

BUNDESMINISTERIUM FÜR BILDUNG,
WISSENSCHAFT, FORSCHUNG UND TECHNOLOGIE

-Meerestechnik-

FORSCHUNGSVORHABEN
WADE

ABSCHLUSSBERICHT

von

Roland Goldenbogen
Hans Kunz
Hanz Dieter Niemeyer
Ernst Schroeder

NIEDERSÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR ÖKOLOGIE
-FORSCHUNGSSTELLE KÜSTE-

Forschungsvorhaben MTK 0508, März 1998

Inhaltsverzeichnis:

1. EINLEITUNG UND PROBLEMSTELLUNG	1
2. DIE UNTERSUCHUNGSGEBIETE	4
2.1 Allgemeines	4
2.2 Ostfriesisches Wattenmeer	7
2.2.1 Historisch-morphologische Entwicklung des Ostfriesischen Wattenmeeres	7
2.2.2 Hydrographisch-morphologische Charakteristik des Ostfriesischen Wattenmeeres	8
2.3 Dithmarscher Bucht	10
2.3.1 Historisch-morphologische Entwicklung der Dithmarscher Bucht	10
2.3.2 Hydrographisch-morphologische Charakteristik der Dithmarscher Bucht	11
3. DOKUMENTATION	12
3.1 Allgemeines	12
3.2 GIS-Datenbank	13
3.2.1 Datenerfassung	13
3.2.2 Berechnungsprozeduren (AML's)	14
3.3 Parameter-Datenbank	14
3.3.1 Parameterarchivierung	14
3.3.2 Paradox-Datenbank	16
4. HYDRODYNAMISCH-MORPHOLOGISCHE GLEICHGEWICHTSZUSTÄNDE	17
4.1 Allgemeines	17
4.2 Definitionen	18
4.3 Parametrisierungen	20
4.3.1 Rinnenquerschnitte und Tidevolumen	20
4.3.2 Einzugsgebietsflächen und Tidevolumen	22
4.3.3 Gezeiten- und Einzugsgebietsflächen sowie Tidevolumen	24
4.3.4 Sedimentvolumen im Gezeitenbereich und Tidevolumen	27
4.3.5 Untersuchung der Ebbdeltas	28
4.3.6 Charakteristische Watthöhen und Umlagerungsraten	31
5. SEDIMENTBEDARF ZUM ERHALT DES MORPHODYNAMISCHEN GLEICHGEWICHTS	45

6.	ANWENDUNGSBEISPIELE EMPIRISCH-KONZEPTIONELLER MODELLE	48
6.1	Linienmodell des Ebbdeltas	48
6.2	Konzeptionelles morphodynamisches Tidebecken-Modell TIDYN	50
6.2.1	Modellkonzept	50
6.2.2	Modellmodifikation	53
6.2.3	Modellanwendungen	55
6.2.3.1	Modellanwendung auf die Dithmarscher Bucht	55
6.2.3.2	Modellanwendung auf das Tidebecken des Norderneyer Seegats	58
6.2.4	Bewertung der Modellanwendungen	60
7.	ZUSAMMENFASSUNG UND SCHLUSSFOLGERUNGEN	62
8.	DANKSAGUNG	63
9.	VERZEICHNISSE	64
9.1	Abkürzungen & Symbole	64
9.2	Abbildungen	65
9.3	Tabellen	68
9.4	Watteinzugs- und -teileinzugsgebiete	69
9.5	Wasserstände und Tidehübe	70
9.6	Veröffentlichungen in Zusammenhang mit WADE	72
9.7	Schrifttum	73

Inhalt von Band 1:

Veröffentlichungen in Zusammenhang mit WADE (siehe Abschnitt 9.6)

Inhalt von Band 2:

Ernst Schroeder und Roland Goldenbogen:

Dokumentation zur Parameter- und GIS-Datenbank

Roland Goldenbogen:

Dokumentation zu den Routinen in der ARC/INFO Macro Language

1. EINLEITUNG UND PROBLEMSTELLUNG

Die Diskussion über eine mögliche globale Klimaänderung hat zu Überlegungen geführt, welche Auswirkungen sich daraus für die Sicherheit der Küsten ergeben können. Primär stand dabei ein beschleunigter Anstieg des Meeresspiegels mit seinen möglichen Konsequenzen für die Sicherheit und Wirksamkeit sturmflutkehrender Bauwerke im Vordergrund. Erst allmählich setzte sich die Erkenntnis durch, daß auch dessen mittelbaren Wirkungen Aufmerksamkeit zu widmen ist, insbesondere möglichen morphologischen Folgewirkungen an den Dünen- und Niederrückküsten, die von den jeweiligen hydrodynamischen Randbedingungen maßgebend geprägt werden. Zu ihnen gehören auch die sich von Den Helder bis Ribe erstreckenden Wattenküsten der südlichen Nordsee. Dieser Naturraum ist in den letzten Jahrhunderten nachhaltig durch menschliches Einwirken mitgestaltet worden: Sein Küstengebiet hat dadurch weitgehend den Charakter einer Kulturlandschaft angenommen, die einer eingehenden Nutzung durch den Menschen unterliegt.

Dabei hat sich ein -in seinen Prozessen noch weitgehend naturgegebenes- morphodynamisches Gleichgewicht ausgebildet, das sich bisher ebenso dem herrschenden Anstieg des Meeresspiegels wie saisonalen Extremen flexibel anpassen konnte. Für den Erhalt des Wattenmeeres und die Sicherheit der dazugehörigen Inseln und Küstengebiete ist von existenzieller Bedeutung, inwieweit das bestehende morphodynamische Gleichgewicht bei sich nachhaltig verändernden hydrodynamischen Randbedingungen wie beispielsweise einem sich beschleunigendem Meeresspiegelanstieg oder einem veränderten Sturm- klima anpassen kann. Dieser Fragestellung hat man sich im letzten Jahrzehnt in den Anrainerländern des Wattenmeeres der südlichen Nordsee gewidmet, insbesondere schon frühzeitig in den Niederlanden. Dabei gewann schnell die Einsicht Raum, daß nachhaltige Veränderungen der Morphodynamik nicht nur für die Sturmflutsicherheit der Inseln und Küste von Belang sein würden, sondern ebenfalls für das Ökosystem Wattenmeer. Für adäquate Problembetrachtungen erwies es sich als erforderlich, aufbauend auf dem verfügbaren Wissenstand geeignete Untersuchungskonzepte zu entwickeln.

Es liegen wohlbegründete Erkenntnisse darüber vor, daß infolge anthropogener Einwirkungen globale Klimaänderungen mit einer deutlichen Zunahme der Durchschnittstemperaturen eintreten können, die -zu gegenwärtig nicht vorhersagbaren- Reaktionen des Meeresspiegels führen könnten. Mit den zur Zeit verfügbaren Werkzeugen einschließlich modernster Klimamodelle ist eine verlässliche Vorhersage künftiger Entwicklungen des Meeresspiegels noch nicht möglich. Um dennoch Untersuchungen zu möglichen Folgewirkungen vornehmen zu können, hat sich es sich weltweit eingebürgert, zu deren vorsorglicher Abschätzung Szenarien für Größenordnungen von Meeresspiegelanstiegsraten anzusetzen, die nach dem verfügbaren Wissensstand als realistisch eingeordnet werden können. Wesentlich ist hierbei auch, daß sie hinsichtlich möglicher Konsequenzen in hinreichender Form die denkbare Bandbreite abdecken, um bei der Planung angemessener Reaktionen soweit wie möglich die Gesamtheit alternativer Konsequenzen umfassend einzubeziehen.

Im Küsteningenieurwesen ist bisher auf das Steigen des Meeresspiegels an den Wattenküsten im wesentlichen durch eine Anpassung vorhandener Bauwerke reagiert worden. Angesichts eines moderaten Meeresspiegelanstiegs sind die daraus resultierenden Anforderungen soweit technisch beherrschbar gewesen, daß die Aufgabe entwickelter Gebiete in den letzten Jahrhunderten kaum noch erforderlich war. Wesentlicher Grund dafür war, daß mit dem Anstieg des Meeresspiegels keine nachhaltigen Veränderungen des morphodynamischen Gleichgewichts einhergingen. Im Wattenmeer hat eine dem Meeresspiegelanstieg seit Jahrhunderten folgende Sedimentation beispielsweise zu im allgemeinen gleichbleibenden Wassertiefen geführt. Hierdurch ist wiederum eine Erhöhung der dynamischen Belastung von Bauwerken des Küsteningenieurwesens ausgeblieben und die Anpassungen an den steigenden Meeresspiegel hatten lediglich der daraus resultierenden erhöhten statischen Belastung Rechnung zu tragen.

Die heute allgemein akzeptierten Szenarien eines künftigen Meeresspiegelanstieg für Planungen im Küsteningenieurwesen [DE RONDE & VOGEL 1988; IPCC 1990; RWS-DGW 1991] beinhalten aber denkbare Raten, bei denen ein Erhalt des gegenwärtigen morphodynamischen Gleichgewichts nicht als sicher

vorausgesetzt werden darf. Dessen Veränderung würde aber in vielen Küstengebieten zu viel weiterreichenden Folgewirkungen führen als sie in den letzten Jahrhunderten eingetreten sind. Dies gilt auch für das Wattenmeer an der südlichen Nordseeküste, dessen morphologische Gestalt durch die Hydrodynamik geprägt wird. Hierbei stellt sich insbesondere die Frage, ob bei einem sich deutlich beschleunigenden Meeresspiegelanstieg durch eine hinreichende Sedimentzufuhr das Höhenwachstum dort soweit nachfolgt, daß eine nachhaltige Veränderung des morphodynamischen Gleichgewichts ausbleibt.

Mit diesen Fragestellungen befaßte sich auch die im Rahmen eines Verwaltungsabkommens zwischen dem BUNDESMINISTERIUM FÜR BILDUNG UND FORSCHUNG und dem niederländischen MINISTERIE VOOR VERKEER EN WATERSTAAT eingerichteten deutsch-niederländischen Arbeitsgruppe „Meeresspiegelanstieg und Küsteningenieurwesen“. Ein Ergebnis der Diskussionen war die Einrichtung des deutsch-niederländische Forschungsvorhaben "Wadden Sea morphodynamical development due to an accelerated relative sea-level rise" (WADE). Dessen Zielsetzung war - aufbauend auf vorhandene Erkenntnisse - ein verfahrensmäßiges Instrumentarium zu entwickeln und bereitzustellen, das Abschätzungen künftiger morphologischer Entwicklungen im Wattenmeer unter veränderten hydrodynamischen Randbedingungen erlaubt. Die primäre Zielsetzung des Vorhabens blieb dabei die Entwicklung von Verfahren für Prognosen, nicht aber deren Erstellung. Im Rahmen jeweils nationaler Förderung wurden in beiden Ländern für das Wattenmeer typische und somit auch repräsentative Teilgebiete untersucht; die Ergebnisse wurden ausgetauscht und hinsichtlich der Entwicklung methodischer Ansätze erfolgte eine enge Kooperation. Im folgenden wird über die im deutschen Teil des Forschungsvorhabens erarbeiteten Ergebnisse berichtet, wobei aus arbeitsökonomischen Gründen hinsichtlich von Einzelheiten auf die bisherigen -in einem Anlageband beigefügten- Veröffentlichungen zu Untersuchungsergebnissen aus dem Forschungsvorhaben hingewiesen wird.

2. DIE UNTERSUCHUNGSGEBIETE

2.1 Allgemeines

Die Nordsee ist ein flaches Randmeer des Atlantischen Ozeans, dessen Meeresboden i.a. von Norden nach Süden ansteigt. An dessen südlicher Küste erstreckt sich von den Helder bis Blåvandshuk ein Wattenmeer, welches zur See hin durch Barriere-Inseln und Außensände und von den alluvialen Niederungsgebieten des Festlandes durch Deiche begrenzt wird. Zwei Bereiche der deutschen Nordseeküste waren Gegenstand der ausgeführten Untersuchungen.

Die Untersuchungen basierten auf zwei grundsätzlich zu unterscheidenden Gebieten. Zum einen das Gebiet des Ostfriesischen Wattenmeeres (Abb. 2.1 bis 2.3) und zum anderen das der Dithmarscher Bucht (Abb. 2.4). Sie umfassen sowohl mesotidale inselgeschützte Wattenküsten als auch ästuarine Watten im meso-makrotidalen Grenzbereich. Die grundsätzliche Unterscheidung resultiert aus der unterschiedlichen morphologischen Struktur. 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.

Begrenzt wird ein einzelnes Watteinzugsgebiet durch die vorgelagerten Inseln, die Festlandsküste und untereinander durch die Watthöhenscheiden. Ein in dieser Form definiertes Watteinzugsgebiet wird im wesentlichen über das zugehörige Seegat gefüllt bzw. entleert. Das heißt, der Wasseraustausch über die Watthöhenscheiden, der primär von der aktuellen Windrichtung und -stärke abhängt, wird vernachlässigt. Diese quasi statische Betrachtung ist vor dem Hintergrund jährlicher Mittelwerte zulässig.

Watthöhenscheiden ergeben sich aus der topographischen Gestalt und erstrecken sich entlang einer gedachten Linie der höchsten Erhebungen zwischen zwei benachbarten Gebieten. Neben den Watthöhenscheiden sind Watteinzugsgebiete durch Seegaten, Wattrinnen und Platen gekennzeichnet. Die Seegaten liegen hierbei definitionsgemäß im engsten Durchflußquerschnitt zwischen den angrenzenden Inseln.

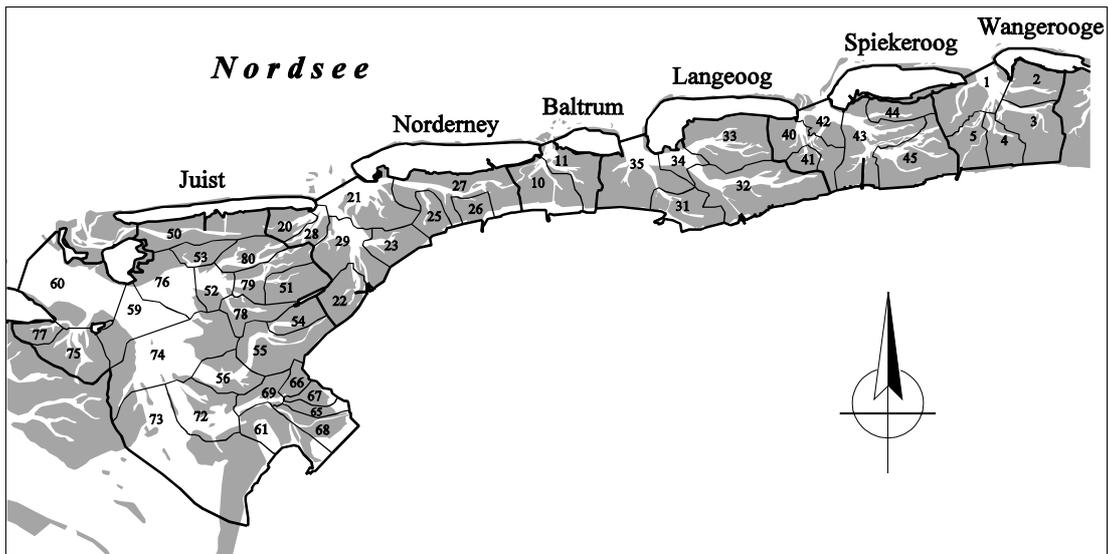


Abb. 2.1: Ostfriesisches Wattenmeer, Gebietseinteilung 1960 (siehe 9.4)

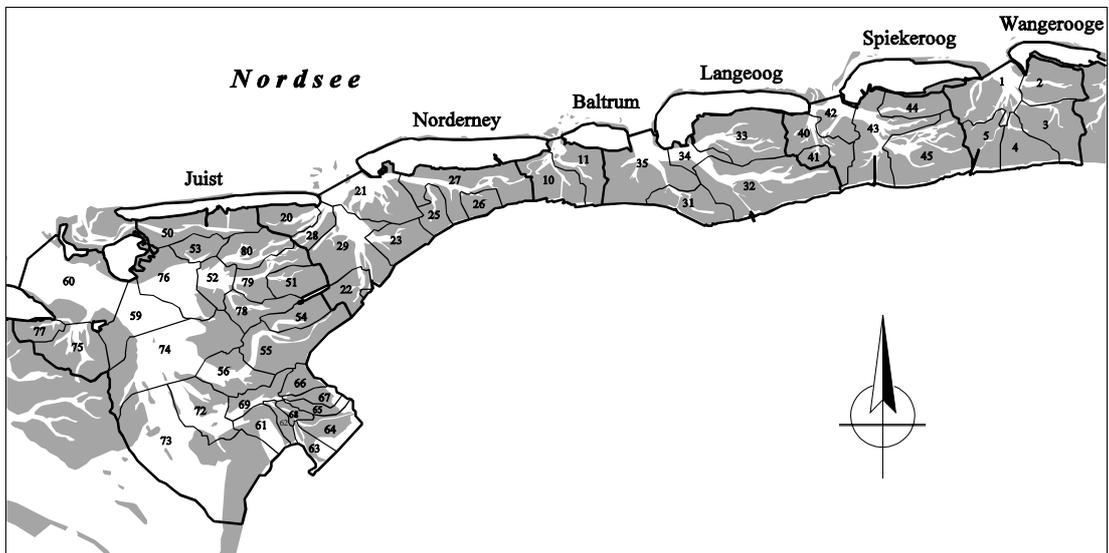


Abb. 2.2: Ostfriesisches Wattenmeer, Gebietseinteilung 1975 (siehe 9.4)

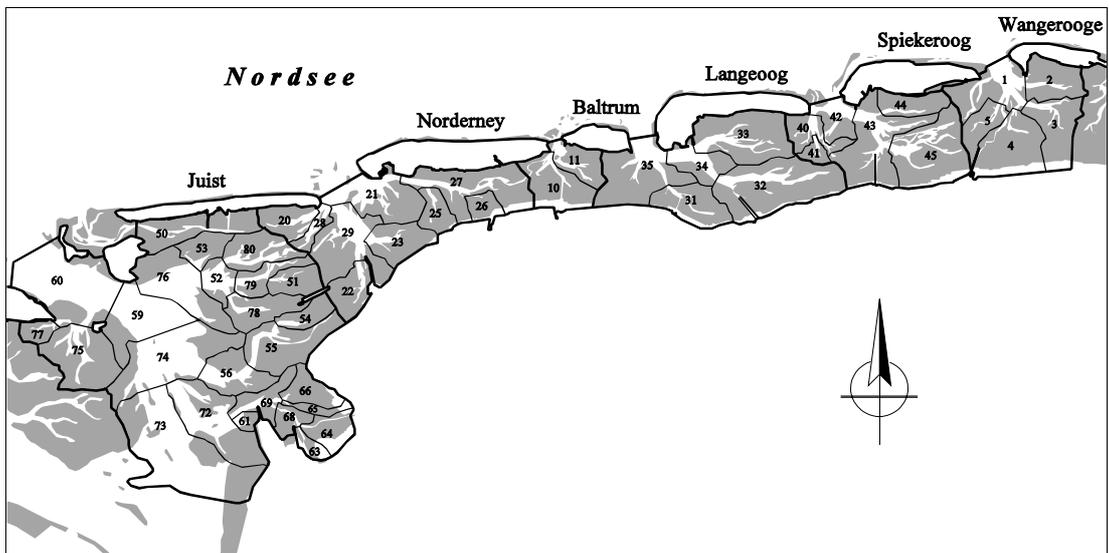


Abb. 2.3: Ostfriesisches Wattenmeer, Gebietseinteilung 1990 (siehe 9.4)

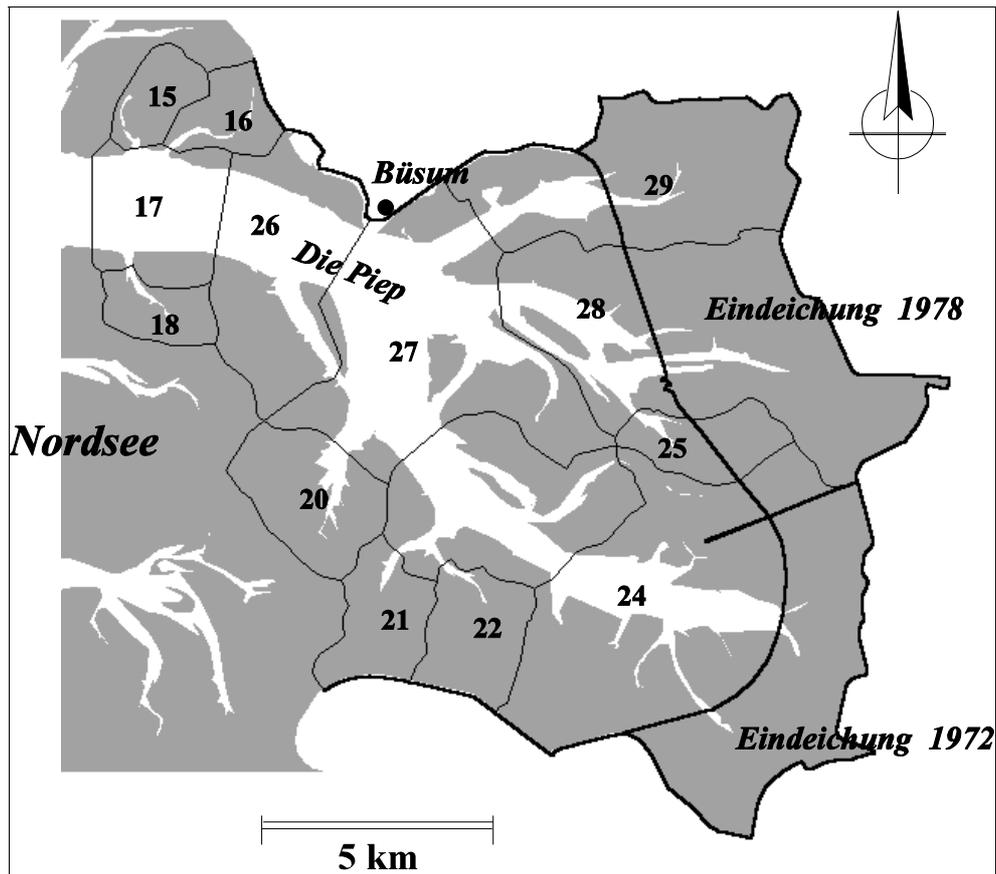


Abb. 2.4: Dithmarscher Bucht, Gebietseinteilung 1969 mit den Eindeichungen von 1972 und 1978

Den Seegaten seewärts vorgelagert befinden sich die Riffbögen oder Ebbdeltas. Sie liegen zwar außerhalb der eigentlichen Wateinzugsgebiete, sind aber als morphologische Formation in engem Zusammenhang mit der Entwicklung innerhalb eines Einzugsgebietes zu sehen. Im Übergang zum Festland bzw. den vorgelagerten Inseln bilden sich zum Teil Salzwiesen in einem geodätischen Höhenbereich aus, der während eines Jahres nur temporär überflutet wird.

In den Abbildungen 2.1 bis 2.3 ist jeweils das Untersuchungsgebiet Ostfriesisches Wattenmeer der Jahrgänge 1960, 1975 und 1990 (Abb. 2.1 bis 2.3) dargestellt. Es sind neben den Grenzen der zu einem Seegat zugehörigen Wateinzugsgebiet auch die Unterteilungen der Teileinzugsgebiete eingetragen. Teileinzugsgebiete sind Untergebiete der Hauptgebiete, die für sich wieder physiographisch geschlossene Einheiten bilden. Ihre hierarchische Struktur resultiert aus der dendrischen Struktur der sich verästelnden Priele. Die angegebenen Nummern bezeichnen die Haupt- und Teileinzugsgebiete (vergleiche Anhang 9.4).

2.2 Ostfriesisches Wattenmeer

2.2.1 Historisch-morphologische Entwicklung des Ostfriesischen Wattenmeeres

Das Untersuchungsgebiet Ostfriesisches Wattenmeer erstreckt sich an der Küste Niedersachsens von Borkum bis Wangerooge. Es ist durch eine Kette von 7 Barriere-Inseln (von West nach Ost: Borkum, Juist, Norderney, Baltrum, Langeoog, Spiekeroog und Wangerooge) gekennzeichnet, die sich in einem Abstand von 3 bis 10 km Entfernung vor dem Festland erstrecken und beinhaltet von Westen nach Osten die Einzugsgebiete von Osterems, Norderneyer Seegat, Wichter Ee, Accumer Ee, Otzumer Balje und Harle (Abb. 2.1 bis 2.3). Zwischen den Barriere-Inseln und dem Festland bildeten sich die Watten aus. Die Größe des Untersuchungsgebiet Ostfriesisches Wattenmeer beträgt rund 800 km². Die Größe der einzelnen Haupteinzugsgebiete variiert zwischen 23,1 km² (Wichter Ee) und 354,1 km² (Osterems).

Für detailliertere Untersuchungen wurde eine Gebietsdifferenzierung in Teileinzugsgebiete vorgenommen. Hierbei stellten sich in einigen Fällen Probleme bezüglich der Vergleichbarkeit von Daten aus unterschiedlichen Aufnahmejahren ein, wenn durch Verlagerung von Wattwasserscheiden Änderungen eintraten, die bezüglich der morphodynamischen Charakteristiken wesentlich waren. Insbesondere für das Einzugsgebiet der Osterems haben sich in der Nachbarschaft zum Emsästuar in einigen Teileinzugsgebieten solche Veränderungen eingestellt sowie im Bereich der Leybucht, die bei Analysen teilweise besondere Beachtung erforderten.

Die Landschaftsform mit Barriere-Inseln ist erst im Verlauf der letzten 7500 Jahre im freien Kräftespiel von sedimentierenden Strömungen, anbrandenden Wellen und Windumlagerungen entstanden. Ausgangspunkt dafür war das nach der Weichsel-Eiszeit infolge des abschmelzenden Inlandeises beginnende Ansteigen und zwischenzeitliche Absinken des Nordseespiegels. Dabei haben die Barriere-Inseln die Entwicklungsstadien periodisch überfluteter Platen und teilweise hochwasserfreier Strandwälle durchlaufen (BARCKHAUSEN 1969). Vor rund 2000 Jahren wurden sie zu dünentragenden Inseln. Diese wandeln ständig ihre Lage und Form (LÜDERS 1953). Kurz nach der Zeitenwende begannen die Küstenbewohner damit, Warften aufzuschütten, um die Wohnplätze höher zu legen und so vor Überflutungen zu schützen.

Mit dem Deichbau setzte im 12. Jahrhundert eine neue Entwicklungsphase ein. Kleinere Gebiete wurden mit Ringdeichen umschlossen und schrittweise mit anderen eingedeichten Gebieten verbunden, bis im 13. Jahrhundert ein zusammenhängender Seedeich vollendet war, der nachfolgend sukzessive seewärts ausgebaut wurde. Nach erheblichen Landverlusten infolge von Sturmfluten im Mittelalter wurden ab dem 15. Jahrhundert große Gebiete durch systematische Eindeichungen wieder zurückgewonnen (HOMEIER 1962, 1969; STREIF 1990).

Die Neigung der ostfriesischen Inseln zur Ostverlagerung läßt sich ursächlich auf Gestaltungsvorgänge in den Seegaten zurückführen, wie von LUCK (1975) am Beispiel des Norderneyer Seegats und der Harle belegt wurde. Die Inseln können sich allerdings um maximal 5 bis 6 km verlagert haben, meist um weniger als 3 km, wie Untersuchungen von STREIF (1990) aufzeigen.

Im 19. Jahrhundert begann man mit der Vertiefung der Fahrrinnen zu den Häfen und mit der Errichtung massiver Küstenschutz- und Strombauwerke. So wurde z.B. im Jahre 1857 damit begonnen, den Westkopf der Insel Norderney zu befestigen (KRÜGER 1911). Hierdurch ist ein Zustand festgelegt, der bei weiterhin freier Entwicklung nur vorübergehend in Erscheinung getreten wäre (LUCK 1975, KUNZ 1987) und nur durch künstliche Strandauffüllungen aufrecht erhalten wird (EITNER 1993).

