

Auswirkungen des Eidersperrwerkes auf die Morphodynamik des Eiderästuars

Von GABRIELE GÖNNERT

Zusammenfassung

Über das MORAN-Verfahren wird nachgewiesen, daß die Inbetriebnahme des Eidersperrwerkes (1972) – mit Ausnahme des nach der Durchdämmung verbliebenen Nordrinnenbogens – keine Störung des dynamischen Gleichgewichtes mit sich brachte, wohl aber erhebliche topographische Veränderungen. Die Aufschüttung des Sanddammes (1979) hingegen führte zu einer Störung der Morphodynamik, da aufgrund der erheblichen Nordverlagerung der Nordrinne zum Schutz des Deiches zu einem Zeitpunkt eingegriffen werden mußte, als sich das Gebiet in einer „sensiblen“ Phase befand. Es wird nachgewiesen, daß es möglich ist, „sensible“ Phasen zu definieren. In diesen Zeiträumen reagiert ein Gebiet „sensibler“ auf künstliche Störungen, d.h. mit deutlicher und sofortiger Beeinträchtigung der natürlichen Morphodynamik des Raumes.

Summary

*The area of research is influenced by human interventions, which are the building of the Sperrwerk (1972) and the construction of the sand dam (1979). In this research an analysis of the consequences of the human activities was undertaken. It was carried out with the MORAN-method (Morphological Analysis of the Northsea). It could be shown that the opening of the Sperrwerk (1972) has not influenced the dynamic balance but that the sand dam (1979) has. The reason is that the last intervention had been necessary at a moment when the area of research was in a sensitive phase. In this research it has been proved that sensitive phases have to be defined with $m * a_0$ and $(m/2) * a_0$. In this period of time an area reacts sensitively to an artificial disturbance, that means with an immediate disturbance of the morphodynamic.*

Inhalt

1. Einleitung	76
2. Die Außeneider	76
3. Arbeitsmethode – MORAN	79
3.1 Parameter zur Beschreibung der Morphodynamik von Wattengebieten	81
3.2 Die Berechnung von morphologischen Parametern in dynamischen Gebieten und bei künstlichen Eingriffen	82
3.3 Die Einheiten im Untersuchungsgebiet	83
4. Das Kartenmaterial	85
5. Entwicklung von Topographie und Wasserraum (1904–1990)	88
6. Die Morphodynamik der Außeneider	91
6.1 Differenzierung der Außeneider in Gebiete ähnlicher morphologischer Aktivität ..	93
6.2 Die Parameter der Wattströme der Außeneider im Vergleich mit Ergebnissen aus anderen Gebieten	95
6.3 Die Höhenstabilität des Raumes und die Berechnung von Sensibilitätsphasen	96
6.3.1 Diskussion: Beeinflussung der Morphodynamik aufgrund der künstlichen Störung	101
6.3.2 Berechnung der Sensibilitätsphasen für ausgewählte Einheiten im Sperrwerksbereich	102
7. Schriftenverzeichnis	106
8. Symbolverzeichnis	107

1. Einleitung

Sturmflutsperrwerke gelten gerade in Zeiten der Zunahme der Anzahl von Sturmfluten als geeignete Lösung, das Hinterland zu schützen. Die vorliegende Analyse zu den Auswirkungen des Eidersperrwerkes zeigt etwaige morphologische und topographische Veränderungen durch Inbetriebnahme eines solchen Sperrwerkes auf. Künstliche Eingriffe erfolgten in der Regel ohne Berücksichtigung der „Sensibilität“ eines Gebietes, so daß eine Baumaßnahme erhebliche Störungen im dynamischen Gleichgewicht haben kann. Die Kenntnis der „Sensibilität“ eines Gebietes kann die Störungen der natürlichen Dynamik verhindern bzw. erheblich vermindern. Im folgenden wird deshalb eine Möglichkeit vorgestellt, Sensibilitätsphasen zu berechnen.

2. Die Außeneider

Die Mündung der Eider liegt im Nordwesten Schleswig-Holsteins, südlich von Eiderstedt und nördlich von Büsum (Abb. 1). Das Untersuchungsgebiet umfaßt das Eiderästuar vom Eidersperrwerk bei Hundeknöll bis 14 km westlich des Eidersperrwerkes.

Die Eider ist gekennzeichnet durch diverse anthropogene Eingriffe, wie den Bau des Eiderkanals (1777–1784), des Nord-Ostseekanals 1887–1895, der Eiderabdämmung bei Nordfeld (1936) und – innerhalb des Untersuchungszeitraumes 1958–1990 – den Bau des Eidersperrwerkes (1969–1972) und die Aufschüttung des Sanddammes (1979).

Das Eidersperrwerk wurde in der Linie Vollerwiek – Hundeknöll errichtet mit dem Bestreben der Verbesserung des Sturmflutschutzes, der Optimierung der Vorflut und Sicherung der Schifffahrt durch Anheben des Tidewasserstandes, Spülen der Rinnen und der Schaffung von Speicherraum durch Aussperrung der Tiden bei Niedrigwasser. Aufgrund der Baumaßnahmen entstanden in der Außeneider erhebliche topographische Veränderungen, da der natürliche Verlauf der Rinne um rund 500 m nordwärts verlegt (Abb. 2) und mittels des Eidersperrwerkes auf eine Durchflußbreite von 200 m fixiert wurde. Die Rinne konnte vor ihrer Fixierung in der Linie Vollerwiek-Hundeknöll in einem 5 km breiten Bett mäandrieren und war gekennzeichnet durch starke Lageveränderungen. Mit dem Bau des Sperrwerkes (1972) richtete sich der Ebbestrom verstärkt in die Nordrinne, die sich mit zunehmender Geschwindigkeit auf den Seedeich bei Vollerwiek zubewegte. 1979 hatte der Prallhang eine Verlagerungsgeschwindigkeit von fast einem Meter pro Tide und war in diesem Jahr nur noch 60 m vom Deichfuß entfernt (WIELAND, 1990). Somit bestand zunehmend Gefahr für den Deich, so daß die Nordrinne bei Vollerwiek durch einen Sanddamm (1979) als plastisches Bauwerk durchdämmt wurde (Abb. 2). Die Nordrinne wurde so in zwei Arme geteilt. Weiterhin wurde eine künstliche Durchstichrinne in Anlehnung an die Lage einer früheren natürlichen Rinne zur Umlenkung der Ebbeströme zwischen Nord- und Südrinne geschaffen. Sollte die in letzter Zeit aufgesandete Durchstichrinne aufreißen und sich somit der Tidestromdruck in der Nordrinne wieder wesentlich erhöhen, kann dies zu einer erneuten Nordverlagerung und damit Gefährdung des Seedeiches führen.

Um über die Volumenänderungen auf die Herkunft der Sedimente in Außen- und Tideeider zu schließen, untersuchte PARTENSKY (1983) einen Bereich der Nordsee, der vor der Eidermündung liegt. In der Tideeider lag nach den Baumaßnahmen bei Nordfeld (1936) eine erhebliche Sedimentation mit 19,5 Mio. m³ von 1936 bis 1947 vor. Gleichzeitig weisen die Außeneider und das Seegebiet vor der Außeneider (dies betrifft den unmittelbar westlich der –6 m Linie anschließenden Nordseeboden; eine genaue Begrenzung gibt PARTENSKY, 1983 nicht an) eine Erosion von 31,2 Mio. m³ auf, so daß seit 1936 der Sedimentstrom seine Rich-

