

Untersuchungen zur Morphodynamik des Wattenmeeres im Forschungsvorhaben WADE

Von

HANZ DIETER NIEMEYER, ROLAND GOLDENBOGEN, ERNST SCHROEDER
und HANS KUNZ

Zusammenfassung

Im deutsch-niederländischen Forschungsvorhaben „Wadden Sea morphological development due to an accelerated relative sea-level rise“ (WADE) ist die erste Phase abgeschlossen worden. Zielsetzung ist hierbei, mit einem weitgehend identischen methodischen Instrumentarium vorhandener und weiterzuentwickelnder empirisch-konzeptioneller morphodynamischer Modelle für ausgewählte Wattengebiete die hydrodynamisch-morphologischen Wechselwirkungsvorgänge und Folgewirkungen quantitativ abzuschätzen, die bei Eintreten eines beschleunigten Meeresspiegelanstiegs im Wattenmeer möglicherweise zu erwarten sein werden. Es wird untersucht, ob und bei welcher der – gegenwärtig über Szenarien eingeschätzten – Anstiegsraten das bisher diesen Naturraum prägende morphodynamische Gleichgewicht sich in einer Weise verändern würde, die für diesen selbst und damit auch für den Insel- und Küstenschutz im Wattenmeer schwerwiegendere Folgen mit sich bringen könnten als die direkten Effekte der Beschleunigung des Meeresspiegelanstiegs selbst. Es wird ein Überblick über Problemstellungen, über ausgewählte Untersuchungsgebiete und über methodische Grundlagen der Datenerhebungen für die Zwecke des Vorhabens gegeben. Zudem werden Beispiele für die bisher erarbeiteten Ergebnisse dargestellt und diskutiert. Sie beinhalten Analysen bestehender hydrodynamisch-morphologischer Gleichgewichtszustände, den für verschiedene Anstiegsraten des Meeresspiegels erforderlichen Sedimentimport in das Wattenmeer zum Erhalt des gegenwärtigen morphodynamischen Gleichgewichts, sowie Anwendungsergebnisse von empirisch-konzeptionellen morphodynamischen Modellen.

Summary

The first phase of the Dutch-German research project „Wadden Sea morphological development due to an accelerated relative sea-level rise“ (WADE) has been finished recently. Its intention is to estimate quantitatively the consequences for the interactions between hydrodynamics and morphology for chosen Wadden Sea areas by aid of utmost identical empirical-conceptual morphodynamical models. Investigations are particularly focussed at the question if the existing morphodynamical equilibrium will continue for a remarkable acceleration of relative sea-level rise which is of high importance for island and coastal protection in Wadden Sea areas. Changes of this equilibrium could incorporate enormous threats for the safety of these coastal areas. The article gives an overview on research subjects and associated problems, on methods used for data evaluation, parametrization and analysis. The basics of the existing morphodynamical equilibrium of Wadden Sea areas are described by the interaction of significant parameters which perform the basis for conceptual models. Furthermore the volume of sediment needed for the conservation of the morphodynamical equilibrium is quantified for different scenarios of possible sea-level rise. Finally results of first applications of empirical-conceptual morphodynamical modelling are presented.

Inhalt

1. Einführung und Problemstellung.....	66
2. Die Untersuchungsgebiete	67
3. Datenunterlagen.....	70
4. Hydrodynamisch-morphologische Gleichgewichtszustände	71
4.1 Ansätze	71
4.2 Fallbeispiele.....	72
5. Sedimentbedarf zum Erhalt des morphodynamischen Gleichgewichts	81
6. Anwendungsbeispiele empirischer und konzeptioneller Modelle	83
6.1 Linienmodell des Ebbdeltas	83
6.2 Konzeptionelles Tidebecken-Modell TIDYN.....	85
7. Zusammenfassung, Schlußfolgerungen und Ausblick	90
8. Danksagung	92
9. Schriftenverzeichnis.....	93

1. Einführung und Problemstellung

Das an der südlichen Nordseeküste von Den Helder bis Ribe sich erstreckende Wattenmeer ist ein Naturraum, der in den letzten Jahrhunderten wesentlich durch menschliches Einwirken mitgestaltet worden ist. Dies war unter anderem auch deshalb möglich, weil Watten und Salzwiesen dem Anstieg des Meeresspiegels in dynamischer Anpassung folgen konnten. Den Küstenbewohnern war es daher in den zurückliegenden Jahrhunderten möglich, auf das Steigen des Meeresspiegels und den damit im Zusammenhang stehenden Veränderungen der Sturmflutwasserstände im wesentlichen durch Erweiterungen und Anpassungen von Schutzwerken zu reagieren. Grundlegende Voraussetzung hierfür war, daß mit dem moderaten Anstieg des Meeresspiegels keine strukturellen Veränderungen des morphodynamischen Gleichgewichtes einhergingen. Im Wattenmeer hat seit Jahrhunderten eine dem Meeresspiegelanstieg folgende Sedimentation zu gleichbleibenden mittleren Wassertiefen geführt, so daß keine verstärkten dynamischen Belastungen von Küstenschutzwerken eintraten. Die Anpassung der Bauwerke an den Meeresspiegelanstieg hatte somit lediglich der daraus resultierenden erhöhten statischen Belastung Rechnung zu tragen.

In jüngerer Zeit sind wohlbegründete Erkenntnisse darüber gewonnen worden, daß infolge anthropogener Einwirkungen globale Klimaänderungen mit einer deutlichen Zunahme der Durchschnittstemperaturen gerechnet werden muß, die wiederum zu Beschleunigungen des Meeresspiegelanstiegs führen können. Mit den zur Zeit verfügbaren Instrumenten ist allerdings eine zuverlässige Vorhersage der daraus folgenden Reaktion des Meeresspiegels noch nicht möglich. Daher sind zur Abschätzung möglicher Folgewirkungen Szenarien für – nach dem gegenwärtigen Erkenntnisstand – als möglich angesehene Größenordnungen des Meeresspiegelanstiegs angenommen worden (DE RONDE u. VOGEL, 1988; IPCC, 1990, 1992; RWS-DGW, 1991). Sie beinhalten Raten, für die der Erhalt des gegenwärtigen morphodynamischen Gleichgewichtes im Wattenmeer nicht als sicher vorausgesetzt werden darf.

Mit der – sich wahrscheinlich über Jahrhunderte erstreckenden – Neuausbildung eines veränderten morphodynamischen Gleichgewichtes wären grundsätzlich andere hydrodynamisch-morphologische Wechselwirkungen zwischen gestaltenden hydrodynamischen Randbedingungen und resultierender morphologischer Entwicklung verbunden. Insbesondere eine damit wahrscheinlich einhergehende Zunahme der Seegangbelastungen könnte zu weiterreichenden Gefährdungen der Sturmflutsicherheit von Inseln und Küsten führen, als die unmittelbare Wirkung des Meeresspiegelanstiegs selbst. Es stellt sich vor allem die Frage,

ob bei einem sich nachhaltig beschleunigenden Meeresspiegelanstieg eine für hinreichend starkes Höhenwachstum der Watten erforderliche Sedimentzufuhr erfolgen kann, und somit das gegebene morphodynamische Gleichgewicht erhalten bleibt.

Vor diesem Hintergrund wurde im Rahmen der Zusammenarbeit zwischen dem BUNDESMINISTERIUM FÜR FORSCHUNG UND TECHNOLOGIE und der Generaldirektion RIJKSWATERSTAAT des niederländischen MINISTERIE VAN VERKEER EN WATERSTAAT das deutsch-niederländische Forschungsvorhaben „Wadden Sea morphological development due to an accelerated relative sea-level rise“ (WADE) vereinbart, das bei methodischer Abstimmung vom RIJKSINSTITUUT VOOR KUST EN ZEE (vormals Dienst Getijdewateren) und der FORSCHUNGSSTELLE KÜSTE DES NIEDERSÄCHSISCHEN LANDESAMTES FÜR ÖKOLOGIE für den jeweiligen nationalen Bereich bearbeitet wird. Ziel des Vorhabens ist – gestützt auf vorhandene Erkenntnisse – ein Instrumentarium aufzubauen, das Abschätzungen künftiger morphologischer Entwicklungen im Wattenmeer unter veränderten hydrodynamischen Randbedingungen erlaubt, und dabei vor allem auch für die Zwischenstadien des Übergangs zwischen einem gewesenen und einem infolge veränderter hydrodynamischer Randbedingungen sich über langfristige Zeiträume neu einstellenden morphodynamischen Gleichgewicht anwendbar ist. Zu diesem Zweck wurden repräsentative Bereiche des Wattenmeeres in den Niederlanden und in Deutschland ausgewählt, auf deutscher Seite das Ostfriesische Wattenmeer und die Dithmarscher Bucht.

2. Die Untersuchungsgebiete

Das Untersuchungsgebiet Ostfriesisches Wattenmeer umfaßt von Borkum bis Wangerooge eine Fläche von etwa 800 km² mit den Einzugsgebieten von Osterems, Norderneyer Seegat, Wichter Ee, Accumer Ee, Otzumer Balje und Harle (Abb. 1). Das Untersuchungsgebiet Dithmarscher Bucht hat mit dem Wattenzugsgebiet der Piep einschließlich ihrer landgerichteten Prielzweige Wöhrdener Loch, Kronenloch, Sommerkoog und Neue-Schell-Legde eine Fläche von etwa 200 km² (Abb. 2). Für detailliertere Untersuchungen wurde zudem eine Gebietsdifferenzierung in Teileinzugsgebiete vorgenommen. Hierbei stellten sich in einigen Fällen Probleme in Bezug auf die Vergleichbarkeit von Daten aus unterschiedlichen Aufnahmejahren ein, wenn durch Verlagerung von Wattwasserscheiden Änderungen eintraten, die hinsichtlich der morphodynamischen Charakteristiken wesentlich waren. Insbesondere für das Einzugsgebiet der Osterems haben sich in der Nachbarschaft zum Emsästuar in einigen – hier durch ihre Kennziffern hervorgehobenen – Teileinzugsgebieten solche Veränderungen eingestellt (Abb. 1), sowie im Bereich der Leybucht, die bei Analysen teilweise besondere Beachtung erforderten. Für die Dithmarscher Bucht waren stärkere Veränderungen im Zuschnitt der Teileinzugsgebiete zwangsläufig nach den Teileindeichungen von 1972 und 1978 zu berücksichtigen (Abb. 2), woraus sich aber keine spezifischen Probleme bei der statistischen Analyse oder der konzeptionellen Modellierung ergaben.

Die Untersuchungsgebiete umfassen sowohl mesotidale inselgeschützte Wattenküsten als auch ästuarine Watten im meso-makrotidalen Grenzbereich. Der Bereich des mittleren Tidehubs liegt derzeit mit einer von Westen nach Osten steigenden Tendenz im Untersuchungsgebiet Ostfriesisches Wattenmeer im Bereich der Seegaten etwa zwischen 2,4 und 2,8 m; in der Dithmarscher Bucht beträgt er gegenwärtig etwa 3,3 m. Die Jahresmittel der signifikanten Wellenhöhen liegen im Seegebiet der Ostfriesischen Inseln und Küste zwischen 0,7 und 1,0 m (NIEMEYER, 1992) und werden für das Vorfeld der Dithmarscher Bucht nach NUMMEDAL u. FISCHER (1978) auf 1,1 m geschätzt. Nach der hydrodynamischen Klassifika-

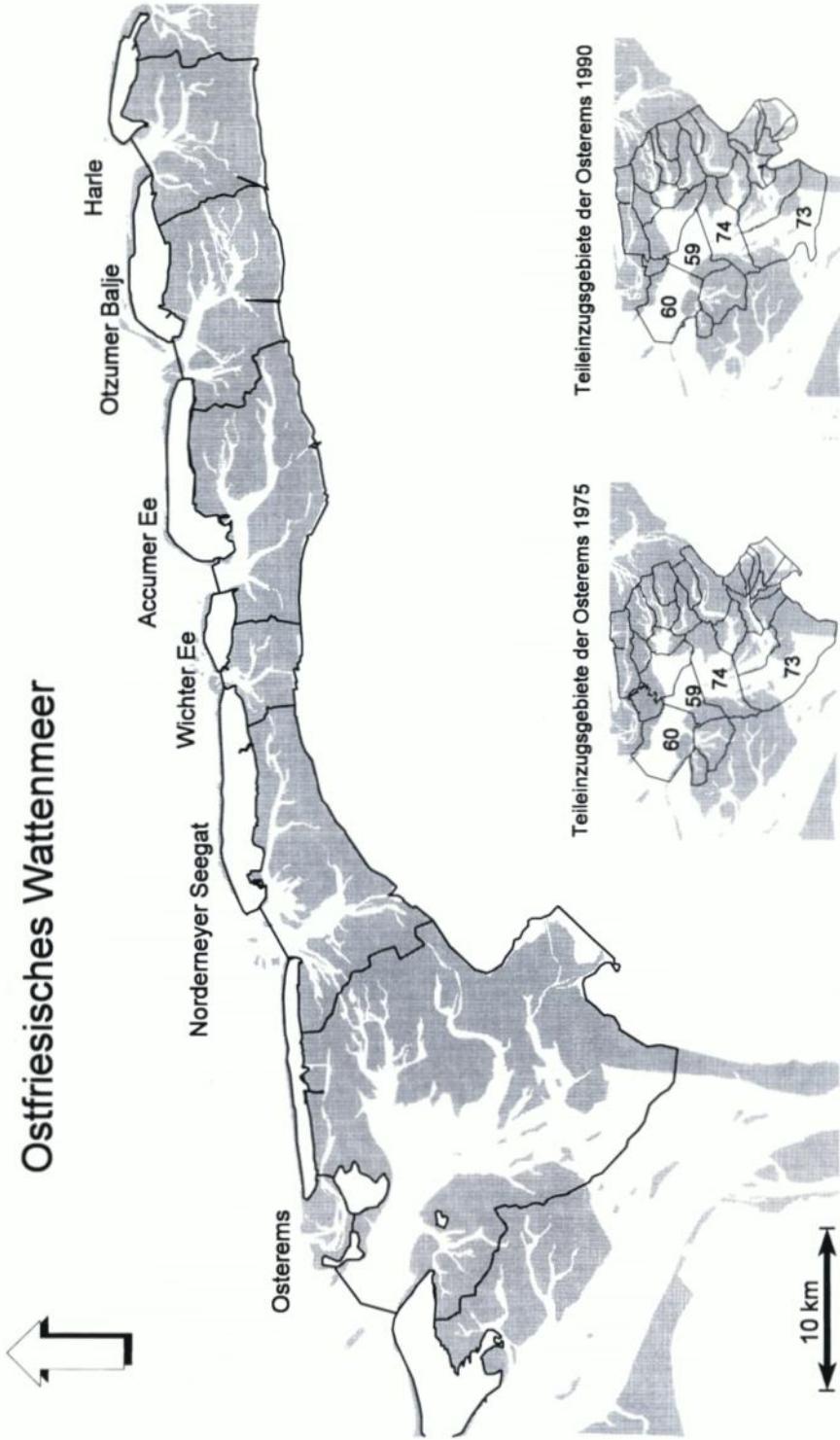
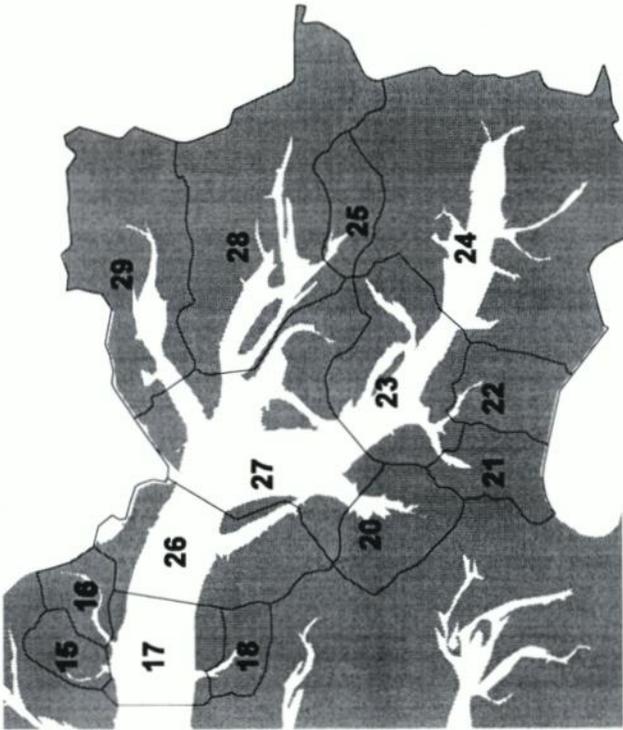


