

# Parameter zur Beschreibung der Morphodynamik eines Wattgebietes

Von JACOBUS HOFSTEDE

## Zusammenfassung

1978 wurde im KFKI eine Projektgruppe: „MORAN, Morphologische Analysen Nordseeküste“ gebildet. Eines der Ergebnisse war die Entwicklung einer Sättigungsfunktion

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

für die Umsatzhöhe  $h_u$  (cm) eines Gebietes, die über den Vergleichszeitraum  $a$  (Jahr) bestimmt werden kann. Aus dieser Sättigungsfunktion lassen sich drei Parameter, die die Morphodynamik eines Gebietes charakterisieren, ermitteln:

- Die asymptotische Umsatzhöhe  $\bar{h}_u$  erlaubt eine Aussage über die maximalen mittleren Höhenänderungen, die auftreten können.
- Die morphologische Varianz  $\beta$  als reziproker Wert von  $a_0$  erlaubt eine Aussage über die Dauer der gleichbleibenden Tendenzen: Erosion oder Sedimentation.
- Die Umsatzrate  $\bar{h}_u/a_0$  schließlich erlaubt eine allgemeine Aussage über die Morphodynamik und läßt sich somit direkt mit der Hydrodynamik des Gebietes vergleichen.

Anhand dieser Parameter ist der Neuwerk/Scharhörner Wattkomplex in neun Teilgebiete unterschiedlicher Morphodynamik untergliedert worden.

## Summary

*In 1978 the German Coastal Engineering Board initiated the scientific project: „MORAN“: „Morphological Analysis of the German North-Sea-Coast“. One of the results was the development of a saturation function for the turnover height  $h_u$  (cm) of a certain area, over the time interval  $a$  (annum) between two surveys (chap. 2, Fig. 2), which can be given as*

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

*From this function, three morphological parameters which describe the morphodynamics of a certain area can be calculated:*

- *the asymptotic turnover height  $\bar{h}_u$  allows a statement about the maximum average height changes which may occur;*
- *the morphological variance  $\beta$ , as the reciprocal of  $a_0$ , allows a statement about the duration of steady trends: erosion or sedimentation;*
- *finally the turnover rate  $\bar{h}_u/a_0$  allows a general statement about the morphodynamics and thereby a direct comparison with the hydrodynamics of the area.*

*With these parameters, the Neuwerk/Scharhörner tidal flats have been divided into nine morphodynamically similar regions (chap. 3, Fig. 4, table 1).*

## Inhalt

1. Einleitung. . . . .	198
2. Die MORAN-Funktion . . . . .	200
3. Ergebnisse . . . . .	201
3.1 Hohes Watt (HW). . . . .	201
3.2 Wattpriele (WP). . . . .	202
3.3 Wattströme (WS). . . . .	204

3.4 Platen (P) . . . . .	205
3.5 Tieferes Wasser vor dem Watt (TW) . . . . .	205
3.6 Randwatt (RW) . . . . .	206
3.7 Brandungswatt (BW) . . . . .	207
3.8 Ästuar-Rand (ÄR) . . . . .	208
3.9 Anthropogen beeinflusste Gebiete (AN) . . . . .	208
4. Diskussion . . . . .	208
5. Schlußfolgerungen . . . . .	210
6. Schriftenverzeichnis . . . . .	211

## 1. Einleitung

In der inneren Deutschen Bucht bildet zwischen Wangerooge und der Halbinsel Eiderstedt ein 15 bis 25 km breiter Streifen offenes Wattgebiet einen wichtigen Schutz des Festlandes vor dem Meer (Abb. 1). Barriereinseln und Küstendünen fehlen hier fast völlig. Wie dieser Streifen offenes Wattgebiet reagieren wird, wenn sich in Zukunft der Meeresspiegelanstieg tatsächlich beschleunigt (Abb. 2), ist für den Küstenschutz von übergeordneter Bedeutung. Dabei wird erwartet, daß ein effektiver Plan zum Schutz der Küste nur dann möglich ist, wenn genaue Erkenntnisse über die heutige Morpho- und Hydrodynamik des Wattgebietes vorliegen.

Im Rahmen des KFKI-Projektes MORAN I – „Morphologische Analysen Nordseeküste“ – (SIEFERT u. BARTHEL, 1980; BARTHEL, 1981; SIEFERT, 1983, 1987) wurde ein Auswertungsverfahren entwickelt, durch das anhand von Kartenvergleichen verschiedene morphologische Parameter erfaßt werden können, welche die Morphodynamik eines Wattgebietes charakterisieren. Diese Parameter werden von empirisch-hypothetischen Ansätzen abgeleitet.

SIEFERT (1987) hat im Rahmen des MORAN-I-Projektes einen ersten Versuch unternommen, das Neuwerk/Scharhörner Wattgebiet anhand dieser Parameter zu charakterisieren. Der Einteilung liegen aber nur Daten aus Teilbereichen des Wattes zugrunde. Aufbauend auf diesen Ergebnissen wurde 1989 das KFKI-Projekt MORAN II initiiert. Eines der Ziele dieses Projektes ist die Verifizierung der in MORAN I entwickelten empirisch-hypothetischen Ansätze durch weiterführende Untersuchungen (SIEFERT, 1987; HOFSTEDE u. SCHÜLLER, 1989). Dann könnten sie als allgemeingültige, beschreibende Parameter zur Charakterisierung eines Wattgebietes verwendet werden. In der vorliegenden Arbeit sind die Parameter für den gesamten Neuwerk/Scharhörner Wattkomplex (340 km<sup>2</sup>) berechnet und in Karten dargestellt (Kap. 3). Anschließend ist ein Vergleich mit den vorläufigen Ergebnissen von SIEFERT (1987) durchgeführt worden (Kap. 4).

Der Neuwerk/Scharhörner Wattkomplex liegt direkt südlich der Elbmündung und umfaßt das Scharhörnerriff, das Neuwerker, Scharhörner und Duhner Watt, Oster- und Westertill, die Robbenplatten und die Hohenhörnsände. Somit sind alle morphologischen Einheiten eines Wateinzuggebietes repräsentiert.

Sedimentologisch ist der Wattkomplex relativ homogen und kann nach RAGUTZKI (1973) als „Sandwatt“, bzw. örtlich „Schlicksand“, klassifiziert werden (GÖHREN, 1975 b). Die größten Sedimente werden im tiefen Bereich der Ostertill angetroffen; die feinsten um Neuwerk, im Duhner Watt und in der Westertill, wo eine alte Tonschicht austreicht (GÖHREN, 1975 b, nach LINKE). Die Besiedlung konzentriert sich im Neuwerk/Scharhörner Wattkomplex vorwiegend auf der Wattwasserscheide, wo kaum Energieumwandlung auf der Sohle stattfindet (REINECK, 1975).

