# Morphologische Analysen für das Knechtsand-Gebiet (Pilotstudie des KFKI-Projektes MORAN)

Von Winfried Siefert

#### Zusammenfassung

Im Rahmen der überregionalen Küstenforschung wurden in den Jahren 1974/75 und 1979/80 erstmals quasi-simultane Vermessungen des deutschen Nordsee-Küstenvorfeldes vorgenommen. Sinn dieser Untersuchungen war es vor allem, Grundlagen für eine Analyse der Veränderungen in einem bestimmten Zeitraum zu schaffen. 1978 wurde im KFKI eine Projektgruppe "Morphologische Analysen Nordseeküste" (MORAN) gebildet, die dieses Ziel verfolgen soll. Die vorbereitenden Arbeiten führten zunächst zur Auswahl von drei Testgebieten mit dem Knechtsand als erstem.

Diese Studie enthält die grundlegenden Gedanken für die weiteren Arbeiten und demonstriert die für das gesamte deutsche Nordsee-Küstengebiet geplanten Analysen am Beispiel Knechtsand. Dazu gehört die übersichtliche Darstellung der hydrologischen Verhältnisse. Die morphologischhydrologischen Wechselbeziehungen werden theoretisch und statistisch behandelt. Abhängigkeiten zwischen einzelnen Parametern werden skizziert. Ein Aufgabenkatalog zeigt schließlich die Perspektiven für die nächsten Jahre auf.

#### Summary

In 1974/75 and 1979/80 quasi simultanic surveys of the German part of the North Sea shallow water area were carried out as part of the inter-governmental coastal engineering research program. The main reason was to gain fundamentals for the analysis of topographic changes in a large area within a certain interval. Therefore in 1978 a project group gathered to work on the "<u>Mor</u>phological <u>Analyses</u> of the German <u>N</u>orth Sea coast" (MORAN). During the period of preparation three test areas were selected, the first of them being the Knechtsand area.

This study contains the main fundamentals for the ongoing tasks and demonstrates the planned analyses for the German coastal area with the Knechtsand area as a first example. It includes the hydrological, sedimentological, and biological situations. The interactions of morphology and hydrology are explained theoretically and statistically. Dependencies between certain parameters are mentioned. Finally a catalogue shows the perspectives of the years ahead.

#### Inhalt

1.	Veranlassung
2.	Abgrenzung des Gebietes und des Untersuchungszeitraumes
3.	Die morphologischen Verhältnisse
	3.1 Historisch-morphologische Entwicklung 8
	3.2 Ergebnisse des halbautomatischen Kartenvergleichs 1974–79
	3.3 "Morphologisches Fenster" Hohenhörn Sände – Oberer Wittsand
	3.4 Ansatz zur Beschreibung einer Höhenänderung im Küstenvorfeld
4.	Die hydrologischen Verhältnisse
	4.1 Tidewasserstände und Windstau 24
	4.2 Strömungen
	4.3 Seegang
5.	Morphologisch-hydrologische Wechselbeziehungen
	5.1 Theoretische Betrachtungen
	5.1.1 Ansätze zur Berechnung von Tide- und Seegangsenergie

	5.1.2 Ansätze zur Berechnung der Transportmengen
	5.1.3 Hypothese zur Berechnung von Höhenänderungen
	5.2 Statistische Untersuchungen
	5.3 Grenzen der skizzierten Untersuchungen
6.	Sedimentologische und biologische Verhältnisse
7.	Zum vollautomatischen Kartenvergleich
8.	Vorgesehene Arbeiten
9.	Danksagung
10.	Schriftenverzeichnis
	Symbolverzeichnis

#### 1. Veranlassung

Im Rahmen der überregionalen Küstenforschung wurden in den Jahren 1974/75 und 1979/80 quasi-simultane Vermessungen des Küstenvorfeldes vorgenommen. Diese Arbeiten von Bundes- und Landesdienststellen wurden vom *Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen* (KFKI) koordiniert und durch Eigenleistungen und mit Mitteln des *Bundesministeriums für Forschung und Technologie* (BMFT) finanziert.

Zur Vorgeschichte schreiben KOWALSKI und LUCK (1979) u. a.:

"Mit der Vermessung und Kartierung nautisch interessanter Gebiete des Küstenvorfeldes wurde schon sehr früh begonnen. Es handelt sich hier überwiegend um die Seeverkehrswege, die größere oder auch kleinere Küstenhäfen mit dem tiefen Wasser der Nordsee verbinden oder die auch parallel zur Küstenlinie über die Watten verlaufen. Je nach Bedeutung der einzelnen Häfen wurden die regelmäßigen Vermessungen der Fahrwasser zu unterschiedlichen Zeiten begonnen, so daß ein einheitlicher Zeitpunkt für den Anfang dieser Arbeiten nicht gegeben werden kann.

Der Mangel einer geschlossenen topographischen Erst- und Wiederholungsaufnahme des deutschen Küstenvorfeldes oder auch nur größerer Untersuchungsgebiete wurde zunehmend empfunden, nachdem die Erforschung dieses Gebietes um 1900 eingesetzt hatte und zunehmend aktiviert wurde.

Erst in der Mitte der dreißiger Jahre konnte die erste topographische Gesamtaufnahme eines größeren Küstenbereiches in Angriff genommen werden. Im Rahmen des schleswig-holsteinischen 10-Jahresplanes wurden die Vermessung und Kartierung der Wattgebiete Nordfrieslands und Dithmarschens vorgesehen. Die 1934 begonnenen Arbeiten kamen durch den Zweiten Weltkrieg zum Erliegen und konnten erst nach dessen Ende 1951 abgeschlossen werden. Damit lag die erste vollständige Wattaufnahme der Westküste Schleswig-Holsteins vor. Auf der Grundlage dieser Erstvermessung wurden dann zu aktuellen Problemen des Seewasserbaues gezielt angesetzte Wiederholungsvermessungen vorgenommen, die das Wissen um die Vorgänge im Küstenvorfeld zunehmend bereicherten.

Im Gebiet der niedersächsischen Küste wurden nach dem Zweiten Weltkrieg Kartierungsarbeiten durch die *Forschungsstelle für Insel- und Küstenschutz Norderney* in jenen Bereichen vorgenommen, die für Planungen zum Insel- und Küstenschutz von Bedeutung waren. Ende der fünfziger Jahre wurde dann die Herstellung zweier topographischer Wattkartenwerke eingeleitet. Die topographischen Wattkarten lehnen sich stark an das Vorbild Schleswig-Holsteins an (Gauß-Krüger-Netz; Bezugshorizont: NN; Maßstab 1:25 000).

Seit 1964 wurde das Neuwerk/Scharhörner Watt in zahlreichen Wiederholungsvermessungen erfaßt, die vor allem der Abschätzung morphologischer Vorgänge als Grundlage für die seinerzeit dort laufenden Planungen eines Vorhafenprojektes der Freien und Hansestadt Hamburg dienten.

Zusammenfassend ist somit festzustellen, daß längs der deutschen Küste erhebliche Aktivitäten entfaltet wurden, um das morphologische Formeninventar des Küstenvorfeldes unter ständiger Kontrolle halten zu können. Besonders in jenen Gebieten, die wegen aktueller Bauvorhaben schwerpunktmäßig behandelt wurden, konnten hierbei erhebliche Einblicke in hydrologischmorphologische Vorgänge gewonnen werden.

Großräumige Untersuchungen, z. B. zu Fragen des Materialhaushaltes der gesamten deutschen Küste, litten jedoch von jeher unter dem Mangel, daß die Vermessungsarbeiten zeitlich und räumlich sehr uneinheitlich abgewickelt wurden. Etwa um 1965 wurden im damaligen Küstenausschuß Nord- und Ostsee erste Überlegungen angestellt, die verschiedenen Aktivitäten in der Erforschung der deutschen Küste großräumig zu koordinieren mit dem Ziel, den Materialhaushalt des Küstenvorfeldes in seiner Gesamtheit zu quantifizieren. Hierbei wurde neben hydrometrischen, sedimentologischen u. ä. Arbeiten auch eine Koordination der Vermessungsarbeiten erwogen. Sie fand 1968 ihren Niederschlag in der Denkschrift "Erforschung der Naturvorgänge im Küstenvorfeld als Voraussetzung für alle Aufgaben im Seebau' des Küstenausschusses Nord- und Ostsee.

Das Untersuchungsprogramm zur Denkschrift des Küstenausschusses wurde im Winter 1968/69 bearbeitet. In einigen ad hoc-Gruppen sind hierbei die organisatorischen, gerätemäßigen und finanziellen Aspekte zu den einzelnen Untersuchungsvorhaben (Seegangs- und Strömungsmessungen, Transportvorgänge, Vermessungen u. ä.) behandelt worden. Die Ergebnisse der Beratungen wurden im "Untersuchungsprogramm zur Erforschung der Naturvorgänge im deutschen Küstenvorfeld' niedergelegt und innerhalb der beteiligten Verwaltung sowie Hochschulinstitute zur Diskussion gestellt.

Es bestand die Absicht, morphologische Vorgänge, die auf strukturelle Entwicklungen hindeuten, in den großen Zusammenhang des Küstenbereiches zu stellen und einander zuzuordnen; Erosions- und Sedimentationsflächen sollten unter besondere Kontrolle genommen werden, in Gebieten schnell wechselnden Formeninventars wurde eine zeitliche und räumliche Verdichtung der Vermessung angestrebt usf. Übergeordnetes wissenschaftliches Ziel war jedoch die Bilanzierung des Materialhaushaltes kleinerer bis größerer morphologischer Einheiten bis hin zur Gesamtküste.

In dem Vermessungsprogramm war für Wiederholungsmessungen ein Zeitraum von fünf Jahren vorgesehen. Es ist späterhin mehrfach in Frage gestellt worden, ob ein solcher Zeitraum wegen des mit den Vermessungsarbeiten verbundenen Arbeitsaufwandes noch sinnvoll sei. Die ursprüngliche Diskussion um die Wiederholungsmessungen gründete vor allem auf Überlegungen zum zeitlichen Ablauf morphologischer Vorgänge.

Da es Gebiete gibt, in welchen jahrelang keine Veränderungen feststellbar sind, während in anderen das Formeninventar beinahe von Tide zu Tide wechselt (z. B. Riffbögen vor den Ostfriesischen Inseln), erbrachte die so geführte Diskussion keine Ergebnisse."

1978 wurde im KFKI eine Projektgruppe "Morphologische Analysen Nordseeküste" (MORAN) gebildet, die das genannte Ziel verfolgen soll. Mitglieder dieser Projektgruppe sind bzw. waren:

Dr. BARTHEL, Wasser- und Schiffahrtsamt Bremerhaven (bis 1981)

Dr. BETTAC, Deutsches Hydrographisches Institut, Hamburg

Dr. LUCK, Forschungsstelle für Insel- und Küstenschutz, Norderney (bis 1981)

Dr. RENGER, Landesamt für Wasserhaushalt und Küsten, Kiel

Dr. SAMU, Bundesanstalt für Wasserbau, Abteilung Küste, Hamburg

Dr. SCHLEIDER, Wasser- und Schiffahrtsdirektion Nordwest, Aurich

Dr. STEPHAN, Forschungsstelle für Insel- und Küstenschutz, Norderney (ab 1981)

Dr. WISMER, Wasser- und Schiffahrtsdirektion Nord, Kiel

und der Autor als Obmann.

Die vorbereitenden Arbeiten, die seit 1980 vom BMFT finanziell gefördert wurden, führten zunächst zur Erstellung eines Ablaufplanes, der Darstellung der Verknüpfung mit anderen KFKI-Projekten und der Auswahl von drei Testgebieten (Kap. 2). Die Aufgabe wurde von vornherein nicht nur in der Herstellung von Tiefenänderungsplänen gesehen, sondern in dem Versuch, einem wesentlich weiter gesteckten Ziel näherzukommen, in dessen Richtung schon vielfach Ansätze gemacht worden sind:

- den Trend der Verlagerung von Rinnen und Platen im K
  üstenvorfeld und in den 
  Ästuaren der deutschen Nordseek
  üste innerhalb eines bestimmten Zeitraumes feststellen und analysieren,
- die Sedimentations- und Erosionsgebiete sowie materialbedingtes Formeninventar (soweit möglich) herausarbeiten,
- die Ergebnisse im Zusammenhang mit den formenden Kräften darstellen,

- Schlußfolgerungen für die praktische Arbeit an der Küste ziehen.

Über das Arbeitsprogramm (Tab. 1) und die Auswahl der Testfelder (Abb. 1) berichten SIEFERT und BARTHEL (1981). Es wird dabei deutlich, daß die Arbeiten nur dann erfolgversprechend durchgeführt werden können, wenn die hydrologischen und sedimentologischen Verhältnisse bekannt sind. Zur Erarbeitung der morphologischen Veränderungen und Demonstration der beabsichtigten Verknüpfung von morphologischen und hydrologischen Gegebenheiten ist diese "Pilotstudie Knechtsand" vorgesehen, in der alle für dieses erste Testgebiet gegebenen Möglichkeiten angesprochen werden sollen.

			Tabell	le 1		
Ablaufplan	für	die	Arbeiten	des	Projektes	MORAN



2. Abgrenzung des Gebietes und des Untersuchungszeitraumes

Die drei auf Abb. 1 angegebenen Testgebiete wurden von der Projektgruppe nach unterschiedlichen Gesichtspunkten ausgewählt. Danach kamen als erste Testfelder nur Gebiete in Frage, die

- kartenmäßig auch aus früherer Zeit gut belegt sind,
- 1974/75 und 1979/80 aufgenommen wurden,
- so liegen, daß auch in späteren Jahren weitere Aufnahmen wahrscheinlich sind,
- nicht ohnehin von Ämtern zu Vergleichszwecken bearbeitet werden,
- keine speziellen Bagger- und Verklappungsgebiete darstellen,
- durch Strömungsmessungen in den 70er Jahren erfaßt sind,
- durch Seegangsmessungen in den 70er Jahren erfaßt sind (Ausnahme: Für höhere Wattgebiete kann das Seegangsklima berechnet werden),
- durch Sedimentproben in den 70er Jahren erfaßt sind.
- Bei sinnvollen Gebietsgrenzen ergaben sich die drei Testfelder:
- (1) durch Insel geschütztes Watt mit Prielsystem südlich Norderney
- (2) zur Nordsee offenes Knechtsandwatt
- (3) durch kleinere Bänke geschütztes Watt vor einer neuen Deichlinie: Meldorfer Bucht

Mit dem als erstes in Angriff genommenen Gebiet sollte eine komplette Wattzone einschließlich der sie begrenzenden Wattströme erfaßt werden. So enthält der Zuschnitt bei einer Gesamtgröße von 340 km<sup>2</sup> den Großen Knechtsand und die Kleinen Knechtsände, die sie im Norden begrenzende Till und im Süden begrenzende Robinsbalje, schließlich den Südwestrand des Neuwerker Watts, den Nordostrand des Eversandes und das dazwischenliegende küstennahe Wurster Watt (Abb. 2). Die seeseitige Begrenzung wurde grob an der 6-m-Tiefenlinie orientiert.