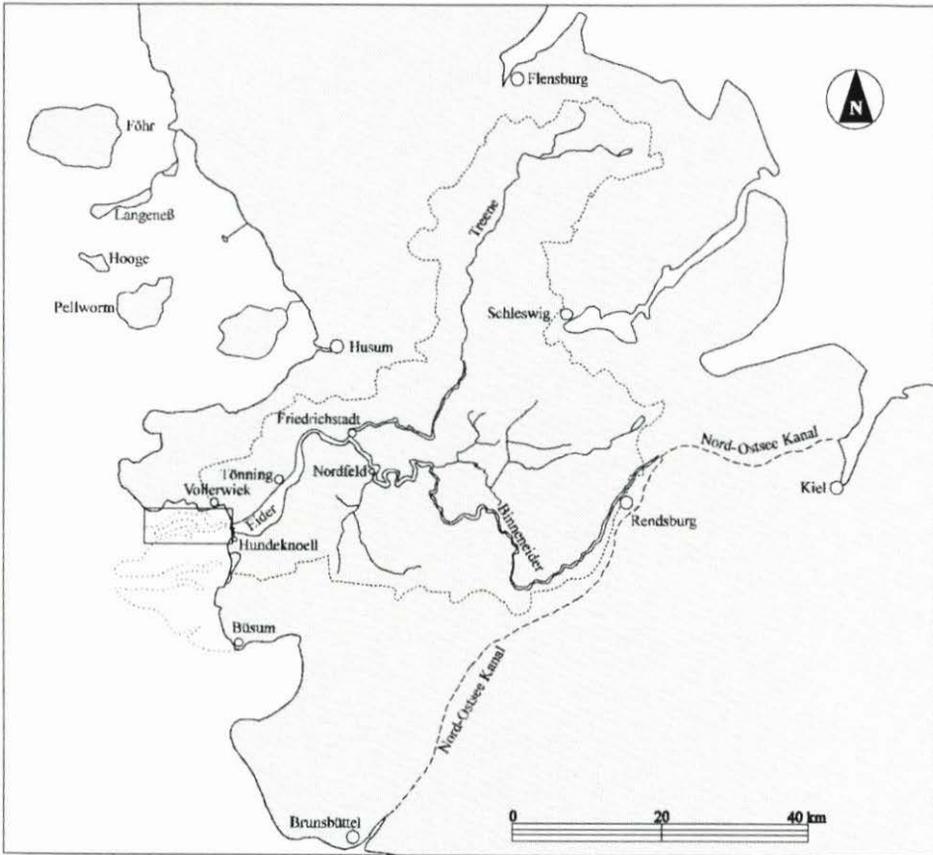


Abb. 1: Das Einzugsgebiet der Eider (verändert nach: ALW HEIDE, 1986)

tung wechselte und nunmehr von dem Seegebiet in die Tideeider verläuft. Die Herkunft der Sedimente der Tideeider ist somit der direkte Seebereich vor der Außeneider.

Seit 1947 liegt sowohl in Tide- und Außeneider als auch im Seegebiet vor der Außeneider Sedimentation vor. PARTENSKY (1983) nimmt an, daß etwa 94,6 Mio. m³ Sediment in das Gebiet verfrachtet wurden. Er folgert, daß die Sedimente im wesentlichen nur vom Meeresboden der Nordsee oder teilweise auch aus tieferen seewärts gelegenen Bereichen der Außeneider stammen, so daß hier der Sedimenttransport der Deutschen Bucht mit einbezogen werden muß.

In der inneren Deutschen Bucht liegen küstenparallele Sedimentströme vor (Abb. 3). Diese teilen sich auf in einen nordsüdlich gerichteten und in einen in westöstlicher Richtung entlang der niederländischen und niedersächsischen Küste verlaufenden Sedimentstrom. Während der nordsüdliche Sedimentstrom in der Höhe Westerland vor Sylt beginnt und im Außeneiderraum endet, reicht der westöstliche, dessen Nordseesedimente bis in die Unterelbe nachgewiesen wurden (LUCHT, 1953), bis in den Elberaum. Ein Teil des westöstlichen Sedimentstroms reicht, wie in der Abb. 3 ersichtlich, in das Gebiet der Piep, so daß hier neben dem überwiegend von Norden mit Material versorgten Außeneiderraum ein weiterer, von Westen gespeister, Sedimentationsraum vorliegt.

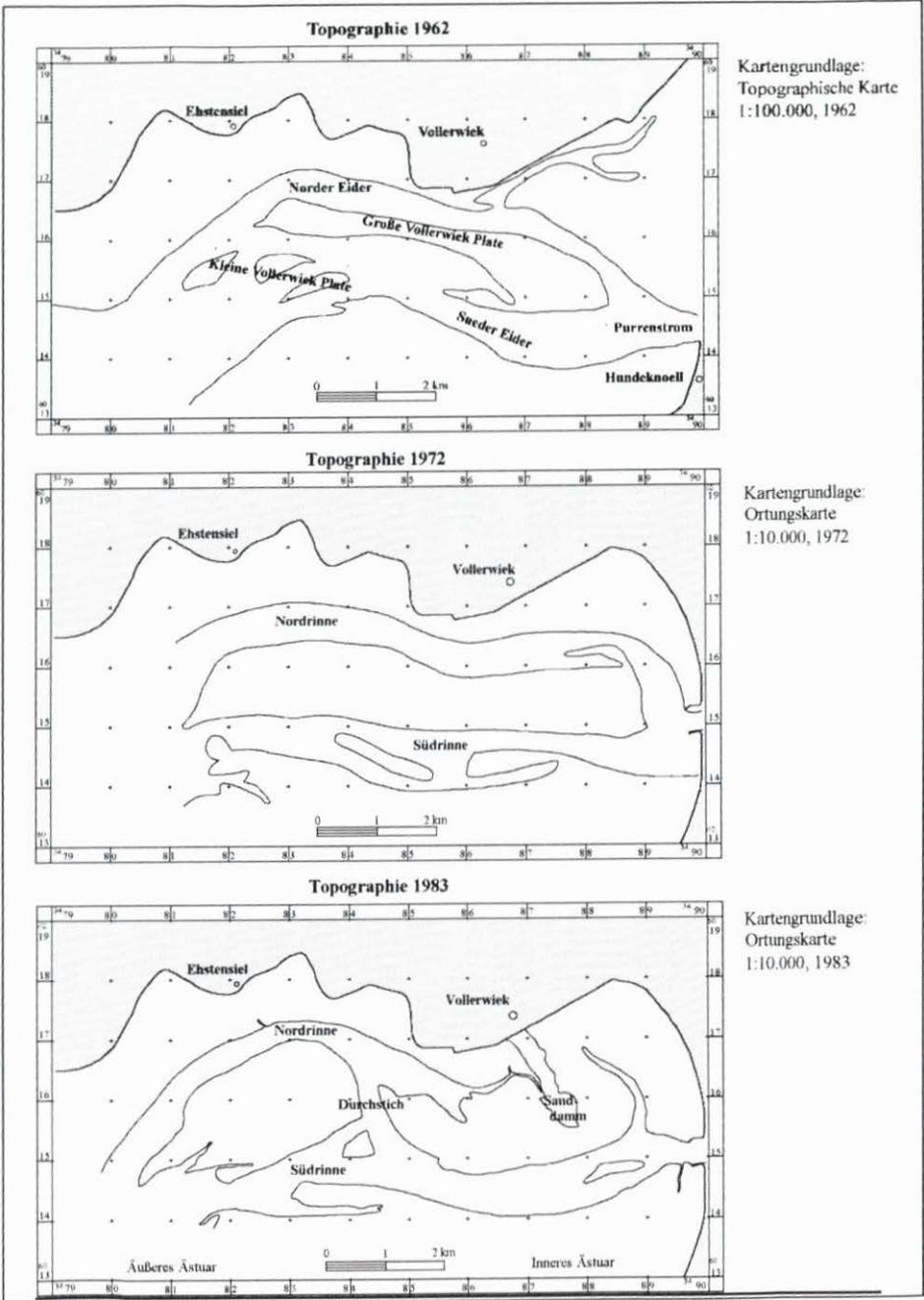


Abb. 2: Veränderungen in der Topographie des Untersuchungsgebietes

3. Arbeitsmethode – MORAN

Zur Analyse der Auswirkungen des Eidersperrwerkes auf die Morphodynamik des Untersuchungsgebietes sowie Berechnung der Sensibilitätsphase, wurde das MORAN-Verfahren angewandt. „MORAN“ ist die Abkürzung für die Projektgruppe „Morphologische Analysen Nordseeküste“, die im Rahmen des Kuratoriums für Forschung im Küsteningenieurwesen 1978 gegründet wurde. Im MORAN-Projekt wurden die Differenzen der mittleren Höhen begrenzter Felder bestimmt. Daraus ergeben sich mit den Werten von Umsatz und Bilanz zwei Kenngrößen, wobei unter dem Bilanzwert (h_b) die mittlere Höhenänderung als Differenz von Sedimentation und Erosion und unter dem Umsatzwert (h_u) der absolute Betrag der umgelagerten Materialmenge verstanden werden.