In den 60er und 70er Jahren wurden im Rahmen eines Hafenbauvorhabens der Freien und

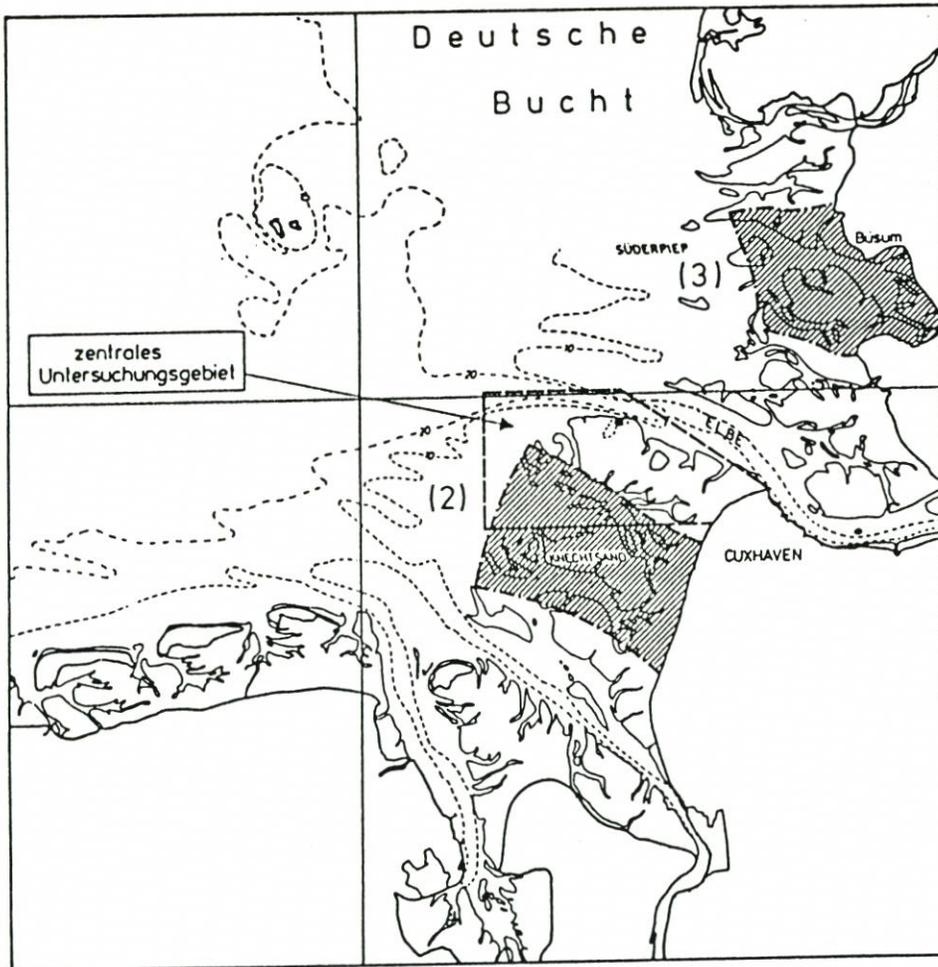


Abb. 1: Innere Deutsche Bucht mit dem untersuchten Gebiet.

Hansestadt Hamburg von Teilbereichen des Neuwerk/Scharhörner Wattkomplexes bis zu 16 topographische Aufnahmen durchgeführt. Über die Genauigkeit dieser Vermessungen berichten GÖHREN (1968) und SIEFERT u. LASSEN (1968). Über jede dieser topographischen Aufnahmen wurde ein Raster von Quadraten – orientiert am Gauss-Krüger-Netz – mit 1 km Seitenlänge gelegt. Jedes dieser Quadrate („Kleine Einheit“) wurde wiederum in 100 Felder von je 1 ha unterteilt (Teilfläche). Für jede dieser Teilflächen wurde schließlich ein mittlerer Tiefenwert eingelesen.

Aus dem Vergleich zweier Aufnahmen einer Kleinen Einheit lassen sich jetzt direkt zwei Kenngrößen für die morphologische Aktivität ermitteln: erstens die mittlere Höhenänderung als Differenzwert von Sedimentation und Erosion der Teilflächen (Bilanzhöhe) und zweitens die mittlere Höhenänderung als Absolutwert von Sedimentation und Erosion der Teilflächen (Umsatzhöhe).

Die Berechnung der Bilanz- und Umsatzhöhen sowie die der Sättigungsfunktionen (s. u.) ist anhand eines von den Herren VU (Strom- und Hafenaufbau, Ref. Hydr. Unterelbe,

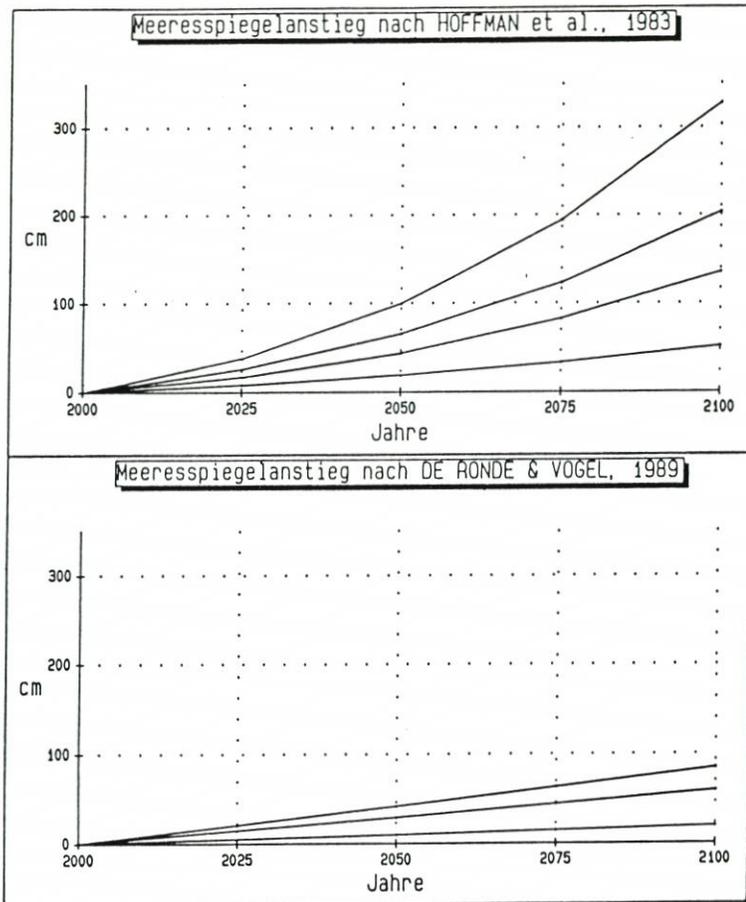


Abb. 2: Vergleich einiger Szenarien zum Meeresspiegelanstieg.

Hamburg) und KÖVES (WSA, Cuxhafen) entwickelten Computerprogrammes „MORAN“ durchgeführt worden, wofür der Autor sich bedanken möchte.

## 2. Die MORAN-Funktion

Die Untersuchungen haben gezeigt (SIEFERT, 1987; HOFSTEDÉ u. SCHÜLLER, 1989), daß die Umsatzhöhe  $h_u$  (cm) über den Vergleichszeitraum  $a$  (Jahr) als Sättigungsfunktion

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

bestimmt werden kann (Abb. 3). Hierbei gibt  $a$  als einzige Veränderliche einen Betrachtungszeitraum (den Zeitraum zwischen zwei topographischen Aufnahmen) an, nicht aber die fortlaufende Zeit. Die asymptotische Umsatzhöhe  $\bar{h}_u$  (cm) ist ein (theoretisch erst für sehr große  $a$  erreichbarer) mittlerer Höchstwert für  $h_u$ ;  $a_0$  (Jahr) steht für den Zeitraum, in dem  $\bar{h}_u$  bei gleichsinniger, linearer Veränderung der Topographie erreicht werden würde. Die Stei-

gung im Ursprung beträgt  $\bar{h}_u/a_0$  (cm/Jahr). Aus dieser Sättigungsfunktion lassen sich drei morphologische Parameter ermitteln:

- die asymptotische Umsatzhöhe  $\bar{h}_u$  erlaubt eine Aussage über die maximalen mittleren Höhenänderungen, die in einem Gebiet auftreten;
- die morphologische Varianz  $\beta$  (SIEFERT, 1983) als reziproker Wert von  $a_0$  erlaubt eine Aussage über die Dauer der gleichbleibenden Tendenzen – Sedimentation oder Erosion – eines Gebietes;
- die Umsatzrate  $\bar{h}_u/a_0$  schließlich erlaubt eine allgemeine Aussage über die Morphodynamik eines Gebietes und läßt sich somit direkt mit der Hydrodynamik dieses Gebietes korrelieren (HOFSTEDE, in Vorb.).

