

# Parametrisierungen morphodynamischer Strukturen von Wateinzugsgebieten für empirisch-konzeptionelle Modellierungen

Von ERNST SCHROEDER

## Zusammenfassung

Es werden Parameter aus hydrographischen und morphologischen Randbedingungen eines Wateinzugsgebietes bestimmt und prozeßkonform in Beziehung gesetzt. Mittels Regressionsanalysen werden diese Funktionsgleichungen, welche die hydrodynamisch-morphologischen Wechselwirkungen von Wateinzugsgebieten beschreiben, auf der Basis von Naturdaten geprüft. Den Auswertungen liegen neben den Parametern der Haupteinzugsgebiete auch die der Teileinzugsgebiete zugrunde.

## Summary

*Parameters which influence the hydrographic and morphological boundary conditions of tidal basins are defined and correlated. On the basis of field data their correlation is verified using regression analysis. The resulting functions will help to describe mutual effects of morphological processes in the wadden area. The evaluation reflects on both the total basin and its subsystems.*

## Inhalt

1. Einleitung .....	151
2. Untersuchungsgebiete .....	152
3. Datengrundlage .....	152
4. Parameter .....	154
4.1 Allgemeines .....	154
4.2 Definition der Parameter .....	154
5. Auswertung .....	155
6. Zusammenfassung und Schlußfolgerungen .....	166
7. Danksagung .....	167
8. Schriftenverzeichnis .....	167
Anhang .....	168

## 1. Einleitung

Die nachfolgenden Ausführungen behandeln Untersuchungen, die im Rahmen des Forschungsvorhabens „WAdden sea morphological DEvelopment with special emphasis of the impact of an increasing relative sea level rise“ (WADE) (GOLDENBOGEN et al., 1994) ausgeführt worden sind. Als Wateinzugsgebiete werden physiographische Einheiten entlang sandiger Küsten bezeichnet, die buchtenförmig oder durch Barriereinseln und Wattwasser-scheiden begrenzt sind. Für Wateinzugsgebiete des Ostfriesischen Wattenmeeres und der Dithmarscher Bucht sind hydrodynamisch-morphologische Parametrisierungen untersucht worden, die als Grundlage für die Entwicklung konzeptioneller morphodynamischer Mo-

delle dienen. Ziel der Parametrisierungen ist die Erfassung und Beschreibung von hydrodynamisch-morphologischen Wechselwirkungen.

Grundsätzlich wird hierbei von der Vorstellung eines dynamischen Gleichgewichtes zwischen einwirkenden hydrodynamischen Kräften und reagierenden morphologischen Randbedingungen ausgegangen. Dies besagt, daß eine Variation der Randbedingungen wie z. B. die Änderung des Meeresspiegels oder Abdeichungen im Einzugsgebiet immer Reaktionen der übrigen Randbedingungen hervorrufen, die das System veranlassen, einem neuen morphodynamischen Gleichgewichtszustand zuzustreben. Die ermittelten Beziehungen gelten für Gleichgewichtszustände, die als quasi stationär betrachtet werden. Für Übergangszustände müssen sie dahin gehend erweitert werden, daß die zeitliche Anpassung der einzelnen Parameter an veränderte Randbedingungen erfaßt werden kann.

Es wurden sowohl aus der Literatur bekannte empirische Parametrisierungen (O'BRIEN, 1931, 1967; WALTHER, 1934, 1972; RODLOFF, 1970; RENGER, 1976; EYSINK, 1979, 1991; DIECKMANN, 1985; NIEMEYER, 1991) untersucht, als auch im Rahmen des Projektes modifizierte bzw. ergänzend eingeführte Beziehungen.

Die Erweiterung der bisherigen Parametrisierungen um den Wathöhennennwert  $I_1$  (DIECKMANN, 1985) erfolgte mit der Zielsetzung, die Höhenlage einer kennzeichnenden Wattfläche quantitativ beschreiben zu können.

Die statistischen Analysen erstrecken sich auch auf Teileinzugsgebiete, die hierarchisch gestaffelt zum Teil nur den Einzugsbereich einer einzelnen Wattrinne beinhalten.

## 2. Untersuchungsgebiete

Das Untersuchungsgebiet Ostfriesisches Wattenmeer mit einer Gesamtfläche von rund 800 km<sup>2</sup> unterteilt sich in die Haupteinzugsgebiete Osterems (OE), Norderneyer Seegat (NS), Wichter Ee (WE), Accumer Ee (AE), Otzumer Balje (OB) und Harle (H) (Abb. 1). Die Haupteinzugsgebiete sind in Teileinzugsgebiete mit hierarchischer Struktur gegliedert.

Das Untersuchungsgebiet der Dithmarscher Bucht umfaßt eine Fläche von etwa 200 km<sup>2</sup>. Es stellt ein Haupteinzugsgebiet dar, das sich aus 14 ebenfalls hierarchisch strukturierten Teileinzugsgebieten zusammensetzt (Abb. 2).

## 3. Datengrundlage

Die Grundlage der ausgewerteten Daten bilden topographische Wattkarten, die zunächst digitalisiert und aufbereitet in einer Datenbank (ArcInfo®, ESRI) archiviert worden sind. Hierzu wurden für das Ostfriesische Wattenmeer die Zustände um 1960 (Topographische Wattkarte der FSK, M: 1:25000), 1975 (Küstenkarte des KFKI, M: 1:25000) und 1990 (Bundeswasserstraßenkarte, M: 1:25000)<sup>1)</sup> und für die Dithmarscher Bucht die Zustände um 1942, 1956, 1969, 1973, 1976, 1979, 1982, 1985 und 1990 (Grundkarte der Wattaufnahmen ALW Heide, M: 1:10000) herangezogen. Mit Hilfe des Geographischen Informationssystems ArcInfo® wurden hieraus Parameter (Flächen, Volumina) berechnet, welche die Datengrundlage der statistischen Untersuchungen bilden (LIEBIG, 1993).

1) Als ASCII-Dateien von der WSD NW Aurich zur Verfügung gestellt

## Ostfriesisches Wattenmeer

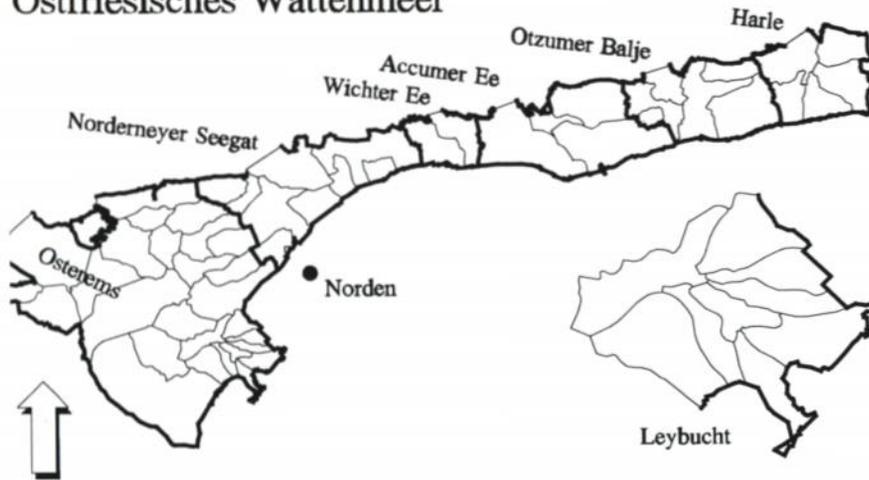


Abb. 1: Untersuchungsgebiet Ostfriesisches Wattenmeer (1975)