Abb. 1: Einzugsgebiete des Ostfriesischen Wattenmeeres 1975 und Veränderung von Teileinzugsgebietsgrenzen im Einzugsbereich der Osterems von 1975 bis 1990

Dithmarscher Bucht 1969



Dithmarscher Bucht 1979

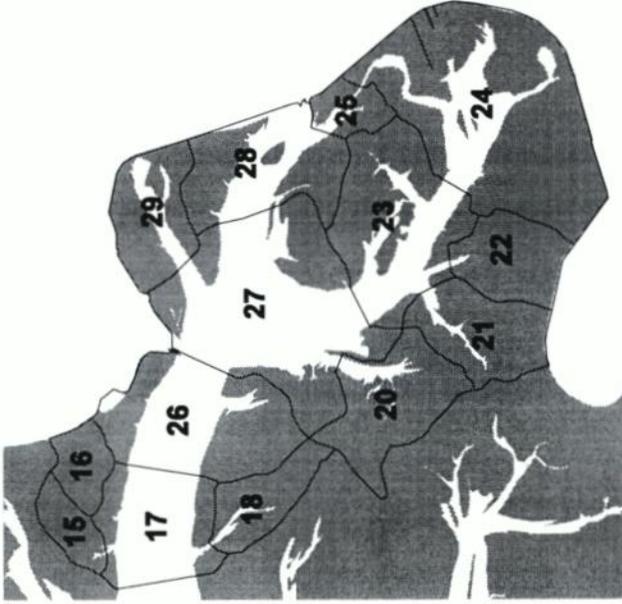


Abb. 2: Teileinzugsgebiete der Dithmarscher Bucht von 1969 und 1979 vor und nach den Teileindeichungen

tion von HAYES (1975) ist das Ostfriesische Wattenmeer als tide- und seegangsgeprägt mit überwiegender Tidewirkung einzuordnen (NIEMEYER, 1992). Die Dithmarscher Bucht ist nach diesem Kriterium hingegen als schwach tidedominierter Bereich einzustufen. Es bleibt anzumerken, daß die verfügbaren hydrodynamischen Klassifikationen (NIEMEYER, 1990) naturgemäß starke Pauschalierungen beinhalten und daher nur als Anhalt gesehen werden sollten und nicht als verbindliche Richtschnur.

3. Datenunterlagen

Die Erstellung der Datensätze für Analysen und Modellierungen erfolgt mit Hilfe von Parametrisierungen, die sich aus der Topographie der Untersuchungsgebiete und den regionalen Tidewasserständen als hydrographische Randbedingungen ergeben. Sie wurden für verschiedene Aufnahmejahrgänge und differenziert nach Wateinzugs- und -teileinzugsgebieten (WEG, TEG) als Grundlage phänomenologischer Analysen hydrodynamisch-morphologischer Wechselwirkungseffekte vorgenommen.

Die Datenbasis bilden kartierte Vermessungen in unterschiedlichen Aufnahmezeiträumen, die auf NN oder Gezeitengrundwerte bezogen sind. Ihre Erfassung erwies sich als besonders personalaufwendig; sie war aber für die weitergehenden Arbeiten unverzichtbar. Für die Datenverwaltung und -analyse hat sich die Anwendung eines geographischen Informationssystems (GIS) (Liebig, 1993) als außerordentlich effizient gezeigt.

Der morphologische Zustand des Ostfriesischen Wattenmeeres für den Zeitraum um 1960 liegt in den topographischen Wattkarten der Forschungsstelle Küste im Maßstab 1:25 000 vor. Für 1975 wurden die vom KFKI herausgegebenen Küstenkarten im gleichen Maßstab genutzt. Die Karten der Synopse 1990, die von der Wasser- und Schifffahrtsdirektion Nordwest (WSD NW) mit dem Konturlinienberechnungsprogramm TASH des Instituts für Kartographie der Universität Hannover erstellt worden sind, wurden in Form von ASCII-Dateien übernommen. Diese Karten sind an der Forschungsstelle Küste zum Teil durch eigene Arbeitskarten ergänzt worden. Vermessungen der Dithmarscher Bucht um 1942, 1956, 1969, 1973, 1976, 1979, 1982, 1985 und 1990 liegen als Wattgrundkarten des Amtes für Land- und Wasserwirtschaft Heide (ALW) im Maßstab 1:10 000 vor. Für alle diese Datensätze sind mit Hilfe des GIS folgende Parametrisierungen vorgenommen worden:

A_b [m^2]:	Gesamtfläche eines WEG oder TEG
A_c [m^2]:	Querschnitt einer Wattrinne an der seewärtigen Grenze eines WEG oder TEG
A_i [m^2]:	Gezeitenfläche eines WEG oder TEG zwischen MTnw und MThw
l_i [m NN]:	charakteristisches Wattniveau: Höhenlage, bei der die halbe Wattfläche überflutet ist
V_o [m^3]:	Sedimentvolumen eines Ebbdeltas nach WALTON & ADAMS (1976)
V_i [m^3]:	Sedimentvolumen im Gezeitenbereich eines WEG oder TEG
V_T [m^3]:	Mittleres Tidevolumen eines WEG oder TEG

Es wurde eine Reduktion der komplexen Gesamtstrukturen der Morphodynamik von Wattgebieten auf solche Parameter angestrebt, die trotz der Vernachlässigung vielfältiger anderer Einflußgrößen die mittelfristig prägenden Prozesse integral repräsentieren. Grundsatz für alle Parametrisierungen war deren präzise Definition im Sinne einer methodisch eindeutigen Reproduzierbarkeit. Dies war auch für die Vergleichbarkeit von Ergebnissen zwischen

dem niederländischen und deutschen Teilvorhaben unerlässlich. Die Wahl von Bezugsgrößen und -horizonten orientierte sich an der zu erfassenden Dynamik des Naturraumes, um auch die Übertragbarkeit von Ergebnissen auf Gebiete mit vergleichbaren morphodynamischen Strukturen zu gewährleisten. So wurden als Bezugshorizonte die mittleren Gezeitenwasserstände gewählt, wobei näherungsweise das MTmw dem NN-Horizont gleichgesetzt wurde. Die Parametrisierungen liegen somit in einheitlicher Form für eine Vielzahl von Watt- und Teileinzugsgebieten für verschiedene Zeiträume vor und bilden somit eine identische Grundlage für statistische Analysen.

4. Hydrodynamisch-morphologische Gleichgewichtszustände

4.1 Ansätze

In der Literatur sind hydrodynamisch-morphologische Gleichgewichtszustände in vielfältiger Form beschrieben worden (O'BRIEN, 1931, 1967; WALTHER, 1934, 1972; RODLOFF, 1970; WALTON u. ADAMS, 1976; RENGER, 1976; EYSINK, 1979, 1991; DIECKMANN, 1985; NIEMEYER, 1990, 1991). Diese Zusammenhänge haben nicht nur Wert als Analyseergebnisse, sondern sie lassen sich – bei Beachtung der physikalisch implizierten Grenzen – auch prognostisch in verschiedenartiger Weise nutzen: EYSINK (1991) hat auf dieser Grundlage den Sedimentbedarf der Westfriesischen Wateinzugsgebiete ermittelt, der zum Erhalt des morphodynamischen Gleichgewichts für die unterschiedlichen Anstiegsraten der Szenarien nach DE RONDE u. VOGEL (1988) erforderlich sein würde. Die Querschnittsentwicklung der Norderley wurde mit Hilfe derartiger Ansätze in Abhängigkeit von der zu erwartenden weiteren Verlandung der Leybucht quantitativ für die Zukunft abgeschätzt (NIEMEYER, 1991).

Zur Erfassung der hydrodynamisch-morphologischen Gleichgewichtszustände in den Untersuchungsgebieten wurden aufbauend auf verfügbaren Erkenntnissen aus der Literatur und eigenen Fortentwicklungen entsprechend der vorgenommenen Parametrisierungen Funktionsgleichungen als Grundlage für Regressionsanalysen der verfügbaren Datensätze aufgestellt:

$$A_c = f_1(A_b) \quad (1)$$

$$A_c = f_2(V_T) \quad (2)$$

$$A_b = f_3(V_T) \quad (3)$$

$$A_c = f_4(A_i) \quad (4)$$

$$A_i = f_5(V_T) \quad (5)$$

$$V_i = f_6(V_T) \quad (6)$$

$$V_i = f_7(A_i) \quad (7)$$

$$A_i = f_8(A_b) \quad (8)$$

$$l_i = f_9(A_b) \quad (9)$$

$$V_o = f_{10}(V_T) \quad (10)$$

Die Gleichungen beinhalten folgende Zusammenhänge: Die Mündungsquerschnitte des Hauptfluters stehen in einer engen funktionalen Abhängigkeit von der Größe der Gesamtfläche des WEG oder TEG, von dessen Volumen und dessen Gezeitenfläche (Gln. 1, 2, 4), die dann zwangsläufig auch eng miteinander korrelieren (Gln. 3, 5, 8). Gln. 1 u. 2 gehen bereits auf O'BRIEN (1931, 1969) und WALTHER (1934, 1972) zurück; die weiteren Kombinationen sind folgerichtige Erweiterungen, bei denen eine größere Parametervielheit einbezo-

gen wird. Hierbei ist die funktionale Abhängigkeit der Gezeiten- von der Gesamteinzugsgebietsfläche hervorzuheben, auf die bereits RENGER (1974) und EYSINK (1991) hingewiesen haben. Ebenso stehen die Sedimentvolumen in der Gezeitenzone in funktionalem Zusammenhang mit Tidevolumen und Gezeitenflächen (Gln. 6, 7). Die Volumen der Ebbdeltas sind als Funktion des Tidevolumens von WALTON u. ADAMS (1976) für die Küsten der USA und von EYSINK u. BIEGEL (1992) für das Westfriesische Wattenmeer dargestellt worden, wobei WALTON u. ADAMS (1976) eine weitergehende Differenzierung nach der Exponiertheit zum Seegang vornahmen.

4.2 Fallbeispiele

Sind für ein Untersuchungsgebiet einem morphodynamischen Gleichgewicht zuzuordnende funktionale Zusammenhänge gefunden, können sie als Indikator von Störungen jeglicher Art herangezogen werden, wie beispielsweise für anthropogene Eingriffe in das Regime, deren Folgewirkungen sich mit ihrer Hilfe quantifizieren lassen. Für alle hier untersuchten Gebiete konnten mit Hilfe der verfügbaren Datensätze dynamische Gleichgewichtszustände zwischen den gestaltenden hydrodynamischen Randbedingungen und der resultierenden Morphologie festgestellt werden. Als dynamisches Gleichgewicht wird die Fähigkeit des Systems verstanden, auf Variationen wesentlicher Randbedingungen mit flexibler Anpassung zu reagieren, die bei partieller quantitativer Änderung von Systemparametern zur qualitativen Wiedererlangung des Gleichgewichtszustands führt, der denselben quantitativen Gesetzmäßigkeiten unterliegt wie der Ausgangszustand. Damit ist zumeist eine verzögerte Anpassung der Morphologie an veränderte hydrodynamische Randbedingungen verbunden.

Regressionsanalysen auf Grundlage der vorstehenden Funktionsgleichungen (1) bis (10) haben sowohl für die Untersuchungsgebiete des Ostfriesischen Wattenmeeres als auch für das Gebiet der Dithmarscher Bucht überwiegend straffe Zusammenhänge mit hoher statistischer Absicherung ergeben. Teilweise hierbei erkennbare Unterschiede waren durch die Wahl der Bezugshorizonte gegeben und konnten hierüber einer plausiblen Begründung zugeführt werden. Die funktionalen Zusammenhänge für morphodynamische Gleichgewichtszustände sind überwiegend linearer Natur; lediglich für die Funktionsgleichungen (6) und (8) bis (10) ergaben sich nichtlineare Beziehungen. Ein ausführlicher Überblick zu den bisher vorgenommenen statistischen Analysen ist – mit Ausnahme der methodisch gesondert erfolgten Aufarbeitung des historischen Kartenmaterials (NIEMEYER, 1993, 1995) – zusammenfassend in einem Bericht dargestellt worden (GOLDENBOGEN et al., 1994). Zu Einzelaspekten sind zudem gesondert Beiträge verfaßt worden (SCHROEDER, 1994; SCHROEDER et al., 1995). Aus diesen Gründen wird die Diskussion hier auf ausgewählte Beispiele begrenzt und der Diskussionsschwerpunkt auf die physikalisch-prozessualen Hintergründe verlagert.

