

Untersuchungen über die Morphodynamik im Wattgebiet der inneren Deutschen Bucht (Abschlußbericht des KFKI-Projektes MORAN, Teil II)

VON ANDREAS SCHÜLLER UND JACOBUS HOFSTEDÉ

Zusammenfassung

Im Jahre 1978 wurde im KFKI eine Projektgruppe: „MORAN, Morphologische Analysen Nordseeküste“ gebildet. Ziel war die Herausarbeitung der morphologischen Veränderungen im Wattengebiet der deutschen Nordseeküste, etwa im Hinblick auf die praktische Arbeit an der Küste. Die im Rahmen dieses Projektes durchgeführten Untersuchungen von SIEFERT (1983, 1987) zur Umsatz- und Bilanzanalyse im Küstenvorfeld sind die Grundlagen der vorliegenden Arbeit.

Anhand der angestellten Bilanzanalysen konnte der Neuwerk/Scharhörner Wattkomplex in Gebiete mit bevorzugtem Abtrag oder Anwachs zergliedert werden. Weiterhin konnte der Wattkomplex mittels dreier morphologischer Parameter in sieben Teilgebiete unterschiedlicher Morphodynamik untergliedert werden. Generell läßt sich folgendes sagen:

- Die Auswirkungen von Änderungen in den hydrographischen Rahmenbedingungen auf die Morphologie eines Wattgebietes können erfolgreich mittels flächenhafter Bilanzanalysen ermittelt werden;
- die momentane Morphodynamik eines Wattgebietes läßt sich durch eine flächenhafte Umsatzanalyse charakterisieren.

Summary

In 1978 the German Coastal Engineering Board initiated the scientific project: MORAN: „Morphological Analysis of the German North Sea Coast.“ The main goal was the determination of the morphological changes along the German Wadden Sea coast with regard to engineering measures. The first results of this project were published by Siefert (1983, 1987). The present paper presents the results of the second project phase. Based upon „special balance-analysis“, the Neuwerk/Scharhörner tidal flats could be divided into areas with predominant sedimentation or erosion trends. Furthermore a „turnover analysis“ enabled the classification of the tidal flats into seven morphodynamically similar regions.

The following conclusions can be drawn:

- *the response of the tidal flat morphology to changes in the hydrographic boundary conditions can be determined using a „special balance-analysis“;*
- *the actual morphodynamics of tidal flats can be assessed from a „turnover-analysis“.*

Inhalt

1. Einführung	278
1.1 Vorgeschichte	278
1.2 Zielsetzung	279
1.3 Der Neuwerk/Scharhörner Wattkomplex	280
1.3.1 Die holozäne Entwicklung	280
1.3.2 Die hydrologischen Verhältnisse	281
2. Untersuchungsmethoden	282
2.1 Methoden der Kartenauswertung	282
2.2 Zur Kartengenauigkeit	284
2.3 Die MORAN-Funktion	285
2.4 Die morphologischen Parameter	287

3. Morphodynamik des Neuwerk/Scharhörner Wattkomplexes	288
3.1 Bilanzanalysen	288
3.1.1 Ergebnisse	288
3.2 Umsatzanalysen	291
3.2.1 Ergebnisse	291
3.3 Fallbeispiel Prielsysteme.	295
3.3.1 Materialhaushalt der Priele	296
3.3.2 Materialumsatz in Prielen	297
3.4 Weitere Untersuchungen mit dem MORAN-Verfahren	298
3.4.1 Windverhältnisse und Materialhaushalt	298
3.4.2 Die Wirkung von Sturmfluten im Küstenvorfeld	299
3.4.3 Hinweise für weitere Arbeiten im Küstenvorfeld	300
4. MORAN-Analysen in anderen Wattgebieten	302
4.1 Der Elbe-Randbereich Brammerbank/Krautsander Watt	302
4.1.1 Ergebnisse	302
4.2 Die Außeneider	303
4.2.1 Ergebnisse	306
5. Allgemeine Hinweise zur Anwendung des MORAN-Verfahrens	309
6. Schlußfolgerungen	310
7. Schriftenverzeichnis	311

1. Einführung

1.1 Vorgeschichte

1978 wurde im KFKI eine Projektgruppe: „MORAN, Morphologische Analysen Nordseeküste“ gebildet. Das Projekt wurde von 1980 bis 1985 und von 1988 bis Mitte 1990 vom BMFT finanziell und durch die beteiligten Dienststellen des Bundes und der Küstenländer mit Eigenleistungen gefördert. Ziel war die Herausarbeitung der morphologischen Veränderungen im Wattgebiet der deutschen Nordseeküste und darüber hinaus die Verknüpfung der Morphologie mit der Hydrologie, etwa im Hinblick auf die praktische Arbeit an der Küste. 1983 wurde ein erster Zwischenbericht des MORAN-Projektes – „Pilotstudie Knechtsand“ (SIEFERT, 1983) – publiziert. In dieser Studie wurde für das Testgebiet Knechtsand versucht, die Verknüpfung von morphologischen und hydrologischen Prozessen zu demonstrieren. Dazu wurde u. a. eine Hypothese zur Berechnung von Höhenänderungen im Küstenvorfeld entwickelt sowie der Versuch gemacht, korrelierbare morphologische und hydrologische Parameter herauszuarbeiten.

1987 wurde in einem ersten Abschlußbericht des MORAN-Projektes die Morphodynamik im Neuwerk/Scharhörner Wattkomplex schwerpunktmäßig dargestellt (SIEFERT, 1987). Es wurden in Anlehnung an die 1983 entwickelten Ansätze theoretische Überlegungen zur quantitativen Erfassung von Materialumlagerungen im Wattenmeer angestellt. Als Resultat wurde ein Auswertungsverfahren entwickelt, durch das anhand von Kartenvergleichen verschiedene morphologische Parameter erfaßt werden können, welche die Morphodynamik eines Wattgebietes charakterisieren. Diese Parameter werden aus einer Sättigungsfunktion

$$h_u = \bar{h}_u(1 - e^{-a/a_0})$$

für die Umsatzhöhe h_u (cm) eines Gebietes, die über den Vergleichszeitraum a (J) bestimmt wird, ermittelt. Für den Neuwerk/Scharhörner Wattkomplex konnten anhand dieses Verfahrens energetisch ähnliche Gebiete erkannt und charakterisiert werden.

1.3 Der Neuwerk/Scharhörner Wattkomplex

Schon am Anfang des MORAN-Projektes, nach den ersten Auswertungen für das Testfeld Knechtsand (BARTHEL, 1981), stellte sich heraus, daß für eine genaue morphodynamische Analyse möglichst viele topographische Aufnahmen sowie Detailkenntnisse über die Seegangs- und Strömungsverhältnisse benötigt werden. Diese Voraussetzungen sind weitgehend für das südliche Elbmündungsgebiet, den Neuwerk/Scharhörner Wattkomplex (Abb. 1), gegeben.

1.3.1 Die holozäne Entwicklung

Die pleistozäne Oberfläche im Neuwerk/Scharhörner Wattkomplex liegt zwischen NN (Altenwalder Geest) und -25 m NN unter Scharhörn. Der Zeitpunkt der holozänen Überflutung liegt nach LINKE (1982) etwa um 7850 BP. Rund 6800 BP erreichte der Meereseinfluß bei einem Niveau von etwa -13 m NN den damaligen Fuß der Altenwalder Geest. Zu diesem Zeitpunkt nahm die Sturmflutaktivität stark zu, wodurch sich ein Sturmflutkliff in der Geest bilden konnte. Zwischen 4500 und 2500 BP fehlen Spuren für Sturmflutaktivitäten und infolgedessen konnte sich vor der Geest ein Moor bilden. Möglicherweise hat sich um 4500 BP auch zum erstenmal ein Außensand in der Lage der heutigen Scharhörner Plate stabilisieren können. Zwischen 2500 BP und Christi Geburt erhöhte sich die Sturmflutaktivität erneut, was dazu führte, daß das Moor teilweise erodiert wurde und sich ein zweites Sturmflutkliff in der Geest bildete (LINKE, 1982).

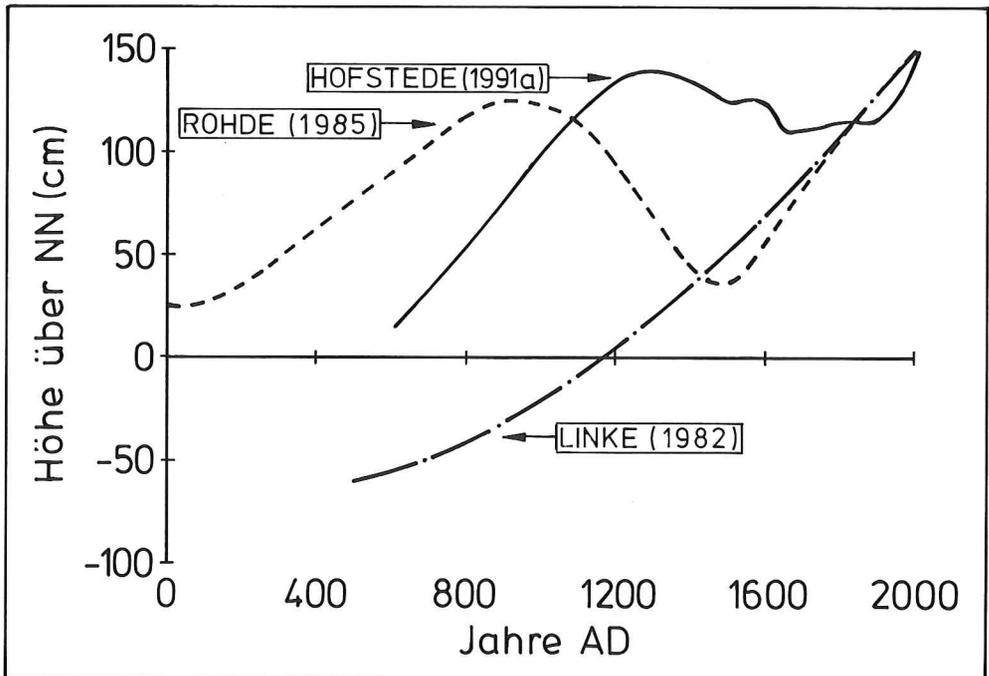


Abb. 2: Vergleich einiger rezenter MThw-Kurven für die innere Deutsche Bucht

Wie sich das MThw-Niveau seit etwa 600 AD entwickelte, ist in Abb. 2 dargestellt (HOFSTEDÉ, 1991b). Die historische Entwicklung der Außensände zwischen Jade und Eider läßt sich gut anhand dieser MThw-Kurve erklären. Sandverwehungen, Grünflächen und wirtschaftliche Nutzung sowie Besiedlung treten konzentriert während regressiver Phasen auf. Die transgressive Perioden dagegen werden von Inselaufgaben, Überflutungen und seit Mitte des letzten Jahrhunderts von Schutzmaßnahmen gekennzeichnet.

Seit 1850, und vor allem während der letzten Dekaden, vertriften zudem die Außensände mit erheblichen Geschwindigkeiten landwärts. Es liegt nahe, diese Verdriftung in der o. a. MThw-Entwicklung zu suchen. Der verstärkte MThw-Anstieg seit etwa 1950 sowie die gleichzeitig auftretende Zunahme der Sturmfluthäufigkeit und -intensität (SIEFERT, 1984) sind wahrscheinlich ursächlich mit der während der letzten Dekaden erkennbaren Beschleunigung der Außensandverlagerung verbunden.

Die holozänen marinen Ablagerungen liegen im Feinsandbereich und haben einen sehr hohen Sortierungsgrad (LINKE, 1970). Der Sandkörper ist sehr homogen ausgebildet, was darauf hindeutet, daß er unter konstanten Bedingungen entstanden ist. Nur unter der Scharhörner Plate, in einer Tiefe von etwa -5 m NN, findet man einen deutlichen Knick in der Korngröße (LINKE, 1969). Die Oberflächensedimente liegen ebenfalls überwiegend im Feinsandbereich (LINKE, 1970).

1.3.2 Die hydrologischen Verhältnisse

Die Materialumlagerungen im Neuwerk/Scharhörner Wattkomplex werden durch viele einander überlagernde Strömungskomponenten verursacht. Erstens existiert die durch die Gezeitenschwingung der Nordsee verursachte und von der Topographie des Flachwasserbereiches geprägte Tideströmung. Die Tideströmung wird von den windbedingten aperiodischen Trift-, Orbital- und Brandungsströmungen überlagert. Gemeinsam verursachen diese Strömungskomponenten eine zeitlich und räumlich äußerst variable Scherbeanspruchung an der Sohle. Trotzdem lassen sich für Teilbereiche des Neuwerk/Scharhörner Wattkomplexes charakteristische Energiespektren herausarbeiten (HOFSTEDÉ, 1991a: Kap. 3).

Nach SIEFERT u. LASSEN (1985) schwankt der MThb 1975/79 zwischen 290 cm (Scharhörnriff) und 320 cm (Duhner Watt). In Abb. 3 ist der Verlauf des Tidehubes am Pegel Cuxhaven seit 1844 dargestellt. Es zeigt sich, daß Mitte der siebziger Jahre der allmähliche Anstieg unterbrochen wurde, wobei sich der MThb von etwa 285 auf 300 cm erhöhte. Diese plötzliche Zunahme des Tidevolumens wird vor allem in den Tiderinnen zu stärkeren morphologischen Änderungen geführt haben (siehe auch Kap. 3.1 u. 3.3).

Untersuchungen über die Seegangscharakteristik im Neuwerk/Scharhörner Wattkomplex sind von SIEFERT (1974) und HOFSTEDÉ (1991a) durchgeführt worden. Hierbei stellte sich heraus, daß die primäre Seegangsenergie bei normalen Wetterbedingungen konzentriert in zwei Brandungszonen westlich der Scharhörner Plate umgewandelt wird. Nur durch die tieferen Tiderinnen kann örtlich primärer Nordsee-Seegang bis an die Wattkanten gelangen. Auf dem Watt existiert nur ein lokal erzeugter Seegang. Während Sturmflutperioden kann jedoch ein signifikanter Teil der primären Seegangsenergie direkt bis auf das Watt vordringen, wobei zur gleichen Zeit sehr starke Triftströmungen auftreten.

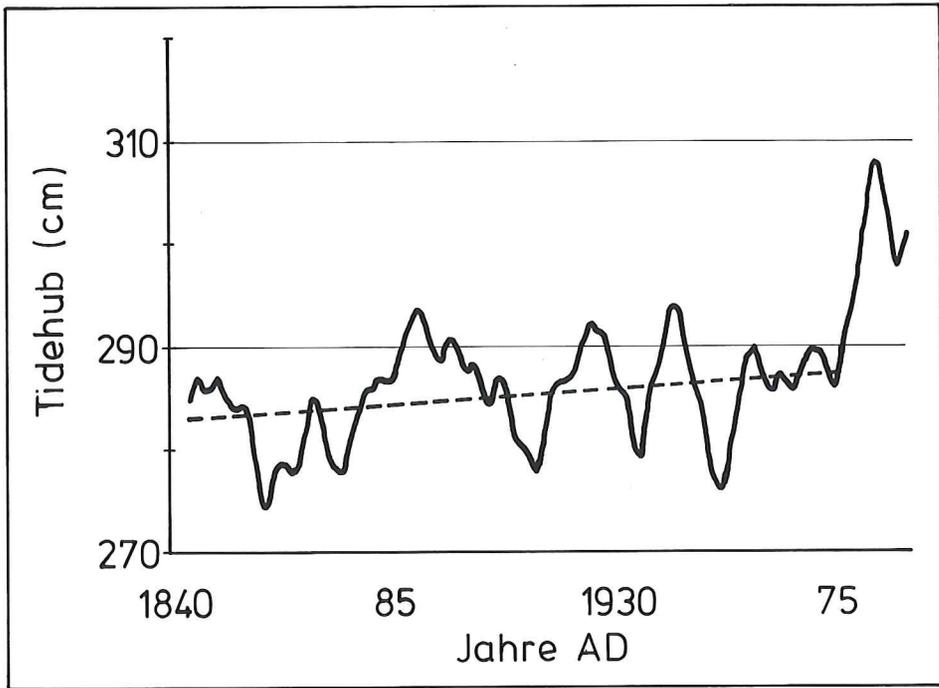


Abb. 3: MThb-Entwicklung am Pegel Steubenhöft, Cuxhaven seit 1844 (dreijährige übergreifende Mittel)

2. Untersuchungsmethoden

2.1 Methoden der Kartenauswertung

Zur Erfüllung der in Kapitel 1.2 formulierten Zielsetzung galt es, ein Analyseverfahren auszuwählen, das es erlaubt, aus den vorliegenden Tiefenkarten die notwendigen Informationen zu erschließen. Nach einer Gliederung von GÖHREN (1970) werden vornehmlich folgende Grundtypen von Kartenauswertungsmethoden verwendet:

- Übereinanderzeichnen von Tiefenlinien
- Darstellung von Profildanglinien
- flächenhafte Darstellung von Tiefenänderungsplänen

Das Übereinanderzeichnen von Tiefenlinien eignet sich zur Veranschaulichung der Verlagerungen von Tiefenlinien und vermittelt einen schnellen Eindruck von den Lageveränderungen der Sände oder Landverlusten/-gewinnen an der Küste. Die qualitative Abschätzung der Sedimentation oder Erosion ist möglich, jedoch deren quantitative Erfassung nicht.