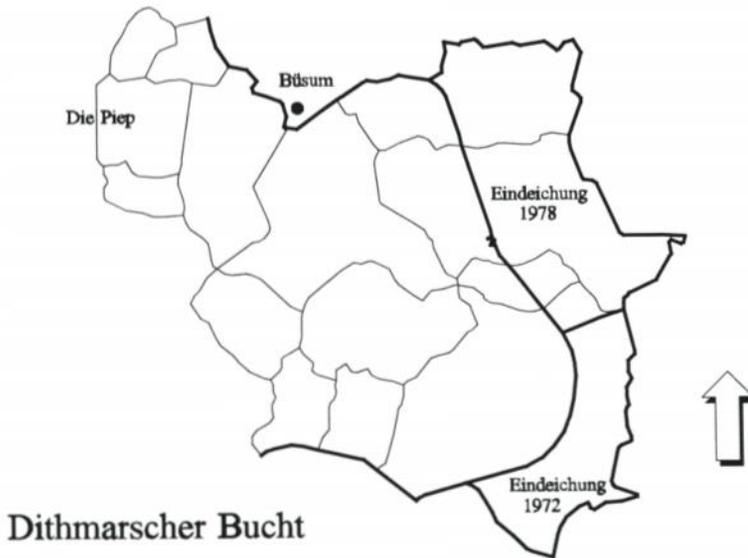


Abb. 2: Untersuchungsgebiet Dithmarscher Bucht (1969) mit den Eindeichungen von 1972 und 1978

## 4. Parameter

### 4.1 Allgemeines

Die morphodynamischen Parametrisierungen der Wateinzugsgebiete basieren auf Höhenlagen, Flächen und Volumina, die sich aus der Geometrie der Einzugsgebiete und den örtlichen Tideparametern ergeben. Als Bezugshöhen wurden als obere Grenze das mittlere Tidehochwasser (MThw), als untere Grenze das mittlere Tideniedrigwasser (MTnw) und als mittlere Bezugshöhe Normal Null (NN) eingeführt, das zur Zeit etwa dem mittleren Tide-mittelwasser (MTmw) entspricht (LASSEN, 1989).

Die Bezugshöhen ergeben sich aus den fünfjährigen Mittelwerten der für das jeweilige Einzugsgebiet repräsentativen Pegel. Datenlücken wurden mit Hilfe von Regressionen zu benachbarten Pegeln geschlossen.

Die Bezugsebenen wurden als horizontale Flächen definiert, deren Höhe aus dem arithmetischen Mittel der zu einem Einzugsgebiet gehörenden Pegel berechnet wurde. Hierbei wurden weder die unterschiedlichen Formen der Tidekurven noch die unterschiedlichen Eintrittszeiten der Hoch- und Niedrigwasserstände zwischen den see- und landwärtigen Pegeln eines Einzugsgebietes berücksichtigt. Exemplarische Vergleichsrechnungen zur Abschätzung des hieraus resultierenden relativen Fehlers weisen sowohl für die mittlere Wassertiefe als auch für das Beckenvolumen Differenzen von weniger als einem Prozent aus, wobei zu bedenken ist, daß eine exaktere Berechnung der Wasserspiegelfläche nur mit Hilfe eines mathematischen Tidemodells möglich ist.

Die Koeffizienten der untersuchten Beziehungen, wie sie für das Ostfriesische Wattenmeer und die Dithmarscher Bucht ermittelt wurden, sind aufgrund unterschiedlicher Bezugswasserstände mit Angaben aus der Literatur nicht unmittelbar vergleichbar. Sie stellen gebietstypische Ergebnisse dar.

Die Zusammenhänge werden grundsätzlich bestätigt. Dies gilt auch für die Koeffizienten der Teileinzugsgebiete, die gute Übereinstimmungen mit denen der Hauptgebiete aufweisen. Einzelne abweichende Ergebnisse sind auf lokale Besonderheiten zurückzuführen.

Im einzelnen werden die nachfolgenden Parameter und deren wechselseitige Beziehungen erläutert:

- $A_c$  Durchflußquerschnitt
- $A_b$  Einzugsgebietsfläche
- $A_i$  Wattfläche
- $l_i$  Wathöhenkennwert
- $V_i$  Wattvolumen
- $V_T$  Tidevolumen.

Die aufgeführten Parameter stellen Grundgrößen zur morphodynamischen Charakterisierung eines Einzugsgebietes dar. Die Natur der Ansätze gestattet es, die Sedimentstruktur der Untersuchungsgebiete unberücksichtigt zu lassen.

### 4.2 Definition der Parameter

- $A_c$ : Der Durchflußquerschnitt ist als Querschnitt mit der stärksten Einschnürung im Seegat definiert. Für die Wattrinnen liegt der Durchflußquerschnitt  $A_c$  im Bereich

der stärksten Einschnürungen der seewärtigen Begrenzungen der Teileinzugsgebiete.

- $A_b$   $M_{Thw}$ : Als Wasserspiegelfläche bei mittlerem Tidehochwasser kennzeichnet sie die Gesamtfläche des Einzugsgebietes bei mittleren Tideverhältnissen.
- $A_i$   $M_{Tnw}$ : Die Wattfläche ist als Differenz der benetzten Flächen bei MThw und MTnw definiert. Sie beschreibt die Gesamtfläche des Watts bei MTnw.
- $l_i$ : Der Wathöhenskennwert benennt die auf NN bezogene Höhe, bei der die Wattfläche zur Hälfte trockengefallen ist.
- $V_i$   $M_{Tnw}$ : Analog zur Berechnung der Wattfläche  $A_i$  wurde das Wattvolumen  $V_i$  aus dem Sedimentvolumen zwischen den Bezugshorizonten MThw und MTnw in Anlehnung an WIELAND et al. (1987) berechnet.
- $V_T$ : Das Tidevolumen ist der Wasserkörper, der sich als Differenz aus dem Volumen bei MThw und dem Volumen bei MTnw ergibt. Dies entspricht der während einer mittleren Tide in das Einzugsgebiet ein- und ausströmenden Wassermenge.

## 5. Auswertung

Im Rahmen der Untersuchungen wurden zunächst aus der Literatur bekannte funktionale Zusammenhänge kennzeichnender Parameter (O'BRIEN, 1931; WALTHER, 1934, 1972; RODLOFF, 1970; RENGER, 1976; EYSINK, 1979) angewendet. Diese Abhängigkeiten wurden bestätigt, wobei die ermittelten Koeffizienten gebietsabhängig variieren. In Tabelle 1 und 2 (Anhang) sind neben den Funktionsgleichungen die Koeffizienten (a bis h) bzw. Exponenten (k, l) und das Bestimmtheitsmaß ( $R^2$ ) angegeben. Weiterhin wurde der 95-%-Vertrauensbereich untersucht. Die Daten sind zudem nach einem Stabilitätskriterium von DIECKMANN (1985) geprüft worden (GOLDENBOGEN et al., 1994).

Die hierarchische Gliederung der Untersuchungsgebiete ermöglichte die Berücksichtigung von Teileinzugsgebieten im Rahmen der Regressionsanalysen. Naturgemäß sind die Streuungen um die Funktionsgleichungen bei Teileinzugsgebieten größer. Dies resultiert aus den relativ zur Größe stärkeren Umlagerungsprozessen und führt so zu größeren Schwankungen der einzelnen Parameter. Weiterhin sind die Teileinzugsgebiete stärker durch lokale Gegebenheiten geprägt wie zum Beispiel durch geologisch-sedimentologische Randbedingungen oder ihre Lage im Einzugsgebiet.

Die ersten drei Grundgleichungen basieren auf den von O'BRIEN (1931) angegebenen Parametern:

$$\begin{aligned} A_c &= a_{ij} \cdot A_b \\ A_c &= b_j \cdot V_T \\ A_b &= c_i \cdot V_T \end{aligned}$$

Als Querschnittsfläche  $A_c$  wurde die Fläche bei NN ausgewählt, da sie den Querschnitt mit dem größten Durchfluß darstellt (GERRITSEN, 1990), (Abb. 3 und 4). Die auf NN bezogenen Querschnittsdaten weisen die geringsten Streuungen auf. Die Auffächerung der jahrgangsbezogenen Regressionsfunktionen in Abbildung 4 entgegen dem Uhrzeigersinn ist auf die Verringerung der Einzugsgebietsfläche  $A_b$  infolge der Eindeichungen in der Dithmarscher Bucht in den Jahren 1972 und 1978 zurückzuführen.