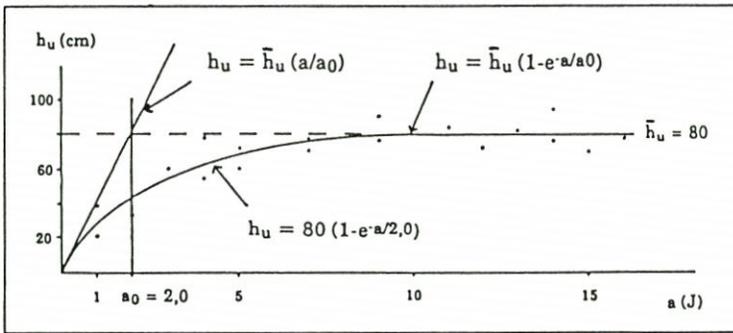


Abb. 3.: Beispielauswertung („Umsatzkurve“) einer Kleinen Einheit.

### 3. Ergebnisse

Anhand der drei morphologischen Parameter „Asymptotische Umsatzhöhe“ (Abb. 4 a), „Morphologische Varianz“ (Abb. 4 b) und „Umsatzrate“ (Abb. 4 c) wurden im Neuwerk/Scharhörner Wattkomplex neun morphodynamische Einheiten charakterisiert (Abb. 5). In Tabelle 1 sind für die Teilbereiche jeweils die Kennwerte der drei Parameter sowie der Bilanz zwischen 1965 und 1979 aufgeführt.

#### 3.1 Hohes Watt (HW)

Das Hohe Watt liegt definitionsgemäß über SKN + 1 m und ist daher nur geringen Energieeinwirkungen aus Seegang und Strömung ausgesetzt (GÖHREN, 1969; SIEFERT, 1974). In diesem Gebiet findet man deshalb die geringsten  $\bar{h}_u$ - und  $\bar{h}_u/a_0$ -Werte.

Die morphologische Varianz  $\beta$  dagegen ist recht unterschiedlich. Es läßt sich erkennen, daß  $\beta$  auf der Nordseite kleiner ist als auf der Wattwasserscheide und der Südseite. Sehr kleine  $\beta$ -Werte werden auf der Scharhörner Plate registriert, was übereinstimmt mit der stetigen ostwärtsgerichteten Verlagerung Scharhörns (GÖHREN, 1975 a).

Nach den Bilanzwerten läßt sich das Hohe Watt in zwei Gebiete unterteilen; im relativ niedrig liegenden Watt zwischen Neuwerk und der Küste überwiegt zwischen 1965 und 1979 deutlich die Erosion (bis 50 % des  $\bar{h}_u$ -Wertes!), wodurch zunehmend mehr Energie auf das Watt gelangen kann (auch im südlich anschließenden, küstennahen Wurster Watt überwiegt zwischen 1974 und 1979 die Erosion [BARTHEL, 1981]); im relativ hoch liegenden Watt

Tabelle 1. Mittlere  $\bar{h}_u$ -,  $\beta$ -,  $\bar{h}_u/a_0$ - und  $h_b$ -Werte für morphodynamische Teilgebiete des Neuwerk/Scharhörner Wattkomplexes

Teilgebiet		$\bar{h}_u$ (cm)	$\beta$ (J <sup>-1</sup> )	$\bar{h}_u/a_0$ (cm/J)	$h_b$ 65/79 (cm)	n*
Hohes Watt	(HW)	27,5	0,19	5,3	-4,8	54
Scharhörn/Neuwerk		25,4	0,19	4,8	5,8	28
Neuwerk/Küste		31,8	0,2	6,5	-14,7**	26
Wattpriele	(WP)	70,7	0,2	16,4	2,8	18
Wattströme	(WS)					
Wskon		231,5	0,18	42,9	-22,0	8
Wsdurch		212,2	0,14	29,1	10,2	13
WSDis (s. u.)		-	-	-	-	-
Platen	(P)					
Pe/WSDis		273,6	0,16	44,1	-26,8	37
Pg		152,5	0,13	20,1	-15,9	13
Tieferes Wasser vor dem Watt	(TW)	90,1	0,23	20,5	-6,4	41
Randwatt	(RW)					
RWa		86,0	0,56	47,8	2,4	5
RWi		117,2	0,16	19,2	4,1	44
Brandungswatt	(BW)	84,3	0,30	25,5	-18,6	12
Ästuar-Rand	(ÄR)	83,5	0,53	43,9	-31,6	30
Anthropogen beeinflusstes Gebiet	(AN)	173,0	0,16	27,5	47,5	27
Neuwerker Fahrw.		356,5	0,09	31,0	225,3	7
Buchtloch + Eitzenbalje		108,8	0,22	24,2	-30,0	20

\*: n = Anzahl der Kleinen Einheiten

\*\* : Bilanzhöhe 1965/86 = -3,4 cm (Aufnahme 1986: DHI, 1:20.000)

Die Standardabweichung (%) für  $\bar{h}_u$  schwankt zwischen 29 (Pg) und 63 (RWi), für  $\beta$  zwischen 17 (Pg) und 70 (BW, Wsdurch) und für  $\bar{h}_u/a_0$  zwischen 21 (Wsdurch) und 47 (HW).

zwischen Scharhörn und Neuwerk dagegen herrscht geringe Sedimentation vor, die in etwa den Anstieg des MThw zwischen 1965 und 1979 ausgleicht. Diese Entwicklungen sind wahrscheinlich teils zurückzuführen auf die unterschiedliche Höhenlage der beiden Wattgebiete, teils auf den Bau des Leitdammes.

Es fällt auf, daß die Umsatzraten im küstennahen Watt höher sind als im mehr exponiert liegenden Scharhörner Watt (Tab.1), was wahrscheinlich ebenfalls auf die unterschiedliche Höhenlage und den Bau des Leitdammes zurückzuführen ist.

### 3.2 Wattpriele (WP)

Die Wattpriele sind die in das Hohe Watt eingeschnittenen Rinnen mit Wassertiefen bis SKN - 5 m. Sie funktionieren als Be- und Entwässerungsrinnen des Hohen Wattes. Sowohl  $\bar{h}_u$  als auch  $\bar{h}_u/a_0$  sind hier deutlich höher als auf dem Hohen Watt. Erstens konzentriert sich in den Wattpriele das Tidewasser, wodurch höhere Strömungsgeschwindigkeiten auftreten und damit die Strömungsenergieeinwirkung auf die Sohle stärker ist. Zweitens können durch