Profile oder Profildanglinien sind bewährte Methoden für die Darstellung morphologischer Veränderungen. Quantitative Aussagen sind möglich, sie bleiben aber auf eine linienhafte Betrachtungsweise beschränkt. Um sich einer flächenhaften Aussage anzunähern, ist eine dichte Staffelung von nebeneinanderliegenden Profilen notwendig.

Die Ermittlung von Tiefendifferenzen zwischen zwei aufeinanderfolgenden Vermessungen und deren Darstellung in Tiefenänderungsplänen bieten die Möglichkeit, die Höhenentwicklung größerer Gebiete flächenhaft darzustellen.

GÖHREN (1970) benutzt zur Ermittlung der Tiefendifferenzen ein Raster mit der Seitenlänge von 100 m. Für die Rasterflächen von 1 ha Größe werden aus den Wattgrundkarten gemittelte Höhenwerte entnommen und die Differenzen (= Auf-/Abtragshöhen) zwischen identischen Rasterflächen aufeinanderfolgender Jahrgänge berechnet. Für das übergeordnete Raster von 1 km² wird dann das Mittel aus 100 Höhendifferenzwerten gebildet. Neben der Berechnung der mittleren Höhendifferenz für 1 km², der Bilanzhöhe, wird von GÖHREN (1970) auf dem gleichen Wege die Umsatzhöhe als Mittel aus den Beträgen der Sedimentations- und Erosionshöhen bestimmt. Die Umsatzhöhe erlaubt Aussagen zur Intensität der morphologischen Vorgänge und Materialverlagerungen.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens „MORAN“ wurde dieses Verfahren vornehmlich für die Untersuchungen im Wattengebiet zwischen Weser und Elbe eingesetzt (BARTHEL, 1981; SIEFERT, 1984, 1987; HOFSTEDE, 1989; SCHÜLLER, 1989b).

Aus dem Tiefenlinienverfahren leitet sich die Niveauflächenmethode als weiteres flächenhaftes Auswerteverfahren ab. Hierbei führt die Ermittlung der Flächengrößen in übereinanderliegenden, geodätischen Niveaus zur hypsographischen Kurve bzw. zur morphographischen Charakteristik von Wateinzugsgebieten (RENGER, 1976). Aus Zeitreihenuntersuchungen lassen sich durch Bestimmung der Differenzfläche (Flächenmessung, Integrationsrechnung) zwischen zeitlich folgenden Niveauflächengrößen Erosions- oder Sedimentationstendenzen feststellen (HIGELKE, 1978; DIECKMANN, 1984, 1987; SCHÜLLER, 1989b). Die genaue Lokalisierung von Sedimentations- oder Erosionsorten ist wegen der integralen Betrachtungsweise (DIECKMANN, 1984) jedoch nicht möglich.

Zur Erforschung der Verhältnisse an der Küste sind eine Reihe von Kartenauswertemethoden für morphologische Untersuchungen in Gebrauch. In einer Zweigliederung können diese in die morphometrischen und in die morphodynamischen Untersuchungen unterteilt werden.

Bei morphometrischen Untersuchungen zum Formengefüge des Küstenvorfeldes werden verschiedene Größen zueinander in Beziehung gesetzt (z. B.: WALTHER, 1934, 1971; RODLOFF, 1970; RENGER, 1976). Hauptsächlich werden folgende Größen verwendet (RENGER, 1976):

- Größe des Wateinzugsgebietes
- Tidevolumen und Flutraum
- Durchflußquerschnitte der Wattwasserläufe
- Breiten und Tiefen der Wattwasserläufe

Grundgedanke der morphologischen Untersuchungen im Wattenmeer ist, daß die auf die Sedimentoberfläche einwirkenden Kräfte eine formändernde Kompetenz besitzen. Verändern sich die Rahmenbedingungen nicht, so bleibt die Beanspruchung des Wattkörpers konstant und die Formenentwicklung erreicht einen Klimaxstand, der den herrschenden Bedingungen entspricht. Mit den aus einer Kartenaufnahme erfaßten und zueinander in Beziehung gesetzten morphometrischen Größen lassen sich keine Aussagen über die Auswirkungen der im Fortgang der Zeit variierenden morphologischen Agenzien erschließen. Auch gilt zu beachten, daß Gleichgewichtsverhältnisse zwischen dem Zustand eines Tidebeckens und den einwirkenden Kräften angenommen werden. Tatsächlich ist es jedoch schwierig abzuschätzen, ob ein solches Gleichgewicht besteht. Aufgrund der Trägheit des Wattkörpers eilt die morphologische Reaktion (Formänderung) immer den einwirkenden Kräften hinterher, so daß statt eines Gleichgewichts eher ein ständiges Streben nach Anpassung des Formengefüges an die hydrologischen Rahmenbedingungen vorliegt.

Morphodynamische Untersuchungen benötigen mindestens zwei aufeinanderfolgende Kartenaufnahmen, aus denen durch Vergleichen oder Differenzbildung der Formenwandel

aufgezeigt werden kann. Nimmt die Anzahl der verfügbaren Vermessungsunterlagen zu, so lassen sich in Abhängigkeit vom Zeitabstand zwischen den Vermessungen kurzfristige oder säkulare Veränderungen erkennen.

Die Mehrzahl der morphodynamischen Untersuchungen beschreiben den morphologischen Wandel auf der Basis ermittelter Höhen- oder Volumenveränderungen (z. B.: GÖHREN, 1970; HIGELKE, 1979; DAMMSCHNEIDER, 1983; TAUBERT, 1986; GLIM et al., 1986, 1988).

Mit dem von GÖHREN (1970) verwendeten Auswerteverfahren wird es möglich, neben den Materialbilanzen auch das Gesamtmaß der aufgetretenen Höhenänderungen, den Umsatz, mit in die Betrachtungen aufzunehmen. Darauf basierend wird im MORAN-Projekt ein Weg beschritten, auf dem neben Materialbilanzen auch die Materialumsätze im Vordergrund stehen.

2.2 Zur Kartengenauigkeit

Die Qualität der mittels Kartenvergleich gewonnenen Ergebnisse ist entscheidend von der Genauigkeit der Karten- und Vermessungsunterlagen abhängig. Die im MORAN-Projekt für den Neuwerk/Scharhörner Wattkomplex verwendeten Vermessungsunterlagen sind im Rahmen der Planungen für das ab Mitte der siebziger Jahre nicht mehr weiterverfolgte Hafenprojekt Scharhörn entstanden. Zusätzlich wurden KFKI-Karten der Jahrgänge 1976 und 1979 eingesetzt. Die genannten Vermessungsunterlagen für den Zeitraum 1965 bis 1979 sind nach einheitlichen Kriterien entstanden und entsprechen den Genauigkeitsanforderungen, die erst eine Vergleichbarkeit untereinander gewährleisten. Aufgrund eines günstig gewählten Beschickungsverfahrens mit geringen Entfernungen zwischen Peil- und Pegelort konnte der Beschickungsfehler auf rd. 10 cm begrenzt werden (GÖHREN, 1968). Gerätetechnische Unsicherheiten liegen zwischen 1 % der Tiefe bei den Aufnahmen der Forschungsgruppe Neuwerk (GÖHREN, 1968) bzw. bei 0,25 % oder 5 cm vom Endwert bei den KFKI-Karten (SCHLEIDER, 1981). Allerdings können nach GÖHREN Salzgehaltsschwankungen bei größeren Wassertiefen Fehler im dm-Bereich verursachen (bei 20 m Wassertiefe bis 40 cm).

Bei der ursprünglich im MORAN-Projekt angestrebten Absicht, die Kartenvergleiche fortzuführen, wurde offensichtlich, daß dies mit einer ausreichenden Genauigkeit nicht durchführbar ist. Grund dafür ist ein festzustellender Bruch zwischen den Kartenunterlagen der Jahrgänge 1965 bis 1979 und den vom WSA Cuxhaven für das Gebiet des Neuwerk/Scharhörner Wattkomplexes herausgegebenen Kartenjahrgängen für die 80er Jahre.

Der festgestellte Bruch zwischen den Kartenjahrgängen bis 1979 und ab 1981 ist als Gesamtwirkung mehrerer Faktoren anzusehen:

- unterschiedliche Beschickungsverfahren
- unterschiedliche Kartenmaßstäbe
- Gerätefehler
- Salzgehaltsschwankungen

Die größte Unsicherheit liegt auf Seiten der Beschickung. Den älteren Kartenjahrgängen liegt ein Beschickungsverfahren auf der Basis der Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Tidewelle zugrunde, bei dem ein Korrekturwert für das Wasserstandsgefälle zwischen Peil- und Pegelort berücksichtigt wurde (GÖHREN, 1968). Bei den Vermessungen des WSA Cuxhaven kam ein Verfahren zum Einsatz, bei dem die mittleren Tidekurven am Bezugspegel Cuxhaven und am Peilort als Beschickungsgrundlage dienen. Zwischen beiden Verfahren sind in Einzelfällen 50 cm übersteigende Differenzen beobachtet worden. Aufgrund der durchaus wünschenswerten Kooperation zwischen den verschiedenen mit Vermessungsaufgaben beauftragten Institutionen sind in den WSA-Karten auch Vermessungen enthalten, die vom Deutschen Hydrogra-

phischen Institut (DHI) aufgenommen wurden. Hierbei wurde eine auf nautische Zwecke abgestimmte Meßtheorie angewendet, bei der hauptsächlich Mindesttiefen im Vordergrund stehen. Die Ungenauigkeiten bei der Tiefenbestimmung können eine Größenordnung von bis zu 50 cm erreichen.

Die Datenkollektive der Bilanzhöhen für die Vergleiche der Kartenjahrgänge 1965 bis 1979 und ab 1981 gehen nicht kontinuierlich ineinander über. Es ist ein Bruch in einer Größenordnung von um 30 cm feststellbar, wie es in Abbildung 4 für Teile des Neuwerk/Scharhörner Wattkomplexes dargestellt ist. Die Auswertungen der Umsatzhöhen und mittleren Geländehöhen lassen ein gleiches Verhalten erkennen (SCHÜLLER, 1992).

Bei der Bearbeitung von Kartenmaterial aus dem Bereich des Mühlenberger Loches, der Außeneste und des Nessandes hat SIEFERT (1984) ebenfalls einen Bruch von 30 bis 40 cm bei den Kartenvergleichen ab 1981 festgestellt.

Die Ausarbeitung einer Diskontinuität in den Kartenunterlagen bei Analysen auf der Grundlage der MORAN-Rastermethode belegt die Sensibilität dieses Verfahrens.

Bei Kenntnisnahme der Unsicherheiten bei den Kartenjahrgängen ab 1981 – die mit großer Wahrscheinlichkeit auf die Verwendung unterschiedlicher Beschickungsverfahren zurückzuführen sind – bleibt festzuhalten, daß diese für Detailuntersuchungen und Kartenvergleiche in der beabsichtigten Form unbrauchbar sind.

Im Hinblick auf Beweissicherungen oder Planungen im Küstenbereich ist die Kontinuität der Vermessungsunterlagen ein wesentliches Kriterium, damit Fehlinterpretationen minimiert werden können. Die Kartenauswertung stellt hohe Anforderungen an die Vermessung. Eine Vereinheitlichung der Beschickungsverfahren und der Meßpunktdichte sind notwendige Forderungen, wenn es darum geht, morphodynamische Entwicklungen über längere Zeiträume im Detail erkennen zu können.

2.3 Die MORAN-Funktion

Im Rahmen des MORAN-Projektes wurde geprüft, ob die Änderungen der topographischen Höhe h über die Zeit t für eine Fläche durch eine entsprechende mathematische Funktion

$$h = F(t)$$

formuliert werden können. Diese Formel muß folgende Voraussetzungen erfüllen (nach SIEFERT, 1983):

- 1) Für eine Fläche beginnt die Höhenänderung h im Ursprung und läuft mit der Zeit asymptotisch auf einen Höchstwert h_{\max} zu. Die maximalen Höhenunterschiede im Wattgebiet der inneren Deutschen Bucht liegen um 20 m. Die mittleren Höhenänderungen werden normalerweise weit darunter bleiben.
- 2) Der asymptotische Grenzwert h wird, je nach Energiespektrum (Art und Beschaffenheit der Scherbeanspruchung) und nach Art und Beschaffenheit des Sediments (Scherfestigkeit), unterschiedlich groß sein.
- 3) Auch der Zeitraum a bis zum Erreichen des Wertes h_{\max} wird, je nach Energiespektrum, unterschiedlich groß sein. Je schneller h_{\max} erreicht ist, desto stärker überwiegen die kurzfristigen die langfristigen morphologischen Veränderungen, bzw. desto größer ist die morphologische Varianz.
- 4) Die mittlere Höhenänderung pro Jahr ist eine Funktion der Zeit, d. h. der Anzahl a Jahre des Vergleichszeitraumes. Je länger der Vergleichszeitraum wird, desto kleiner muß die

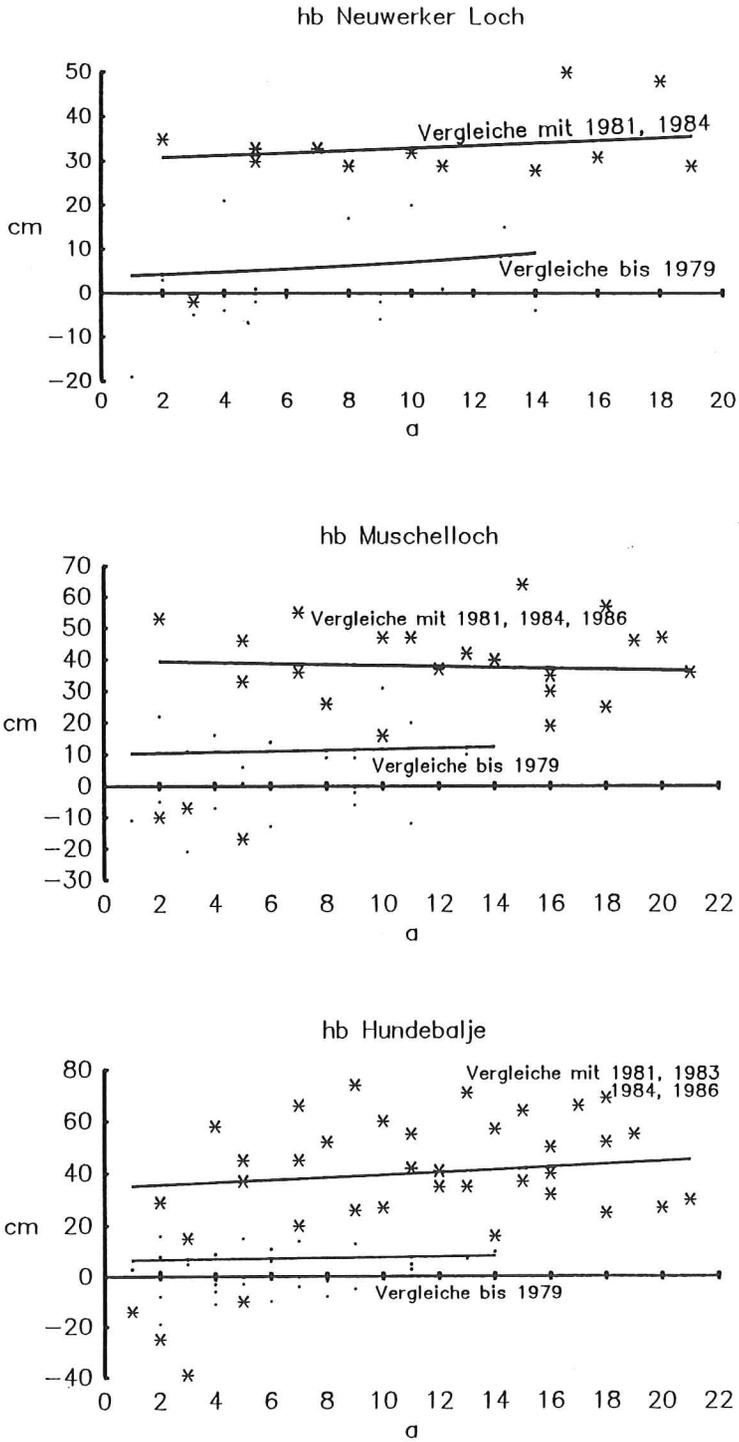


Abb. 4: Bilanzhöhen der Kartenvergleiche bis 1979 bzw. bis 1986 für verschiedene Prielgebiete

darüber gemittelte jährliche Höhenänderung werden. Sonst wäre es auch unmöglich, zu einem asymptotischen Höchstwert h_{\max} zu gelangen.