2.2.2 Hydrographisch-morphologische Charakteristik des Ostfriesischen Wattenmeeres

Charakteristisch für das Gebiet des Ostfriesischen Wattenmeeres ist die Kette seewärts vorgelagerter Barriere-Inseln, die vom Festland durch Watten wechselnder Ausdehnung getrennt sind. Die Füllung und Entleerung dieser Gebiete erfolgt im Tiderhythmus durch die Seegaten mit schmalen, tiefen Rinnen über ein weitverzweigtes System von Baljen und Prielen. Seewärts sind die Seegaten von Ebbdeltas in Form von Riffbögen begrenzt. Landwärts verzweigen sich die Seegaten in eine Anzahl von Stromrinnen, die durch Watthöhenscheiden getrennt werden. Die Seegaten bilden die Verbindung zwischen dem Ebbdelta und dem Wattenmeer, das in deren Nähe noch stark in Rinnen und amphibische Bereiche gegliedert ist. Mit wachsender Entfernung vom Seegat werden die amphibischen Bereiche zunehmend

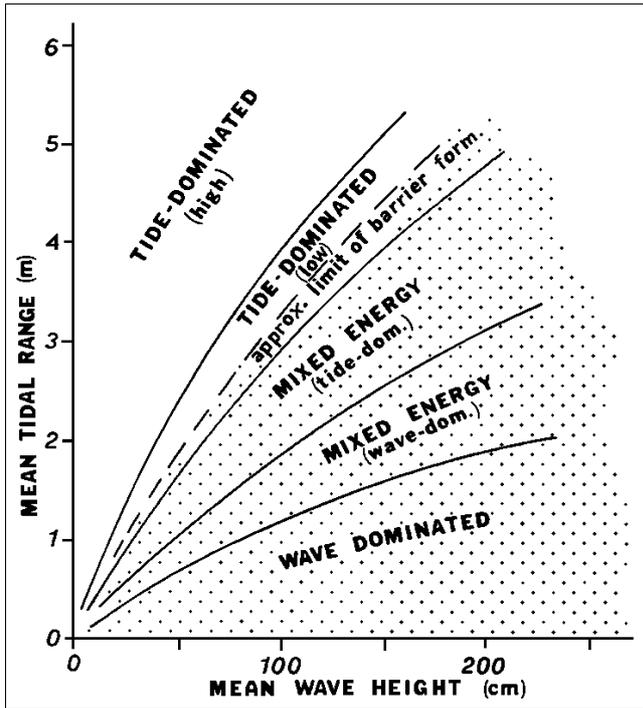


Abb. 2.5: Hydrodynamische Klassifikation von Küstenabschnitten (HAYES 1979)

großflächiger und höher als in Nähe des Seegats bis hin zur Ausbildung von Verlandungsbereichen als Übergang zu Hellern oder Salzwiesen (NIEMEYER 1983).

Die Küste wird von halbtägigen Tiden, starken Westwinden und einer Küstenlängsströmung von West nach Ost beeinflusst. Nipp- und Springtiden modulieren den Tidehub um bis zu $\pm 0,7$ m. Der Bereich des mittleren Tidehubs liegt derzeit mit einer von Westen nach Osten steigenden Tendenz im Untersuchungsgebiet Ost-

friesisches Wattenmeer im Bereich der Seegaten etwa zwischen 2,4 und 2,8 m. Die Jahresmittel der signifikanten Wellenhöhen liegen im Seegebiet der Ostfriesischen Inseln und Küste zwischen 0,7 und 1,0 m (NIEMEYER 1992). Nach der hydrodyna-

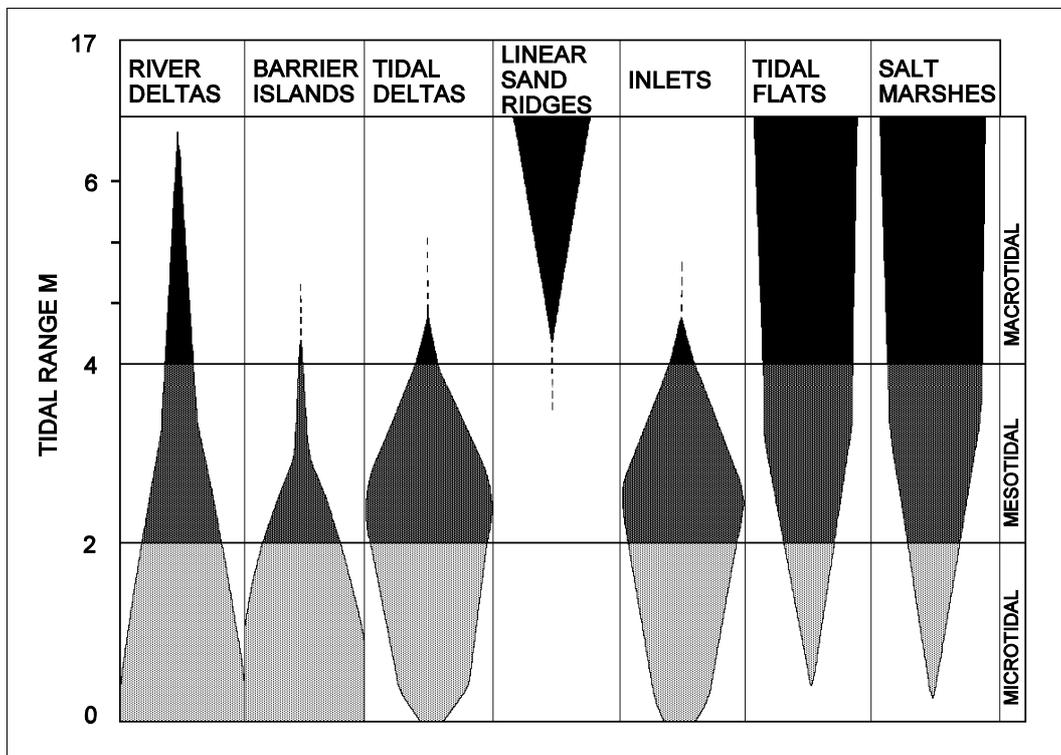


Abb. 2.6: Einfluß des Tidehubs auf die Morphologie von Küstenabschnitten (HAYES 1975)

mischen Klassifikation von HAYES (1975, 1979, Abb. 2.5 & 2.6) ist das Ostfriesische Wattenmeer als tide- und seegangsgeprägt mit überwiegender Tidewirkung einzuordnen (NIEMEYER 1992).

2.3 Dithmarscher Bucht

2.3.1 Historisch-morphologische Entwicklung der Dithmarscher Bucht

Das Untersuchungsgebiet Dithmarscher Bucht liegt an der Westküste Schleswig-Holsteins oberhalb des Elbeästuars und hat eine Fläche von etwa 200 km². Im Gegensatz zum Untersuchungsgebiet des Ostfriesischen Wattenmeeres ist das buchtartige Gebiet zur See hin offen, d.h. es besitzt keine vorgelagerten Inseln. Dennoch muß davon ausgegangen werden, daß die Inseln Blauort und Trischen die morphodynamische Funktion von Barriere-Inseln haben. Die buchtartige Form entstand während der letzten Jahrhunderte als Folge natürlicher Entwicklungen, die durch anthropogene Einwirkungen unterstützt wurden (WIELAND 1984). Etwa $\frac{3}{4}$ der Begrenzung wird durch die Küstenlinie gebildet und nahezu auf ihrer gesamten Breite ist sie zur See hin offen. Der Hauptpriel "Die Piep", der sich im Inneren der Bucht in die Priele Wöhrdener Loch, Kronenloch, Sommerkoog-Steertloch und Neue-Schell-Legde aufteilt, schmiegt sich an den nördlichen Rand des Untersuchungsgebietes an. Für die Dithmarscher Bucht waren stärkere Veränderungen im Zuschnitt der Teileinzugsgebiete zwangsläufig nach den Teileindeichungen von 1972 und 1978 zu berücksichtigen, woraus sich aber keine spezifischen Probleme bei der statistischen Analyse oder der konzeptionellen Modellierung ergaben (Abb. 2.4).

Kennzeichnend für das Gebiet der Dithmarscher Bucht ist das Vordringen des Meeres bis zum heutigen Geestrand vor schon 5000 Jahren. Erst die Ablagerung mariner Sedimente bewirkte damals die Bildung und das langsame seewärts gerichtete Wachstum eines Marsch- und Wattsauemes vor dieser Küste. Dieser Prozeß hat bis zur Gegenwart angehalten (BANTELMANN 1966).

Das Gebiet des Dithmarscher Küstenraumes ist gekennzeichnet durch eine pleistozäne Moränenwelle der Saale-Eiszeit auf der Linie Heide - Meldorf - Burg, einer westlich davor gelegenen, bis zu 10 km breiten Marsch von rund 20 m Stärke als mariner

Ablagerungsraum und einem bis etwa 25 km aus der Bucht herausragendem Wattenmeergebiet, gegliedert durch Priele und Außensände. Vor etwa 2000 Jahren begann die anthropogene Beeinflussung der Küstenregion, welche einerseits durch die Kultivierung des Landes, aber auch durch den Torfabbau und die daraus resultierende Erniedrigung der Landoberfläche und schließlich durch den Deichbau die weitere Entwicklung mitbestimmte (BANTELMANN 1966). Trotz des steigenden Meeresspiegels und verheerender Sturmflutkatastrophen verlief die Landentwicklung in den letzten 2000 Jahren insgesamt positiv, wenn man davon absieht, daß die Insel Büsum weitgehend vom Meer abgetragen wurde. Seit dem Beginn des Deichbaus im 14. Jahrhundert wurden bis 1970 im Inneren der Dithmarscher Bucht etwa 30 km² Marschland gewonnen. In den Jahren 1970 bis 1978 ist durch den Bau eines neuen, rund 15 km langen Seedeiches in 2 bis 4 km Entfernung von der alten Küstenlinie der 48 km² große "Speicherkoog Dithmarschen" geschaffen worden (WIELAND et al. 1987).

2.3.2 Hydrographisch-morphologische Charakteristik der Dithmarscher Bucht

Das Untersuchungsgebiet 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 Barriere-Inseln. Der "Tertiussand" ist als Ebbdelta der Piep anzusehen. Seine von den Ebbdeltas der ostfriesischen Küste abweichende Form ergibt sich vermutlich daraus, daß hier die Richtung der Tidedrömung und des im Mittel maßgebenden Seegangs in etwa übereinstimmen. 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 Neue-Schell-Legde auf.

In der Dithmarscher Bucht beträgt der mittlere Tidehub gegenwärtig etwa 3,3 m. Die Jahresmittel der signifikanten Wellenhöhen werden für das Vorfeld der Dithmarscher Bucht nach NUMMEDAL & FISCHER (1978) auf 1,1 m geschätzt. Die Dithmarscher Bucht ist nach der hydrodynamischen Klassifikation von HAYES (1975, 1979) als schwach tidedominierter Bereich einzustufen (Abb. 2.5).

3. DOKUMENTATION

3.1 Allgemeines

Eine ausführliche Dokumentation der im Rahmen des Forschungsvorhabens "Wadden Sea morphological development" (WADE) erstellten Datenbank über das Ostfriesische Wattenmeer und die Dithmarscher Bucht ist in SCHROEDER & GOLDENBOGEN (1995) enthalten.

Die nachfolgende Dokumentation gliedert sich in drei Abschnitte. Der erste Abschnitt behandelt die Datenerhebung und Archivierung als Grundlage der GIS-Datenbank unter ArcInfo®. Im zweiten Abschnitt wird die Archivierung der aus den GIS-Daten resultierenden Parameter erläutert (Paradox-Datenbank). Der dritte Abschnitt beinhaltet eine zusammenfassende Dokumentation über die unter Kapitel 6 behandelten empirisch-konzeptionellen Modelle.

Die Erstellung der Datensätze für Analysen und Modellierungen erfolgten 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 Grundlage der Datenbank bilden topographische Wattkarten verschiedener Jahrgänge im Zeitraum zwischen 1650 und 1990 mit zum Teil unterschiedlicher Auflösung (siehe Abschnitt 3.2) des Ostfriesischen Wattenmeeres und der Dithmarscher Bucht. Diese sind auf NN oder Gezeitengrundwerte bezogen. Eigens für bestimmte Bezugshorizonte (MThw, MTnw, NN) berechnete Parameter sind in einer gesonderten Datenbank (Paradox) zusammengefaßt (siehe Abschnitt 3.3.2).

Für die Datenverwaltung und -analyse hat sich die Anwendung eines geographischen Informationssystems (GIS) (LIEBIG 1993) als außerordentlich effizient gezeigt. Aus den in das GIS ArcInfo® übertragenen digitalisierten Werte in Form von Datentripel (x-, y- und z-Koordinaten) wurde ein dreidimensionales Abbild der Morphologie erstellt.

Mittels Macros (*.aml-Prozeduren) wurden hieraus geometrische Größen (Schnittflächen und Volumen) berechnet und listenartig in ASCII-Dateien abgelegt (siehe Abschnitt 3.3.1).

3.2 GIS-Datenbank

Die Bearbeitung und Aufbereitung der topographischen Wattkarten erfolgte unter Anwendung des Geographischen Informationssystems (GIS) ArcInfo®, Version 6.1.1 (inklusive TIN- und GRID-Modul), das auf einer DEC-Alpha 5000/400 unter dem Betriebssystem unix implementiert war.

3.2.1 Datenerfassung

Die Digitalisierung der Karten der Vermessungsjahrgänge vor 1990 erfolgte ursprünglich mit dem Digitalisierer benson® 6301, wobei die einzelnen Tiefenlinien aufgenommen und mit einer Tiefenkennung versehen abgespeichert wurden. Die dabei erzeugten Dateien wurden visuell überprüft und in das Eingabeformat von ArcInfo® umgewandelt. Nach Inbetriebnahme des Digitalisierers Summagraphics® Summagrid IV wurde direkt über das ArcInfo®-Modul ADS digitalisiert. Die Karten der Synopse 1990, die von der Wasser- und Schifffahrtsdirektion Nordwest Aurich (WSD NW) mit dem Konturlinienberechnungsprogramm TASH der Universität Hannover erstellt worden sind, wurden in Form von ASCII-Dateien übernommen und in das Eingabeformat von ArcInfo® umgewandelt.

Die x- und y-Koordinaten des Ostfriesischen Wattenmeeres beziehen sich auf das Gauß-Krüger-System mit dem Bezugsmeridian 6° westlicher Breite des zweiten Streifens. Daten aus dem dritten Bezugsstreifen (Bezugsmeridian 9° westlicher Breite) wurden auf den zweiten Streifen transformiert, wobei in beiden Streifen vermessene Festpunkte als Referenzpunkte dienten. Die Daten der Dithmarscher Bucht beziehen sich auf den dritten Streifen.

Digitalisierte Teilkarten wurden zu den Gesamtkarten Ostfriesisches Wattenmeer und Dithmarscher Bucht der jeweiligen Synopse nach morphologisch sinnvollen Kriterien zusammengefügt. Die Karten der Synopse 1990 konnten zum Teil durch neuere

Vermessungen ergänzt werden, welche zum Zeitpunkt ihrer Erstellung der WSD NW noch nicht vorlagen. Anschließend wurde die Unterteilung der einzelnen Watteinzugsgebiete in Teileinzugsgebiete vorgenommen, welche von Watthöhenscheiden, Uferlinien und Durchflußquerschnitten begrenzt werden. Die Grenzen dieser Watteinzugs- und -teileinzugsgebiete wurden als starr, also unabhängig vom Wasserstand angenommen. Hieraus ergibt sich eine hierarchische Struktur der Watteinzugs- und -teileinzugsgebiete.

Die bislang bearbeiteten Wattkarten sowohl für das Ostfriesische Wattenmeer als auch die Dithmarscher Bucht sind im Anhang 1 aufgelistet. In Anhang 2 bis 7 sind die Übersichten der Blattsnitte der Wattgrundkarten und Küstenkarten dargestellt. Weiterhin enthalten Anhang 8 (Ostfriesisches Wattenmeer) und Anhang 9 (Dithmarscher Bucht) eine tabellarische Übersicht der für die einzelnen Vermessungsjahrgänge ausgewerteten Watteinzugs- und -teileinzugsgebiete.

3.2.2 Berechnungsprozeduren (AML's)

Die AML's stellen GIS-spezifische Programme dar, die zur Aufbereitung und Bearbeitung der digitalisierten Daten erforderlich sind. Diese "Macros" ermöglichen die Anpassung des GIS für spezielle Anforderungen, die sich aus der Anwendung im Küsteningenieurwesen ergeben. Detailliert wird hierauf in SCHROEDER & GOLDENBOGEN (1995) und GOLDENBOGEN (1995b) eingegangen.

3.3 Parameter-Datenbank

3.3.1 Parameterarchivierung

Die Daten wurden getrennt nach Untersuchungsgebieten Ostfriesisches Wattenmeer und Dithmarscher Bucht für Watteinzugs- und -teileinzugsgebiete berechnet und in einzelnen Dateien abgelegt. Die Tabellen 8 und 9 (Anhang) enthalten die den Gebietsnummern zugeordneten Gebietsnamen; die Namen der Haupteinzugsgebiete wurden fett gedruckt (Kartenübersicht vergleiche Kapitel 2).

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. Die diesen Auswertungen zugrunde liegenden Wattkarten basieren auf Vermessungen, die sich über einen längeren Zeitraum vor und zum Teil auch nach dem Untersuchungsjahrgang erstrecken. Darüber hinaus wurde das Kartenwerk "Historische Karten der FSK" der Jahrgänge 1650, 1750 und 1860 sowie einzelne Einzugsgebiete verschiedener Jahrgänge ausgewertet (Tabelle 8 und Tabelle 9, siehe Anhang).

Für alle diese Datensätze sind mit Hilfe des GIS folgende Parametrisierungen vorgenommen worden:

- V_T Das Tidevolumen wurde in den vorliegenden Untersuchungen als Wasservolumen der Hohlform eines Einzugsgebietes zwischen den horizontalen Ebenen MTnw und MThw angenommen.
- A_b Die Einzugsgebietsfläche ist die gesamte bei MThw benetzte Fläche.
- A_c Der Durchflußquerschnitt ist als lotrechte Schnittfläche normal zum Verlauf der Tiefenlinien definiert; er liegt im Bereich der stärksten Einschnürung der seewärtigen Grenze eines Einzugsgebietes.
- A_i Die Wattfläche ergibt sich aus der Differenz der bei MThw und der bei MTnw benetzten Fläche des Einzugsgebietes.

- I_i Der Wathöhenkennwert ist die auf NN bezogene Höhenlage, bei der 50 % der Wattfläche A_i überflutet bzw. 50 % trockengefallen sind.

- V_b Das Beckenvolumen ist das Wasservolumen eines Einzugsgebietes unterhalb eines angegebenen Bezugshorizontes.

- V_i Das Sedimentvolumen eines Einzugsgebietes ergibt sich innerhalb der bei MThw benetzten Fläche aus dem Volumen des Bodenkörpers zwischen MTnw und Mthw.

- V_o Das Ebbdeltavolumen wird als Differenz aus der wirklichen und einer idealisierten Morphologie bestimmt, wobei sich die idealisierte Morphologie aus der Verbindung der Tiefenlinien nicht beeinflusster, dem Seegat benachbarter Strandabschnitte ergibt.

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 Wateinzugs- und -teileinzugsgebieten für verschiedene Zeiträume vor und bilden somit eine identische Grundlage für statistische Analysen.

3.3.2 Paradox-Datenbank

Die Paradox-Datenbank beinhaltet berechnete Parameter auf der Basis der GIS-Datenbank für das Ostfriesische Wattenmeer und die Dithmarscher Bucht. Die ausge-

werteten Jahrgänge umfassen für das Ostfriesische Wattenmeer die Jahre 1960, 1975, 1990 und für die Dithmarscher Bucht 1942, 1956, 1969, 1973, 1976, 1979, 1982, 1985 und 1990. Anlage 9.5 enthält die Wasserstandsdaten der zugrundeliegenden Bezugshorizonte. Im einzelnen enthält die Datenbank Werte der im vorigen Abschnitt aufgezählten Parameter:

Die Parameter V_i und V_T stellen jeweils das Volumen zwischen MThw und MTnw dar. Das Volumen V_o des Ebbdeltas wird unabhängig von den Bezugshorizonten ermittelt. Der Parameter l_i beschreibt eine charakteristische Höhe zwischen MThw und MTnw. Hieraus folgt für die Parameter V_i , V_o , V_T und l_i , daß sie keinem Tidewasserstand in der Datenbank zugeordnet worden sind. Neben den Bezugshorizonten wurden die Einzugsgebietsnummern (Tabelle 1 und 2 der Datenbank), ein Kennbuchstabe, welcher das Untersuchungsgebiet bezeichnet (o = Ostfriesisches Wattenmeer, d = Dithmarscher Bucht, l = Leybucht), sowie der Jahrgang aufgenommen. Diese Angaben dienen als Schlüssel zur Identifikation einzelner Werte.

4. HYDRODYNAMISCH-MORPHOLOGISCHE GLEICHGEWICHTSZUSTÄNDE

4.1 Allgemeines

In der Literatur sind hydrodynamisch-morphologische Gleichgewichtszustände in vielfältiger Form beschrieben worden (O'BRIEN 1931, 1967; WALTHER 1934, 1972; RODLOFF 1970; WALTON & 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 und mathematisch 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 & 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).

4.2 Definitionen

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:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Die Gleichungen beinhalten folgende Zusammenhänge: Die Mündungsquerschnitte des Hauptfluters stehen in einer engen funktionalen Abhängigkeit von der Größe der Gesamtfläche des Wateinzugs- oder -teileinzugsgebietes, von dessen Volumen und dessen Gezeitenfläche (Gln. 1, 2, 4), die dann zwangsläufig auch eng miteinander korrelieren (Gln. 3, 5, 8). Die Gleichungen 1 und 2 gehen bereits auf O'BRIEN (1931, 1967) und WALTHER (1934, 1972) zurück; die weiteren Kombinationen sind folgerichtige Erweiterungen, bei denen eine größere Parameter Vielfalt einbezogen 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 & ADAMS (1976) für die Küsten der USA und von EYSINK & BIEGEL (1992) für das Westfriesische Wattenmeer

dargestellt worden, wobei WALTON & ADAMS (1976) eine weitergehende Differenzierung nach der Exponiertheit zum Seegang vornahmen.

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 zusammenfassend in mehreren Berichten bzw. Veröffentlichungen dargestellt worden (GOLDENBOGEN et al. 1994, NIEMEYER 1994, NIEMEYER et al. 1995). Die methodisch gesondert erfolgte Aufarbeitung des historischen Kartenmaterials wurde von NIEMEYER (1993) veröffentlicht. Zu Einzelaspekten sind zudem gesonderte Beiträge verfaßt worden (SCHROEDER 1994; GOLDENBOGEN et al. 1996; SCHROEDER et al. 1994, 1995, 1996a, 1996b).

4.3 Parametrisierungen

4.3.1 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. 4.1 & 4.2). Allerdings zeigen sich bezüglich des Koeffizienten sowohl zwischen den hier untersuchten Bereichen Ostfriesisches Wattenmeer und Dithmarscher Bucht, als auch im Vergleich zur Formulierung von O'BRIEN (1931, 1967) graduelle Unterschiede. 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 Bezugs-

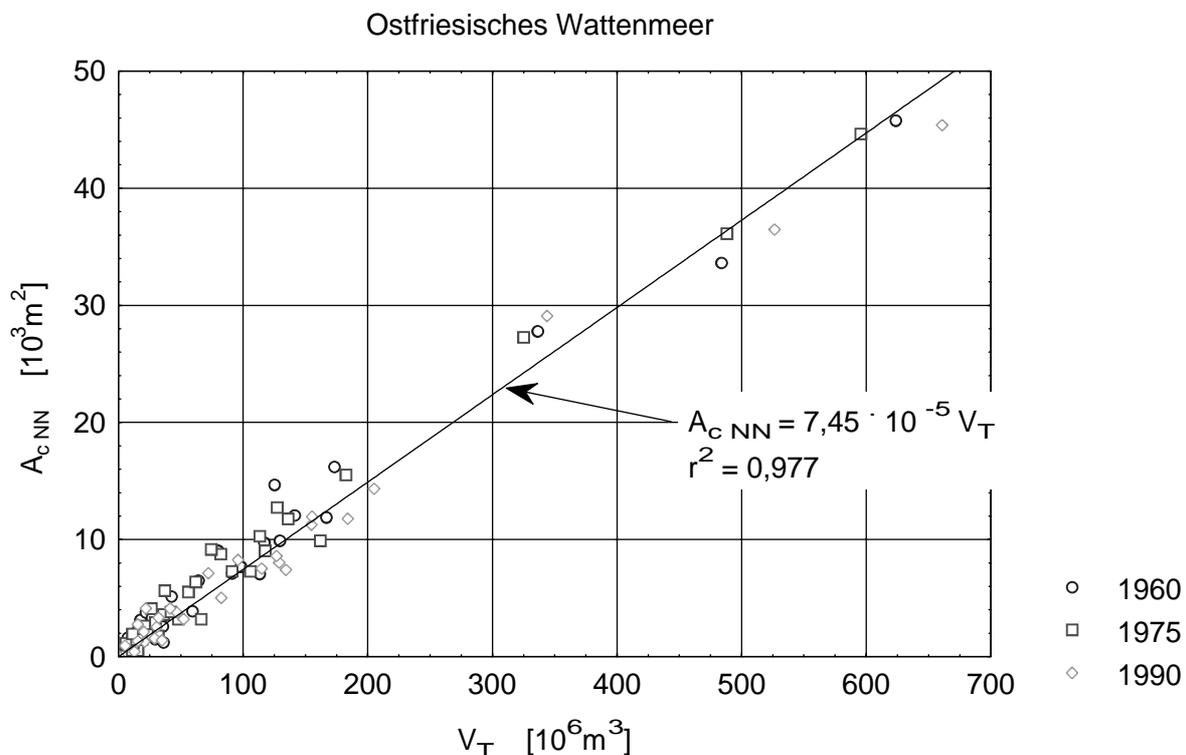


Abb. 4.1: Mündungsquerschnitt der Hauptrinne als Funktion des Tidevolumens des Einzugsgebietes (Ostfriesisches Wattenmeer)

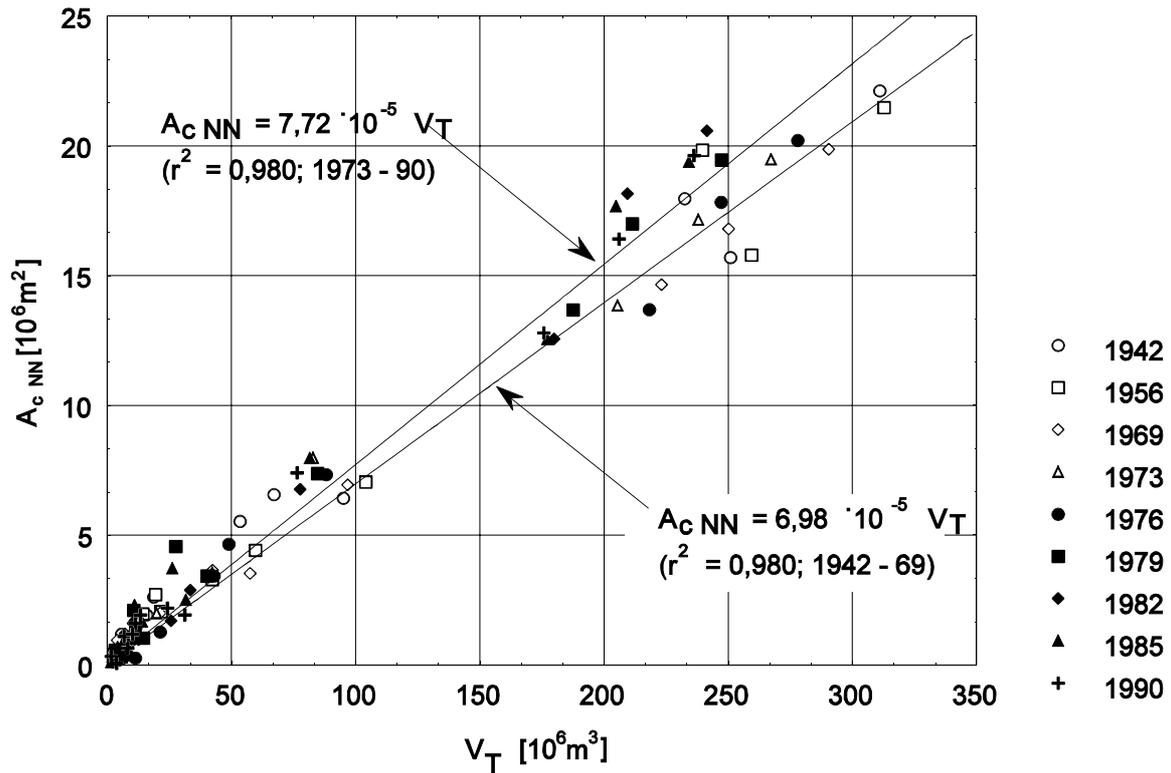


Abb. 4.2: Mündungsquerschnitt der Hauptrinne als Funktion des Tidevolumens des Einzugsgebietes (Dithmarscher Bucht); Anpassungsfunktionen für die Zeiträume vor und nach Beginn der Vordeichungen

horizonten 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. 4.2). 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 Rinnenquerschnitten zu rechnen ist.