Mit der Darstellung der Umsatzhöhen h_u ist ein anschauliches Bild über die Vorgänge im Küstenvorfeld möglich, da der Umsatz sowohl die morphologische Aktivität als auch die Intensität des Materialtransportes aufzeigt.

Ausgehend von der These, daß stochastische Prozesse in der Natur zu quasi periodischen und aperiodischen Veränderungen der Topographie führen, analysierte SIEFERT (1983, 1987) deren morphologische Charakteristik, indem er Umsatz und Bilanz als Funktion der Zeit darstellte. Er bestimmte die Umsatzhöhe über einen Vergleichszeitraum als Sättigungsfunktion

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

Die einzige Variable ist a , welche nicht die fortlaufende Zeit, sondern den Betrachtungszeitraum zwischen zwei topographischen Aufnahmen angibt. SIEFERT ermittelte charakteristische a_0 und \bar{h}_u für einzelne energetisch ähnliche Gebiete und kam u. a. zu folgenden Ergebnissen:

- Bei kleinen a_0 und großen \bar{h}_u , also hohen asymptotischen Umsatzraten in kurzer Zeit, ist (zumeist in Prielgebieten und Brandungszonen) mit häufigen Umlagerungen zu rechnen.
- Bei großen a_0 und kleinen \bar{h}_u , also niedrigen asymptotischen Umsatzraten in langen Zeiträumen, sind wenig Umlagerungen in einem von Strömungen gering beeinflussten Gebiet (insbesondere im hohen, brandungsfreien Watt) zu verzeichnen.

Für die Praxis wurde der Beginn der asymptotischen Horizontalen mit

$$a \text{ (Asympt.)} = a_{0,9} = 2,3 * a_0$$

bei einem Zeitraum, nach dem $0,9 * \bar{h}_u$ erreicht ist, festgelegt (theoret. Voraussetzungen s. SIEFERT, 1987).

Bei Anwendung des MORAN-Verfahrens ist folgendes zu berücksichtigen:

1. Ist über einen großen Vergleichszeitraum $h_u \approx \text{const.} \approx \bar{h}_u$ erreicht, so ist davon auszugehen, daß das Gebiet höhenstabil ist. In kurzen Zeiträumen jedoch sind Höhenveränderungen möglich und meist auch vorhanden.
2. Der tatsächliche Materialumsatz liegt in der Regel höher als der aus den Kartenvergleichen über längere Zeiträume errechnete. Der realistische Wert ist nur über kurze Zeiträume – vermutlich über einjährige Kartenvergleiche – zu ermitteln. Die Höhe der Abweichung vom tatsächlichen Materialumsatz nimmt mit der Länge des Betrachtungszeitraumes zu.
3. Aussagen über größere Flächen sind problematisch, wenn a_0 und \bar{h}_u von Gebiet zu Gebiet wechseln und der Meßzeitraum zu kurz ist, so daß $h_u \approx \text{const.} \approx \bar{h}_u$ und $h_b = 0$ nicht erreicht werden. Es werden „[...] dann – je nach morphologischer Charakteristik – die Funktionen

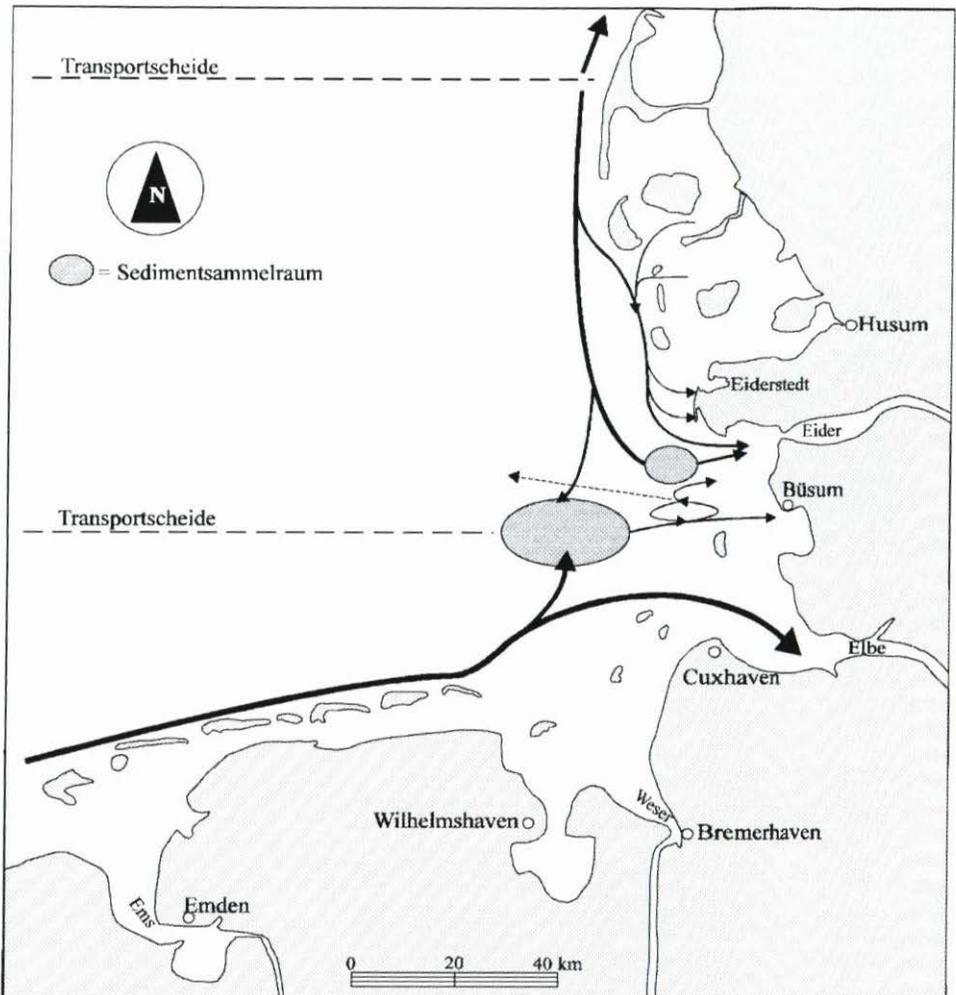


Abb. 3: Generelle Richtung der Hauptsedimentströme in der inneren Deutschen Bucht (nach PARTENSKY, 1983: 106; Kartengrundlage: Topographische Karten 1:100.000, 1986)

$h_u = f(a)$ und $|h_b|_{\max} = f(a)$ an Stellen „angeschnitten“, die keine gleichgewichtigen Aussagen über h_u und h_b zulassen“ (SIEFERT, 1987: 13). Ob die Länge des Berechnungszeitraumes Aussagen über eine Höhenstabilität des Raumes zulässt, kann über m (Vielfaches von a_0 , bei dem $h_b = 0$ wird) berechnet werden.

4. Die Funktion $h_u = \bar{h}_u (1 - e^{-a/a_0})$ ist nur dann anwendbar, wenn sich das Gebiet im Gleichgewicht befindet und über einen längeren Zeitraum ein $h_b = 0$ errechnet werden kann oder sich auf einem bestimmten Niveau einpendelt. In Gebieten mit hoher Morphodynamik können die Ergebnisse der Bilanzen bis $|h_b|_{\max} = h_u$ betragen. Im allgemeinen kann für die Deutsche Bucht seit 1200 AD von einem dynamischen Gleichgewicht ausgegangen werden, so daß bei ausreichend langem Vergleichszeitraum immer ein dynamisches Gleichgewicht innerhalb eines Untersuchungsraumes berechnet werden kann (HOFSTEDT, 1991).