- 5) Wenn eine Analyse von Daten aus unterschiedlichen Zeiträumen durchgeführt wird, müssen eventuelle Änderungen des Energiespektrums berücksichtigt werden.

Die bisherigen Arbeiten im Rahmen des MORAN-Projektes (SIEFERT, 1987) haben gezeigt, daß die Umsatzhöhe h_u (cm) über den Vergleichszeitraum a (J) als Sättigungsfunktion

$$h_u = \bar{h}_u(1 - e^{-a/a_0})$$

bestimmt werden kann. Hierbei gibt a als einzige Veränderliche einen Betrachtungszeitraum (den Zeitraum zwischen zwei topographischen Aufnahmen) an, nicht aber die fortlaufende Zeit. Die asymptotische Umsatzhöhe \bar{h}_u (cm) ist ein (theoretisch erst für sehr große a erreichbare) mittlerer Höchstwert für h_u ; a_0 steht für den Zeitraum, in dem \bar{h}_u bei gleichsinniger, linearer Veränderung der Topographie erreicht werden würde. Die Steigerung im Ursprung beträgt \bar{h}_u/a_0 (cm/J) und entspricht somit der Umsatzrate.

Es läßt sich allerdings nur dann eine Sättigungsfunktion erreichen, wenn die Bilanzhöhe h_b bei Zunahme des Vergleichszeitraumes a gegen Null geht oder sich auf ein bestimmtes Niveau einpendelt. Wenn h_b auch bei zunehmenden a im Verhältnis zu h_u wächst, deutet das auf eine säkulare Höhenänderung (während des Vergleichszeitraumes) hin, bzw. wird Voraussetzung 1 (s. o.) nicht mehr erfüllt.

2.4 Die morphologischen Parameter

Aus der Sättigungsfunktion lassen sich drei morphologische Parameter ermitteln (HORSTEDT, 1989):

- 1) die asymptotische Umsatzhöhe \bar{h}_u :
der Höhenunterschied im Neuwerk/Scharhörner Wattkomplex erreicht in der Ostertill einen Höchstwert von etwa 20 m. Bei einer Verlagerung der Till könnte h_u demnach theoretisch einen Wert von etwa 20 m erreichen. Normalerweise wird er aber weit darunter bleiben. In stabilen Gebieten, d.h. Gebiete, wo h_b über größere Zeiträume um Null schwankt, erlaubt h_u eine Aussage über die maximalen Höhenänderungen, die in diesen Gebieten auftreten können. Im intertidalen Bereich westlich von Scharhörner (Foreshore) wird h_u beispielsweise in etwa der Höhe der durchziehenden Brandungsbänke entsprechen.
- 2) die morphologische Varianz β als reziproker Wert von a_0 :
der Zeitraum bis zum Erreichen von \bar{h}_u ist in einzelnen Gebieten je nach Energiespektrum unterschiedlich groß. So wird in einem Gebiet, das vom kurzfristig auftretenden Wechsel der äußeren Kräfte geprägt wird, wie der Foreshore, die Morphologie von kurzfristigen Änderungen geprägt werden. Dies bedeutet, daß \bar{h}_u schnell erreicht wird bzw. β groß ist. In anderen Gebieten wird die Morphologie dagegen von langfristigen Tendenzen maßgebend beeinflusst. Die Scharhörner Plate verlagert sich beispielsweise unter Einfluß des Meeresspiegelanstieges schon über 100 Jahre ostwärts (siehe Kap. 2.3). Konsequenterweise wird \bar{h}_u hier erst nach langer Zeit eintreten und wird β sehr gering sein. Somit erlaubt β eine Aussage über die Dauer der gleichbleibenden Tendenzen – Erosion oder Sedimentation – eines Gebietes.
- 3) die Umsatzrate \bar{h}_u/a_0 :
dieser Parameter entspricht der Steigung im Ursprung und wird in cm/Jahr ausgedrückt. Da

$$\bar{h}_u/a_0 \geq h_u \quad (a = 1 \text{ Jahr})$$

gibt die Umsatzrate nicht nur einen Wert für die gemessene mittlere jährliche Umsatzhöhe zwischen zwei Aufnahmen, sondern auch einen Hinweis auf die weiterhin ablaufenden Umlagerungen. Somit erlaubt die Umsatzrate eine allgemeine indikative Aussage über die morphologische Aktivität (Morphodynamik) eines Gebietes während des Betrachtungszeitraumes und läßt sich direkt mit dem Energiespektrum (Scherbeanspruchung) des Gebietes korrelieren.

3. Morphodynamik des Neuwerk/Scharhörner Wattkomplexes

3.1 Bilanzanalysen

Die Untersuchungen im Neuwerk/Scharhörner Wattkomplex basieren aufgrund der im Kapitel 2.2 geschilderten Einschränkung auf Kartenmaterial aus dem Zeitraum 1965 bis 1979. Es liegen acht Vermessungsjahrgänge vor, die das Küstenvorfeld einschließlich der Wattflächen abdecken. Für die in Abb. 5 dargestellten Rasterfelder von 1 km² (Kleinen Einheiten) wurden jeweils die Bilanzwerte der Kartenvergleiche 1965–66, 66–68, 68–70, 70–72, 72–74, 74–76 und 76–79 betrachtet. Mit der Berechnung der Ausgleichsgeraden für die Bilanzhöhenwerte jeder Kleinen Einheit werden die Höhenänderungen im Untersuchungszeitraum verdeutlicht.

3.1.1 Ergebnisse

Abbildung 5 zeigt die unterschiedlichen Entwicklungen für die einzelnen Kleinen Einheiten des Neuwerk/Scharhörner Wattkomplexes. Die Verteilung der Steigungsmaße der Ausgleichsgeraden für die Rasterfelder erlaubt eine Gliederung des Wattkomplexes in Gebiete mit bevorzugtem Abtrag oder Anwachs.

Im Watt vor der Festlandsküste Cuxhavens über Neuwerk hinweg bis westlich einer Linie Scharhörner-Unterer Wittsand sind die Bilanzhöhen niedrig. Die Sedimentations- bzw. Erosionshöhen betragen < 5 cm/J und zeichnen dieses Gebiet als relativ höhenstabilen Wattkern aus. Aber dennoch lassen sich für das Wattkerngebiet Zonen unterschiedlicher Entwicklungstendenzen erkennen.

Die Wattflächen zwischen der Festlandsküste und Neuwerk (Neuwerker Watt) erreichen auf der Wattwasserscheide maximale Höhen von SKN +1.70 m. Die Höhenlage der Wattwasserscheide hat sich nach Untersuchungen von SIEFERT und LASSEN (1987) als stabil erwiesen. Die für Kleine Einheiten ermittelten Bilanzhöhen in diesem Wattgebiet tendierten zwischen 1965 und 1979 jedoch zu Materialabträgen. Bei stabiler Höhenlage der Wattwasserscheide verbleiben nur die tieferliegenden und durch Prielsysteme zergliederten Wattareale, in denen Material abgetragen wurde. Zudem ist zu erkennen, daß durch rückschreitende Erosion die Priele in Richtung auf die Wattwasserscheide vorgedrungen sind (vgl. Abb. 6). Ursachen für diese Entwicklung werden in Kapitel 3.3 diskutiert.

Auf den Wattflächen zwischen Neuwerk und der Düneninsel Scharhörner (Scharhörner Watt) wechseln Kleine Einheiten mit Anwachs- und Abtragstendenzen ab. Südöstlich Scharhörners schließt sich ein Wattgebiet mit Materialgewinnen an, die sicherlich in Zusammenhang mit der generellen Südost-Bewegung der Scharhörnerplate zu werten sind. Westlich einer Linie Scharhörner-Oberer Wittsand wird die Bilanzhöhenentwicklung differenzierter; insgesamt verzeichnete das Scharhörner Watt zwischen 1965 und 1979 aber einen leichten Materialzuwachs (vgl. Tab. 1).

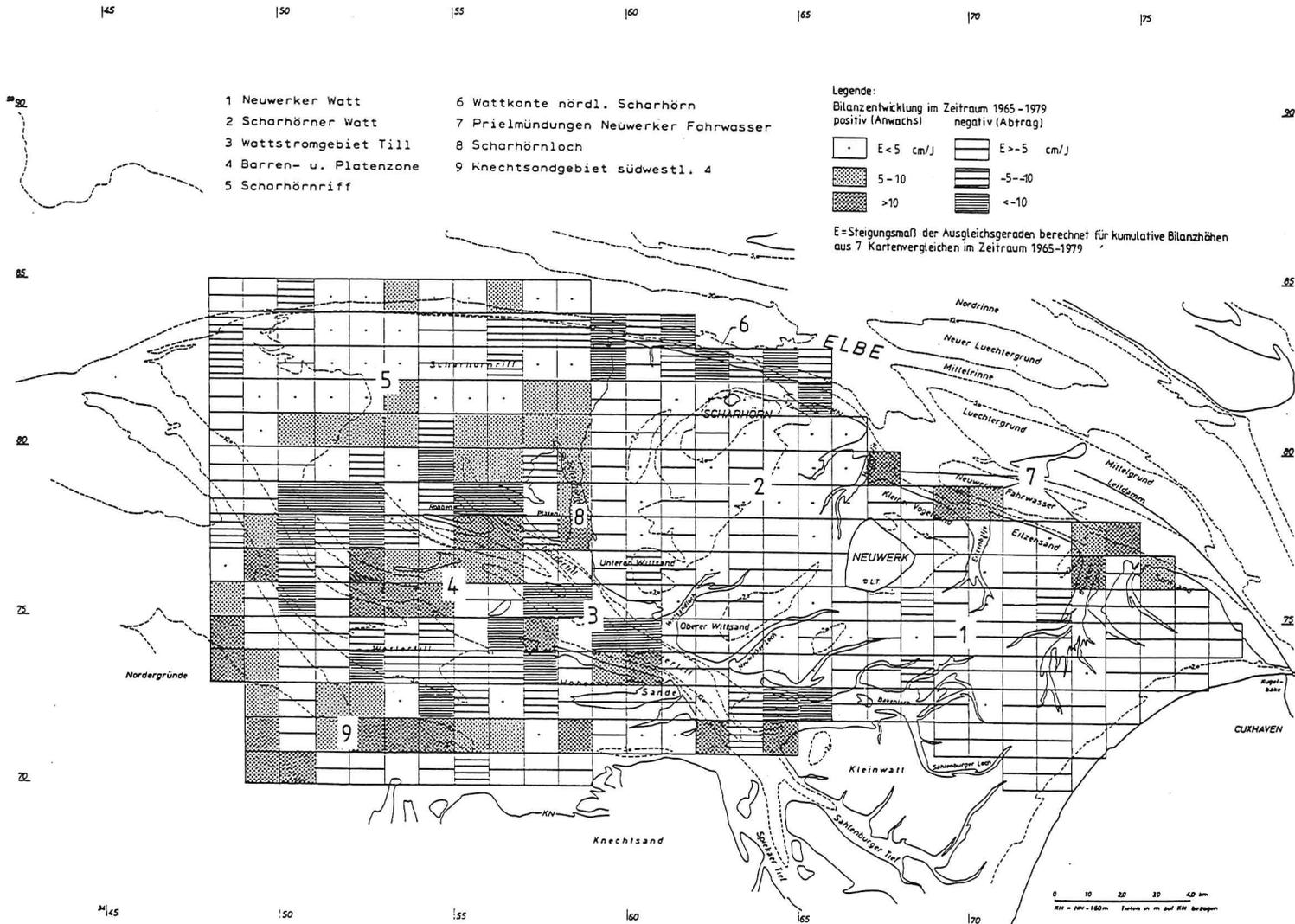


Abb. 5: Entwicklung der Bilanzhöhen zwischen 1965-1979 im Küstenvorfeld zwischen Außenelbe und Knechtsand

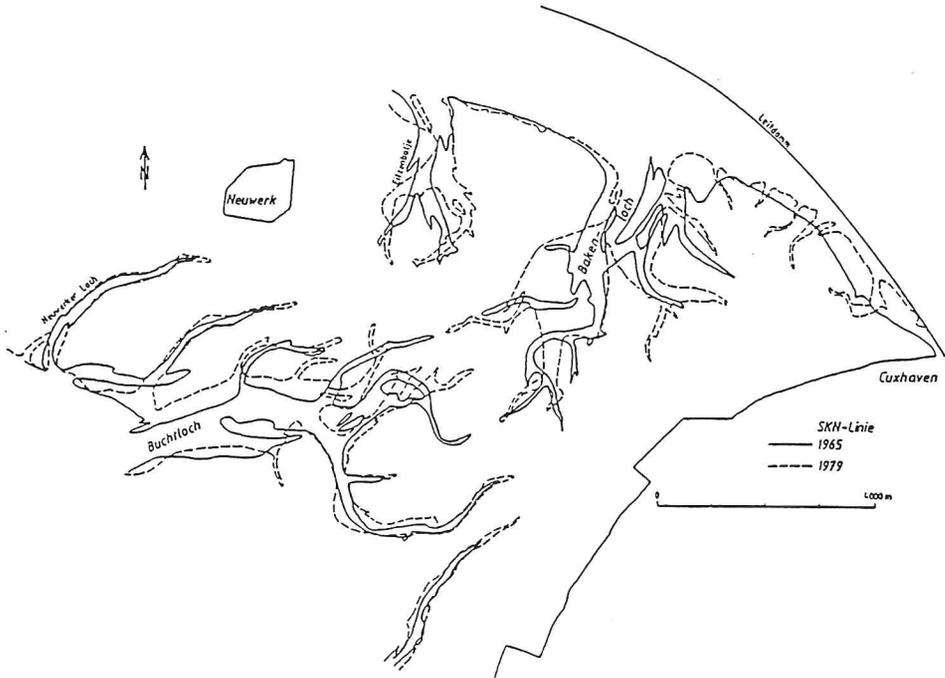


Abb. 6: Priele im Neuwerker Watt

Die Bilanzhöhenentwicklung in dem durch niedrige Bilanzhöhen ($< \pm 5$ cm) ausgezeichneten Wattkerngebiet umfaßt Wattflächen unterschiedlicher Höhenlagen, Exposition und Seegangs- bzw. Strömungsbeeinflussung. Die bei der Umsatzanalyse für morphologisch unterschiedliche Gebiete berechneten Umsatzhöhen (SIEFERT, 1983, 1987; HOFSTEDE und SCHÜLLER, 1988; HOFSTEDE, 1989) spiegeln sich nicht in einer entsprechenden Bilanzhöhen-differenzierung wider. Dies sei nochmals ein Hinweis dafür, daß sich aus unterschiedlichen Umsatzhöhen nicht zwingend entsprechende Bilanzhöhen ableiten lassen.

Ein Gebiet mit ebenfalls nur niedrigen Bilanzhöhen von meist < 5 cm/J ist das zur Nordsee hin abtauchende Scharhörnriff. Ein Wechsel zwischen Anwachs- und Abtragsflächen ist die Regel. Der Korrelationskoeffizient der Bilanzhöhenentwicklung ist niedrig, $r \approx 0,5$. Das Auf und Ab der Geländehöhen resultiert aus dem ständigen Aufbau und ostwärtigem Vortrieb von Sandrücken und Brandungsbänken, wie sie bei GÖHREN (1970, 1975) beschrieben werden. Der Wattstrom Till ist durch negative Entwicklungen der Bilanzhöhen in Kleinen Einheiten geprägt, wie sie vor allem in Verengungszonen und Prielmündungen hervortreten.

Im Ebbedelta der Till liegen die Barren und Platen der Hohenhörnsände und Robbenplatten. Dieses Gebiet mit maximalen Höhendifferenzen > 15 m ist morphologisch stark gegliedert. Die Tideströmung schafft hier V-förmige Sandbänke, die von Ebbe- und Flutrinnen zerschnitten werden. Diese Sandbänke entsprechen nach Lage und Form den Riffbögen am seewärtigen Ausgang der Seegaten zwischen den Friesischen Inseln. Aus dem Zusammenwirken zwischen starker Reliefierung und intensivem Angriff von Strömung und Seegang resultieren Höhenänderungen (Bilanzen) von $> \pm 10$ cm/J.

In nachfolgender Tabelle sind die Bilanzierungen für den Neuwerk/Scharhörner Wattkomplex zusammengestellt.