Die Grenzen dieses Testfeldes schließen Gebiete intensiver Messungen seitens der Forschungsstelle für Insel- und Küstenschutz, Norderney (Knechtsand, Wurster Watt), der Forschungs- und Vorarbeitenstelle Neuwerk (Neuwerker Watt, Till) und des Wasser- und Schiffahrtsamtes Bremerhaven (Robinsbalje, Eversand, Tegeler Plate) ein. Somit liegt eine Fülle von Datenmaterial vor. Dieses wurde in den letzten Jahren zum großen Teil veröffentlicht oder in internen Berichten zusammengestellt. Aber es fanden sich auch weitere Rohdaten, die nun im Rahmen der Voruntersuchungen für die Pilotstudie ausgewertet wurden und z. T. wertvolle Ergänzungen brachten.

Der im MORAN-Projekt vorgesehene Kartenvergleich umfaßt den Zeitraum 1974/75 bis 1979/80. Die hydrologischen Ergebnisse wurden je nach ihren Meßdaten verwendet, und zwar – Messungen bis 1970 nur für eine generelle Darstellung der regionalen Verhältnisse,

- Messungen von 1971 bis 1980 außerdem zur Analyse der lokalen Gegebenheiten.

Die weitere Verwendung dieser und anderer Daten zeigt der bereits erwähnte Ablaufplan (Tab. 1). Daß es nicht hilfreich sein kann, zu alte Messungen (also älter als etwa von 1971\*) als lokale Angaben zu nutzen, wird deutlich an der Skizze auf Abb. 3. Hier zeigt der Kartenvergleich 1974/76/79, vereinfacht dargestellt an den Tiefenlinien KN und 10-m-KN, eine Verlagerung der Kleinen Knechtsände einschließlich der zwischenliegenden Rinnen um rd.

<sup>\*)</sup> Sicher ist die Grenze, nur Messungen ab 1971 im Detail heranzuziehen, in gewisser Weise willkürlich; aber eine Vorverlegung scheint unrealistisch zu sein. Sie soll auch nicht starr gesehen werden, und bei der weiteren Verwendung ist von Bedeutung, ob die Daten aus ruhigen oder unruhigen Gebieten stammen und wozu sie benötigt werden. Für eine generalisierte Darstellung der Verhältnisse in einem größeren Gebiet können auch ältere Messungen herangezogen werden.







1 km in fünf Jahren nach Westen bei gleichzeitiger Drehung der südlich anschließenden Gebiete um rd. 10°. Dabei haben sich an einigen geographischen Punkten die topographischen Höhen um bis zu 12 m verändert. Wo ältere Messungen noch auf hohem Watt durchgeführt wurden, können heute tiefe Rinnen die Brandungsbänke begrenzen. So haben sich die lokalen Verhältnisse vollkommen geändert, ohne daß angenommen werden muß, daß dies auch regional der Fall ist.

#### 3. Die morphologischen Verhältnisse

#### 3.1 Historisch-morphologische Entwicklung

Die historisch-morphologische Entwicklung im Testgebiet Knechtsand war verschiedentlich Gegenstand intensiver Untersuchungen. Aus den beiden bedeutendsten Arbeiten sollen im folgenden einige Zitate eine Übersicht ermöglichen.

HOMEIER (1969) schreibt u. a. über das Wurster Watt:

"Die Untersuchung der bei MTnw trockenfallenden Flächen des Wurster Watts hat im wesentlichen folgende Ergebnisse: Die Gesamtfläche von durchschnittlich 390 km² hat in den vergangenen rund 175 Jahren, für die verläßliche Aufnahmen der Wattkonfiguration vorliegen, um etwa 6 km<sup>2</sup> oder jährlich durchschnittlich 3,5 ha, das sind insgesamt um etwa 1,6 % des mittleren Flächeninhalts, abgenommen. Diese Abnahme ist nicht signifikant. Eindeutig sind jedoch die Abnahme der Flächen des Festlandwatts und die Zunahme der Flächen des äußeren Wattgürtels. Dies bedeutet eine Verschiebung der küstenparallelen Ausläufer der Wattströme in Richtung auf die Küste. Die küstenparallele Tiefenachse am Übergang vom Festlandswatt zum äußeren Wattgürtel hat sich danach in den vergangenen 175 Jahren um jährlich knapp 10 m von rund 5,1 km auf rund 3,4 km Abstand von der Vorlandkante genähert. Nach 1940 ist dieser Abstand etwa gleich geblieben. Ob diese Annäherung mit gleichbleibenden Tiefen verbunden war oder ob die Tiefen mit der Annäherung abgenommen haben, läßt sich auf Grund unzureichender Tiefenangaben nicht ermitteln. Ob ferner die annähernde Lagekonstanz der Tiefenachse seit 1940 ein Ausklingen der Verlagerung in einem bestimmten Küstenabstand bedeutet oder nur eine vorübergehende Stillstandsphase ist, muß zukünftig durch weitere Messungen wegen der hervorragenden Bedeutung dieser Frage für den Vorland- und Deichschutz sorgfältig verfolgt werden.

Zur Watthöhenänderung können wegen des späten Einsetzens ausreichender Meßunterlagen keine Aussagen über die langfristige Entwicklung gemacht werden."

#### Zu demselben Thema und den Verlagerungen der Wattströme bemerkt LANG (1970):

"Ein Vergleich des Zustandsbildes aus der Zeit um 1790 mit dem von heute, also für etwa 180 Jahre, ergibt folgendes: Die an die Robinsbalje grenzende Nordkante des Ewersandes rückte – bezogen auf eine uns nicht mehr bekannte Niedrigwasserlinie – in ihrem seewärtigen Teil in den letzten 180 Jahren nicht weniger als durchschnittlich 3 km, der dem Festland zugekehrte Teil um schätzungsweise 2,5 km nordwärts vor. Die Südkante dieses Sandes vertriftete ebenfalls um die gleiche Strecke in nördlicher Richtung. Demnach verlagerte sich der Gesamtkomplex Ewersand um etwa 2,5 bis 3 km nordwärts.

Auch der nördlich anschließende, durch die Robinsbalje vom Ewersand getrennte Knechtsand läßt Veränderungen in ähnlicher Richtung erkennen. Hier sind zwar die seewärtigen Partien seiner Südkante seit 1790 gleichfalls um ungefähr 3 km vorgerückt, der dem Festland zugekehrte Abschnitt dagegen vertriftete nur 1 bis 1,5 km nordwärts. Diese unterschiedliche Bewegung kommt im Bereich der Nordufer des Knechtsandes ebenfalls zum Ausdruck: Die westliche Hälfte hat sich – freilich nur teilweise – bis zu 3 km verlagert, wobei der äußerste Westen des Sandes streckenweise ausgeräumt wurde, die östliche Hälfte dagegen drang durchschnittlich nur 1 bis 1,5 km vor, und zwar nicht nach N, sondern nach NO. An dem landwärtigen Abschnitt des Knechtsandes ist – wie im Bereich der Robinsbalje – gegenüber dem in Seenähe befindlichen Teil des Knechtsandes also eine langsamere Verlagerung zu bemerken. Dieser Befund scheint abermals zu beweisen, daß in Seenähe eine raschere Vertriftung vor sich gegangen ist als in dem dem Festland zugekehrten Teil des Knechtsandes.

Dessen Nordkante grenzt an eine Rinne, die auf der Seekarte REINKES von 1802 bezeichnenderweise den Namen "Wester-Till oder Altes Fahrwasser" trägt und noch bis in die 70er Jahre des





Gr

1

ELBE

Abb 2. Luftbild 1975 des Wattkomplexes zwischen Weser- und Elbemündung (Aufnahme Hansa Luftbild, freigegeben Reg.Präs. Münster, Nr. 1426 vom 11. 8. 1975) gleichen Jahrhunderts ,Altfahrwasser' genannt wurde. Anläßlich der ersten wissenschaftlichen Vermessung konnten hier 1859 noch Durchschnittstiefen von 8,5 bis 11 m festgestellt werden, um 1910 waren diese in der den Knechtsand im Norden begrenzenden Rinne auf 2 bis 3 m zurückgegangen, so daß unter diesen Umständen hier von einem wirklichen Fahrwasser nicht mehr gesprochen werden konnte. Diese Entwicklung läßt auf eine kräftige Nordvertriftung von Sänden schließen.

Hohenhörn-Sand und Wittsand, zu dieser Zeit zwei auffallend lange und schmale Platen, deren Längsachsen nordwestwärts gerichtet sind, trennen die (neue) Wester-Till von der Oster-Till. Während die (neue) Wester-Till Tiefen von etwa 7,5 bis 11 m aufweist, werden in der Oster-Till 3,75 bis 5,5 m nur selten überschritten.

Die (neue) Wester-Till und die Oster-Till vereinigen sich um 1800 südwestlich der Insel Neuwerk zu einer gemeinsamen Rinne mit Tiefen von etwa 5,5 m. Ostwärts der Vereinigung unterteilen sie sich in mehrere Priele, deren Verlauf um 1800 nicht weiter verfolgt wird, so daß wir hierüber nichts Näheres auszusagen vermögen.

Die Oster-Till begrenzt im Süden und Südwesten die zu dieser Zeit hier noch verhältnismäßig schmalen äußeren Partien des Scharhörnsandes. Ein Vergleich mit jüngeren, auf trigonometrischer Grundlage entwickelten Seekarten von 1846, 1876 ff. lehrt, daß von etwa 1800 an die Oster-Till, die eine ungefähr nordwestliche Verlaufsrichtung zeigte, in der Folgezeit mit ihrem seewärtigen Arm eine starke Schwenkung nach Norden vollführt und sich von Westen her bis auf 3 km der Scharhörnbake gefährlich näherte. Infolge der Antriftung von Sänden aus südwestlicher, südlicher und südöstlicher Richtung an Scharhörn verflachte die Oster-Till zusehends und war um 1900 praktisch nicht mehr existent. Nur ihr Name blieb noch längere Zeit erhalten: Er wurde nach Versanden der alten Oster-Till auf die (neue) Wester-Till, die sich von 1800 bis 1900 in ganzer Ausdehnung ebenfalls Scharhörn genähert hatte, um die Wende vom 19. zum 20. Jahrhundert übertragen, auf ein Fahrwasser also, das mit der eigentlichen, ursprünglichen Oster-Till zu keiner Zeit identisch war, sondern als Wester-Till stets eine selbständige Rinne eigenen Namens gewesen ist.

Die an Scharhörn angetrifteten Platen Unterer und Oberer Wittsand sowie Schaafsand verschmolzen nach Zutriftung der alten Oster-Till im letzten Viertel des vorigen Jahrhunderts mit dem Scharhörnsand zu einem breiten, im wesentlichen heute noch existierenden Komplex Scharhörn.

Die 1802 noch schmalen, langgestreckten Hohenhörn-Sände wurden bis 1900 durch angelagerte Sandmassen erheblich verbreitert und rückten hierbei im ganzen mehrere 100 m weiter nordwärts. Im Laufe des 20. Jahrhunderts sind sie zum Teil stärker aufgerieben worden.

Durch diese zunächst etwas verwirrend erscheinende Entwicklung nahm das um 1800 noch stark aufgegliederte Rinnensystem zwischen Knechtsand und Scharhörn übersichtlichere Formen an und wird heute durch eine einzige dominierende Rinne charakterisiert, die (neue) Oster-Till im Verein mit der sog. Norder-Till.

Die tiefgreifenden Veränderungen der letzten 180 Jahre, die in ihren einzelnen Phasen sich – wissenschaftlich verhältnismäßig gut gesichert – nachweisen lassen, gipfeln in der Tatsache, daß die jahrhundertelang zu verfolgende Unterteilung der Neuwerker und Wurster Watten durch die drei Hauptrinnen Robinsbalje, Wester- und Oster-Till auf Grund einer Nordvertriftung der Oster-Till und ihrer damit verbundenen gänzlichen Versandung heute nur noch durch zwei Wasserzüge gekennzeichnet wird, durch die Robinsbalje und durch die – das Neuwerker und Scharhörner Watt im Süden begrenzende – Rinne, die den Doppelnamen Oster- und Norder-Till trägt.

Mit der Ermittlung dieser starken Veränderungen der Watten zwischen Weser und Elbe ist freilich noch nicht die offene Frage geklärt, ob der Gestaltungswandel im 19. und 20. Jahrhundert in einer kontinuierlichen Entwicklung vor sich ging oder ob es sich grundsätzlich um Pendelbewegungen handelt.

Generell scheint in Anbetracht der an der ganzen südlichen Nordseeküste zu beobachtenden West-Ost-Vertriftung der Sände, Rinnen und Inseln zunächst die Annahme berechtigt zu sein, daß wir in der beobachteten Umsetzung der gesamten Watten zwischen Weser und Elbe eine fortlaufende Vertriftung vor uns haben."

Über die ältesten Schilderungen des Hohen Knechtsandes erfahren wir ebenfalls bei LANG (1970):

"Der Knechtsand grenzte im Osten um 1700 an einen Priel namens Spiekerboor, einen stark gewundenen Wasserzug. Als Teil der Südergründe wurde er vom 16. Jahrhundert ab wiederholt





auf einschlägigen Seekartenskizzen dargestellt, ohne daß wir freilich nähere Einzelheiten erfahren. Erst 1683/84 tritt der Knechtsand in einer primitiven, die wahren Verhältnisse extrem verzeichnenden Faustskizze unter seinem bis heute gebräuchlichen Namen auf. Vom Beginn des 18. Jahrhunderts an erwähnen – angefangen mit der Elbekarte von 1721 – zahlreiche Seekarten diesen Sand, auch begegnet er uns verschiedentlich in älteren Strandungsakten. Seine willkürliche und unterschiedlich gestaltete Konfiguration läßt allerdings vermuten, daß er vor 1789 niemals sorgfältig aufgenommen worden ist. Auch sind außer der kurzen Schilderung von 1683 keinerlei ältere Beschreibungen bekannt geworden.