4.3.2 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 verwendeten Datensätze für das Ostfriesische Wattenmeer zeigen ebenfalls einen räumlich und zeitlich stabilen funktionalen Zusammenhang von statistisch hoher Qualität (Abb. 4.3). In Ergänzung zu den Untersuchungen von WALTHER (1972) und EYSINK (1979, 1991) konnte hier auch der Nachweis für die Teileinzugsgebiete geführt werden.

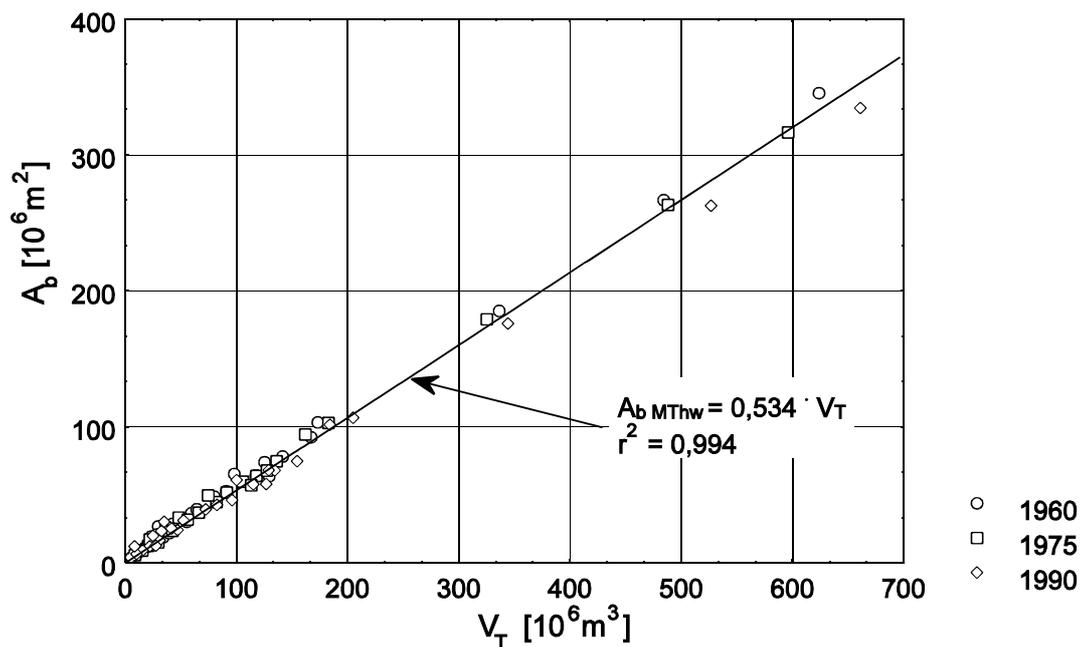


Abb. 4.3: Einzugsgebietsflächen in Abhängigkeit ihres Tidevolumens (Ostfriesisches Wattenmeer)

Die Daten der Dithmarscher Bucht lassen dagegen deutlich die Störungen des morphodynamischen Gleichgewichts erkennen (Abb. 4.4). 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

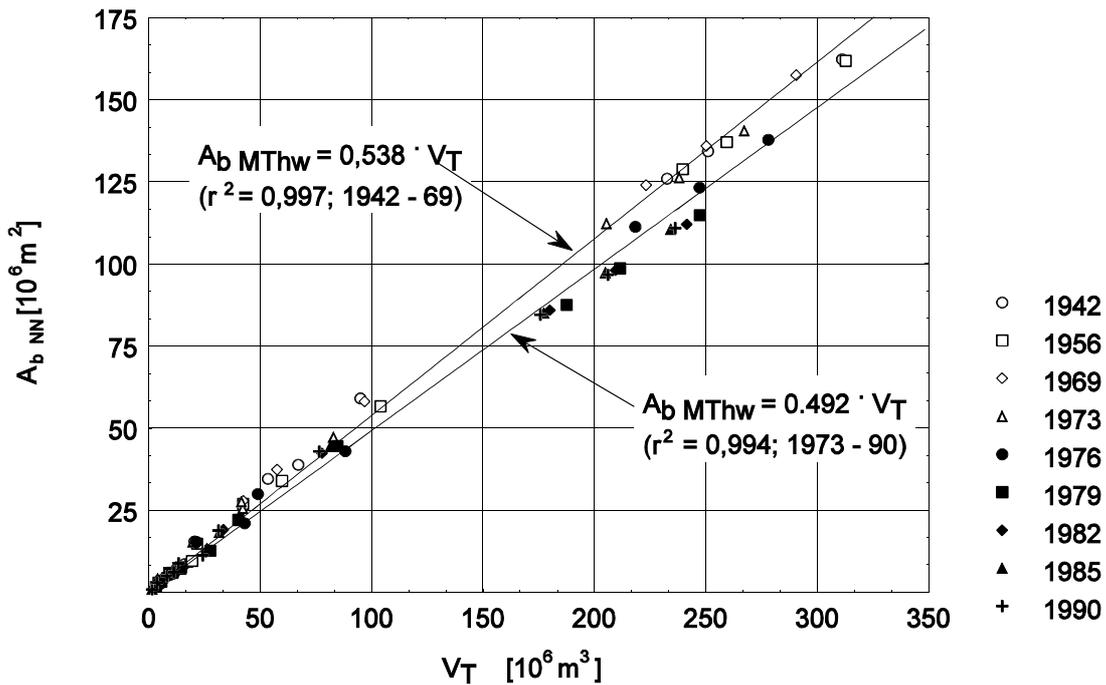


Abb. 4.4: Einzugsgebiete und Tidevolumen (Dithmarscher Bucht); Anpassungsfunktionen für die Zeiträume vor und nach Beginn der Vordeichungen

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, 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).

4.3.3 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. 4.3) fortpflanzen (Abb. 4.5). 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. 4.6). 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. 4.7). 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.

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 wird 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. 4.6 & 4.7). Folgerichtig besteht ebenfalls ein enger statistischer Zusammenhang zwischen Gezeitenflächen und Tidevolumen, was hier für die Wattenzugs- und -teileinzugsgebiete des Ostfriesischen Wattenmeeres exemplarisch dargestellt wird (Abb. 4.8).

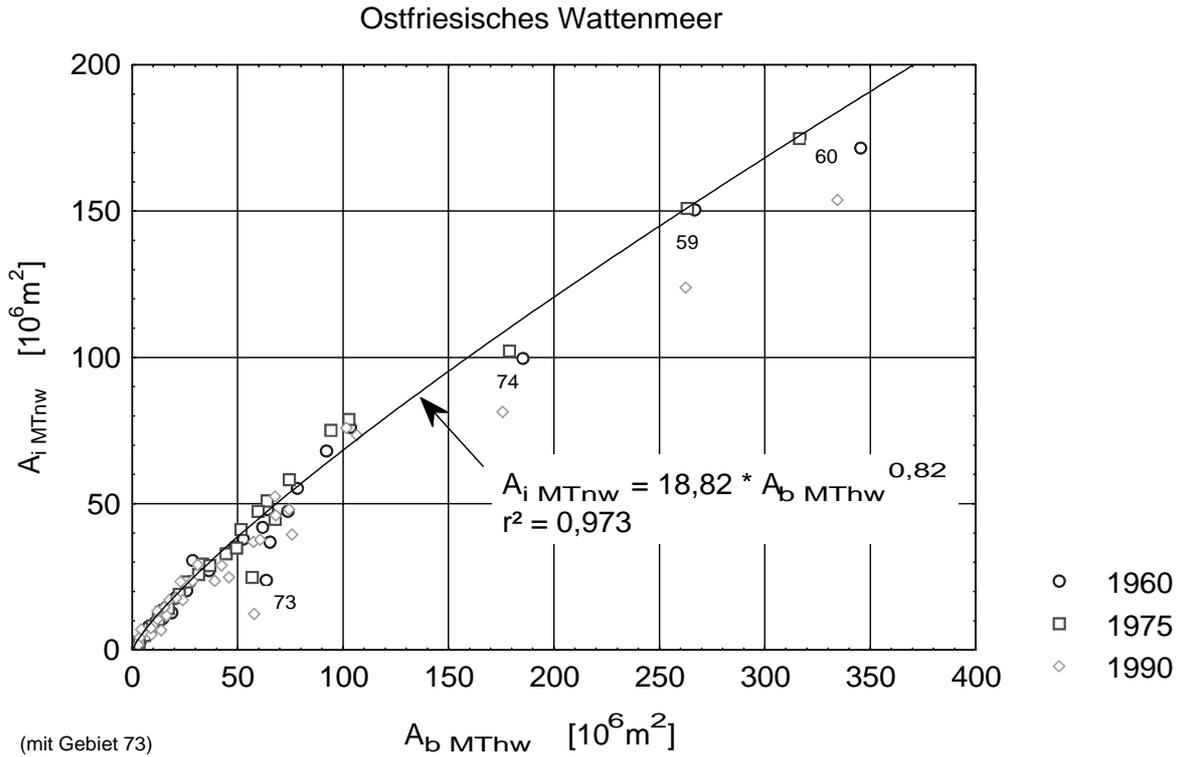


Abb. 4.5: Gezeitenflächen in Abhängigkeit von Einzugsgebietsflächen (Ostfriesisches Wattenmeer); Anpassungsfunktion für die Datensätze ohne Einbeziehung des TEG 73

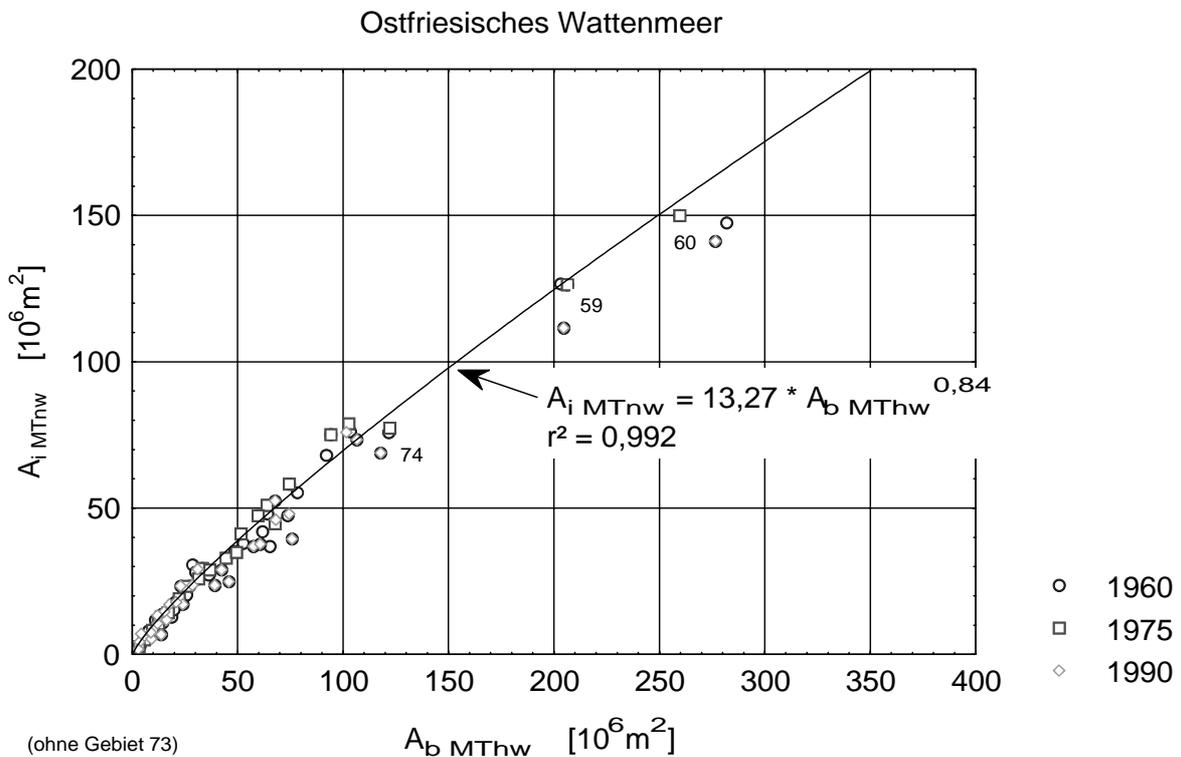


Abb. 4.6: Gezeitenflächen in Abhängigkeit von Einzugsgebietsflächen (Ostfriesisches Wattenmeer)

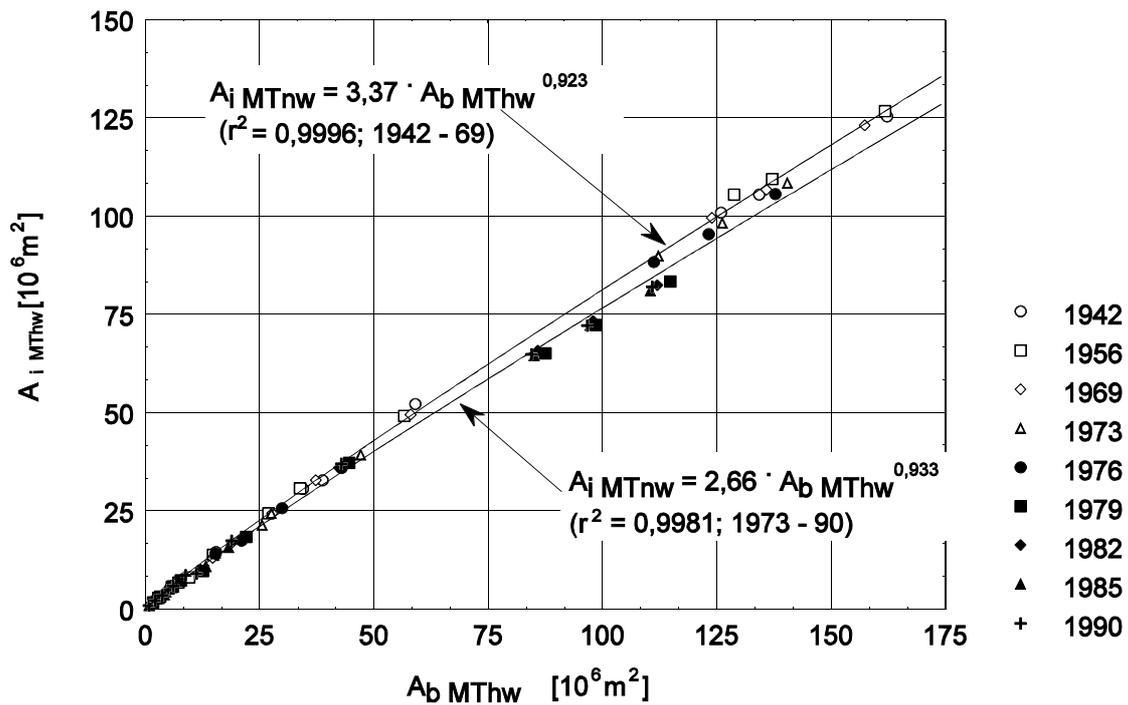


Abb. 4.7: Gezeitenflächen in Abhängigkeit von den Einzugsgebietsflächen (Dithmarscher Bucht); Anpassungsfunktionen für die Zeiträume vor und nach Beginn der Vordeichungen

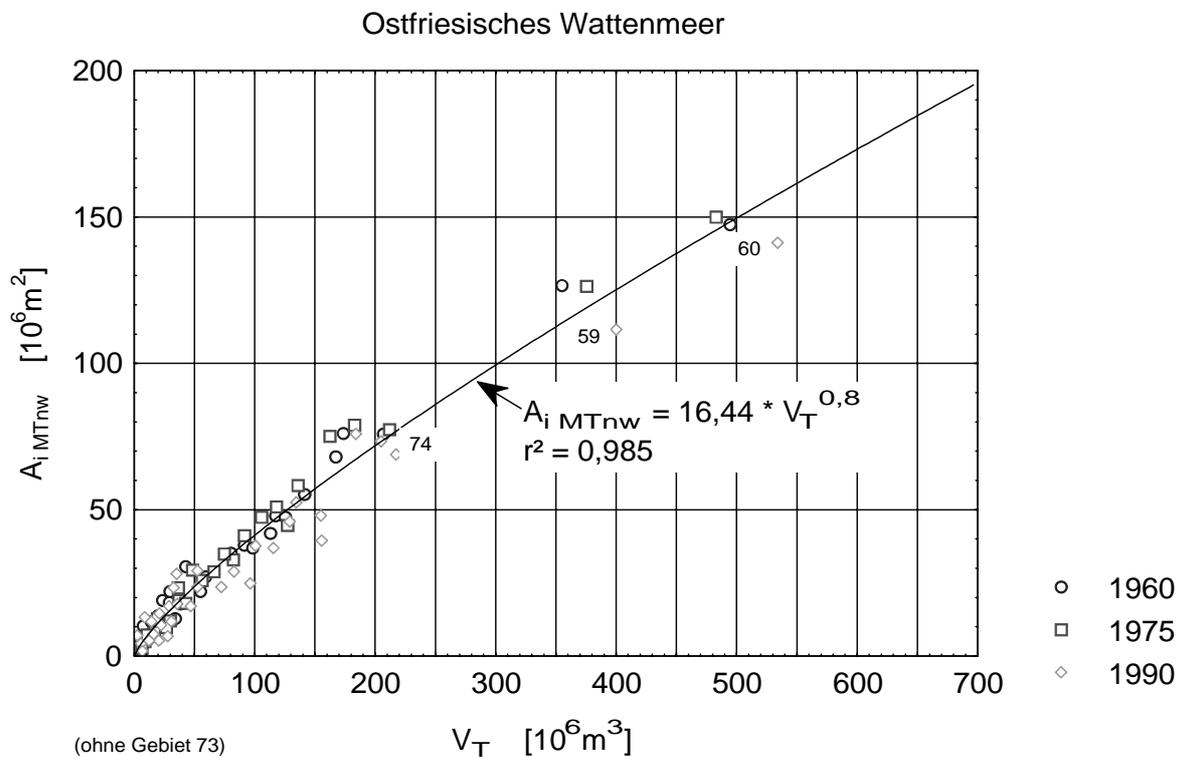


Abb. 4.8: Gezeitenflächen in Abhängigkeit vom Tidevolumen der Einzugsgebiete (Ostfriesisches Wattenmeer ohne TEG 73)

4.3.4 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. Das Tidevolumen kann als an beide Parameter gekoppelte

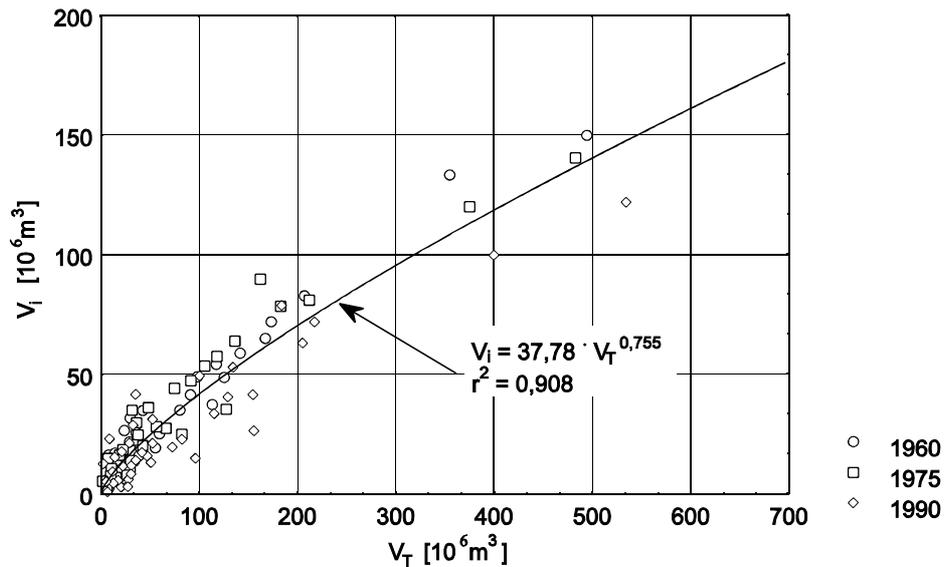


Abb. 4.9: Sedimentvolumen des Gezeitenbereichs als Funktion des Tidevolumens (Ostfriesisches Wattenmeer ohne TEG 73)

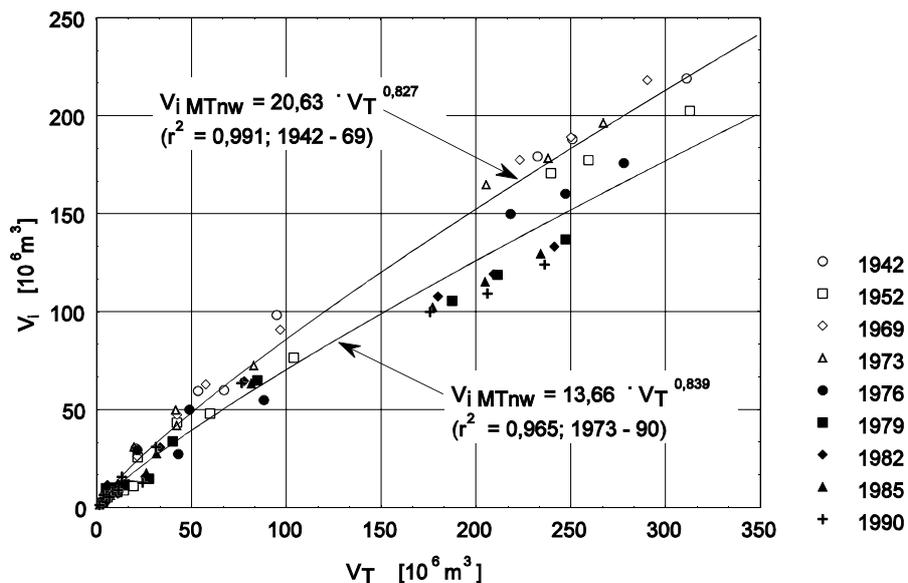


Abb. 4.10: Sedimentvolumen des Gezeitenbereiches als Funktion des Tidevolumens (Dithmarscher Bucht); Anpassungsfunktionen für die Zeiträume vor und nach den Eindeichungen

Größe angesehen werden. Regressionsanalysen für die Datensätze des Ostfriesischen Wattenmeeres ergaben ohne das Teileinzugsgebiet 73 einen eindeutigen tendenziellen Zusammenhang, der allerdings durch starke Streuungen gekennzeichnet ist (Abb. 4.9). Für die Dithmarscher Bucht zeigt sich vor den Teileindeichungen ein engerer Zusammenhang (Abb. 4.10) 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. 4.4).

4.3.5 Untersuchung der Ebbdeltas

Ebbdeltas sind ein wichtiges Element der Struktur eines Seegats und des zugehörigen Wateinzugsgebietes; ihre Entwicklung ist von grundlegendem Interesse für die Stabilität des gesamten Systems. Ihr Volumen V_o kann definiert werden als das Sedimentvolumen vor dem Seegat, welches in den seewärtigen Barren akkumuliert ist (Abb. 4.11, DEAN & WALTON 1975).

WALTON & ADAMS (1976) stellten den Zusammenhang zwischen dem Ebbdeltavolumen V_o und dem mittleren Tidevolumen V_T bzw. dem Seegat-Querschnitt A_c funktional dar. Sie unterteilten die untersuchten Seegat-Einzugsgebiete entlang der US-amerikanischen Küste in drei Klassen in Abhängigkeit vom Gefälle der Brandungszone und der Seegangintensität. Die Daten streuen insbesondere für moderat exponierte

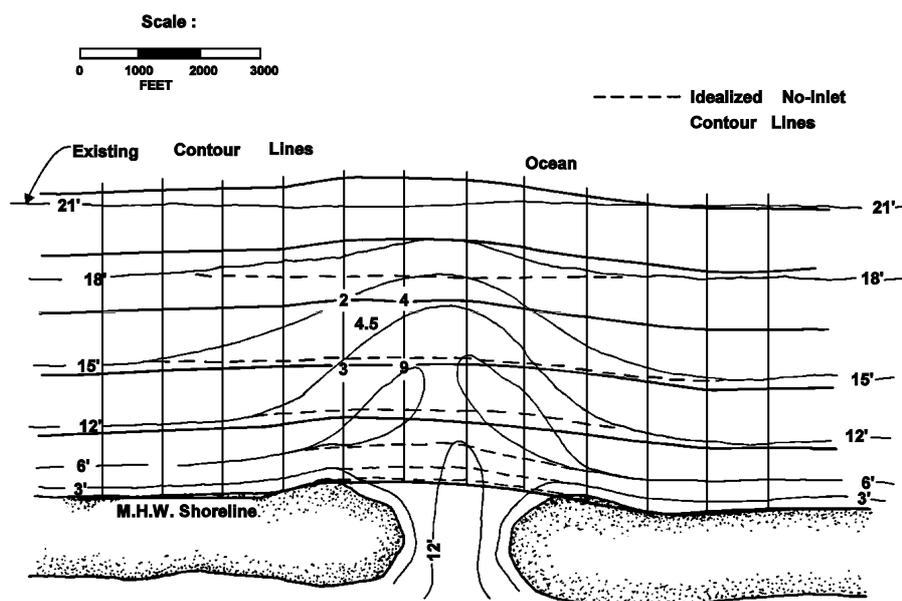


Abb. 4.11: Definition des Sedimentvolumens von Ebbdeltas (DEAN & WALTON 1975)

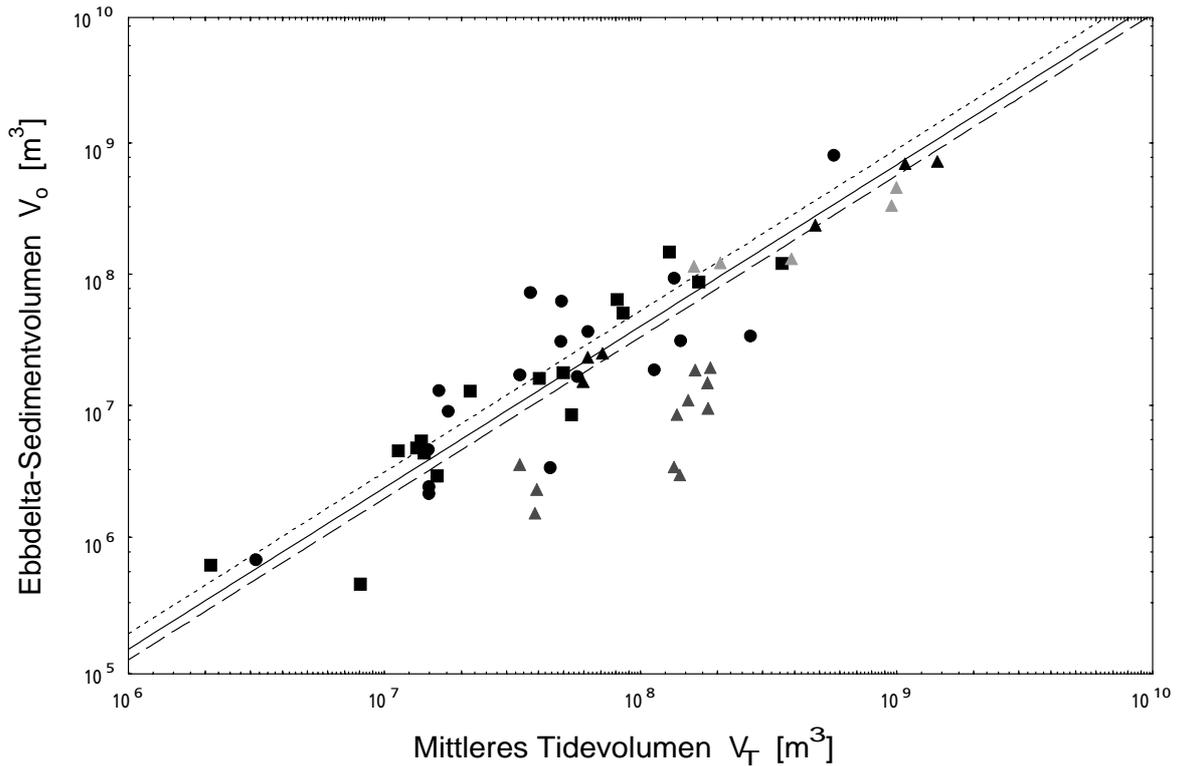


Abb. 4.12: Sedimentvolumen der Ebbdeltas von Seegaten in Abhängigkeit vom Tidevolumen der zugehörigen Einzugsgebiete (Küsten der USA, Westfriesisches und Ostfriesisches Wattenmeer)

Bereiche stark um die drei Ausgleichsgeraden der logarithmischen Funktionsdarstellung (Abb. 4.12). Angesichts der Streubreite der Daten erscheint die Differenzierung der funktionalen Zusammenhänge nicht als zwingend.