Tabelle 1. Bilanzierungen für den Zeitraum 1965–1979 im Küstenvorfeld zwischen Außenelbe und Knechtsand

	Fläche [km ²]	Bilanz: [Mio m ³]	–Abtrag/+Anwachs [Mio m ³ /km ²]	Höhenänderung [cm/km ²]
1. Neuwerker Watt	54	–8.90	–0.17	–17
2. Scharhörner Watt	54	+3.0	+0.06	+6
3. Wattstrom Till	25	–12.09	–0.48	–48
4. Robbenplatten, Hohenhörnsände	82	–27.50	–0.29	–29
5. Scharhörnriff	54	–4.51	–0.08	–8
6. Ästuarrand Scharhörn	10	–11.19	–1.12	–112
7. Prielmündungen zum Neuwerker Fahrwasser	7	+12.33	+1.76	+176
8. nordwestl. Knecht- sandgebiet	22	+17.94	+0.82	+82
Gesamt	308	–30.91	–0.10	–10
Neuwerk/Scharhörner Wattkomplex (ohne 8.)	286	–48.85	–0.17	–17

3.2 Umsatzanalysen

Materialumlagerungen im Wattgebiet treten auf, wenn die von den äußeren Kräften verursachte Scherbeanspruchung an der Sohle größer wird als die Scherfestigkeit des Sedimentkörpers. Die auf der Sohle einwirkenden äußeren Kräfte sind die durch Wind verursachte Triftströmung, die Orbitalströmung der Wellen und die Tideströmung des Wasserkörpers (Kap. 1.3.2). Wenn die Wattoberfläche trockenliegt, kann der Wind auch direkt auf die Sohle einwirken. Somit unterliegt die Scherbeanspruchung einem ständigen, von planetarischen und meteorologischen Einflüssen induzierten Wechsel. Die Scherfestigkeit des Sedimentkörpers ist in erster Linie von den Eigenschaften des Materials (Korngröße, -form, Kohäsion, Packung, usw.) abhängig. Aber auch die Richtung und Geschwindigkeit der Scherbeanspruchung sowie die früheren Materialverlagerungen und die Besiedlung können Einfluß auf die momentane Scherfestigkeit haben.

3.2.1 Ergebnisse

Die Auswertungen mit Hilfe der Sättigungsfunktion (Kap. 2.3) zeigen, daß sich der Wattkomplex morphodynamisch unterteilen läßt. Anhand der Parameter *Asymptotische Umsatzhöhe* \bar{h}_u (cm), *morphologische Varianz* β (J⁻¹) und *Umsatzrate* \bar{h}_u/a_0 (cm/J) wurden sieben morphodynamische Einheiten sowie ein anthropogen beeinflusstes Gebiet charakterisiert (Abb. 7). In Tabelle 2 sind für die Teilbereiche jeweils die Kennwerte der drei Parameter aufgeführt. Es soll nochmals darauf hingewiesen werden, daß die ermittelten Parameter Mittelwerte über den Zeitraum 1965–79 darstellen.

Hobes Watt

Das Hohe Watt liegt über NN und umfaßt den eigentlichen Kernbereich des Neuwerk/Scharhörner Wattkomplexes.

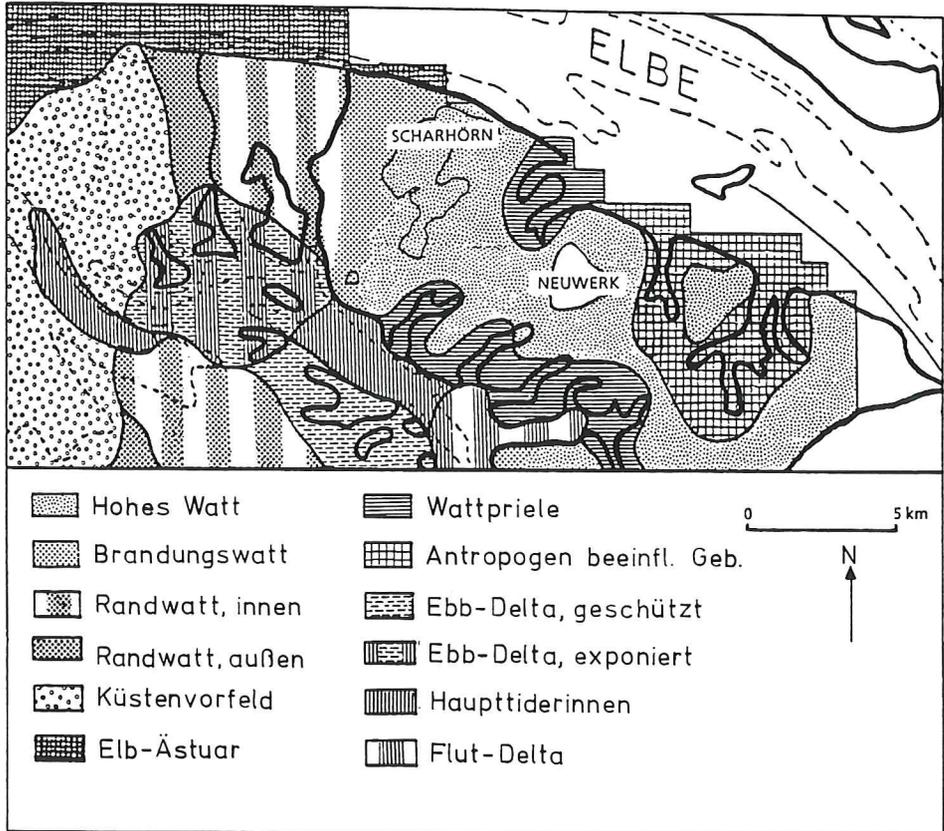


Abb.7: Untergliederung des Neuwerk/Scharhörner Wattkomplexes in Teilgebiete unterschiedlicher Morphodynamik

Die \bar{h}_v -Werte in diesem Bereich entsprechen den maximalen Höhenänderungen, die während einer Sturmflut auftreten können (REINECK, 1976). Dies ist ein Hinweis dafür, daß die Morphodynamik des hohen Wattes maßgeblich von Sturmfluten bestimmt wird, wie das auch von GÖHREN (1968) postuliert wurde. Die sehr geringen \bar{h}_v/a_0 -Werte deuten darauf hin, daß in diesem Bereich, außer während der seltenen Sturmflutereignisse, insgesamt sehr wenig Höhenänderungen auftreten. Die morphologische Varianz β ist recht unterschiedlich. Sehr geringe β -Werte werden auf der Scharhörner Plate registriert, was gut mit der stetigen ostwärtsgerichteten Verlagerung der Plate seit Mitte des letzten Jahrhunderts übereinstimmt (HOFSTEDE, 1991a).

Wattpriele

Die Wattpriele sind die in das Hohe Watt eingeschnittenen Rinnen mit Wassertiefen bis -6 m NN. Sie funktionieren als Be- und Entwässerungsrinnen des Hohen Wattes.

Die \bar{h}_v -Werte liegen um 71 cm. Obwohl lokal sicher Höhenänderungen bis 7 m auftreten können und auch werden, liegen die über den gesamten Bereich gemittelten maximalen Höhenänderungen viel niedriger. Die Werte liegen trotzdem erheblich höher als im Hohen Watt, was vor allem durch die Konzentration des Tidewassers in den Prielen verursacht wird. Dies wird auch durch die viel höheren Umsatzraten belegt. Wie auf dem hohen Watt ist die

Tabelle 2. Untergliederung des Neuwerk/Scharhörner Wattkomplexes anhand der morphologischen Parameter \bar{h}_u , β und \bar{h}_u/a_0

Teilgebiet	n*	\bar{h}_u (cm)	β (J ⁻¹)	\bar{h}_u/a_0 (cm/J)
Hohes Watt	54	28	0,19	5,3
Wattpriele	18	71	0,20	16,4
Seegat Till:				
– Flut Delta	8	232	0,18	42,9
– Haupttiderinnen	13	212	0,14	29,1
– Ebb Delta				
– exponiert	37	274	0,16	44,1
– geschützt	13	153	0,14	20,1
Küstenvorfeld	41	90	0,23	20,5
Randwatt				
– Außenzone	5	86	0,56	47,8
– Innenzone	44	117	0,16	19,2
Brandungswatt	12	84	0,30	25,5
Elb-Ästuar	30	84	0,53	43,9
Anthropogen beeinflusste Gebiete:				
– Neuwerker Fahrwasser	7	357	0,09	31,0
– Buchtloch und Eitzenbalje	20	109	0,22	24,2
Neuwerk/Scharhörner Wattkomplex	275	117	0,20	23,5

*: n = Anzahl der berücksichtigten Kleinen Einheiten

morphologische Varianz auch in den Wattprielel recht unterschiedlich, wobei die Werte auf der Nordseite des Wattes etwas geringer erscheinen als auf der Südseite.

Eine genaue Analyse der Morphodynamik in ausgewählten Prielsystemen wird in Kap. 3.3 vorgestellt.

Seegat Till

Südlich des Neuwerk/Scharhörner Wattkomplexes liegt das Seegat Till. Es läßt sich als Hauptbe- und Entwässerungsrinne eines Wateinzugsgebietes morphometrisch in ein Flut-Delta, ein Ebb-Delta und Haupttiderinnen (Oster- und Westertill) untergliedern.

Der gesamte Seegatbereich wird durch hohe bis sehr hohe \bar{h}_u - und kleine bis sehr kleine β -Werte gekennzeichnet. Die hohen bis sehr hohen \bar{h}_u -Werte werden durch das starke Relief verursacht, was dazu führt, daß geringe horizontale Verlagerungen der Rinne große Höhenänderungen an den Rändern bewirken. Die kleinen bis sehr kleinen β -Werte deuten auf eine langfristig gleichbleibende Tendenz hin, die gut an die von GÖHREN (1965) beschriebene säkulare nordostgerichtete Verlagerung der Seegats zwischen Jade und Elbe anschließt.

Die Umsatzraten sind in den Teilbereichen des Seegates unterschiedlich:

- In den Haupttiderinnen liegen die Umsatzraten um 29 cm/J, etwa 1,8 mal so hoch wie in den Wattprielel.
- Im Flut-Delta liegen die Umsatzraten um 43 cm/J. Hier münden die meisten Wattpriele, was dazu führt, daß der Stromstrich in den Rinnen sehr unregelmäßig verläuft. Es werden sich also an vielen Stellen Prall- und Gleithänge bilden. So wurde zum Beispiel im Bakenloch zwischen 1976 und 1979 an einem Prallhang (1000 × 200 m) etwa $1,2 \times 10^6$ m³ Sand erodiert, d. h. eine flächenhafte Vertiefung von 6 m, während an dem gegenüberliegenden Gleithang etwa $0,8 \times 10^6$ m³ Sand sedimentiert wurde.
- Das Ebb-Delta läßt sich in einen exponierten (Robben Plate) und einen geschützten

(Höhenhörn Sände) Teilbereich zweiteilen. Erstens kann der primäre Seegang direkt bis an die Robben Plate gelangen. Zweitens passiert hier mit jeder Tidephase fast zweimal soviel Tidewasser als bei den Höhenhörn Sänden (SIEFERT, 1976). Diesen hydrologischen Unterschied findet man in den unterschiedlichen Umsatzraten (44 resp. 20 cm/J) der beiden Teilbereiche wieder.

Küstenvorfeld

Dieser Bereich umfaßt das Gebiet westlich des Wattsockels außerhalb der Haupttiderinne Westertill. Die obere Genze liegt im untersuchten Gebiet etwa bei -6 m NN. Hier findet man einen Profilknick, der ursächlich mit den hier einsetzenden Seegangsenergieeinwirkungen auf die Sohle verknüpft ist.

Der Bereich ist gekennzeichnet durch mittlere \bar{h}_u -, mittlere β - und mittlere \bar{h}_u/a_0 -Werte. Die Materialumlagerungen werden hier fast ausschließlich durch die Tideströmungen verursacht. Obwohl die Tideströmungen vergleichbar sind mit denen in den Haupttiderinnen, liegen die Umsatzraten mit 20 cm/J deutlich niedriger. Dies wird durch das Fehlen einer Rinnenstruktur, wodurch überhaupt keine Prall- und Gleithangbildung möglich ist, verursacht.

Randwatt

Das Randwatt ist die äußere Zone des Wattsockels. Es läßt sich topographisch in eine reliefreiche Außen- und eine reliefarme Innenzone untergliedern. Die untere Grenze der Außenzone formt den schon erwähnten Profilknick um -6 m NN, die obere Grenze der Innenzone liegt um MTnw.

Auch morphodynamisch läßt sich das Randwatt in eine Außen- und Innenzone zweiteilen:

- Die Außenzone ist etwa 1,5 km breit und weist Wassertiefen zwischen -6 und -2 m NN auf. Sie wird durch mittlere \bar{h}_u -, sehr große β - und sehr hohe \bar{h}_u/a_0 -Werte gekennzeichnet. Diese ausgeprägte Morphodynamik läßt sich folgenderweise erklären. Bedingt durch die Seegangsenergieeinwirkungen werden in einer Tiefe von etwa -6 m NN Sandbänke geformt. Diese Sandbänke verlagern sich ostwärts, wodurch sich an der Wellenbasis neue Bänke bilden können. Die \bar{h}_u -Werte von etwa 86 cm geben einen Hinweis auf die Höhe der Sandbänke, die sehr großen β -Werte deuten auf ihre schnelle Verlagerung hin. Die sehr hohen Umsatzraten schließlich verweisen auf eine hohe Scherbeanspruchung, wie sie in dieser Brandungszone vorgegeben ist.
- Die Innenzone des Randwattes schließt landseitig an die Außenzone an. Sie ist eine etwa 3,5 km breite Zone, gekennzeichnet durch mittlere bis hohe \bar{h}_u -, kleine β - und mittlere \bar{h}_u/a_0 -Werte. Die relativ hohen \bar{h}_u -Werte werden wahrscheinlich durch Verlagerungen der Tiderinnenläufer verursacht. Die kleinen β - sowie die mittleren \bar{h}_u/a_0 -Werte deuten darauf hin, daß sich in dieser Zone keine oder kaum Sandbänke bilden und verlagern bzw., daß in dieser Zone kaum Seegangsenergie umgewandelt wird.

Brandungswatt

Das Brandungswatt liegt direkt westlich der Scharhörner Plate zwischen MTnw und MThw (eulitoral Bereich). In dieser etwa 3 km breiten Zone werden gleichzeitig bis zu fünf sich ostwärts verlagernde Brandungsbänke unterschieden.

Das Brandungswatt wird durch niedrige bis mittlere \bar{h}_u -, mittlere bis große β - und mittlere \bar{h}_u/a_0 -Werte gekennzeichnet.

Die \bar{h}_u -Werte von 84 cm entsprechen in etwa der Höhe der durchziehenden Brandungsbänke. Die β -Werte sind relativ hoch, was auf einen kurzfristigen Wechsel der Tendenzen, bedingt durch die durchziehenden Brandungsbänke, hindeutet.

Es zeigt sich also, daß im Brandungswatt und in der Außenzone des Randwattes in etwa die gleichen morpho- und hydrologischen Prozesse vorherrschen. Die Umsatzraten sind im Brandungswatt jedoch nur etwa halb so hoch wie in der Außenzone des Randwattes. Dieser Unterschied wird verständlich, wenn man bedenkt, daß sich während ruhiger Wetterlagen in der Außenzone 83 % und im Brandungswatt nur 17 % des primären Seeganges umwandeln (HOFSTEDÉ, 1991a).

Elb-Ästuar

Der Nordrand des untersuchten Gebietes wird durch die Südflanke des Elb-Ästuars gebildet. Westlich von Scharhörn kann der Höhenunterschied auf einer Strecke von 200 m über 20 m betragen. Dieser Bereich wird durch mittlere \bar{h}_u -, sehr große β - und sehr hohe \bar{h}_u/a_0 Werte gekennzeichnet.

Die sehr hohen Umsatzraten deuten auf einen intensiven Materialtransport entlang der Nordflanke des Scharhörnriffes hin. Die sehr großen β -Werte sind ein Hinweis dafür, daß dieser Bereich keiner säkularen Entwicklung unterliegt. Alte Seekarten belegen, daß die Südflanke der Elbe westlich von Scharhörn schon seit Jahrhunderten in seiner heutigen Lage verharnt. Die nur mittleren \bar{h}_u -Werte deuten darauf hin, daß die Gesamtopographie des Gebietes relativ stabil ist.

Anthropogen beeinflusste Gebiete

Ein Teil des untersuchten Gebietes ist deutlich durch menschliche Eingriffe beeinflusst. Diese Gebiete sind immer einzeln zu bewerten, weil das Eingreifen jedesmal quantitativ und qualitativ unterschiedlich sein kann. Im Neuwerk/Scharhörner Wattkomplex wurden die künstlichen Störungen durch die Verklappungen großer Baggermengen aus der Elbe im Neuwerker Fahrwasser und durch den Bau des Leitdammes an der Nordgrenze des untersuchten Gebietes verursacht. Die Verklappungen im Neuwerker Fahrwasser führten zu sehr hohen \bar{h}_u - und sehr kleinen β -Werten, was auf eine (künstliche) säkulare Veränderung hindeutet.