– Rinnenquerschnitte und Tidevolumen

Die wohl meistzitierte empirische morphodynamische Beziehung ist der funktionale Zusammenhang zwischen dem Mündungsquerschnitt einer Rinne und dem Tidevolumen ihres Wateinzugsgebietes, der mit dem Namen O'BRIEN (1931, 1967) untrennbar verbunden ist. Für alle hier untersuchten Gebiete ergaben sich ebenfalls entsprechende gesetzmäßige Zusammenhänge, die sowohl räumlich als auch zeitlich von gleichbleibend hoher statistischer Qualität gekennzeichnet sind (Abb. 3 u. 4). Allerdings zeigen sich hinsichtlich des Koeffizienten sowohl zwischen den hier untersuchten Bereichen Ostfriesisches Wattenmeer und Dithmarscher Bucht graduelle Unterschiede als auch im Vergleich zur Formulierung von

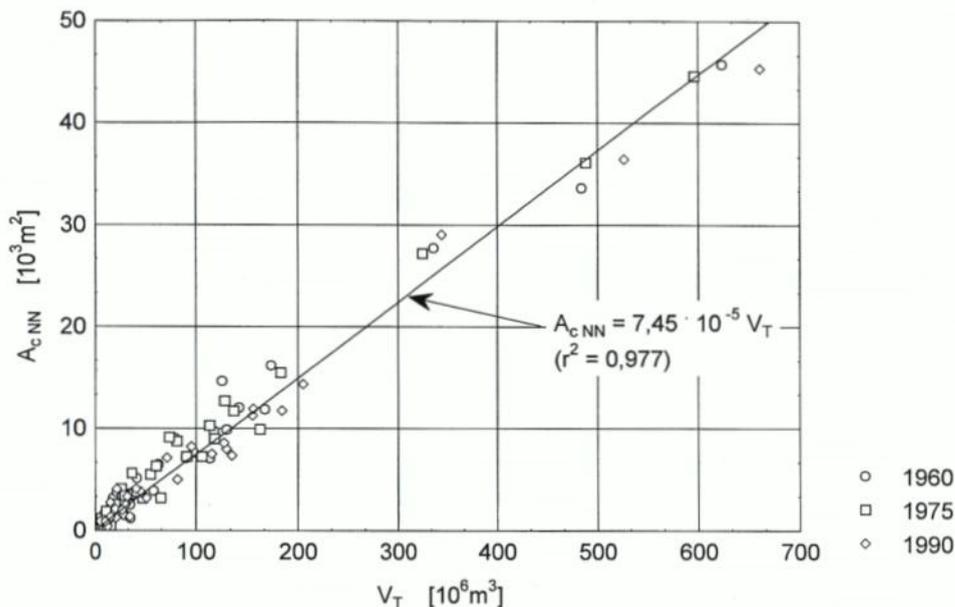


Abb. 3: Mündungsquerschnitt der Hauptrinne als Funktion des Tidevolumens des Einzugsgebietes (Ostfriesisches Wattenmeer)

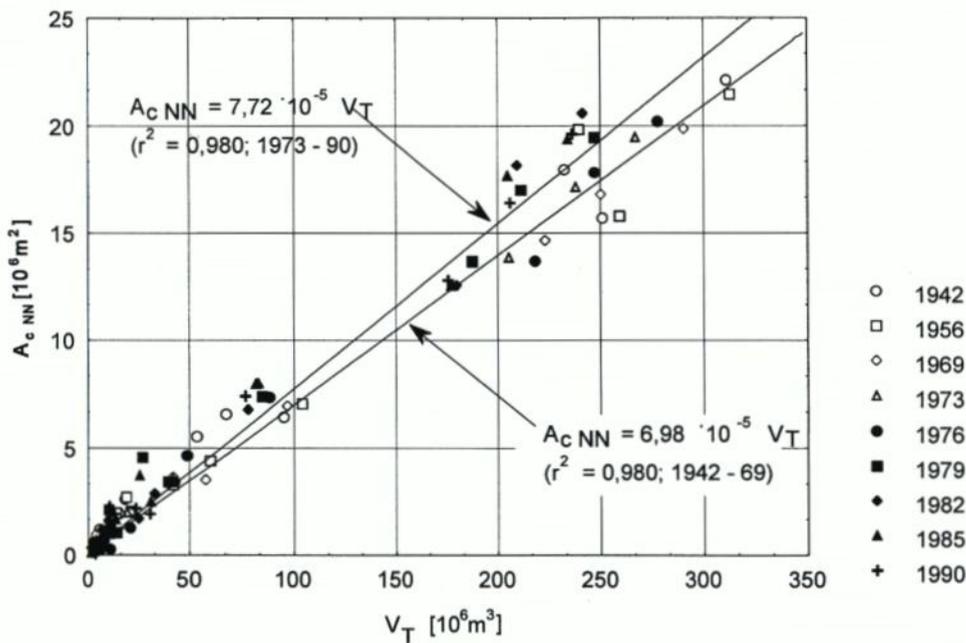


Abb. 4: Mündungsquerschnitt der Hauptrinne als Funktion des Tidevolumens des Einzugsgebietes (Dithmarscher Bucht); Anpassungsfunktionen für die Zeiträume vor und nach Beginn der Vordeichungen

O' BRIEN (1931, 1967). Der letztgenannte Unterschied beruht möglicherweise aber auf einem unterschiedlichen Bezugshorizont, der hier für die Querschnitte nach einer Empfehlung von GERRITSEN (1990) mit NN als Näherung für MTmw gewählt worden ist. Hiermit sind statistisch optimale Ergebnisse erzielt worden (GOLDENBOGEN et al., 1994). Von den drei hier untersuchten Bezugshorizonten ist dieser in Bezug auf die Tidephase mit den höchsten Fließgeschwindigkeiten assoziiert, was als plausible physikalische Erklärung der statistischen Analyseergebnisse angesehen werden kann.

Die stärkeren Streuungen für die Daten der Dithmarscher Bucht sind als Folge des noch nicht abgeschlossenen morphodynamischen Anpassungsprozesses anzusehen, der durch die Teileindeichungen bewirkt worden ist. Daher ist die Anpassungsfunktion hier – wie auch in anderen Anwendungsbeispielen – sowohl für die Daten der Vermessungszeiträume vor den Teileindeichungen als auch für den Zeitraum danach ermittelt worden (Abb. 4). Hierbei läßt sich auch quantitativ erkennen, inwieweit die Vordeichungen zu einer – sicherlich nur vorübergehenden – Störung des morphodynamischen Gleichgewichts in der Dithmarscher Bucht geführt haben, und daß bei der Wiedererlangung des morphodynamischen Gleichgewichts mit geringeren Rinnquerschnitten zu rechnen ist.

– Einzugsgebietsflächen und Tidevolumen

Die Einzugsgebietsflächen stehen bei Vorhandensein eines morphodynamischen Gleichgewichts in einem engen funktionalen Zusammenhang mit dem Tidevolumen, worauf insbesondere WALTHER (1972) für das Ost- und EYSINK (1979, 1991) für das Westfriesische Wattenmeer hingewiesen haben. EYSINK (1979) hat diesen Ansatz insbesondere zur Abschätzung der morphodynamischen Anpassung im Wattenmeer nach den Abdämmungen der Zuider- und Lauwerszee genutzt.

Die hier verwandten Datensätze für das Ostfriesische Wattenmeer zeigen ebenfalls einen räumlich und zeitlich stabilen funktionalen Zusammenhang von statistisch hoher Qualität (Abb. 5). Im Gegensatz zu den Untersuchungen von WALTHER (1972) und EYSINK (1979, 1991) konnte hier auch der Nachweis für die Teileinzugsgebiete geführt werden. Die Daten der Dithmarscher Bucht lassen hingegen deutlich die Störungen des morphodynamischen Gleichgewichts erkennen (Abb. 6). Während der Koeffizient der Regressionsgleichung für die Datensätze aus der Zeit vor den Teileindeichungen nahezu völlig mit dem für die Daten des Ostfriesischen Wattenmeeres übereinstimmt, weisen die Daten aus der Zeit nach den Teileindeichungen deutliche Abweichungen vom morphodynamischen Gleichgewichtszustand auf. Die Teileindeichungen haben demnach im Verhältnis zur Reduktion des Tidevolumens zu einer überproportionalen Abnahme der Einzugsgebietsflächen geführt. Es wird aber erkennbar, daß nach 1979 eine Entwicklung zu einer Wiederanpassung einsetzt, die insbesondere durch eine Verringerung des Tidevolumens gekennzeichnet ist. Hierbei überlagern sich zwei Vorgänge: zum einen erfolgt eine weitere – allerdings geringfügige – Abnahme der Einzugsgebietsflächen, die zum anderen von einer relativ stärkeren Verringerung des Tidevolumens begleitet wird.

Untersuchungen zur Langzeitstabilität dieser Beziehung für die Zeiträume seit 1650 im Bereich der Ostfriesischen Inseln und Küste haben allerdings ergeben, daß stärkere Variationen des Tidehubs zu einer quantitativen Änderung der dynamischen Gleichgewichtsbeziehung führen, so daß die Anwendung dieser Zusammenhänge auf Untersuchungen zu Langzeitprozessen wie den morphologischen Folgewirkungen eines beschleunigten relativen Meeresspiegelanstiegs nicht ohne ergänzende Betrachtungen der hydrodynamischen Randbedingungen vorgenommen werden sollten (NIEMEYER, 1993, 1995).

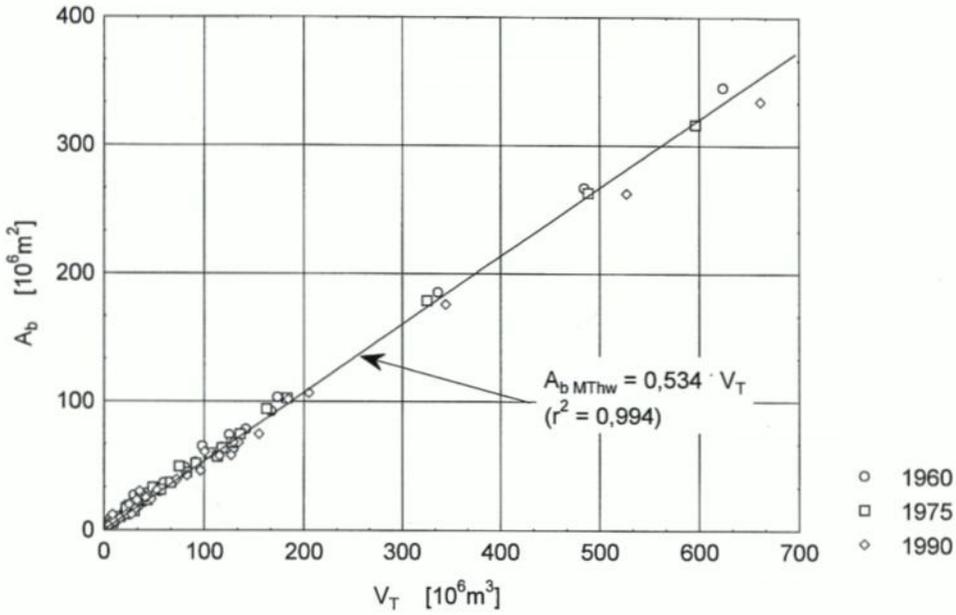


Abb. 5: Einzugsgebietsflächen in Abhängigkeit ihres Tidevolumens (Ostfriesisches Wattenmeer)

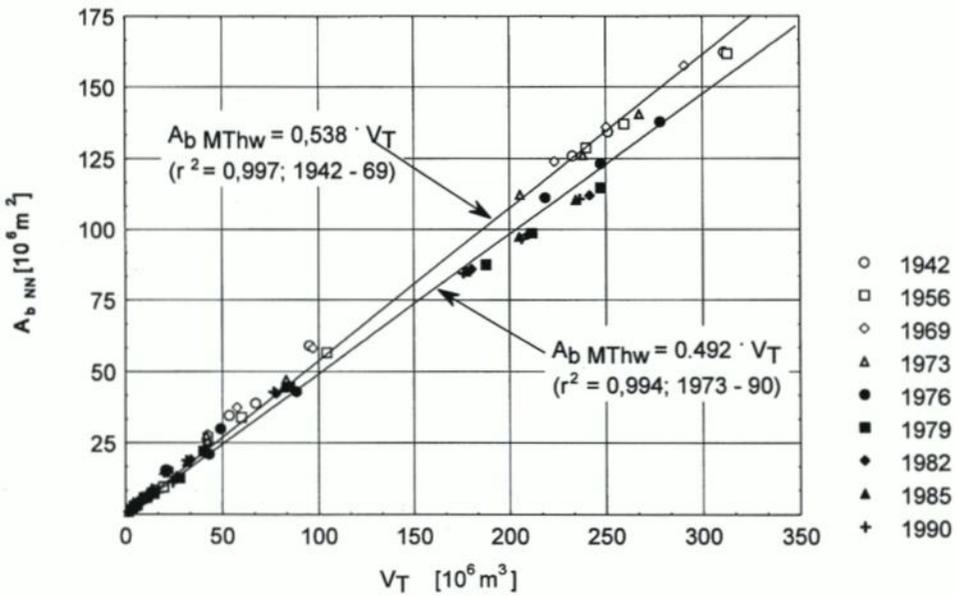


Abb. 6: Einzugsgebiete und Tidevolumen (Dithmarscher Bucht); Anpassungsfunktionen für die Zeiträume vor und nach Beginn der Vordeichungen

– Gezeiten- und Einzugsgebietsflächen sowie Tidevolumen

Die Größe der Gezeitenflächen wird im wesentlichen von der Größe des Gesamteinzugsgebietes bestimmt. RENGER (1974) und EYSINK (1991) haben für ihre Untersuchungsgebiete entsprechende funktionale Zusammenhänge mit unterschiedlichen Ansätzen dargestellt, bei denen die Daten allerdings ausgeprägte Abweichungen von den gewählten Funktionen aufweisen. Insbesondere gilt dies für den Ansatz von EYSINK (1991), der zudem noch den Nachteil hat, daß die Gezeitenfläche auf beiden Seiten der Gleichung steht und somit einen selbstkorrelierenden Effekt ausübt.

Die Daten für das Ostfriesische Wattenmeer weisen für einige Bereiche starke Streuungen auf. Diese können überwiegend auf Verschiebungen der Wattwasserscheiden des Teileinzugsgebietes 73 (Westerbalje) im Einzugsgebiet der Osterems zurückgeführt werden, die sich dann in den Daten der übergeordneten Teileinzugsgebiete und des Gesamteinzugsgebietes (Kennziffern 74, 59, 60; Abb. 1) fortpflanzen (Abb. 7). Eliminiert man die Daten des Teileinzugsgebietes 73, so zeigt sich für die Gesamtheit der Einzugs- und Teileinzugsgebiete ein straffer Zusammenhang, der durch geringe Streuungen um den Graphen der Funktion ausgewiesen wird (Abb. 8). Das Verhältnis von Gezeiten- zu Einzugsgebietsflächen ist für die Bereiche der Dithmarscher Bucht durch einen statistisch straffen Zusammenhang für die Daten der Vermessungen vor den Teileindeichungen gekennzeichnet, der sich danach naturgemäß etwas verändert hat (Abb. 9). Es zeigt sich, daß der hier gewählte einfache Ansatz zu statistisch erheblich besseren Ergebnissen führt, als sie RENGER (1974) oder EYSINK (1991) mit ihren Ansätzen erzielt haben.