Zu Beginn des 17. Jahrhunderts begegnet uns auf dem Knechtsand, und zwar offenbar in Nähe der diesen im Osten begrenzenden Fahrrinne, ein höheres Plateau, der auf Seekarten HAEYENS von 1613 und seiner Nachfolger stark betonte Teutel. Schematisch als Oval dargestellt, findet er sich auf zahlreichen Seekarten des 17. und 18. Jahrhunderts unter verschiedener Schreibweise wieder und wird in der Folgezeit nur noch gelegentlich als hoher Sand erwähnt. Unter dem Teutel des 17. Jahrhunderts dürften wir uns wohl am ehesten eine höhere, über MThw gelegene – freilich sturmflutfreie – Plate von erheblicher Größe vorzustellen haben, die wohl niemals irgendeinen nennenswerten Pflanzenbewuchs zeigte, da hierüber nicht das geringste überliefert wird.

Um 1575 findet sich auf dem Knechtsand eine weitere Watthöhe, Meithörn. Sie wird von da an wiederholt genannt, so u. a. 1653 und 1681. Nach einer Situationsskizze von 1684 scheint diese Plate mehr see- als landwärts gelegen zu haben. Um diese Zeit wird erstmalig im Bereich des Wurster Watts hier ausdrücklich von einer "Sanddüne" gesprochen und der Gesamtkomplex wörtlich als "Hoher Sand" bezeichnet, der etwa 7 km Länge und ungefähr 3,5 km Breite messe. Über die Höhe der Düne und ihre Ausdehnung erfahren wir nichts. Soweit bekannt, wird 1703 Meithörn zum letztenmal erwähnt."

Die nachfolgende, durch Messungen belegte Entwicklung analysiert HOMEIER (1969) wie

folgt:

"Der Hohe Knechtsand hat seit seiner ersten genauen Darstellung 1789 keine gleichförmige Verlagerung erfahren. Auf der Vermessung von 1789 sind eine nördliche und eine südliche Thwfreie Fläche getrennt dargestellt. Es ist sehr wahrscheinlich, daß es sich bei der nördlichen um die hochaufragende Plate handelt, die 1859 etwa 3 km ostnordöstlich der Nordspitze des Hohen Knechtsandes lag und heute, weitere 3 km ostwärts, im Osten vom Neucappeler Tief begrenzt, bis wenig unter MThw aufragt. Diese Plate hätte sich danach seit 1789 mit durchschnittlich 37,4 m/J vom nördlichen Außenrand des Großen Knechtsandes erst in mehr nordöstlicher, später in mehr östlicher Richtung landwärts verlagert.

Die südliche hochwasserfreie Fläche von 1789 hat sich bis 1859 etwas nach Osten verschoben und sich erheblich nach Norden ausgedehnt. Der Flächenschwerpunkt hat sich dabei um rund einen Kilometer nach Norden verlagert. Die dargestellte Form der Insel deutet darauf hin, daß nur der höchstgelegene Teil, der Strandwall, erfaßt wurde, wie er auch heute noch, von Nordnordwest-Südsüdost nach Nordost-Südwest verschwenkt, als höchster Teil der Insel vorhanden ist. Zwischen 1859 und 1964 verlagerte sich der Flächenschwerpunkt der Insel um weitere 2,1 km mit veränderter Richtung nach Nordosten. Die Verlagerungsgeschwindigkeit erhöhte sich von 14,3 m/J zwischen 1789 und 1859 auf 29,5 m/J zwischen 1859 und 1964. Der jüngste Abbruch im Südwesten der Insel betrug zwischen 1953 und 1964 ebenso wie der Anwuchs im Nordosten rund 17 bis 18 m/J.

Die MThw-freie Fläche der Insel hatte nach dem Luftbildplan von 1953 einen Umfang von rund 454 ha, im Jahre 1964 nach dem Nivellement der Forschungsstelle Norderney von 467 ha, wobei vom Südwesten der Insel bis zum Norden rund 68 ha abgebrochen sind und vom Nordosten bis zum Südosten eine entsprechende Fläche anwuchs. Mit anderen Worten sind in elf Jahren 85 % der Insel bestehen geblieben, 15 % abgebrochen und 18 % der ursprünglichen Fläche neu hinzugekommen.

Nach den vorliegenden Befunden ist die Strandinsel Hoher Knechtsand in ständiger Veränderung begriffen. Entsprechend der auf dem Wurster Watt vorherrschenden Verlagerungstendenz von etwa Südwest nach Nordost verliert sie im Süden und Westen an Fläche, während sie in östlicher und nordöstlicher Richtung zunimmt. Der Flächenumfang ist dabei nach dem Ergebnis des letzten Jahrzehnts nur geringfügigen Schwankungen unterworfen. Die Gefahr einer Vernichtung der Insel ist demnach äußerst unwahrscheinlich. Es wäre jedoch ein Fehler, feste Bauwerke auf der vertriftenden Insel erhalten zu wollen."

12

3.2 Ergebnisse des halbautomatischen Kartenvergleichs 1974-79

Die KFKI-Projektgruppe hat in ausführlichen Beratungen versucht, die Genauigkeit der Höhenbestimmungen festzustellen. Dabei sind Werte herausgekommen, die unwesentlich von den von Göhren (1968) sowie SIEFERT und LASSEN (1968) für das Nachbargebiet festgestellten abweichen. Das besagt für die anzunehmende Genauigkeit:

Nivellements: 0,2 bis 4 cm

- Peilungen: a) nahe bei Hilfspegeln: durch Beschickungsfehler bis 1 dm; Lotungsfehler wegen geringer Wassertiefen deutlich unter 1 dm
  - b) im äußeren Küstenvorfeld: durch Lotungsfehler 1 bis 2 % der Tiefe, bis 4 dm bei 20 m Tiefe; durch Beschickungsfehler, bei Distanzen von 10 bis 30 km, 3 bis 5 dm
  - c) gerätetechnische Unsicherheit: 0,25 % vom Endwert oder 5 cm (SCHLEIDER, 1981)

Unter diesen Voraussetzungen müssen die im folgenden nach der Arbeit von BARTHEL (1981) skizzierten Entwicklungen als tatsächlich aufgetreten und außerhalb möglicher meßtechnischer Ungenauigkeiten befindlich verstanden werden, zumindest soweit sie in denjenigen Gebieten festgestellt wurden, in denen mit Fehlern unter 1 dm gerechnet werden muß, oder sofern sie Größenordnungen wie auf Abb. 3 erreichen.

Der Vergleich unterschiedlicher topographischer Zustände eines Gebietes läßt sich nach verschiedenen Methoden durchführen. Für das Testgebiet Knechtsand sollen zwei Verfahren für flächenmäßig dargestellte Differenzen verglichen werden:

- 1) halbautomatisches Verfahren mit Digitalisierung von Tiefenwerten für Rasterfelder und automatischer Weiterverarbeitung in einer Kleinrechenanlage
- Digitalisierung von Tiefenwerten unter gleichzeitiger Benutzung von bereits digital gespeicherten Daten und Verarbeitung in einer Großrechenanlage mit einem digitalen Geländemodell

Die hier vorgestellten Ergebnisse wurden nach dem halbautomatischen Verfahren gewonnen. Dazu wurde über das Testgebiet ein Raster von Quadraten mit 1 km Seitenlänge (= GAUSS-KRÜGER-Koord.) gelegt. Jedes dieser Quadrate war wiederum in Felder von 100 × 100 m unterteilt. Ein geübter Bearbeiter las für jedes Feld bis zu 6 Tiefenwerte aus den Tiefenkarten der zu vergleichenden Zustände und trug sie in ein Formular ein. Dabei kam es weniger auf die Anzahl der Einzelwerte als vielmehr auf die Fähigkeit des Bearbeiters an, die Tiefensituation durch die richtigen Werte darzustellen, d. h. innerhalb des 100 × 100-m-Feldes zu wichten.

Die Tiefenwerte wurden blockweise (1 km<sup>2</sup>) über einen Tischrechner (HP 9830 B) auf Magnetkassette gespeichert. Das BASIC-Rechenprogramm mittelte die Einzelwerte je Rasterfeld (100  $\times$  100 m) und verglich sie mit dem entsprechenden Feld des anderen topographischen Zustandes. Dabei wurde pro Block (1 km<sup>2</sup>) eine Massenbilanz mit mittleren Auf- und Abtragshöhen berechnet.

In einem Plot-Programm wurden auf einem Trommelplotter (Cal-Comp 836) die Tiefenänderungen (in dm) in den Rasterfeldern dargestellt.

Der Nachteil dieser Methode liegt in den hohen Personalkosten, die bei den erforderlichen sachkundigen Bearbeitern anfallen. Darum müssen bei zukünftigen Vergleichen die Vorteile der digitalen Speicherung der Werte schon während der Seevermessung genutzt werden. Ist jedoch ein Vergleich mit schon vorhandenem, ggf. älterem Kartenmaterial erforderlich, so bietet die hier geschilderte Methode einen guten Kompromiß zwischen dem Vergleich von Profilen und der Anwendung eines Geländemodells mit digital gespeicherten Werten.



Abb. 4. Generalisierter Tiefenänderungsplan 1974–79 für das Knechtsand-Gebiet (aus BARTHEL, 1981)



Die Konstruktion von wenigen Isolinien (Linien gleicher Tiefenänderung), die über der Darstellung der Wattkanten (Zustand 1974) aufgetragen sind (Abb. 4), gibt ein anschauliches Bild der Vorgänge im Testgebiet Knechtsand. Es wurde hier bewußt auf eine kleine Abstufung der Isolinien verzichtet, um das Bild nicht unnötig zu verwirren.

Zu den Ergebnissen schreibt BARTHEL (1981) u. a.:

"Die größten Umlagerungen sind im Verlauf der großen Priele, der Robinsbalje und der Till, zu erkennen. Im Vergleich mit der topographischen Karte zeigt sich, daß die Robinsbalje eine deutliche Verlagerungstendenz nach Nordosten besitzt. Dabei vertiefen sich die vorhandenen Rinnen bis dicht unter die Küste. Die Kleinen Knechtsände und die Ausläufer des Großen Knechtsandes verschieben sich seewärts und nehmen zum Teil die Positionen von früheren Rinnen ein. Südlich der Robinsbalje – auf dem Eversand – sind größere Auflandungsgebiete zu erkennen.

Ähnlich sieht es im Verlauf der Till aus. Auch hier läßt sich anhand des Verlaufs der Vertiefungen und der Sedimentationsbereiche der Großpriel mit all seinen Verästelungen erkennen. Es scheint jedoch, als ob hier die Hauptrinne nach Südwesten ausweicht und sich auch in den Verästelungen zur Küste hin vertieft.

Es fällt auf, daß insbesondere auch im Küstenvorfeld die Flächen mit Erosion überwiegen. Von 1974 bis 1979 hat im Küstenvorfeld zumindest in diesem Testgebiet ein resultierender Abtrag stattgefunden. Neben z. T. erheblichen Prielvertiefungen sind auch großflächig Massenverluste auf den höheren Watten festzustellen."

Maximale Tiefenänderungen liegen im Gebiet der Kleinen Knechtsände und der Tegeler Rinne bei 12 m.

Wie bereits bei der Beschreibung des Auswerteverfahrens erwähnt wurde, ist für jeden 1-km<sup>2</sup>-Block eine Massenbilanz errechnet worden. Dabei wurden die mittlere Tiefenzunahme oder -abnahme in dm und die resultierende Menge (Auf- oder Abtrag) in m<sup>3</sup> ausgeworfen. Die Gesamtbilanz zeigt, daß im betrachteten Zeitraum von fünf Jahren 159 Mio. m<sup>3</sup> e r o d i e r t und 103 Mio. m<sup>3</sup> a b g e l a g e r t wurden. Es entsteht ein M a s s e n f e h l von rd. 56 Mio. m<sup>3</sup> für ein Testgebiet von rd. 340 km<sup>2</sup>. Als rein statistischer Wert ergibt sich eine mittlere Höhenabnahme des Testgebietes von rd. 1,6 dm<sup>1</sup>).

> 3.3 "Morphologisches Fenster" Hohenhörn Sände – Oberer Wittsand

Wenn die Entwicklung eines Gebietes in einem Zeitraum von fünf Jahren, die zwischen aufeinanderfolgenden topographischen Aufnahmen liegen, analysiert werden soll, so kann streng genommen nur ein Vergleich zweier Zustände vorgenommen werden. Dabei ist natürlich unbekannt, ob die feststellbaren Veränderungen symptomatisch für einen längeren Zeitraum sind oder wie die Morphologie variiert – wobei die Länge einer möglichen Periode ungewiß ist. Um in dieser Frage etwas weiterzukommen, wurde genutzt, daß der nördliche Teil des Testgebietes Knechtsand von 1965 bis 1976 von der damaligen *Forschungsgruppe Neuwerk* des Amtes *Strom- und Hafenbau, Hamburg*, in zeitlich enger Folge topographisch aufgenommen und morphologisch verglichen worden war (Göhren, 1971). Damit wurde es möglich, Kartenvergleiche für die Zeiträume zwischen Aufnahmen in den Jahren 1965, 1966, 1968, 1970, 1972, 1974 und 1976 heranzuziehen, um Hinweise auf längerfristige Entwicklungen des nördlichen Teiles des Testgebietes zu gewinnen und sozusagen einen Blick in die Morphologie der Jahre 1965 bis 1976 zu tun.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>) GÖHREN (1971) bezeichnet für das Neuwerker Watt mit angrenzenden Rinnen (rd. 700 km<sup>2</sup>) eine Differenz von 54 Mio. m<sup>3</sup> bei 558 Mio. m<sup>3</sup> Gesamtumsatz als "zu gering, um auf eine Materialzufuhr zu schließen".

Als "morphologisches Fenster", das diesen Blick gewähren konnte, wurde eine Fläche ausgewählt, die im hamburgischen Untersuchungsgebiet lag und etwa in gleichem Verhältnis wie das gesamte Testgebiet die dort vorhandenen Landschaften enthält. Die Wahl fiel auf einen Streifen von  $4 \times 12$  km<sup>2</sup>, der von den Hohenhörn Sänden bis zum Oberen Wittsand reicht (Abb. 9). Die Auswahl war – wie geschildert – durch die vorhandenen Aufnahmen hinsichtlich seiner Lage und Größe limitiert. Da es sich bei den folgenden Untersuchungen zudem um einen ersten Versuch handelt, mag auch eine gewisse Willkür oder Zufälligkeit hingenommen werden. Die nachstehenden Ausführungen sind daher mehr als Präsentation einer Idee zu verstehen. So wird auch nicht definiert, nach welchen Gesichtspunkten ein "morphologisches Fenster" ausgewählt werden kann.