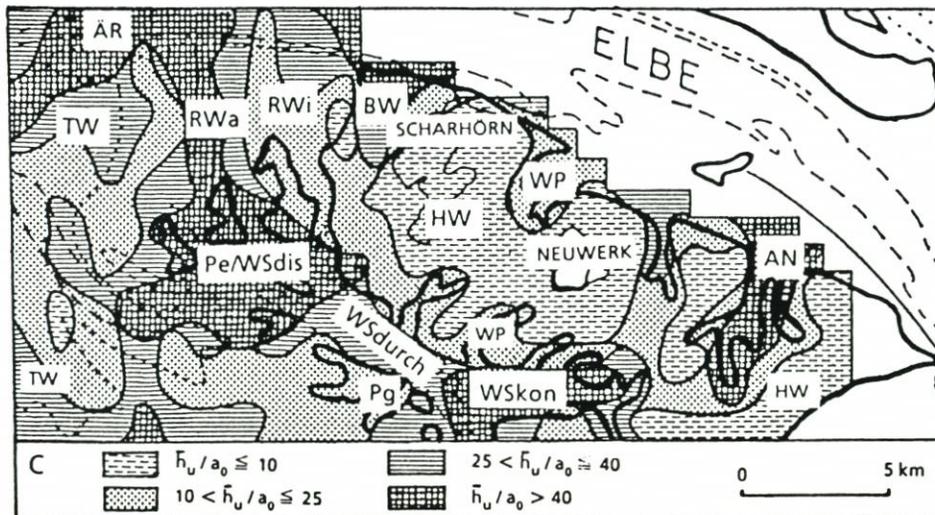
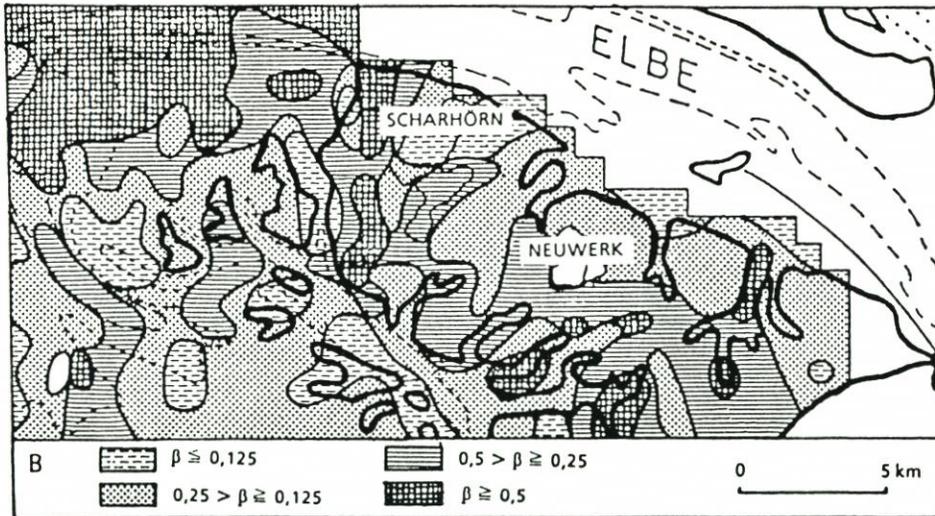
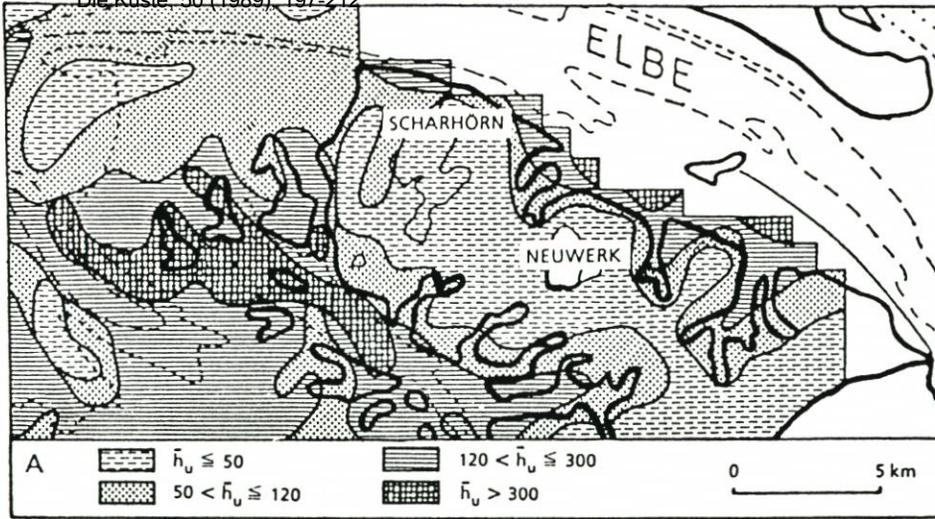


Abb. 4: Morphologische Parameter flächenmäßig für den Neuwerk/Scharhörner Wattkomplex dargestellt. 4a: Asymptotische Umsatzhöhe  $\bar{h}_u$ ; 4b: Morphologische Varianz  $\beta$ ; 4c: Umsatzrate  $\bar{h}_u/a_0$ .

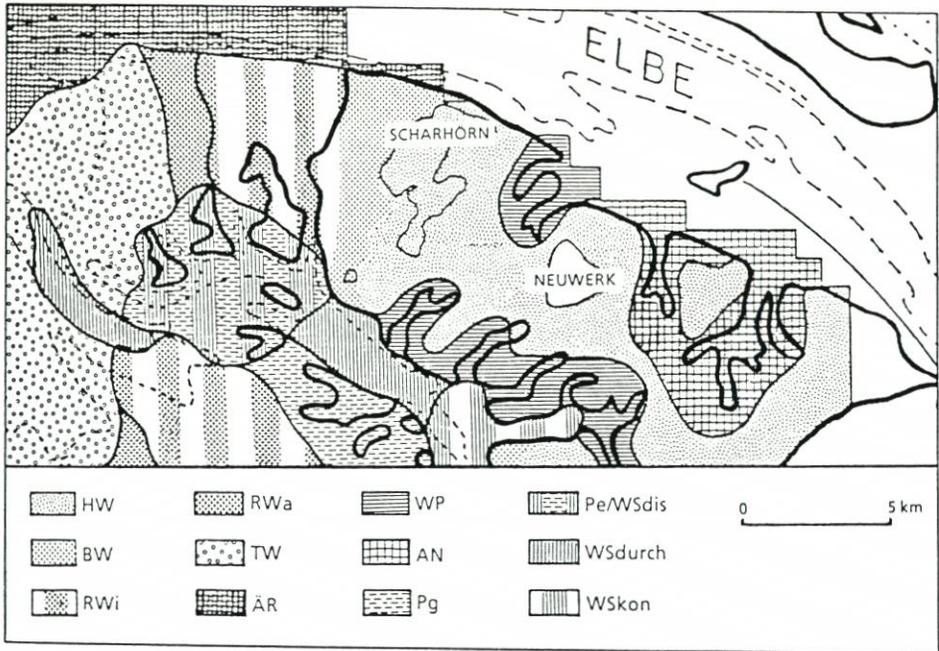


Abb.5: Untergliederung des Neuwerk/Scharhörner Wattkomplexes in Teilgebiete unterschiedlicher Morphodynamik.

Wellenbeugung primäre, relativ hohe Wellen in die Wattpriele gelangen, wobei eine starke Seegangenergieabgabe an den Prielrändern stattfindet (SIEFERT, 1974). Die morphologische Varianz ist etwas größer als auf dem Hohen Watt, was sich durch die ständigen, kurzfristigen Verlagerungen der Wattpriele erklärt. Die Bilanzwerte zwischen 1965 und 1979 streuen aber um Null.

### 3.3 Wattströme (WS)

Ein Wattstrom als Hauptbe- und -entwässerungsrinne eines Wateinzugsgebietes läßt sich morphometrisch, wie ein Fluß, in eine Kontributions- (WSkon), eine Durchfluß- (WSDurch) und eine Distributionszone (WSdis) einteilen.

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

Die Umsatzrate ist in den drei Teilgebieten des Wattstromes unterschiedlich:

- Die Kontributionszone (WSkon) wird gekennzeichnet durch sehr hohe  $\bar{h}_u/a_0$ -Werte. In dieser Zone münden die meisten Wattpriele, was dazu führt, daß der Stromstrich des Wattstromes sehr unregelmäßig verläuft. Es können sich also an vielen Stellen Prall- und Gleithänge bilden, die die sehr hohen  $\bar{h}_u/a_0$ -Werte erklären.