Der Bau des Leitdammes hat nach GÖHREN (1970) dazu geführt, daß die morphologische Aktivität des Buchtloches stark zunahm. Dies wird auch deutlich, wenn man die hohen \bar{h}_u - und mittleren bis hohen \bar{h}_u/a_0 -Werte der Prielsysteme Buchtloch und Eitzenbalje betrachtet.

Als drittes Beispiel menschlichen Eingreifens kann das Aufspülen der zweiten Vogelinsel Nighörn in 1989 direkt südlich von Scharhörn genannt werden. Es wird interessant sein, die Folgen dieser Aufspülung anhand des MORAN-Verfahrens zu untersuchen.

3.3 Fallbeispiel Prielsysteme

In den Prielen eines Wattgebietes wird die Morphodynamik von ungleich vielfältigeren Rahmenbedingungen gesteuert als es bei den rein terrestrischen Flußsystemen der Fall ist, die durch die herrschenden Gefälleverhältnisse geprägt sind. Bei der Gestaltung der Wattwasserläufe wirken Tideverhältnisse, Seegang und Wellenbeugungsprozesse mit.

Entscheidend für die Morphodynamik ist der Wechsel der Wasserstände, die durch das Zusammenwirken des übergeordneten Tidegeschehens der Nordsee und der topographischen Küstenkonfiguration bestimmt wird. Bis in die 60er Jahre dieses Jahrhunderts lassen sich die Veränderungen der Tidewasserstände als periodische Schwankungen nachverfolgen (MÜGGE und Vischer, 1988). Etwa ab 1965 hat eine überdurchschnittliche Absenkung des MTnw eingesetzt, die aus der Periodizität ausbricht und bis etwa 1979 einen Tiefstand erreicht. Die morphologische Auswirkung dieser MTnw-Entwicklung wird mittels der Analyse von Bilanz- und Umsatzhöhen aus dem vorliegenden Kartenmaterial herausgearbeitet. In Abbil-

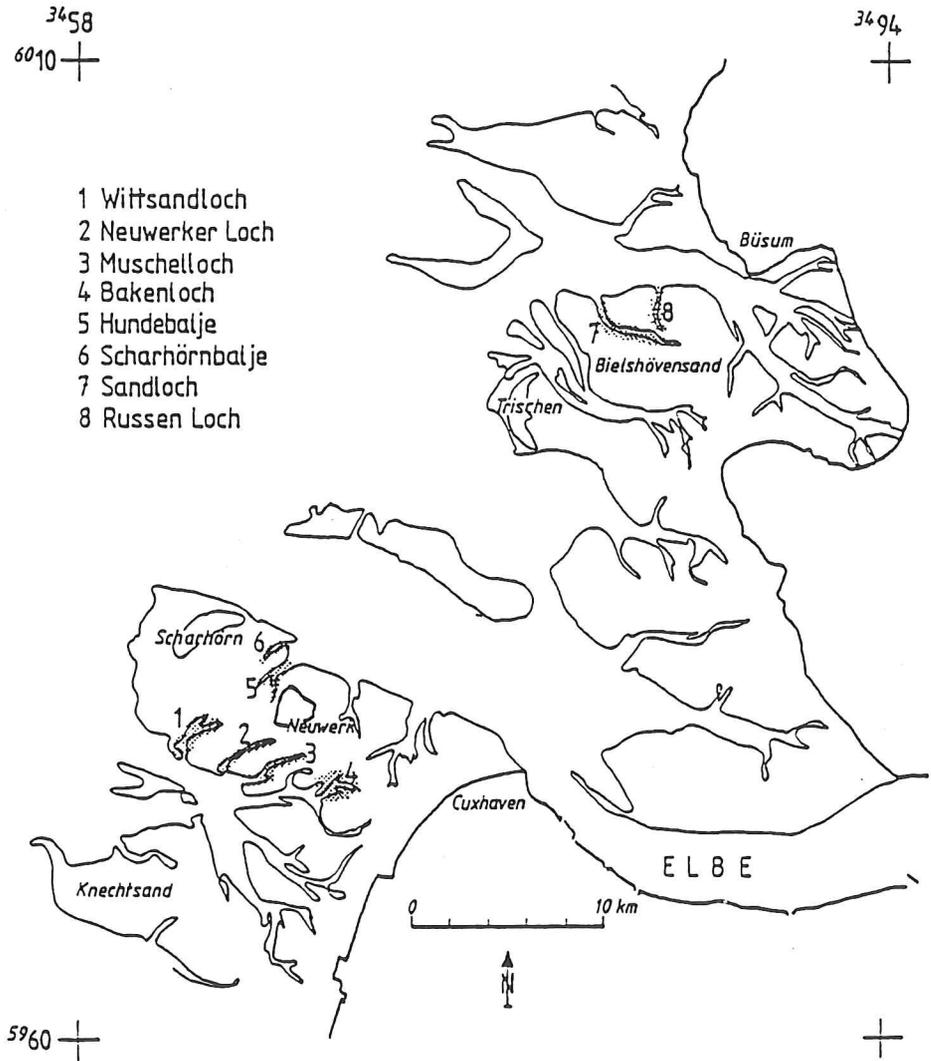


Abb. 8: Übersichtsplan mit den untersuchten Prielgebieten

ding 8 sind die untersuchten Priele des Neuwerk/Scharhörner Wattkomplexes gekennzeichnet.

3.3.1 Materialhaushalt der Priele

Der Materialhaushalt in den Priele wechselt zwischen akkumulativen und erosiven Phasen, wie sie in Tabelle 2 zu ersehen sind. Bei zwei Priele (Wittsandloch, Muscheloch) endet die Entwicklung mit deutlichen Erosionshöhen. In den anderen Priele übersteigt die Bilanzhöhe am Ende des Untersuchungszeitraumes nicht die Bilanzhöhen der einzelnen Kartenvergleiche. Zur Beurteilung des morphologischen Geschehens ist es daher unerlässlich, auch die einzelnen Vergleiche zu werten.

Tabelle 3. Bilanzhöhen in Prielen des Neuwerk/Scharhörner Wattkomplexes: Sedimentations-, Erosionshöhe in cm

	Fläche ha	Kartenvergleiche							Σ
		65/66	66/68	68/70	70/72	72/74	74/76	76/79	
Wittsandloch	26	-12	12	-13	-14	-3	-4	-18	-52
Neuwerker Loch	11	-35	36	20	14	-29	28	-21	13
Muschelloch	20	1	3	-1		-8	-13	-6	-35
Bakenloch	275	8	-18	9	-6	7	-1	9	8
Scharhörnbalje	39	3	3	10	9	0,3	47	-70	2
Hundebalje	29	-1	4	-12	19	-20	12	7	9

(1 cm Höhenänderung = 100 m³/ha)

Die Bilanzhöhen in Tabelle 3 lassen erkennen, daß ein absinkendes Tideniedrigwasser (um 1965, ab 1970) in den Prielen die Abtragungsprozesse fördert. Am deutlichsten wird dies bei Betrachtung der innerhalb 1965 bis 1979 aufgetretenen Höchst- und Tiefststände des MTnw. Während des relativ hochstehenden MTnw um 1967 dominiert Akkumulation und zu Zeiten des stark abgesunkenen MTnw zwischen 1976 bis 1979 Erosion (vgl. Tab. 3, Kartenvergleiche für 66/68 und 76/79).

3.3.2 Materialumsatz in Prielen

Die einzelnen Priele unterscheiden sich in ihren absoluten Umsatzhöhen. Eine weitergehende Information kann aus der zeitlichen Veränderung dieser Umsatzhöhen abgeleitet werden. Aus den Umsatzhöhen der einzelnen Vergleiche wurden nach einem von TAUBERT (1986) vorgestellten Ansatz die Umsatzänderungs-Beschleunigungen zur Verdeutlichung der Umsatzhöhenentwicklung berechnet (Tab. 4).

Tabelle 4. Umsatzhöhenentwicklung (Umsatzänderungs-Beschleunigung) in Prielen des Neuwerk/Scharhörner Wattkomplexes

	66/68	68/70	70/72	72/74	74/76	76/79
Wittsandloch	0,5	3,5	-0,5		-3	4
Neuwerker Loch	1	-3		2	2,5	3,5
Muschelloch	0,5		-4,4	1,3		6,5
Bakenloch	-2,5	4,5	-2		1	0,5
Scharhörnbalje	-1	-2,5	3,5		4,5	2,5
Hundebalje	-3	1	2		-2,5	-7

Die Tabelle 4 zeigt für alle sechs Prielläufe in den 70er Jahren positive Beschleunigungen der Umsatzhöhen, die sich bis 1979 mit Ausnahme der Hundebalje in allen Prielen durchgesetzt haben. Die Beschleunigungen finden sich überwiegend in der Phase des deutlich abgesunkenen MTnw nach 1974. Im Wittsandloch und Bakenloch fallen weitere positive Umsatzänderungs-Beschleunigungen mit dem absinkenden MTnw zwischen 1968-72 zusammen.

Die sich auf den nun trockengefallenen, subtidalen Prielhängen entfaltende fluviale Aktivität und die mit dem wachsenden Tidenhub verbundene Zunahme der Fließgeschwindigkeiten stellen Änderungen der hydraulischen Rahmenbedingungen dar. Die Anpassung daran äußerte sich in einer Steigerung der Umsatzaktivität in den Prielen.

Das Umsatzgeschehen in zwei Prielen des Bielshövensandes vor der Meldorfer Bucht ordnet sich in die Verhältnisse des Neuwerk/Scharhörner Wattkomplexes ein. Die dort festgestellten Umsatzsteigerungen zwischen etwa 1974 bis 1980 sind auch in den Prielen des Bielshövensandes zu erkennen gewesen. (Die Vermessungsunterlagen für die Analysen des Bielshövensandes wurden dankenswerterweise vom Amt für Land- und Wasserwirtschaft Heide, Dezernat Gewässerkunde, in Büsum zur Verfügung gestellt).

Die nach der MORAN-Methode berechneten asymptotischen Umsatzhöhen sind für die einzelnen Priele deutlich differenziert. Die Exposition der Prielmündung gegen den einlaufenden Seegang – freie Wasserflächen vor der Mündung oder vorgelagerte seegangsdämpfende Barren und Platen – sind mitentscheidend für die Umsatzhöhe. Daneben sind die Größe des Prieleinzugsgebietes und die Form des Priellaufes dahingehend bestimmend, daß mit wachsendem Prieleinzugsgebiet und zunehmender Zergliederung des Priellaufes die Umsatzhöhe zunimmt.

Abbildung 9 zeigt eine Zusammenstellung der zur Morphodynamik in Prielen beitragenden Einflußfaktoren.

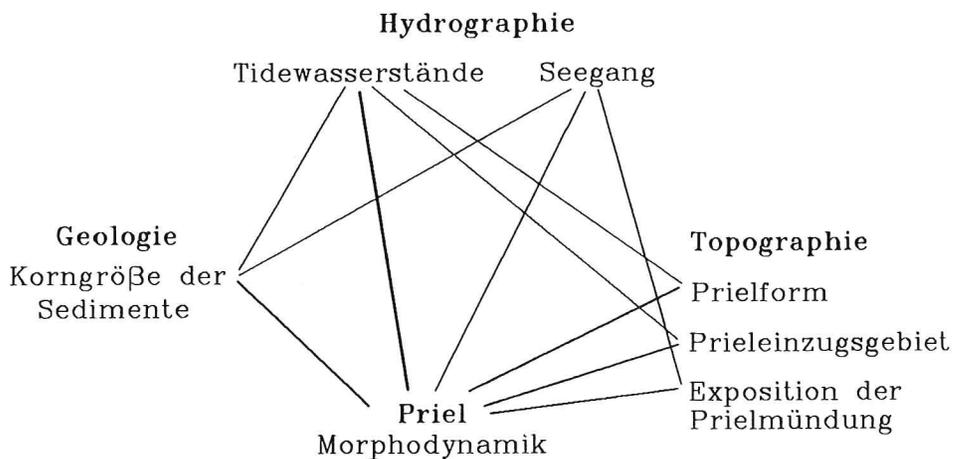


Abb. 9: Die Morphodynamik in Prielen bestimmende Einflußfaktoren

3.4 Weitere Untersuchungen mit dem MORAN-Verfahren

3.4.1 Windverhältnisse und Materialhaushalt

Neben den Tideströmungen haben die unter Windeinfluß entstehenden Triftströmungen eine große Bedeutung für die Materialverlagerungen. Im Wattengebiet mißt GÖHREN (1968) den winderzeugten Triftströmungen einen erheblichen Einfluß auf die Sandbewegung zu. Die Auswertung der Winddaten der Station Scharhörn, für den mit verlässlichem Kartenmaterial abgedeckten Zeitraum zwischen 1965 bis 1979, zeigt vor allem im Bereich höherer Windgeschwindigkeiten (> Bft 5) eine Zunahme der Windhäufigkeit aus west-, nordwestlichen

Richtungen. Diese Verhältnisse waren auch überregional festzustellen, wie Untersuchungen von HOOZEMANS (1989) vor der niederländischen Küste belegen.

Aufgrund der topographischen Küstenkonfiguration ist bei westlichen Windlagen eine Förderung des Sedimenteintrages in die innere Deutsche Bucht zu erwarten. Die Gegenüberstellung westlicher Windrichtungen mit dem verbleibenden Teil der Windrose zeigt in Abbildung 10 Phasen mit bzw. ohne Dominanz westlicher, sedimentbringender Windlagen.

Zwischen den in Abbildung 10 dargestellten Windverhältnissen und den Bilanzhöhen in

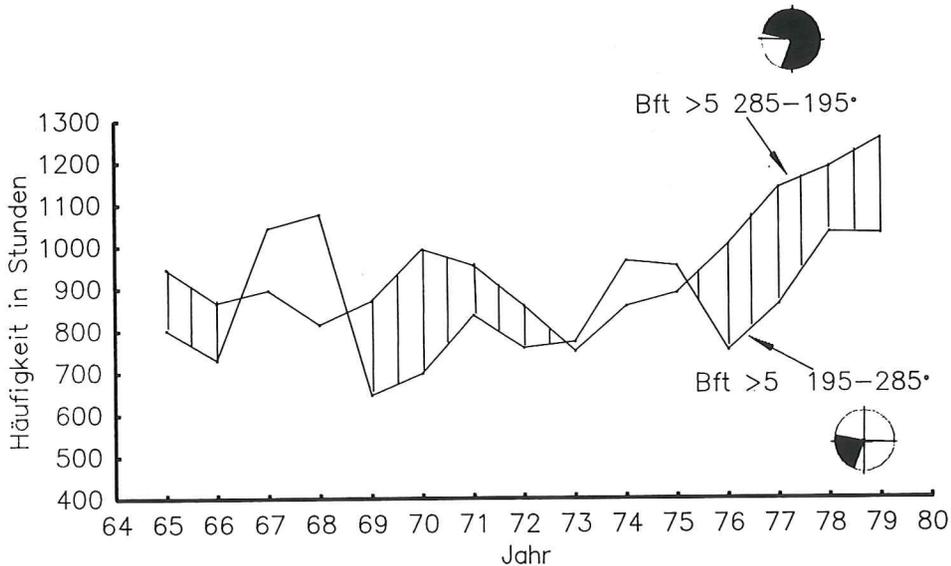


Abb. 10: Verteilung der summierten Stundenhäufigkeiten für die Windrichtungen 285–195° und 195–285° (Station Scharhörn)

Teilgebieten des Neuwerk/Scharhörner Wattkomplexes läßt sich mittels Regressionsrechnung ein Zusammenhang ableiten, wie er in Abbildung 11 verdeutlicht ist.

Dabei ist bei einem Überwiegen westlicher Windrichtungen (im Bereich höherer Windgeschwindigkeiten) von einem Materialeintrag in die äußeren Teile des Küstenvorfeldes auszugehen, wie es die relativ strengen Korrelationen für das Ebbedelta der Till bzw. das Scharhörnriff anzeigen. Auch in dem an den Materialhaushalt des äußeren Küstenvorfeldes angeschlossenen Wattstrom Till ist dieser Zusammenhang noch bemerkbar, nicht dagegen auf den Wattflächen des Neuwerker und Scharhörner Wattes.

Es gibt damit Belege dafür, daß im äußeren Küstenvorfeld die Windverhältnisse einen entscheidenden Einfluß auf den Materialhaushalt ausüben.