Vergleichbare Daten einiger Ebbdeltas des Ostfriesischen Wattenmeeres liegen weit außerhalb der von Walton & 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 & ADAMS (1976) auf eine stärkere Exponiertheit als bei den Ebbdeltas der US-amerikanischen Küsten hindeutet. Damit liegt der Schluß nahe, daß der von WALTON & ADAMS (1976) ausgewiesene Zusammenhang zwischen dem Sedimentvolumen von Ebbdeltas und dem Tidevolumen des zugehörigen Einzugsgebietes zwar qualitativ zutreffend, aber quantitativ nicht übertragbar ist.

Die Differenzierung bezüglich der Exponiertheit erscheint nach Einbeziehung von Daten des Ostfriesischen Wattenmeeres noch weniger plausibel als bei alleiniger Betrachtung der Originaldaten. Die Streuung der Daten für das Ostfriesische Wattenmeer ist so groß, daß sie nicht mit Änderungen des mittleren Tidevolumens V_T erklärt werden können. Überdies ist die Menge des gespeicherten Sediments im Vergleich zu den Tidevolumen geringer als die der US-amerikanischen Küste.

Es ist anzumerken, daß die Quantifizierung der Sedimentvolumen von Ebbdeltas nach WALTON & 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. Mutmaßlich lassen sich diese sowohl mit verfahrensbedingten Variationen als auch mit zeitabhängige Veränderungen erklären.

Deshalb wurden weitergehende Untersuchungen der Ebbdeltavolumen V_o durchgeführt, welche auf Daten für den Zeitraum von 1889 bis 1990 für das Norderneyer Seegat bzw. von 1878 bis 1990 für die Seegaten Wichter Ee und Accumer Ee basieren (GOLDENBOGEN et al. 1996). Die Berechnung der Parameter und die Parametrisierungen richteten sich auf die zeitabhängige Entwicklung (Abb. 4.13).

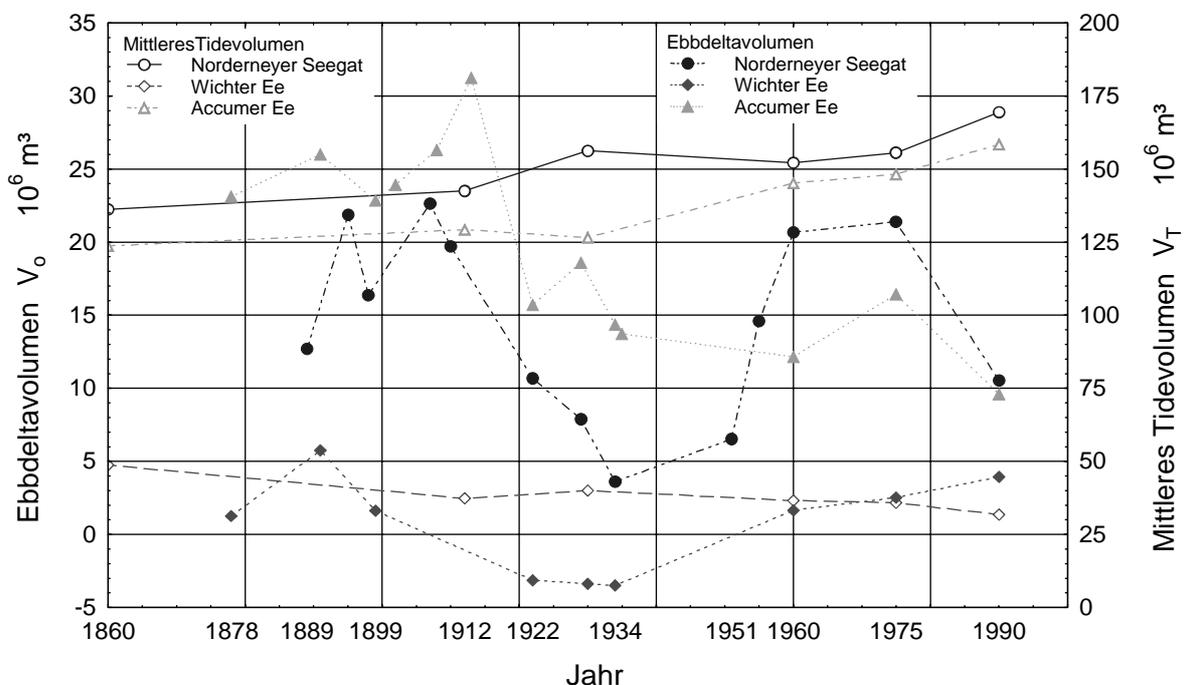


Abb. 4.13: Zeitliche Entwicklung der Sedimentvolumen der Ebbdeltas und der Tidevolumen der Ostfriesischen Seegaten

Im Modell von STIVE und EYSINK (1989) wird angenommen, daß das Ebbdelta als die erste Quelle für den Sedimentbedarf des zugehörigen Wateinzugsgebietes dient. Während Sturmfluten kann sich das Volumen des Ebbdeltas stark ändern (SHA 1990). Die Ergebnisse der Untersuchungen zeigen die temporäre Entwicklung des Ebbdelta-volumens auf. Außerdem wird gezeigt, wie dieses Volumen mit Vergleichsparametern in Wechselbeziehung steht.

4.3.6 Charakteristische Watthöhen und Umlagerungsraten

Zur Beschreibung der höhenmäßigen Entwicklung der Wattvolumen sowohl über die Zeit, als auch im Vergleich der Einzugsgebiete bzw. deren Teileinzugsgebiete untereinander, wurde in Anlehnung an die von VAN BENDEGOM (1950) und GÖHREN (1968) eingeführte mittlere Höhenlage der Wattvolumen eine Höhe aus der Wattfläche A_i bestimmt, die in ihrer Definition als repräsentative, das Wattniveau beschreibende Größe angesehen werden kann. Diese Vorgehensweise unterscheidet sich insofern von bisherigen, als daß nicht über eine gemittelte Niveauflächenverteilung (DIECKMANN 1985), sondern direkt aus der einem Wateinzugsgebiet bzw. Teileinzugsgebiet zuzuordnenden Wattflächenverteilung die der halben projizierten Wattfläche A_i zugehörige Höhe ermittelt wurde.

Der als charakteristische Watthöhe I_i bezeichnete Parameter beschränkt sich definitionsgemäß auf die geodätische Höhe des Wattvolumens zwischen mittlerem Tideniedrig- und mittlerem Tidehochwasser. In diesem Höhenbereich (MThb) finden die nachhaltigsten Umlagerungsprozesse statt. Eine vergleichbare Definition gibt EYSINK (1991) an. Er ermittelt jeweils für den Bereich über- und unterhalb des mittleren Tidemittelwassers eine repräsentative Höhe des Wattvolumens.

Wesentliche Einflußfaktoren auf die geodätische Höhe des Sediment- bzw. Wattvolumens ergeben sich laut DIECKMANN (1985) aus der Struktur des Einzugsgebietes (inselgeschützt oder offene Bucht) und den hydrologischen Randbedingungen (HAYES 1975, 1979). Entsprechend der charakteristischen Form des Wattvolumens, das durch die Lage zur Hauptwellenrichtung bzw. der Wellenausbreitung im Einzugsgebiet sowie tideinduzierten Strömungen und insbesondere durch die Gestalt in Form einer offenen Bucht oder inselgeschützt geprägt ist, weisen Wattgebiete mit steileren Böschungs-

winkeln höhere mittlere Watthöhen auf als solche, die sich durch seichte Übergänge zwischen Prielen und Platen auszeichnen. DIECKMANN (1985) weist darauf hin, daß im Gegensatz zu den Wattgebieten der Niederlande und des Ostfriesischen Wattenmeeres, bei denen die höheren Wattbereiche im Lee der vorgelagerten Insel auftreten, die Watten vor der dänischen Küste in den Bereichen entlang der Festlandsküste höher liegen. In dieses Bild fügen sich auch die Ergebnisse aus den Untersuchungen über die Dithmarscher Bucht und das Ostfriesische Wattenmeer ein. Die charakteristischen Watthöhen der Dithmarscher Bucht liegen im Mittel rund 0,5 m über denen des Ostfriesischen Wattenmeeres (SCHROEDER 1994). Weiterhin resultieren lokale Eigenarten aus der Lage der Teileinzugsgebiete zum Hauptgebiet (innenliegendes Gebiet oder Randgebiete mit binnenseitiger Begrenzung durch die Küstenlinie - SCHROEDER et al. 1995).

Darüber hinaus führen unter Umständen Sielabflüsse zu spürbaren Modifikationen der Teilgebietscharakteristik, deren Auswirkungen im gesamten Wattenzugsgebiet nicht in Erscheinung treten. Weitere signifikante Auswirkungen sind in Gebieten zu erkennen, die Übergangsbereiche zu Ästuarien bilden und somit dem Einfluß der Oberwasserabflüsse sowie veränderten tideinduzierten Strömungen ausgesetzt sind (SCHROEDER 1994).

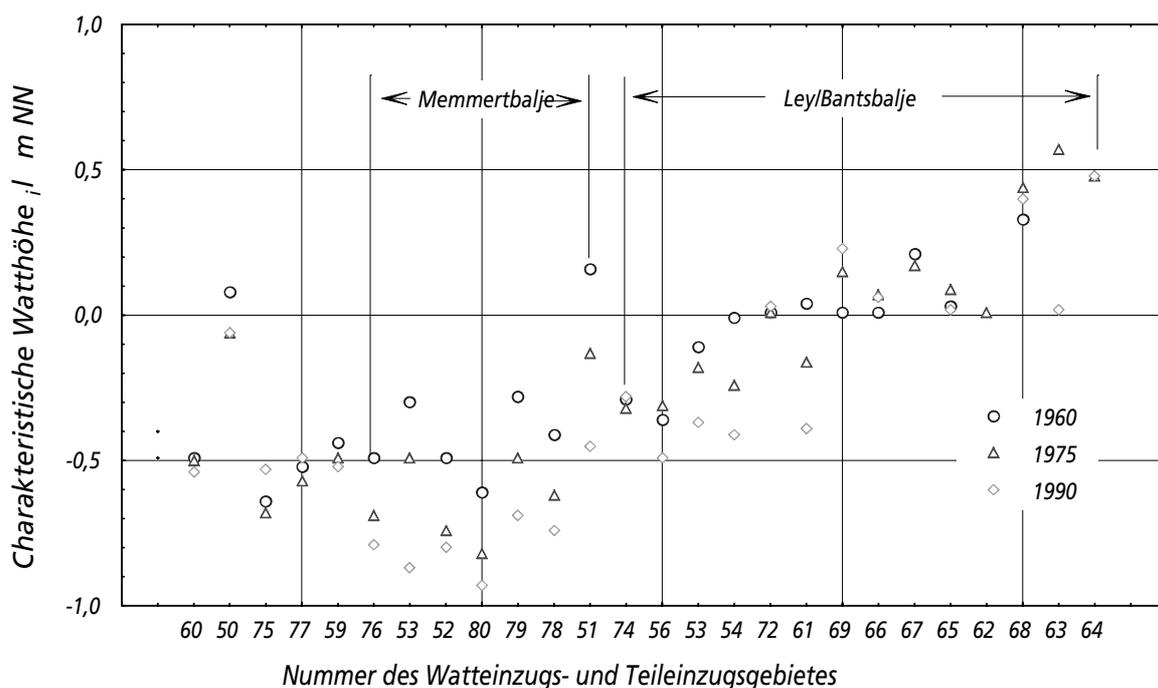


Abb. 4.14: Charakteristische Watthöhe h_i über die hierarchische Struktur der Gebietsgliederung der Osterems getrennt nach Memmertbalje und Ley/Bantsbalje

Die Untersuchungen erstreckten sich auch auf die Teileinzugsgebiete mit dem Ziel, differenzierte Angaben über die höhenmäßige morphologische Entwicklung zu erhalten. Innerhalb des Hauptgebietes zeichnet sich grundsätzlich ein Trend in Abhängigkeit der hierarchischen Gliederung ab (Abb. 4.14). Von See her kommend wächst die charakteristische Watthöhe l_i , wobei die mittleren Höhen schwanken und die Entwicklung in den Teileinzugsgebieten zum Teil uneinheitlich ist.

Die Auftragung der Daten beginnt zunächst mit den Werten für das Gesamteinzugsgebiet Osterems. Anschließend wurden getrennt nach den Teileinzugsgebieten Memmertbalje und Ley/Bantsbalje die Daten aufgetragen. Es zeigt sich hierbei eine signifikante Reduzierung der charakteristischen Höhe der Daten für das Teileinzugsgebiet der Memmertbalje verglichen mit dem Haupteinzugsgebiet Osterems. Das Gebiet der Memmertbalje mit ihren weiteren Untergebieten können als innen liegende Gebiete bezeichnet werden, die nur durch Wattwasserscheiden begrenzt sind und keine direkt angrenzende Küsten- bzw. Strandbereiche aufweisen.

Im Gegensatz hierzu ist das Teileinzugsgebiet Ley/Bantsbalje mit den Untergebieten durch die Küstenlinie begrenzt. Folglich liegt der Mittelwert höher und darüber hinaus zeichnet sich eine ansteigende Tendenz infolge der hierarchischen Struktur ab. Zusätzlich wird die höhere Lage der charakteristischen Watthöhe durch die geschützt liegenden Teileinzugsgebiete im Bereich der Leybucht verstärkt.

Weiterführende Untersuchungen über den Zusammenhang zwischen der Einzugsgebietsfläche A_b und der charakteristischen Watthöhe l_i führten auf eine relativ konstante mittlere Watthöhe l_i von rund -0,5 m NN bei einer Schwankungsbreite von $\pm 0,05$ m (Abb. 4.15) für das Gesamtgebiet des Ostfriesischen Wattenmeeres. Bei Teileinzugsgebieten ist ein exponentielles Anwachsen der Schwankungsbreite zu beobachten. Die Schwankungsbreite erreicht für Gebiete einer Größe von weniger als 25 km² rund -1,0 m NN bis +0,5 m NN.

Dies unterstreicht die Notwendigkeit, differenzierte Betrachtungen über die Lage der Teileinzugsgebiete im Gesamtgebiet anzustellen. Generell ein Anwachsen der Watthöhe l_i bei abnehmender Einzugsgebietsfläche A_b vorzusetzen, wie es DIECKMANN (1985) angibt, ist unzureichend, da offensichtlich hydrologische Randbedingungen

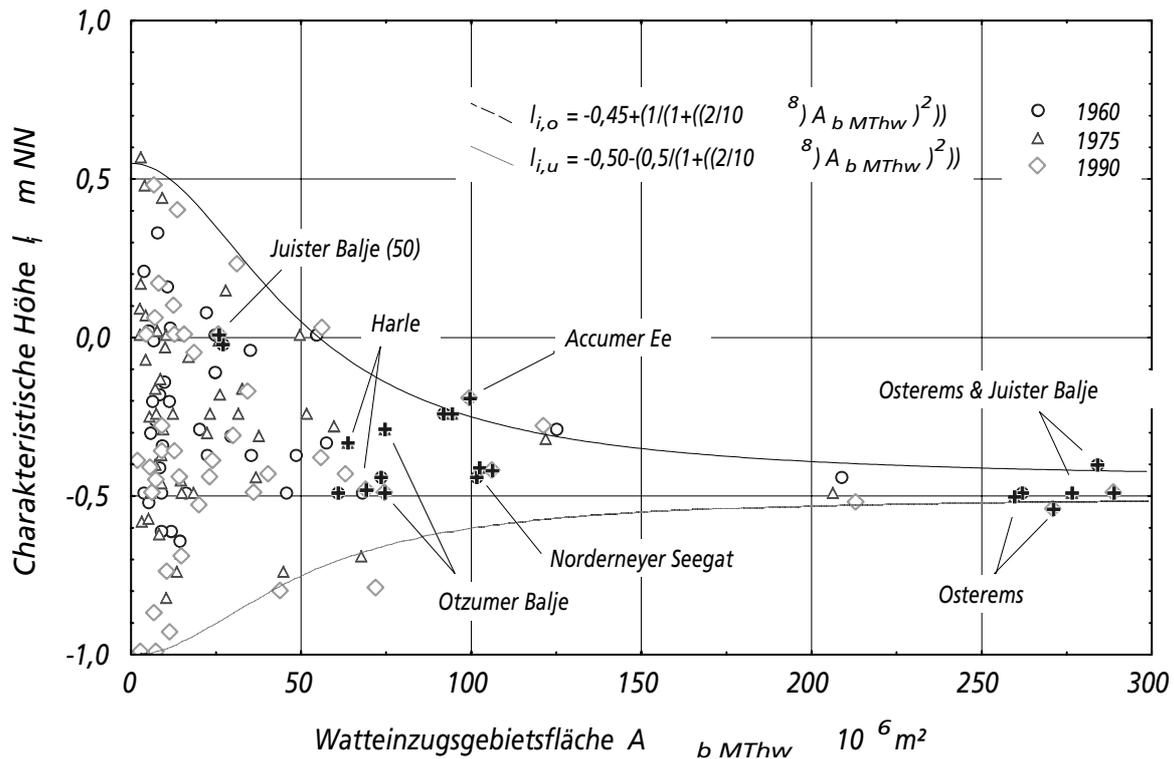


Abb. 4.15: Charakteristische Wathöhe l_i und Einzugsgebietsfläche A_b des Ostfriesischen Wattenmeeres (SCHROEDER 1994)

eine wesentliche Änderung der Charakteristik eines Teilgebietes bewirken können (SCHROEDER et al. 1995).

Im Hinblick auf die Anwendung des Zusammenhanges der charakteristischen Wathöhe l_i und der Einzugsgebietsfläche A_b im Rahmen numerischer Modelle wurden zwei Funktionen ermittelt, welche die obere und untere Grenze der charakteristischen Wathöhe l_i beschreiben (Abb. 4.15). Sie geben die maximale bzw. minimale Höhe an, gegen die sich sukzessiv die charakteristische Wathöhe l_i entwickeln kann. Sie lauten für das Ostfriesische Wattenmeer:

$$l_i = -0,45 + \frac{1}{1 + (2 \cdot 10^{-8} \cdot A_b)^2} \quad \text{obere Grenze}$$

$$l_i = -0,50 + \frac{0,5}{1 + (2 \cdot 10^{-8} \cdot A_b)^2} \quad \text{untere Grenze}$$

Die empirisch-funktionale Beschreibung der Umlagerungsraten berücksichtigt sowohl die zeitliche als auch die räumliche Dimension. Neben der zeitlichen Dimension, die sich aus den verschiedenen Vermessungszuständen ergibt, resultiert die räumliche Dimension aus der Berücksichtigung der hierarchisch gegliederten Teileinzugsgebiete. Aus dem zunehmenden zeitlichen Abstand der einzelnen Untersuchungsjahrgänge zu einer Störung des morphologischen Gleichgewichtes kann die Größe der morphologischen Reaktionen in Abhängigkeit des zeitlichen Verlaufes für ein bestimmtes Zeitfenster bestimmt werden. Für unterschiedliche Untersuchungsintervalle werden die Akkumulations- bzw. Erosionsraten auf der Basis von Volumenberechnungen ermittelt.

Zur Abschätzung der möglichen morphologischen Reaktionen werden im nachfolgenden die Absolutwerte der Volumendifferenzen ΔV_i aus verschiedener Jahrgängen untersucht, sowohl für das Gesamtgebiet, als auch für die von den Eindeichungen direkt beeinflussten Teileinzugsgebieten. Das Sedimentvolumen ergibt sich aus dem Volumen oberhalb eines festen Bezugshorizontes.

Es wird davon ausgegangen, daß die mittleren jährlichen Erosions- und Akkumulationsraten vergleichbare Größenordnungen erreichen. Dem stehen Umlagerungsraten gegenüber, die infolge kurzfristiger signifikanter Einwirkungen (Sturmfluten) zu erheblich höheren Erosions- als Sedimentationsraten führen können. Diese Einflüsse sind im Jahresmittel in der Regel vernachlässigbar, soweit nicht grundsätzliche Veränderungen der geographisch-morphologischen Gestalt eintreten. Derartige Veränderungen sind während des Untersuchungszeitraumes nicht aufgetreten.

Die Größe der Umlagerungsrate ist aus dem Differenzvolumen ΔV_i bestimmt worden, welches zur Normierung auf eine definierte Schnittfläche A_i des anstehenden Sedimentvolumens bezogen und als jährlicher Mittelwert angegeben wird:

$$\Delta h_i = f(\Delta V_i, A_i, \Delta t)$$

Ausgehend von 9 topographischen Vermessungen der Dithmarscher Bucht, die sich über einen Zeitraum von 48 Jahren von 1942 bis 1990 erstrecken und zwei Eindeichungen enthalten, wird die zeitliche Veränderung der Morphologie auf der Basis von

Bilanzierungen beschrieben. Die Untersuchungen basieren auf den Parametern Sedimentvolumen V_i und Sedimentschnittfläche A_i , die zur Normierung herangezogen wird.

Das kürzeste Untersuchungsintervall zwischen zwei Vermessungen umfaßt einen Zeitraum von drei Jahren. Der Zeitraum zwischen einer Eindeichung als sprunghafte Veränderung der morphologischen Gestalt und der nächstfolgenden Vermessung beträgt ca. 1 Jahr. Der gesamte Untersuchungszeitraum umfaßt 48 Jahre. Der längste Untersuchungszeitraum nach einer Störung beträgt 17 Jahre.

Die Untersuchungen erstrecken sich sowohl auf das Haupteinzugsgebiet der Dithmarscher Bucht als auch auf die von den Eindeichungen direkt betroffenen Teileinzugsgebiete Speicherkoog mit der Eindeichung von 1972 sowie Kronenloch und Wöhrender Loch mit der Eindeichung von 1978.

Zunächst wurden Differenzen des Sedimentvolumens V_i der Untersuchungsjahrgänge gebildet. Das Sedimentvolumen V_i wurde oberhalb Normal Null als festen Bezugshorizont ermittelt. Das Volumen V_i ergibt sich aus dem Sedimentkörper oberhalb der Schnittfläche in Höhe des Bezugshorizontes innerhalb der Gebiets- bzw. Teilgebietsgrenzen. Die obere Begrenzung bildet die Höhekote NN+2,00 m. Es erfolgte keine weitere Differenzierung der höhenmäßigen Staffelung in Anlehnung an Tidewasserstände, um unabhängig hiervon eine Quantifizierung des ein- bzw. ausgetragenen Sedimentes vornehmen zu können. Eine zusätzliche höhenmäßige Staffelung würde nur Aussagen über die Größenordnung spezifischer Umlagerungsprozesse in Teilabschnitten wie zum Beispiel dem Tidehubbereich zulassen; nicht aber Aussagen über strukturelle Veränderungen des Gesamt- oder Teilsystems.

Aus der Differenz der Sedimentvolumen V_i zweier Untersuchungsjahrgänge ergibt sich die absolute Volumendifferenz ΔV_i über das betrachtete Zeitintervall Δt_i . Hieraus wurde ein Wert als arithmetisches Mittel mit jährlichen Zeitintervallen gebildet:

$$\Delta V_i / \Delta t_i = (V_{i1990} - V_{i1985}) / (t_{1990} - t_{1985}).$$

Aufgrund der variierenden Gebietsgrößen ist eine Normierung erforderlich. Die Normierung erfolgte durch die Einführung der Schnittfläche A_i als Referenzfläche in Höhe des Bezugshorizontes. Der Quotient führt auf den mit Δh_i bezeichneten Parameter, der eine repräsentative mittlere jährliche Umlagerungsrate darstellt:

$$\Delta h_i = (\Delta V_i / \Delta t_i) / A_{i1990}$$

Es wurde die dem jüngeren Jahrgang zugehörige Schnittfläche A_i gewählt, da diese auch die horizontale Veränderung des Sedimentkörpers berücksichtigt. Δh_i ist ein synthetischer Parameter mit der Einheit m/a. Er kann nicht direkt einer physikalischen Größe zugeordnet werden, d.h. es ist keine Zuordnung zu Strukturelementen wie zum Beispiel Platen oder einer bestimmten geodätischen Höhe möglich. Wegen der fehlenden räumlichen Verteilung der über die Höhe zu differenzierenden morphologischen Reaktionen stellt der Wert ein gemittelttes Maß aus der Veränderung in horizontaler und vertikaler Richtung dar.

Die Normierung des Differenzvolumens ΔV_i erfolgte insbesondere, um die Koeffizienten der Teileinzugsgebiete mit denen des Hauptgebietes vergleichen zu können. Zu beachten ist dabei, daß die zugrundegelegte Referenzfläche A_i aus einem vergleichbaren Kurvenabschnitt der Sedimentflächenverteilungsfunktion resultiert. Das Volumen V_i ergibt sich theoretisch aus der Integration dieser Funktion über die geodätische Höhe mit der unteren Integrationsgrenze in Höhe des Bezugshorizontes. Liegt diese Integrationsgrenze jeweils in einem vergleichbaren, formbenachbarten Kurvenabschnitt, so kann von einem ähnlichen Verhältnis zwischen dem Sedimentvolumen V_i und der -schnittfläche A_i ausgegangen werden. Liegt diese Grenze in einem wesentlich flacher verlaufenden Bereich, ergibt sich ein signifikant unterschiedliches Verhältnis zwischen den Parametern. Der hieraus resultierende systematische Fehler würde die Vergleichbarkeit der Koeffizienten zwischen dem Haupteinzugsgebiet und den Teileinzugsgebieten in Frage stellen (Abb. 4.16).