#### Tabelle 2

"Morphologisches Fenster"

Mittlere morphologische Veränderungen in cm/km<sup>2</sup> für 8 Vergleiche, geteilt in nördliche (N) und südliche (S) Teilfläche von je 24 km<sup>2</sup>

Vergleich		Auf-, Ab	trag in cm ²-Fläche		Gesamt-	Volumina	Gesamt- Vol.	Höhen- änderung
	max.	Sed.	max.	Eros.	$\Sigma$ (Sed	., Eros.)	N+S	(N+S)
	N	S	N	S	N 10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup>	S 10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup>		cm/a $\cdot km^2$
1965-66	54	41	67	49	- 890	- 1640	-2530	
/Jahr	(54)	(41)	(67)	(49)	(- 890)	(-1640)		-5,3
1965-68	111	51	45	86	- 510	- 5470	-5980	
/Jahr	37	17	15	29	- 170	- 1820		-4,2
1965-70	153	105	37	107	+ 5640	- 3820	+1820	
/Iahr	31	21	7,5	21,5	+ 1130	- 770		+0,8
1965-74	229	172	47	174	+ 5830	-11040	-5210	
/Jahr	25,5	19	5	19,5	+ 650	- 1230		-1,2
1965-76	276	32	58	224	+10220	-13880	-3660	
/Jahr	25	3	5	20	+ 930	- 1260		-0,7
1966-68	56	35	30	57	+ 310	- 3840	-3550	
/Jahr	28	17,5	15	28,5	+ 155	- 1920		-3,7
1968-70	80	63	5	41	+ 6110	+ 1740	+7850	
/Jahr	40	31,5	2,5	20,5	+ 3055	+ 840		+8,2
1968-72	139	53	58	99	+ 4540	- 4650	- 110	
/Jahr	35	13	15	25	+ 1135	- 1160		-0,1
1968-74	238	120	99	114	+ 6320	- 5700	+ 620	
/Jahr	40	20	16,5	19	+ 1060	- 950		+0,2
1970-74	185	67	111	88	+ 130	- 7430	-7300	
/Jahr	46	17	28	22	+ 40	- 1860		-2,2
1970-76	233	14	88	101	+ 4800	-10000	-5200	
/Jahr	39	2	15	17	+ 800	- 1670		-1,8
1972-74	121	75	40	43	+ 1880	- 840	+1040	
/Jahr	60,5	37,5	20	21,5	+ 890	- 420		+1,1
1974-79	182	71	179	106	+ 4250	- 5120	- 870	
/Jahr	36	14	36	21	+ 850	- 1020		-0,7

Die wichtigsten Daten über die Massenänderungen in dem Streifen enthält Tab. 2. Abb. 5 zeigt in 4 Skizzen die morphologischen Entwicklungen in diesem Zeitraum. Optisch ist schon festzustellen, daß in der nördlichen Hälfte des morphologischen Fensters Sedimentation, in der südlichen Erosion überwiegen. Daher wurde für einige Betrachtungen eine weitere Unterteilung vorgenommen.



Abb. 5. Tiefenänderungen für das "morphologische Fenster" Hohenhörn Sände – Oberer Wittsand (Abb. 9)



Abb. 6 enthält eine Zusammenfassung der Ergebnisse von Tab. 2 und Abb. 5 einschließlich des MORAN-Zeitraumes 1974–79 in Form von Summenkurven. Das Resultat ist generell für den Zeitraum 1965–79:

- Erosion von 6 · 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup> auf 48 km<sup>2</sup> Fläche, dabei

- Erosion der südlichen Teilfläche von 16 · 106 m3,

- Sedimentation auf der nördlichen Teilfläche von 10 · 106 m3.

Erosion und Sedimentation haben sich – außer um 1970 – etwa gleichmäßig in diesen 15 Jahren entwickelt; für das Gebiet von 48 km<sup>2</sup> ergeben sich für 1974–79 wie für 1965–76 mittlere Erosionsgeschwindigkeiten von 0,7 cm/Jahr, während es im 340 km<sup>2</sup> großen Testgebiet 3,3 cm/Jahr sind (1974–79).

## 3.4 Ansatz zur Beschreibung einer Höhenänderung im Küstenvorfeld

Wurde in Kap. 3.2 der Versuch unternommen, mehr oder weniger optisch die Erkenntnisse aus dem MORAN-Zeitraum auf einen größeren Zeitraum auszudehnen, so soll im folgenden ein Ansatz skizziert werden, der – wahrscheinlich mit Modifizierungen beim Fortschritt der MORAN-Arbeiten – dies mathematisch ermöglicht. Dabei muß der Ansatz in folgenden Rahmen passen:

- 1. Eine Höhenänderung  $\Delta z$  in cm das Ergebnis einer zeitlichen Volumenänderung über eine beliebige Fläche – beginnt im Ursprung und muß asymptotisch mit der Zeit auf einen Höchstwert  $\Delta z_{max}$  zulaufen. Denn Erosions- oder Sedimentationshöhen können maximal die Differenz zwischen höchstem Watt- und tiefstem Rinnenniveau, also etwa 20 m vor unserer Küste, erreichen. In stabilen Gebieten liegen sie weit darunter.
- Je nach energetischer Beanspruchung, nach vorhandenem Sediment und nach der Größe der Fläche, über die er gemittelt wird, muß der Höchstwert unterschiedlich groß sein. Die energetische Beanspruchung steht in Wechselwirkung mit der topographischen Situation, der Höhenlage und der Umgebung.
- 3. Der Zeitraum a Jahre bis zum Erreichen des charakteristischen Höchstwertes  $\Delta z_{max}$  ist in einzelnen Gebieten unterschiedlich lang. Er richtet sich nach saisonalen und längeren Einflüssen und Tendenzen. Wird der Höchstwert einer Höhe erst nach einem relativ langen Zeitraum erreicht, so deutet dies auf längerfristig gleichbleibende Tendenzen. Stellt sich  $\Delta z_{max}$  kurzfristig ein, so deutet dies auf größere morphologische Varianzen und damit auf ein größeres energetisches Spektrum: Eine solche morphologische Entwicklung ist nur denkbar, wenn sich Sedimentation und Erosion saisonal oder innerhalb weniger Jahre ablösen oder sogar aufheben. Je steiler eine Funktion für kleine Zeiträume a verläuft, je eher also  $\Delta z_{max}$  erreicht wird, desto stärker überwiegen kurz- gegen langfristige morphologische Veränderungen.
- 4. Eine mittlere Höhenänderung je Jahr für beliebige Flächengrößen

$$\overline{\Delta z} = \frac{\Delta z}{a}$$

ist eine Funktion der Zeit, d. h. der Anzahl a Jahre des Vergleichszeitraumes: Innerhalb kurzer Zeiträume sind beträchtliche Veränderungen – auf das Jahr bezogen – möglich, die zurückzuführen sind auf Variationen der diese Veränderungen hervorrufenden Kräfte; je länger der Zeitraum wird, desto kleiner muß die darüber gemittelte jährliche Veränderung werden. Das geht allein daraus hervor, daß es an der Deutschen Bucht ein dem heutigen vergleichbares Küstenvorfeld auch schon vor Hunderten von Jahren, ja sogar schon zur Zeitenwende gab.

5. Eine vergleichende Analyse von Daten aus unterschiedlichen Zeiträumen ist nur dann zulässig, wenn mögliche Veränderungen der wirksamen Energieanteile berücksichtigt werden können oder wenn bekannt ist, daß solche nicht aufgetreten sind.

Mit a = Anzahl der Jahre im betrachteten Zeitraum und

 $\Delta z_{max} = H \ddot{o} chst wert der H \ddot{o} hen \ddot{a} n der ung$ 

genügt eine Funktion

$$\Delta z = \Delta z_{\max} \cdot (1 - e^{-\beta a}) \tag{1}$$

den unter Pkt. 1 und 2 zusammengestellten Randbedingungen. Der Wert β kann dabei als morphologische Varianz entspr. Pkt. 3 angesehen werden.

Funktionen dieses Typs sind auf Abb.7 dargestellt, einschließlich derjenigen für die zugehörigen jährlichen Höhenänderungen entspr. Pkt. 4 mit

$$\overline{\Delta z} = \frac{\Delta z_{\max}}{a} \cdot (1 - e^{-\beta a})$$
<sup>(2)</sup>

Der Rahmen ist so gehalten, daß dieser Ansatz für Sedimentations- wie für Erosionshöhen gelten kann:

$$h_s = \frac{S}{n_s \cdot F_s}; h_e = \frac{E}{n_e \cdot F_e}$$
(3)

Dasselbe gilt für die Ergebnisse aus der Differenz wie der Summe von Sedimentation und Erosion: Die mittlere Höhenänderung ergibt sich als

$$h_{m} = \frac{S + E}{F_{ges}} = \sum_{n} \Delta z \tag{4}$$

Aus dem Materialumsatz wird die Umsatzhöhe zu

$$h_{z} = \frac{|S| + |E|}{F_{ges}} = \sum_{n} |\Delta z|$$
(5)

bestimmt. Analog zu Gl. (1) und (2) gelten dann für he, hs, hm und hz:

$$h = h_{max} \cdot (1 - e^{-\beta a}) \tag{6}$$

$$\overline{\mathbf{h}} = \frac{\mathbf{h}}{\mathbf{a}} \tag{7}$$

Im Vorgriff auf später folgende Ausführungen werden auf Abb. 8 die Entwicklungen der Umsatzhöhen für zwei kleine Gebiete – für die entspr. Pkt. 5 des obigen Rahmens konstante wirksame Energieanteile vorausgesetzt werden können – als Funktionen des Vergleichszeitraumes dargestellt. Sie mögen zunächst nur zur Bestätigung obiger Ausführungen dienen und werden erst später weiter diskutiert.

Mit den Funktionen von Abb. 7 wird nicht angestrebt, morphologische Veränderungen innerhalb weniger Tage oder Wochen zu bestimmen, zumal dafür Meßdaten fehlen. Entsprechend ist die Darstellung gehalten. Für diese Abhandlung können nur Zeiträume a  $\geq$  1 Jahr interessieren.

und



Abb. 7. Höhenänderung im Küstenvorfeld als Funktion des Vergleichszeitraumes





Abb. 8. Beispiele zu Abb. 7: Entwicklung der Umsatzhöhen (Sedimentation plus Erosion dividiert durch die Fläche) als Funktionen des Vergleichszeitraumes nach Messungen der damaligen *Forschungsgruppe Neuwerk* für Teilflächen des "morphologischen Fensters"

## 4. Die hydrologischen Verhältnisse

4.1 Tidewasserstände und Windstau

Eine ausführliche Analyse der mittleren Tidewasserstandsverhältnisse für 1961/70 liegt für das gesamte Küstenvorfeld zwischen Außenweser und Außenelbe vor (SIEFERT, 1973). Sie enthält Regressionen, Korrelationen und mittlere Tidekurven für alle bis dahin eingesetzten Dauer- und Hilfspegel in der von GöHREN (1968) für das Elbmündungsgebiet entwickelten Form. Zu den damals aufgeführten Standorten kommen inzwischen einige hinzu, an denen von der ehemaligen *Forschungs- und Vorarbeitenstelle Neuwerk* oder vom *Wasser- und Schiffahrtsamt Bremerhaven* gemessen wird bzw. wurde. Seinerzeit wurden Korrelationen zwischen den Scheitelwasserständen an diesen Pegeln und dem Pegel Cuxhaven errechnet. Darauf wird hier wegen anderer Zielsetzung verzichtet. Dagegen sind in einer Übersicht auf Abb. 9 mittlere Tide- und Windstaudaten zusammengestellt. Als Vergleichspegel bietet sich in diesem Falle der seewärts stehende Pegel Alte Weser an. Folgende Ergebnisse, die für alle Hilfspegel auf Auswertungen und Korrelationen aus dem Zeitraum 1971/80 basieren, sind auf Abb. 9 ablesbar:

- Wasserstände MThw, MTnw 1975/79 in cm NN 5 m
- mittlerer Tidehub in cm
- mittleres Verhältnis zwischen der Differenz von eingetretener Sturmflutscheitelhöhe (= HThw) und MThw an den einzelnen Standorten und derjenigen bei Alte Weser
- mittlere Eintrittszeitdifferenzen für Thw und Tnw in h nach Eintritt bei Alte Weser
- Flut- und Ebbedauern in h
- mittleres Verhältnis der Flut- zur Ebbedauer

Abb. 9 zeigt die allgemein bekannte Tendenz der Thw-Erhöhung, Tnw-Erniedrigung und Thb-Zunahme bei Annäherung der Tidewelle an die Küste. Interessanter ist die zeitliche Verformung dieser Tidewelle. Die Thw laufen etwa gleich schnell in Till und Robinsbalje ein, die Ebbedauer entwickelt sich in beiden Wattströmen jedoch unterschiedlich: In der Till bleibt sie fast konstant (6.32 bis 6.22 h), in der Robinsbalje hingegen nimmt sie so weit ab (6.26 auf 6.03 h), bis am Pegel Dorumer Watt das Verhältnis  $D_F/D_E > 1$  wird. Außerdem tritt das MTnw in diesem oberen Teil der Robinsbalje f r ü h e r als weiter stromab ein, was übrigens auch in der Dithmarscher Bucht zu beobachten ist. Im gesamten Außenbereich zwischen Tegeler Plate und Großem Knechtsand wird Tnw praktisch gleichzeitig – und später als in der Robinsbalje – erreicht.

Da die Zeit-Parameter und ihre Beziehungen zu Alte Weser (AW) in der Form

$$(Tnw_{x} - Tnw_{AW}) = (Thw_{x} - Thw_{AW}) + (D_{E_{x}} - D_{E_{AW}})$$

voneinander abhängen, ergeben sich weitere, hier nicht im einzelnen diskutierte Erkenntnisse.

Ursache für die unterschiedliche Entwicklung in Till und Robinsbalje ist der Umstand, daß die Robinsbalje als dominierende Flutrinne fungiert, das angrenzende Watt weiter als bis zur topographischen Wattwasserscheide durch sie bewässert wird und das Wasser dann bei Ebbe in stärkerem Maße durch Till und Wurster Arm wieder abfließt.

Das führt (wegen des verkleinerten Ebbe-Einzugsgebietes) zu frühen und besonders niedrigen MTnw in der Robinsbalje und muß Reststromversetzungen über den Knechtsand nach Norden und den Eversand nach Süden zur Folge haben. Darauf wird bei der Diskussion der Strömungsmessungen zurückzukommen sein.