So wurde zum Beispiel im Bakenloch zwischen 1976 und 1979 an einem Prallhang (1000 · 200 m) etwa 1 200 000 m<sup>3</sup> Sand erodiert, d. h. eine flächenhafte Vertiefung von 6 m,

während an dem gegenüberliegenden Gleithang (1000 · 200 m) etwa 800 000 m<sup>3</sup> Sand sedimentiert wurde.

Zwischen 1965 und 1979 ist die Bilanz deutlich negativ, was wahrscheinlich durch die starke Zunahme des Tidevolumens im Neuwerk/Scharhörner Wattkomplex seit 1972 zu erklären ist.

- Die **Durchflußzone** (WSdurch) wird zwar durch hohe  $\bar{h}_u/a_0$ -Werte gekennzeichnet. Sie sind aber im Vergleich zu WSkon und WSdis niedriger, da in dieser Zone zwar hohe Strömungsgeschwindigkeiten auftreten, die Energieeinwirkung auf die Sohle jedoch gering ist (wenig Prall- und Gleithangbildung). Dazu kommt, daß in dieser Zone relativ grobe Sedimente angetroffen werden, was sich hemmend auf die Umsatzraten auswirkt. Die Bilanzwerte streuen zwischen 1965 und 1979 im Gegensatz zu WSkon und WSdis um Null. Wahrscheinlich ist die Zunahme des Tidevolumens seit 1972 unsignifikant im Vergleich zum hydraulischen Umfang des Wattstromes in diesem Bereich.
- Die **Distributionszone** (WSdis) formt zusammen mit den exponiert liegenden Platen (Pe, s. u.) eine morphodynamische Einheit und wird unter Pe behandelt.

### 3.4 Platen (P)

Die Platen sind die hufeisenförmigen Sandbänke, die die von der Ebbe- und Flutströmung geprägten Ebbe- und Flutrinnen voneinander trennen (VAN VEEN, 1950). Obwohl morphometrisch gleich, gibt es exponiert liegende Platen (Pe) und geschützt liegende Platen (Pg), die eine recht unterschiedliche Morphodynamik aufweisen.

- Die exponiert liegenden Platen (Pe) formen mit WSdis eine morphodynamische Einheit. Das Gebiet wird gekennzeichnet durch sehr hohe  $\bar{h}_u$ -, kleine  $\beta$ - und sehr hohe  $\bar{h}_u/a_0$ -Werte. In diesem Bereich geben die von Süd- bis Nordwesten kommenden primären Wellen einen Großteil ihrer Energie ab (HOFSTEDÉ, in Vorb.). Diese Energieabgabe, kombiniert mit den stark ausgeprägten Ebbe- und Flutströmungen, ist der Grund für die sehr hohen  $\bar{h}_u/a_0$ -Werte.

Die Bilanzwerte zwischen 1965 und 1979 sind ausgeprägt negativ.

- Die geschützt liegenden Platen (Pg) werden durch hohe  $\bar{h}_u$ -, sehr kleine  $\beta$ - und mittlere  $\bar{h}_u/a_0$ -Werte gekennzeichnet. Im Vergleich zu Pe/WSdis ist die Seegangenergieabgabe gering und sind die Ebbe- und Flutströmungen schwach. Zusammen führt dies dazu, daß die  $\bar{h}_u/a_0$ -Werte in diesem Bereich nur etwa 40 % der Werte im Pe/WSdis erreichen.

Auch die geschützt liegenden Platen unterliegen zwischen 1965 und 1979 der Erosion. Kombiniert mit den kleinen  $\beta$ -Werten deutet dies auf eine negative Tendenz hin, die für den gesamten Wattstrom-/Platenbereich zutrifft. Ob dies kausal mit dem Meeresspiegel- bzw. Tidehubanstieg zusammenhängt, muß in weiteren Untersuchungen geklärt werden.

### 3.5 Tieferes Wasser vor dem Watt (TW)

Dieser Bereich umfaßt das Gebiet vor dem Watt außerhalb der Wattströme und kann mit der „Transition Zone“ zwischen „Offshore“ und „Shore Face“ eines Strandprofils verglichen werden (Abb. 6). Die obere Grenze wird durch die mittlere Wellenbasis bei ruhiger Wetterlage festgelegt und liegt im untersuchten Gebiet etwa bei SKN - 4,5 m; die untere Grenze wird durch die mittlere Wellenbasis bei stürmischer Wetterlage bestimmt und liegt außerhalb

des untersuchten Gebietes. Das TW wird durch mittlere  $\bar{h}_u$ -, mittlere  $\beta$ - und mittlere  $\bar{h}_u/a_0$ -Werte gekennzeichnet.

In diesem Gebiet werden nur geringe Strömungsgeschwindigkeiten gemessen. Kombiniert mit der noch schwachen Seegangsenergie-Einwirkung auf die Sohle führt dies zu einer in jeder Hinsicht nur mittleren Morphodynamik.

Die Bilanzwerte zwischen 1965 und 1979 streuen um Null.

### 3.6 Randwatt (RW)

Das Randwatt als äußere Zone des Wattsockels kann mit dem „Shoreface“ eines Strandprofils verglichen werden (Abb. 6). Zwischen TW und RW befindet sich, wie normalerweise auch beim Übergang von der „Transition Zone“ zum „Shoreface“ (REINECK u. SINGH, 1980) ein Knick in der Böschungsneigung. Die Wassertiefen liegen etwa zwischen SKN - 4,5 m und SKN. In diesem etwa 5 km breiten Bereich verliert der primäre Seegang einen Großteil seiner Energie durch (Linien- und) Flächenbrandung, Wellenzerfall, Bodenreibung, Perkolatation und Materialumlagerung (HOFSTEDE, in Vorb.).

Das Randwatt kann morphodynamisch in eine äußere Zone (RWa) und eine innere Zone (RWi) unterteilt werden. Wenn man den Vergleich mit einem „Shoreface“ weiterführen würde, könnte man die RWa-Zone als „Breaker Zone“ und die RWi-Zone als „Surf Zone“ betrachten.

– Die äußere Zone (RWa) liegt auf dem Scharhörnriff direkt östlich des TW und umfaßt den Bereich, in dem die Wellen „Kontakt“ mit der Sohle bekommen. Das RWa ist ungefähr 1,5 km breit und weist Wassertiefen etwa zwischen SKN - 4,5 m und SKN - 0,5 m auf. Sie wird durch mittlere  $\bar{h}_u$ -, sehr große  $\beta$ - und sehr hohe  $\bar{h}_u/a_0$ -Werte gekennzeichnet.

Diese Morphodynamik kann möglicherweise wie folgt erklärt werden: An der Wellenbasis werden Sandbänke („Longshore Bars“; REINECK u. SINGH, 1980; VAN ALPHEN u. DAMOISE-AUX, 1987) geformt. Diese Sandbänke verlagern sich ostwärts, wodurch an der Wellenbasis neue Bänke entstehen können. Nach etwa 1,5 km erreichen die Sandbänke die Ausläufer der Ebberinne Robbenloch, und das Material, das an dem Leehang herunterwirbelt, wird durch die Ebbeströmung nordwärts transportiert.

Nach HOFSTEDE (in Vorb.) wird in dieser schmalen Zone ein Großteil der Seegangsenergie umgewandelt. Nach CARTER (1988) kann in der äußeren „Breaker Zone“ bis zu 99 % der Seegangsenergie umgewandelt werden. Es ist im Hinblick auf den Küstenschutz von großem Interesse, diese Hypothese durch vertiefte Untersuchungen (Sedimentologie, Strömungs- und Seegangsmessungen) zu verifizieren. In diesem Zusammenhang soll auch auf das von der Forschungsstelle Küste (Norderney) betriebene „Seegangmeßprogramm Ostfriesische Inseln und Küste“ (NIEMEYER, 1979, 1986) hingewiesen werden. Hier zeigte sich eindeutig, daß vor den Seegats die Luvseiten der Riffbögen als äußere „Breaker Zone“ funktionieren, wobei quantitative Zusammenhänge zwischen den Wellenhöhen in Luv und Lee des Riffbogens in Abhängigkeit von der Wellenhöhe seawärts des Riffbogens festgestellt werden konnten.