Die Geraden in den Abbildungen 5 und 6 stellen die zweite der angegebenen Grundgleichungen dar. Das Tidevolumen  $V_T$  ist eine wesentliche formbildende Größe, deren

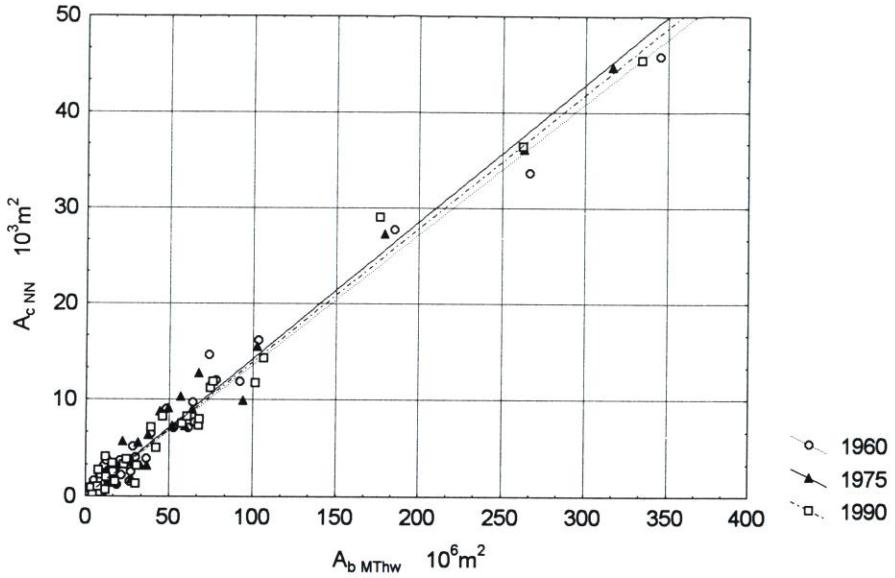


Abb. 3: Durchflußquerschnitt  $A_{c\text{NN}}$  zu Wattenzugsgebietsfläche  $A_{b\text{MThw}}$  des Ostfriesischen Wattenmeeres

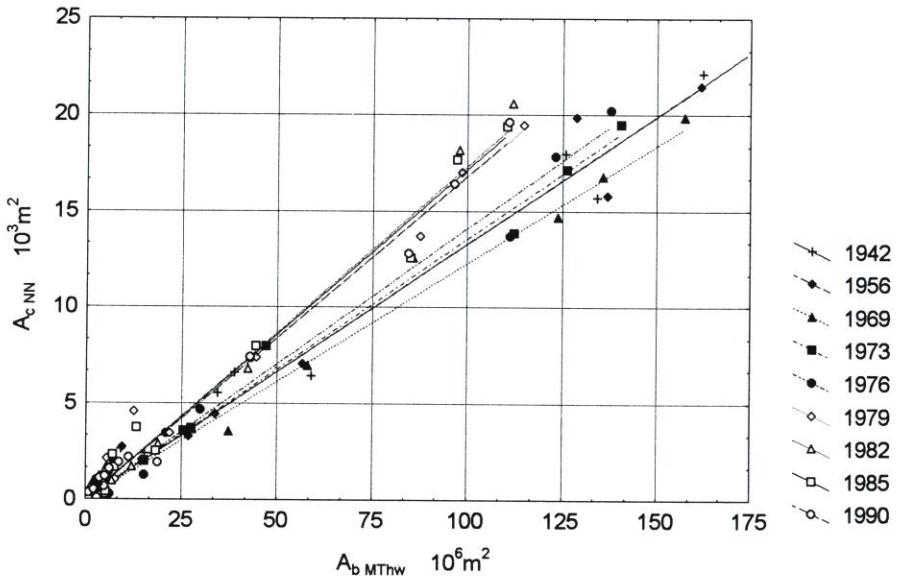


Abb. 4: Durchflußquerschnitt  $A_{c\text{NN}}$  zu Wattenzugsgebietsfläche  $A_{b\text{MThw}}$  der Dithmarscher Bucht

Transportkapazität in Zusammenhang mit dem Tideverlauf von der Strömungsgeschwindigkeit abhängt.

Die dritte Beziehung stellt den Zusammenhang von Tidevolumen  $V_T$  und Einzugsgebietsfläche  $A_{b\ MThw}$  dar (Abb. 7 und 8). Die Verkleinerung der Einzugsgebietsfläche  $A_{b\ MThw}$  und des Tidevolumens  $V_T$  in der Dithmarscher Bucht ist ursächlich auf die erfolgten Eindeichungen zurückzuführen. Hierbei muß zusätzlich berücksichtigt werden, daß sich für 1973 ein um 2 cm geringerer MThb ergab. Die Verringerung des Tidevolumens ergibt sich somit als Summe aus der Abdeichung (23 Mio.  $m^3$ ) und der Abnahme des mittleren Tidehubes (3 Mio.  $m^3$ ) zu rund 26 Mio.  $m^3$ .

Die zweite Gruppe der Regressionsanalysen stellt den Bezug zwischen den oben angegebenen Parametern und denen, welche die Morphologie beschreiben, her. Die Definition der morphologischen Parameter orientierte sich an den hydrographischen Randbedingungen. Folgende Funktionsgleichungen wurden untersucht:

$$\begin{aligned} A_c &= d_{ij} \cdot A_i \\ A_c &= e_{ij} \cdot V_i \\ V_i &= g_{ij} \cdot A_i \\ A_i &= f_i \cdot V_T^k \\ A_i &= h_i \cdot A_b^l \end{aligned}$$

Die Auswertungen der ersten beiden Gleichungen weisen vergleichbare Abhängigkeiten aus (Abb. 9 bis 12), die zum Teil durch stärkere Streuungen gekennzeichnet sind. Es läßt sich eine deutliche Zuordnung nach gestörten und ungestörten Gebieten in der Dithmarscher Bucht ausmachen. Die Untersuchung der dritten Gleichung weist auf straffe Zusammenhänge hin (Abb. 13 und 14). Insbesondere die Daten der Dithmarscher Bucht zeichnen sich durch sehr geringe Streuungen aus.

Die folgenden Funktionsgleichungen beschreiben den Zusammenhang zwischen dem Tidevolumen  $V_T$  und der Wattfläche  $A_{i\ MTnw}$ . Sie sind durch einen nichtlinearen Zusammenhang gekennzeichnet (Abb. 15 und 16). Die Abnahme der Wattfläche  $A_{i\ MTnw}$  in beiden Untersuchungsgebieten ist zum Teil auf das Ansteigen des MTnw über den gesamten Untersuchungszeitraum bei annähernd gleichbleibendem Tidehub zurückzuführen.

Die Ergebnisse der Regressionsanalysen ließen es angebracht erscheinen, aus der Literatur bekannte Ansätze (RENGER, 1976; EYSINK, 1991) für den Zusammenhang von Watt- und Einzugsgebietsflächen durch gebietsdifferenzierte Ansätze zu ersetzen. Eine geeignete Annäherung für das Gebiet der Dithmarscher Bucht führt auf die Funktionsgleichung

$$A_i = 3,37 \cdot A_{b\ MThw}^{0,92} \quad (A \text{ in } m^2).$$

Im Gegensatz zur Dithmarscher Bucht weisen die Daten des Ostfriesischen Wattenmeeres auf eine stärkere Abnahme der Wattfläche mit wachsender Einzugsgebietsfläche hin. Es ergibt sich aus den drei Untersuchungsjahrgängen (1960, 1975, 1990) eine mittlere Funktionsgleichung von

$$A_i = 18,82 \cdot A_{b\ MThw}^{0,82} \quad (A \text{ in } m^2),$$

wobei die Streuungen der Daten ab einem Wert von  $A_{b\ MThw} = 75 \text{ km}^2$  geringfügig zunehmen (Abb. 17).