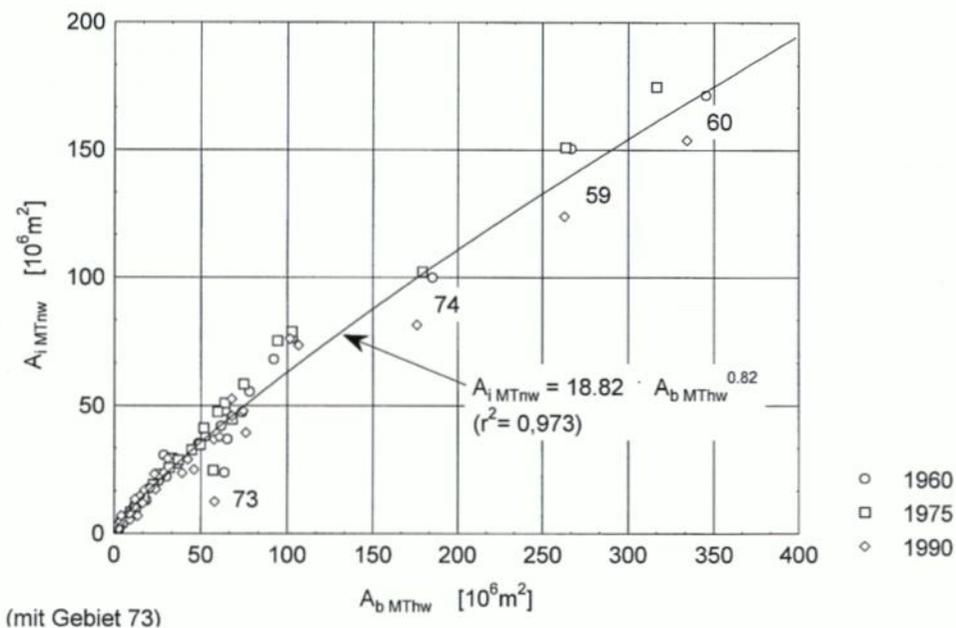


Abb. 7: Gezeitenflächen in Abhängigkeit von Einzugsgebietsflächen (Ostfriesisches Wattenmeer)
Anpassungsfunktion für die Datensätze ohne Einbeziehung des TEG 73

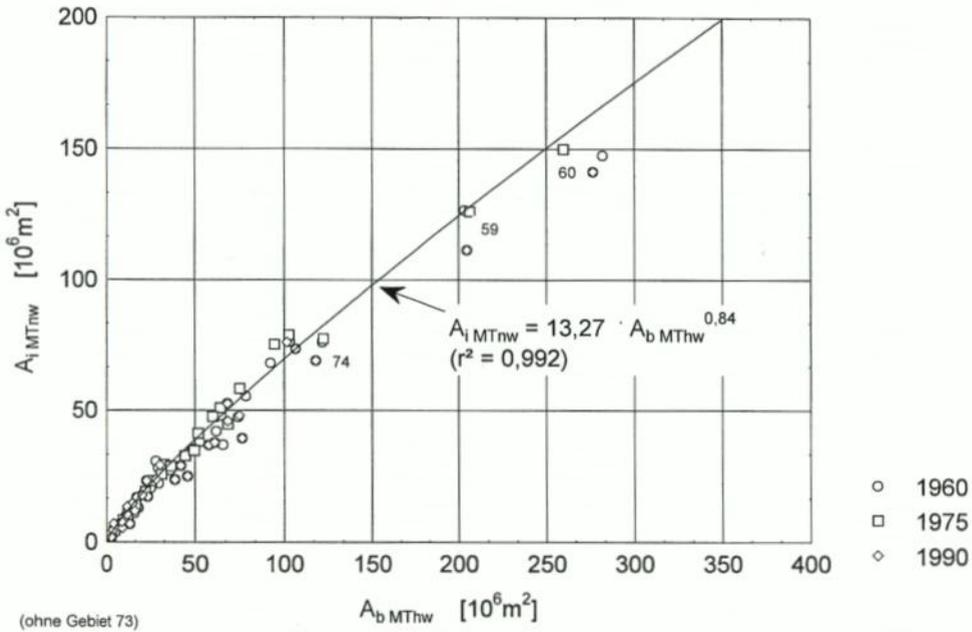


Abb. 8: Gezeitenflächen in Abhängigkeit von Einzugsgebietsflächen (Ostfriesisches Wattenmeer)

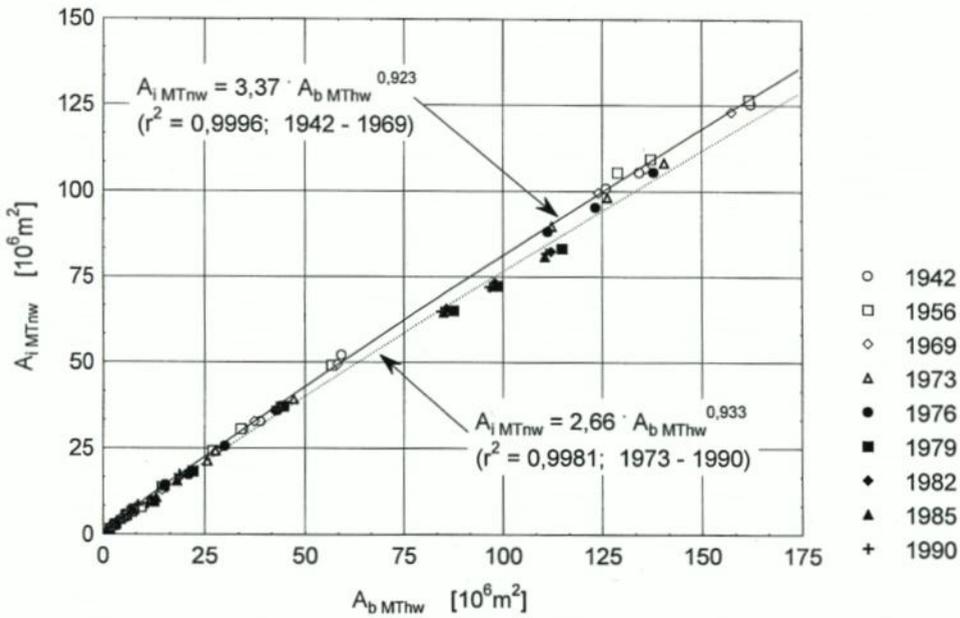


Abb. 9: Gezeitenflächen in Abhängigkeit von den Einzugsgebietsflächen (Dithmarscher Bucht); Anpassungsfunktionen für die Zeiträume vor und nach Beginn der Vordeichungen

Aus dem hier aufgezeigten engen statistischen Zusammenhang darf nicht der Fehlschluß gezogen werden, physikalisch hänge die Gezeitenfläche allein von der Größe der Gesamteinzugsgebietsfläche ab. Deren Anteil an der Einzugsgebietsfläche und ihre geometrische Struktur werden vielmehr vom Tidehub bestimmt, wie HAYES (1975, 1979) exemplarisch nachgewiesen hat. Dessen Einfluß ist in tendenzieller Übereinstimmung mit den Ergebnissen von HAYES (1975, 1979) an den Koeffizienten der Regressionsgleichungen erkennbar (Abb. 8 u. 9). Folgerichtig besteht ebenfalls ein enger statistischer Zusammenhang zwischen Gezeitenflächen und Tidevolumen, was hier für die Wateinzugs- und -teileinzugsgebiete des Ostfriesischen Wattenmeeres exemplarisch dargestellt wird (Abb. 10).

– Sedimentvolumen im Gezeitenbereich und Tidevolumen

Es ist naheliegend, daß das Sedimentvolumen im Gezeitenbereich, eine von WIELAND et al. (1987) eingeführte Parametrisierung, wesentlich von der Gezeitenfläche und dem Tidehub bestimmt wird. Als an beide Parameter gekoppelte Größe kann das Tidevolumen angesehen werden. Regressionsanalysen für die Datensätze des Ostfriesischen Wattenmeeres ergaben – ohne das TEG 73 – einen eindeutigen tendenziellen Zusammenhang, der allerdings durch starke Streuungen gekennzeichnet ist (Abb. 11). Für die Dithmarscher Bucht zeigt sich vor den Teileindeichungen ein engerer Zusammenhang (Abb. 12) mit höherer statistischer Qualität. Danach ist ein Anpassungsvorgang erkennbar, der in ähnlicher Weise abläuft, wie für den Zusammenhang von Einzugsgebietsflächen und Tidevolumen dargestellt wurde (Abb. 6).

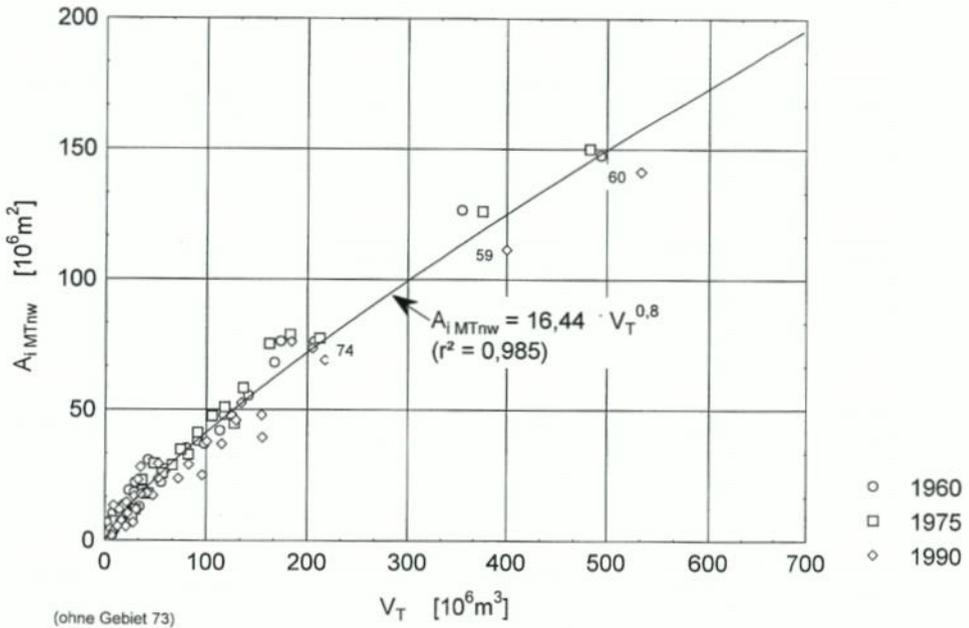


Abb. 10: Gezeitenflächen in Abhängigkeit vom Tidevolumen der Einzugsgebiete (Ostfriesisches Wattenmeer ohne TEG 73)

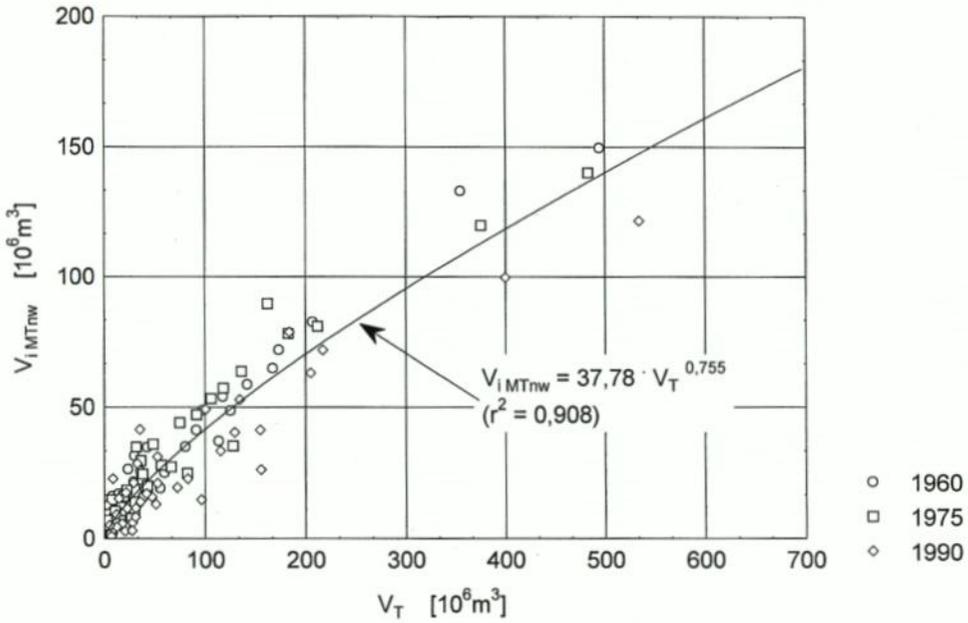


Abb. 11: Sedimentvolumen des Gezeitenbereichs als Funktion des Tidevolumens (Ostfriesisches Wattenmeer ohne TEG 73)

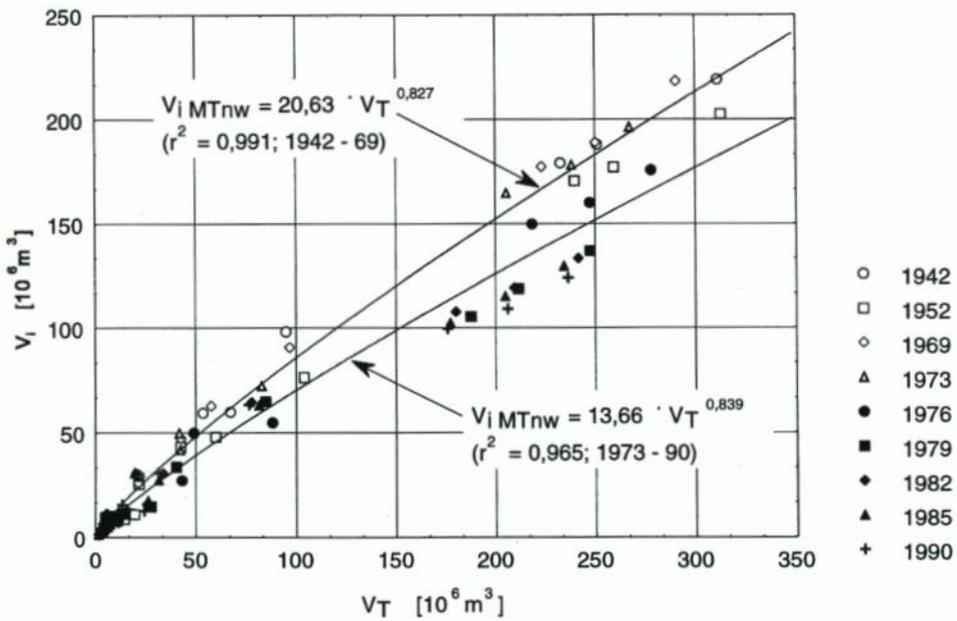


Abb. 12: Sedimentvolumen des Gezeitenbereichs als Funktion des Tidevolumens (Dithmarscher Bucht); Anpassungsfunktionen für die Zeiträume vor und nach den Eindeichungen

– Sedimentvolumen der Ebbdeltas und Tidevolumen

Für die Ebbdeltas der US-amerikanischen Küsten haben WALTON u. ADAMS (1976) – wie bereits erwähnt – den Zusammenhang des Ebbdelta-Sedimentvolumens V_0 mit dem Tidevolumen des zugehörigen Einzugsgebietes V_T funktional dargestellt und hinsichtlich der Exponiertheit in drei Klassen unterteilt. Die Daten streuen – insbesondere für moderat exponierte Bereiche – stark um die drei Ausgleichsgeraden der logarithmischen Funktionsdarstellung (Abb. 13). Angesichts der Streubreite der Daten erscheint die Differenzierung der funktionalen Zusammenhänge nicht als zwingend. Im Vergleich zu den Originaldaten weisen die von EYSINK u. BIEGEL (1992) für einige der Ebbdeltas des Westfriesischen Wattenmeeres ermittelten Daten erstaunlich geringe Streuungen gegenüber den drei Funktionsgeraden auf (Abb. 13). Allerdings ist auch für diese Daten keine Plausibilität hinsichtlich der Differenzierung von WALTON u. ADAMS (1976) zu erkennen. Vergleichbare Daten einiger Ebbdeltas des Ostfriesischen Wattenmeeres liegen hingegen weit außerhalb der von WALTON u. ADAMS (1976) vorgegebenen funktionalen Zusammenhänge; ein vergleichbarer funktionaler Zusammenhang ist aber mit geringerer Streubreite als bei den Originaldaten erkennbar. Sie liegen überwiegend außerhalb des Streubereichs der Originaldaten und zwar durchweg mit einheitlicher Tendenz, die nach der Differenzierung von WALTON u. ADAMS (1976) auf eine stärkere Exponiertheit als bei den Ebbdeltas der US-amerikanischen Küsten und des Westfriesischen Wattenmeeres hindeutet. Insbesondere hinsichtlich der letztgenannten Region sind derart gravierende Unterschiede nicht nachvollziehbar. Damit liegt der Schluß nahe, daß der von WALTON u. ADAMS (1976) ausgewiesene Zusammenhang zwischen dem Sedimentvolumen von Ebbdeltas und dem Tidevolumen des zugehörigen Einzugsgebietes