Die Windstauverhältnisse sind auf Abb. 9 pauschal mit der Beziehung

$$W' = \frac{HThw_{x} - MThw_{x}}{HThw_{AW} - MThw_{AW}}$$
(8)

angegeben. Dabei zeigt sich die erwartete Entwicklung mit einem Anstieg des Windstauverhältnisses von See bis an die Küste um über 20 % (W' > 1,2). Die Aussagekraft allein dieses Wertes ist jedoch begrenzt, da W = f(t) über die Tide stark wechseln kann und meist nicht zur HThw-Zeit das Maximum erreicht. Außerdem ist W abhängig von der Sturmflut- (d. h. Wind-)entwicklung und vom Ort. So wird der Wert W' nur einen groben, vielleicht aber im Rahmen dieser Untersuchungen wertvollen Anhalt liefern.

#### 4.2 Strömungen

Detaillierte Strömungsanalysen aus dem Knechtsandgebiet bzw. aus Randbereichen liegen vor von Göhren, 1969 (Abb. 10), von Koch und Luck, 1973 (Abb. 11), und von Göhren, 1974 (Abb. 12). Sofern diese Messungen aus der Zeit vor 1971 stammen, können sie nur noch in bestimmten Fällen als lokal relevant angesehen werden, wie oben erläutert wurde. Eine Zusammenfassung dieser Ergebnisse zeigt das großräumige Reststrombild, das die heutigen Verhältnisse repräsentiert (SIEFERT et al., 1981).

Abb. 13 enthält für das hier behandelte Gebiet alle diejenigen Daten aus den o.g. Veröffentlichungen, die nach 1970 gewonnen wurden. Ferner sind Ergebnisse aus den Arbeiten des *WSA Bremerhaven* (1979) und weiteres Archivmaterial verwendet worden. Dadurch konnte die bisherige Übersicht in wichtigen Punkten ergänzt werden.

Dargestellt sind auf Abb. 13 neben dem regionalen Reststrombild (lange, offene Pfeile) für die Messungen diejenigen Strömungsparameter, die nach dem heutigen Kenntnisstand für die weitere Bearbeitung im MORAN-Projekt von besonderer Bedeutung sein werden:

- maximale Flut- und Ebbestromgeschwindigkeiten in cm/s, als Mittel der v<sub>max</sub> über mindestens einen Mondzyklus
- Reststrom in der Definition von GÖHREN (1968a) in km/Tide, als Mittel wie oben
- Triftstrom in der Definition von GÖHREN (1968a) für westliche Winde ab 6 Bft

Sofern Messungen ab 1971 aus den tiefen Rinnen vorliegen, zeigen sie in den Mündungen der Wattströme Geschwindigkeiten bis 110 cm/s. Die Ausprägung als vornehmliche Flut- bzw. Ebbequerschnittsteile wird deutlich, indem sich die  $v_{max}$  bei Ebbe von denen bei Flut teilweise beträchtlich unterscheiden. Auf den Watten – hier liegen nur einige Messungen vom Neuwerker Watt, drei Profile vom Wurster Watt und wenige Daten von den Kleinen Knechtsänden und der Tegeler Plate vor – erreichen die  $v_{max}$  meist Werte um 25 bis 40 cm/s, in Prielausläufern auch darüber. Wie Göhren (1969) und KOCH und LUCK (1973) zeigen, handelt es sich hierbei großenteils nur um kurzzeitig auftretende Spitzenwerte. Vom zentralen Gebiet des Großen Knechtsandes liegen aus dieser Zeit leider keine Messungen vor.

Die Reststromvektoren zeigen – soweit sie ausgewertet wurden – Beträge bis zu 10 km/ Tide (Tegeler Rinne); im Watt liegen sie dagegen meist noch unter 1 km/Tide. Sofern während der Messungen westliche Winde ab 6 Bft auftraten, sind auch Triftstromvektoren angegeben, die im tieferen Wasser Größe und Richtung ähnlich denen der Reststromvektoren zeigen, im Watt dagegen etwa mit dem Wind verlaufen und wesentlich höhere Beträge als in den Rinnen erreichen, eine Tatsache, die Göhren (1968a) ausführlich behandelt hat.

Der Hinweis in Kap. 4.1 auf die Füll- und Leerungsvorgänge im Einzugsgebiet der Robinsbalje, wie sie aus den Tidekurvenparametern auf Abb. 9 abgeleitet werden können, wird in der Tat auf Abb. 13 durch das Reststrombild bestätigt: Der Reststrom setzt von der





Abb. 9. Tide- und Windstaudaten für das Knechtsand-Gebiet mit Grenzen des Testfeldes und des "morphologischen Fensters"

28



Abb. 10. Strömungsmessungen der damaligen Forschungsgruppe Neuwerk (aus Göhren, 1969)

# STRÖMUNGEN ÖSTLICHE WESERWATTEN

## Strömungsverhältnisse bei mittlerer Tide Thw



Abb. 11. Strömungsmessungen der Forschungsstelle Norderney (aus KOCH und LUCK, 1973)

Robinsbalje über den Großen Knechtsand nach Nordost, vor der Küste nach Norden über das Wurster Watt bei Spieka, über den Eversand nach Südost sowie vor der Küste bei Dorum nach Süden. Die Flutwassermenge der Robinsbalje muß also erheblich größer sein als die Ebbewassermenge. Nur im äußeren nördlichen Querschnitt, unterhalb der Kleinen Knechtsände, ist ein seewärts gerichteter Reststrom vorhanden. Wieweit dieser Ursache für die auf Abb. 3 skizzierten Veränderungen sein kann, werden die weiteren Analysen zeigen müssen.





Abb. 12. Strömungsmessungen seewärts des Wattgebietes (aus Göhren, 1974)

# 4.3 Seegang

Die einzige ausführliche Analyse von Seegangsmessungen in Flachwassergebieten liegt für das Elbmündungsgebiet vor (SIEFERT, 1974). Inzwischen sind im Bereich der Till zusätzliche Stationen in Betrieb gewesen, so daß die Seegangsverhältnisse im nördlichen Bereich des Gebietes für die MORAN-Pilotstudie ausreichend genau bekannt sind. Weitere Hinweise auf den Seegang beim Eindringen aus dem tiefen Weser-Elbe-Ästuar in das Knechtsand-Gebiet sind über Messungen und Analysen bei BARTHEL (1980) zu finden.

Die Untersuchungen im Elbmündungsgebiet erlauben es, sog. "Gebiete gleicher Seegangscharakteristik" zu definieren. Abb. 14 zeigt diese für den damals untersuchten Bereich, womit bereits der nördliche und östliche Teil des hier betrachteten Küstenvorfeldes erfaßt war. Nach SIEFERT (1974) ergaben sich für die einzelnen Gebiete die folgenden Charakteristiken:

T a b e l l e 3 Gebiete gleicher Seegangscharakteristik

Parameter	tieferes Wasser	Watt- ströme	Rand- watt	Brandungs- watt	brandungs- freies Watt
Wassertiefe d bei MThw	5 bis 12	5 bis 10	2 bis 5	1 bis 4	bis 5
mittl. Per. T	$2\overline{H}+2,3$	$2,3\overline{H}+1,8$	$3,5\overline{H}+1,8$	$3,5\overline{H}+2,8$	$2,8\overline{H} + 1,8$
Per. der kennz. Wellenhöhe T <sub>H10</sub>	1,25 T		1,19 T	1,15 T	1,15 T
Per. der max. Wellenhöhe T <sub>Hmr</sub>	1,46 T		1,27 T	1,28 T	1,28 T
Verteilungskennwert $C_{1/3} = H_{1/3}/\overline{H}$	1,51	1,49	1,47	1,41	1,45
mittl. Steilheit $\overline{H}/\overline{L}$	0,055	0,060	0,040	0,025	0,050
mittl. Länge			$\overline{L} = \overline{T}^2$ (9)		

Bei Kenntnis der Charakteristik ist der Seegang also umfassend – außer im Hinblick auf Häufigkeit – analysierbar.

Auf Abb. 15 sind die erweiterten Erkenntnisse zur Darstellung der Gebiete gleicher Seegangscharakteristik für das Knechtsandgebiet genutzt worden. Das zentrale Gebiet des hochliegenden Großen Knechtsandes ist – ebenso wie Neuwerker Watt, Eversand und das küstennahe Watt – dem "brandungsfreien Watt" ohne große Seegangsbelastung zuzuordnen. Unter Vermeidung einer Aufzählung von Einzelheiten sei auf viele Parallelitäten in den Umgebungen von Till und Robinsbalje hingewiesen. Übertragungen aus einem Gebiet mit dichtem Meßnetz in ein anderes sind unter diesen Umständen einfach.

Zur Anschauung sind zwei Luftbilder bei Seegang, und zwar von der 1980 versetzten Knechtsand-Hütte und von dem Deichvorland bei Dorum, angefügt (Abb. 16 und 17). Abb. 18 zeigt die alten Fundamente sowie die Hütte an ihrem neuen Standort.

## 5. Morphologisch-hydrologische Wechselbeziehungen

#### 5.1 Theoretische Betrachtungen

# 5.1.1 Ansätze zur Berechnung von Tide- und Seegangsenergie

Der Vergleich zweier Tiefenkarten zeigt das Ergebnis all der Einflüsse und Abläufe, die sich in dem betrachteten Gebiet während des gegebenen Zeitraumes abgespielt haben. Es handelt sich also um ein integrales Resultat, dessen Zwischenstadien unbekannt sind. Sofern man das Volumen des als bewegt ermittelbaren Materials als Parameter für die morphologische Aktivität heranzieht, gibt es zwei aus den Tiefenänderungsplänen ablesbare Resultate, nämlich einmal die mittlere Höhenänderung, d. h. die Differenz zwischen sedimentierter und erodierter Menge, jeweils auf eine Fläche bezogen. Das andere Resultat ist die Summe aus sedimentierter und erodierter Menge, also der Absolutwerte; dieser Parameter ist ein Maß für den Materialumsatz, wobei davon ausgegangen werden muß, daß der tatsächliche Umsatz wahrscheinlich wesentlich größer als der durch Kartenvergleiche erfaßbare ist.

Je kürzer der betrachtete Zeitraum ist, desto eher ist es daher denkbar, daß der aus einem Kartenvergleich ablesbare Materialumsatz in seiner Größenordnung der tatsächlich umgelagerten Menge entspricht. Dafür kommt als realistische Größe allenfalls ein Zeitraum von einem Jahr in Frage, da dies für das Küstenvorfeld üblicherweise der kürzest analysierbare Zeitraum ist.

GÖHREN (1971) stellt den resultierenden Materialtransport durch Tide, Wind und Seegang getrennt dar. EISMA (1980) schildert den Einfluß von Klima, Seegang, Tidehub, Strömungen und biotischen Faktoren. Bei diesen wie bei anderen Arbeiten tritt die Schwierigkeit auf, den morphologischen Parametern entsprechende, mit diesen vergleich- und koppelbare, integrierende Parameter für die auslösenden und evtl. die resistierenden Kräfte gegenüberzustellen. Dabei erhebt sich natürlich auch die Frage nach geeigneten morphologischen Parametern. Neben den in Gl. (6) und (7) verwendeten  $h_{max}$  und  $\beta$  mag ein weiterer als integraler Parameter interessant sein: der Zeitraum a (Jahre), bei dem 0,9  $h_{max}$  erreicht werden<sup>2</sup>. Über Gl. (6) wird dann mit

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup>) Die Zahl 0,9 wird in diesem Anfangsstadium der Untersuchungen vorgeschlagen; später mag sich ein anderer Wert als sinnvoller herausstellen.









Abb. 14. Gebiete gleicher Seegangscharakteristik nach Messungen der damaligen Forschungsgruppe Neuwerk (aus SIEFERT, 1974)







Abb. 15. Gebiete gleicher Seegangscharakteristik für das Knechtsand-Gebiet



Abb. 16. Knechtsand-Düne mit Schutzhütte (Aufn. HANS-HENNING KRUSE, Aug. 1980)



Abb. 17. Vorlandkante an der Wurster Küste bei Dorum (Aufn. HANS-HENNING KRUSE, Aug. 1980)



Abb. 18. Knechtsand mit Hütte im Mai 1981 (Aufn. Verf.)

$$0,9 h_{max} = h_{max} \cdot (1 - e^{-\beta \cdot a_{0,9}})$$

$$a_{0,9} = 2,3 \cdot \frac{1}{\beta}$$
(10)

schließlich

Er liefert neben der morphologischen Varianz β einen anschaulichen Eindruck über die Dauer gleichbleibender morphologischer Tendenzen.

 $h_{max}$ ,  $\beta$  wie auch  $a_{0,9}$  stellen integrierende Parameter dar. Im folgenden soll versucht werden, zu diesen etwa gleichwertige Parameter zu entwickeln, die die energetischen Belastungen repräsentieren.

Bei morphologischen Veränderungen handelt es sich um das Resultat eines Kräftespieles. Dieses wird meist in der Dimension m (als Höhen-) oder m<sup>3</sup> (als Volumenänderung) angegeben.

Tatsächlich werden Massen umgelagert wie ständig in Suspension bewegt, also es wird Arbeit geleistet. Die je Flächeneinheit aufgebrachte Arbeit kann bestimmt werden über

 v<sub>max</sub> als Parameter f
ür die bei Normaltiden 
über dem K
üstenvorfeld wirkende kinetische Energie:

$$\begin{split} \frac{E_{km}}{F} &= \varrho \cdot (d' + \eta^*) \cdot \frac{K_f - K_e}{D_F^2} \cdot \int_{K_e}^{K_f} v^2 \; dt \\ \int_{K_e}^{K_f} v^2 \; dt &\approx \frac{2}{3} \cdot v_{fmax}^2 \cdot (K_f - K_e) \end{split}$$

Das liefert

$$\frac{E_{km}}{F} = \frac{2}{3} \, \varrho \cdot (d' + \eta^{*}) \cdot \left(\frac{K_f - K_e}{D_F}\right)^2 \cdot v_{fmax}^2 \tag{11}$$

(Sofern bei Ebbe höhere Geschwindigkeiten als bei Flut auftreten, ist Gl. (11) entspr. für die Ebbe anzuwenden.)