– Die innere Zone (RWi) des Randwattes schließt landseitig an das RWa an. Es ist eine etwa 3,5 km breite Zone, gekennzeichnet durch eine extrem geringe Böschungsneigung, mittlere bis hohe  $\bar{h}_u$ -, kleine  $\beta$ - und mittlere  $\bar{h}_u/a_0$ -Werte. Die kleinen  $\beta$ - und mittleren  $\bar{h}_u/a_0$ -Werte deuten daraufhin, daß sich in dieser Zone keine oder kaum Sandbänke bilden und verlagern wie im RWa oder im BW (s. u.).

Die Bilanzwerte im RW streuen zwischen 1965 und 1979 um Null, was bedeutet, daß das

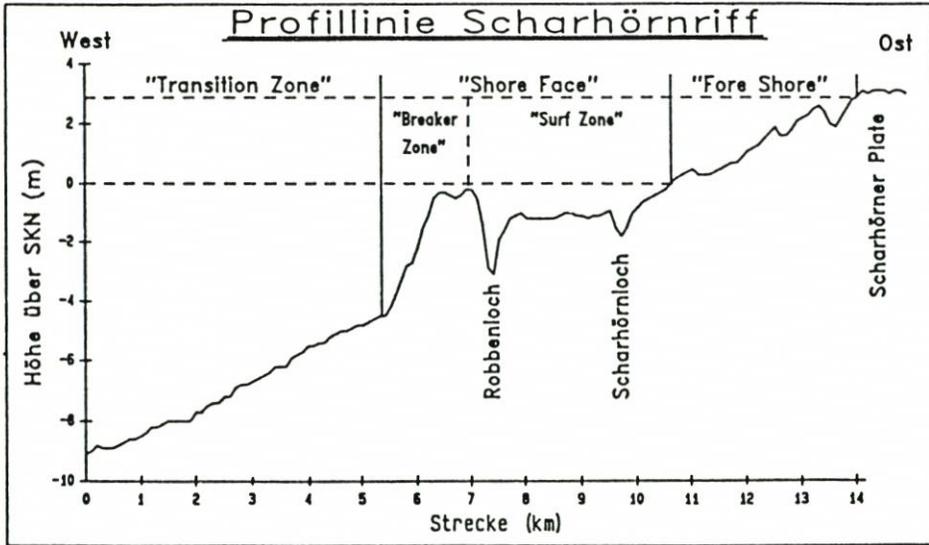


Abb. 6: Profillinie Scharhörnriff mit „Strandprofilterminologie“.

Material aus dem Wattstrom/Platenbereich nicht auf dem Scharhörnriff abgelagert, sondern weitertransportiert worden ist.

### 3.7 Brandungswatt (BW)

Das Brandungswatt liegt direkt westlich der Scharhörner Plate zwischen SKN und SKN + 3 m (intertidaler Bereich) und kann somit mit der „Fore Shore“ eines Strandprofils verglichen werden (Abb. 6). In dieser etwa 3 km breiten Zone werden gleichzeitig bis zu fünf Brandungsbänke unterschieden. Nach GÖHREN (1975 a) verlagern sich diese Sandbänke als Gesamtform durch Erosion am Luvhang und Sedimentation am Leehang ostwärts. Damit existiert hier eine Form der Bänkemigration, die nach CARTER (1988) nur an sog. „low-wave energy, meso-tidal“ Küsten stattfindet. Während des „Auftauchprozesses“ verlangsamt sich die Verlagerung der Sandbänke, wodurch nachfolgende Bänke die älteren einholen und sich mit ihnen vereinigen können. Letztendlich schließen die Bänke sich an die Scharhörner Plate an (GÖHREN, 1975 a).

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

Die  $\beta$ -Werte sind fast zweimal so groß wie im RWI, was durch die große Verlagerungsgeschwindigkeit der Brandungsbänke, 1300 m in 10 Jahren (GÖHREN, 1971), verursacht wird.

Im Gegensatz zum Randwatt unterliegt das Brandungswatt zwischen 1965 und 1979 der Erosion. Dies braucht aber nicht auf eine langfristige tendenzielle Entwicklung hinzudeuten, sondern kann auch mit dem Durchzug der Brandungsbänke zusammenhängen.

### 3.8 Ästuar-Rand (ÄR)

Der Ästuar-Rand im Untersuchungsgebiet wird geformt durch die sehr steile Kante zwischen dem Scharhörnriff und der Elbe. Der Höhenunterschied kann auf einer Strecke von 200 m bis zu 20 m betragen. Die Elbkante wird gekennzeichnet durch mittlere  $\bar{h}_u$ -, sehr große  $\beta$ - und hohe bis sehr hohe  $\bar{h}_u/a_0$ -Werte.

Die hohen bis sehr hohen  $\bar{h}_u/a_0$ -Werte deuten zwar darauf hin, daß in dieser Zone sehr viel Material umgelagert wird, die sehr großen  $\beta$ -Werte, kombiniert mit den nur mittleren  $\bar{h}_u$ -Werten zeigen aber, daß Erosion und Sedimentation einander schnell abwechseln, wodurch die allgemeine Topographie gleich bleibt.

Die Bilanz zwischen 1965 und 1979 ist negativ. Das Material aus dem Wattstrom-/Platenbereich, das nach GÖHREN (1971) nordwärts über das Scharhörnriff verlagert wird, wird also auch hier weitertransportiert. Da an der Elbkante die Flutströmung deutlich dominiert, kann man davon ausgehen, daß das Material sich stromaufwärts, in Richtung des Neuwerker Fahrwassers und der Mittelgründe, bewegt. Ob es im Neuwerker Fahrwasser sedimentiert oder im Bereich der Mittelgründe und des Lüchtergrunds quer durch die Elbe in Richtung Vogelsand wandert, ist (noch) nicht geklärt.

### 3.9 Anthropogen beeinflusste Gebiete (AN)

Die anthropogen beeinflussten Gebiete sind immer nur als lokale Ereignisse zu bewerten, weil das menschliche Eingreifen in jedem Gebiet qualitativ und quantitativ unterschiedlich sein kann. Im Neuwerk/Scharhörner Wattkomplex wurden die künstlichen Störungen durch die Verklappung großer Baggermengen aus der Elbe im Neuwerker Fahrwasser und durch den Bau des Leitdammes verursacht.

Die Verklappungen führten im Neuwerker Fahrwasser zu sehr hohen  $\bar{h}_u$ -, sehr kleinen  $\beta$ -Werten und zwischen 1965 und 1979 zu stark positiven Bilanzwerten. Das Baggermaterial blieb also erwartungsgemäß im Neuwerker Fahrwasser, das seit dem Bau des Leitdammes zur Sedimentfalle geworden ist.

Der Bau des Leitdammes hat nach GÖHREN (1970) dazu geführt, daß die morphologische Aktivität des Buchtloches stark zunahm. Dies wird auch deutlich, wenn man die hohen  $\bar{h}_u$ - und mittleren bis hohen  $\bar{h}_u/a_0$ -Werte des Buchtloches (und auch der Eitzenbalje) betrachtet. Die beiden Prielsysteme unterliegen zwischen 1965 und '79 der Erosion, was darauf hindeutet, daß die im Neuwerker Fahrwasser verklappten Baggermengen nicht prielaufwärts transportiert werden. Die Erosionen hängen wahrscheinlich mit der zugenommenen morphologischen Aktivität, bzw. dem Bau des Leitdammes zusammen.