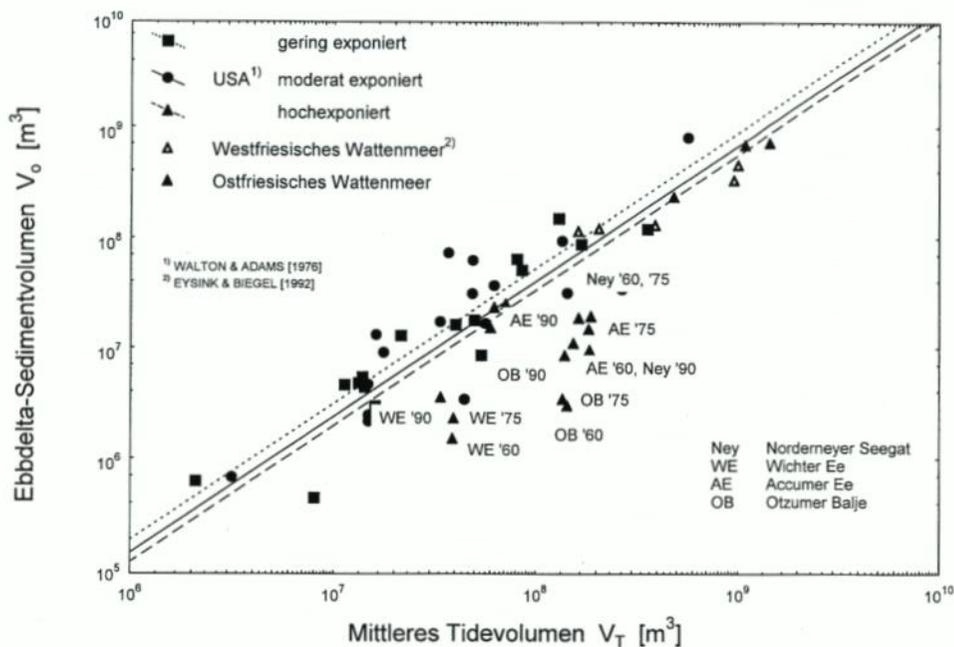


Abb. 13: Sedimentvolumen der Ebbdeltas von Seegaten in Abhängigkeit vom Tidevolumen der zugehörigen Einzugsgebiete (Küsten der USA, Westfriesisches und Ostfriesisches Wattenmeer)

qualitativ zutreffend, aber quantitativ nicht übertragbar ist. Die Differenzierung hinsichtlich der Exponiertheit erscheint nach Einbeziehung von Daten des West- und Ostfriesischen Wattenmeeres noch weniger plausibel als bei alleiniger Betrachtung der Originaldaten. Anzumerken ist weiterhin, daß die Quantifizierung der Sedimentvolumen von Ebbdeltas nach WALTON u. ADAMS (1976) zwar zu einer Objektivierung und Vergleichbarkeit führt; in der Anwendung haben sich aber in einigen Fällen nicht plausible Ergebnisse eingestellt, für die noch Erklärungen zu finden sind. Insofern ist den Vorbehalten von BRUUN (1978) beizupflichten.

5. Sedimentbedarf zum Erhalt des morphodynamischen Gleichgewichts

Das großskalige morphodynamische Gleichgewicht ist im Wattenmeer in den letzten Jahrhunderten erhalten geblieben, weil infolge einer hinreichenden Sedimentzufuhr die Watten in ihrer Höhenlage dem Anstieg des Meeresspiegels folgen konnten. So erklärt sich beispielsweise, daß die Tidevolumen als morphodynamische Gestaltungsfaktoren trotz des Meeresspiegelanstiegs für die Gesamtheit des Ostfriesischen Wattenmeeres seit 1650 keinen wesentlichen Zuwachs erfahren haben (NIEMEYER, 1993, 1995). Wie bereits ausgeführt, ist es für die künftige Entwicklung des Wattenmeeres sowohl im Hinblick auf den Insel- und Küstenschutz als auch hinsichtlich des Naturschutzes entscheidend, ob diese Grundvoraussetzungen für den Erhalt des bestehenden morphodynamischen Gleichgewichts auch dann noch gegeben bleiben, wenn der Anstieg des relativen Meeresspiegels sich erheblich beschleunigt. Mit dem gegenwärtig verfügbaren Instrumentarium läßt sich diese zentrale Frage noch nicht abschließend beantworten. Es ist aber möglich, unter Vorgabe von Szenarien für einen sich möglicherweise zukünftig beschleunigenden relativen Meeresspiegelanstieg (DE RONDE u. VOGEL, 1988; IPCC, 1990, 1992; RWS-DGW, 1991), den für einen Erhalt des morphodynamischen Gleichgewichts erforderlichen Sedimentbedarf der Tidebecken nach der Gleichung

$$V_{s,erf} = R_{SL} \cdot A_b \cdot M_{Thw} \quad (11)$$

abzuschätzen. Diese Beziehung geht von der vereinfachenden – und in dieser Form unzutreffenden – Annahme aus, daß die Anpassung der Morphologie an den Meeresspiegelanstieg gleichmäßig über das gesamte Einzugsgebiet verteilt unter Beibehaltung der Formen erfolgt. Es kann aber aufgrund der Entwicklung der letzten Jahrhunderte (HOMEIER, 1962; NIEMEYER, 1993, 1995) als geeignete erste Näherung zur Abschätzung des Sedimentbedarfs infolge eines angenommenen relativen Meeresspiegelanstiegs angesehen werden. Dieser Ansatz beinhaltet noch keine Aussagen zur Größe der Phasenverschiebung der morphologischen Anpassung gegenüber dem vorausseilenden Meeresspiegelanstieg. Es wurden für die Ermittlung des Sedimentbedarfs zum Erhalt des morphodynamischen Gleichgewichts nach den Szenarien von RWS-DGW (1991) folgende Anstiegsraten eines relativen Meeresspiegelanstiegs R_{SL} für den Zeitraum von 100 Jahren angenommen:

- a) $R_{SL} = 0,20$ m
- b) $R_{SL} = 0,60$ m
- c) $R_{SL} = 0,85$ m
- d) $R_{SL} = 1,00$ m.

Auf dieser Grundlage wurde nach Gl. (11) für die Szenarien a) bis d) der für den Erhalt des morphodynamischen Gleichgewichts erforderliche Sedimentbedarf ermittelt (Tab. 1, Abb. 14). Es kann nicht davon ausgegangen werden, daß die Leistungsfähigkeit des Küstenquertransportes in einem solchen Maße steigen wird, wie es bei wesentlich höheren Anstiegsraten des relativen Meeresspiegelanstiegs als den gegenwärtigen für den Erhalt des morphodynamischen Gleichgewichts erforderlich sein würde. Auf jeden Fall ist davon auszuge-

Tab. 1: Durchschnittlich pro Jahr erforderliche Sedimentvolumen $V_{s, \text{erf}}$ für den Erhalt des morphologischen Gleichgewichts unter Annahme verschiedener Szenarien des relativen Meeresspiegelanstiegs (Ostfriesisches Wattenmeer und Dithmarscher Bucht)

Einzugsgebiet	$V_{s, \text{erf}} [\cdot 10^6 \text{ m}^3 / \text{Jahr}]$			
	Meeresspiegelanstieg [m / Jahr]			
	0,002	0,006	0,0085	0,010
Osterems	0,708	2,125	3,010	3,541
Norderneyer Seegat	0,213	0,639	0,905	1,065
Wichter Ee	0,046	0,139	0,196	0,231
Accumer Ee	0,203	0,609	0,863	1,015
Otzumer Balje	0,149	0,447	0,633	0,745
Harle	0,136	0,407	0,576	0,678
Dithmarscher Bucht	0,221	0,663	0,939	1,105

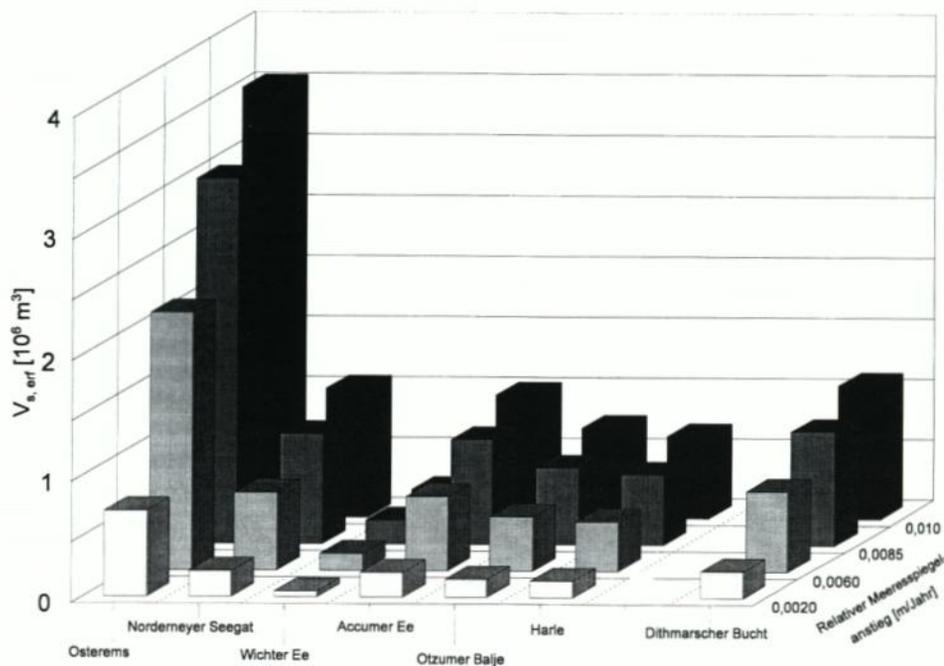


Abb. 14: Durchschnittlich pro Jahr erforderliche Sedimentvolumen $V_{s, \text{erf}}$ für den Erhalt des morphodynamischen Gleichgewichts unter Annahme verschiedener Szenarien des relativen Meeresspiegelanstiegs (Ostfriesisches Wattenmeer und Dithmarscher Bucht)

hen, daß mit einem erhöhten Sedimentbedarf eine größere Phasenverschiebung der morphologischen Anpassung gegenüber dem vorseilenden Meeresspiegelanstieg verbunden sein wird.

Allerdings ist nach den Eindeichungen der Zuider- und Lauwerszee in den Niederlanden festgestellt worden, daß der Küstenquertransport bei erhöhtem Sedimentbedarf zur Wiederherstellung des morphodynamischen Gleichgewichts höhere Importmengen in das Wattenmeer liefert als nach der gegenwärtigen Anstiegsrate des Meeresspiegels erforderlich wäre (STIVE u. EYSINK, 1989). Aus phänomenologischen Analysen für das Einzugsgebiet des Frieschen Zeegats hat sich ergeben, daß diese Erhöhung der Transportkapazitäten des Küstenquertransportes aus den Sedimentvolumen des Ebbdeltas gespeist wurde, das offenbar eine Pufferfunktion für den wechselnden Sedimentbedarf des Wattenmeeres ausübt und somit flexiblere Reaktionen ermöglicht (STIVE u. EYSINK, 1989; NIEMEYER, 1990).

6. Anwendungsbeispiele empirischer und konzeptioneller Modelle

6.1 Linienmodell des Ebbdeltas

DE VRIEND, BAKKER u. BILSE (1994) haben das Zweilinienmodell von BAKKER (1968) auf das Ebbdelta des Frieschen Zeegats angewandt und auf dieser Grundlage auch hypothetische Fälle untersucht. Im Rahmen der Kooperation wurde dieses Modell DELTA auch für Untersuchungen des deutschen Teilprojekts vor Veröffentlichung der Ergebnisse zur Verfügung gestellt. Das Modell beschränkt sich auf den Bereich oberhalb der NN - 5 m - Linie, die als Basis des Ebbdeltas angesehen wird. Bei der Anwendung des Modells wird vorausgesetzt, daß hier der seegangserzeugte Sedimenttransport vorherrscht. Dabei wird die Lage der Basis des Ebbdeltas als Verlängerung der entsprechenden Tiefenlinie auf dem Vorstrand der beiderseits des Seegats liegenden Inseln angesehen; ihre Lageänderungen werden über die Simulation der Materialtransporte gesteuert. Es erfolgt eine Unterscheidung in die drei Bereiche oberdriftig, Ebbdelta und unterdriftig. Als Hauptelemente des Ebbdeltas werden die Hauptebberinne, kleinere Flutrinnen und die Randlappen des Deltas berücksichtigt. In der Modellrechnung erfolgt eine Simulation von insgesamt 15 verschiedenen Sedimentströmen und deren Materialbilanz in sechs Knoten an den drei Knickpunkten der Vorstrandlinie, an den Endpunkten der Strandlinien auf den angrenzenden Inseln und an der Mündung des Seegats (Abb. 15).

Das Modell wurde in einem ersten Versuch auf das Ebbdelta des Norderneyer Seegats angewandt. Als Ausgangssituation wurde der Zustand von 1960 gewählt; die für das Betreiben von Linienmodellen erforderliche Küstenkonstante wurde in erster Näherung aus dem Bereich des westfriesischen Seegats Marsdiep (BAKKER et al., 1988) übernommen. Als Quertransportkonstante wird analog zum Vorgehen von DE VRIEND, BAKKER u. BILSE (1994) für das Friesche Zeegat der Wert $b = 0,5$ m/Jahr angesetzt. Die Ergebnisse der Modellrechnungen (Abb. 16) wurden mit den Daten für die Zustände von 1975 und 1990 verglichen (Tab. 2).

