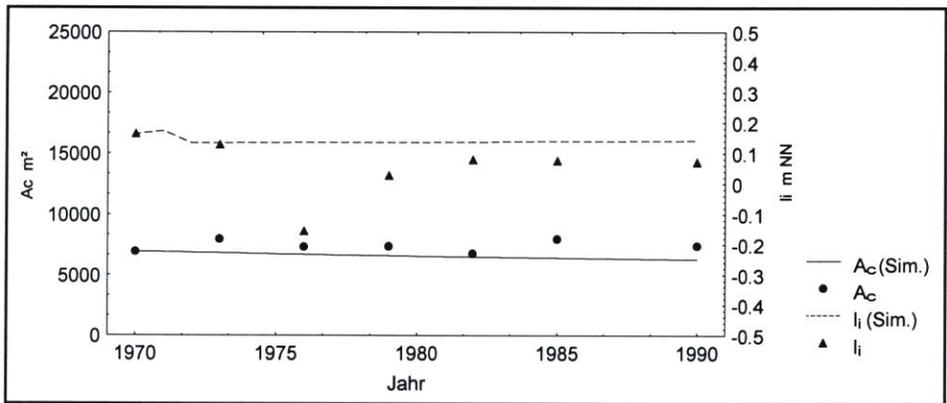


Abb. 9a: Simulationsergebnisse in Knoten 5

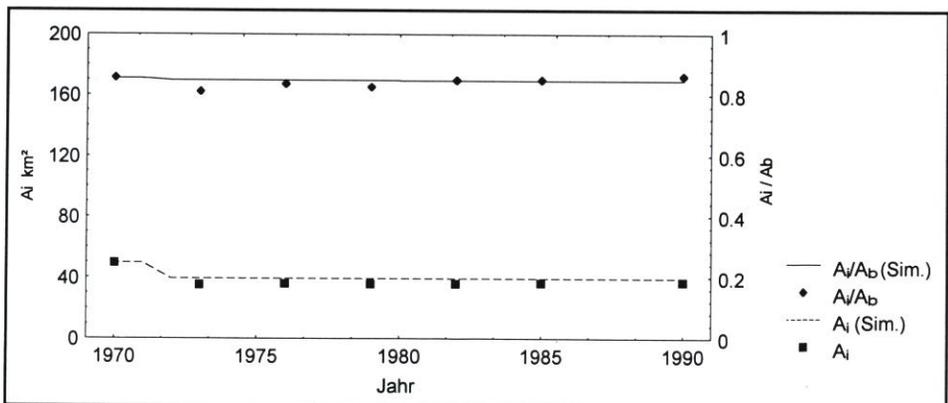


Abb. 9b: Simulationsergebnisse in Knoten 5

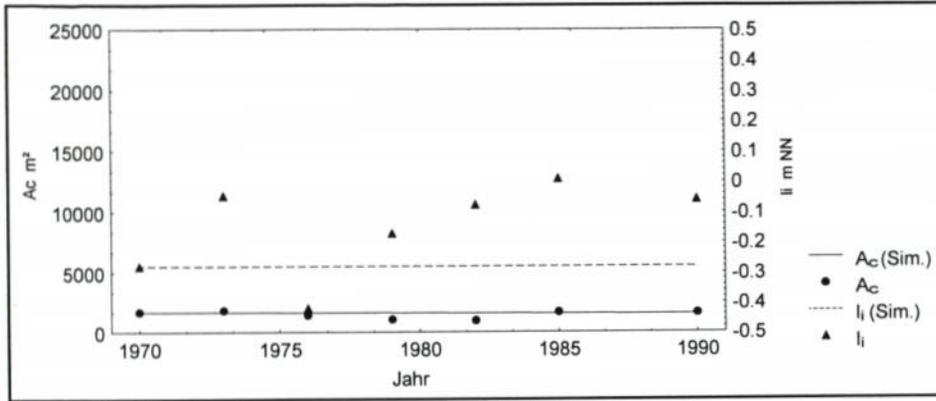


Abb. 10a: Simulationsergebnisse in Knoten 6

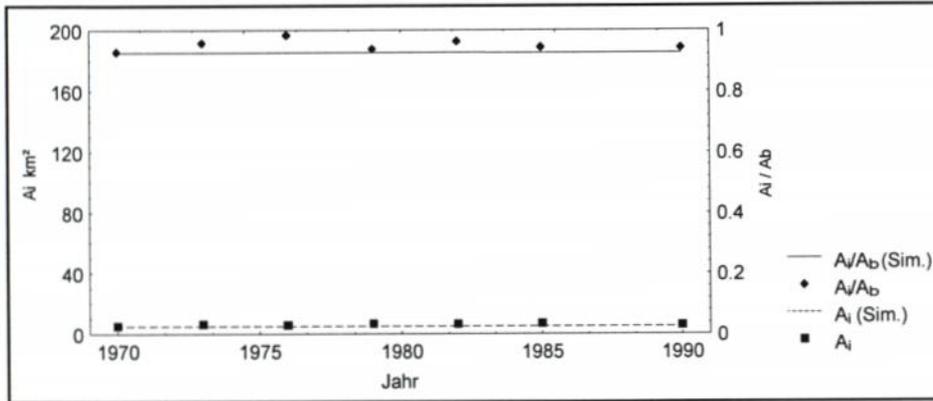


Abb. 10b: Simulationsergebnisse in Knoten 6

4. Schlußfolgerungen und Ausblick

Der hier dargestellte Arbeitsstand bei der Entwicklung des Modells TIDYN2 soll beispielhaft aufzeigen, wie auf der Grundlage parametrisierter funktionaler Zusammenhänge (GOLDENBOGEN, SCHROEDER, KUNZ und NIEMEYER, 1994) empirisch-konzeptionelle morphodynamische Modelle entwickelt werden können. Drei der für Watteinzugsgebiete repräsentativen funktionalen Zusammenhänge wurden genutzt, um das in den Niederlanden entwickelte empirisch-konzeptionelle morphodynamische Modell TIDYN in bezug auf seine Anwendbarkeit auf Wattgebiete wesentlich zu erweitern und seine Naturähnlichkeit deutlich zu verbessern. Das neue Modell TIDYN2 konnte für die morphodynamische Modellierung der Folgewirkungen partieller Eindeichungen in der Dithmarscher Bucht für tidedominierte Bereiche mit Erfolg eingesetzt werden.

Das vorgestellte Modell beschreibt ein Teilsystem des Wattenmeeres. Es wird daher für eine Gesamtmodellierung von Watteinzugsgebieten, Seegaten und Ebbdeltas bis zur offenen See erforderlich sein, über dieses Modell mit vorhandenen oder zu entwickelnden Teilsystemmodellen zu einem Gesamtmodell zu gelangen.

5. Danksagung

Die Arbeiten erfolgten im Rahmen des deutsch-niederländischen Forschungsvorhabens WADE, das vom BUNDESMINISTERIUM FÜR FORSCHUNG UND TECHNOLOGIE gefördert und an der Forschungsstelle Küste des Niedersächsischen Landesamtes für Ökologie ausgeführt wird.