Bei den besonders markierten Datenpunkten in Abbildung 17 handelt es sich um das

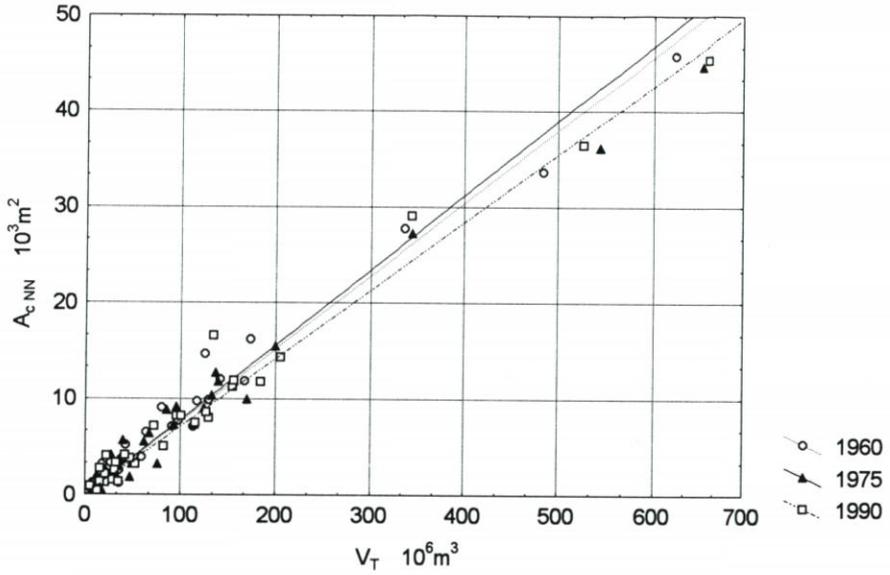


Abb. 5: Durchflußquerschnitt  $A_{c,NN}$  zu Tidevolumen  $V_T$  des Ostfriesischen Wattenmeeres

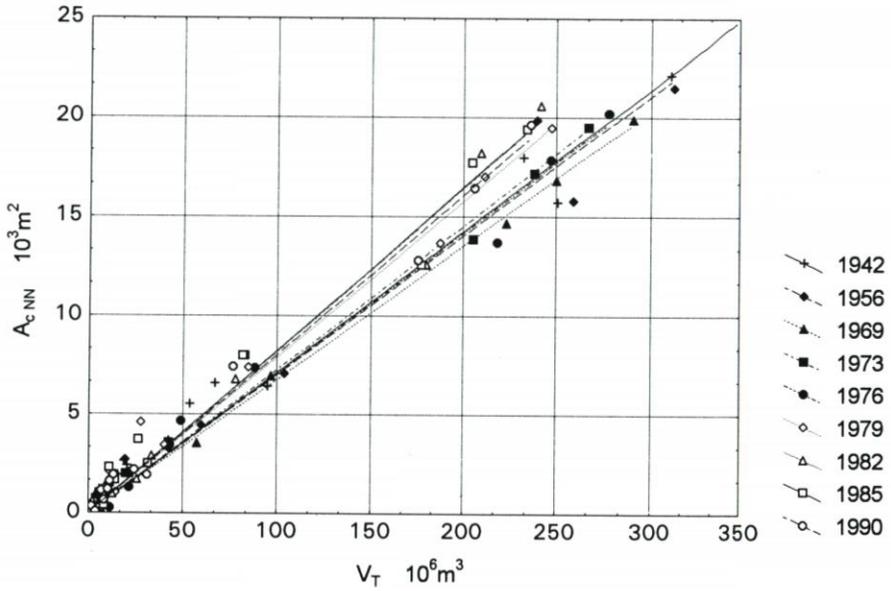


Abb. 6: Durchflußquerschnitt  $A_{c,NN}$  zu Tidevolumen  $V_T$  der Dithmarscher Bucht

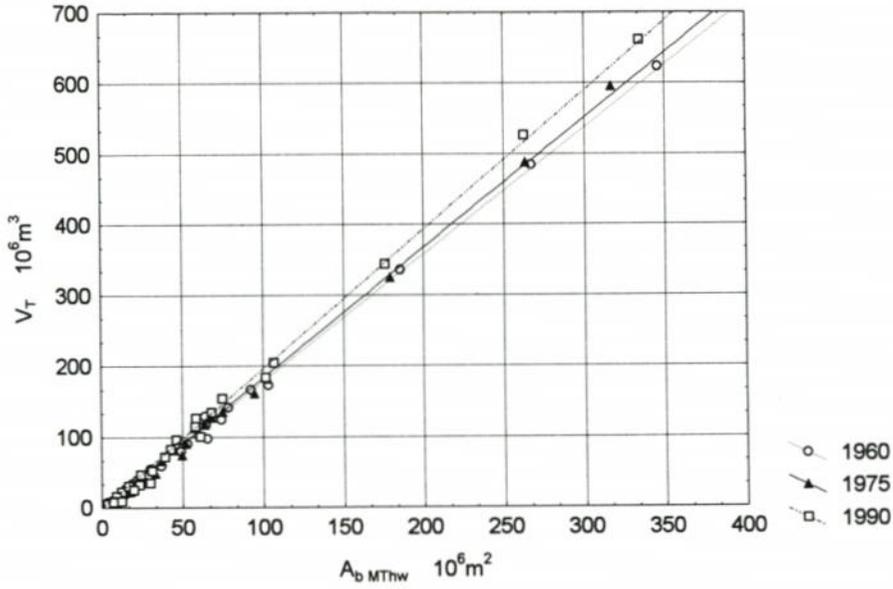


Abb. 7: Tidevolumen  $V_T$  zu Einzugsgebietsfläche  $A_{b \text{ MTHW}}$  des Ostfriesischen Wattenmeeres

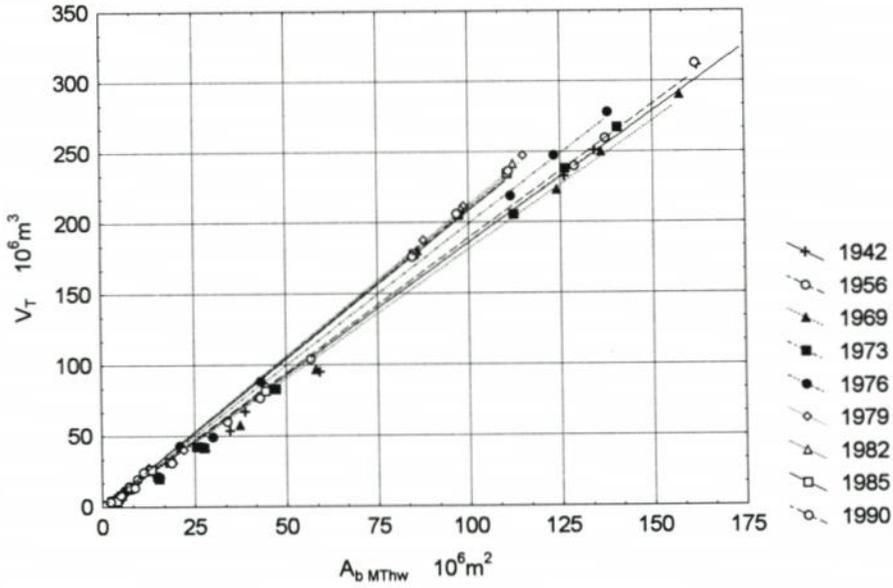


Abb. 8: Tidevolumen  $V_T$  zu Einzugsgebietsfläche  $A_{b \text{ MTHW}}$  der Dithmarscher Bucht

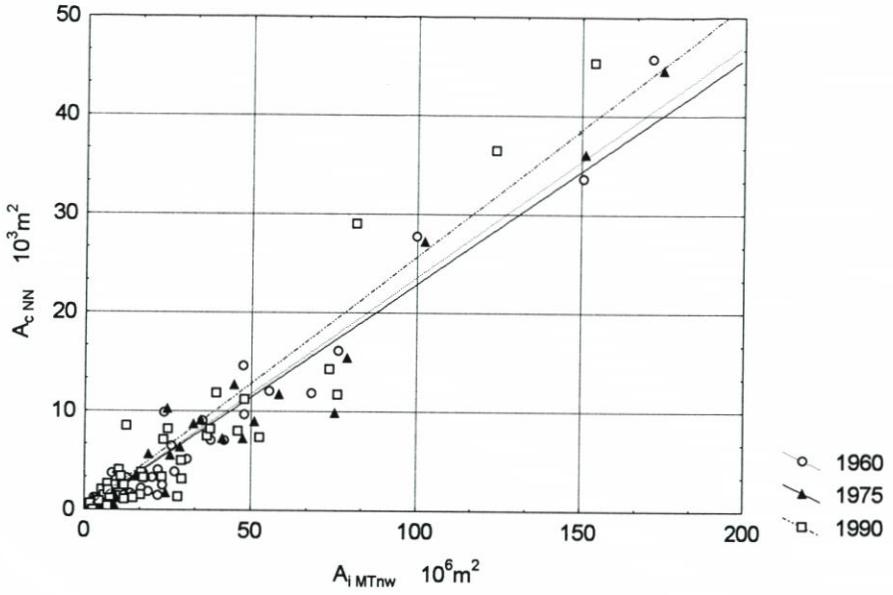


Abb. 9: Durchflußquerschnitt  $A_{cNN}$  zu Wattfläche  $A_{iMTnw}$  des Ostfriesischen Wattenmeeres