Für den Raum der Außeneider muß diese Aussage insofern relativiert werden, als hier erst seit 1960 von einer gewissen Stabilität des Raumes ausgegangen wird. Um so interessanter ist es, hier die Morphodynamik des Raumes zu analysieren und das dynamische Gleich- bzw. Ungleichgewicht zu ermitteln.

5. Wächst h_b über a im Verhältnis zu h_u , so ist von einer über den Vergleichszeitraum säkulareren Höhenänderung auszugehen.

3.1 Parameter zur Beschreibung der Morphodynamik von Wattengebieten

Die Ergebnisse der Arbeiten von SIEFERT (1987) und HOFSTEDE (1991) aus dem Neuwerk-Scharhörner Wattkomplex wurden mit der Strömungs- und Seegangsenergie in Beziehung gesetzt und führten zur Untergliederung in folgende charakteristische Teilgebiete :

Tab. 1: Ergebnisse aus dem Neuwerk-Scharhörner Wattkomplex

Parameter	SIEFERT (1987)	HOFSTEDE (1991)
	Scharhörner Watt	Scharhörner Watt
	Brandungsfreies Watt	Hohes Watt
d (MThw) (m)	$d < 2$	$d < 2$
\bar{h}_u (cm)	20 (+/-8)	28 (+/-15)
a_0 (Jahre)	4 (+/-0,9)	5,2 (+/-2,8)
h_u/a_0 (cm/Jahr)	4,6 (+/-1,6)	5,3 (+/-2,7)
	Kleine Einheit mit Prielen	Wattpriele
d (MThw) (m)	$2 < d < 5$	$2 < d < 8$
\bar{h}_u (cm)	45 (+/-23)	71 (+/-35)
a_0 (Jahre)	4,1 (+/-1,4)	4,3 (+/-2,3)
h_u/a_0 (cm/Jahr)	11,3 (+/-6,6)	16,4 (+/-8,7)
	Brandungswatt	Brandungswatt
d (MThw) (m)	$1 < d < 4$	$0 < d < 3$
\bar{h}_u (cm)	41 (+/-17)	84 (+/-41)
a_0 (Jahre)	3,9 (+/-1,7)	3,3 (+/-2,3)
h_u/a_0 (cm/Jahr)	10,8 (+/-4,0)	25,5 (+/-14,1)
	Randwatt	Randwatt
d (MThw) (m)	$4 < d < 10$	$3 < d < 7,5$
\bar{h}_u (cm)	66 (+/-22)	114 (+/-48)
a_0 (Jahre)	3,2 (+/-1,2)	5,7 (+/-2,6)
h_u/a_0 (cm/Jahr)	21,3 (+/-6,7)	22,1 (+/-7,8)
	Tieferes Wasser vor dem Watt	Elbästuar
d (MThw) (m)	$6 < d < 10$	$d > 8$
\bar{h}_u (cm)	64 (+/-16)	84 (+/-33)
a_0 (Jahre)	2,0 (+/-0,7)	1,9 (+/-1,0)
h_u/a_0 (cm/Jahr)	34,6 (+/-9,7)	43,9 (+/-12,4)

Tab. 1: (Fortsetzung)

Parameter	SIEFERT (1987)	HOFSTEDE (1991)
	Platenbereich	Elb-Delta (exponiert)
d (MThw) (m)	$2 < d < 13$	$1 < d < 16$
\bar{h}_u (cm)	245 (+/-90)	273 (+/-129)
a_0 (Jahre)	6,6 (+/-3,1)	6,2 (+/-3,4)
\bar{h}_u/a_0 (cm/Jahr)	39,1 (+/-12,0)	44,1 (+/-13,2)
	Wattströme	Haupttiderinnen
d (MThw) (m)	$d > 8$	$d > 8$
\bar{h}_u (cm)	140	212 (+/-126)
a_0 (Jahre)	5,0	7,3 (+/-3,1)
\bar{h}_u/a_0 (cm/Jahr)	30	31,1 (+/-6,5)

Es zeigte sich in den Untersuchungen, daß der Bereich Wattstrom im Tideästuar noch unzureichend untersucht worden ist. Insbesondere die Spezialisierung auf Wattströme und deren separate Betrachtung ist bisher noch nicht erfolgt. So wurde zwar Tiefes Wasser vor dem Watt untersucht, womit auch die Ästuar einbezogen wurden, und es existiert die morphologische Charakteristik Wattströme, aber die Anzahl der Berechnungen für diese morphologischen Charakteristika ist bisher relativ gering. Weiterhin erfolgte bisher keine Betrachtung der Wattströme in Relation zu ihrer Bewegung, was für die Berechnung der Räume mit großer Verlagerung der Rinnen dringend erforderlich ist. Die dritte morphologische Charakteristik, die für das Tideästuar der Eider von Relevanz ist, ist der Bereich Brandungsplatten/Ränder der Wattströme. Die bisherigen Ergebnisse dieses heterogenen Bereiches, der von NN +2,0 m bis NN -13,0 m reicht, sind mit derart hoher Standardabweichung berechnet worden, daß auch hier eine Vertiefung dringend erforderlich ist.

3.2 Die Berechnung von morphologischen Parametern in dynamischen Gebieten und bei künstlichen Eingriffen

Als Hauptkritikpunkt am MORAN-Verfahren galt, daß es nur dann angewandt werden kann, wenn ein Gebiet sich im Gleichgewicht befindet und damit die Bilanzen gegen Null tendieren oder aber sich auf einem bestimmten Niveau eingependelt haben. Weiterhin wurde angezweifelt, ob das Verfahren in Gebieten mit hoher Dynamik zu aussagekräftigen Ergebnissen führt.

Bereits die Untersuchungen von SIEFERT (1984) am Beispiel des Mühlenberger Lochs zeigen, daß Störungen des dynamischen Gleichgewichtes aufgezeigt und quantifiziert werden können. Modifizierungen der MORAN-Funktion, wie etwa von MARNITZ (1991) in der Elbe über Berechnung einer Regressionsgeraden zur Berechnung der Störung oder aber von GÖNNERT (1989) für das Niederländische Watt, zeigen auf, daß über eine Modifizierung des Verfahrens die Störung quantifiziert werden kann. Beide Verfahren sind bislang jedoch nur kleinräumig angewandt worden. Die Anwendung des MORAN-Verfahrens auf die Außen-eider erwies jedoch, daß es auch in Gebieten mit hoher Morphodynamik und bei künstlichen Störungen anwendbar ist. Eine Modifizierung der MORAN-Funktion war nicht notwendig. Als erforderlich erwies sich eine Anpassung der Berechnungseinheiten an die Morphologie.

Somit ist eine Überprüfung des Kartenmaterials hinsichtlich der Verlagerung der einzelnen morphologischen Gebilde notwendig. Die Analyse muß gezielt auf eine Fragestellung hin, etwa durch Dynamisierung der Einheiten über Berechnung von Vertikalabschnitten oder durch Bildung von Großen Einheiten, erfolgen. Die Berechnung von morphologischen Parametern erlaubt so auch in Gebieten, in denen eingegriffen wurde, eine Differenzierung in Bereiche verschiedener morphologischer Charakteristik. Das MORAN-Verfahren ist somit auch in gestörten und sehr dynamischen Gebieten anwendbar.

3.3 Die Einheiten im Untersuchungsgebiet

Zur Ermittlung der Umsatz- und Bilanzwerte wird im MORAN-Verfahren das Untersuchungsgebiet in Felder von 1 km² eingeteilt, für die jeweils ein Umsatz- und ein Bilanzwert aus 100 Tiefenwerten bei den Kartenvergleichen ermittelt wird.