Die Ergebnisse lassen erkennen, daß mit Hilfe des Modells DELTA die Lage des Ebbdeltas in Bezug zu den angrenzenden Düneninseln realistisch reproduzierbar ist. Das Ergebnis ist insofern erstaunlich, da in diesem Bereich in dem Untersuchungszeitraum signifikante morphologische Veränderungen stattgefunden haben (LIEBIG, 1994). Es ist aber festzuhalten, daß die Vielfalt der Änderungen erheblich größer ist als die mit dem Modell

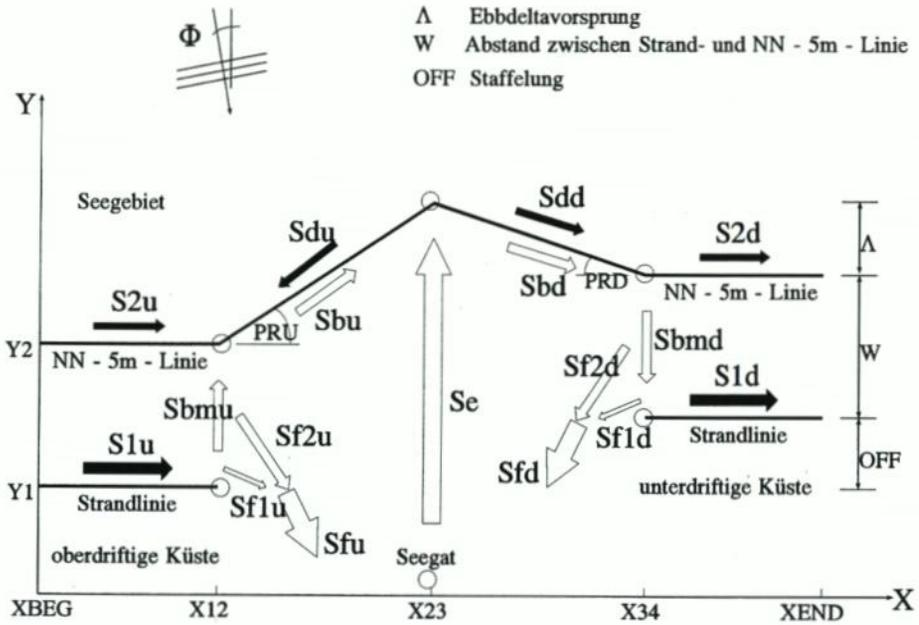


Abb. 15: Sedimentströme im Modell DELTA nach (BILSE, 1993 und GOLDENBOGEN et al., 1994)

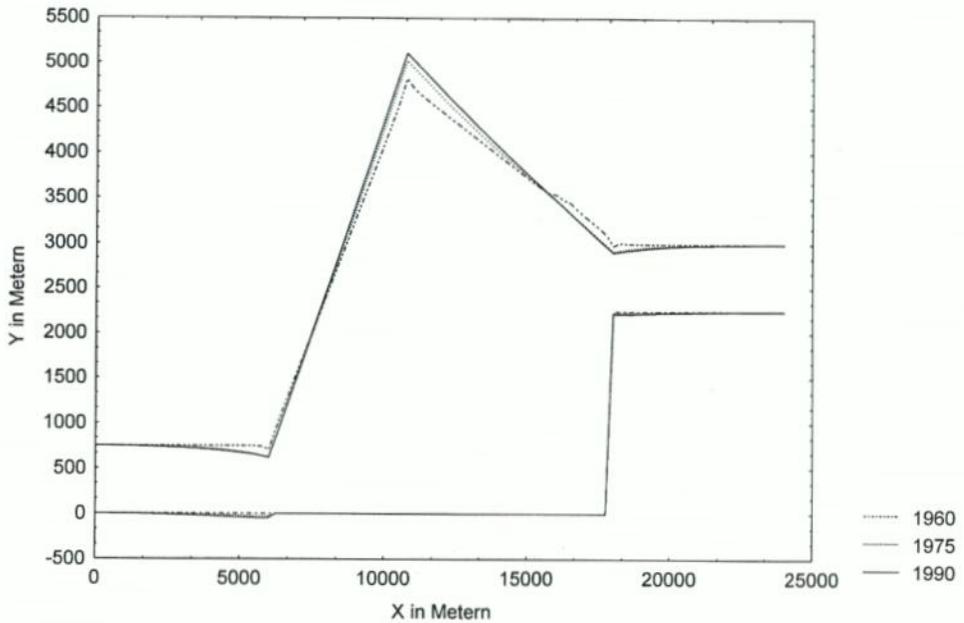


Abb. 16: Seewärtige Auslenkung des Ebbdeltas des Norderneyer Seegats (Ergebnisse des Modells DELTA) (GOLDENBOGEN et al., 1994)

Tab. 2: Seewärtige Auslenkung des Ebbdeltas; Vergleich der Rechnungen mit dem Modell DELTA und Naturdaten für das Norderneyer Seegat (GOLDENBOGEN et al., 1994)

Jahr	Δ gemessen [m]	Δ berechnet [m]
1960	1750	1750 (Anfangswert aus Messung)
1975	1900	1917
1990	2000	1979

DELTA reproduzierten Lageänderungen der Achsen des Ebbdeltas, was allein aus der vereinfachenden Strukturierung der Transportfaktoren und -prozesse erklärbar ist.

6.2 Konzeptionelles Tidebecken-Modell TIDYN

In den Niederlanden ist für die morphodynamische Modellierung von Tidebecken mit Rinnen und zugehörigen Wateinzugsgebieten das Modell TIDYN entwickelt worden (VAN DONGEREN u. DE VRIEND, 1994), das für die Arbeiten im deutschen Teilprojekt von WADE zur Verfügung gestellt worden ist. Hierauf aufbauend ist eine Fortentwicklung vorgenommen worden, die eine Optimierung der Randbedingungen zur Lösung der Bestimmungsgleichungen für die Transporte hinsichtlich der Datenanalysen für den jeweiligen regionalen Anwendungsbereich beinhaltet. Weiterhin wurde die Umkehr des Sedimentationsmechanismus entsprechend phänomenologischer Kenntnisse der Naturprozesse (NIEMEYER, 1991) implementiert und der Aufbau eines hierarchisch gegliederten Modells aus einer beliebigen Anzahl über Knoten gekoppelter Teilsysteme von Rinnen mit zugehörigen Einzugsgebieten ermöglicht. Hierdurch wurde die Anwendung auf Wattenbereiche mit Hierarchien von Rinnen und Teileinzugsgebieten möglich (GOLDENBOGEN et al., 1994; GOLDENBOGEN, 1994).

Als erster Testfall für das erweiterte Modell TIDYN wurde die Entwicklung der Dithmarscher Bucht für den Zeitraum von 1970 bis 1990 reproduziert (GOLDENBOGEN et al., 1994; GOLDENBOGEN, 1994), innerhalb dessen die beiden Teileindeichungen von 1972 und 1978 stattfanden. Ergänzend zu den bereits ausführlich erfolgten Darstellungen (GOLDENBOGEN et al. 1994; GOLDENBOGEN, 1994) sollen hier auf der Grundlage eines bisher nicht publizierten Berechnungsbeispiels aus dem Modellgebiet erkannte Schwachpunkte und eventuelle Verbesserungsmöglichkeiten diskutiert werden, um insbesondere die gegenwärtigen Anwendungsgrenzen des Modells aufzuzeigen.

Die Ergebnisse für den Knoten 9 (Abb. 17), der das Teileinzugsgebiet Speicherkoog repräsentiert, werden hierfür als Beispiele herangezogen (Abb. 18 u. 22). Bei dem hier gewählten Bereich eines deichnahen Teileinzugsgebietes, das zudem durch die Vordeichung verkleinert wurde, treten deutliche Schwierigkeiten bei der Reproduktion der Wathöhen auf, die durch erheblich stärkere Differenzen zwischen Modell- und Naturdaten gekennzeichnet sind (Abb. 18), als die für Knoten mit großflächigen Anteilen deichferner Watten (GOLDENBOGEN et al. 1994; GOLDENBOGEN, 1994). Die Reproduktion des Rinnenmündungsquerschnitts und der Gezeitenflächen ist hingegen auch für dieses Teiluntersuchungsgebiet als tendenziell zutreffend mit zufriedenstellender Übereinstimmung von Modell- und Naturdaten anzusehen. Die Diskrepanz in der Naturähnlichkeit bei der Reproduktion der verschiedenen modellierten Parameter gab Anlaß zur Ursachenforschung. Eine vorab ausgeführte Sensitivitätsanalyse der von VAN DONGEREN u. DE VRIEND (1994) übernommenen

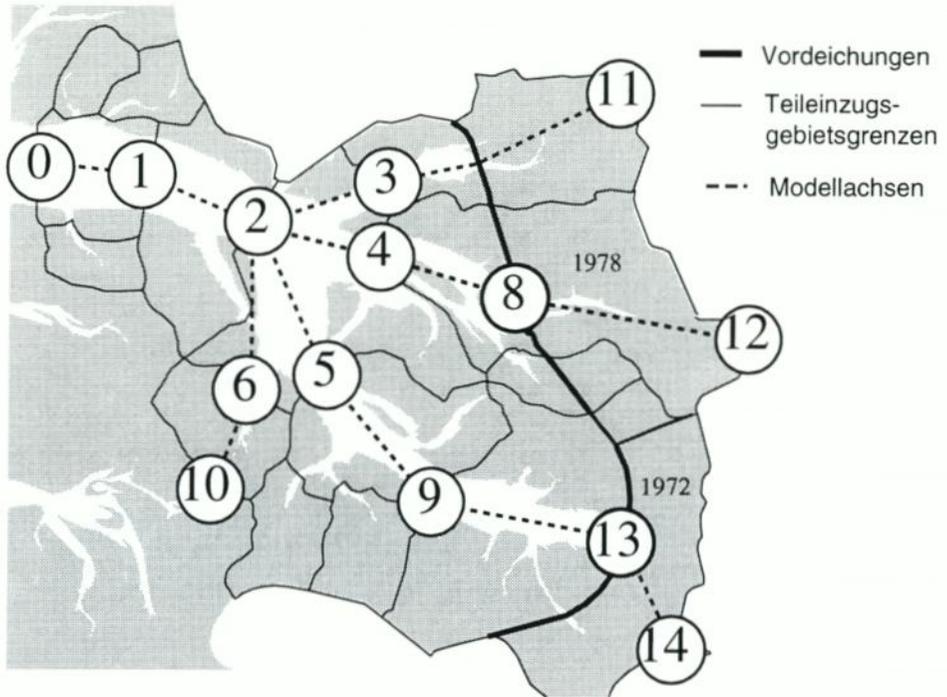


Abb. 17: Einteilung der Teileinzugsgebiete in der Dithmarscher Bucht in Modellkompartimente (Knoten 9)

Modellparameter und Zeitskalen machte deutlich, daß über deren Variation keine grundsätzliche Verbesserung der Naturähnlichkeit zu erreichen ist, wie am als repräsentativ anzusehenden Beispiel für die Zeitskala der morphologischen Rinnenanpassung deutlich wird (Abb. 19).

Eine wesentliche Ursache der relativ starken Abweichungen der Modellergebnisse von den Naturdaten für das charakteristische Wattniveau liegt sicherlich in dem im Modell enthaltenen Ansatz, der in kleineren Teileinzugsgebieten zwangsläufig ein erhebliches Versagensrisiko impliziert, da es nur dessen oberen Grenzwert (GOLDENBOGEN et al., 1994; SCHROEDER, 1994) berücksichtigt. Der im Modell hierüber berücksichtigte funktionale Zusammenhang mit der Einzugsgebietsfläche weist für die kleinsten Teileinzugsgebiete Variationen bis zu etwa 1,3 m für das Ostfriesische Wattenmeer und bis zu etwa 1,0 m für die Dithmarscher Bucht auf (GOLDENBOGEN et al., 1994; SCHROEDER, 1994). Insofern kann für die Reproduktion der Watthöhen im Modell nur eine verbesserte Naturähnlichkeit erwartet werden, wenn ein geeigneterer Ansatz zur Verfügung gestellt werden kann. Ein verbesserter Ansatz muß vor allem den Gestaltungsfaktor Seegang einbeziehen. In den Modellgleichungen findet als Ausgangsgröße nur das Tidevolumen mittelbar über die Einzugsgebietsfläche als prägende hydrodynamische Randbedingung Berücksichtigung. Der Seegang ist jedoch in den oberhalb des Meeresspiegels liegenden Wattbereichen morphologisch prägend (NIE-MEYER, 1983, 1991). Deren relativer Anteil ist in den kleineren, zumeist ufernah gelegenen Teileinzugsgebieten deutlich größer als in den größeren, seewärtiger gelegenen und auch als in den Gesamteinzugsgebieten, die wiederum primär tidegeprägt sind. In den Teileinzugsge-

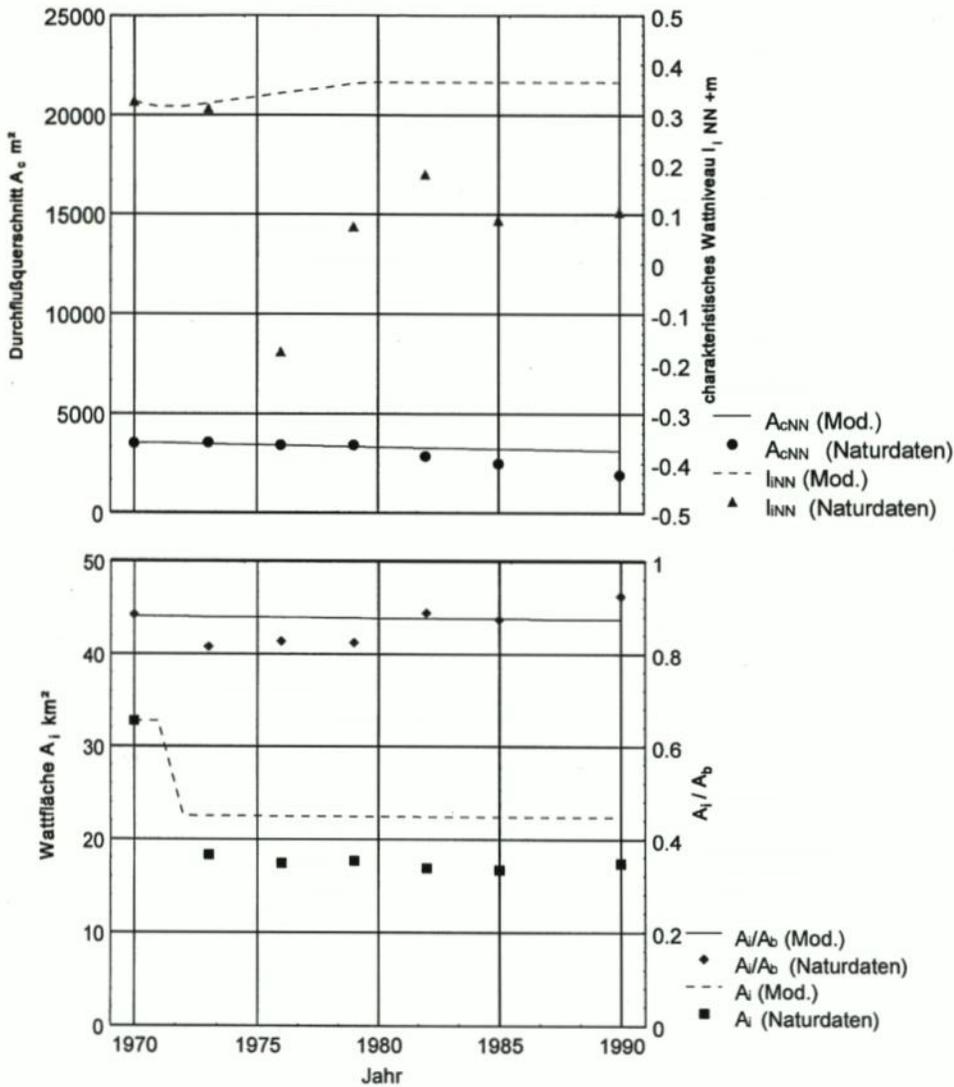


Abb. 18: Vergleich von Modellergebnissen und Meßdaten für die kennzeichnenden Parameter Mündungsquerschnitt, charakteristisches Wattniveau, Gezeitenfläche und Relation von Gezeiten- und Einzugsgebietsfläche für das Teileinzugsgebiet Speicherkoog (Knoten 9, Abb. 17) in der Dithmarscher Bucht (ohne Sedimenttransport von den Wattoberflächen zu den Rinnen)

bieten, deren Watthöhen stärker durch die Lage und Exponiertheit zum einschwingenden Seegang bestimmt werden, sind daher von einem allein die Tidedynamik berücksichtigenden Modell keine naturähnlichen Ergebnisse zu erwarten.