Als drittes Beispiel menschlichen Eingreifens kann das momentan stattfindende Aufspülen einer zweiten Vogelinsel direkt südlich von Scharhörn genannt werden. Es wird interessant sein, die Folgen dieser Aufspülung anhand des MORAN-Auswerteverfahrens zu analysieren.

## 4. Diskussion

Wie bereits in der Einleitung erwähnt wurde, ist eines der Ziele des KFKI-Projektes MORAN II die Verifizierung der in MORAN I entwickelten Ansätze. Dazu wurde ein Vergleich mit den von SIEFERT (1987) erzielten Kennwerten durchgeführt (Tab.2). Es zeigt

Tabelle 2. Vergleich der morphodynamischen Kennwerte von Teilgebieten nach SIEFERT (1987) und HOFSTEDE (1989)

Parameter	SIEFERT (1987)	HOFSTEDE (1989)
	Brandungsfreie Watt (FW)	Hohes Watt (HW)
d (MThw)	$d < 2$ (m)	$d < 2$
$n^*$	19 (km <sup>2</sup> )	54
$\bar{h}_u$ ( $\pm \sigma^{**}$ )	$19,5 \pm 7,7$ (cm)	$27,5 \pm 15,3$
$a_o$	$4,0 \pm 0,9$ (J)	$5,2 \pm 2,8$
$\bar{h}_u/a_o$	$4,6 \pm 1,6$ (cm/J)	$5,3 \pm 2,7$
	Kleine Einheiten mit Prielen (WP)	Wattpriele (WP)
d (MThw)	$2 < d < 5$	$2 < d < 8$
$n^*$	16	18
$\bar{h}_u$	$44,5 \pm 23,1$	$70,7 \pm 34,6$
$a_o$	$4,1 \pm 1,4$	$4,3 \pm 2,3$
$\bar{h}_u/a_o$	$11,3 \pm 6,6$	$16,4 \pm 8,7$
	Brandungswatt (BW)	Brandungswatt (BW)
d (MThw)	$1 < d < 4$	$0 < d < 3$
$n^*$	12	12
$\bar{h}_u$	$41,3 \pm 17,3$	$84,3 \pm 40,5$
$a_o$	$3,9 \pm 1,2$	$3,3 \pm 2,3$
$\bar{h}_u/a_o$	$10,8 \pm 4,0$	$25,5 \pm 14,1$
	Randwatt (RW)	Randwatt (RWi + RWa)
d (MThw)	$4 < d < 10$	$3 < d < 7,5$
$n^*$	20	49
$\bar{h}_u$	$65,6 \pm 21,8$	$114 \pm 48,4$
$a_o$	$3,2 \pm 1,2$	$5,7 \pm 2,6$
$\bar{h}_u/a_o$	$21,3 \pm 6,7$	$22,1 \pm 7,8$
	Tieferes Wasser vor dem Watt (TW)	Ästuar Rand (ÄR)
d (MThw)	$d > 8$	$d > 8$
$n^*$	9	30
$\bar{h}_u$	$63,7 \pm 15,7$	$83,5 \pm 33,0$
$a_o$	$2,0 \pm 0,7$	$1,9 \pm 1,0$
$\bar{h}_u/a_o$	$34,6 \pm 9,7$	$43,9 \pm 12,4$
	Wattströme (WS)	Wattströme (WSdurch)
d (MThw)	$d > 8$	$d > 8$
$n^*$	6	13
$\bar{h}_u$	140	$212,2 \pm 126,2$
$a_o$	5,0	$7,3 \pm 3,1$
$\bar{h}_u/a_o$	30,0	$31,1 \pm 6,5$
	Platenbereich (PR)	Platen und Wattströme (Pe/WSdis)
d (MThw)	$2 < d < 13$	$1 < d < 16$
$n^*$	22	37
$\bar{h}_u$	$245,1 \pm 90,2$	$273,6 \pm 129,4$
$a_o$	$6,6 \pm 3,1$	$6,2 \pm 3,4$
$\bar{h}_u/a_o$	$39,1 \pm 12,0$	$44,1 \pm 13,2$

\*: n = Anzahl der Kleine Einheiten

\*\*:  $\sigma$  = Standardabweichung

sich, daß die Parameter für vergleichbare Teilgebiete zum Teil erheblich abweichen. Dies hat folgende Gründe:

- Die Teilgebiete sind teilweise unterschiedlich definiert.
- Die Anzahl der für die Berechnung der Parameter miteinbezogenen Kleinen Einheiten liegt bei SIEFERT (1987) meist erheblich niedriger.
- Die von SIEFERT zur Berechnung der Parameter benutzten Kleinen Einheiten sind wegen ihrer charakteristischen Lage ausgewählt worden. Dies bedeutet, daß die Kleinen Einheiten, die an den zeitlich und räumlich fließenden Grenzen zwischen unterschiedlichen Teilgebieten liegen, nicht in die Berechnung miteinbezogen wurden. In der vorliegenden Arbeit ist dagegen der gesamte Wattkomplex zur Berechnung der Parameter miteinbezogen worden. Hierdurch nehmen die Standardabweichungen zwar zu, es entsteht aber ein mehr vollständiges Bild.

In der vorliegenden Arbeit ist der Wattkomplex in mehrere Teilgebiete aufgegliedert worden. Dies war erforderlich aufgrund der großen Streuung der Kennwerte innerhalb mancher der von SIEFERT definierten Teilgebiete. Das Randwatt (RW) wurde in Anlehnung an die internationale Strandprofilterminologie in eine äußere (breaker) und eine innere (surf) Zone (RWa, RWi) untergliedert. Der Wattstrombereich (WS) wurde wegen der stark unterschiedlichen Morphodynamik und Morphometrie in eine Kontributions-, eine Durchfluß- und eine Distributionszone (WSkon, WSDurch und WSDis) untergliedert. Der Wattstrombereich laut SIEFERT liegt dabei innerhalb WSDurch. Der Platenbereich (PR) schließlich ist aufgrund der unterschiedlichen Morphodynamik in einen exponiert zur Brandung und Strömung liegenden Bereich und einen geschützt liegenden Bereich (Pe und Pg) unterteilt worden. Wegen der starken hydro- und morphodynamischen Verknüpfung des Pe und WSDis sind beide in einem Teilgebiet (Pe/WSDis) zusammengefaßt worden, das mit dem Platenbereich (PR) laut SIEFERT zu vergleichen ist.

Das „Tiefere Wasser vor dem Watt“ (TW) laut SIEFERT liegt weitgehend im Bereich der Elbmündung und stimmt gut überein mit dem Ästuarrandbereich (ÄR), wie er in der vorliegenden Arbeit verwendet wird. Mit „Tieferes Wasser vor dem Watt“ (TW) laut HOFSTEDE (die sogenannte „Transition Zone“) wird ausschließlich das Gebiet direkt westlich vom RWa verstanden.

Schließlich ist noch ein „Antropogener Bereich“ (AN) hinzugefügt worden, womit die Teilgebiete gemeint sind, wo die natürliche Dynamik durch menschliches Eingreifen stark gestört wurde.

Die vorliegende Arbeit stellt somit eine Erweiterung der von SIEFERT (1987) durchgeführten Untersuchungen dar. Dabei stellte sich heraus, daß eine genauere morphodynamische Charakterisierung eines Wattgebietes anhand der entwickelten Ansätze möglich ist, wenn man das Gesamtgebiet betrachtet.

## 5. Schlußfolgerungen

Anhand der Umsatzrate  $\bar{h}_u/a_0$  kann die allgemeine Morphodynamik eines Gebietes charakterisiert werden.