Zur funktionalen Beschreibung des zeitlichen Verlaufs der morphologischen Entwicklung wurde die jährliche Umlagerungsrate Δh_i über die Zeit aufgetragen. Die Umlagerungsrate Δh_i wurde für verschiedene Untersuchungsintervalle für das Haupteinzugsgebiet und die Teilgebiete Speicherkoog, Kronenloch und Wöhrdener Loch ermittelt.

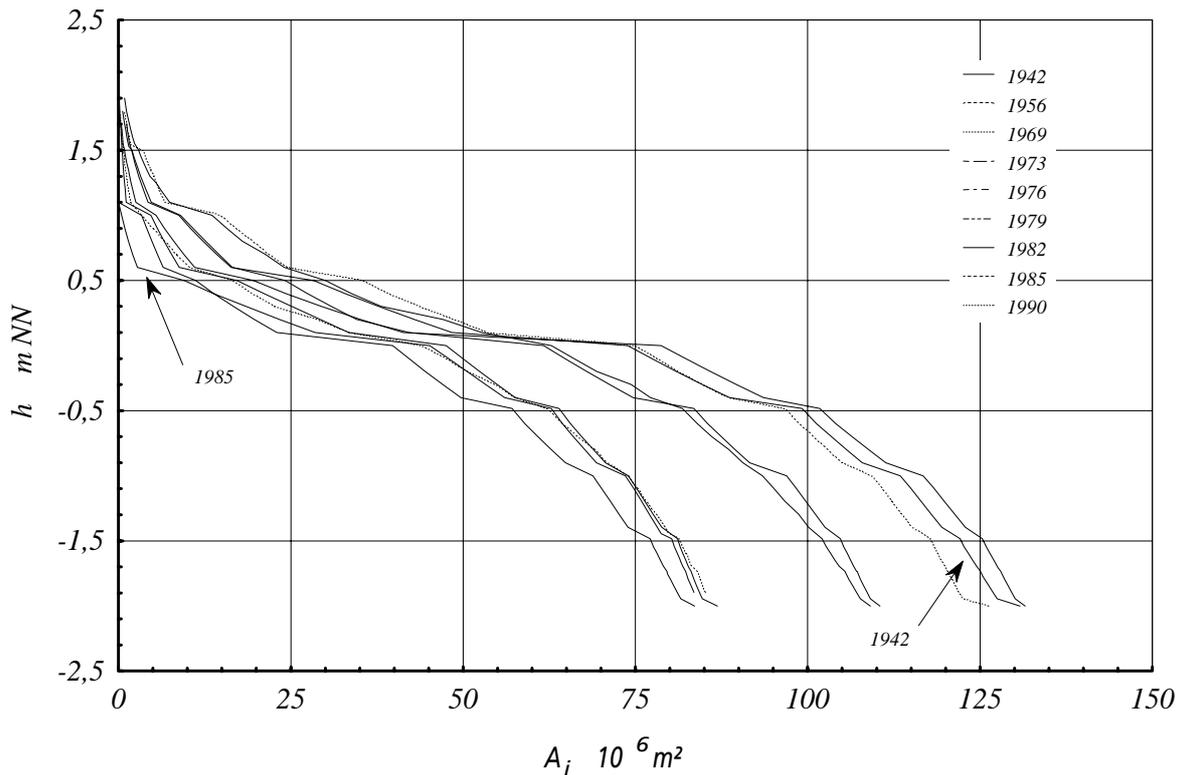


Abb. 4.16: Sedimentflächenverteilungsfunktion

Aus dem zeitlichen Abstand der Untersuchungsintervalle zu einer Störung ergibt sich die Verteilung der Umlagerungsraten Δh_i über die Zeit. Hierbei wurde der zu einer Umlagerungsrate Δh_i gehörende Zeitwert m_{Jahre} aus der halben Länge des Untersuchungsintervalls Δt_i und dem Abstand zu einer Eindeichung, der mit t_s bezeichnet wurde, berechnet:

$$m_{\text{Jahre}} = t_s + (t_{1990} - t_{1985})/2.$$

In der graphischen Auftragung wird der Zeitpunkt der Eindeichung als Ausgangswert auf der Abszisse gleich Null gesetzt. Es ergibt sich zum Beispiel für das Untersuchungsintervall 1985 bis 1990 ein Abszissenwert von $m_{\text{Jahre}} = 9,5$. Er errechnet sich aus dem Term $(1990-1985)/2$ und dem zeitlichen Abstand zwischen 1985 und der zweiten Eindeichung von 1978 mit 7 Jahren.

Untersuchungsgebiet Speicherkoog

Das Gebiet Speicherkoog (Abb. 2.4) liegt im südlichen Teil der Dithmarscher Bucht. Es umfaßte 1969 eine Einzugsgebietsgröße A_b von 37,32 km². Überwiegend im östlichen Bereich wurde 1972 eine Fläche von 11,5 (14,95) km² eingedeicht.

Die Reduzierung des Sedimentvolumens infolge der Eindeichung von 1972 betrug, bezogen auf die -12,0 m NN-Linie, absolut rund $1,72 \cdot 10^8$ m³. Gegenüber 1969 ist bis 1973 eine leichte Verringerung des relativen Sedimentvolumens V_i/V_t zu erkennen (Abb. 4.17). Bis zum Jahr 1976 tritt eine gegenläufige Entwicklung mit einer Zunahme um rund 10 % ein. Diese Tendenz verstärkt sich noch bis 1979 mit einem relativen Sedimentvolumen von 0,29. Die deutliche Veränderung der morphologischen Struktur erscheint nicht nur eine Folge der Eindeichung von 1972 zu sein, sondern auch im Zusammenhang mit den Sturmfluten von 1976 (3. und 21. Januar 1976, ANDRESEN 1976) zu stehen. Aus der Sedimentschnittflächen-Summenkurve zeichnet sich eine Umlagerung des Sedimentes aus oberen Bereichen in tiefere ab (Abb. 4.16).

Etwa in Höhe -1,0 m NN schneiden sich die Graphen von 1973 und 1976, wobei der Graph von 1976 einen flacheren Verlauf aufweist. Der interne Umlagerungsprozeß spiegelt sich auch im Verlauf des Verhältnisses V_i/V_t im Vergleich mit zunehmendem Sedimentvolumen im Gezeitenbereich bei schwacher Verringerung der Größe der

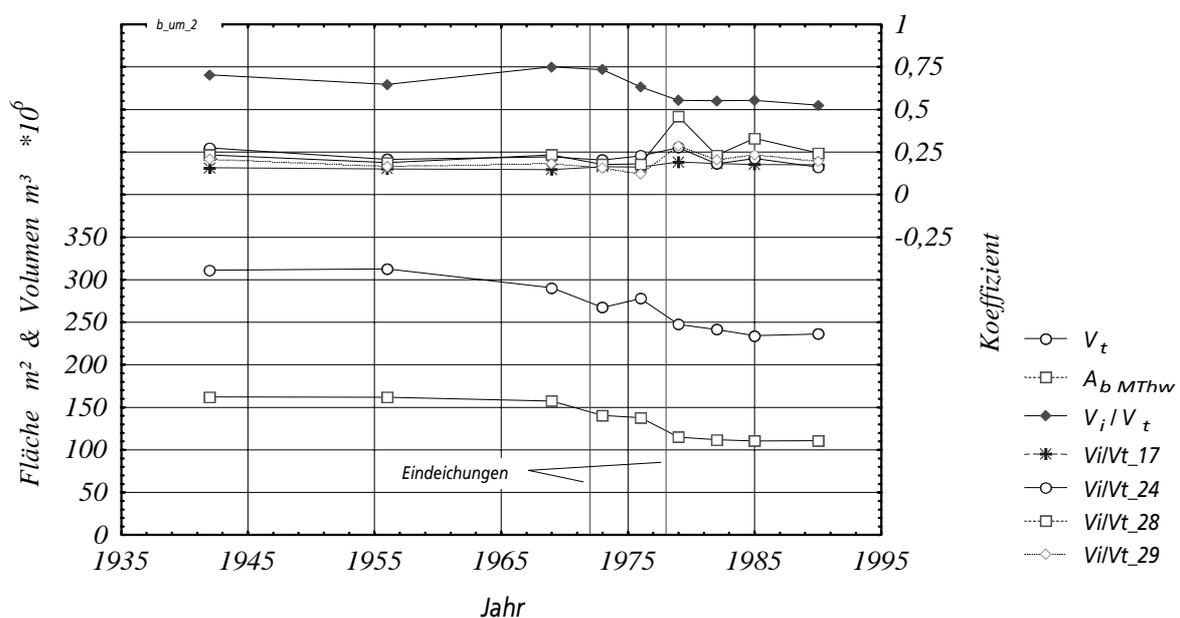


Abb. 4.17: Zeitliche Entwicklung des Koeffizienten V_i/V_t

Wattfläche wider. Die Wattfläche reduziert sich zunächst bis 1976 im Bereich oberhalb 0 m NN, verläuft nahezu identisch zwischen 0 m NN und -1,0 m NN, wächst im darunter liegenden Bereich an und liegt im unteren Bereich mit einem konstanten Betrag über dem Zustand von 1973. Während der nachfolgenden Untersuchungsabschnitte pendelt sich ein relatives Sedimentvolumen V_i/V_t ein, das unterhalb des Ausgangszustand von 1969 liegt (Abb. 4.17).

Zur Abschätzung der maximalen Umlagerungsraten und deren zeitlichem Verlauf wurden die Δh_i den Untersuchungsintervallen zugeordnet aufgetragen:

ohne Eindeichung:

$$m_{\text{Jahre}} = 13,5 = (1956-1942)/2$$

mit Eindeichung von 1972:

$$m_{\text{Jahre}} = 5,5 = (1979-1976)/2 + (1976-1972)$$

Die Betrachtung der Umlagerungsraten für den Gezeitenbereich führt auf die in Abb. 4.19 dargestellten Raten von Δh_i . Die Rate für den Zeitraum 1973 bis 1976, also unmittelbar nach der ersten Eindeichung 1972 weist mit $\Delta h_i = -0,156$ auf.

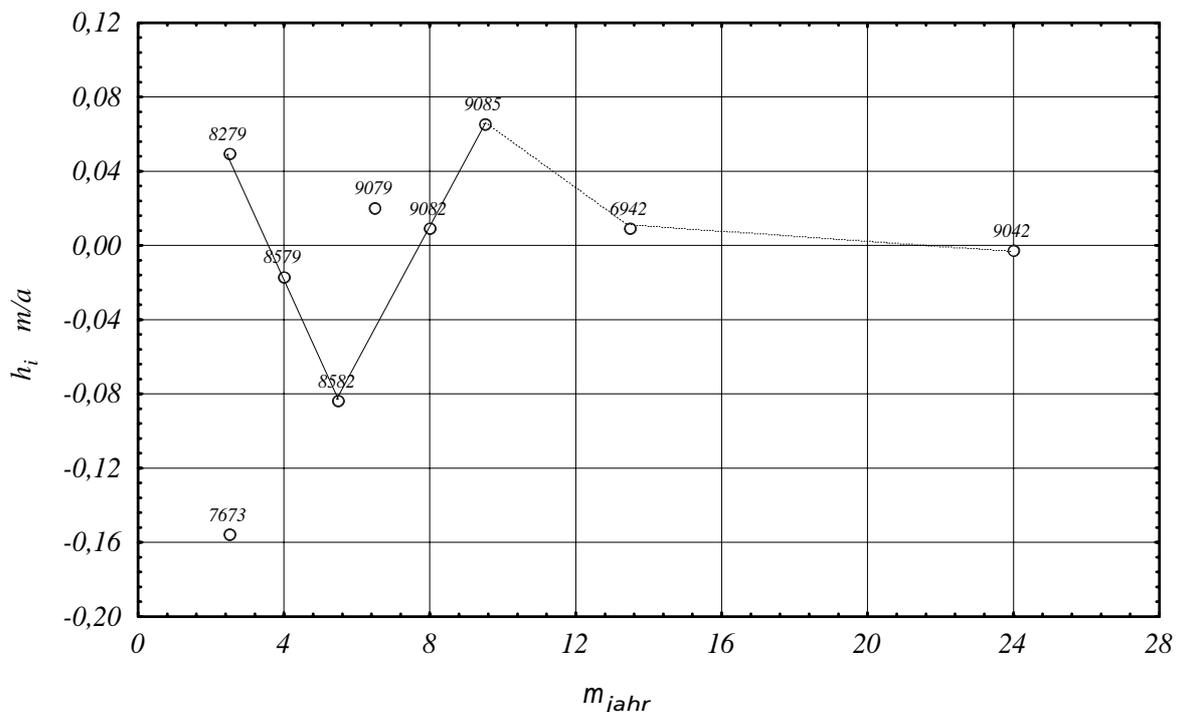


Abb. 4.18: Entwicklung der Umlagerungsrate nach einer Störung; Teileinzugsgebiet Speicherkoog

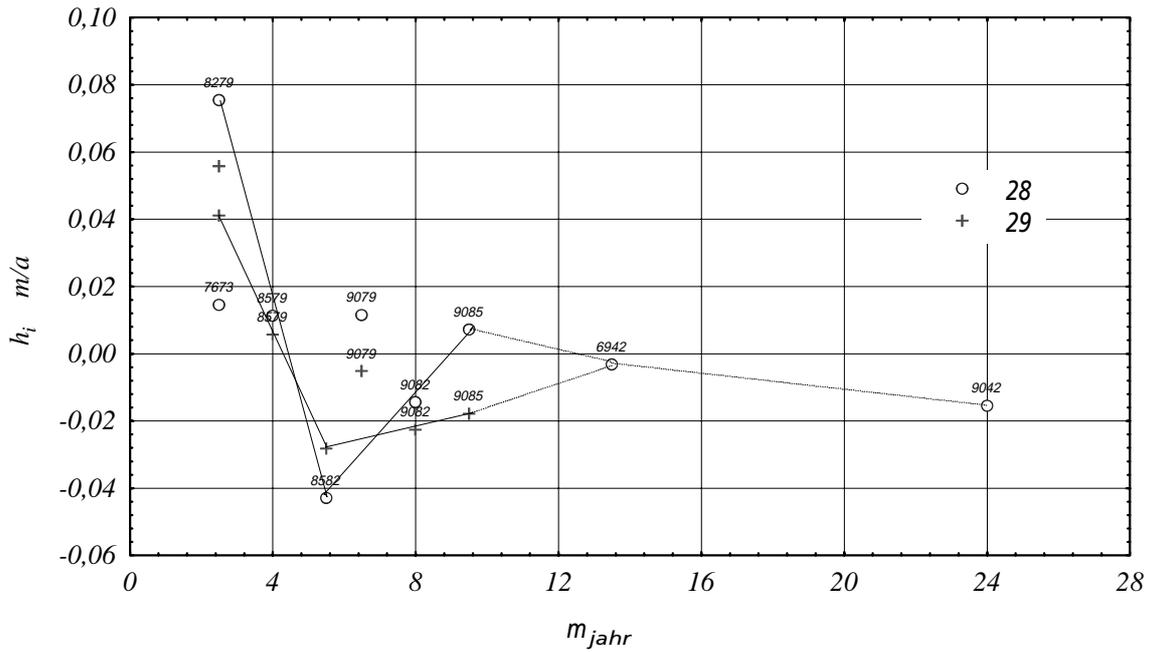


Abb. 4.19: Zeitliche Entwicklung nach einer Störung oberhalb Normal Null für das Teileinzugsgebiet Kronenloch/Kronenloch Süd und Wördener Loch

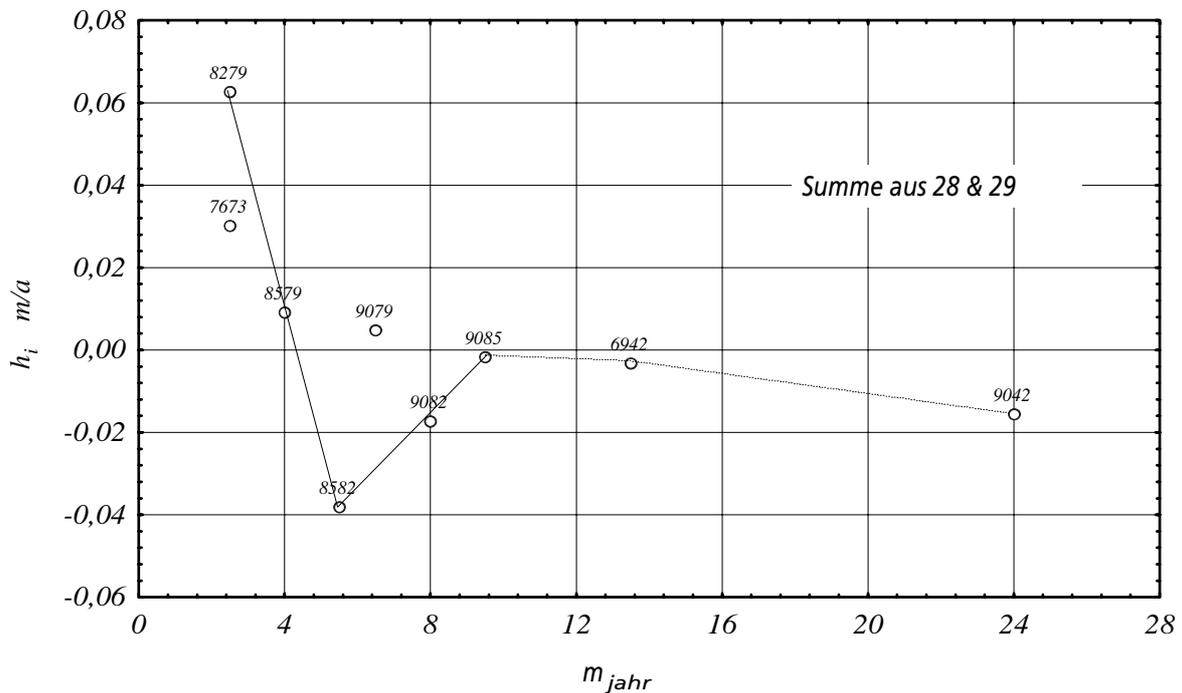


Abb. 4.20: Zeitliche Entwicklung nach einer Störung oberhalb Normal Null für das Teileinzugsgebiet Kronenloch/Kronenloch Süd und Wördener Loch

Infolge der zweiten Eindeichung 1978 in den angrenzenden Teileinzugsgebiet Kronenloch und Wördener Loch zeichnet sich zunächst ein Aufsedimentieren ab, das im

Gegensatz zu dem Wert des gesamten Höhenbereiches steht. Gefolgt von Erosionen und Sedimentationen, die noch in ihrer Größenordnung über denen unmittelbar nach der Eindeichung 1978 liegen (Abb. 4.18). Die angegebenen Werte für die Zeiträume 1942 bis 1969 und 1942 bis 1990 dienen nur zur Orientierung bei der Berücksichtigung langfristiger Untersuchungszeiträume.

Untersuchungsgebiet Kronenloch

Das Teileinzugsgebiet Kronenloch liegt in der nördlichen Hälfte der Dithmarscher Bucht und umfaßte 1969 eine Fläche von 27,80 km². Durch die Eindeichung 1978 verringerte sich die auf das mittlere Tidehochwasser bezogene Einzugsgebietsfläche um 17,24 km², was in etwa 58 % der Fläche von 1976 entspricht.

Aus der Entwicklung des relativen Sedimentvolumens V_i/V_t (Abb. 4.17) ergibt sich nach einer leichten Abnahme 1956 wieder ein zu 1942 vergleichbarer Koeffizient von 0,23. Für den Zeitraum nach der ersten Eindeichung 1972, d.h. für die Untersuchungsjahre 1973 und 1976 fällt der Koeffizient geringfügig auf 0,18 ab. Infolge der zweiten Eindeichung 1978 steigt er von 0,18 auf 0,46 an. Diese erhebliche Verschiebung der V_i/V_t -Relation wird aber bereits bis 1982 wieder kompensiert. Nach einem wiederholten Anstieg auf 0,33 erreicht der Koeffizient 1990 einen Wert von 0,24 und entspricht damit annähernd dem von 1969.

Die Entwicklung innerhalb des Gezeitenbereiches zeigt zunächst eine Verschiebung zu höheren Akkumulations- und geringeren Erosionsraten als im Teileinzugsgebiet Speicherkoog. Es liegt die Vermutung nahe, daß überschüssiges Sediment aus dem Gebiet Speicherkoog in das Gebiet Kronenloch eingetragen worden ist. (Abb. 4.18, 4.19 & 4.20).

Untersuchungsgebiet Wöhrdener Loch

Das Teileinzugsgebiet Wöhrdener Loch liegt am nördlichen Rand der Dithmarscher Bucht. Infolge der Eindeichung 1978 wurde die Einzugsgebietsfläche um 64 % gegenüber 1976 auf $A_b = 5,59$ km² verkleinert.

Der Verlauf des relativen Sedimentvolumens V_i/V_t ist von einer annähernd stetigen Abnahme bis zum Jahr 1976 gekennzeichnet (Abb. 4.17). Infolge der Eindeichung 1978 erreicht der Wert 1979 sein Maximum von 0,29. Nach 1979 entwickelt er sich ähnlich den Verhältnissen im Einzugsgebiet Speicherkoog mit einem Wert für 1990 von 0,20, der in etwa dem von 1969 entspricht. Diese geringen Verschiebungen sind im Zusammenhang mit der ausgesprochenen Randlage des Untersuchungsgebietes zu sehen. Die Koeffizienten im Gezeitenbereich sind mit Ausnahme des Zeitraumes 1973 bis 1976 geringer als im Untersuchungsgebiet Kronenloch (Abb. 4.19 & 4.20).

Gesamtgebiet Dithmarscher Bucht

Das Haupteinzugsgebiet der Dithmarscher Bucht verkleinerte sich infolge der Eindeichungen im Zeitraum 1969 bis 1973 und 1976 bis 1979 um jeweils rund 23 km². Das entspricht einer prozentualen Abnahme von 15 % und 17 %. Es weist erwartungsgemäß gegenüber den Teileinzugsgebieten stärker gedämpfte morphologische Reaktionen auf. Zum Teil sind die Werte für Δh_i um eine Zehnerpotenz niedriger als im Gebiet Kronenloch. Sie spiegeln dennoch die gleichen Entwicklungen wie die der Teileinzugsgebiete wider.

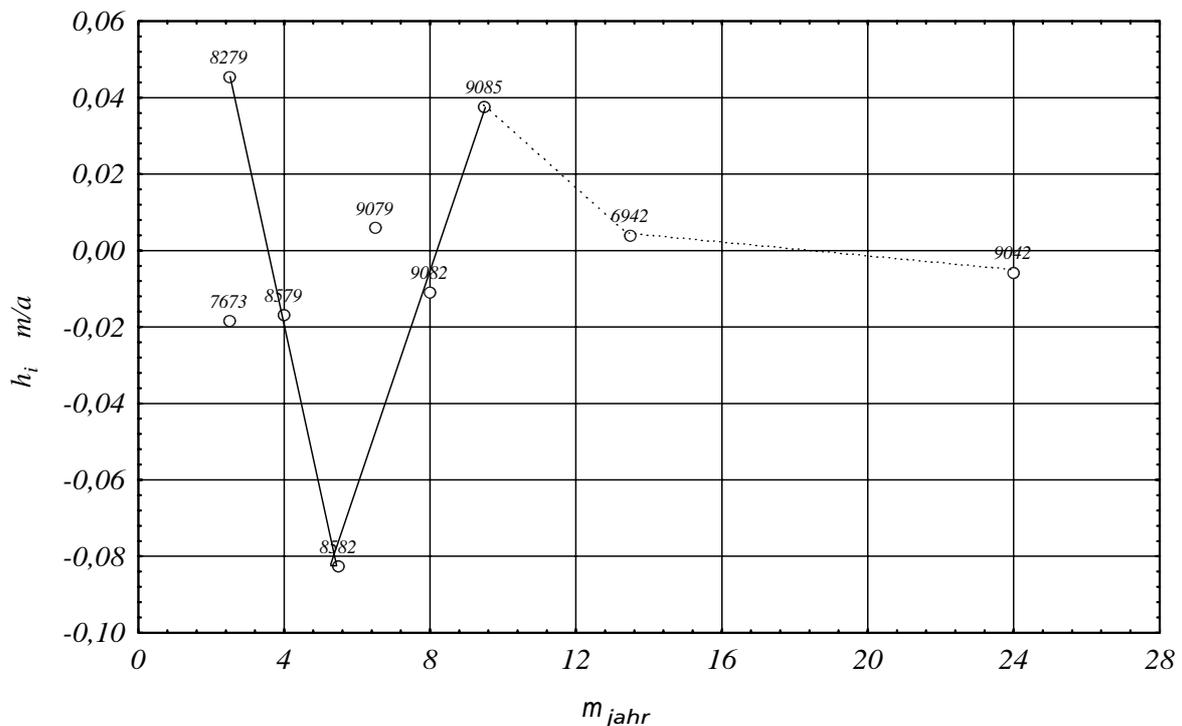


Abb. 4.21: Zeitliche Entwicklung nach einer Störung oberhalb Normal Null der Dithmarscher Bucht

Innerhalb des Gezeitenbereiches auftretende Koeffizienten entsprechen in ihrer Größenordnung denen der Teileinzugsgebiete (Abb. 4.21). Die Entwicklung der Werte weist eine Abnahme des relativen Sedimentvolumens von rund 0,75 auf 0,5 aus, dies steht im Gegensatz zu der langfristig durch Akkumulation gekennzeichneten Situation in der Dithmarscher Bucht.

Die Auswertungen über die zeitliche Entwicklung der Sedimentations- und Erosionsentwicklungen infolge anthropogener Störungen unterstreichen, einen charakteristische Gebietsparameter als zusätzliche Referenzgröße zu berücksichtigen. Vor dem Hintergrund der Ergebnisse der statistischen Untersuchungen, die zu strengen Korrelationen zwischen der Einzugsgebietsfläche A_b und weiteren gebietsspezifischen geometrischen Parametern führen, wäre diese Grundgröße als Referenzparameter zweckmäßig. Sie charakterisiert bei annähernd konstantem Tidehub das Einzugs- bzw. Teileinzugsgebiet unbeeinflusst vom jeweiligen Verhältnis Sediment- zu Tidebeckenvolumen. Dies würde prinzipiell eine Erweiterung des MORAN-Ansatzes darstellen (SIEFERT 1987). Hierbei erfolgt eine Normierung der Umsatz- und Bilanzhöhen implizit durch die definierte Größe der Untersuchungsgebiete in Form von Planquadraten.

Vor dem Hintergrund bislang nur für spezifische Strukturelemente eines Wateinzugsgebietes vorgenommene Untersuchungen über die zeitliche Veränderung in Form einer Bilanzierung der morphologischen Struktur wurde in dem hier dargelegten Ansatz die morphologischen Veränderungen auf das Einzugs- bzw. Teileinzugsgebietsfläche bezogen. Hierzu war die Gliederung des Einzugsgebietes in eine hierarchische Struktur von Teileinzugsgebieten erforderlich, die als in sich abgeschlossene Bereiche angesehen werden können. Unabhängig von der Normierung auf die Einzugsgebietsflächen ist bei der Herleitung eines empirisch-funktionalen Ansatzes eine gebietsspezifische Beschreibung der zeitlichen Entwicklung der morphologischen Reaktionen notwendig. Insbesondere im Hinblick auf die Übertragung dieser Ergebnisse auf weitere Wateinzugsgebiete ist es erforderlich, die gebietstypischen Gegebenheiten der hydrologischen und morphologischen Randbedingungen in die Betrachtung einzubeziehen.