Ein Vergleich des oberen Grenzwertes mit den Naturdaten für die Teileinzugsgebiete Neue-Schell-Legde (Knoten 6), Sommerkoog (Knoten 5) und Speicherkoog (Knoten 9) (Abb. 2 u. 17) verdeutlicht dieses Defizit: Das charakteristische Wattniveau wird für das seewärts gelegene TEG Neue-Schell-Legde nicht nur am stärksten überschätzt, es wird auch relativ zu den anderen beiden Gebieten falsch eingeordnet (Abb. 20).

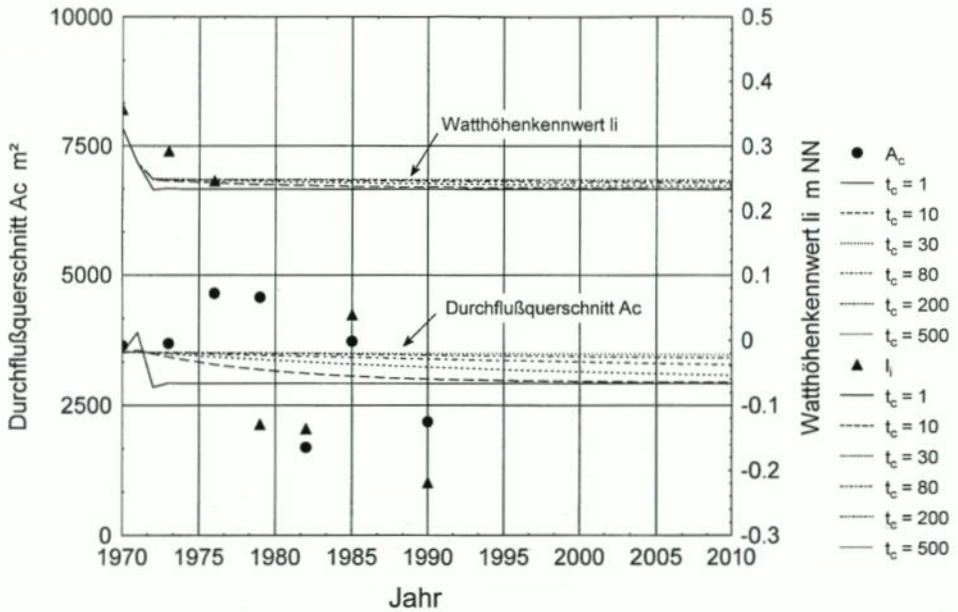


Abb. 19: Variation der Modellergebnisse für Mündungsquerschnitt und charakteristisches Wattniveau in Abhängigkeit von der morphologischen Zeitskala für den Rinnenquerschnitt für das Teileinzugsgebiet Speicherkoog (Knoten 9, Abb. 17) in der Dithmarscher Bucht (ohne Sedimenttransport von den Wattoberflächen zu den Rinnen)

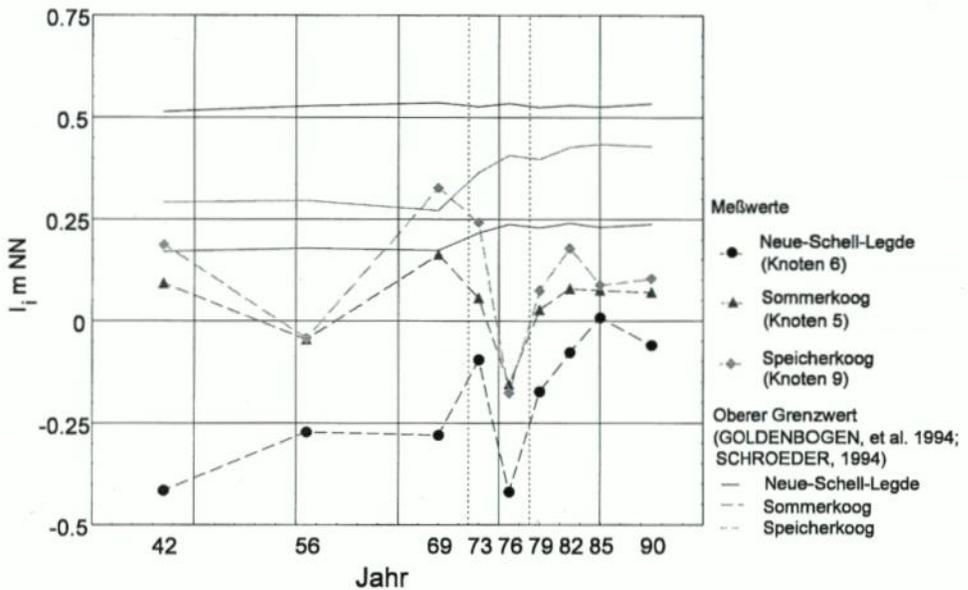


Abb. 20: Vergleich der Naturdaten des charakteristischen Wattniveaus mit dem oberen Grenzwert

Die Daten machen zudem ein weiteres wesentliches Defizit des Modellkonzepts hinsichtlich der naturähnlichen Reproduktion morphodynamischer Folgewirkungen von Reduktionen der Einzugsgebietsflächen – wie im gewählten Beispiel partieller Abdeichungen – deutlich: die im Modellmechanismus unzureichend berücksichtigte Pufferfunktion morphologischer Großformen (NIEMEYER, 1994). Während der angenommene Sedimentimport ohne weitere Differenzierung auch das durch Erosion von Ebbedeltaplatten und Düneninselstränden verfügbare Sedimentangebot (STIVE u. EYSINK, 1989; NIEMEYER, 1990) mittelbar impliziert, wird die vergleichbare Funktion der Watten (NIEMEYER, 1991) außer Acht gelassen. Nach den Teileindeichungen ist – beginnend in den deichnahen Bereichen (NIEMEYER, 1991) – mit einer schnellen Sedimentation der von ihnen nun eingepolderten Einzugsgebieten abgeschnittenen deichnahen Priele auszugehen. Der dafür erforderliche Sedimentbedarf wird zum Teil vorübergehend durch Erosion benachbarter Wattflächen gedeckt. Dieser Vorgang ist im Mechanismus des Modells TIDYN (VAN DONGEREN u. DE VRIEND, 1994) nicht implementiert, was als Ursache für die starken Abweichungen von Modell- und Naturdaten für das charakteristische Wattniveau mit hoher Wahrscheinlichkeit anzusehen ist (NIEMEYER, 1994).

Es ist daher für eine naturähnliche Modellierung der morphodynamischen Prozesse unumgänglich, das Grundmuster der Transportprozesse des Modells zu erweitern (Abb. 21), indem ergänzend eine Erosion der Wattoberflächen bei Sedimentbedarf im Rinnenquerschnitt vorgesehen wird (NIEMEYER, 1994): Zu Testzwecken wurde daher eine – von vornherein als unzureichend, aber als tendenziell weiterführend anzusehende – Erweiterung des Softwarepaketes TIDYN (Abb. 22; GOLDENBOGEN, 1995) zur Umsetzung dieser Idee vorgenommen. In diesem Ansatz wird die Erosion des Wattes und der daraus resultierende Sedimenttransport zur Rinne lediglich durch deren zusätzlichen Sedimentbedarf bestimmt, ohne daß Wechselwirkungseffekte in weiterem Umfang einbezogen werden. Die Ergebnisse auf dieser Grundlage weisen tendenzielle Verbesserungen (Abb. 23) gegenüber dem bisher-

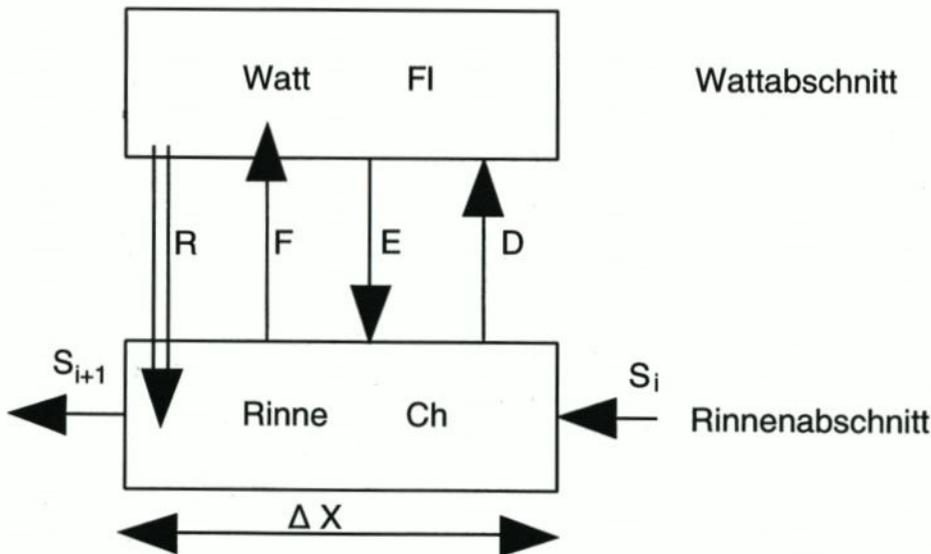


Abb. 21: Erweiterung der Transportprozesse im Modell TIDYN durch Sedimenttransport zur Rinne infolge Erosion der Wattoberfläche (NIEMEYER, 1994)

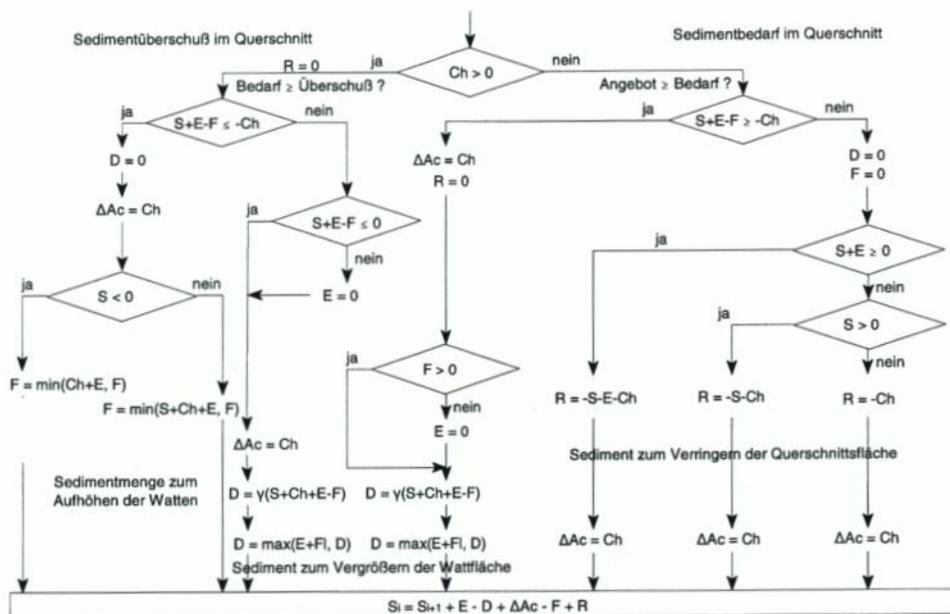


Abb. 22: Erweiterung der Software des Modells TIDYN zur Einbeziehung des Sedimenttransportes zur Rinne infolge Erosion der Wattoberfläche nach Abb. 21 – Programmablaufplan (Goldenbogen, 1995)

gen Ansatz (Abb. 18) auf. Insbesondere erfolgt eine Abnahme des Wattniveaus nach der Abdeichung und somit eine Ausschaltung der bisherigen monokausalen Zuordnung von Erhöhungen des Wattniveaus bei Verkleinerung der Einzugsgebietsfläche. Trotz dieses ersten erfolgreichen Umsetzens eines verbesserten Konzeptes (NIEMEYER, 1994) sind aber noch erhebliche Anstrengungen zu leisten, um derartige morphodynamische Vorgänge annähernd naturähnlich modellieren zu können.

7. Zusammenfassung, Schlußfolgerungen und Ausblick

In der ersten Phase des deutsch-niederländischen Forschungsvorhabens „Wadden Sea morphological development due to the acceleration of relative sea-level rise“ (WADE) sind im deutschen Teilprojekt sechs Wateinzugsgebiete im Ostfriesischen Wattenmeer und die Dithmarscher Bucht an der schleswig-holsteinischen Westküste exemplarisch untersucht worden. Zielsetzung der Arbeiten war und ist es, Grundlagen für empirische und konzeptionelle morphodynamische Modelle zu erstellen, mit deren Hilfe die morphodynamischen Reaktionen von Wattgebieten auf einen sich beschleunigenden relativen Meeresspiegelanstieg vorausschauend abgeschätzt werden können.

Als Grundlage für weitergehende Untersuchungen wurden morphodynamisch repräsentative Parametrisierungen für Wattgebiete vorgenommen; dabei ist zum einen Vorbildern aus der Literatur gefolgt worden und zum anderen sind bedarfsgemäß auch neuartige Kenngrößen definiert worden. Auf der Grundlage physikalisch plausibler Funktionsgleichungen dieser Parameter ist mit Hilfe von Regressionsanalysen deren funktionaler Zusammenhang