3.4.2 Die Wirkung von Sturmfluten im Küstenvorfeld

Grundlage bilden auch hier die nach dem MORAN-Verfahren ermittelten Bilanz- und Umsatzhöhen für die in Tab. 1 aufgeführten Teilgebiete des Neuwerk/Scharhörner Wattkomplexes. Außerdem sind für den gesamten Überwachungszeitraum aus den Windstaukurven der einzelnen Sturmflutereignisse die Windstauenergien ermittelt worden. Danach ist nicht

Zusammenhang zwischen Windverhältnissen und Bilanzhöhen

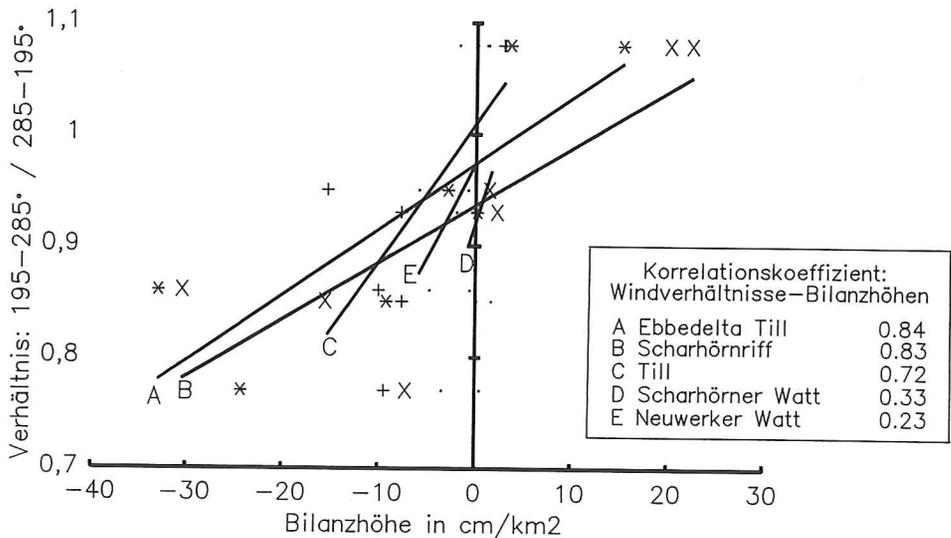


Abb. 11: Zusammenhang zwischen Windverhältnissen und Bilanzhöhen für Teilgebiete des Küstenvorfeldes zwischen Außenelbe und Knechtsand

diejenige Sturmflut mit dem absolut höchsten Wasserstand die energiereichste – von ebenso wichtiger Bedeutung ist die Zeitdauer eines Sturmflutereignisses.

Die Ausgleichsgeraden für die Datenkollektive in den Abbildungen 12 und 13 zeigen bei zunehmender Windstauenergie die Tendenz zu negativen Bilanzhöhen (Materialverlusten) und steigenden Umsatzhöhen auf den Wattflächen.

Die Verhältnisse im äußeren Küstenvorfeld sind indifferenter, wobei auffallenderweise die Umsatzhöhe im Ebbedelta der Till bei Sturmflutereignissen zu geringeren Werten tendiert.

Auf der Grundlage der rd. zweijährigen Vermessungsabstände ist der Einfluß von Sturmfluten auf die Morphodynamik der Wattflächen noch gut erkennbar. Sturmfluten steigern die Dynamik, Umsatzhöhen nehmen zu und Materialverluste stellen sich ein. Im äußeren Küstenvorfeld, in dem gegenüber den Wattflächen auch bei Normalbedingungen eine größere Morphodynamik herrscht, haben Sturmfluten im Hinblick auf Bilanz- und Umsatzhöhen eine geringere Bedeutung.

3.4.3 Hinweise für weitere Arbeiten im Küstenvorfeld

Die vorgestellten Untersuchungsergebnisse verdeutlichen, daß die Morphodynamik im Küstenvorfeld keinem einheitlichen Steuerungsmechanismus unterliegt. Es können vielmehr Bereiche ausgegliedert werden, in denen unterschiedliche Wirkungsmechanismen dominieren. Für zukünftige Untersuchungen lassen sich in Abhängigkeit davon und den ermittelten Höhenänderungen Empfehlungen für Vermessungsabstände geben:

- **hohe Watten:** sturmflutabhängige Morphodynamik, Überwachungsrythmus: 10 Jahre
- **Priele:** tidewasserstandsabhängige Morphodynamik, Überwachungsrythmus: 1 Jahr

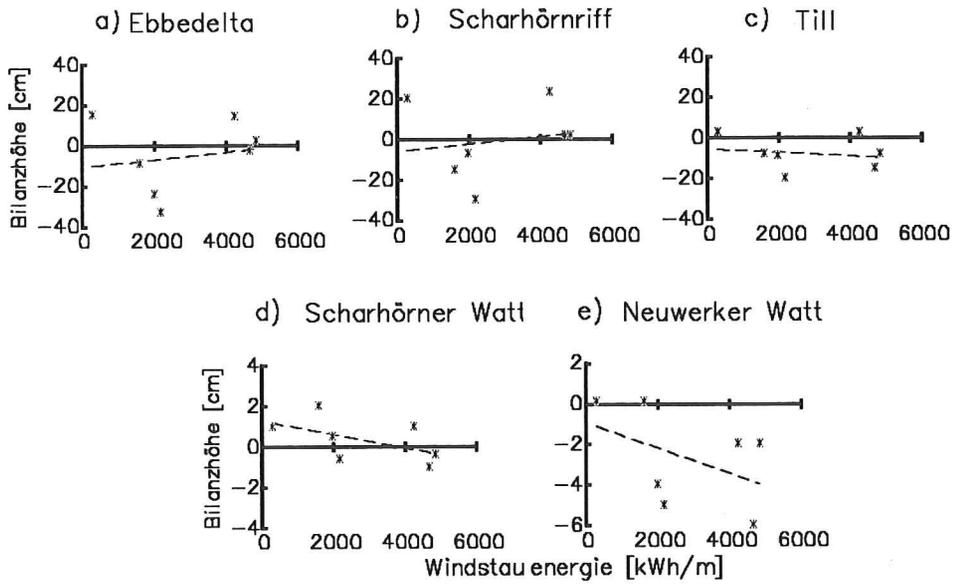


Abb. 12: Bilanzhöhen in Teilen des Küstenvorfeldes zwischen Außenelbe und Knechtsand und Windstauenergie

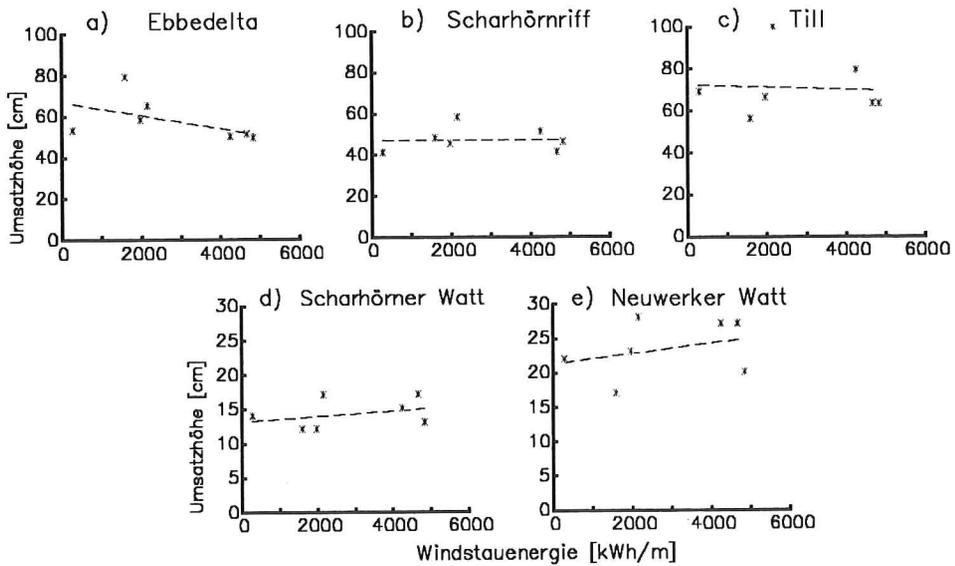


Abb. 13: Umsatzhöhe in Teilen des Küstenvorfeldes zwischen Außenelbe und Knechtsand und Windstauenergie

- **äußeres Küstenvorfeld:** atmosphärisch-hydrologisch gesteuerte Morphodynamik, Überwachungsrythmus 3 bis 5 Jahre

4. MORAN-Analysen in anderen Wattgebieten

Die detaillierten Untersuchungen im Neuwerk/Scharhörner Wattkomplex scheinen die Aussagekraft des MORAN-Verfahrens zu bestätigen. Es wurde aber als notwendig empfunden, das Verfahren auch in anderen Gebieten anzuwenden, um somit eventuelle Fehler des Verfahrens korrigieren und die Allgemeingültigkeit der erzielten Parameterwerte überprüfen zu können.

4.1 Der Elbe-Randbereich Brammerbank/Krautsander Watt

Das Gebiet liegt im Randbereich der Unterelbe (km 675 bis 681) und umfaßt einen etwa 10 km² großen Abschnitt zwischen dem Ufer und dem künstlich tiefgehaltenen Hauptelbefahrwasser (Abb. 14). Die Morphodynamik des Sandbank/Rinnensystems wird von der Coriolisbeschleunigung geprägt. Sie verursacht eine Rechtsablenkung der Ebbe- und Flutströmung, wodurch es in der Mitte des Strömungskreises, d. h. in der Beruhigungszone, zu Ablagerungen kommen kann. Folglich läßt sich das Gebiet hydrodynamisch in zwei Teilbereiche unterteilen: den Rinnenbereich unterhalb SKN ($\approx 8,5$ km²) und den über SKN herausragenden Bankenbereich ($\approx 1,5$ km²). Der Bankenbereich besteht nur aus den stabilen Kernen der Brammerbank und des Krautsander Watts, d. h. jenen Gebieten, die zwischen 1970 und 1987 kontinuierlich über SKN herausragten. Dies bedeutet, daß von der im Neuwerk/Scharhörner Wattkomplex benutzten quadratischen Grundform „Kleine Einheit“ von 1 km² abgewichen wurde.

4.1.1 Ergebnisse

Die durchgeführten MORAN-Auswertungen scheinen die Zweiteilung des Gebietes zu unterstützen (Abb. 15). Die asymptotische Umsatzhöhe ist im Bankenbereich etwa 2,5mal niedriger als im reliefreichen Rinnenbereich. Dagegen ist die morphologische Varianz im Bankenbereich mit 0,45 etwa 3,5mal höher als die des Rinnenbereiches. Dies könnte darauf hinweisen, daß der Rinnenbereich einer säkularen Änderung der Topographie unterliegt, die im Bankenbereich fehlt. Obwohl der Rinnenbereich höhere Strömungsgeschwindigkeiten aufweist und zudem kontinuierlich überflutet wird, ist die mittlere Umsatzrate hier etwa 1,4mal niedriger als im Bankenbereich.

Mit Hilfe des MORAN-Auswertungsverfahrens können nicht nur Umsatz-, sondern auch (flächenhafte) Bilanzanalysen durchgeführt werden.

Aus diesen Bilanzanalysen geht hervor, daß der Rinnenbereich eindeutig einer säkularen Änderung unterliegt (Abb. 16), wie dies auch die geringen β -Werte schon andeuteten. Eine flächenhafte Darstellung der Höhenentwicklung im Untersuchungsgebiet zwischen 1970 und 1987 (Abb. 17) zeigt, daß diese Änderung für Teile des Rinnenbereiches gegensätzlich verläuft. Die Höhenänderungen im Bankenbereich dagegen schwanken um Null (Abb. 16).

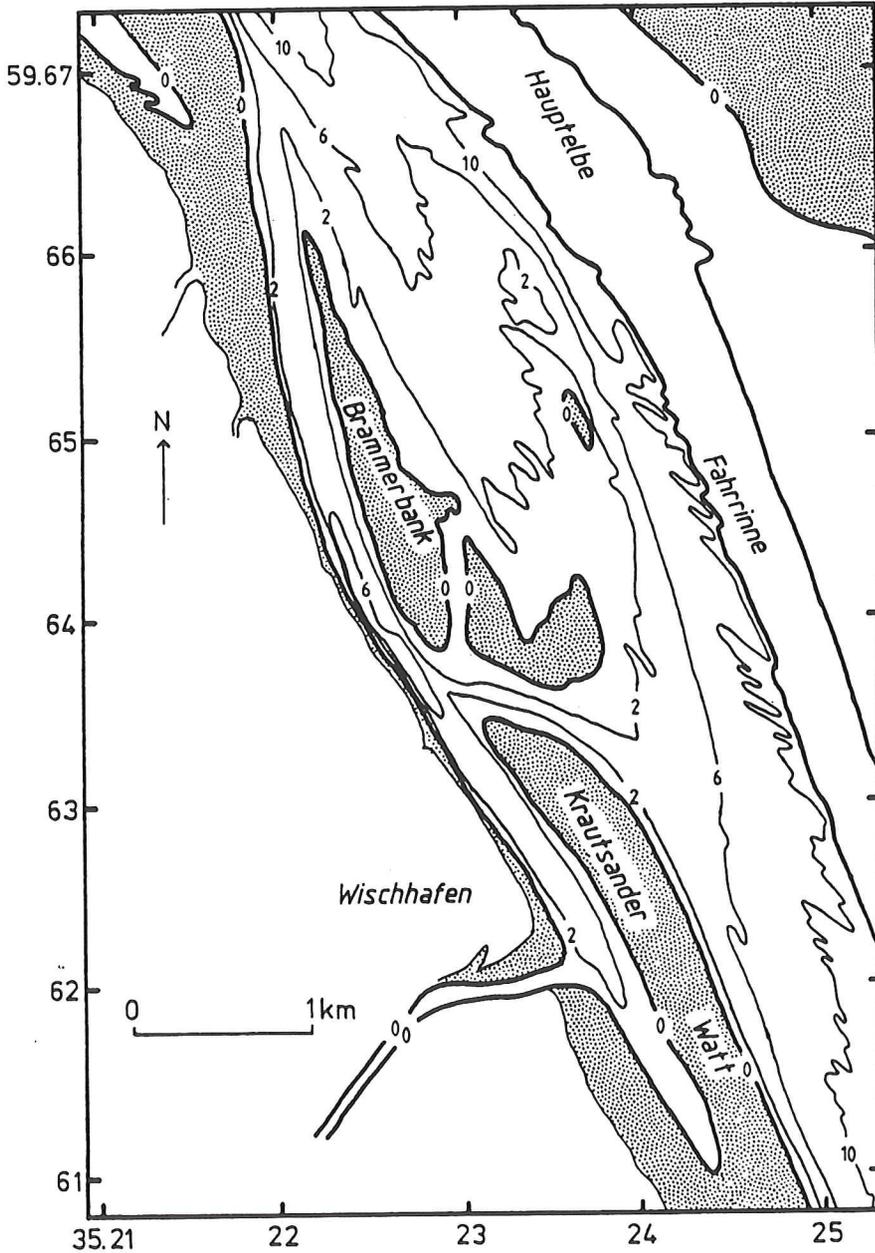


Abb. 14: Übersichtsplan des Elbe-Randbereiches Brammerbank/Krautsander Watt

4.2 Die Außeneider

Das etwa 16 km² große Untersuchungsgebiet liegt südlich der Halbinsel Eiderstedt im Wattengebiet der inneren Deutschen Bucht (Abb. 18). Innerhalb seiner Grenzen liegen Teilabschnitte der Nord- und Südrinne der Außeneider sowie die Vollerwiek-Plate. Auch hier

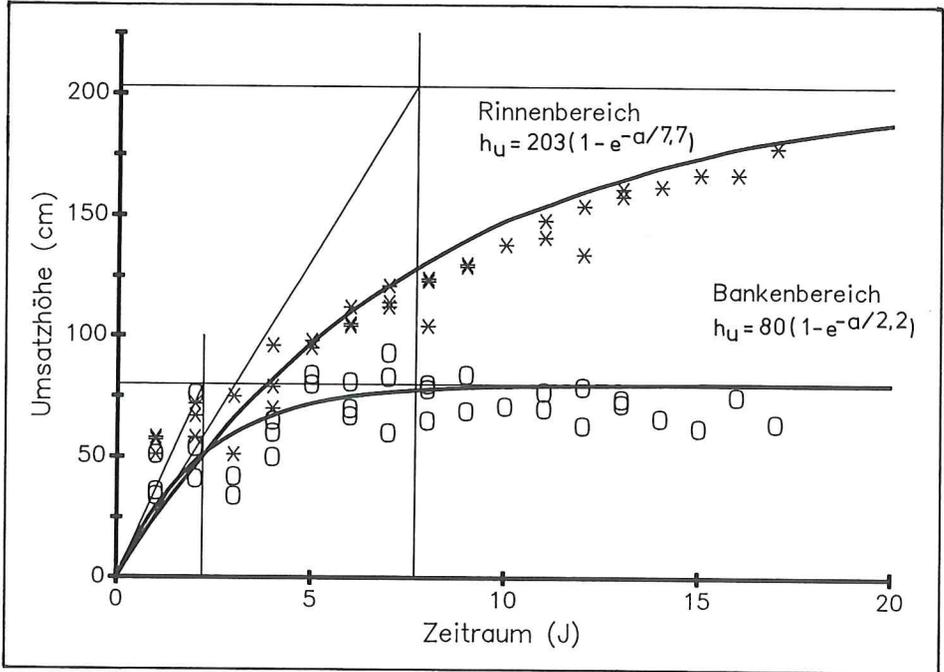


Abb. 15: Umsatzhöhen h_U über den Vergleichszeitraum a für die Teilgebiete Rinnenbereich (*) und Bankenbereich (o)