Im Außeneiderraum zeigte sich, daß es mit einer starr am Gauß-Krüger-Netz orientierten Unterteilung eines Gebietes problematisch ist, in dynamischen Räumen morphologische Charakteristika zu erarbeiten. Platen und Rinnen der Außeneider verlagern sich mit derart hoher Geschwindigkeit, daß bereits nach kurzen Zeiträumen die z.B. zuvor als Wattstrom/Rand der Plate deklarierten Einheiten zu reinen Platen werden und ehemalige Watt-ränder zu Wattströmen. Infolgedessen mußte das MORAN-Verfahren nach dem Kriterium Lage und Größe der Einheiten überprüft werden, weshalb die folgenden Möglichkeiten zur Bestimmung der Einheitengröße geprüft wurden:

1. Anpassung der Kleinen Einheiten an die Morphologie, d. h., es wird sich an sämtlichen Karten orientiert, und die Einheiten werden so gelegt, daß die für die jeweilige Fragestellung relevante Morphologie wie Wattrinne, Wattrinne/Ränder der Platen, Platen, Tiefes Wasser vor dem Watt etc. erfaßt werden kann. Dies muß bei dem Schwerpunkt dieser Arbeit – Wattrinne – so erfolgen, daß auch das Rinnenstadium 1990 erfaßt wird.
2. Anwendung von dynamischen Einheiten mit zeitflexiblen Grenzen, d.h. Einheiten, die mit der Bewegung – wie hier z. B. der Nordrinne – verschoben werden.
3. Bildung von Großen Einheiten.

Die Anpassung der Einheiten an die Morphologie, die Verschachtelungen, Überschneidungen und asymmetrische Lagen der Einheiten mit sich bringt, erwies sich als ungeeignet, da

1. aufgrund von Überlagerungen keine Gesamtberechnungen erfolgen können;
2. sie bei erheblichen Veränderungen im Gesamtgefüge des Untersuchungsgebietes (z. B. durch Sturmfluten) zu Problemen bei den Berechnungen führt;
3. sie sich in der praktischen Anwendung dieses Verfahren als zu inflexibel bei quasi keinem differierenden Ergebnis gezeigt hat.

Einheiten in zeitflexiblen Grenzen sollen der Dynamisierung der starren Einheiten dienen. Hierbei wird die morphologische Einheit klar definiert und im Raum verfolgt. Dies kann im Extremfall dazu führen, daß keine Veränderungen in der Bilanzentwicklung auftreten und der Umsatz nicht entsprechend der Verlagerung der Rinne berechnet wird. Meßbar ist mit diesem Verfahren beispielsweise die Bilanzentwicklung einer Rinne, die im Raum verfolgt wird, wie etwa die Versandung der Talsohle etc.

Soll aber die Morphodynamik erfaßt werden, die über den Umsatz und mit Hilfe der morphologischen Parameter a_0 , β , \bar{h}_n und h_n/a_0 analysiert werden kann, bewirkt die Verschiebung der Einheiten eine Beeinflussung der Berechnung, wodurch die Möglichkeit einer unkalkulierbaren Fehlerquelle gegeben ist.

Um diesem Problem zu entgehen, aber trotzdem eine Dynamisierung der Einheiten zu

erreichen, wird die Morphologie über gezielte Tiefenabschnitte berechnet. Eine klare Definition von Vertikalabschnitten dient der Festlegung, auf welchen Bereich sich Umsatz und Bilanz beziehen. So kann beispielsweise die Watttrinne in ihrer Bewegung durch Definition des Vertikalabschnittes von unterhalb NN $-1,0$ m bis zum tiefsten Punkt berechnet und im Raum verfolgt werden. Mit dieser Form der Berechnung erübrigen sich Einheiten mit zeitflexiblen Grenzen, da dieses Vorgehen der Verschiebung der Einheiten bezogen auf die Verlagerung der Rinnen entspräche. Weiterhin lassen sich nun auch in dynamischen Gebieten morphologische Parameter dadurch errechnen, daß der zu berechnende Vertikalabschnitt variiert werden kann. Soll die Umsatzrate der Watttrinne aufgrund einer hohen Verlagerungsrate untersucht werden, muß der Gesamtbereich von der höchsten Wattscheidenkante bis zum tiefsten Punkt berechnet werden.

Um in diesem Fall trotzdem die Verlagerung der Rinnen im Raum zu verfolgen, ist es unabdingbar, eine Berechnungseinheit zu definieren, die groß genug ist, um die maximale Verlagerung der Rinnen zu erfassen. Infolgedessen ist es notwendig, in Räumen mit hoher Morphodynamik und großer Verlagerungsrate Große Einheiten zu bilden. Große Einheiten sind Berechnungseinheiten, für die ein mittlerer Umsatz- und Bilanzwert bezogen auf eine Fläche, die größer als 1 km^2 (Kleine Einheiten) ist, ermittelt wird. Sie werden erstellt, indem Kleine Einheiten in Anlehnung an das Gauß-Krüger-Netz festgelegt und über die Software zu Großen Einheiten zusammengefaßt werden. Dabei ist die Anzahl der Kleinen Einheiten, die in die Großen Einheiten integriert werden, unbegrenzt. Weiterhin ist es möglich, die Kleinen Einheiten zu teilen, so daß sie an die Morphologie angepaßt werden können. Über die Bildung von Großen Einheiten können so bei konstanten Einheiten die weitläufigen Mäandrierungsbewegungen der Rinnen über die Jahre verfolgt werden. Weiterhin ist es möglich, die Rinnen durch flexible Einheitengrößen getrennt zu betrachten, wie im Eiderästuar die Nord- und die Südrinne. Dies ist über Berechnungen von Vertikalbereichen im Gauß-Krüger-Netz z. B. dann nicht möglich, wenn beide Rinnen sich in einer Kleinen Einheit befinden. Über Große Einheiten, notfalls mit Bildung von asymmetrischen Einheiten, ist dies jedoch möglich.

Eine Beibehaltung der Kleinen Einheiten, orientiert am Gauß-Krüger-Netz, ist dann vorteilhaft, wenn eine Vergleichbarkeit einzelner Kleiner Einheiten mit Einheiten anderer Gebiete gewährleistet werden soll. Erfolgt weiterhin über die Software die Bildung von Großen Einheiten und eine indirekte Dynamisierung durch Berechnung von Vertikalbereichen, erweist sich dieses Vorgehen in der Praxis am sinnvollsten, da

1. je nach Fragestellung die Einheiten entsprechend zu morphologischen Blöcken zusammengefügt werden können und eine Differenzierung auch sehr dynamischer Gebiete in Bereiche morphologischer Charakteristik somit möglich ist;
2. über Berechnung einzelner Vertikalabschnitte eine detaillierte morphologische Analyse einzelner topographischer Formen erfolgen kann;
3. Differenzierungen dementsprechend leicht und flexibel möglich sind.

Zusammengefaßt zeigt die Untersuchung der verschiedenen Einheitengrößen, daß es sinnvoll ist, sich am Gauß-Krüger-Netz zu orientieren und bei den Kleinen Einheiten zu verbleiben. Dem Kritikpunkt an MORAN, daß es eine zu starre, zu wenig an der Morphologie orientierte Einteilung ist, kann über die Software indirekt begegnet werden, indem morphologische Gefüge über Große Einheiten zusammengefaßt werden und zusätzlich gezielte Vertikalabschnitte berechnet werden.

Bei der Diskussion um die Einheitengröße zur Erfassung morphologischer Parameter für das Eiderästuar galt es weiterhin, folgende Kriterien der Einheitenbildung zu beachten:

1. Die Nord- und Südrinne sollten getrennt untersucht werden.

- Die Einteilung des Untersuchungsgebietes sollte unter Berücksichtigung der hydrodynamisch differierenden Bereiche erfolgen: Äußeres Ästuar und Inneres Ästuar (Abb. 2). Darüber hinaus ist der Mündungsbereich zur Nordsee separat zu betrachten.
- Nord- und Südrinne sollen erfaßt, in ihrer Lage über die Zeit verfolgt und in ihrer maximalen Nord- und Südverlagerung eingegrenzt werden. Sie sollen differenziert werden in östliche und westliche Mäanderachse sowie in die Mäanderschleife.