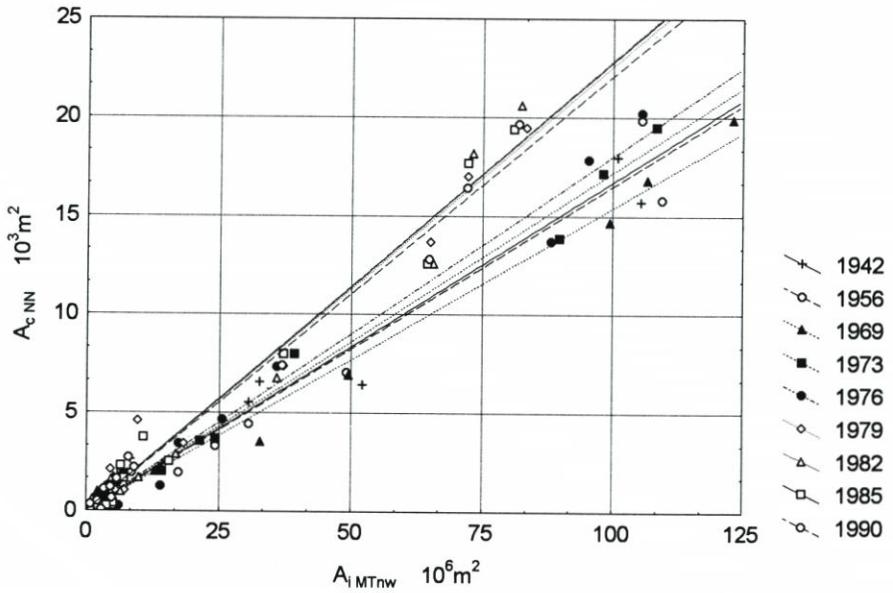


Abb. 10: Durchflußquerschnitt  $A_{cNN}$  zu Wattfläche  $A_{iMTnw}$  der Dithmarscher Bucht

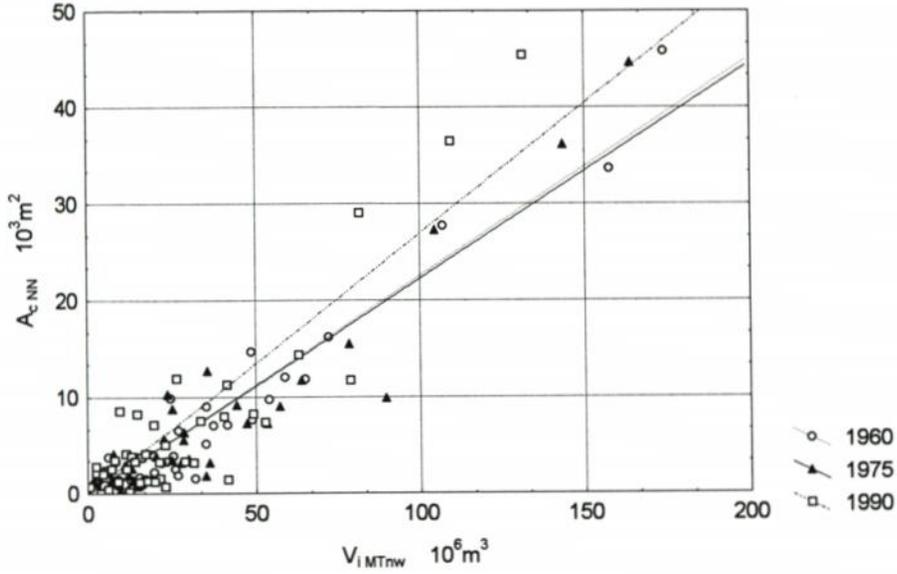


Abb. 11: Durchflußquerschnitt  $A_{cNN}$  zu Wattvolumen  $V_{iMTW}$  des Ostfriesischen Wattenmeeres

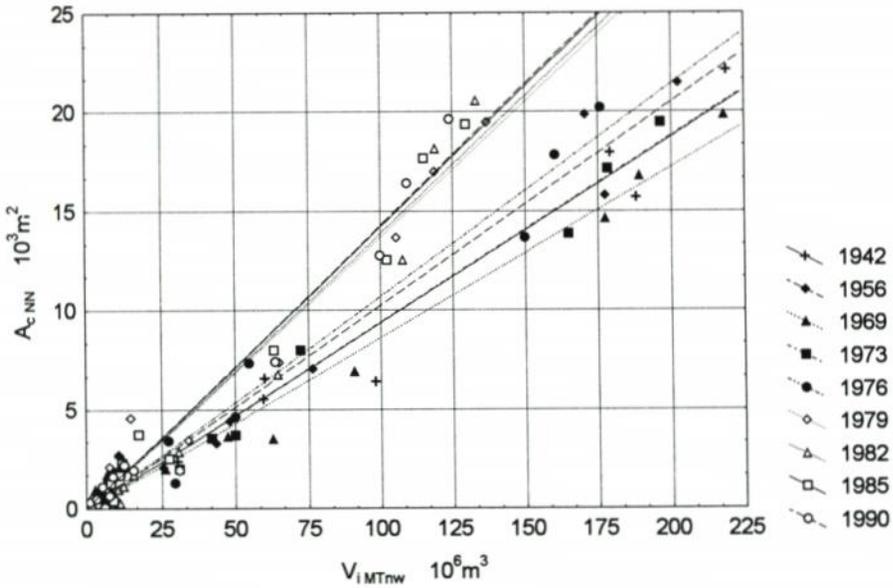


Abb. 12: Durchflußquerschnitt  $A_{cNN}$  zu Wattvolumen  $V_{iMTW}$  der Dithmarscher Bucht

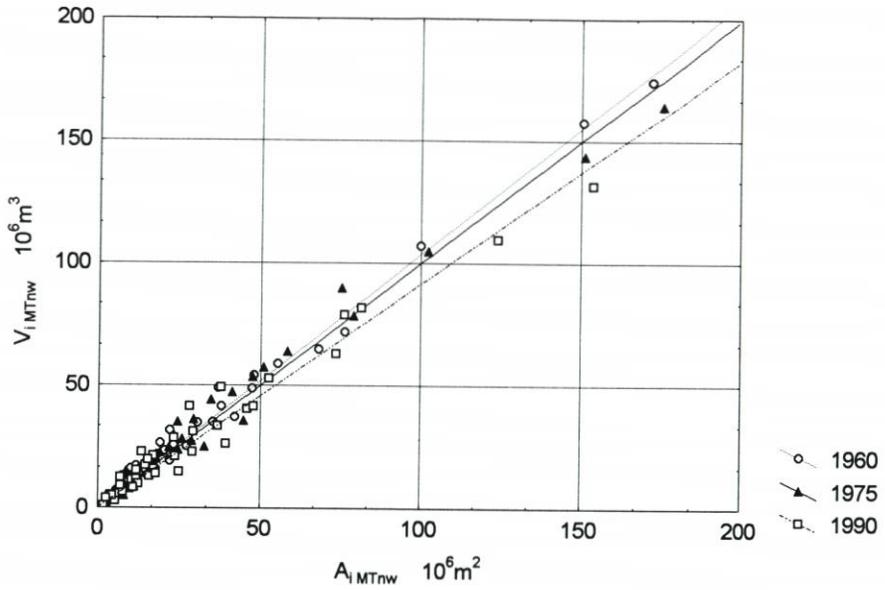


Abb. 13: Wattvolumen  $V_{i\_MTNw}$  zu Wattfläche  $A_{i\_MTNw}$  des Ostfriesischen Wattenmeeres