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). Wie bereits ausgeführt, ist es für die künftige Entwicklung des Wattenmeeres sowohl im Hinblick auf den Insel- und Küstenschutz als auch in Bezug auf den Naturschutz 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 & VOGEL 1988; IPCC 1992; RWS-DGW 1991) den für einen Erhalt des morphodynamischen Gleichgewichts erforderlichen Sedimentbedarf der Tidebecken nach der Gleichung

$$V_{i,erf} = R_{SL} \cdot A_b$$

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

Auf dieser Grundlage wurde nach der obengenannten Gleichung für die Szenarien a) bis d) der für den Erhalt des morphodynamischen Gleichgewichts erforderliche Sedimentbedarf ermittelt. 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 auszugehen, daß mit einem erhöhten Sedimentbedarf eine größere Phasenverschiebung der morphologischen Anpassung gegenüber dem vorausseilenden Meeresspiegelanstieg verbunden sein wird (Abb. 5.1).

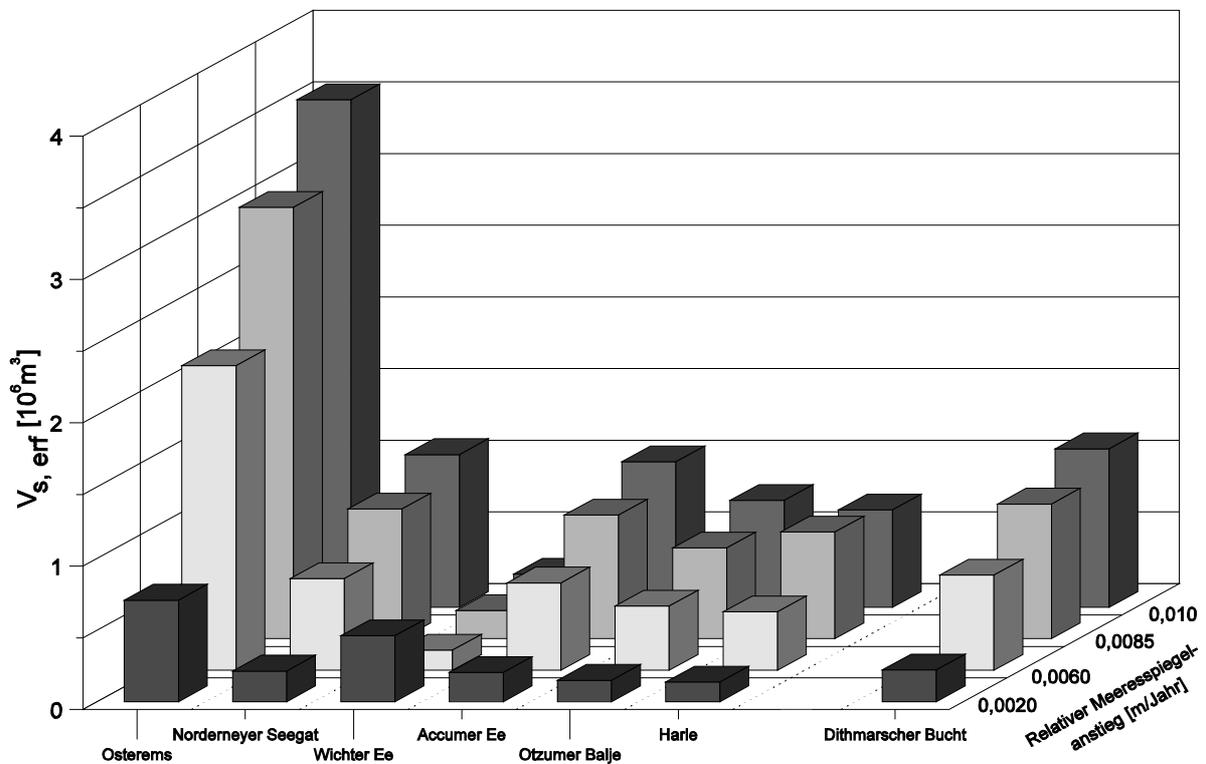


Abb. 5.1: Durchschnittlich pro Jahr erforderliche Sedimentvolumen $V_{s,erf}$ für den Erhalt des morphodynamischen Gleichgewichts unter Annahme verschiedener Szenarien des relativen Meeresspiegelanstiegs (Ostfriesisches Wattenmeer und Dithmarscher Bucht) (NIEMEYER et. al 1995)

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 & 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 & EYSINK 1989; NIEMEYER 1990).

$V_{i, \text{erf}} [\cdot 10^6 \text{ m}^3 / \text{Jahr}]$				
Einzugsgebiet	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

Tab. 5.1: Durchschnittlich pro Jahr erforderliche Sedimentvolumen $V_{i, \text{erf}}$ für den Erhalt des morphologischen Gleichgewichts unter Annahme verschiedener Szenarien des relativen Meeresspiegelanstiegs (NIEMEYER et. al 1995)

6. ANWENDUNGSBEISPIELE EMPIRISCH-KONZEPTIONELLER MODELLE

6.1 Linienmodell des Ebbdeltas

DE VRIEND, BAKKER & 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 niederländisch-deutschen Kooperation wurde das Modell DELTA auch für Untersuchungen des deutschen Teilprojekts zur Verfügung gestellt. Das Modell beschränkt sich auf den Bereich oberhalb der NN -5 m - Linie, die als Basis des Ebbdeltas angesehen wird (Abb. 6.1). Bei der Anwendung des Modells wird vorausgesetzt, daß hier der seegangserzeugte Sedimenttransport vorherrscht. Dabei wird die Lageänderungen der Basis des Ebbdeltas 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. 6.2).

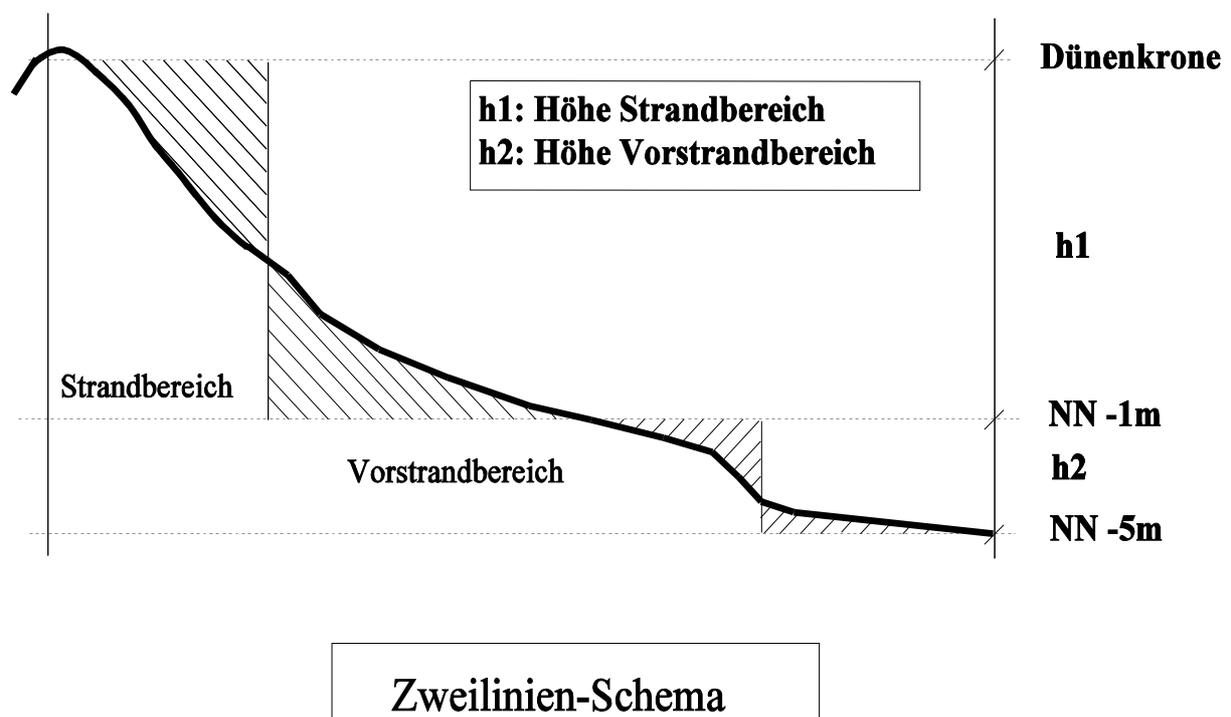


Abb. 6.1: Zweilinien-Schema (DIJKMAN et al. 1990)

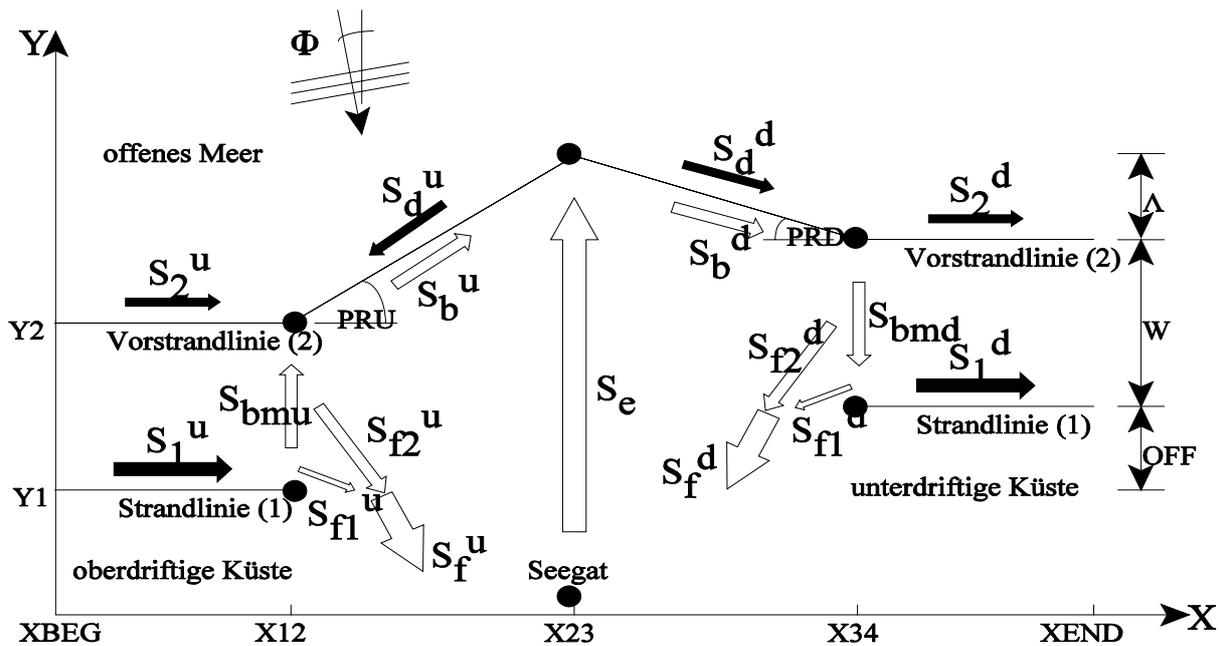


Abb. 6.2: Sedimentströme im Gebiet des Ebbdeltas (BILSE 1993)

Das Modell wurde in einem ersten Versuch auf das Ebbdelta des Norderneyer Seegats angewandt. Als Ausgangssituation wurde der Zustand um 1960 (Topographische Wattkarte der Forschungsstelle Küste) 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 wurde analog zum Vorgehen von DE VRIEND, BAKKER & BILSE (1994) für das Friesche Zeegat der Wert $b = 0,5 \text{ m/Jahr}$ angesetzt. Die Ergebnisse der Modellrechnungen wurden mit den Daten für die Zustände von 1975 (Küstenkarte des KFKI) und 1990 (Küstenkarte des BWK) verglichen.

Die Ergebnisse lassen erkennen, daß mit Hilfe des Modells DELTA die Lage des Ebbdeltas in Bezug zu den angrenzenden Barriere-Inseln realistisch reproduzierbar ist. Nachzuprüfen wäre hier noch, inwiefern die angenommenen Küstenkonstanten den tatsächlichen Werten entsprechen. Ihre Ermittlung wurde von Herrn NICO KERSTING im Rahmen seines Praktikums in der Forschungsstelle Küste vorgenommen; seine Diplomarbeit mit den Ergebnissen liegt aber noch nicht vor. Es ist weiterhin festzuhalten, daß die Vielfalt der Änderungen erheblich größer ist als die mit dem Modell DELTA reproduzierten Lageänderungen der Achsen des Ebbdeltas, was allein aus der vereinfachenden Strukturierung der Transportfaktoren und -prozesse erklärbar ist (Abb. 6.3).

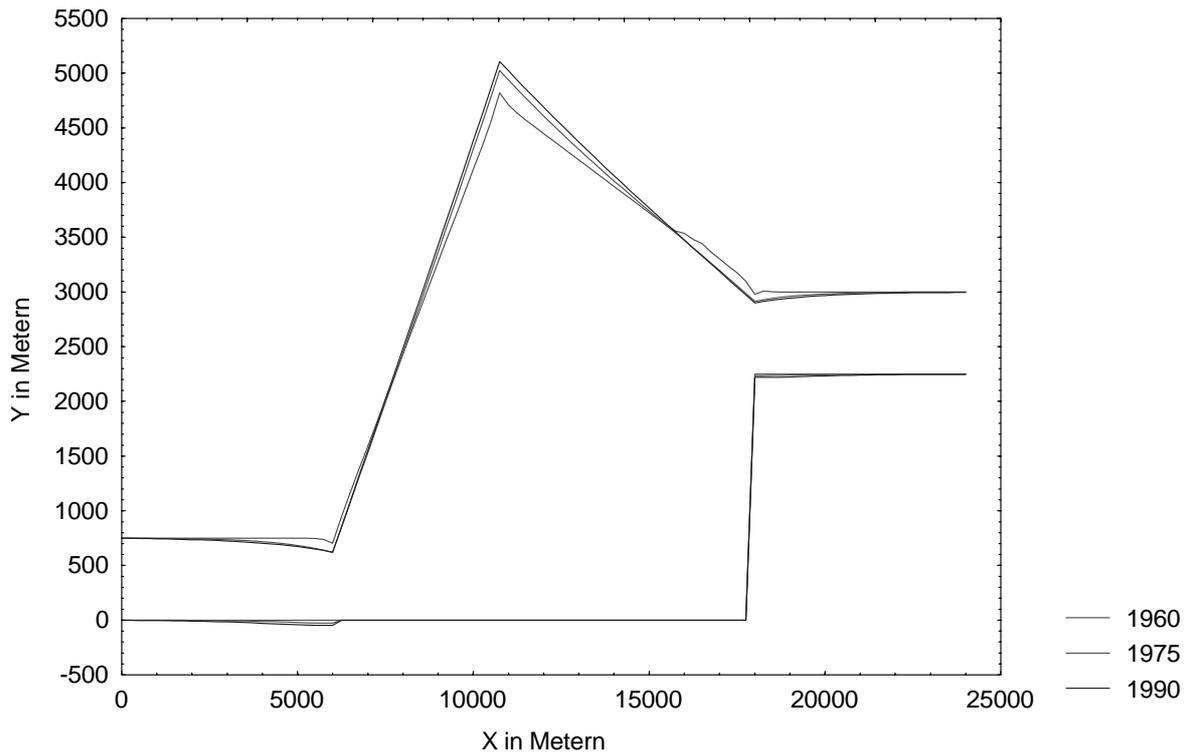


Abb. 6.3: Entwicklung des Ebbdeltas des Norderneyer Seegats (Goldenbogen et al. 1994)

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

Tab. 6.1: Seewärtige Auslenkung des Ebbdeltas; Vergleich der Rechnungen mit dem Modell DELTA und Naturdaten für das Norderneyer Seegat

6.2 Konzeptionelles morphodynamisches Tidebecken-Modell TIDYN

6.2.1 Modellkonzept

Im Rahmen des niederländischen WADE-Projektes ist von VAN DONGEREN & DE VRIEND (1994) ein konzeptionelles morphodynamisches Modell für Tidebecken entwickelt worden. Es umfaßt in schematisierter Form eine Rinne mit zugehörigem Watt-einzugsgebiet (BOX) als Grundbausteine, die über Knoten zu einem Modellsystem aneinandergereiht werden können. Hierdurch ist es möglich ein Tidebecken hinsichtlich

seiner Strukturen zu differenzieren, ohne auf die Vorteile der systemtypischen Schematisierung durch die charakteristische Kenngrößen Rinnenquerschnitt und Einzugsgebietsfläche zu verzichten. Das Gesamtsystem ist seeseitig offen und landseitig geschlossen.

Die Tidedynamik wird in dem eindimensional über die seeseitige Einsteuerung der vertikalen Tide eingebracht. Dabei wird zusätzlich zur Hauptzeit M_2 auch die Partialtide M_4 berücksichtigt, um die wattungstypische Asymetrie zu erreichen, die für die Transportvorgänge wesentlich ist. Die Phase zwischen den Partialtiden ist mit einer Voreilung von M_4 um 90° angesetzt, wodurch Flutdominanz bewirkt wird. Über einen parametrischen Ansatz von MOTA OLIVEIRA (1970) ist der sohlnahe Sedimenttransport als Funktion der Strömungsgeschwindigkeit implementiert. Insgesamt ist somit ein potentieller Import von Material in das System vorgegeben.

Diese konventionelle Modellierung bildet die Grundlage für ein konzeptionelles Modell mit folgenden Transportkomponenten je Modellbaustein (Box) (Abb. 6.4):

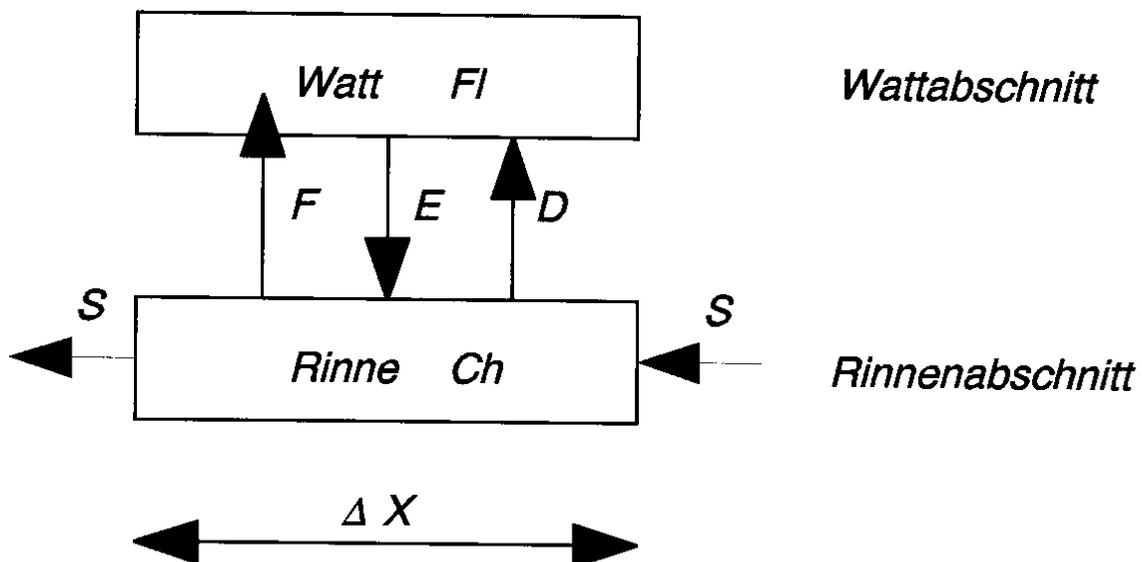


Abb. 6.4: Transportkomponenten innerhalb eines Modellbausteins (Box) nach VAN DONGEREN & DE VRIEND (1994)

- in die Box von See eingebrachte Sedimentmenge S_i
- aus der Box landwärts austretende Sedimentmenge S_{i+1}

- Ablagerungen im Rinnenquerschnitt D
- Erweiterungen des Rinnenquerschnitts durch Erosion E
- Erhöhungen des Wattniveaus durch Sedimentzufuhr aus der Rinne F

Die Besonderheit dieses konzeptionellen Modells liegt in seinen Steuerungsmechanismen: Als Kriterien für Sedimentbedarf oder -überschuß werden folgende empirische morphodynamische Gleichgewichtsbedingungen angesetzt:

1. Der Zusammenhang von Rinnenquerschnitt und Tidevolumen, bekannt in der Formulierung von O'BRIEN (1931, 1969),
2. Dem Zusammenhang von Gesamt- und Gezeitenfläche eines Tidebeckens oder Teileinzugsgebietes; hier in der Formulierung nach RENGER & PARTENSKY (1974),
3. eine Gleichgewichtshöhe des Watts, für die keine Definition geliefert wird.

Diese Kriterien werden funktional in die Modellgleichungen so eingebunden, daß bei Abweichen im jeweiligen Anfangszustand Transportvorgänge ausgelöst werden, die auf eine Wiederherstellung des Gleichgewichtes ausgerichtet sind. Wesentlich ist dabei, daß die Anpassung von der Seeseite her beginnt und sich landwärts fortpflanzt. Auf diese Weise können mit Hilfe dieses Modells morphologische Folgewirkungen ermittelt werden, wie sie beispielsweise von Änderungen der Einzugsgebietsgrößen oder des lokalen Tidehubes oder des relativen Meeresspiegelanstiegs bewirkt werden können.

Die Modellentwickler haben es zu Testzwecken auf das Einzugsgebiet des Zoutkamperlaag im Tidebecken des Friessche Zeegat angewandt, um die Folgen der Abdämmung der früheren Lauwerszee zu reproduzieren. Für die Rinnenquerschnitte zeigten sich über die Dauer von 18 Jahren gute Übereinstimmungen zwischen Modellergebnissen und Naturdaten (VAN DONGEREN & DE VRIEND 1994).

6.2.2 Modellmodifikation

Nachdem das Modell für die Untersuchungen im deutschen Teilprojekt zur Verfügung gestellt worden ist, wurde im Dialog mit einem der Modellentwickler das Konzept einer kritischen Überprüfung unterzogen. Als wesentliches Modifikationsbedürfnis wurde herausgearbeitet, daß bei Verkleinerungen von Wateinzugsgebieten infolge Abdeichungen nach verfügbaren phänomenologischen Kenntnissen (NIEMEYER 1991) die Sedimentationsprozesse in den landseitigen Teilen des Tidesystems beginnen und nicht in den seeseitigen. Diese Anforderung beinhaltet aber keine physikalische Erweiterung des Modellkonzeptes.

Weiterhin erwies sich die Aneinanderreihung von Teileinzugsgebieten für solche Untersuchungsgebiete als unzureichend, die in ihrer hierarchischen Gliederung nicht linienhaft, sondern pyramidenartig (Abb. 6.5) aufgebaut sind (NIEMEYER 1984, 1991). Hieraus ergab sich das Erfordernis der landseitigen Verzweigung in Teilsystemen.

Weiterhin wurde es als sinnvoll angesehen, einen ersten experimentellen Versuch für die funktionale Vorgabe einer Gleichgewichtsbedingung für Watthöhen einzubauen. Hierfür standen aus den bisherigen Untersuchungen Zusammenhänge zwischen einer charakteristischen Watthöhe (SCHROEDER 1994) und der Einzugsgebietsgröße zur Verfügung. Als erster Ansatz wurde die Näherungsfunktion für die obere Einhüllende (SCHROEDER 1994) gewählt.

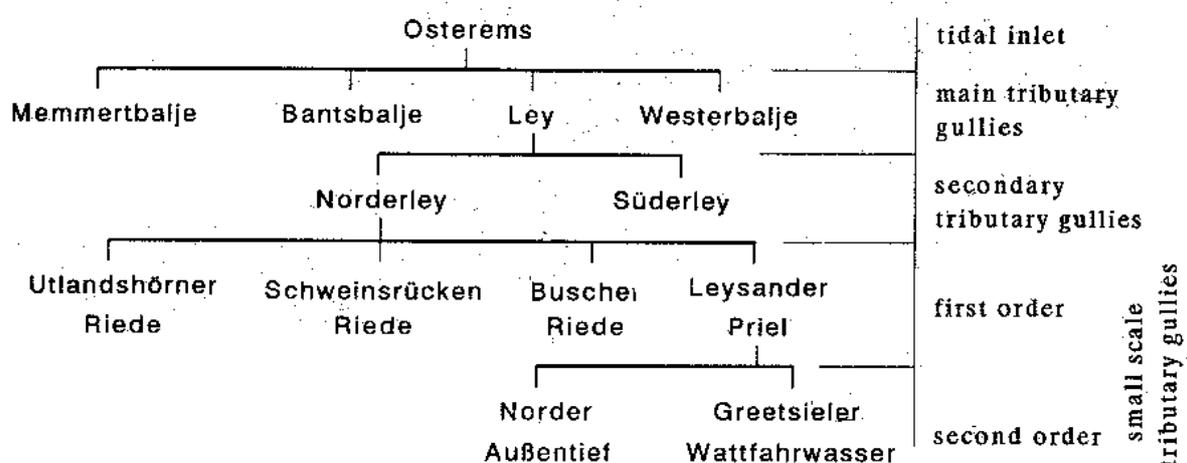


Abb. 6.5: Hierarchische Pyramide der Rinnen und zugehörigen Teileinzugsgebiete des Tidebeckens der Osterems-Ostfriesisches Wattenmeer (NIEMEYER 1984, 1991)

Hinsichtlich der örtlichen Sedimentationsbeginns war nur ein sehr einfacher Eingriff in den Modellalgorithmus erforderlich. Für die landseitigen Verzweigungen der Rinnen waren hingegen aufwendigere programmtechnische Eingriffe erforderlich (GOLDENBOGEN 1995).

Bei den ersten Anwendungen ergab sich ein weiteres grundsätzliches Defizit: Im Modellkonzept ist die Pufferfunktion morphologischer Großformen bei großskaligen morphodynamischen Anpassungsprozessen in Tidebecken nicht vollständig erfaßt. Während die Materialzufuhr durch die Erosion der Ebbdeltas (STIVE & EYSINK 1989; NIEMEYER 1990) mittelbar impliziert ist, wird die entsprechende Funktion der Watten außer Acht gelassen (NIEMEYER 1994). Auch hierfür wurde eine Erweiterung des Modells vorgenommen (Abb. 6.6), bei der eine Erosion der Watten bei Sedimentbedarf im Rinnenquerschnitt und unzureichendem Import von See möglich ist.

Darüber hinaus wurden bei den morphodynamischen Gleichgewichtskriterien für Rinnenquerschnitte und Tidevolumen die Modifikationen des Ansatzes von O'BRIEN mit den gebietstypischen Koeffizienten (NIEMEYER et al. 1995) angesetzt. Für die Relation von Watt- und Einzugsgebietsflächen wurde der in diesem Vorhaben entwickelte funktionale Ansatz (NIEMEYER et al. 1995) verwandt.