6. Schriftenverzeichnis

- DONGEREN, A. R. VAN: A model of the morphological behaviour and stability of channels and flats in tidal basins. *delft hydraulics*, Rep. H 824.55, 1992.
- DONGEREN, A. R. van und VRIEND, H. J. DE: A model of morphological behaviour in tidal basins. *Coastal Engineering*, Vol. 22, Nos. 3/4, Elsevier, Amsterdam, 1994.
- GOLDENBOGEN, R. u. SCHROEDER, E.: Empirische Beziehungen zur Charakterisierung hydrodynamisch-morphologischer Wechselwirkungen in Wattgebieten. 60. Tagung der AG Nordwestdeutscher Geologen, Kurzfassungen und Exkursionsführer, Klein Labenz, 1993.
- GOLDENBOGEN, R.; SCHROEDER, E.; KUNZ, H. u. NIEMEYER, H. D.: Zwischenbericht zum Forschungsvorhaben „WADE“ (Wadden Sea morphological development). Niedersächsisches Landesamt für Ökologie – Forschungsstelle Küste –, Zwischenbericht zum Forschungsvorhaben MTK 0508, Norderney, 1994.
- LASSEN, H.: Örtliche und zeitliche Variationen des Meeresspiegels in der südöstlichen Nordsee. *Die Küste*, H. 50, 1989.
- LIEBIG, W.: GIS-applications to Wadden Sea areas. *Proc. Int. Coast. Congr. Kiel '92*, Verlag Peter Lang, Frankfurt am Main, 1993.
- NIEMEYER, H. D.: Case study Ley Bay: an alternative to traditional enclosure. *Proc. 3rd Conf. Coast. & Port Eng. in Develop. Countr., Mombasa/Kenya*, 1991.
- NIEMEYER, H. D.: Long-term morphodynamical behaviour of the East Frisian islands and coast. *Conf. Large Scale Coastal Behavior '93*, U.S. Geol. Surv., O.-File Rep. 93-381, 1993.
- O'BRIEN, M. P.: Estuary tidal prisms related to entrance areas. *ASCE, Civ. Eng.*, Vol. 1, No. 8, 1931.
- PROJECTGROUP WADE: Effects of an increased sea level rise on geomorphology and ecological functioning of the Wadden Sea. Rijkswaterstaat, Dienst Getijdewateren/NLÖ-Forschungsstelle Küste, Authors: T. Louters, J. P. M. Mulder, H. D. Niemeyer, E. Schroeder, R. Goldenbogen, E. J. Biegel, W. D. Eysink, Rep. GWAO-92.197X, Den Haag, 1992.
- RENGER, E.: Quantitative Analyse der Morphologie von Wateinzugsgebieten und Tidebecken. *Mitteilungen des Franzius-Institutes der Universität Hannover*, H. 43, 1976.
- SCHROEDER, E.: Parametrisierungen morphodynamischer Strukturen von Wateinzugsgebieten für empirisch-konzeptionelle Modellierungen. *Die Küste*, H. 56, 1995.
- SIEFERT, W.: Umsatz- u. Bilanzanalysen für das Küstenvorfeld der Deutschen Bucht. Grundlagen und erste Auswertungen (Teil I der Ergebnisse eines KFKI-Projektes). *Die Küste*, H. 45, 1987.
- WIELAND, P.; THIES, E. und BERGHEIM, V.: Bilanz hydrologischer und morphologischer Untersuchungen in der Dithmarscher Bucht. *Büsumer Gewässerkundliche Berichte*, H. 54, ALW Heide, Dez. Gewässerk., Büsum, 1987.

7. Symbolverzeichnis

A_b	Einzugsgebietsfläche, benetztes Areal unterhalb MThw	m^2
A_c	Durchflußquerschnitt eines Priels unterhalb NN	m^2
\bar{A}_c	Gleichgewichtswert von A_c	m^2

A_i	Wattfläche, Differenz der jeweils bei MThw und MTnw benetzten Areale	m^2
\bar{A}_i	Gleichgewichtswert von A_i	m^2
b_i	Parameter in Formel (1)	m^{-1}
Ch	Sedimentbedarf der Rinne	m^3
D	Sedimentvolumen zum Anwachs an den Watträndern	m^3
E	Erosionsvolumen an den Prielrändern	m^3
F	Sedimentbedarf zum Aufhohen des Watts	m^3
Fl	Sedimentbedarf des Watts	m^3
l_i	Watthöhenkennwert, auf NN bezogen	m NN
\bar{l}_i	Gleichgewichtswert von l_i	m NN
S_i	Volumen der Sedimentzu- und -abfuhr in einem Abschnitt	m^3
V_T	mittleres Tidevolumen, Wasservolumen zwischen MThw und MTnw	m^3
α	Parameter in Formel (16)	m/Jahr
γ	Parameter in Formel (14)	-
Δt	Länge eines Zeitschritts	Jahr
Δx	Länge eines Abschnitts	m
μ	Parameter in Formel (10)	-
τ_c	morphologische Zeitskala der Rinnen	Jahr
τ_i	morphologische Zeitskala der Watten	Jahr