Die Analyse des Kartenmaterials nach morphologischen Gesichtspunkten und nach Maßgabe des vorhandenen Datenmaterials ergab die Unterteilung des Untersuchungsgebietes in neun Große Einheiten: A1-A4, B1-B4 und C1 (Abb. 4).

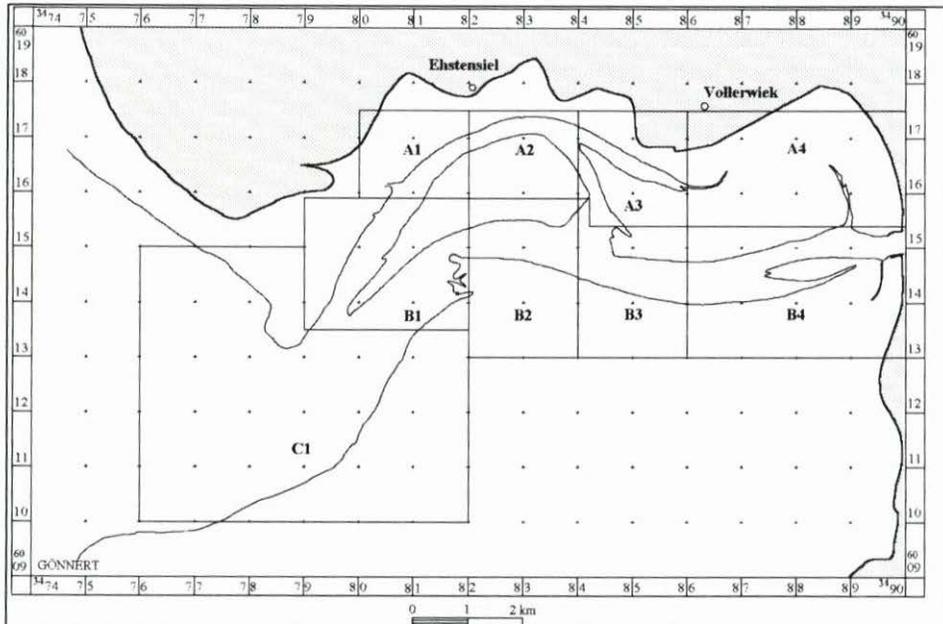


Abb. 4: Die großen Einheiten (Kartengrundlage: Ortungskarte 1:10000, 1986)

4. Das Kartenmaterial

Das Kartenmaterial der Außeneider lag für die Jahrgänge 1958 und von 1969 bis 1990 in jährlichen Abständen vor. Alle Karten weisen den gleichen Maßstab 1:10.000 auf und sind auf NN bezogen.

Zu unterscheiden sind die Karten der Außeneider in:

- Grundkarten, vorliegend als Höhenlinienkarten für 1958 und diverse, nicht immer durchgängig für alle Jahrgänge vorhandene Blätter;
- Ortungskarten, vorliegend mit Meßprofilinien und wenigen Höhenlinien für die Jahre 1969 bis 1985;
- Höhenkarten, vorliegend als Isolinienkarten für die Jahrgänge 1986 bis 1990.

Vermessen und erstellt wurden die Ortungskarten bis 1977 durch das WSA TÖNNING, seit 1978 durch das ALW HEIDE, Dezernat Gewässerkunde Büsum. Dies gilt auch für die Höhenkarten von 1986 bis 1990.

Die Möglichkeit, die Topographie eines Geländes in der Karte möglichst naturgetreu darzustellen, ist abhängig von der Dichte der Aufnahmepunkte, dem Kartenmaßstab, dem Ortungssystem und dessen Genauigkeit, der Genauigkeit der Tiefenmessung in Abhängigkeit von der Methode – wie der Echolotleistung – sowie der Genauigkeit der Beschickung.

Seit Beginn der 60er Jahre werden zur Lagebestimmung elektro-magnetisch/optische (z. B. Radiolog), optische (z. B. Sextanten), tachymetrische oder optisch/mechanische Verfahren (z. B. Deckpeilung/Peilleine) ersetzt durch elektromagnetische Verfahren. Diese benötigen jeweils einen Empfänger und eine Masterstation. Das Peilgebiet der Nordsee wird durch vier Hi-Fix-(bzw. Hydrotrac-)Ortungsketten und eine Hi-Fix-6-Ortungskette abgedeckt (SCHLEIDER, 1981). Zur Ortsbestimmung im Eiderästuar wird die „Eiderkette“ benutzt, deren Masterstation neben der „Hamburger Kette“ auf Helgoland installiert ist. Die Gewässerkunde Büsum hat erst 1969 auf das Hi-Fix-Ortungssystem umgestellt, so daß bis zu diesem Zeitpunkt die Ortsbestimmung noch mit den Sextanten erfolgt. Das weiterentwickelte Ortungssystem Syledis wird seit 1989 auch im Eiderraum verwendet. Es wird inzwischen ausschließlich zur Ortsbestimmung bei der Vermessung der Bundeswasserstraßen und der Nordsee sowie des Wattenmeeres, z. B. von der WSD Nordwest und dem ALW HEIDE, Gewässerkunde Büsum, genutzt.

Die Tiefenmessung erfolgt generell mit Echoloten. Die Genauigkeit der Lotung hängt von Faktoren wie der Anzeigegenauigkeit und Eichung des Gerätes, der Schwingerbefestigung am Schiffsboden und dessen Tiefe sowie der Schallgeschwindigkeit im Wasser ab (GROTHENN, 1964). Die entscheidende mögliche Fehlerquelle bei der Echolotung liegt im Beschickungsverfahren. Mit verschiedenen Beschickungsverfahren werden die Wassertiefen der Echolotmessung auf ein einheitliches Bezugsniveau reduziert. In Tideregimen liegt hierbei eine der Fehlerquellen in einem zu großen Abstand zwischen Peil- und Pegelort, weshalb das Netz der Pegel möglichst dicht sein sollte. In der Außeneider liegt heute eine Pegeldichte von einem Pegel/Radius von 3 km vor. Zusätzlich wird ein Pegel mitgenommen, um bei größeren Entfernungen zusätzliche Messungen vornehmen zu können. Gemessen wird eine Stunde vor bis eine Stunde nach MThw. Bezugnehmend auf die von GÖHREN (1968) angegebenen Beschickungsfehler aufgrund von Beschickungsdistanz und Tidephase heißt dies, daß der Grenzfehler bei 1 dm liegt. Dieser Wert ergibt sich aus der Kombination einer geringen Distanz unterhalb von 5 km und der Messung um Hochwasser, wodurch ein möglicher Beschickungsfehler deutlich reduziert wird.

Die nivellitische Wattvermessung erfolgt über ein Profilverfahren, bei dem in Abständen von 100 bis 200 m eine Linie durch Pfähle markiert wird. Diese über Nivellement an NN angeschlossene Standlinie bildet die Basis für die im rechten Winkel im Abstand von 50 m gesteckten Profile. Bei besonderen Oberflächenformen wie Senken, Rippeln, Prielen etc. werden Zwischenpunkte eingemessen. Die mittlere Meßgenauigkeit des Profilverfahren liegt in der Punktlage bei $\pm 2,5$ m sowie eine Höhenlage bei ± 3 cm (WIELAND u. THIES, 1975). Der Vorteil dieser Methode liegt in der großen Genauigkeit, der Nachteil in dem relativ hohen Zeitaufwand der Vermessung.

Zusammenfassend läßt sich festhalten, daß die Ortungskarten von 1969–1985 und die Höhenkarten von 1986–1990 mit Verfahren erstellt wurden, die auf hohe Genauigkeit schließen lassen. Die Fehlerangaben und ableitbaren Fehlerquellen sind weitaus geringer als die morphologischen Veränderungen.