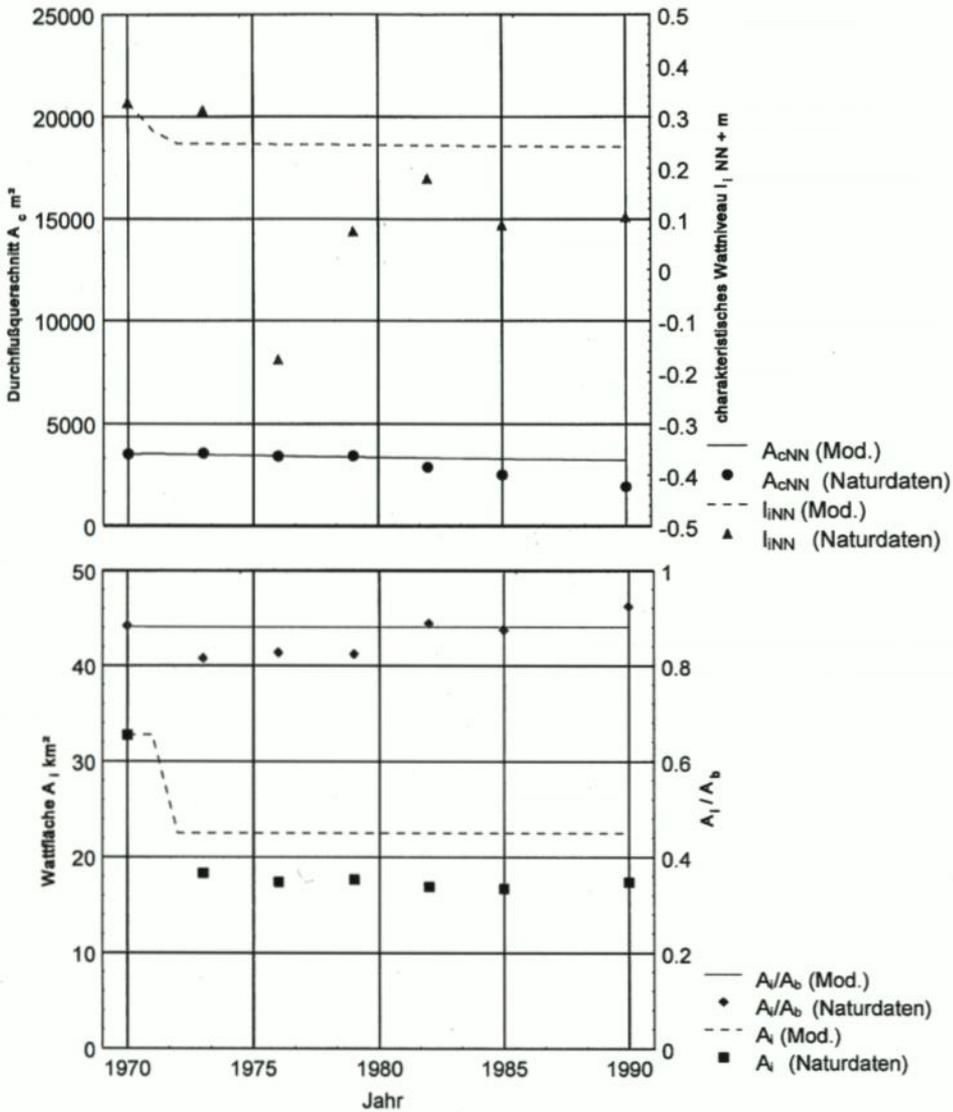


Abb. 23: Vergleich von Modellergebnissen und Meßdaten für die kennzeichnenden Parameter Mündungsquerschnitt, charakteristisches Wattniveau, Gezeitenfläche und Relation von Gezeiten- und Einzugsgebietsfläche für das Teileinzugsgebiet Speicherkooog (Knoten 9, Abb. 17) in der Dithmarscher Bucht mit Sedimenttransport von den Wattoberflächen zu den Rinnen

auf ihre statistische Qualität untersucht worden. Hierbei konnten wesentliche quantitative Zusammenhänge hinsichtlich morphodynamischer Gleichgewichtszustände in Wattengebieten mit regionaler und teilweise auch überregionaler Gültigkeit gewonnen werden. Am Fall der Dithmarscher Bucht konnten auf dieser Grundlage zudem die Auswirkungen der dort vorgenommenen beiden Teileindeichungen analysiert werden. Des weiteren wurde in einem ersten Ansatz für verschiedene Szenarien eines sich beschleunigenden relativen Meeres-

spiegelanstiegs der Sedimentbedarf ermittelt, der in den jeweiligen Untersuchungsgebieten für den Erhalt des bestehenden morphodynamischen Gleichgewichts erforderlich sein würde.

Die Ermittlung statistisch zuverlässiger und räumlich sowie zeitlich stabiler funktionaler Zusammenhänge für hydrodynamisch-morphologische Gleichgewichtszustände soll als Grundlage für die Fortentwicklung empirischer und konzeptioneller morphodynamischer Modelle dienen, die auch Übergangszustände zwischen Gleichgewichtszuständen quantitativ nachbilden können und somit als Prognoseinstrumente in Zeitskalen der Ingenieurplanung einsetzbar sind. Als erste Schritte in dieser Richtung ist zum einen das – in den Niederlanden entwickelte – Zweiliniennmodell DELTA auf die Lageveränderungen des Ebbdeltas vom Norderneyer Seegat angewandt worden. Zum anderen wurde das – ebenfalls in den Niederlanden entwickelte – morphodynamische Tidebecken-Modell TIDYN für die Anwendung auf großräumige Wattgebiete unter Optimierung der Randbedingungen und qualitativer Anpassung von Transport-, Erosions- und Sedimentationsvorgängen an die Naturvorgänge fortentwickelt. Hierdurch konnten teilweise wesentliche Verbesserungen der Naturähnlichkeit erreicht werden, wie eine Anwendung neuerer Versionen des Modells zur Reproduktion der morphodynamischen Folgewirkungen von zwei Teileindeichungen in der Dithmarscher Bucht zeigt. Das Modell weist aber immer noch deutliche Grenzen hinsichtlich der Naturähnlichkeit auf, an deren Überwindung weiter zu arbeiten sein wird. Wesentliche Ursachen für diese Mängel wurden analysiert; hiermit ist eine brauchbare Grundlage für weitere Schritte in Richtung auf verbesserte Naturähnlichkeit dieses Modelltyps geschaffen worden.

Entscheidender Schritt für die morphodynamische Modellierung des Gesamttraumes Wattenmeer wird neben wesentlichen Verbesserungen von Modelltypen für Ebbdeltas einschließlich angrenzender Düneninselstrände wie DELTA einerseits und denen für Tidebecken wie TIDYN die Entwicklung eines Kopplungsmechanismus zwischen beiden sein. Insofern ist für die morphodynamische Modellierung von Gesamtsystemen des Wattenmeeres im Mittel- und Langfristmaßstab ergänzend zur Verfeinerung und Fortentwicklung verfügbarer empirischer oder konzeptioneller Modelle noch elementare Entwicklungsarbeit einschließlich der Formulierung prägender physikalischer Prozesse erforderlich.

8. Danksagung

Das deutsche Teilprojekt des Forschungsvorhabens WADE wird vom Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI) begleitet und vom Bundesministerium für Forschung und Technologie gefördert. Es wird in der Forschungsstelle Küste des Niedersächsischen Landesamtes für Ökologie bearbeitet. Bei diesen Arbeiten hat es vielfältige Unterstützung von Fachkollegen aus dem eigenen Haus und aus anderen Institutionen des deutschen Küsteningenieurwesens, insbesondere vom ALW Heide und der WSD Nordwest, sowie von zahlreichen niederländischen Kollegen des Rijksinstituut voor Kust en Zee, des Waterloopkundig Laboratorium und der Universiteit Twente gegeben, ohne die das bisher Erreichte nicht möglich gewesen wäre. Insbesondere gilt dies für Prof. Dr. ir. H. de Vriend von der Universiteit Twente, der die Modelle DELTA und TIDYN in einer Form zur Verfügung stellte, die deren unmittelbare Nutzung ebenso erlaubte wie ihre Ergänzung.

9. Schriftenverzeichnis

- BAKKER, W. T.: A mathematical theorie about sand waves and its application on the Dutch isle of Vlieland. Eng. Departm. f. Coast. Res., Rijkswaterstraat, 1968.
- BAKKER, W. T., VAN DER KERK, C., DE VROEG, J. H.: Determination of coastal constants in mathematical line-models. 2nd European Workshop on Coast. Zon., Loutraki, 1988.
- BRUUN, P.: Stability of tidal inlets-theory and engineering. Developm. Geotech. Eng., Vol. 23, Elsevier Sc. Publ. Comp., Amsterdam, Oxford, New York, 1978.
- DIECKMANN, R.: Geomorphologie, Stabilitäts- und Langzeitverhalten von Wateinzugsgebieten der Deutschen Bucht. Mitt. Franzius-Institut d. Universität Hannover, H. 60, 1985.
- DE VRIEND, H. J., BAKKER, W. T. u. BILSE, D. P.: A morphological behaviour model for the outer delta of mixed-energy tidal inlets. Coast. Eng., Vol. 23, No. 3/4, 1994.
- DE RONDE, J. G. u. VOGEL, J. A.: Zeespiegelrijzing, hydro meteo scenario's. Ministerie van verkeer en waterstraat, Rijkswaterstaat: Kustverdediging na 1990. techn. rap. 6, Nota GWAO-88.015, Den Haag, 1988.
- EYSINK, W. D.: Morfologie van de Waddenzee. Waterloopk. Laborat. Rap. R 1336, 1979.
- EYSINK, W. D.: Morphologic response of tidal basins to changes. Proc. 22nd Int. Conf. Coast. Eng., Delft, Vol. 2, ASCE, New York, 1991.
- EYSINK, W. D. u. BIEGEL, E. J.: Impact of sea level rise on the morphology of the Wadden Sea in the scope of its ecological function. Delft Hydraulics, Rep. H 1300, 1992.
- GERRITSEN, F.: Morphological stability of inlets and channels of the Western Wadden Sea. Rijkswaterstraat, Dienst Getijdewateren, Rap. GWAO-90.019, Den Haag, 1990.
- GOLDENBOGEN, R.: Erste Ergebnisse empirischer Modellierung der Morphodynamik eines Wateinzugsgebietes am Beispiel der Dithmarscher Bucht. Die Küste, H. 56, 1994.
- GOLDENBOGEN, R.: Dokumentation zu Erweiterungen der Software des Modells TIDYN. NLÖ - Forschungsstelle Küste -, Dezern. Hydrographie d. Küstengebietes, 1995.
- GOLDENBOGEN, R.; SCHROEDER, E.; KUNZ, H. u. NIEMEYER, H. D.: Zwischenbericht zum Forschungsvorhaben WADE. NLÖ -Forschungsstelle Küste-, Schlußber. z. Phase I BMFT/KFKI-FV MTK 0508, Norderney, 1994.
- HAYES, M. O.: Morphology and sand accumulation in estuaries. in: L. E. Cronin: Estuarine Research, Vol. 2., Academic Press, New York, 1975.
- HAYES, M. O.: Barrier island morphology as a function of tidal and wave regime. in: S. P. Leatherman: Barrier islands, Academic Press, New York, 1979.
- HOMER, H.: Historisches Kartenwerk 1:50.000 der niedersächsischen Küste. Jber. 1961 Forsch.-Stelle f. Insel- u. Küstenschutz, Bd. 13, 1962.
- IPCC: Strategies for adaption to sea level rise. Intergovernmental Panel on Climate Change, Response Strategies Working Group, ed.: Dutch Ministry of Transport and Public Works, Rijkswaterstaat, Tidal Water Division, The Hague, 1990.
- IPCC: Strategies for adaption to sea level rise. Intergovernmental Panel on Climate Change, Response Strategies Working Group, ed.: Dutch Ministry of Transport and Public Works, Rijkswaterstraat, Tidal Water Division, The Hague, 1992.
- LIEBIG, W.: GIS-applications to Wadden Sea areas. Proc. Int. Coast. Congr. Kiel '92, 1993.
- LIEBIG, W.: GIS and the Wadden Sea. GIS - Europe, Vol. 3, No. 2, 1994.
- NIEMEYER, H. D.: Über den Seegang an einer inselgeschützten Wattküste. BMFT-Forschungsber. MF 203, 1983.
- NIEMEYER, H. D.: Morphodynamics of tidal inlets. CEEC (Civil Eng. Europ. Cours. Progr. o. Contin. Educat. 1990), Delft Univ. o. Techn. Intern. Intern. Civ. Eng., 1990.
- NIEMEYER, H. D.: Case study Ley Bay: an alternative to traditional enclosure. Proc. 3rd Conf. Coast. & Port Eng. Develop. Countr., Mombasa/Kenya, 1991.
- NIEMEYER, H. D.: Zur Systematik hydrodynamisch-morphologischer Wechselwirkungen im Einzugsbereich der Otzumer Balje. Ber. z. Ökosystemforsch. - Hydrographie - Nr. 5, UBA-Schlußber. Vorph. Teil F, NLWA - Forschungsstelle Küste -, Norderney, 1992.
- NIEMEYER, H. D.: Long-term morphodynamical behaviour of the East Frisian islands and coast. Conf. Large Scale Coastal Behavior '93, U.S. Geol. Surv., Open-File Rep. 93-381, 1993.
- NIEMEYER, H. D.: Further development of a process-based morphodynamical model for tidal basins - box- and tree-model. Worksh. o. Tidal Inlet Modeling, US Army Corps o. Eng. Waterw. Exp. Stat. - Coast. Eng. Res. Cent. - Vicksburg/Ms., 1994.

- NIEMEYER, H. D.: Long-term morphodynamical development of the East Frisian islands and coast. Proc. 24th Int. Conf. o. Coast. Eng. Kobe/Japan, ASCE, New York, 1995.
- NUMMEDAL, D. u. FISCHER, I. A.: Process-response models for depositional shorelines. The German and the Georgia bights. Proc. 16th Int. Conf. Coast. Eng. Hamburg, ASCE, New York, 1978.
- O'BRIEN, M. P.: Estuary tidal prisms related to entrance areas. ASCE, Civ. Eng., Vol. 1, No. 8, 1931.
- O'BRIEN, M. P.: Equilibrium flow areas of tidal inlets on sandy coasts. Proc. 10th Conf. Coast. Eng., Ch. 39, ASCE, New York, 1967.
- 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. Niemeier, E. Schroeder, R. Goldenbogen, E. J. Biegel, W. D. Eysink, Rep. GWA0-92.197X, Den Haag, 1992.
- RENGER, E.: Untersuchungen von Wateinzugsgebieten. Mitt. Franzius-Institut d. Univ. Hannover, H. 40, 1974.
- RENGER, E.: Quantitative Analyse der Morphologie von Wateinzugsgebieten und Tidebecken. Mitt. Franzius-Institut d. Univ. Hannover, H. 43, 1976.
- RODLOFF, W.: Über Wattwasserläufe. Mitt. Franzius-Institutes d. Universität Hannover, H. 34, 1970.
- RWS-DGW: Wassend waters. Rijkswaterstaat, Dienst Getijdewateren, Nota GWA0-90.026, Den Haag, 1991.
- SCHROEDER, E.: Parametrisierungen morphodynamischer Strukturen von Wateinzugsgebieten für empirisch-konzeptionelle Modellierungen. Die Küste, H. 56, 1994.
- SCHROEDER, E.; GOLDENBOGEN, R. u. KUNZ, H.: Parametrization for conceptual morphodynamic models of Wadden Sea areas. 24th Int. Conf. o. Coast. Eng. Kobe/Japan, ASCE, New York, 1995.
- STIVE, M. J. F. u. EYSINK, W. D.: Voorspelling ontwikkeling kustlijn 1990-2020, fase 3. Deelrap. 3.1: Dynamisch model van het Nederlandse kuststelsel. Waterloopk. Labor. Rap. H 825, 1989.
- VAN DONGEREN, A. R. u. DE VRIEND, H. J.: A model of morphological behaviour in tidal basins. Coast. Eng., Vol. 22, No. 3/4, 1994.
- WALTHER, F.: Die Gezeiten und Meeresströmungen im Norderneyer Seegat. Bautechn., H. 13, 1934.
- WALTHER, F.: Zusammenhänge zwischen der Größe der ostfriesischen Seegaten mit ihren Wattgebieten sowie mit Watten und Strömungen. Jber. 1971 Forsch.-Stelle f. Insel- u. Küstenschutz, Bd. 23, 1972.
- WALTON, T. L. u. ADAMS, W. D.: Capacity of inlet outer bars to store sand. Proc. 15th Int. Conf. Coast. Eng. Honolulu/Hawaii, Vol. II, ASCE, New York, 1976.
- WIELAND, P., THIES, E. u. BERGHEIM, V.: Bilanz hydrologischer und morphologischer Untersuchungen in der Dithmarscher Bucht. Büsser Gewässerkundl. Ber., H. 54, ALW Heide, Dez. Gewässer., Büsser, 1987.