- einen Triftstromwert, der die kinetische Energie während der Sturmfluten<sup>3</sup>) repräsentiert:

$$\frac{E_{ks}}{F} = \varrho \cdot (d' + \eta_s^{\scriptscriptstyle ts}) \cdot \frac{K_{fs} - K_{es}}{D_{fs}^2} \cdot \int_{K_{es}}^{K_{fs}} v^2 \ dt$$

mit  $\eta_s^* = \eta^* + 1$  m als Mittelwert

$$\begin{split} & \int_{K_{es}}^{K_{fs}} v^2 dt = v_T^2 \cdot D \text{ als N\"aherungswert} \\ & D_{fs} = D = 12,4 \text{ h als N\"aherungswert} \\ & \frac{E_{ks}}{F} = \varrho \cdot (d' + \eta_s^*) \cdot \frac{K_{fs} - K_{es}}{D} \cdot v_T^2 \end{split}$$
(12)

Ob es lohnt, das Sturmflutgeschehen zwischen zwei topographischen Aufnahmen genauer zu spezifizieren, kann noch nicht entschieden werden. Es wäre nach Gl. (12) für einzelne Sturmfluten möglich, sofern Strömungsmessungen vorliegen. Wenn dies nicht der Fall ist, müßte auf Näherungswerte nach Göhren (1969) zurückgegriffen werden. Ein Vergleich der beiden Energieanteile für ein normales Jahr ergibt somit unter der Annahme

$$K_f - K_e = D_f$$

und unter Annahme einer Grenzgeschwindigkeit von 20 cm/s mit den bei GÖHREN (1968a) zu findenden Geschwindigkeitsdaten ein Verhältnis von rd. 1,5 : 1. Für diesen Fall, ohne Berücksichtigung von Seegangseinflüssen – praktisch also brandungsfreies Watt –, sind danach 60 % der morphologischen Veränderungen auf die Bewegungen bei mittleren Tiden und 40 % auf diejenigen bei Sturmfluten zurückzuführen.\*)

Im Brandungswatt als Beispiel mit flächenhafter Brandung und Einwirkung der Orbitalbewegung verschiebt sich dieses Verhältnis weiter zugunsten der Sturmfluten. Im Randwatt gar, wo die Brandungsenergie auf kürzerer Strecke schneller ausgetauscht wird und außerdem beträchtliche Brandungströmungen zu erwarten sind, wird das Verhältnis zusätzlich in diese Richtung verschoben:

Nach den bei WIEGEL (1964) zusammengestellten Funktionen über die Orbitalgeschwindigkeiten u in Sohlennähe (Abb. 19) als Verhältnis

$$\frac{\mathbf{u}}{\overline{\mathbf{c}}} = \mathbf{f}\left(\frac{\overline{\mathbf{H}}}{\mathbf{d}}\right)$$

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup>) Nach Untersuchungen in anderem Zusammenhang (SIEFERT, 1982) ist in der Deutschen Bucht heute mit rd. 5 Tiden/Jahr zu rechnen, bei denen im Küstenvorfeld das HThw  $\ge$  MThw + 1,5 m oder der Windstau > 2 m werden.

<sup>\*)</sup> Die für das Aufwirbeln gültige Grenzgeschwindigkeit liegt etwa doppelt so hoch wie die hier für Bewegung an der Sohle zugrundegelegte. Wird erstere in diesem Vergleich verwendet, kippt das Verhältnis deutlich zugunsten der Sturmfluten.



Abb. 19. Orbitalgeschwindigkeit u als Funktion von Wassertiefe und Wellenkennwerten (aus WIEGEL, 1964)

mit

$$\overline{c} = \sqrt{g \cdot d \cdot \left(1 + \frac{3}{4} \frac{\overline{H}}{d}\right)}$$

und (soweit die obere Grenze des bei jedem Wasserstand möglichen H-Spektrums als Parameter gewählt wird)

$$\overline{\mathrm{H}}_{\mathrm{max}} = 0,375 \cdot \mathrm{d}^{0,6}$$

für brandungsfreies Watt und

$$\overline{\mathrm{H}}_{\mathrm{max}} = 0.5 \cdot \mathrm{d}^{0.6} \cdot$$

für Brandungsgebiete (SIEFERT, 1974) kann entsprechend die Energie aus Orbitalbewegungen angesetzt werden.

FÜHRBÖTER et al. (1979) erwähnen Brandungsströmungen vor Sylt bis 1,5 m/s, die am besten durch den einfachen Ansatz

$$\bar{v}_L = \sqrt{H_B} \cdot \sin 2\phi_B$$

beschrieben werden können.

Da nach Definition "tieferes Wasser" und "Wattströme" als Seegangsgebiete so tief sind, daß der Orbitaleinfluß vernachlässigt werden kann, darf nur für die flachen Gebiete die Energie je Flächeneinheit nach der Größe der Orbitalgeschwindigkeit kurz über der Sohle bestimmt werden:

$$\frac{E_{kb}}{F} = \varrho \cdot (d' + \eta_s^*) \cdot u^2 \tag{13}$$

Nach obigen Ansätzen wird damit über Abb. 19 die Orbitalgeschwindigkeit u im brandungsfreien Watt 25 bis 30% unter derjenigen in Brandungsgebieten liegen. Für  $d = d' + \eta_s^* = 4 m$  wird z. B.

$$\frac{\overline{H}_{max}}{d} = 0,375 \cdot d^{-0,4} = 0,215$$

$$\overline{c} = \sqrt{g \cdot d \cdot (1+0,16)} = 6,8 \text{ m/s}$$

$$u = 0,15 \cdot \overline{c} = 1,0 \text{ m/s}$$

$$\frac{\overline{E}_{kb}}{F} = \varrho \cdot d \cdot u^2 = 4,0 \frac{Nm}{m^2}$$

und damit

In Brandungsgebieten wird aber bei gleicher Wassertiefe

$$\frac{E_{kb}}{F} = 8,0 \frac{Nm}{m^2}$$

und damit – als Maß für die Turbulenz und die Transportbereitschaft – entsprechend größer. Dieser Vergleich gilt jedoch nur für die Seegangsgebiete "brandungsfreies Watt" – "Brandungswatt". Im "Randwatt" treten konzentriert Brandungsströmungen auf, die dann in Gl. (12) mit

$$\overrightarrow{V}_{T_b} = \overrightarrow{V}_T + \overrightarrow{V}_b$$

zu höheren Strömungsgeschwindigkeiten führen. Diese bewirken im Randwatt einen größeren Materialumsatz.

Wie bereits erwähnt, spielt der Seegangseinfluß am Boden der tieferen Bereiche des Küstenvorfeldes (die Grenze wird etwa bei – 10 m KN liegen) eine untergeordnete Rolle. Viele Messungen zeigen zudem, daß schon in flacheren Prielen die Strömungsgeschwindigkeiten bei Sturmfluten meist nur geringfügig von denen bei mittleren Tiden abweichen (Abb. 20). Transportvorgänge, die hier ihren Ursprung haben, sind also weitgehend wetterunabhängig.

#### 5.1.2 Ansätze zur Berechnung der Transportmengen

Der Sedimenttransport findet – am genauesten durch die englischen Ausdrücke definiert – als "bed load" und als "suspended load" statt. Beide werden als "total load" zusammengefaßt. Es gibt eine ganze Reihe bekannter Arbeiten, die sich theoretisch und in Laborversuchen mit diesem Phänomen beschäftigen. Die Übertragbarkeit auf Verhältnisse in der Natur ist jedoch bis heute problematisch, und andererseits liegen aus dem Küstengebiet nur wenige Messungen vor, die eine Verallgemeinerung gestatten. Bisher sind die am weitesten vorgedrungenen Untersuchungen in dem nördlich des Testfeldes Knechtsand liegenden Gebiet durchgeführt worden. Es sind zunächst die Arbeiten GÖHREN (1971) und dann diejenigen von CHRISTIANSEN (1974) – bezüglich der Rinnen – und von DÜCKER (1982) – bezüglich des Wattes (Abb. 21).

Beide letztgenannten Arbeiten enthalten Begründungen dafür, daß bei den im Küstenvorfeld gegebenen hydraulischen Verhältnissen der Transport auf der Sohle vernachlässigbar klein ist und somit in guter Näherung der Gesamttransport als derjenige der suspendierten Feststoffe angesehen werden kann. Damit wird das Problem zunächst reduziert auf die Bestimmung der Funktion des Diffusionskoeffizienten



Abb. 20. Max. Strömungsgeschwindigkeiten zwischen Neuwerk und der Küste in Abhängigkeit von der Höhenlage des Meßortes

## $\varepsilon = f(d)$

für die es parabolische (ROUSE-EINSTEIN), lineare (BHATTA-CHARYA) und konstante (COLE-MAN) Ansätze gibt. Für die Ästuare kann mit wesentlich größerer Sicherheit auf die von Göhren (1971) angegebenen vertikalen Verteilungen von Suspensionskonzentration und Transportmenge zurückgegriffen werden (Abb. 22). Für das Watt setzt Dücker (1982) die vertikale Suspensionsverteilung nach ROUSE (1937) an, die derjenigen nach Göhren ähnlich ist (Abb. 23). Neueste, noch nicht veröffentlichte Úntersuchungen scheinen diese Annahme als richtig zu bestätigen.

Zur Berechnung des tatsächlichen Suspensionstransportes je m<sup>2</sup> Durchflußquerschnitt während einer Halbtide entwickelte CHRISTIANSEN (1974) den Ansatz







Die Küste, 38 (1983), 1-57







Mo 148



Abb. 22. Vertikale Verteilungen von Schwebstoffkonzentration (C) und Transportmenge (Q<sub>s</sub>); Mittel aus 21 Messungen (aus Göhren, 1971)



Relative Suspensionskonzentration C/Ca



$$Q = 10^{-6} \cdot \frac{S_{v}^{3} \cdot A \cdot \frac{D_{f(e)}}{t_{b}}}{d_{m}^{2} \cdot \ln^{0.56} \left(\frac{VO}{V}\right)} \left[\frac{m^{3}}{m^{2}}\right]$$
(14)

der also in der 3. Potenz vom Stromweg S<sub>v</sub> abhängt. Unter Berücksichtigung eines aus Messungen abgeleiteten "Umgebungsparameters" kommt er für die Nord- und Südrinnen der Außenelbe zu Werten von 1,5 bis 6 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>. Das führt für die Größenordnung des Transportes je Halbtide in Till und Robinsbalje mit mittleren Querschnittsgrößen von 9000 m<sup>2</sup> zu

$$Q_{\rm T}$$
 = rd. 30 · 10<sup>3</sup> m<sup>3</sup>/Halbtide

Für das Watt gibt DÜCKER (1982) eine normierte Funktion für die Veränderung der Suspensionskonzentration mit der Windstärke in der Form

$$C_{v_{T}} = F \cdot C_{c_{T}} \tag{15}$$

mit dem relativen Anstiegswert F als

 $\begin{array}{l} F \,=\, f \, \left( v_W \right) \, f \ddot{u} r \; v_W \,\leq\, 11,5 \, \, m/s \\ F \,=\, f \, \left( v_W^3 \right) \, f \ddot{u} r \; v_W \,\geq\, 11,5 \, \, m/s, \end{array}$ 

also der 3. Potenz der Windgeschwindigkeit. Bei einer überschläglichen Berechnung der Suspensionstransportmengen setzt DÜCKER – auch für das benachbarte Knechtsandgebiet maßgebende – Mittelwerte der Konzentrationen (für 4 °C Wassertemperatur) nach seinen Messungen an mit

Gebiet (Seegangscharakter)	$v_W < 11,5 m/s$	v <sub>W</sub> >11,5 m/s (auflandig)
Randwatt	25 mg/l	145 mg/l
brandungsfreies Watt	60 mg/l	335 mg/l

Unter Verwendung einer Windstatistik für Scharhörn, die auch für das Knechtsandgebiet gilt, kommt DÜCKER zu jährlichen Frachtraten von

$$Q = n \cdot 10^5 \text{ m}^3/\text{Jahr}$$
(16)

(mit n = 1 bis 10) parallel zum Wattsockel im Randwatt und im brandungsfreien Watt. Die Größenordnung entspricht der bereits früher von Göhren (1971) ermittelten.

## 5.1.3 Hypothese zur Berechnung von Höhenänderungen

Als Resultat der Kap. 5.1.1 und 5.1.2 ist festzuhalten, daß die Ansätze zum einen den Einblick in das grandiose Spiel überreichlich vorhandener Energie im Küstenvorfeld gestatten und zum anderen hier je Tide mehr Material im Wasser bewegt wird, als es aus den maximalen Höhenänderungen abzuleiten ist.

Die Grundfunktion für die Höhenänderung lautet

$$\Delta z = \Delta z_{\max} \cdot (1 - e^{-\beta a}) \tag{1}$$

Dieser Ansatz gilt nach Kap. 3.3 für verschiedene Höhenparameter. Auf Abb. 8 wurden die Umsatzhöhen  $h_z = f$  (a) dargestellt. Es ergibt sich schon aus den beiden Beispielen ein Hinweis auf Zusammenhänge zwischen  $h_{z_{max}}$ ,  $\beta$  und der Seegangscharakteristik von Tab. 3 oder nach Gl. (13). Die Auswertung in weiteren Gebieten, die momentan betrieben wird, wird hier Möglichkeiten für genauere Analysen schaffen.

Eine Fläche wie das "morphologische Fenster" von 48 km<sup>2</sup> Größe setzt sich aus verschiedenen Gebieten mit jeweils eigener Seegangscharakteristik zusammen. Dadurch ergeben sich bestimmte Teilflächen, auf denen jeweils mit der größten Sedimentations- bzw. Erosionshöhe zu rechnen ist. Tab. 2 weist z. B. aus, daß die Maxima für Sedimentation stets in Teilen der nördlichen Hälfte, die Maxima für Erosion fast immer in solchen der südlichen Hälfte zu finden sind. Es kann also nicht überraschen, wenn Typen der Grundfunktion auch diese Maxima beschreiben können (Abb. 24).





Abb. 24. "Morphologisches Fenster" Hohenhörn Sände – Oberer Wittsand: Maxima von Sedimentationsund Erosionshöhen für 1 km² große Teilflächen (Tab. 2) als Funktionen des Vergleichszeitraumes

Nach den Definitionen in Kap. 3.3 deuten die Werte für  $\beta$  von 0,2 für die Sedimentationsund von 0,1 für die Erosionshöhen an, daß im Gebiet des "morphologischen Fensters" die Sedimentationsmaxima doppelt so schnell erreicht sind wie die Erosionsmaxima ( $a_{0,9} = 11,5$ gegen 23) und damit in den Sedimentationsbereichen früher mit einer Umkehr in Erosion zu rechnen ist als umgekehrt.

Dies ist begreiflicherweise momentan noch eine Hypothese. Die weiteren Arbeiten am MORAN-Projekt werden zeigen, wieweit sie gilt.