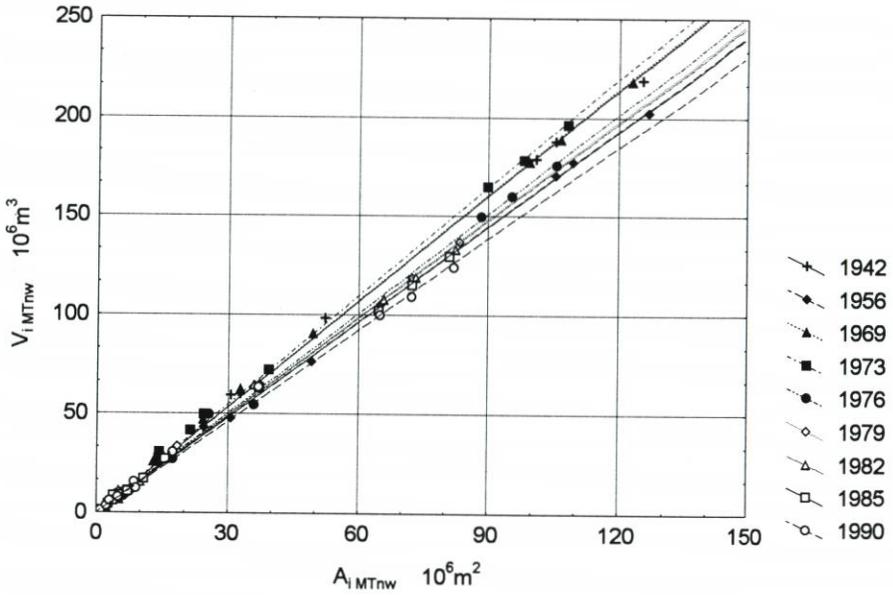


Abb. 14: Wattvolumen  $V_{i\_MTNw}$  zu Wattfläche  $A_{i\_MTNw}$  der Dithmarscher Bucht

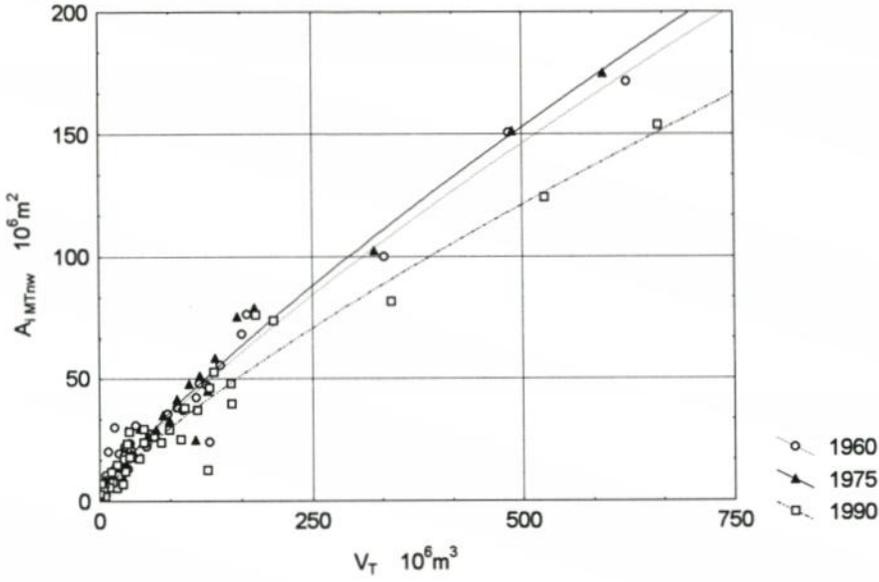


Abb. 15: Wattfläche  $A_{iMTNW}$  zu Tidevolumen  $V_T$  des Ostfriesischen Wattenmeeres

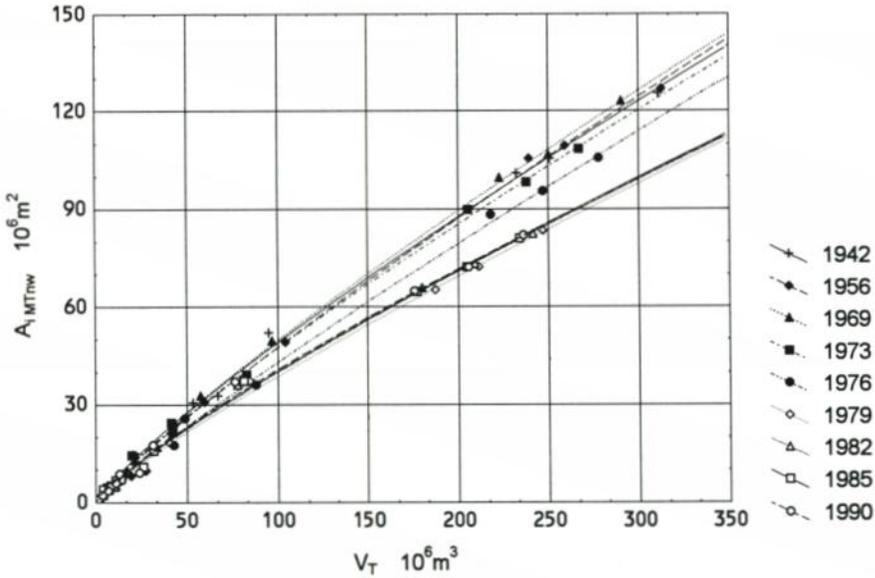


Abb. 16: Wattfläche  $A_{iMTNW}$  zu Tidevolumen  $V_T$  der Dithmarscher Bucht

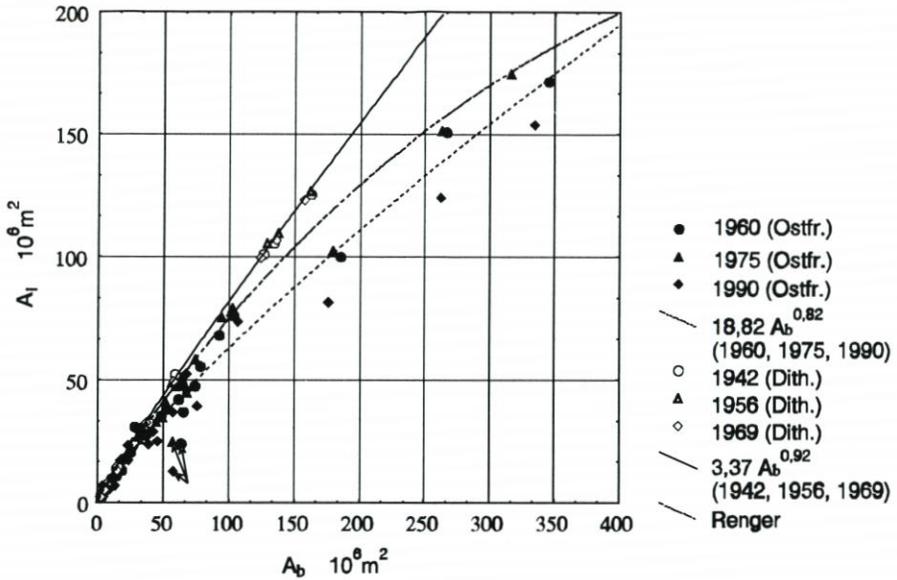


Abb. 17: Wattfläche  $A_{i,MTnw}$  zu Einzugsgebietsfläche  $A_{b,MTnw}$

Teileinzugsgebiet Westerbalje des Wateinzugsgebietes Osterems. Dieses Gebiet ist durch seine Randlage zum Emsästuar charakterisiert. Die überproportionale Abnahme der Größe der Wattfläche von 1975 zu 1990 ist auf morphologische Veränderungen zurückzuführen, die zu erheblichen Verlagerungen der Wattwasserscheide führten.

Als weitere die Gestalt der Morphologie charakterisierende Größe wurde der Watthöhenkennwert  $l_i$  eingeführt. Der Watthöhenkennwert dient zur Beschreibung der morphologischen Entwicklung des Wattniveaus. Um die Form der Wattoberfläche einzubeziehen, wurde  $l_i$  direkt aus der Morphologie eines Einzugsgebietes berechnet.