Erwartungsgemäß werden die höchsten Umsatzraten dort gefunden, wo starke Seegangsenegie-Einwirkung kombiniert mit hohen Tideströmungsgeschwindigkeiten auftritt (Pe/WSDis). Auch relativ nah an der Küste, im WSkon, werden sehr hohe Umsatzraten, verursacht durch die starke Mäanderbildung der Priele in diesem Bereich, gefunden. Ein dritter Bereich mit sehr hohen Umsatzraten ist der RWa, wo ein Großteil der primären

Seegangsenergie umgewandelt wird. Der vierte und letzte Bereich, wo sehr hohe Umsatzraten angetroffen werden, stellt die Elbkante (ÄR) dar, wo eine stark ausgeprägte Flutströmung vorherrscht.

Die morphologische Varianz  $\beta$  läßt sich gut als Parameter zur Erkennung von tendenziellen Entwicklungen verwenden.

Die sehr geringen  $\beta$ -Werte im Wattstrombereich, südöstlich von Scharhörn, im Scharhörnloch und im Neuwerker Fahrwasser sind alle auf langfristig gleichbleibende Tendenzen zurückzuführen: die säkulare nordostwärts gerichtete Verlagerung der Wattströme, die säkulare ostwärts gerichtete Verlagerung Scharhörns, die Zuschüttung des Scharhörner Loches und die Verklappungen im Neuwerker Fahrwasser.

Sehr große  $\beta$ -Werte dagegen werden dort angetroffen, wo zwar viel Material transportiert wird, die Topographie aber relativ stabil (ohne zu- oder abnehmende Tendenz) ist, wie im RWa, BW und ÄR.

Anhand der asymptotischen Umsatzhöhe  $\bar{h}_u$  schließlich lassen sich die maximalen mittleren Höhenänderungen, die in einem Gebiet auftreten können, abschätzen.

Die höchsten Werte trifft man erwartungsgemäß in den reliefreichsten Gebieten, den Wattströmen, an. Eine Ausnahme dieser Regel stellt die Elbkante dar, wo zwar die größten Höhenunterschiede des Wattkomplexes existieren, aber nur geringe  $\bar{h}_u$ -Werte vorherrschen. Dies ist ein zweites Indiz für die große Stabilität der Elbkante.

Die Ergebnisse zeigen, daß sich der Neuwerk/Scharhörner Wattkomplex anhand der entwickelten Parameter in Teilgebiete unterschiedlicher Morphodynamik untergliedern läßt (Abb. 4 u. 5). Die große Streubreite der Kennwerte deutet allerdings darauf hin, daß die morphodynamische Untergliederung des Wattkomplexes durch weitere Analysen noch verbessert werden kann. Momentan wird untersucht, ob die Kennwerte der Teilgebiete auf ähnliche Wattkomplexe übertragbar sind.

## 6. Schriftenverzeichnis

- BARTHEL, V.: Vergleich der Topographie 1974-79 des Testfeldes „Knechtsand“ im Rahmen des MORAN-Projektes. Strom- und Hafenanbau, Ref. Hydr. Unterelbe, Studie 51 (unveröff.), 1981.
- CARTER, R. W. G.: Coastal environments. An introduction to the physical, ecological and cultural systems of coastlines. Academic press, Harcourt Brace Jovanovich, Publ., London, 1988.
- DE RONDE, J. G. u. VOGEL, J. A.: Zeespiegelrijzing, hydro meteo scenario's. Rijkswaterstaat, dienst getijdewateren, nota: GWA0-88.015, 1989.
- GÖHREN, H.: Beitrag zur Morphologie der Jade- und Wesermündung. Die Küste, H. 13, 1965.
- GÖHREN, H.: Die Strömungsverhältnisse im Elbmündungsgebiet. Hamb. Küstenf., H. 6, 1969.
- GÖHREN, H.: Studien zur morphologischen Entwicklung des Elbmündungsgebietes. Hamb. Küstenf., H. 14, 1970.
- GÖHREN, H.: Untersuchungen über die Sandbewegung im Elbmündungsgebiet. Hamb. Küstenf., H. 19, 1971.
- GÖHREN, H.: Zur Dynamik und Morphologie der hohen Sandbänke im Wattenmeer zwischen Jade und Eider. Die Küste, H. 27, 1975 a.
- GÖHREN, H.: Die Sedimente im küstennahen Watt zwischen Elbe und Weser. Hamb. Küstenf., H. 33, 1975 b.
- HOFFMANN, J., KAYES, D. u. TITUS, J.: Projecting future sea level rise. Gov. Printing Office, Washington D.C., 1983.
- HOFFSTEDTE, J. L. A.: Seegangsenergieumwandlung im Außenwatt des Neuwerk/Scharhörner Wattkomplexes (Innere Deutsche Bucht) in Vorb.
- HOFFSTEDTE, J. L. A. u. SCHÜLLER, A.: Dynamisch-morphologische Analysen im Wattengebiet der

- Deutschen Bucht. Ergebnisse des KFKI-Projektes MORAN I und Ausblicke für MORAN II. Hamb. Geogr. Studien, H. 44, 1989.
- NIEMEYER, H. D.: Untersuchungen zum Seegangsklima im Bereich der Ostfriesischen Inseln und Küste. In: Die Küste, H. 34, 1979.
- NIEMEYER, H. D.: Ausbreitung und Dämpfung des Seegangs im See- und Wattengebiet von Norderney. Jber. 1985, Forsch.-Stelle Küste, Bd. 37, Norderney, 1986.
- RAGUTZKI, G.: Vergleichende bodenphysikalische Untersuchungen über die Eigenschaften von Schlick in Verlandungsgebieten. Jber. 1972, Forsch.-Stelle f. Insel- und Küstenschutz, Bd. 24, Norderney, 1973.
- REINECK, H.-E.: Die Größe der Umlagerungen im Neuwerk/Scharhörner Watt. Hamb. Küstenf., H. 33, 1975.
- REINECK, H.-E. u. SINGH, I. B.: Depositional Sedimentary Environments; with Reference to Terrigenous Clastics. Second, revised and updated Edition. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1980.
- RENGER, E.: Quantitative Analyse der Morphologie von Wateinzugsgebieten und Tidebecken. Mitt. des Franzius-Inst. der Univ. Hannover, H. 43, 1976.
- SIEFERT, W.: Über den Seegang in Flachwassergebieten. Mitt. des Leichtweiß-Inst. der TU Braunschweig, H. 40, 1974.
- SIEFERT, W.: Morphologische Analysen für das Knechtsand-Gebiet (Pilotstudie des KFKI-Projektes MORAN). Die Küste, H. 38, 1983.
- SIEFERT, W.: Hydrologische und morphologische Untersuchungen für das Mühlenberger Loch, die Außeneste und den Neßsand. Hamb. Küstenf., H. 43, 1984.
- SIEFERT, W.: Umsatz- und Bilanzanalysen für das Küstenvorfeld der Deutschen Bucht; Grundlagen und erste Auswertungen (Teil 1 der Ergebnisse eines KFKI-Projektes). Die Küste, H. 45, 1987.
- SIEFERT, W. u. BARTHEL, V.: The German „MORAN“ Project. Proc. 17th Intern. Conf. on Coastal Eng., Sydney 1980, ASCE, New York, 1981.
- SIEFERT, W. u. LASSEN, H.: Gesamtdarstellung der Wasserstandsverhältnisse im Küstenvorfeld der Deutschen Bucht nach neuen Pegelauswertungen. Die Küste, H. 42, 1985.
- VAN ALPHEN, J. S. L. J., u. DAMOISEAUX, M. A.: A morphological map of the Dutch shoreface and adjacent part of the continental shelf (1 : 250 000). Rijkswaterstaat, directie Noordzee, Nota: NZ-N-87.21/MDLK-R-87.18, 1987.