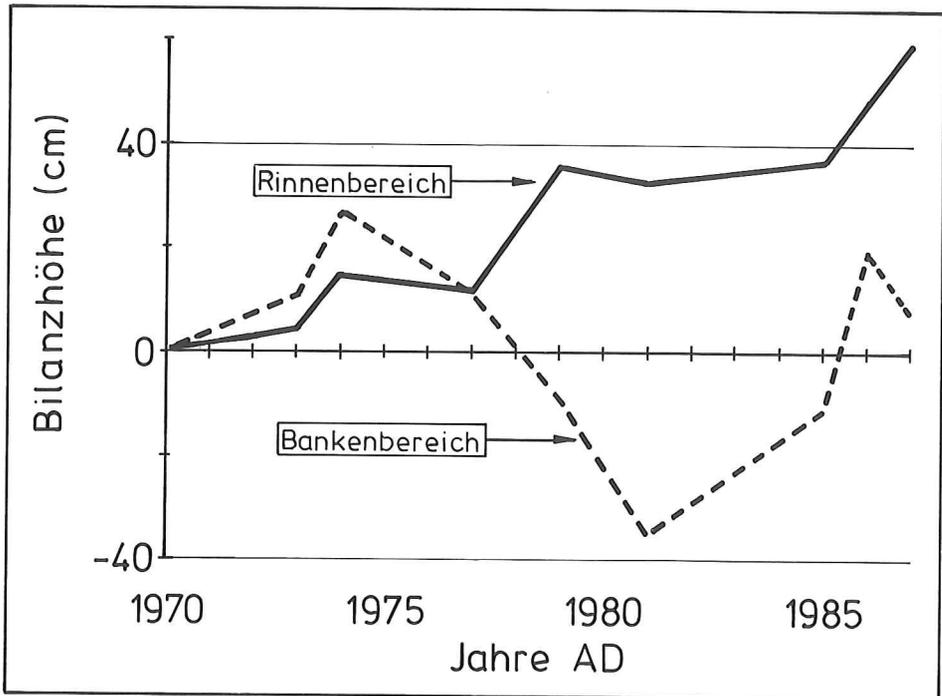


Abb. 16: Bilanzentwicklung im Rinnen- und Bankenbereich zwischen 1970 und 1987

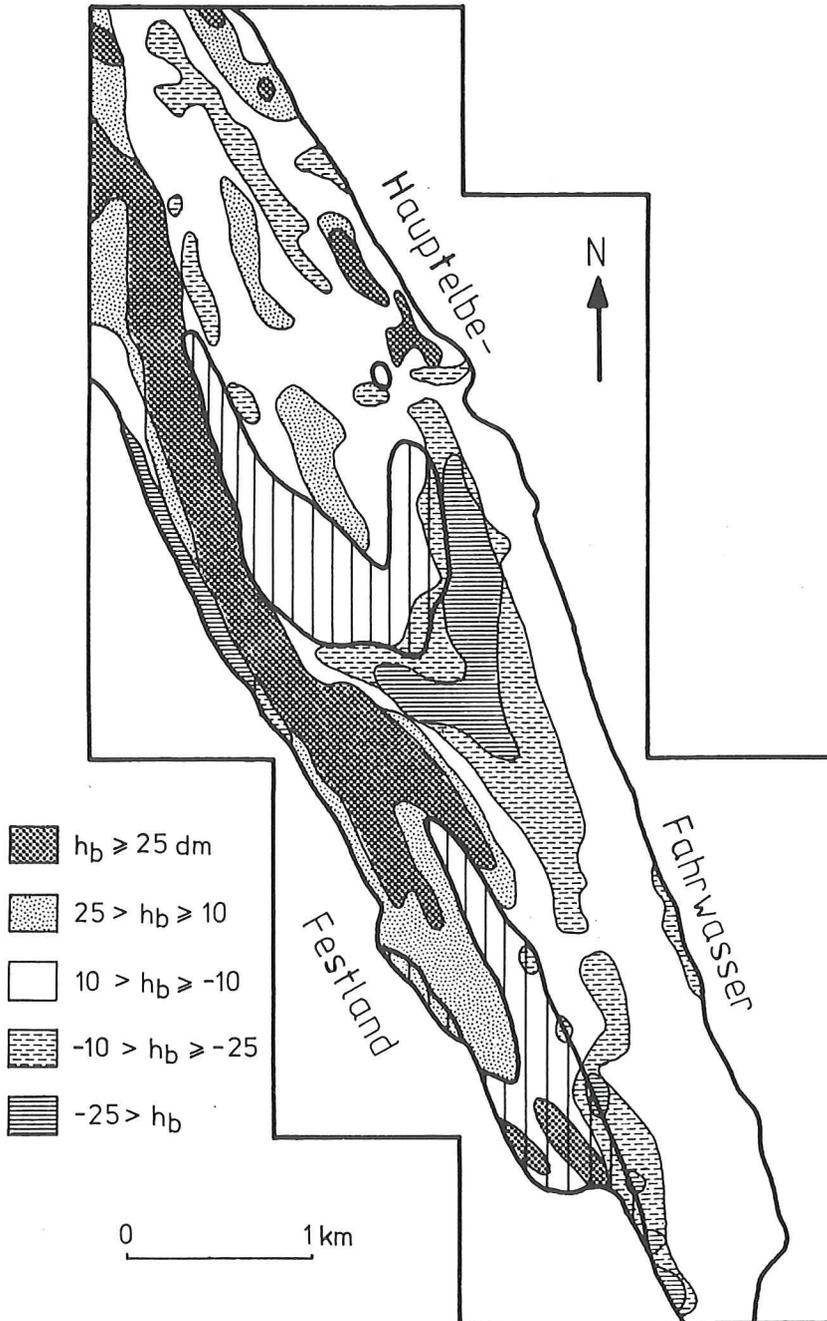


Abb. 17: Flächenmäßige Bilanzierung (Vergleich 1970–87) des Elbe-Randbereiches Brammerbank/Kraut-sander Watt

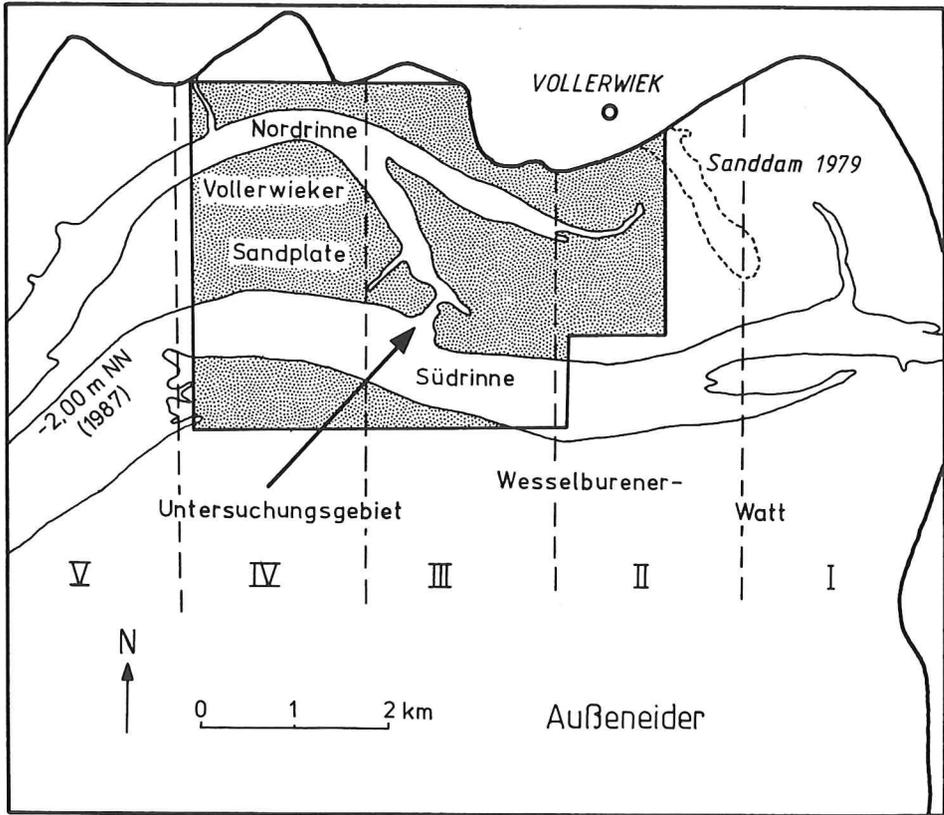


Abb. 18: Übersichtsplan der Außeneider

wird die Hydrodynamik vom Tidegeschehen bzw. von der Coriolisbeschleunigung dominiert.

Die Entwicklung der Außeneider unterscheidet sich grundlegend von der in den bisher untersuchten Gebieten. Mit dem Ziel, für das Eidergebiet eine optimale Vorflut zu schaffen sowie den Schiffsverkehr in dem nach 1936 möglich gewesenen Umfange zwischen der Nordsee und dem Nord-Ostsee-Kanal aufrechtzuerhalten, wurde die Eider in 1972 bei Hundeknöll abgedämmt (Eidersperrwerk). Zweitens wurde 1979 zur Sicherung des Vollerwieker Seedeiches die Nordrinne der Außeneider durchdämmt, wobei gleichzeitig weiter westlich eine künstliche Durchbruchrinne von der Nordrinne zur Südrinne geschaffen wurde. Die Außeneider stellt somit einen stark von menschlichen Eingriffen beeinflussten Naturraum dar, d. h., das natürliche Prozeßgefüge in diesem Gebiet wird von den Menschen gesteuert bzw. reguliert.

4.2.1 Ergebnisse

Wie oben bereits erwähnt, wurde das natürliche Prozeßgefüge 1979 mit der Durchdämmung der Nordrinne stark gestört. Es liegt auf der Hand, daß diese Störung eine erhebliche Belebung der Morphodynamik induziert haben wird.

Mit dem Ziel, diese Belebung zeitlich abzugrenzen, wurden die Umsatzhöhen der

Zweijahresvergleiche kumulativ über die Zeit aufgetragen (Abb. 19). Diese Methode wird in HOFSTEDÉ (1991a: Kap. 5.2.3.1) ausführlich behandelt. Aus Abbildung 19 geht hervor, daß die Umsatzhöhe pro Jahr (Umsatzrate) von 1971 bis 1979 um etwa 45 cm/J pendelt. Ab 1979 steigt sie rapide an, wobei sie zwischen 1981 und 1983 ein Maximum von 82,5 cm/J erreicht. Bis 1985 fällt die Umsatzrate wieder, und seit 1985 schließlich pendelt sie sich auf den alten Wert von etwa 45 cm/J ein.

Um dieser zeitlich unterschiedlichen Morphodynamik gerecht zu werden, wurden zwei Sättigungsfunktionen, eine für die Periode 1971/79 und 1985/89 sowie eine für die Periode 1979/85, errechnet (Abb. 20).

Die asymptotischen Umsatzhöhen sind für beide Zeiträume innerhalb ihrer Standardab-

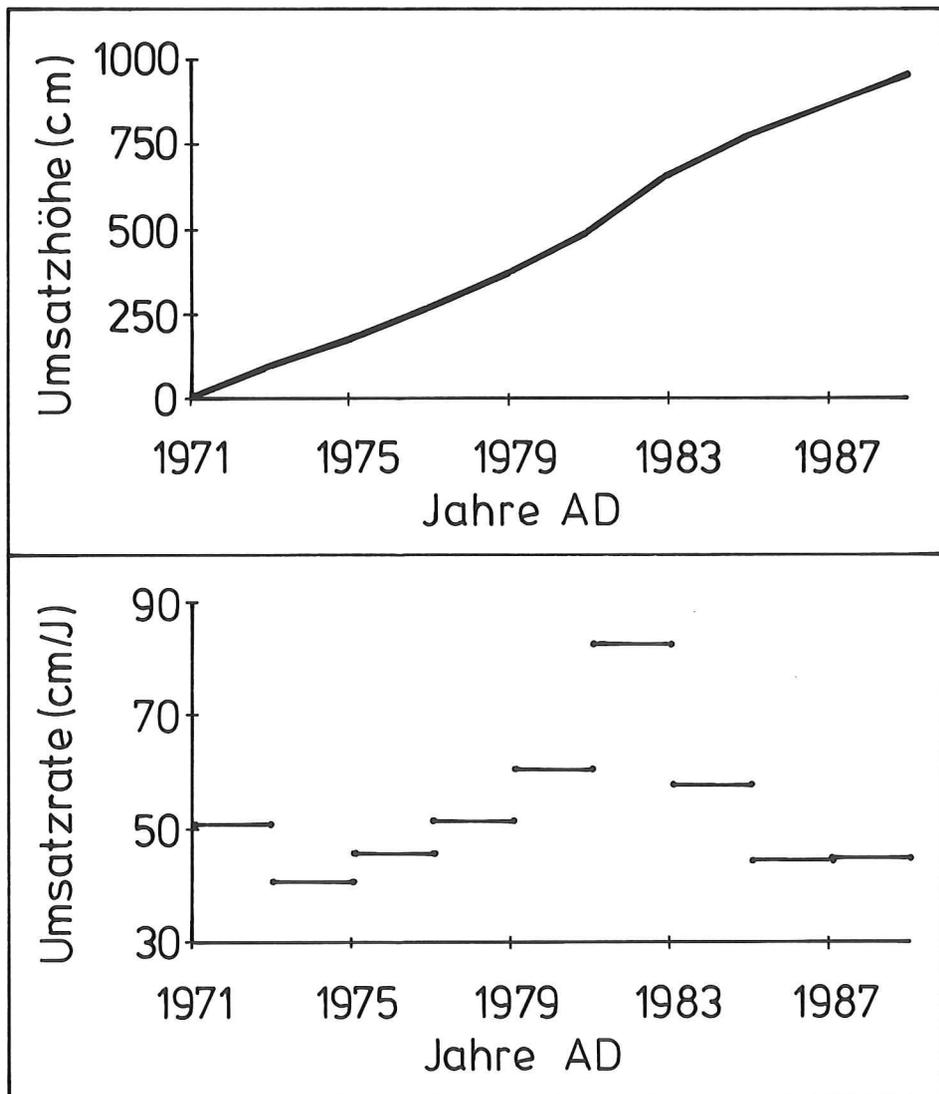


Abb. 19: Entwicklung der Umsatzhöhen (oben) und Umsatzraten (unten) für die Periode 1971–89