Einige Daten aus dem Testgebiet Knechtsand für den MORAN-Zeitraum 1974–79 erlauben weitere Rückschlüsse, und zwar zunächst in allgemeiner Form zwischen der jährlichen Höhenänderung  $\Delta z$  einer Teilfläche und dem Verhältnis dieser Teil- zur betrachteten Gesamtfläche:

Δz cm/Jahr	Δz als Mittelwert über die Teilfläche	Az ausgewählt als Maximalwert der Mittel über Flächen F aus der Gesamtfläche F	$\frac{F}{F_{ges}}$	hmend hmend
	km <sup>2</sup>	km <sup>2</sup>		zune
242	0,01	340	3 · 10 <sup>-5</sup>	β
78	1	340	$3 \cdot 10^{-3}$	$\Delta_2$
36	1	48	2 · 10 <sup>-2</sup>	4
10,5	24	48	$5 \cdot 10^{-1}$	
3,3	340	340	1,0	

T a b e l l e 4 Jährliche Höhenveränderung im Vergleich zum Flächenverhältnis

Die absolute Höhe der Funktion ist durch  $\overline{\Delta z}_{max}$  gegeben. Daraus läßt sich primär eine Abhängigkeit

$$\Delta z_{max} = f\left(\frac{1}{F/F_{ges}}\right)$$

ersehen. Die Wirkung des Seegangscharakters, wie er entspr. Tab. 3 sicherlich nicht nur durch einen einzigen Parameter ausgedrückt werden kann, ferner der Orbital- und Brandungsströmungen, der Tide- und Triftströmungen wurden bereits diskutiert. Bei dem Stand der Auswertung der Daten aus dem Knechtsandgebiet und bei der in jedem Falle nur begrenzten Aussagekraft läßt sich heute folgendes annehmen:

 a) Der Höchstwert Δz<sub>max</sub> wird durch die Seegangscharakteristik beeinflußt, und zwar in der Weise, daß er mit zunehmender mittlerer Wellensteilheit H/L deutlich abnimmt. Als charakteristischer Parameter bietet sich daher in erster Näherung an:

$$\Delta z_{max} = f\left(\frac{1}{\overline{H}/\overline{L}}\right)$$

b) Im Randwatt und – in schwächerer Form – im Brandungswatt ist die Brandungsströmung von großer Bedeutung. Da sie konzentriert an bestimmten Orten auftreten und zu großen kurzfristigen Änderungen führen kann, wird sie vermutlich stärker die morphologische Varianz  $\beta$  beeinflussen mit  $\beta = f(\overline{v}_1)$ 

oder besser, da  $\overline{v}_L$  mit H wächst,

$$\beta = f(\overline{H}/d)$$

um auch die geringere Bedeutung dieser Strömung im tieferen Wasser zu erfassen.

c) Tide- und Triftstromgeschwindigkeiten sind in den Wattrinnen und im tieferen Wasser fast gleich und treten täglich in ähnlicher Größe auf. Sie wirken daher dort gleichmäßig über die Zeit und werden vornehmlich Δz<sub>max</sub> verändern:

$$\Delta z_{\rm max} = f(v)$$

vermutlich mit v in der 2. oder 3. Potenz nach Kap. 5.1.2. Im Watt spielt die normale Tideströmung bei der Höhenveränderung über längere Zeiträume nur eine untergeordnete Rolle; dafür gewinnen Triftströmungen hier als seltene Ereignisse besondere Bedeutung. In diesem Sinne werden sie vor allem  $\beta$  beeinflussen:

$$\beta = f(v) \text{ oder } \beta = f(S_v)$$

vermutlich ebenfalls in der 2. oder 3. Potenz.

Eine der wichtigsten Aufgaben im MORAN-Projekt wird es sein, diese Hypothesen

$$\begin{split} \Delta z &= \Delta z_{max} \cdot (1 - e^{-\beta a}) \\ \text{mit } \Delta z_{max} &= f\left(\frac{1}{F/F_{ges}}, \frac{1}{\overline{H}/\overline{L}}, v\right) \\ \beta &= f\left(\frac{\overline{H}}{d}, v, S_v\right) \end{split}$$

zu untersuchen und erkennbare Zusammenhänge festzuhalten.

#### 5.2 Statistische Untersuchungen

Einige der unter 5.1 theoretisch begründeten Zusammenhänge können nur auf statistischem Wege verdeutlicht werden. Dazu sind bisher im MORAN-Projekt zwei Untersuchungen vorgenommen worden:

Das Testgebiet Knechtsand wurde in Gebiete gleicher Seegangscharakteristik aufgeteilt (Abb. 15). Die ein km<sup>2</sup> großen Teilflächen wurden danach sortiert. Für die Kategorien "tieferes Wasser", "Randwatt", "Brandungswatt" und "brandungsfreies Watt" wurden dann auf Abb. 25 die Summenhäufigkeiten des Materialumsatzes dargestellt.



1974–79 für verschiedene Seegangsgebiete

Als Ergebnis dieser ersten, wegen der Teilflächengröße von ein km<sup>2</sup> noch recht groben statistischen Auswertung sind vier fast parallele Summenkurven entstanden: Der Materialumsatz – also die Summe der je km<sup>2</sup> sedimentierten und erodierten Volumina – nimmt vom tieferen Wasser in das brandungsfreie Watt gleichmäßig und deutlich ab, wie Tab. 5 mit den 50-%- und den 99-%-Werten (letztere mögen als Maxima angesehen werden) zeigt:

				Tabelle	5
Materialumsatz	für	Gebiete	mit	definierter	Seegangscharakteristik (Tabelle 3)

Gebiet	Materialumsatz 1974–79 in m <sup>3</sup> /km <sup>2</sup> für die Häufigkeitssumme			
	50 %	99 %		
tieferes Wasser	11,0 · 10 <sup>5</sup>	4,6 · 10 <sup>6</sup>		
Randwatt	$7,7 \cdot 10^{5}$	$3.4 \cdot 10^{6}$		
Brandungswatt	$5,2 \cdot 10^5$	$2.0 \cdot 10^{6}$		
brandungsfreies Watt	$3,3 \cdot 10^5$	1,4 · 10 <sup>6</sup>		
Testgebiet Knechtsand gesamt	5,5 · 10 <sup>5</sup>	3,4 · 10 <sup>6</sup>		

Zur ausreichend genauen Erfassung der Wattrinnen ist die gewählte Rasterung zu grob. Es ist daher und für Detailuntersuchungen vorgesehen, im weiteren Verlauf die Teilflächengrößen zu verringern oder nach Bedarf zu variieren.



Abb. 26. Testfeld Knechtsand: Summenhäufigkeit des Materialumsatzes (Erosion + Sedimentation) 1974–79 für Gebiete mit unterschiedlichen mittleren Tideströmungsverhältnissen

Eine zweite statistische Untersuchung erfaßt die Strömungsgeschwindigkeiten, wie sie auf Abb. 13 angegeben sind. Dabei ist zu bedenken, daß die Brandungsströmungen in den gemessenen Triftstromwerten enthalten sind. Weil neuere Strömungsmessungen für eine detaillierte Untersuchung nur in unzureichender Dichte vorliegen, wurde eine etwas grobe Unterteilung in drei Geschwindigkeitsklassen, bezogen auf die maximale Strömungsgeschwindigkeit bei einer Normaltide, gewählt. So konnte leider nur die "Klasse" mit v<sub>f, e max</sub> zwischen 40 und 70 cm/s etwas ausführlicher untersucht werden. Die Summenkurve des Materialumsatzes zeigt Abb. 26. Sie strebt bereits bei einem Umsatz um 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup> der 100-%-Grenze deutlich zu; dazu der Hinweis, daß diese geringen Strömungsgeschwindigkeiten vornehmlich im brandungsfreien Watt auftreten.

Über die Mittelwerte von Tab. 6 werden die Aussagen von Kap. 5.1 über die Wirkung der verschiedenen Energiekomponenten zunächst bestätigt.

Über Gl. (11) ist die kinetische Energie proportional  $v_{max}^2$ ; in den Gebieten mit hohen Tidestromgeschwindigkeiten, im wesentlichen den Wattrinnen, ist hoher Materialumsatz also eine Folge des normalen Tidegeschehens. Wo die Tidestromgeschwindigkeiten kleiner wer-

v <sub>f, e max</sub> cm/s	mittl. Materialumsatz 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> *)	vertretene Seegangscharakteristik
v < 40	1,81	Rand-, Brandungswatt, brandungsfreies Watt
$40 \leq v \leq 70$	0,51	überwiegend brandungsfreies Watt
v > 70	2,20	tieferes Wasser, Wattströme

Tabelle 6 fittelwerte des Materialumsatzes

den, nämlich in den Brandungsgebieten, wirken verstärkt die Triftstromenergie (Gl. 12) und die Energie durch Orbitalströmung (Gl. 13), deren gemeinsame Wirkung über das Jahr aber diejenige der täglichen Gezeiten in den Rinnen wohl nicht erreicht. Im brandungsfreien Watt hingegen nimmt der Orbitaleinfluß erheblich ab, und damit wird der Materialumsatz weiter verringert, wie Tab. 5 und 6 und auch Abb. 25 und 26 ausweisen.

# 5.3 Grenzen der skizzierten Untersuchungen

Im Text wurde mehrfach darauf hingewiesen, daß es wegen der gerade erst gestarteten intensiven Analysen bis jetzt nur möglich ist, im Rahmen der vorgelegten Projektstudie Ideen und Konzeptionen zu entwickeln und – vor allem mit Abb. 24 bis 26 – Wege aufzuzeigen. Daher kann hier auch nicht festgelegt werden, wie weit diese Wege zu beschreiten sein werden. Die ersten Auswertungen lassen jedoch Optimismus gerechtfertigt erscheinen.

Dennoch sind den Untersuchungen von vornherein Grenzen gesetzt:

- a) Es war nicht beabsichtigt und kann es auf Grund der vorhandenen Daten nicht sein, Höhenveränderungen im Mikromaßstab festzustellen. Die kleinste sinnvolle Flächeneinheit dürfte bei einem ha liegen, die kleinste Zeiteinheit bei einem Jahr.
- b) Es gibt eine Reihe von Gebieten, vor allem vor der schleswig-holsteinischen Küste, die 1974/75 nicht aufgenommen und wo Daten aus den 1960er Jahren in das Küstenkartenwerk eingearbeitet wurden. Diese Flächen und solche, in denen ab 1974 gebaggert oder verklappt wurde, werden nicht untersucht.
- c) Eine Kopplung morphologischer und hydrologischer Daten entsprechend Kap. 5.1.1 kann nur in solchen Gebieten erreicht werden, wo hydrologische Daten in der erforderlichen Dichte vorliegen oder mit ausreichender Genauigkeit eingerechnet werden können.
- d) Man wird aus Höhenänderungen oder Materialumsatz nicht auf den Transport schließen können. Mit Hilfe des umfangreichen Datenschatzes kann es jedoch gelingen, Ort und Zeitraum von Umlagerungen festzustellen.

## 6. Sedimentologische und biologische Verhältnisse

Der Ansatz von CHRISTIANSEN (1974) zur Berechnung des Suspensionstransportes enthält den mittleren Korndurchmesser als Parameter (Gl. 14). DÜCKER (1982) stellt eine Abhängigkeit der Konzentration vom "Einzugsgebiet" fest. REINECK und SIEFERT (1980) haben die Wirkung des Seegangs auf den Schluffanteil im Oberflächensediment untersucht und das Zusammenwirken von Orbital- und Tideströmungen dargestellt. Aus all diesen Analysen geht teils sogar quantitativ der Zusammenhang zwischen Sediment und Suspensionstransport hervor, und es bedarf wohl keiner weiteren Begründungen für die Bedeutung der sedimentologischen Verhältnisse.

Wenn diesen auch in der vorliegenden Pilotstudie nur relativ wenig Aufmerksamkeit geschenkt werden konnte, sollen hier doch die wichtigsten Arbeiten über das Knechtsandgebiet genannt werden, um zu dokumentieren, mit welchem Datenmaterial hier weitergearbeitet werden kann. Da ist zunächst die umfangreiche Arbeit von Müller et al. (1965) zu nennen, die sich im wesentlichen mit dem Oberflächenmaterial beschäftigt.

Makrofauna und Vegetation der Knechtsandwatten hat MICHAELIS (1969) analysiert. Einige Jahre später haben sich KOEMAN (1975), COLIJN und KOEMAN (1975) sowie HAUSER und MICHAELIS (1975) erneut intensiv mit den biologischen Verhältnissen des Knechtsandgebietes beschäftigt. Diesem Datenmaterial kommt insoweit besondere Bedeutung zu, als die biogene Festigkeit des Oberflächensedimentes einen wichtigen Faktor bei morphologischen Veränderungen bzw. beim Suspensionstransport darstellen kann. Biotop (etwa Schlickwatt-Mischwatt-Sandwatt-Brandungsgebiet) und morphologisch wirksame Kraft stehen in Wechselbeziehung. Darauf hat RAGUTZKI (1979) hingewiesen, und die Erkenntnisse von FÜHRBÖ-TER et al. (1981) bestätigen dies in eindrucksvoller Weise: Der Erosionsbeginn des Sandwattes vor der Insel Alte Mellum liegt durch biogene Stabilisation um durchschnittlich rd. 300 % über dem bodenmechanischen Vergleichswert eines sterilen Bodens.

#### 7. Zum vollautomatischen Kartenvergleich

Nach einem Beschluß des KFKI sollen die morphologischen Analysen für das Nordsee-Küstengebiet auf der Basis eines neuartigen vollautomatischen Kartenvergleiches durchgeführt werden, das auf längere Sicht die bisherigen – personalintensiven – halbautomatischen Vergleiche unterschiedlicher Prägung ablösen soll. Die Voraussetzungen dafür werden inzwischen getroffen, indem diejenigen Daten, die nicht schon während der Aufnahme (Peilung) entsprechend gespeichert wurden, nunmehr auf Datenträger übertragen werden. Eigentlich war es auch schon geplant, im Rahmen dieser Studie einen Vergleich zwischen den Ergebnissen der halb- und der vollautomatischen Auswertung zu bringen. Das ist deshalb mißlungen, weil im Moment noch die Übertragung vieler Daten auf Magnetbänder vorgenommen werden muß, ein Schritt, der in etwas fernerer Zukunft vollständig automatisiert werden soll.