Die Karte von 1958 lag als Höhenplan/Grundkarte im Maßstab 1:10.000 vor. Die Tiefenwerte der Karte beziehen sich auf NN. Bei Auswertung dieser Karte zeigte sich ein deutlicher Sprung zwischen den Kartenvergleichen 1958 mit 1969–1990 und den Ergebnissen der Kartenvergleiche 1969–1989 mit 1970–1990, der insbesondere in den Einheiten A1/A2/B2

Tab. 2: Mittlere Differenz zwischen Ergebnissen der Kartenvergleiche kumulativ über die Zeit von 1969–1990 und 1958–1990

Große Einheiten	Differenz Bilanz	Differenz Umsatz
A1	-516 cm	-175 cm
A2	-202 cm	-92 cm
A3	-63 cm	+/-0 cm
A4	-321 cm	-49 cm
B1	-118 cm	+75 cm
B2	+193 cm	-27 cm
B3	+213 cm	+30 cm
B4	+22 cm	+8,1 cm
		(innerhalb Trend)
C1	-99 cm	(innerhalb Trend)
Gesamt	-85 cm	-6 cm

und B3 deutlich ist, weniger dagegen in den Einheiten B1/B4/A3 und C1. Der Sprung in den Daten zeigt sich sowohl in den Ergebnissen der Umsätze als auch in denen der Bilanzen (Tab. 2).

Eine Berechnung der mittleren Differenz zwischen den Ergebnissen der Kartenvergleiche über die Zeit von 1969–1990 und 1958–1990 läßt deutlich auf einen systematischen Fehler schließen. So ist anzunehmen, daß diese hohen Abweichungen nicht mit morphologischen Veränderungen zu erklären sind, sondern vielmehr mit Abweichungen in der Erstellung des Kartenmaterials. Sicherlich sind solch hohe Abweichungen von bis zu einigen Metern auch schwerlich mit der Ungenauigkeit der Kartenerstellung wie z. B. Lotungsfehler erklärbar, doch müssen zunächst zur Analyse des Kartenmaterials die bereits genannten Punkte, wie

Tab. 3: Faktoren der Kartenerstellung für die Außeneiderkarten

Kriterien	Grundkarte	Ortungskarte	Höhenkarte
Jahrgänge	1958	1969–1985	1986–1990
Kartenmaßstäbe	1 : 10.000	1 : 10.000	1 : 10.000
Iso-/Profillinien	Höhenlinien	Profillinien	Höhenlinien
Vermessungsstelle	Büsum	1969–1977 Tönning 1978–1985 Büsum	Büsum
Meßdichte (nivellit.)	Standlinie: 200 m Profillinie: 50 m	Standlinie: 200 m Profillinie: 50 m seit '72 bis NN + 1,0 m nautisch	Standlinie: 200 m Profillinie: 50 m bis NN +1,0 nautisch
Meßdichte	Prüfungen nicht nachvollziehbar	in Anlehnung an Hyperbellinien (alle 50 m Profillinien, alle 50 m Tiefenwert)	siehe Ortungskarte
Ortungssystem	Sextant	Decca-Hi-Fix- Ortungssystem	Decca-Hi-Fix- Ortungssystem ab '89 Syledis
Beschickungsentf.	unbekannt	3 km	3 km

Dichte der Aufnahmepunkte, Kartenmaßstab, Ortungssystem, Genauigkeit der Tiefenmessung und Beschickungsverfahren, berücksichtigt werden.

Als zusätzlicher Gesichtspunkt sollte beachtet werden, von welcher Institution Vermessung und Kartierung vorgenommen wurden. Weiterhin ist für die Anwendung des MORAN-Verfahrens und dessen Anwendungsgenauigkeit relevant, ob es sich um eine Ortungskarte oder um eine Höhenlinienkarte handelt.

Wie aus Tab. 3 zu entnehmen ist, unterscheidet sich die Grundkarte 1958 von den anderen insbesondere dadurch, daß jeweils ein verschiedenartiges Ortungssystem genutzt wurde. Offensichtlich bewirken unterschiedliche Institutionen und eventuelle Unterscheidungen in Höhen- und Ortungskarten weniger eine Kartendifferenz, wenn andererseits die nautische, die nivellistische und die Ortungsmessung mit zumindest annähernd gleichen Mitteln erfolgten. Auffällig ist, daß der Wechsel vom Decca-Hi-Fix-Ortungssystem zum Syledissystem keinen Sprung im Datenmaterial verursacht hat und somit von einem übergangslosen Ortsbestimmungswechsel ausgegangen werden kann.

Anhand der Auflistung läßt sich erkennen, daß der Fehler durch den Wechsel der Ortbestimmung vom Sextanten zum Decca-Hi-Fix-Ortungssystem entstanden sein müßte. Eine detaillierte Analyse hierzu ist in GÖNNERT (1995) nachzulesen. Grundsätzlich ist zu berücksichtigen, daß bei Einbeziehung der Karte von 1958 fehlerhafte Ergebnisse vor allem in den absoluten Werten zu erwarten sind.

Um jedoch die langfristige Tendenz nicht zu vernachlässigen, wird der Vergleich mit der Karte von 1958 in der Umsatzanalyse mitberücksichtigt. Hierbei finden aber die möglichen Fehler der Karte eine besondere Beachtung. Diese Daten werden aus diesem Grunde nicht in die Berechnungen der MORAN-Funktion miteinbezogen. Ebenso sind sie nicht in der Bilanzanalyse berücksichtigt, da die Möglichkeit der Fehlinterpretation aufgrund des Datensprungs zu groß ist.

5. Entwicklung von Topographie und Wasserraum (1904–1990)

Für das gesamte Untersuchungsgebiet ist durchgängig von 1969 bis 1986 ein Wasserraumverlust, d.h. Sedimentation, festzustellen, der von Erosionsphasen 1975–1977 und 1978–1979 unterbrochen wird (Abb. 5). Weiterhin wechselt die Sedimentation seit 1986 in eine Erosion und damit in eine Wasserraumöffnung. Insgesamt liegt im Zeitraum 1969–1990 ein Sedimentgewinn von 20 Mio. m³ vor (einschließlich A1/B1 – d. h. bis 34.80, Abb. 4 – von 28,6 Mio. m³). Die in diesem Raum umgelagerte Materialmenge und die wasserraumverändernde Bilanzmenge sind für die berechneten Zeitabschnitte für den Gesamttraum (A2/B2–A4/B4) in Tab. 4 dargestellt.

Für den Zeitraum 1904 bis 1980 analysierte PARTENSCKY (1983) die Bilanzentwicklung der Außeneider. Er konstatierte für die Jahre 1904–1947, daß die Außeneider von Hundeknöll bis 10 km westlich zur Nordsee (Abb. 4) einer Erosion mit einem Materialverlust unterhalb MT_{NW} von 37 Mio. m³ unterliegt. Der Zeitraum 1947–1969 kann hingegen in Anlehnung an PARTENSCKY (1983) als Hauptsedimentationsphase der Außeneider bezeichnet werden. Die Versandung, verursacht durch das Sperrwerk bei Nordfeld, erreicht die Außeneider mit einer Verzögerung von 10 Jahren.