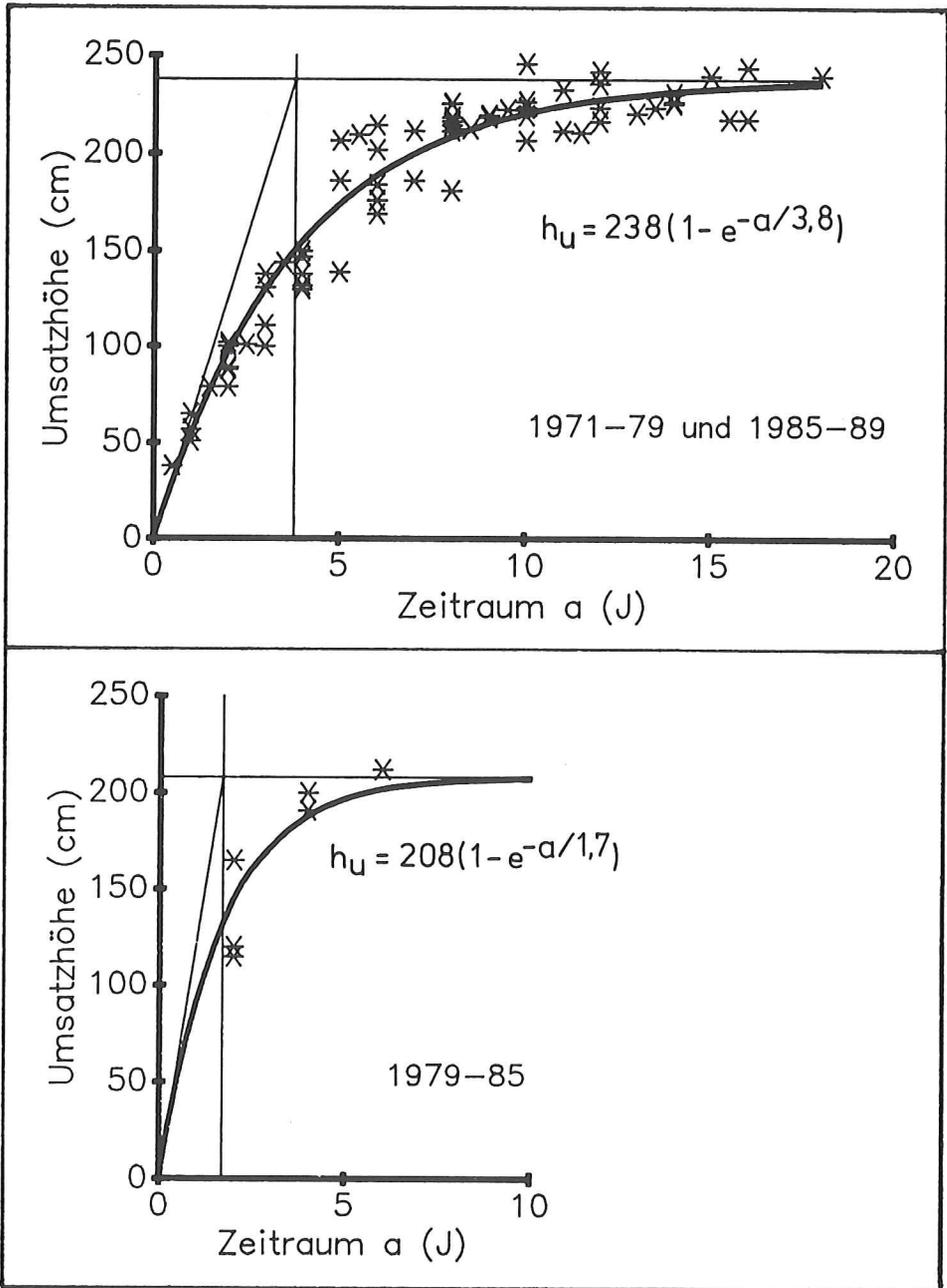


Abb. 20: Umsatzhöhen h_U über den Vergleichszeitraum a für die Perioden 1971-79/85-89 (oben) und 1979-85 (unten)

weichungen gleich, was darauf hindeutet, daß dieser Parameter sehr stark von der Gesamtopographie bzw. vom Relief des Gebietes gesteuert wird. Die morphologische Varianz ist dagegen zwischen 1979 und 1985 im Durchschnitt zweimal so groß wie vor- und nachher. Dies bedeutet, daß sich die Geschwindigkeit der Höhenänderungen und/oder das Areal, das Höhenänderungen unterliegt, stark vergrößert haben. Folglich hat sich auch die Umsatzrate zwischen 1979 und 1985 verdoppelt.

Ein einmaliger künstlicher Eingriff hat somit zu einer Störung des morphodynamischen Gleichgewichtes geführt. Nach einer bestimmten „Anpassungszeit“ mit intensiven Materialumlagerungen hat sich dann aber das alte Gleichgewicht wiederhergestellt.

5. Allgemeine Hinweise zur Anwendung des MORAN-Verfahrens

Eine morphologische Analyse mit Hilfe des MORAN-Verfahrens enthält folgende Schritte:

- manuelle Bestimmung der topographischen Höhe der einzelnen Teilflächen aus topographischen Grundkarten;
- Eingabe der ermittelten Höhenwerte im Computerprogramm MORAN;
- EDV-gestützte Berechnung der mittleren Bilanz- und Umsatzhöhen pro Kleine Einheit (1 km^2);
- EDV-gestützte Berechnung der Sättigungsfunktionen pro Kleine Einheit.

Die Wahl der 1 km^2 großen Kleinen Einheit als Grundform zur Berechnung der mittleren Bilanz- und Umsatzwerte hat folgende Vorteile:

- eine Kleine Einheit besteht aus 100 Teilflächen, was nach SIEFERT (1987) für die Ermittlung einer charakteristischen Funktion $h_u = f(a)$ ausreicht;
- da auch das Gauß-Krüger-Netz auf einem flächentreuen Raster basiert, lassen sich die Kleinen Einheiten leicht lokalisieren und kodieren;
- das Computerprogramm MORAN konnte durch Verwendung der quadratischen Grundform benutzerfreundlich gestaltet werden.

Die Anwendung einer künstlichen quadratischen Grundform in einem Naturraum birgt aber auch einen schwerwiegenden Nachteil in sich. Die Grenze einer morphodynamischen Einheit (Rinne, Plate usw.) wird nur äußerst selten entlang einer der Gauß-Krüger Koordinaten verlaufen. Somit ist es möglich, daß eine Kleine Einheit zur Hälfte in einer Rinne und zur Hälfte auf einer Plate liegt. Die für diese Kleine Einheit erzielten mittleren Bilanz- und Umsatzwerte haben demnach nur eine geringere morphologische Aussagekraft. Es leuchtet somit ein, daß eine morphodynamische Analyse anhand der Kleinen Einheiten nur ein generalisiertes Bild der Morphodynamik des Gebietes vermitteln kann. Je nach Größe des Untersuchungsgebietes und nach Zielsetzung kann dies aber durchaus gerechtfertigt sein. Für eine Detailuntersuchung reicht es allerdings nicht (Kap. 4.1).

Die Berechnung der Sättigungsfunktionen erfolgt jeweils über den gesamten Betrachtungszeitraum, d. h., die mittlere Morphodynamik über den Gesamtzeitraum wird erfaßt. In mehr oder weniger stabilen Gebieten ist dies angebracht, nicht aber in Gebieten, wo entweder eine säkulare Änderung oder eine (anthropogene) Störung zeitlich zu erheblichen Änderungen der Morphodynamik führen können. Als Beispiel kann die Außeneider (Kap. 4.2) genannt werden, wo menschliche Eingriffe zu erheblichen Änderungen des natürlichen Prozeßgefüges führten. Hier erwies sich die temporär differenzierte Ermittlung der Umsatzwerte als hilfreich für die zeitliche Begrenzung der Störungen. Wenn diese zeitliche Eingrenzung erfolgt ist,

können unter der Voraussetzung, daß genügend Kartenaufnahmen vorliegen, für die einzelnen Perioden mit unterschiedlicher Morphodynamik Sättigungsfunktionen ermittelt werden.

Insgesamt zeigt sich, daß sich das EDV-gestützte MORAN-Verfahren sehr flexibel einsetzen läßt. Es eignet sich sowohl für eine morphodynamische Charakterisierung ganzer Wateinzugsgebiete wie auch für Detailuntersuchungen in Teilbereichen eines Wattes. Grundsätzlich ist eine beliebige flächenmäßige und zeitliche Auflösung der Teilflächen bzw. des Mindestvergleichszeitraumes möglich. Diese Auflösung wird nur von der Genauigkeit der geodätischen Vermessungen begrenzt.

6. Schlußfolgerungen

Zur Erfassung der Wechselbeziehungen zwischen den einwirkenden Energien aus Strömung und Seegang und den daraus resultierenden Materialumlagerungen können folgende Überlegungen angestellt werden: Topographische Änderungen eines Gebietes können durch Berechnung der Höhendifferenzen zwischen topographischen Aufnahmen quantifiziert werden. Die erzielten Bilanzwerte können anschließend mit Änderungen der hydrologischen Prozesse während des Vergleichszeitraumes verglichen werden. Es ist aber unmöglich, diese Massenbilanzen direkt mit dem Energiespektrum des Gebietes zu vergleichen. Ein Bilanzwert von Null bedeutet beispielsweise nicht, daß während des Vergleichszeitraumes keine Strömungs- und Seegangenergieeinwirkung auf der Sohle stattgefunden hat, sondern nur, daß die hydrologischen Prozesse im Gebiet im dynamischen Gleichgewicht mit der Morphologie standen. Anhand von Umsatzwerten ist es theoretisch möglich, die Intensität der Materialumlagerungen im absoluten Sinne zu erfassen und zu quantifizieren. Bislang war aber eine verlässliche, praxisgerechte Ermittlung dieser Umsatzwerte unmöglich, denn es können nur die Umsatzmengen über einen bestimmten Vergleichszeitraum (mindestens etwa 1 Jahr) ermittelt werden, nicht die zwischenzeitlich abgelaufenen Umlagerungen. Folglich nimmt der Unterschied zwischen meßbarem und tatsächlich aufgetretenem Umsatz mit zunehmendem Vergleichszeitraum zu (SIEFERT, 1987).

Auch die mit Hilfe der Sättigungsfunktion berechnete Umsatzrate kann wegen des zu großen Mindestvergleichszeitraumes nicht die tatsächlich aufgetretenen Materialumlagerungen quantifizieren. Da die Umsatzrate aber als Mittelwert über (möglichst) viele Kartenvergleiche und über einen (möglichst) langen Zeitraum bestimmt wird, erlaubt sie trotzdem eine allgemeine indikative Aussage über die morphologische Aktivität eines Gebietes während des Betrachtungszeitraumes. Folglich lassen sich anhand der Umsatzrate Gebiete mit unterschiedlicher morphologischer Aktivität bzw. Energiespektrum voneinander abgrenzen und definieren.

Zur Erfassung von morphologisch/topographischen (säkularen) Änderungen eines Wattgebietes zeigt sich eine flächenhafte Bilanzanalyse als erfolgreiches Instrument. Die momentane Morphodynamik eines Wattgebietes läßt sich am besten durch eine flächenhafte Umsatzanalyse charakterisieren. Eine detaillierte morphologische Untersuchung eines Gebietes sollte deswegen sowohl eine Bilanz- wie auch eine Umsatzanalyse anhand des EDV-gestützten MORAN-Verfahrens umfassen.

7. Schriftenverzeichnis

- BARTHEL, V.: Vergleich der Topographie 1974–79 des Testfeldes „Knechtsand“ im Rahmen des MORAN-Projektes. Strom- und Hafenaufbau, Ref. Hydr. Unterelbe, Studie 51, 1981 (unveröff.).
- DAMMSCHNEIDER, H.-J.: Morphodynamik, Materialbilanz und Tidewassermenge der Unterelbe. Berliner Geogr. Stud., 12, 1983.
- DIECKMANN, R.: Flächenhafter Küstenschutz. Mitt. d. Franzius-Inst. f. Wasserbau der TU Hannover, H. 59, 1984.
- DIECKMANN, R., OSTERHUN, M. u. PARTENSKY, H.-W.: Influence of waterlevel elevation and tidal range on the sedimentation in a german tidal flat area. Proc. Oceanog., Vol. 18, 1987.
- GLIM, G. W. et al.: Erosie en sedimentatie in de binnendelta van het Zeegat van het Vlie 1933–1983. Rijkswaterstaat, Rapportage ANWX-86.H210, Deelonderzoek Nr. 7, Hoorn, 1987.
- GLIM, G. W. et al.: Erosie en sedimentatie in de binnendelta van het Zeegat van het Vlie 1933–1983. Rijkswaterstaat, Rapportage ANWX-88.H204, Deelonderzoek Nr. 3, Hoorn, 1988.
- GÖHREN, H.: Beitrag zur Morphologie der Jade- und Wesermündung. Die Küste, Jg. 13, 1965.
- GÖHREN, H.: Triftströmungen im Wattenmeer. Mitt. des Franzius-Inst. der TU Hannover, H. 30, 1968.
- GÖHREN, H.: Studien zur morphologischen Entwicklung des Elbmündungsgebietes. Hamb. Küstenf., H. 14, 1970.
- GÖHREN, H.: Zur Dynamik und Morphologie der hohen Sandbänke im Wattenmeer zwischen Jade und Eider. Die Küste, H. 27, 1975.
- HIGELKE, B.: Morphodynamik und Materialbilanz im Küstenvorfeld zwischen Hever und Elbe. Ergebnisse quantitativer Kartenanalysen für die Zeit von 1936 bis 1969. Regensburger Geogr. Schriften, H. 11, 1978.
- HOFSTEDE, J. L. A.: Hydro- und Morphodynamik im Tidebereich der Deutschen Bucht. Berl. Geogr. Studien, H. 31, 1991a.
- HOFSTEDE, J. L. A.: Sea level rise in the Inner German Bight (Germany) since 600 AD and its implications upon tidal flats geomorphology. In: Erdkundliches Wissen, 105, BRÜCKNER, H. & U. RADTKE (Hrsg.), From the North Sea to the Indian Ocean. Franz Steiner Verlag, Stuttgart, 1991b.
- HOFSTEDE, J. L. A. u. SCHÜLLER, A.: Dynamisch-morphologische Analysen im Wattengebiet der Deutschen Bucht. Ergebnisse des KFKI-Projektes MORAN I und Ausblicke für MORAN II. Hamb. Geogr. Studien, H. 44, 1988.
- LINKE, G.: Die Entstehung der Insel Scharhörn und ihre Bedeutung für die Überlegungen zu Sandbewegungen in der Deutschen Bucht. Hamb. Küstenf., H. 11, 1969.
- LINKE, G.: Über die geologischen Verhältnisse im Gebiet Neuwerk/Scharhörn. Hamb. Küstenf., H. 17, 1970.
- LINKE, G.: Der Ablauf der holozänen Transgression der Nordsee aufgrund von Ergebnissen aus dem Gebiet Neuwerk/Scharhörn. Probl. der Küstenf. im südlichen Nordseegebiet, Bd. 14, 1982.
- MÜGGE, H.-E. u. VISCHER, G.: Analyse von Wasserstandszeitreihen in der Deutschen Bucht. Zusammenfassende Darstellung der bisherigen Arbeiten und Ergebnisse des KFKI-Projektes, unveröff., 1988.
- REINECK, H.-E.: Einwirkungen der vier Sturmfluten im Januar 1976 auf die Wattsedimente zwischen dem Festland und der Insel Neuwerk. Hamb. Küstenf., H. 35, 1976.
- RENGER, E.: Quantitative Analyse der Morphologie von Watteinzugsgebieten und Tidebecken. Mitt. d. Franzius-Inst. der TU Hannover, H. 43, 1976.
- RODLOFF, W.: Über Wattwasserläufe. Mitt. d. Franzius-Inst. der TU Hannover, H. 34, 1970.
- SCHLEIDER, W.: Das Peilwesen der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes im Küstengebiet. Der Seewart, 6, 1981.
- SCHÜLLER, A.: Morphologisch-topographische Untersuchungen im Küstenvorfeld südlich der Elbmündung. Essener Geogr. Arbeiten, 17, 1989a.
- SCHÜLLER, A.: Bilanzentwicklung im Küstenvorfeld der südöstlichen Nordsee. Die Küste, H. 50, 1989b.

- SCHÜLLER, A.: Zur Morphodynamik des Küstenvorfeldes – Innere Deutsche Bucht. Umsatz- und Bilanzanalysen. Berliner Geogr. Studien, H. 35, 1992.
- SIEFERT, W.: Über den Seegang in Flachwassergebieten. Mitt. des Leichtweiß-Inst. der TU Braunschweig, H. 40, 1974.
- SIEFERT, W.: Morphologische Analysen für das Knechtsandgebiet (Pilotstudie des KFKI-Projektes MORAN). Die Küste, H. 38, 1983.
- SIEFERT, W.: Hydrologische und morphologische Untersuchungen für das Mühlenberger Loch, die Außeneste, und den Neßsand. Hamb. Küstenf., H. 43, 1984.
- SIEFERT, W.: Long-term tidal changes along the southeastern North Sea coast. Ann. Geophysicae, 2(4), 1984.
- SIEFERT, W.: Umsatz- und Bilanzanalysen für das Küstenvorfeld der Deutschen Bucht. Grundlagen und erste Auswertungen (Teil 1 der Ergebnisse eines KFKI-Projektes). Die Küste, H. 45, 1987.
- SIEFERT, W. u. LASSEN, H.: Gesamtdarstellung der Wasserstandsverhältnisse im Küstenvorfeld der Deutschen Bucht nach neuen Pegelauswertungen. Die Küste, H. 42, 1985.
- SIEFERT, W. u. LASSEN, H.: Zum säkularen Verhalten der mittleren Watthöhen an ausgewählten Beispielen. Die Küste, H. 45, 1987.
- TAUBERT, A.: Morphodynamik und Morphogenese des Nordfriesischen Wattenmeeres. Hamburger Geogr. Studien, H. 42, 1986.
- WALTHER, F.: Über Gezeiten und Meeresströmungen im Norderneyer Seegat. Die Bautechnik, 13, 1934.
- WALTHER, F.: Zusammenhänge zwischen der Größe der ostfriesischen Seegaten mit ihren Wattgebieten sowie den Gezeiten und Strömungen. Forsch.-Stelle f. Insel- und Küstenschutz, Norderney, H. 23, 1971.