Die Kopplung des Watthöhenkennwertes  $l_i$  mit der Einzugsgebietsfläche  $A_{b,MTnw}$  führt für die Dithmarscher Bucht auf folgende Funktion für den oberen Grenzwert der Watthöhen:

$$l_i = 0,05 + \frac{0,5}{1 + (3 \cdot 10^{-8} \cdot A_{b,MTnw})^2} \quad (l_i \text{ in m NN; } A \text{ in m}^2)$$

Die Funktion zeigt einen asymptotischen Verlauf mit einem Grenzwert für  $l_i$ , der gegen NN +0,05 m konvergiert. Dieser Wert wird etwa bei einer Einzugsgebietsgröße von  $A_{b,MTnw} > 75 \text{ km}^2$  erreicht. Im unteren Bereich, also für Gebietsgrößen  $A_{b,MTnw} < 75 \text{ km}^2$ , wächst der Streubereich bis zu einer Größe von rund NN  $\pm 0,5 \text{ m}$  an (Abb. 18). Als Schwellenwert für eine Mindesthöhe von  $l_i$  kann die untere Funktion angenommen werden, die symmetrisch zur NN-Linie verläuft.

Für das Ostfriesische Wattenmeer ergibt sich als Funktion

$$l_i = -0,45 + \frac{1,0}{1 + (2 \cdot 10^{-8} \cdot A_{b,MTnw})^2} \quad (l_i \text{ in m NN; } A \text{ in m}^2),$$

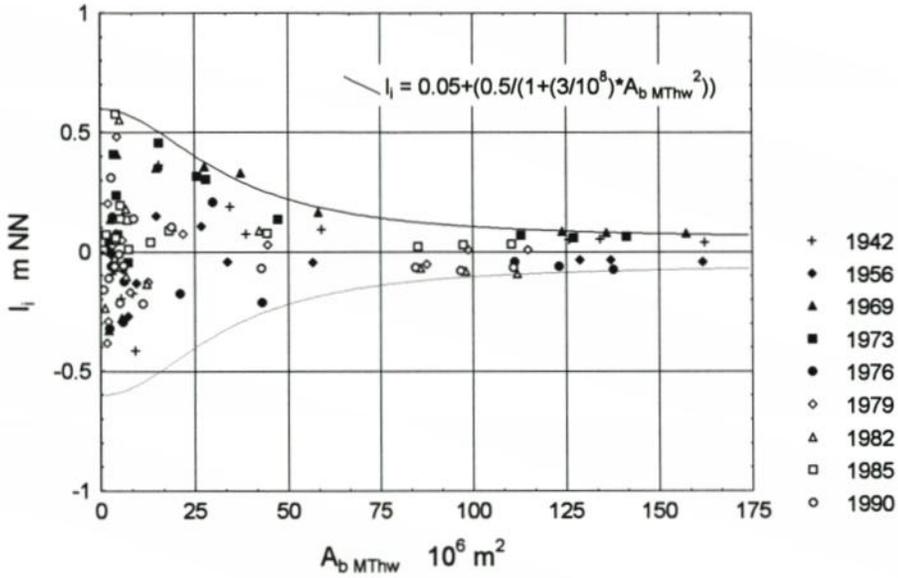


Abb. 18: Wattenhöhenkennwert  $I_t$  m NN (Dithmarscher Bucht)

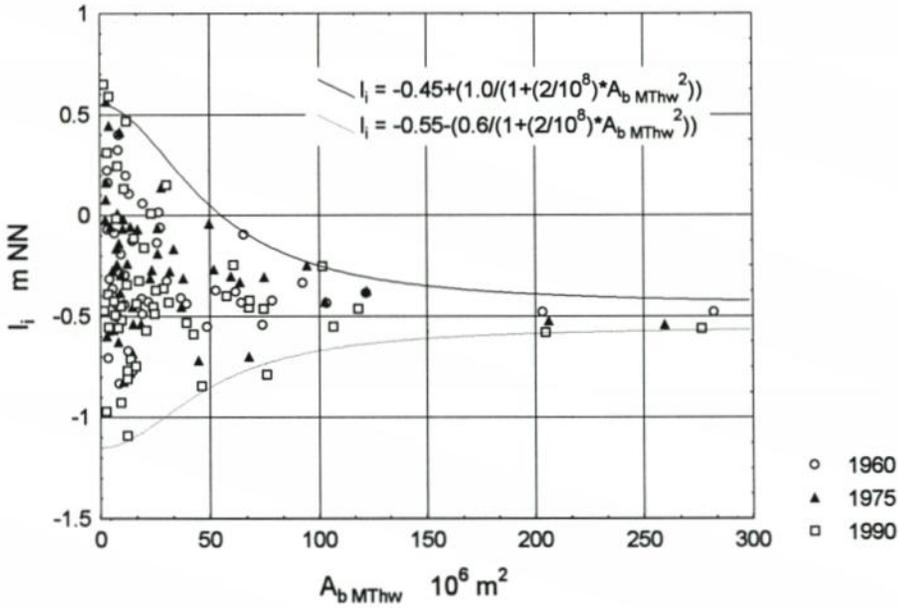


Abb. 19: Wattenhöhenkennwert  $I_t$  m NN (Ostfriesisches Wattenmeer)

wobei der obere Grenzwert für  $l_i$  gegen NN -0,45 m konvergiert, der untere wird durch die Funktion

$$l_i = -0,55 + \frac{0,6}{1 + (2 \cdot 10^{-8} \cdot A_{b\_MThw})^2} \quad (l_i \text{ in m NN; } A \text{ in m}^2)$$

mit einem Grenzwert von NN -0,55 m beschrieben. Die Streubreite für Gebiete kleiner 100 km<sup>2</sup> liegt zwischen NN +0,65 m und NN -1,10 m (Abb. 19).

## 6. Zusammenfassung und Schlußfolgerungen

Für das Ostfriesische Wattenmeer und die Dithmarscher Bucht wurden Parameter ermittelt, die von Morphologie und Hydrographie bestimmt sind. Für diese Parameter wurden Funktionsgleichungen mit Hilfe von Regressionsanalysen auf Zusammenhänge und deren statistische Qualität untersucht, welche die morphodynamischen Eigenschaften der Gebiete charakterisieren. Die Untersuchungen zeigen, daß die Gebiete entlang der Ostfriesischen Küste ähnliche Verhältnisse aufweisen und somit keine Unterscheidung der einzelnen Wateinzugsgebiete erforderlich ist.

Die getrennte Betrachtung der Untersuchungsgebiete Ostfriesisches Wattenmeer und Dithmarscher Bucht ergibt sich aus den unterschiedlichen Randbedingungen. Im Gegensatz zu den durch die vorgelagerten Inseln geschützten Einzugsgebieten des Ostfriesischen Wattenmeeres stellt die Dithmarscher Bucht eine offene Bucht dar. Der mittlere Tidehub von 3,30 m ist, bezogen auf das Ostfriesische Wattenmeer, rund 20 % (0,50 m) höher. Die Dithmarscher Bucht mit den Außensänden Trischen und Blauort entspricht in der Tendenz der Klassifizierung nach HAYES (1979) für ästuarine Watten, demzufolge keine Düneninseln mehr auftreten. Die Koeffizienten der untersuchten Funktionsgleichungen weisen insbesondere für die aus der Morphologie bestimmten Parameter deutliche Unterschiede auf.

Im allgemeinen sind die Streuungen um die Funktionsgleichungen sowohl für Haupt- als auch für Teileinzugsgebiete gering, so daß die Gültigkeit auch für Teileinzugsgebiete angenommen werden kann. Die statistische Qualität des Zusammenhanges von Daten und Ansätzen ermöglicht es, die hier ermittelten Beziehungen für Ansätze empirisch-konzeptioneller Modellierungen zu verwenden.

Neben der Untersuchung des nichtlinearen Zusammenhanges zwischen der Einzugsgebietsfläche  $A_b$  und der Wattfläche  $A_w$ , die mit einer Funktion der Form

$$A_i = a \cdot A_b^c$$

die beste Anpassung ergab, wurde ein zweiter Parameter untersucht, der das Höhenniveau des Wattes beschreibt. Der sogenannte Wathöhenkennwert  $l_i$  wird als Funktion der Wattfläche  $A_w$  berechnet und stellt eine charakteristische Größe eines Einzugsgebietes dar.