Anzumerken ist im jetzigen Stadium, daß eine KFKI-Projektgruppe unter Leitung von Dr.-Ing. SCHLEIDER aus sieben verschiedenen Konzepten das System TASH (<u>Topographisches A</u>ufnahme- und Auswerte<u>s</u>ystem der Universität <u>H</u>annover) als am besten für die vorgesehenen Aufgaben geeignetes ausgewählt hat. Das Verfahren wurde im Sonderforschungsbereich 149 an der Universität Hannover entwickelt (KRUSE, 1979). Sobald die oben erwähnten Vergleiche vorliegen, wird mit Bezug auf das MORAN-Projekt darüber publiziert werden.

## 8. Vorgesehene Arbeiten

Für den Zeitraum 1982/84 wird das Projekt MORAN intensiv vom Bundesministerium für Forschung und Technologie (BMFT) gefördert. Diese Förderung wird es gestatten, das Problem der morphologischen Analysen in seiner ganzen Breite weiterzuverfolgen.

Dazu gehören folgende Teilprojekte:

- a) Analysen in den Testfeldern 2 (Norderney) und 3 (Büsum), um Erkenntnisse aus dem Testfeld Knechtsand zu erhärten und zu erweitern.
- b) Ausdehnung der morphologischen Analysen 1974–79 auf das gesamte Küstengebiet zwischen Ems und Lister Tief (Ableitung von Kausalzusammenhängen über Gl. [11] bis [13] und entspr. Abb. 24 bis 26).
- c) Fortsetzung der Inspektion von "morphologischen Fenstern" in anderen Gebieten mit dichten Messungen, um die Entwicklung 1974–79 in die längerfristige Entwicklung einzubinden (entspr. den Ausführungen in Kap. 3.3).
- d) Beobachtung von kleinen morphologischen Einheiten, d. h. kleinen Gebieten mit konstantem Seegangs- und Strömungscharakter, der genau definierbar ist (entspr. Abb. 8 und 24).
- e) Erarbeitung eines Werkes zur Bestimmung der Höhenänderungen im Küstenvorfeld (entspr. den Ansätzen in Kap. 5.1.3).
- f) Materialbilanzen mehr oder weniger geschlossener Gebiete, Begründungen für deren Entwicklung aus den hydrologischen Parametern.
- g) Schlußfolgerungen auf morphologische Veränderungen aus den sedimentologischen und biologischen Gegebenheiten.
- h) Festlegung von Gebieten mit starken/schwachen Veränderungen; daraus Empfehlungen über die Zeitabstände von topographischen Aufnahmen.

Das Programm ist also vielfältig und umfangreich. Kritiker mögen es als überzogen ansehen. Auch dazu hat sich die Projektgruppe Gedanken gemacht. Antworten auf die Frage nach der praktischen Bedeutung des MORAN-Projektes enthält stichwortartig die folgende Zusammenstellung:

Wenn topographische Veränderungen im Küstenvorfeld unerkannt bleiben, so kann das zur Folge haben:

- negative Auswirkungen auf den Küstenschutz (einschl. Inseln und Halligen),
- Gefährdung der Fahrrinnen in den Strömen,
- Gefährdung der Zufahrten zu den kleinen Küstenhäfen, Fährhäfen, Außentiefs,
- Gefährdung von Bauwerken (Türme, Pfähle, Baken, Buhnen, Dämme, Plattformen u. a.),
- Gefährdung von Pipelines, Kabelverbindungen und Wasserleitungen sowie dadurch mögliche Gefährdung der Ökologie und der Schiffahrt,
- Veränderungen der Umweltbedingungen, z. B. für Vögel (Beruhigungszonen, Flachwasserflächen) und Seehunde (Strömungsbänke),
- Gefährdung des Wattes als Reinigungsgebiet und Nahrungsquelle,
- fehlende Hinweise auf sinnvolle Steuerungsmaßnahmen (prognostische Modelle, Lenkungsmaßnahmen).

# 9. Danksagung

Die Abfassung der vorliegenden Studie hat dem Verfasser zugegebenermaßen erhebliche Schwierigkeiten bereitet, soll sie doch dazu beitragen, die sinnvolle Arbeit einer Gruppe für die nächsten Jahre zu skizzieren und zu begründen. Er ist daher für viele Anregungen und offene Diskussionen den Mitgliedern der Projektgruppe sowie den Herren Drs.-Ing. CHRI-STIANSEN, GÖHREN und LUCK sehr dankbar und hofft, daß diese Gespräche mit der Veröffentlichung der Arbeit nicht abreißen werden.

## 10. Schriftenverzeichnis

BARTHEL, V: Seegang in einem Ästuar am Beispiel der Außenweser. Die Küste, H. 35, 1980.

- BARTHEL, V.: Vergleich der Topografie 1974–79 des Testfeldes "Knechtsand" im Rahmen des MORAN-Projektes. Strom- und Hafenbau Hamburg, Ref. Hydrologie Unterelbe, Studie 51, 1981 (unveröff.).
- CHRISTIANSEN, H.: Über den Transport suspendierter Feststoffe in Ästuarien am Beispiel der Elbemündung bei Neuwerk. Hamb. Küstenf., H. 28, 1974.
- COLIJN F., u. KOEMAN, R.: Das Mikrophytobenthos der Watten, Strände und Riffe um den Hohen Knechtsand in der Wesermündung. Forschungsst. Norderney, Jb. 1974, Bd. 26, 1975.
- DÜCKER, H. P.: Suspensionsgehalte in Flachwassergebieten Messungen im Watt von Scharhörn. Die Küste, H. 37, 1982.
- EEISMA, D.: Natural Forces. In: Geomorphology of the Wadden Sea Area. Wadden Sea Working Group, Rep. 1, Leiden, 1980.
- FÜHRBÖTER, A., BÜSCHING, F., DETTE, H. H. U. HANSEN, U. A.: Energieumwandlungen in Brandungszonen. In: Sandbewegung im Küstenraum, ein Abschlußbericht. DFG, Boldt Verlag, Boppard, 1979.
- FÜHRBÖTER, A., DETTE, H. H. u. MANZENRIEDER, H.: In-situ-Untersuchungen der Erosionsstabilität und der Durchlässigkeit von Wattböden. Leichtweiß-Inst. der TU Braunschweig, Ber. Nr. 506, 1981.
- GÖHREN, H.: Über die Genauigkeit der küstennahen Seevermessung nach dem Echolotverfahren. Hamb. Küstenf., H. 2, 1968.
- GÖHREN, H.: Triftströmungen im Wattenmeer. Mitt. des Franzius-Inst. der TU Hannover, H. 30, 1968a.
- Göhren, H.: Tidewasserstände und Windstau im Elbmündungsgebiet. Hamb. Küstenf., H. 3, 1968b.
- GÖHREN, H.: Die Strömungsverhältnisse im Elbmündungsgebiet. Hamb. Küstenf., H. 6, 1969.
- Göhren, H.: Untersuchungen über die Sandbewegung im Elbmündungsgebiet. Hamb. Küstenf., H. 19, 1971.
- Göhren, H.: Über Strömungsverhältnisse und Sandtransport in Flachwassergebieten vor der südöstlichen Nordseeküste. Hamb. Küstenf., H. 29, 1974.
- HAUSER, B. u. MICHAELIS, H.: Die Makrofauna der Watten, Strände, Riffe und Wracks um den Hohen Knechtsand in der Wesermündung. Forschungsst. Norderney, Jb. 1974, Bd. 26, 1975.
- HOMEIER, H.: Untersuchung morphologischer Veränderungen an der Wurster Küste auf Grund topographischer Vergleichsmessungen 1957/65. Forschungsst. Norderney, Jb. 1965, Bd. 17, 1966.
- HOMEIER, H.: Das Wurster Watt eine historisch-morphologische Untersuchung des Küstenund Wattgebietes von der Weser- bis zur Elbmündung. Forschungsst. Norderney, Jb. 1967, Bd. 19, 1969.
- KOCH, M. u. LUCK, G.: Untersuchungen zur Erfassung der Strömungsverhältnisse auf den östlichen Weserwatten. Forschungsst. Norderney, Jb. 1972, Bd. 24, 1973.
- KOEMAN, R.: Die Makrofauna der Watten, Strände und Riffe um den Hohen Knechtsand in der Wesermündung. Forschungsst. Norderney, Jb. 1974, Bd. 26, 1975.
- KOWALSKI, H. u. LUCK, G.: Mitwirkung der Forschungsstelle Norderney bei der Vermessung des deutschen Küstenvorfeldes durch das Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI). Forschungsst. Norderney, Jb. 1978, Bd. 30, 1979.
- KRUSE, I.: TASH Ein System zur EDV-unterstützten Herstellung topographischer Grundkarten. NaKaVerm. Reihe I, H. 79, 1979.
- LANG, A. W.: Untersuchungen zur morphologischen Entwicklung des südlichen Elbe-Ästuars von 1560 bis 1960. Hamb. Küstenf., H. 12, 1970.
- MICHAELIS, H.: Makrofauna und Vegetation der Knechtsandwatten. Forschungsst. Norderney, Jb. 1967, Bd. 19, 1969.
- MÜLLER, C. D., NACHTIGALL, K. H., REINECK, H. E., SEIBOLD, E. u. VOLLBRECHT, K.: Der Knechtsand – Eine Untersuchung über Material und Materialtransport mit der Luminophorenmethode und anderen vergleichenden Methoden. Forschungsst. Norderney, Jb. 1964, Bd. 16, 1965.

- RAGUTZKI, G.: Zur Frage der biogenen Festigkeit von Wattsedimenten nach bodenphysikalischen Kriterien. Forschungsst. Norderney, Jb. 1978, Bd. 30, 1979.
- REINECK, H. E. u. SIEFERT, W.: Faktoren der Schlickbildung im Sahlenburger und Neuwerker Watt. Die Küste, H. 35, 1980.

ROUSE, H.: Modern Conceptions of the Mechanics of Turbulence. Transa. ASCE, Vol. 102, 1937.

SCHLEIDER, W.: Das Peilwesen der Wasser- und Schiffahrtsverwaltung des Bundes im Küstengebiet. Der Seewart, H. 6, 1981.

- SIEFERT, W.: Ergänzende Wasserstandsuntersuchungen im Elbmündungsgebiet und im Wurster Watt. Hamb. Küstenf., H. 27, 1973.
- SIEFERT, W.: Über den Seegang in Flachwassergebieten. Mitt. des Leichtweiß-Inst. der TU Braunschweig, H. 40, 1974.
- SIEFERT, W.: Bemerkenswerte Veränderungen der Wasserstände in den deutschen Tideflüssen. Die Küste, H. 37, 1982.
- SIEFERT, W. u. BARTHEL, V.: The German "MORAN" Project. Proc. 17th Int. Conf. on Coastal Eng., Sydney 1980, ASCE, New York, 1981.
- SIEFERT, W. u. LASSEN, H.: Vermessungsarbeiten im Elbmündungsgebiet. Hamb. Küstenf., H. 2, 1968.
- SIEFERT, W. et al.: Die Strömungsverhältnisse vor der Westküste Schleswig-Holsteins Ergebnisse eines KFKI-Meßprogramms. Die Küste, H. 35, 1980.

WIEGEL, R. L.: Oceanographical Engineering. Prentice Hall Inc., Englewood Cliffs, N. J., 1964.

- WSA Bremerhaven: Tidewasserstände in der Außenweser. Teilber. 1, Bremerhaven, 1975 (unveröff.).
- WSA Bremerhaven: Tidewasserstände in der Außenweser. Teilber. 3, Bremerhaven, 1979 (unveröff.).

WSA Bremerhaven: Die Hydrographie der Außenweser 1979/1. Bremerhaven, 1979 (unveröff.).

A	Turbulenzquotient	-
AW	Pegel Alte Weser	_
D	Tidedauer	h
D <sub>E E</sub>	Ebbe-, Flutdauer	h
E	Erosionsvolumen	m <sup>3</sup>
Ekb	kin. Energie in der Brandungszone	Nm
Ekm	kin. Energie der mittleren Tide	Nm
Eke	kin. Energie von Sturmfluten	Nm
F	Teilfläche	ha oder km <sup>2</sup>
Fare	Gesamtfläche	km <sup>2</sup>
H	Brecherhöhe	m
HThw	Sturmflut-Scheitelwasserstand	cm PN
H1/3	kennzeichn. Wellenhöhe	m
H	mittl. Wellenhöhe	m
K.	Ebbe-, Flutstromkenterpunkt	h
Ī <sup>c,1</sup>	mittl. Wellenlänge	m
S	Sedimentationsvolumen	m <sup>3</sup>
S.	Stromweg	km
TH	Periode der kennzeichn. Wellen	s
$\overline{T}$	mittl. Wellenperiode	s
W'	Windstau (Diff. zwischen HThw und MThw)	m
Z	Materialumsatzvolumen	m <sup>3</sup>
a	Zeitraum (Anzahl Jahre)	_
ano	Anzahl Jahre bis zum Erreichen von 90 % Azmar bzw. hmar	_
ē	mittl. Fortschrittsgeschwindigkeit der Wellen	m/s
d	Wassertiefe	m
d'	Wassertiefe bei Kartennull	m

## Symbolverzeichnis

dm	mittl. Korndurchmesser suspendierter Feststoffe	mm
g	Erdbeschleunigung	cm/s <sup>2</sup>
he	Erosionshöhe	cm
h <sub>m</sub> .	mittl. Höhenänderung	cm
hs	Sedimentationshöhe	cm
hz	Umsatzhöhe	cm
h	Höhenänderung je Jahr	cm/Jahr
n	Anzahl der Teilflächen	-
t	Tidezeit (t = 0 für Tnw-Eintritt)	h
t <sub>b</sub>	Dauer der beschleunigten Tideströtnung	h
u	Orbitalgeschwindigkeit	m/s
Ve.f	Ebbe-, Flutstromgeschwindigkeit	m/s
$\overline{\mathbf{v}}_{\mathrm{L}}$	mittl. Brandungsstromgeschwindigkeit	m/s
v <sub>T</sub>	Triftstromgeschwindigkeit	m/s
$v_w$	Windgeschwindigkeit	m/s
β	morphologische Varianz	-
Δz	Höhenänderung allgemein	cm
$\overline{\Delta z}$	Höhenänderung je Jahr	cm/Jahr
η*	mittl. Höhe der Tidekurve über MTnw zwischen K <sub>e</sub> und K <sub>f</sub>	m
η <sup>*</sup>	η* entspr. Wert bei Sturmfluten	m
γ	kinem. Zähigkeit	m <sup>2</sup> /s
$\varphi_{\rm B}$	Brecherkammwinkel (zwischen Wellenkamm und Uferlinie)	-
6	Dichte	g/cm <sup>3</sup>