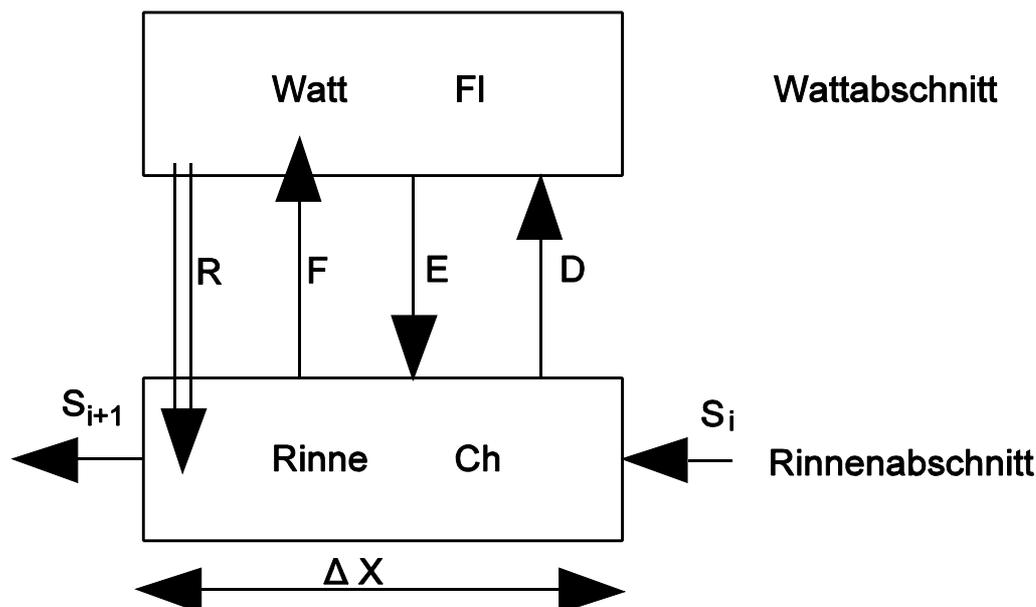


Abb. 6.6: Erweiterung der Transportvorgänge im Modell TIDYN durch Sedimenttransport R in die Rinne infolge Erosion der Watten des zugehörigen Watteinzugsgebietes (NIEMEYER 1994)

6.2.3 Modellanwendungen

6.2.3.1 Modellanwendung auf die Dithmarscher Bucht

Als erster Testfall für das modifizierte Modell TIDYN wurde die Entwicklung der Dithmarscher Bucht für den Zeitraum von 1970 bis 1990 reproduziert, innerhalb dessen die beiden Teileindeichungen von 1972 und 1978 stattfanden (Abb 6.7). Die Dithmarscher Bucht wird durch die Wattwasserscheiden auf dem Blauortsand im Norden und dem Bielshövensand im Süden und seewärts vom Außensand Tertiusand sowie den Inseln Blauort und Trischen begrenzt. Letztere wirken morphodynamisch analog zu Düneninseln. Tertiusand kann als Ebbdelta der Piep angesehen werden. 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 Neue-Schell-Legde auf. 1969 betrug die Fläche 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 insgesamt 33 km² abgetrennt wurde, danach 11,5 km² im Jahre 1972 und 21,5 km² im Jahre 1978. Das morphologische Verhalten des Tidebeckens Dithmarscher Bucht nach der

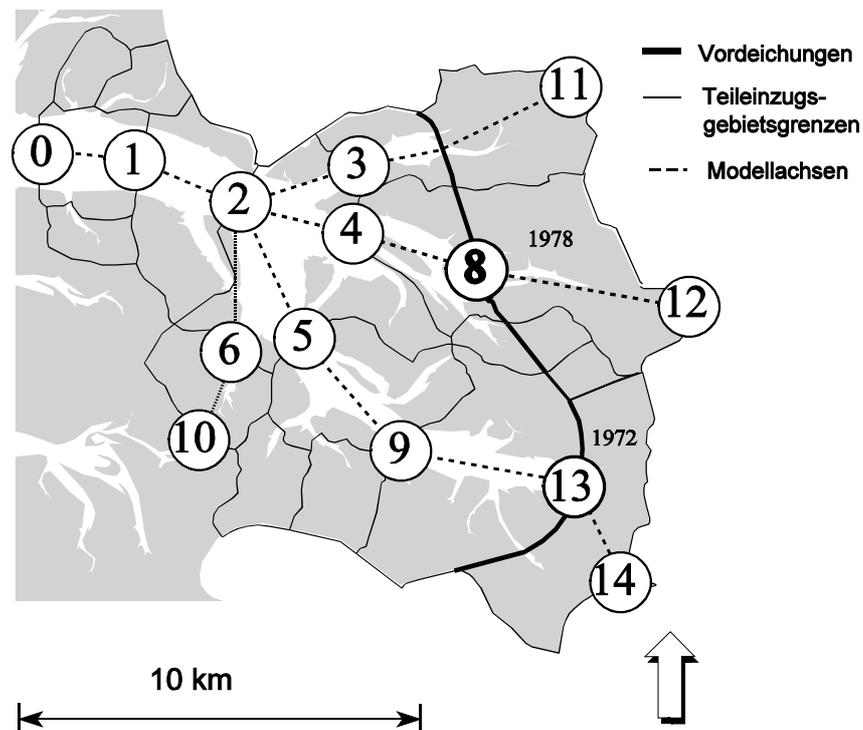


Abb. 6.7: Einleitung der Teileinzugsgebiete in der Dithmarscher Bucht in Modellkompartimente (Knoten 9) (NIEMEYER et al. 1995)

Abtrennung des Speicherkoogs Dithmarschen wurde mit dem modifizierten Modell TIDYN für folgende Randbedingungen reproduziert:

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_j (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) wurde der Steuerparameter α zur Berechnung des Sediment austausches mit dem Ebbdelta mit $40.000 \text{ m}^3/(\text{Jahr} \cdot \text{m}^2)$ angenommen und morphologischen Zeitskalen mit $\tau_c = 30$ Jahren für die Rinnen und $\tau_i = 200$ Jahren für die Watten. Für den Koeffizienten μ zur Berechnung des Erosionsvolumens an den Watträndern und γ zur Skalierung des Sediment austausches mit dem angrenzenden Abschnitt werden die Standardwerte nach VAN DONGEREN (1992) verwendet:

τ_c :	30 Jahre
τ_i :	200 Jahre
α :	$40.000 \text{ m}^3/(\text{Jahr} \cdot \text{m}^2)$
γ :	0,3
μ :	0,0005

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

Meeresspiegelanstieg: 0,005 m/Jahr

Ergebnisse der Modellrechnungen sind bereits mehrfach dokumentiert worden (GOLDENBOGEN et al. 1994; GOLDENBOGEN 1994; NIEMEYER et al. 1995; NIEMEYER & DE VRIEND 1995). Sie enthalten zumeist zwar nicht die Ergebnisse der letzten angewandten Modellversion mit sämtlichen Modifikationen, erlauben aber einen Einblick in die Leistungsfähigkeit und -grenzen des Modells. Diese Aspekte sind insbesondere

in den letztgenannten Arbeiten angesprochen worden. Hier werden deshalb in Ergänzung dazu die spezifischen Aspekte der Ergebnisse angesprochen, die hinsichtlich der Modellbewertung relevant sind.

Es hatte sich gezeigt, daß die Folgen der Abdeichungen im Gesamttidebecken und in den größeren Teileinzugsgebieten tendenziell und teilweise mit quantitativ zufriedenstellender Genauigkeit reproduziert werden konnten (GOLDENBOGEN et al. 1994; GOLDENBOGEN 1994). Insbesondere in den landnäheren, kleineren Teileinzugsgebieten traten insbesondere für den Wattflächenkennwert erhebliche Abweichungen zwischen Modell- und Naturwerten auf (Abb. 6.8). Ein Versuch, zumindest tendenziell auch für diese Bereiche zu verbesserten Ergebnissen zu gelangen, stellte die Erweiterung der Transportprozesse im Modell (Abb. 6.6) dar. Die Ergebnisse führten zu tendenziellen, aber nicht zu durchgreifenden Verbesserungen (Abb. 6.9)

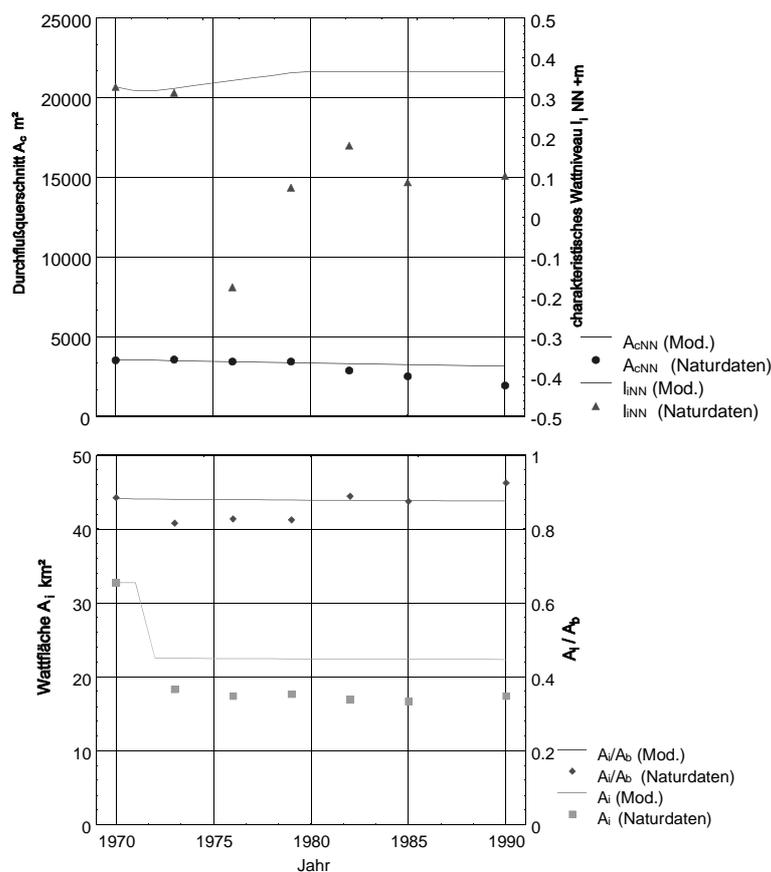


Abb. 6.8: Vergleich von Modellergebnissen und Meßdaten für die kennzeichnenden Parameter Mündungsquerschnitt, charakteristisches Wattniveau, Gezeitenfläche und Relation von Gezeiten- und Einzugsgebietsfläche für das Teileinzugsgebiet Speicherkoog (Knoten 9, Abb. 6.7) in der Dithmarscher Bucht (ohne Sedimenttransport von den Wattoberflächen zu den Rinnen) (NIEMEYER et al. 1995)

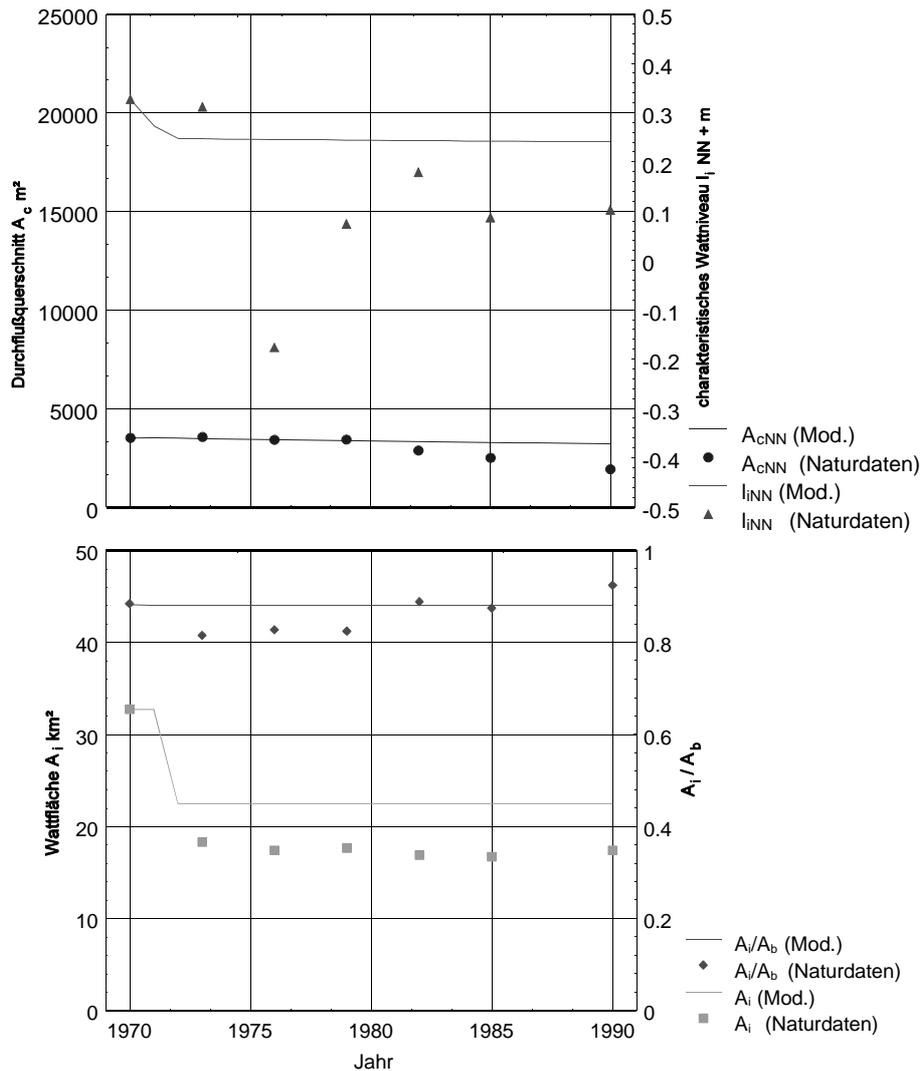


Abb. 6.9: Vergleich von Modellergebnissen und Meßdaten für die kennzeichnenden Parameter Mündungsquerschnitt, charakteristisches Wattniveau, Gezeitenfläche und Relation von Gezeiten- und Einzugsgebietsfläche für das Teileinzugsgebiet Speicherkoog (Knoten 9, Abb. 6.7) in der Dithmarscher Bucht mit Sedimenttransport von den Wattoberflächen zu den Rinnen (NIEMEYER et al. 1995)

6.2.3.2 Modellanwendung auf das Tidebecken des Norderneyer Seegats

Eine weitere Anwendung des Modells wurde für das Einzugsgebiet des Norderneyer Seegats vorgenommen (Abb. 6.10). Da hier während des Simulationszeitraumes (1960-1990) keine signifikanten Änderungen der Randbedingungen stattfanden, konnte kein Vergleich von gemessenen und simulierten Werten vorgenommen werden. Für die Modellrechnungen wurde als Szenario ein Meeresspiegelanstieg von 0,002 m/Jahr, 0,006 m/Jahr und 0,010 m/Jahr angenommen.

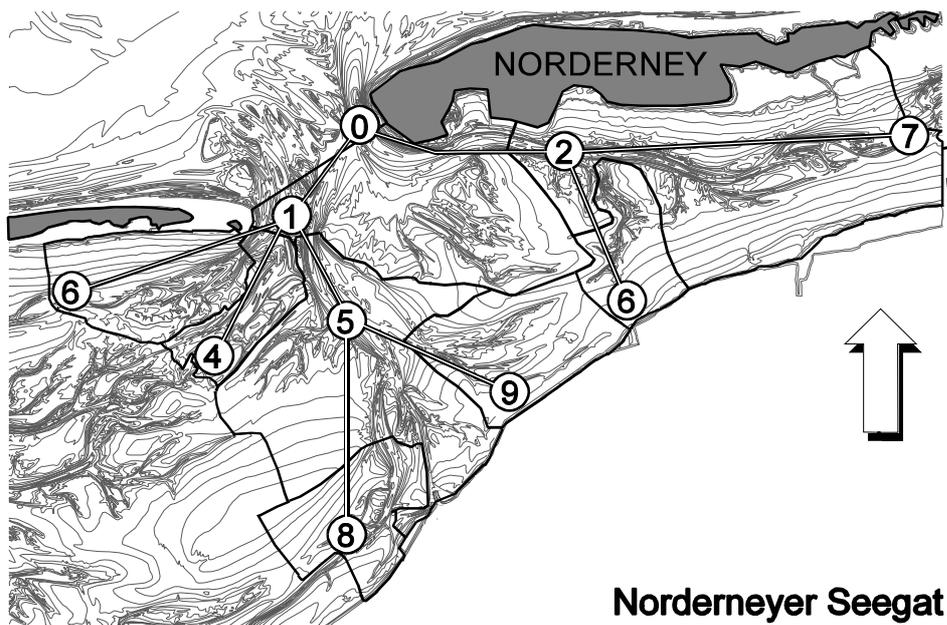


Abb. 6.10: Modellaufbau für das Tidebecken des Norderneyer Seegats

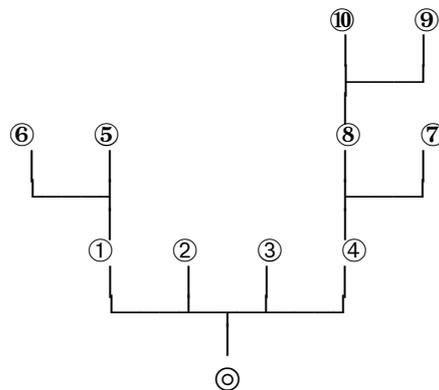


Abb. 6.11: Aufbau der Modellstruktur

Bei der Diskretisierung des Einzugsgebietes ergab sich das Problem, daß die Abführung des Wassers aus dem westlichen Teil des Einzugsgebietes nur teilweise über das Norderneyer Seegat erfolgt und somit fraglich ist, ob man in der Hierarchie des Modells die Teilbereiche Busetief/Kalfamergat und Riffgat in einem Endknoten (Wurzel) zusammenführen kann. Es wurde sowohl die getrennte Simulation beider Teilbereiche, als auch die Zusammenführung in einem Endknoten getestet, aber es konnte nicht abschließend beurteilt werden, welcher Ansatz der passendere ist. Ein weiteres Problem ist, daß das Einzugsgebiet des Norderneyer Seegats im Gegensatz

zur Dithmarscher Bucht durch Watthöhenscheiden zu den Nachbargebieten begrenzt ist, deren Lage stärker schwankt.

Zur Berechnung wurden folgende allgemeine Daten erfaßt:

Beginn der Simulation:	1960	
Simulationszeitraum:	30 Jahre	(1960 - 1990)
mittlerer Tidehub am Pegel Norderney:	2,36 m	(1956 - 1960)
Watthöhenkennwert l_i an der Wurzel:	-0,44 m	(1960)
Parameter b_j (O'BRIEN 1931):	$7,6 \cdot 10^{-5} \text{ m}^{-1}$	(1960)

Folgende Parameter beschreiben die zehn Rinnenabschnitte des Einzugsgebietes Norderneyer Seegat, Synopse 1960:

Rinne	End-knoten	A_b [km ²]	A_i [km ²]	A_c [m ²]	V_T [10 ⁶ m ³]	L [m]	l_i [m NN]
1	0	35,32	27,21	4248	58,33	3800	-0,37
2	0	3,42	2,4	1387	6,76	3200	-0,83
3	0	7,06	5,45	1328	11,66	3800	-0,26
4	0	54,57	40,78	7906	87,35	3000	-0,45
5	1	9,88	8,27	898	14,55	4800	-0,14
6	1	9,2	8,12	1368	14,59	4000	-0,34
7	4	6,31	5,83	1044	9,04	5000	-0,2
8	4	28,58	24,92	5033	38,54	3000	0
9	8	5,11	4,88	482	6,37	3200	0,02
10	8	17,38	15,4	2032	22,3	6000	0,02

Tab. 6.2: Daten für die Modellrechnung

6.2.4 Bewertung der Modellanwendungen

Die beiden Modellanwendungen haben zu unterschiedlichen Ergebnissen geführt. Hinsichtlich des Tidebeckens des Norderneyer Seegats ist anzumerken, daß die Umset-

zung der jeweiligen Naturräume in die Modellstruktur nicht immer mit der wünschenswerten Eindeutigkeit möglich ist. Hier verbleibt ein weiterer Entwicklungsbedarf, insbesondere für Kriterien, ob und wann Strukturvereinfachungen bei der Neubildung von Naturräumen hinnehmbar sind.

Bei der Anwendung auf die Dithmarscher Bucht ergibt sich eine wesentlich positivere Bilanz. Die Änderungen der Rinnenquerschnitte und Wattflächen infolge der Eindeichung werden tendenziell naturähnlich reproduziert; für die größeren tidedominierten Einzugsgebiete sogar mit einer guten quantitativen Übereinstimmung. Für diese Bereiche erweist sich das Modell TIDYN als ein ausgesprochen brauchbares Werkzeug. Dies gilt umso mehr als der Aufwand für Modellerstellung und -betrieb im Vergleich zu räumlich hochauflösenderen und prozessual differenzierteren Modellen als sehr niedrig einzustufen ist.

Defizite zeigen sich hier in den Bereichen, die als seegangsdominiert (NIEMEYER 1983, 1991) anzusehen sind. Insbesondere die Wathöhenkennwerte werden hier in völlig unzureichender Form reproduziert. Hier liegt für weitere Anwendungen des Modells noch ein wesentlicher Entwicklungsbedarf.

Allerdings ist eine erfolgreiche Modellanwendung hier auch von Verbesserungen in den Parametrisierungen und empirischen morphodynamischen Relationen abhängig.

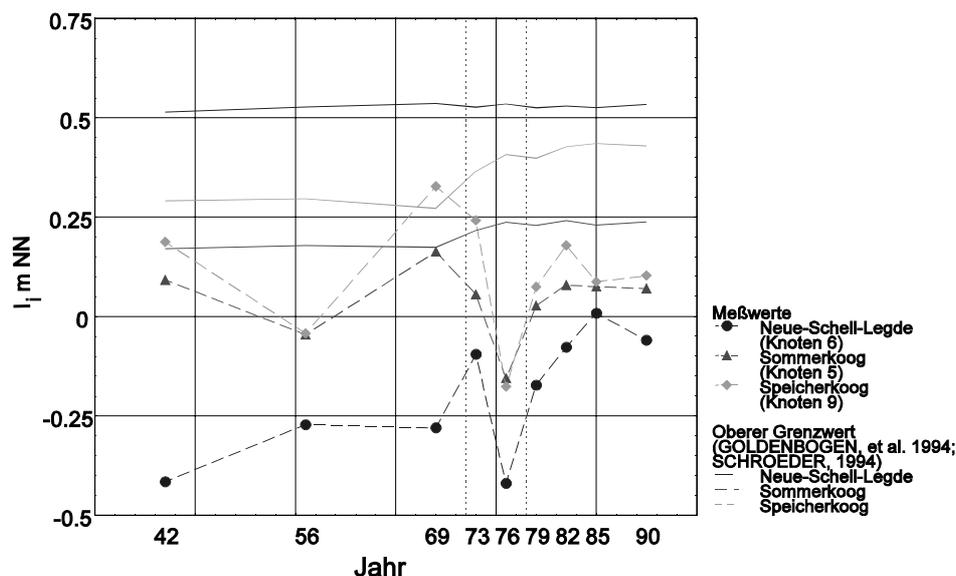


Abb. 6.12: Vergleich der Naturdaten des charakteristischen Wattniveaus mit dem oberen Grenzwert (NIEMEYER et al. 1995)

Die hier genutzte Parametrisierung des Watthöhenkennwertes als obere Einhüllende in Bezug zur Einzugsgebietsfläche (GOLDENBOGEN et al. 1994; SCHROEDER 1994) kann nur als eine erste Näherung angesehen werden. Sie ist physikalisch und damit natürlich auch statistisch völlig unzureichend, wie die Beispiele für die verschiedene Bereiche der Dithmarscher Bucht zeigen (Abb. 6.12): Die wirklichen Werte divergieren über die Zeit in unterschiedlichem, aber stets erheblichen Maß von dem Funktionswert.

7. ZUSAMMENFASSUNG UND SCHLUSSFOLGERUNGEN

Im deutschen Teil des deutsch-niederländischen Teilprojektes sind die Tidebecken der ostfriesischen Seegaten Osterems, Norderneyer Seegat, Wichter Ee, Accumer Ee, Otzumer Balje und Harle sowie das der Dithmarscher Bucht an der schleswig-holsteinischen Westküste untersucht worden. Hierbei hat erstmalig eine einheitliche Inventarisierung dieser Gebiete stattgefunden: für die ostfriesischen Tidebecken für die Zustände von etwa 1960, 1975 und 1990, für die Dithmarscher Bucht sogar für die von 1942, 1956, 1969, 1973, 1976, 1979, 1982, 1985 und 1990. Topographien und daraus extrahierte Parameter sind in Datenbanken zusammengestellt und bleiben für weitergehende Untersuchungen, aber auch für Anwendungen mit anderen Zielrichtungen verfügbar.

Die Untersuchungen bekannter und neu eingeführter morphodynamischer Gleichgewichtsbedingungen hat deren Anwendungsmöglichkeiten erhellt, aber auch deren Anwendungsgrenzen noch einmal verdeutlicht: Sie sind als Indikator mittelfristigen morphodynamischen Gleichgewichts hervorragend geeignet. Sie weisen ebenfalls Abweichungen von einem vorhanden gewesenen Gleichgewicht aus; ihr Prognosewert ist aber insofern begrenzt, als sie keine Aussage ermöglichen, wann eine Wiederherstellung des Gleichgewichts erfolgt ist und welche Zwischenzustände dabei eintreten können. Insofern ist es nicht verwunderlich, daß Versuche zu einer weitergehenden Differenzierung von derartigen morphodynamischen Gleichgewichtszuständen über Raum und Zeit zu keinen aussagekräftigen Ergebnissen führen. Die Ursache dafür ist nicht in der Unzuverlässigkeit der Ansätze zu sehen, sondern in deren grundsätzlicher Überforderung.

Einen -im Forschungsvorhaben WADE von vornherein angestrebten- Schritt zur Behebung dieses Defizites stellt das Modell TIDYN dar. Trotz erkannter Unzulänglichkeiten stellt es die erste Stufe des eigentlichen Forschungsziels dar: Ein Werkzeug zur Prognose morphologischer Folgewirkungen im Wattenmeer bei veränderten Randbedingungen wie beschleunigter Meeresspiegelanstieg, verstärkten Tidehubvariationen oder Verkleinerungen der Einzugsgebiete durch bauliche Eingriffe. Trotz aller inzwischen erreichten Fortschritte in der morphodynamischen Modellierung mit räumlich hochauflösenden und prozessual wesentlicher differenzierenden Werkzeugen bleibt das in TIDYN enthaltene Konzept eine zukunftsgerichtete und vielversprechende Perspektive, die zwar weiterer Verbesserungen bedarf, sie aber auch verdient.

8. DANKSAGUNG

Das deutsch-niederländische Forschungsvorhaben WADE wurde vom BUNDESMINISTERIUM FÜR BILDUNG, WISSENSCHAFT, FORSCHUNG UND TECHNOLOGIE unter der Kennziffer MTK 0508 gefördert. Es ist das erste und bisher einzige konkrete Vorhaben, das aus der institutionalisierten Kooperation zwischen dem BMBF mit der Generaldirektion RIJKSWATERSTAAT hervorgegangen ist. Inhaltlicher Anlaß war zum einen die seinerzeit aktuelle Diskussion um die möglichen Folgewirkungen eines beschleunigten Meeresspiegelanstiegs, aber vor allem auch die Ergebnisse der niederländischen Strategiestudie zum künftigen Küstenschutz "Kustverdediging na 1990". Der daraus resultierende Vorsprung der niederländischen Kollegen war nicht nur Ansporn, sondern auch Hilfe. Hierfür gebührt allen beteiligten niederländischen Kollegen Dank. In besonderem Maß gilt dies aber für Professor Dr. ir. Huib de Vriend, der das unter seiner Anleitung entwickelte Modell TIDYN vor seiner Veröffentlichung in einer Form zur Verfügung stellte, die eine unmittelbare Anwendung und Bearbeitung ermöglichte.

Grundlage aller erfolgreichen Arbeit ist die Verfügbarkeit verlässlicher Daten. Neben den Eigenbeständen der Forschungsstelle Küste hat das Projekt von der nachhaltigen Unterstützung durch die WASSER- UND SCHIFFAHTSDIREKTION NORDWEST (Ltd. VD Dr.-Ing. Schleider) und das seinerzeitige AMT FÜR LAND- UND WASSERWIRTSCHAFT HEIDE (RBD Dipl.-Ing. Gärtner + Dr.-Ing. Wieland) profitiert.

9. VERZEICHNISSE

9.1 Abkürzungen & Symbole

Einige der aufgeführten Parameter sind in Abschnitt 3.3.1 ausführlich erläutert.