Die Anwendung der nichtlinearen Funktionsgleichungen erfordert eine Mindesteinzugsgebietsgröße von rund  $A_{b\_MThw} = 10 \text{ km}^2$  um physikalisch sinnvolle Ergebnisse zu erhalten.

Die dargestellten Parametrisierungen beschreiben quasi-stationäre Zustände. Um auch Übergangszustände quantifizieren zu können (morphodynamische Modellierung), müssen anstelle der konstanten Funktionsgleichungen veränderliche Zusatzgrößen eingeführt werden, welche die zeitliche Veränderung der Parameter in Abhängigkeit von variierenden Randbedingungen erfassen.

## 7. Danksagung

Die dargestellten Untersuchungen wurden innerhalb des deutsch-niederländischen Forschungsvorhabens WADE durchgeführt, welches, durch das Bundesministerium für Forschung und Technologie gefördert, an der Forschungsstelle Küste eingerichtet worden ist.

## 8. Schriftenverzeichnis

- DIECKMANN, R.: Geomorphologie, Stabilitäts- und Langzeitverhalten von Wateinzugsgebieten der Deutschen Bucht. Mitteilungen des Franzius-Institutes der Universität Hannover, H. 60, 1985.
- 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.
- GERRITSEN, F.: Morphological stability of inlets and channels of the Western Wadden Sea. Rijkswaterstaat, Dienst Getijdewateren, Rap. GWAO-90.019, Den Haag, 1990.
- GOLDENBOGEN, R.: Erste Ergebnisse empirischer Modellierung der Morphodynamik eines Wateinzugsgebietes am Beispiel der Dithmarscher Bucht. Die Küste, H. 56, 1995.
- GOLDENBOGEN, R. u. SCHROEDER, E.: Empirische Beziehungen zur Charakterisierung hydrodynamisch-morphologischer Wechselwirkungen in Wattgebieten. 60. Tagung der AG Nordwestdeutscher Geologen, Kurzfassungen und Exkursionsführer, Klein Labenz, 1993.
- GOLDENBOGEN, R.; SCHROEDER, E.; KUNZ, H. 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.
- 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.
- LASSEN, H.: Örtliche und zeitliche Variationen des Meeresspiegels in der südöstlichen Nordsee. Die Küste, H. 50, 1989.
- LIEBIG, W.: GIS-applications to Wadden Sea areas. Proc. Int. Coast. Congr. Kiel '92, Verlag Peter Lang, Frankfurt am Main, 1993.
- NIEMEYER, H. D.: Case study Ley Bay: an alternative to traditional enclosure. Proc. 3rd Conf. Coast. & Port Eng. Develop. Countr., Mombasa/Kenya, 1991.
- NIEMEYER, H. D.: Long-term morphodynamical behaviour of the East Frisian islands and coast. Conf. Large Scale Coastal Behavior '93, U.S. Geol. Surv., O.-Fil. Rep. 93-381, 1993.
- O'BRIEN, M. P.: Estuary tidal prisms related to entrance areas. ASCE, Civ. Eng., Vol. 1, No. 8, 1931.
- O'BRIEN, M. P.: Equilibrium flow areas of tidal inlets on sandy coasts. Proc. 10th Conf. Coast. Eng., Ch. 39, ASCE, New York, 1967.
- PROJECTGROUP WADE: Effects of an increased sea level rise on geomorphology and ecological functioning of the Wadden Sea. Rijkswaterstaat, Dienst Getijdewateren/NLÖ-Forschungsstelle Küste, Authors: T. Louters, J.P.M. Mulder, H.D. Niemeier, E. Schroeder, R. Goldenbogen, E.J. Biegel, W.D. Eysink, Rep. GWAO-92.197X, Den Haag, 1992.
- RENGER, E.: Quantitative Analyse der Morphologie von Wateinzugsgebieten und Tidebecken. Mitteilungen des Franzius-Institutes der Universität Hannover, H. 43, 1976.
- RODLOFF, W.: Über Wattwasserläufe. Mitteilungen des Franzius-Institutes der Universität Hannover, H. 34, 1970.
- WALTHER, F.: Die Gezeiten und Meeresströmungen im Norderneyer Seegat. Bautechn., H. 13, 1934.
- WALTHER, F.: Zusammenhänge zwischen der Größe der ostfriesischen Seegaten mit ihren Wattgebieten sowie mit Watten und Strömungen. Jber. 1971 Forsch.-Stelle f. Insel- u. Küstenschutz, Bd. 23, 1972.

WIELAND, P.; THIES, E. u. BERGHEIM, V.: Bilanz hydrologischer und morphologischer Untersuchungen in der Dithmarscher Bucht. Büsser Gewässerkundliche Berichte, H. 54, ALW Heide, Dez. Gewässerk., Büsum, 1987.

## Anhang

Tab. 1: Funktionsgleichungen und Koeffizienten des Ostfriesischen Wattenmeeres (A bzw. V in  $m^2$  bzw.  $m^3$ )

Funktion	Ostfriesisches Wattenmeer		
	Koeffizienten		
Bestimmtheitsmaß	'60	'75	'90
Ac NN = a · Ab MThw	0,00013	0,00014	0,00013
R <sup>2</sup>	0,9781	0,9783	0,9805
Ab MThw = c · VT	0,5571	0,5428	0,5073
R <sup>2</sup>	0,9966	0,9968	0,9965
Ac NN = b · VT	0,000076	0,000071	0,000072
R <sup>2</sup>	0,9755	0,9769	0,9733
Ac NN = d · Ai MTnw	0,00023	0,00022	0,00025
R <sup>2</sup>	0,9497	0,9403	0,8908
Ac NN = e · Vi MTnw	0,00022	0,00022	0,00026
R <sup>2</sup>	0,9333	0,8819	0,8127
Vi MTnw = g · Ai MTnw	1,0352	0,9997	0,9153
R <sup>2</sup>	0,9904	0,9809	0,9655
Ai MTnw = f · VTk	16,46	16,53	19,30
R <sup>2</sup>	0,7988	0,8008	0,7815
R <sup>2</sup>	0,9752	0,9818	0,9457

Tab. 2: Funktionsgleichungen und Koeffizienten der Dithmarscher Bucht (A bzw. V in m<sup>2</sup> bzw. m<sup>3</sup>)

Funktion Bestimmtheitsmaß	Dithmarscher Bucht Koeffizienten									
	'42	'56	'69	'73	'76	'79	'82	'85	'90	
$A_{c\ NN} = a \cdot A_b$	0,00013	0,00013	0,00012	0,00013	0,00014	0,00016	0,00017	0,00017	0,00017	
$R^2$	0,9783	0,9767	0,9940	0,9908	0,9866	0,9841	0,9839	0,9829	0,9896	
$A_b$	0,5369	0,5284	0,5508	0,5363	0,5015	0,4697	0,4727	0,4795	0,4771	
$R^2$	0,9963	0,9986	0,9976	0,9974	0,9981	0,9979	0,9972	0,9974	0,9964	
$A_{c\ NN} = b \cdot V_T$	0,000071	0,000070	0,000068	0,000073	0,000071	0,000079	0,000082	0,000082	0,000080	
$R^2$	0,9750	0,9745	0,9951	0,9880	0,9889	0,9834	0,9874	0,9802	0,9894	
$A_{c\ NN} = d \cdot A_1$	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	
$R^2$	0,9775	0,9775	0,9906	0,99	0,9837	0,9804	0,9739	0,99	0,9822	
$A_{c\ NN} = e \cdot V_1$	0,000094	0,000103	0,000086	0,000094	0,000107	0,000137	0,000139	0,000142	0,000143	
$R^2$	0,9704	0,9752	0,9859	0,9862	0,9753	0,9746	0,9639	0,9771	0,9699	
$V_1$	1,7796	1,6093	1,7859	1,8287	1,6790	1,6488	1,6414	1,6059	1,5411	
$R^2$	0,9985	0,9993	0,9992	0,9989	0,9977	0,9987	0,998	0,9988	0,9969	
$A_1$	9,925	4,862	8,149	8,025	3,452	6,761	10,11	9,524	12,81	
$R^2$	0,8368	0,8739	0,8482	0,8465	0,8869	0,8447	0,8248	0,8281	0,8129	
	0,9979	0,9987	0,9995	0,999	0,9981	0,9979	0,9942	0,9986	0,9972	