Symbol	Einheit	Größenart, Bezeichnung
A_b	m^2	Einzugsgebietsfläche
A_c	m^2	Durchflußquerschnitt
\bar{A}_c	m^2	Gleichgewichtswert von A_c
A_i	m^2	Wattfläche
\bar{A}_i	m^2	Gleichgewichtswert von A_i
A_{sl}	m^2	Prielfläche
l_i	m NN	charakteristisches Wattniveau
\bar{l}_i	m NN	Gleichgewichtswert von l_i
m_{Jahre}	a	Zeitwert
MTnw	m NN	mittleres Tideniedrigwasser
MThb	m	mittlerer Tidehub
MThw	m NN	mittleres Tidehochwasser
MT $\frac{1}{2}$ w	m NN	mittleres Tidehalbwasser
NN		Normal Null
r^2		Bestimmtheitsmaß
R_{SL}	m	Meeresspiegelanstieg
S_i	m^3	Sedimentzu- und -abfuhr
t_s	a	Abstand zu einer Eindeichung
TEG		Watteileinzugsgebiet, Untergebiet eines WEG
V_b	m^3	Beckenvolumen
V_i	m^3	Sedimentvolumen
$V_{i,erf}$	m^3	Sedimentbedarf
V_o	m^3	Ebbdeltavolumen
V_T	m^3	mittleres Tidevolumen
WEG		Watteinzugsgebiet
Δh_i	m/a	Umlagerungsrate
Δt_i	a	Untersuchungsintervall

ΔV_i	m^3	Differenzvolumen
Λ	m	Ebbdelta-Auslenkung
τ_c	a	morphologische Zeitskala der Rinnen
τ_{fl}	a	morphologische Zeitskala der Watten

9.2 Abbildungen

Abb. 2.1:	Ostfriesisches Wattenmeer, Gebietseinteilung 1960 (siehe 9.4)	5
Abb. 2.2:	Ostfriesisches Wattenmeer, Gebietseinteilung 1975 (siehe 9.4)	5
Abb. 2.3:	Ostfriesisches Wattenmeer, Gebietseinteilung 1990 (siehe 9.4)	5
Abb. 2.4:	Dithmarscher Bucht, Gebietseinteilung 1969 mit den Eindeichungen von 1972 und 1978	6
Abb. 2.5:	Hydrodynamische Klassifikation von Küstenabschnitten (HAYES 1979)	9
Abb. 2.6:	Einfluß des Tidehubs auf die Morphologie von Küstenabschnitten (HAYES 1975)	9
Abb. 4.1:	Mündungsquerschnitt der Hauptrinne als Funktion des Tidevolumens des Einzugsgebietes (Ostfriesisches Wattenmeer)	20
Abb. 4.2:	Mündungsquerschnitt der Hauptrinne als Funktion des Tidevolumens des Einzugsgebietes (Dithmarscher Bucht); Anpassungsfunktionen für die Zeiträume vor und nach Beginn der Vordeichungen	21
Abb. 4.3:	Einzugsgebietsflächen in Abhängigkeit ihres Tidevolumens (Ostfriesisches Wattenmeer)	22
Abb. 4.4:	Einzugsgebiete und Tidevolumen (Dithmarscher Bucht); Anpassungsfunktionen für die Zeiträume vor und nach Beginn der Vordeichungen	23
Abb. 4.5:	Gezeitenflächen in Abhängigkeit von Einzugsgebietsflächen (Ostfriesisches Wattenmeer); Anpassungsfunktion für die Datensätze ohne Einbeziehung des TEG 73	25
Abb. 4.6:	Gezeitenflächen in Abhängigkeit von Einzugsgebietsflächen (Ostfriesisches Wattenmeer)	25
Abb. 4.7:	Gezeitenflächen in Abhängigkeit von Einzugsgebietsflächen (Dithmar- scher Bucht); Anpassungsfunktionen für die Zeiträume vor und nach Beginn der Vordeichungen	26

Abb. 4.8:	Gezeitenflächen in Abhängigkeit vom Tidevolumen der Einzugsgebiete (Ostfriesisches Wattenmeer ohne TEG 73)	26
Abb. 4.9:	Sedimentvolumen des Gezeitenbereiches als Funktion des Tidevolumens (Ostfriesisches Wattenmeer ohne TEG 73)	27
Abb. 4.10:	Sedimentvolumen des Gezeitenbereiches als Funktion des Tidevolumens (Dithmarscher Bucht); Anpassungsfunktionen für die Zeiträume vor und nach Beginn der Vordeichungen	27
Abb. 4.11:	Definition des Sedimentvolumens von Ebbdeltas (DEAN & WALTON 1975)	28
Abb. 4.12:	Sedimentvolumen der Ebbdeltas von Seegaten in Abhängigkeit vom Tidevolumen der zugehörigen Einzugsgebiete (Küsten der USA, Westfriesisches und Ostfriesisches Wattenmeer)	29
Abb. 4.13:	Zeitliche Entwicklung der Sedimentvolumen der Ebbdeltas und der Tidevolumen der Ostfriesischen Seegaten	30
Abb. 4.14:	Charakteristische Watthöhe l_i über die hierarchische Struktur der Gebietsgliederung der Osterems getrennt nach Memmertbalje und Ley/Bantsbalje	32
Abb. 4.15:	Charakteristische Watthöhe l_i und Einzugsgebietsfläche A_b des Ostfriesischen Wattenmeeres	34
Abb. 4.16:	Sedimentflächenverteilungsfunktion	38
Abb. 4.17:	Zeitliche Entwicklung des Koeffizienten V_i/V_t	39
Abb. 4.18:	Entwicklung der Umlagerungsrate nach einer Störung; Teileinzugsgebiet Speicherkoog	40
Abb. 4.19:	Zeitliche Entwicklung nach einer Störung oberhalb Normal Null für das Teileinzugsgebiet Kronenloch/Kronenloch Süd und Wöhrdener Loch	41
Abb. 4.20:	Zeitliche Entwicklung nach einer Störung oberhalb Normal Null für das Teileinzugsgebiet Kronenloch/Kronenloch Süd und Wöhrdener Loch	41
Abb. 4.21:	Zeitliche Entwicklung nach einer Störung oberhalb Normal Null der Dithmarscher Bucht	43

Abb. 5.1:	Durchschnittlich pro Jahr erforderliche Sedimentvolumen $V_{s,erf}$ für den Erhalt des morphodynamischen Gleichgewichts unter Annahme verschiedener Szenarien des relativen Meeresspiegelanstiegs (Ostfriesisches Wattenmeer und Dithmarscher Bucht)	46
Abb. 6.1:	Zweilinienschema (DIJKMAN et al. 1990)	48
Abb. 6.2:	Sedimentströme im Gebiet des Ebbdeltas	49
Abb. 6.3:	Entwicklung des Ebbdeltas des Norderneyer Seegats	50
Abb. 6.4:	Transportkomponenten innerhalb eines Modellsteins (Box) nach VAN DONGEREN & DE VRIEND (1994)	51
Abb. 6.5:	Hierarchische Pyramide der Rinnen und zugehörigen Teileinzugsgebiete des Tidebeckens der Osterems-Ostfriesisches Wattenmeer (NIEMEYER 1984, 1991)	53
Abb. 6.6:	Erweiterung der Transportvorgänge im Modell TIDYN durch Sedimenttransport R in die Rinne infolge Erosion der Watten des zugehörigen Wateinzugsgebietes (NIEMEYER 1994)	54
Abb. 6.7:	Einleitung der Teileinzugsgebiete in der Dithmarscher Bucht in Modellkompartimente (Knoten 9) (NIEMEYER et al. 1995)	55
Abb. 6.8:	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. 6.7) in der Dithmarscher Bucht (ohne Sedimenttransport von den Wattoberflächen zu den Rinnen) (NIEMEYER et al. 1995)	57
Abb. 6.9:	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. 6.7) in der Dithmarscher Bucht mit Sedimenttransport von den Wattoberflächen zu den Rinnen (NIEMEYER et al. 1995)	58
Abb. 6.10:	Modellaufbau für das Tidebecken des Norderneyer Seegats	59
Abb. 6.11:	Aufbau der Modellstruktur	59
Abb. 6.12:	Vergleich der Naturdaten des charakteristischen Wattniveaus mit dem oberen Grenzwert (NIEMEYER et al. 1995)	61

9.3 Tabellen

Tab. 5.1:	Durchschnittlich pro Jahr erforderliche Sedimentvolumen $V_{i, \text{erf}}$ für den Erhalt des morphologischen Gleichgewichts unter Annahme verschiedener Szenarien des relativen Meeresspiegelanstiegs	47
Tab. 6.1:	Seewärtige Auslenkung des Ebbdeltas; Vergleich der Rechnungen mit dem Modell DELTA und Naturdaten für das Norderneyer Seegat (GOLDENBOGEN et al. 1994)	50
Tab. 6.2:	Daten für die Modellrechnung	60

9.4 Watteinzugs- und -teileinzugsgebiete

Ostfriesisches Wattenmeer

01	Harle (H)
02	Gat vom Wrack
03	Breite Legde
04	Alte Carolinensieler Balje
05	Neue Carolinensieler Balje
10	Ostbalje
11	Wichter Ee (WE)
20	Kalfamergat West
21	Norderneyer Seegat (NS)
22	Westerriede
23	Osterriede
25	Lütetsburger Priel
26	Hilgenrieder Priel
27	Riffgat
28	Kalfamergat
29	Busetief
31	Accumersieler Balje
32	Rute
33	Dollart
34	Langeooger Balje
35	Accumer Ee (AE)
40	Hullbalje
41	Roggsand
42	Otzumer Balje (OB)
43	Schillbalje
44	Swinn
45	Landbalje
50	Juister Balje
51	Itzendorf-Plate
52	Mittelsand
53	Nordland
54	Slapersbucht
55	Bantsbalje Ost
56	Bantsbalje West
59	Osterems Ost
60	Osterems (OE)
61	Süderley

62	Greetsieler Nackenlegde
63	Greetsieler Wattfahrwasser
64	Norder Außentief
65	Buscher Riede
66	Utlandshörner Riede
67	Schweinsrücken
68	Leysander Priel
69	Norderley
72	Hamburger Sand
73	Westerbalje
74	Ley
75	Evermannsgat
76	Memmertbalje
77	Borkumer Wattfahrwasser
78	Kopersandpriel
79	Memmertbalje Ost
80	Nordlandpriel

Dithmarscher Bucht

15	Scholl-Loch West
16	Scholl-Loch Ost
17	Dwarsloch Ost (D)
18	Russenloch
20	Neue-Schell-Legde
21	Muschelloch West
22	Muschelloch Ost
23	Sommerkoog
24	Speicherkoog
25	Kronenloch Süd
26	Schell-Legde
27	Steertloch
28	Kronenloch
29	Wöhrdener Loch

9.5 Wasserstände und Tidehübe

Allen auf MThw, MTnw und MThb bezogenen Parametrisierungen und Berechnungen lagen folgende Fünfjahresmittel zugrunde:

Gebiet	Jahr	MThw	MTnw	MThb	Pegel
Osterems	1650			2,1	
	1750			2,2	
	1860			2,3	
	1912	+0,90	-1,42	2,32	Lütje Hörn (Werte aus Regression mit Pegel Norder- ney)
	1930	+0,97	-1,45	2,42	
	1960	+1,02	-1,39	2,41	
	1972	+1,02	-1,37	2,39	
	1975	+1,02	-1,38	2,4	
	1990	+1,08	-1,33	2,41	
Norderneyer Seegat	1650			2,05	
	1750			2,15	
	1860			2,25	
	1912	+0,99	-1,3	2,29	Norderney Hafen
	1930	+1,06	-1,32	2,38	
	1960	+1,10	-1,26	2,36	
	1975	+1,11	-1,26	2,37	Norderney Riffgat
	1990	+1,17	-1,2	2,37	
	Wichter Ee	1650			2,05
1750				2,15	
1860				2,25	
1912		+0,99	-1,3	2,29	Norderney Hafen
1930		+1,06	-1,32	2,38	
1960		+1,10	-1,26	2,36	
1975		+1,11	-1,26	2,37	Norderney Riffgat
1990		+1,17	-1,2	2,37	

Gebiet	Jahr	MThw	MTnw	MThb	Pegel
Accumer Ee	1650			2,2	
	1750			2,3	
	1860			2,4	
	1912			2,43	
	1930			2,45	nach Walther
	1960	+1,25	-1,36	2,61	Langeoog Ost
	1975	+1,27	-1,34	2,61	Langeoog Süd
	1990	+1,27	-1,34	2,61	
Otzumer Balje	1650			2,3	
	1750			2,4	
	1860			2,5	
	1912			2,53	
	1930			2,55	nach Walther
	1960	+1,25	-1,36	2,61	Langeoog Ost
	1975	+1,27	-1,34	2,61	Langeoog Süd
	1990	+1,27	-1,34	2,61	
Harle	1650			2,4	
	1750			2,5	
	1860			2,6	
	1912			2,63	
	1930			2,65	
	1960	+1,24	-1,52	2,76	Wangerooge West
	1975	+1,35	-1,40	2,75	
	1990	+1,40	-1,36	2,76	
	Dithmarscher Bucht	1942	+1,46	-1,77	3,23
1956		+1,48	-1,71	3,19	
1969		+1,54	-1,72	3,26	
1973		+1,49	-1,75	3,24	
1976		+1,53	-1,74	3,27	
1979		+1,55	-1,76	3,31	
1982		+1,62	-1,71	3,33	
1985		+1,63	-1,66	3,29	
1990		+1,62	-1,61	3,23	

9.6 Veröffentlichungen in Zusammenhang mit WADE

Niemeyer, H.D.: Long-term morphodynamical behaviour of the East Frisian islands and coast. Large Scale-Coastal Behavior '93, U.S. Geological Survey, Open-file report 93-381, 1993.

Niemeyer, H.D.: Case study Ley Bay: an alternative to traditional enclosure. Proc. of the 3rd Conference on Coastal & Port Engineering in Developing Countries, Mombasa/Kenya, 1991.

Niemeyer, H.D.: Long-term morphodynamical development of the East Frisian islands and coast. Proc. 24th Int. Conf. Coast. Eng. Kobe, ASCE, New York, 1995.

Schroeder, E.; Goldenbogen, R. & Kunz, H.: Parametrization for conceptual morphodynamic models of Wadden Sea areas. Proc. 24th Int. Conf. Coast. Eng., Kobe, ASCE, New York, 1995.

Goldenbogen, R.: Erste Ergebnisse empirischer Modellierung der Morphodynamik eines Watteinzugsgebietes am Beispiel der Dithmarscher Bucht. Die Küste, H. 56, Heide, 1994.

Schroeder, E.: Parametrisierungen morphodynamischer Strukturen von Watteinzugsgebieten für empirisch-konzeptionelle Modellierungen. Die Küste, H. 56, Heide, 1994.

Niemeyer, H.D.; Goldenbogen, R.; Schroeder, E. & Kunz, H.: Untersuchungen zur Morphodynamik des Wattenmeeres im Forschungsvorhaben WADE. Die Küste, H.57, Heide, 1995.

Schroeder, E.; Goldenbogen, R. & Kunz, H.: Longterm behaviour of the sediment-volume inside a tidal basin after poldering. Proc. 25th Int. Conf. Coast. Eng., Orlando, ASCE, New York, 1997.

Niemeyer, H.D. & H. de Vriend: Further Development of a Conceptual Morphodynamical Model for Tidal Basins in Wadden Sea Areas. Proceedings of the International Conference on Coastal Dynamics '95, pages 142-144.

9.7 Schrifttum

Andresen, F.H.: Die Sturmflut vom 3. Januar 1976 an der nordfriesischen Küste. Nordfriesland, Bd. 9, Heft 3/4, 1976.

Bakker, W.T.: A mathematical theorie about sand waves and its application on the Dutch isle of Vlieland. Engineering department for Coastal Research, Rijkswaterstaat, Den Haag, 1968.

Bakker, W.T.; Kerk, C. van der & Vroeg, J.H. de: Determination of coastal constants in mathematical line-models. 2nd European workshop on coastal zones, Loutraki, 1988.

Bantelmann, A.: Die Landschaftsentwicklung an der schleswig-holsteinischen Westküste, dargestellt am Beispiel Nordfriesland. Die Küste, Jg. 14, H. 2, Heide, 1966.

Barckhausen, J.: Entstehung und Entwicklung der Insel Langeoog. Beiträge zur Quartär-Geologie und Quartär-Paläogeographie eines ostfriesischen Küstenabschnittes. Oldenburger Jahrbuch, Band 68, Oldenburg i.O., 1969.

Bendegom, L. van: Enkele beschouwingen over de vorming en vervorming van wadden. Waddensymposium 1950. Tijdschrift van het Koninklijk Nederlandsch Aardrijkskundig Genootschap, 1950.

Bilse, D.P.: A large scale model of the morphological behaviour of the outer delta of tidal inlets. delft hydraulics, H 1215, 1993.

Dean, R.J. & Walton, T.L.: Sediment transport processes in the vicinity of inlets with special reference to sand trapping. In: Cronin, L.E. (ed.): Estuarine Research, vol. 2., Geology and Engineering, Academic Press, New York, 1975.

Dieckmann, R.: Geomorphologie, Stabilitäts- und Langzeitverhalten von Wateinzugsgebieten der Deutschen Bucht. Mitteilungen des Franzius-Instituts der Universität Hannover, H. 60, 1985.

Dongeren, A.R. van: A model of the morphological behaviour and stability of channels and flats in tidal basins. delft hydraulics, H 824.55, 1992.

Dongeren, A.R. van & Vriend, H.J. de: A model of morphological behaviour in tidal basins. Coastal Engineering, Vol. 22, Nos. 3/4, Elsevier, Amsterdam, 1994.

Eitner, V.: Sedimentdynamik im Strandbereich einer brandungsbeeinflussten, mesotidalen Barriere-Insel unter Berücksichtigung der Auswirkungen künstlicher Strandauffüllungen (Norderney, südliche Nordsee). Dissertation an der Westfälischen Wilhelms-Universität zu Münster, 1993.

Eysink, W.D.: Morfologie van de Waddenzee. Waterloopkundig Laboratorium, 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. & Biegel, E.J.: Impact of sea level rise on the morphology of the Wadden Sea in the scope of its ecological function. Investigations on empirical relations. delft hydraulics, H 1300, 1992.

Gerritsen, F.: Morphological stability of inlets and channels of the Western Wadden Sea. Rijkswaterstaat, Dienst Getijdewateren, GWAO-90.019, Den Haag, 1990.

Göhren, H.: Triftströmungen im Wattenmeer. Mitteilungen des Franzius-Instituts für Grund- und Wasserbau der Universität Hannover, H. 30, 1968.

Goldenbogen, R.: Erste Ergebnisse empirischer Modellierung der Morphodynamik eines Wattenzugsgebietes am Beispiel der Dithmarscher Bucht. Die Küste, H. 56, Heide, 1994.

Goldenbogen, R.: Dokumentation zu Erweiterungen der Software des Modells TIDYN. NLÖ -Forschungsstelle Küste-, Dezernat Hydrographie des Küstengebietes, Norderney, 1995a.

Goldenbogen, R.: Macro's für Arc/Info. Dokumentation zu den im Rahmen des Forschungsvorhabens WADE verwendeten Routinen in der Arc/Info Macro Language. NLÖ -Forschungsstelle Küste-, Dezernat Hydrographie des Küstengebietes, Norderney, 1995b.

Goldenbogen, R.; Schroeder, E.; Kunz, H. und Niemeyer, H.D.: Zwischenbericht zum Forschungsvorhaben "WADE" (Wadden Sea morphological development). Niedersächsisches Landesamt für Ökologie -Forschungsstelle Küste-, Zwischenbericht zum Forschungsvorhaben MTK 0508, Norderney, 1994.

Goldenbogen, R.; Schroeder, E. & Kunz, H.: Variations of ebb-delta volumes along the East-Frisian Islands in the last hundred years. Proc. 3rd Int. Conf. Littoral, Portsmouth, 1996 (accepted paper).

Hayes, M.O.: Morphology of sand accumulation in estuaries. In: Cronin, L.E. (ed.): Estuarine Research, vol. 2., Geology and Engineering, 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.

Homeier, H.: Historisches Kartenwerk 1:50.000 der niedersächsischen Küste. Jber. 1961 Forsch.-Stelle f. Insel- u. Küstenschutz, Bd. 13, Norderney, 1962.

Homeier, H.: Der Gestaltwandel der Ostfriesischen Küste im Laufe der Jahrhunderte. Ein Jahrtausend ostfriesischer Deichgeschichte. Ostfriesland im Schutze des Deichs, Bd. II, Hrsg. Deichacht Krummhörn, Pewsum, 1969.

IPCC: Strategies for adaption to sea level rise. Intergovernmental Panel on Climate Change, Response Strategies Working Group, Editor: Dutch Ministry of Transport and Public Works, Rijkswaterstaat, Tidal Water Division, Den Haag, 1992.

Krüger, W.: Meer und Küste bei Wangeroog und die Kräfte, die auf ihre Gestaltung einwirken. Zeitschrift für Bauwesen, Berlin, 1911.

Kunz, H.: History of seawalls and revetments on the island of Norderney. Proc. of Coastal Sediments '87, ASCE, New York, vol. 1, 1987.

Liebig, W.: GIS-applications to Wadden Sea areas. Proc. of the Int. Coastal Congress ICC - Kiel '92, Verlag Peter Lang, Frankfurt a. M., 1993.

Luck, G.: Der Einfluß der Schutzwerke der ostfriesischen Inseln auf die morphologischen Vorgänge im Bereich der Seegaten und ihrer Einzugsgebiete. Mitt. d. Leichtweiß-Inst. f. Wasserbau, H. 47, Braunschweig, 1975.

Lüders, K.: Die Entstehung der ostfriesischen Inseln und der Einfluß der Dünenbildung auf den geologischen Aufbau der ostfriesischen Küste. Probleme der Küstenforschung im südlichen Nordseegebiet, Band 5, 1953.

Niemeyer, H.D.: Über den Seegang an einer inselgeschützten Wattküste. BMFT-Forschungsbericht MF 203, Norderney, 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. of the 3rd Conference on Coastal & Port Engineering in Developing Countries, Mombasa/Kenya, 1991.

Niemeyer, H.D.: Zur Systematik hydrodynamisch-morphologischer Wechselwirkungen im Einzugsbereich der Otzumer Balje. Berichte zur Ökosystemforschung, Hydrographie - Nr. 5, Teil F, NLWA -Forschungsstelle Küste-, Norderney, 1992.

Niemeyer, H.D.: Long-term morphodynamical behaviour of the East Frisian islands and coast. Large Scale-Coastal Behavior '93, U.S. Geological Survey, Open-file report 93-381, 1993.

Niemeyer, H.D.: Further development of a process-based morphodynamical model for tidal basins - box- and tree-modell. 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 island and coast. Proc. 24th Int. Conf. O. Coast. Eng. Kobe/Japan, ASCE, New York, 1995.

Niemeyer, H.D.; Goldenbogen, R.; Schroeder, E. & Kunz, H.: Untersuchungen zur Morphodynamik des Wattenmeeres im Forschungsvorhaben WADE. Die Küste, H.57, Heide, 1995.

Niemeyer, H.D. & H. de Vriend: Further Development of a Conceptual Morphodynamical Model for Tidal Basins in Wadden Sea Areas. Proceedings of the International Conference on Coastal Dynamics '95, pages 142-144.

Nummedal, D. & 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, Civil Engineering, Vol. 1, No. 8, 1931.

O'Brien, M.P.: Equilibrium flow areas of tidal inlets on sandy coasts. Proc. of the 10th Conf. on Coastal Engineering, ASCE (1966), Chapter 39, 1967.

Renger, E.: Untersuchungen von Wateinzugsgebieten. Mitteilungen des Franzius-Institutes der Universität Hannover, H. 40, 1974.

Renger, E.: Quantitative Analyse der Morphologie von Wateinzugsgebieten und Tidebecken. Mitteilungen des Franzius-Institutes der Universität Hannover, H. 43, 1976.

Rodloff, W.: Über Wattwasserläufe. Mitteilungen des Franzius-Institutes für Grund- und Wasserbau der Universität Hannover, H. 34, 1970.

Ronde, J.G. de & Vogel, J.A.: Kustverdediging na 1990. technisch rapport 6: zeespiegelrijzing, hydro meteo scenario's. Ministerie van verkeer en waterstraat, Rijkswaterstaat, Nota GWAO-88.015, Den Haag, 1988.

RWS-DGW: Wassend waters. Rijkswaterstaat, Dienst Getijdewateren, Nota GWAO-90.026, Den Haag, 1991.

Schroeder, E.: Parametrisierungen morphodynamischer Strukturen von Wateinzugsgebieten für empirisch-konzeptionelle Modellierungen. Die Küste, H. 56, Heide, 1994.

Schroeder, E. & Goldenbogen, R.: FV Wadden Sea morphological development. Dokumentation über Datenbestände. NLÖ -Forschungsstelle Küste-, Dezernat Hydrographie des Küstengebietes, Norderney, 1995.

Schroeder, E.; Goldenbogen, R. & Kunz, H.: Parametrization for conceptual morphodynamic models of Wadden Sea areas. Proc. 24th Int. Conf. Coast. Eng., Kobe, ASCE, New York, 1994.

Schroeder, E.; Goldenbogen, R. & Kunz, H.: Parametrization of intertidal areas and volumes. Proc. 4th Conf. Coast. & Port Eng. Develop. Countr., Rio de Janeiro, 1995.

Schroeder, E.; Goldenbogen, R. & Kunz, H.: Development of the sedimentvolume inside a tidal basin as a result of poldering. Proc. 3rd Int. Conf. Littoral, Portsmouth, 1996a (accepted paper).

Schroeder, E.; Goldenbogen, R. & Kunz, H.: Longterm behaviour of the sediment-

volume inside a tidal basin after poldering. Proc. 25th Int. Conf. Coast. Eng., Orlando, ASCE, New York, 1996b (accepted paper).

Sha, L.P.: Sedimentological studies of the ebb-tidal deltas along the West Frisian Islands, the Netherlands. *Geologica Ultraiectina*, No. 64, University Utrecht, 1990.

Siefert, W.: Umsatz- und Bilanzanalysen für das Küstenvorfeld der Deutschen Bucht. Grundlagen und erste Auswertungen (Teil I der Ergebnisse eines KFKI-Projektes). *Die Küste*, H. 45, Heide, 1987.

Stive, M.J.F. & Eysink, W.D.: Voorspelling ontwikkeling kustlijn 1990-2090, fase 3. Deelrapport 3.1: Dynamische model van het Nederlandse kuststelsel. *delft hydraulics*, Rap. H 825, 1989.

Streif, H.: Das ostfriesische Küstengebiet. Nordsee, Inseln, Watten und Marschen. Sammlung geologischer Führer, Gebr. Borntraeger Berlin-Stuttgart, 2. Aufl., 1990.

Vriend, H.J. de; Bakker, W.T. & Bilse, D.P.: A morphological behaviour model for the outer delta of mixed-energy tidal inlets. *Coastal Engineering*, Vol. 23, Elsevier, Amsterdam, 1994.

Walther, F.: Die Gezeiten und Meeresströmungen im Norderneyer Seegat. *Die Bau-technik*, Jg. 12, H. 13, Berlin, 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, Norderney, 1972.

Walton, T.L. & Adams, W.D.: Capacity of inlet outer bars to store sand. Proc. of the 15th Coastal Engineering Conference Honolulu, Hawaii, Vol. II, 1976.

Wieland, P.: Untersuchung über geomorphologische Veränderungen in der Dithmarscher Bucht. *Die Küste*, H. 40, Heide, 1984.

Wieland, P.; Thies, E. & Bergheim, V.: Bilanz hydrologischer und morphologischer Untersuchungen in der Dithmarscher Bucht. *Büsumer Gewässerkundliche Berichte*, Heft 54, ALW Heide, Dez. Gewässerkunde, Büsum, 1987.