1969–1975 ist ebenfalls eine deutliche Sedimentationsphase festzustellen, wobei die Intensität der Sedimentation im Vergleich zu 1947–1969 deutlich nachläßt. Das Sperrwerk hat einen weiteren Sedimentationsimpuls bewirkt, der jedoch seit 1972 stetig abnahm. So lag von

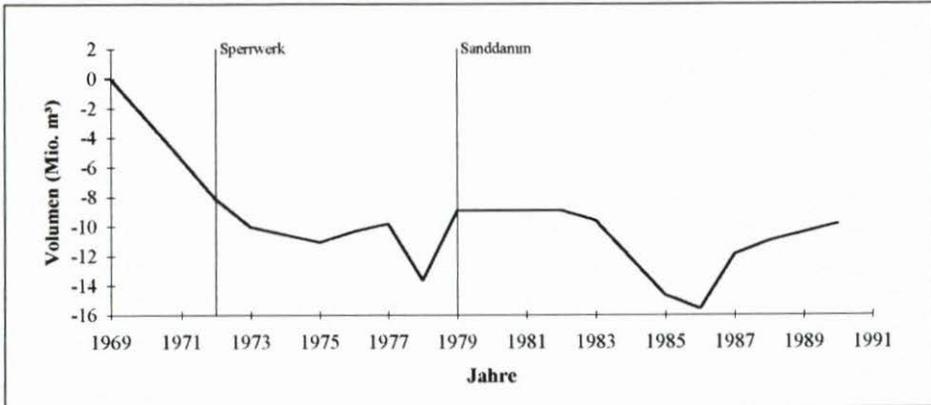


Abb. 5: Relative Wasserraumveränderung, maximale Rinnentiefe bis maximale Platenhöhe: Untersuchungsgebiet 34.82–34.90 (A2/B2–A4/B4)

1969–1972 ein Sedimentgewinn von ca. 8,1 Mio. m³ vor. Von 1972–1975 wurde mit ca. 3 Mio. m³ weit weniger als die Hälfte des Sediments abgelagert (Tab. 4). Die umgelagerte Sedimentmenge ist jedoch nicht angestiegen. Die Sedimentation ist insbesondere in der Nordrinne (4–8 km westlich des Sperrwerkes in den Großen Einheiten A1 und A2, Abb. 4) und in der Südrinne (0–6 km westlich des Sperrwerkes in den Großen Einheiten B3 und B4, Abb. 4) vorzufinden.

1975–1979 wechselte die Sedimentation in eine Erosion, unterbrochen von einem Sedimentationspeak 1977–1978. Die Erosion bewirkt eine Abflachung der Watten und z.T. eine Vertiefung der Rinnen. Dies ist jedoch nicht im gesamten Außeneiderraum der Fall. So ist Erosion in der Südrinne in den Großen Einheiten B1, B2 und B3 festzustellen, seit 1978 in der Großen Einheit B4 (0–4 km westlich des Sperrwerkes). Daneben liegt sie in der Nordrinne in den Großen Einheiten A2 und A4 vor. Auffällig ist, daß diese Erosion in A4 unterhalb NN –1,0 m nur bis 1976 zu finden ist. Das bedeutet, daß seit 1976 die Nordrinne deutliche Versandungstendenzen aufweist. Dagegen erodieren die Flachen Watten. Hier liegt

Tab. 4: Jährlich umgelagerte Material- und Bilanzmenge in der Außeneider

Zeitraum ¹	1969–1971	1971–1972	1972–1973	1973–1975	1975–1976	1976–1977	1977–1978	1978–1979
Bilanzmenge (Mio. m ³)	5,48	2,66	1,93	1,00	–0,73	–0,51	3,84	4,73
Umsatzmenge (Mio. m ³)	26,09	17,25	17,64	20,75	13,62	15,60	17,56	19,79
Zeitraum	1979–1980	1980–1982	1982–1983	1983–1985	1985–1986	1986–1987	1987–1988	1988–1990
Bilanzmenge (Mio. m ³)	0	0	0,69	5,06	0,92	–3,68	–0,92	–1,15
Umsatzmenge (Mio. m ³)	17,66	32,99	11,49	21,59	14,98	9,40	18,45	19,76

¹ Für die Jahrgänge 1970, 1974, 1981, 1984 und 1989 lag ein zu geringer Datenrahmen vor, so daß sie unberücksichtigt bleiben mußten.

auch der in der Gesamtberechnung ausgewiesene Sedimentationspeak (Abb. 5), der zwischen 1977 und 1978 hauptsächlich in der Nordrinne mit 1,37 Mio. m³ und in der Südrinne mit 2,26 Mio. m³ im Bereich 0–4 km westlich des Sperrwerkes nachzuweisen ist.

Die Kombination aus Erosion in großen Teilen der Südrinne und Sedimentation in der Nordrinne kann auf ein beginnendes dynamisches Gleichgewicht und ein sich änderndes topographisches Gefüge hinweisen. Die Südrinne zeigt an der Verbindungsstelle zur Nordrinne einen steilen Mäanderradius, der vermutlich an der Basis dieses Mäanders in nächster Zeit vom Flutstrom durchbrochen worden wäre. Damit hätte die Südrinne einen größeren Anteil des Flut- und Ebbestroms übernommen, der Strömungsdruck auf die Nordrinne hätte nachgelassen. Die Versandung der Nordrinne hat zum einen den Effekt, daß die Strömungsgeschwindigkeit in der verengten Nordrinne zunächst zunimmt, wodurch die Nordverlagerung der Nordrinne durch Erosionstätigkeit am Prallhang verstärkt wird. Zum anderen weist sie bereits auf die Änderung des topographischen Gefüges in Hinblick auf die Verlagerung des Hauptfahrwassers in die Südrinne hin. Dies wird durch die Erosionstätigkeit in der Südrinne 4–8 km westlich des Sperrwerkes deutlich. Eine weitere Möglichkeit der Veränderung des topographischen Gefüges wäre im Nordrinnenbereich gegeben. So liegt ein sehr steiler Mäander vor Vollerwiek (Abb. 6) vor, und der Flutstrom zeigt eine verstärkte Erosionstätigkeit am Fuß des Mäanders. Der sich an den Nordmäander anschließende Südmäander zeigt Barrenbildung. Der Flutstrom verlagert sich gleichzeitig in den Rinnenbereich südlich des Mäanders. Vor diesem Talweg südlich der Barre schließt sich der beginnende Durchbruch an der Basis des Vollerwieker Mäanders an. Möglich wäre hier der Durchbruch des Flutstroms bis zur Verbindung von der Nordrinne zur Südrinne gewesen. In diesem Fall wäre das Mündungsrinnensystem in zwei Rinnen geteilt geblieben, und eine erneute Nordmäandrierung der Nordrinne, als Wiederholung der Geschehnisse von 1972–1979, wäre eingetreten.

Demzufolge weisen die topographischen Veränderungen auf eine Einstellung des Gebietes auf ein erneutes topographisches Gefüge und damit auf ein beginnendes dynamisches Gleichgewicht hin. Laut PARTENSKY (1983) hat das Untersuchungsgebiet 1980 jenes Fassungsvermögen erreicht, das in der Außeneider 1904 vorlag. Inwieweit dies als ein für den Raum gleichgewichtiges Fassungsvermögen zu bezeichnen ist, kann nicht geklärt werden.

Im Zeitraum 1979–1986 setzt eine erneute Sedimentationsphase ein, verursacht durch die Durchdämmung der Nordrinne und Baggerung der Durchstichrinne. Bis 1983 liegt diese Sedimentation unterhalb NN –1,0 m vor, verzögert dann ab 1983 auch oberhalb NN –1,0 m. Die Sedimentation liegt vorwiegend in der Nordrinne mit 8,7 Mio. m³ (von insgesamt 13,3 Mio. m³) und ist mit der Versandung des Altarmes zu erklären. Ob hier ein verkleinertes neues Wattenzugsgebiet entstanden ist, wodurch eine Rinnenversandung erzwungen wird, bleibt offen. Daneben versandet der Durchstich, die Südrinne verzeichnet eine Wasserraumöffnung.

1986–1990 ist eine Erosionsphase nachweisbar, die wiederum auf ein sich einpendelndes dynamisches Gleichgewicht hindeuten könnte. Die Erosion zeigt sich nicht nur in der Südrinne, sondern auch in Teilbereichen der Nordrinne wie in A2. Es beginnt vom Flutstrom eine Überströmung des Bereiches westlich des Durchstichs. 1990 liegt hier bereits eine rinnenartige Mulde zur Südrinne vor, die jedoch nur eine Tiefe NN –2,0 m erreicht.

Insgesamt haben Sperrwerk und Sanddammbau jeweils einen Sedimentationsimpuls bewirkt. Dieser muß jedoch nicht unbedingt ursächlich mit den Bauwerken im Zusammenhang gesehen werden. Insbesondere die Sedimentation nach Bau des Sperrwerkes bei Hundeknöll kann auch ein Ausläufer der Versandung sein, die vom Sperrwerk bei Nordfeld ausgelöst

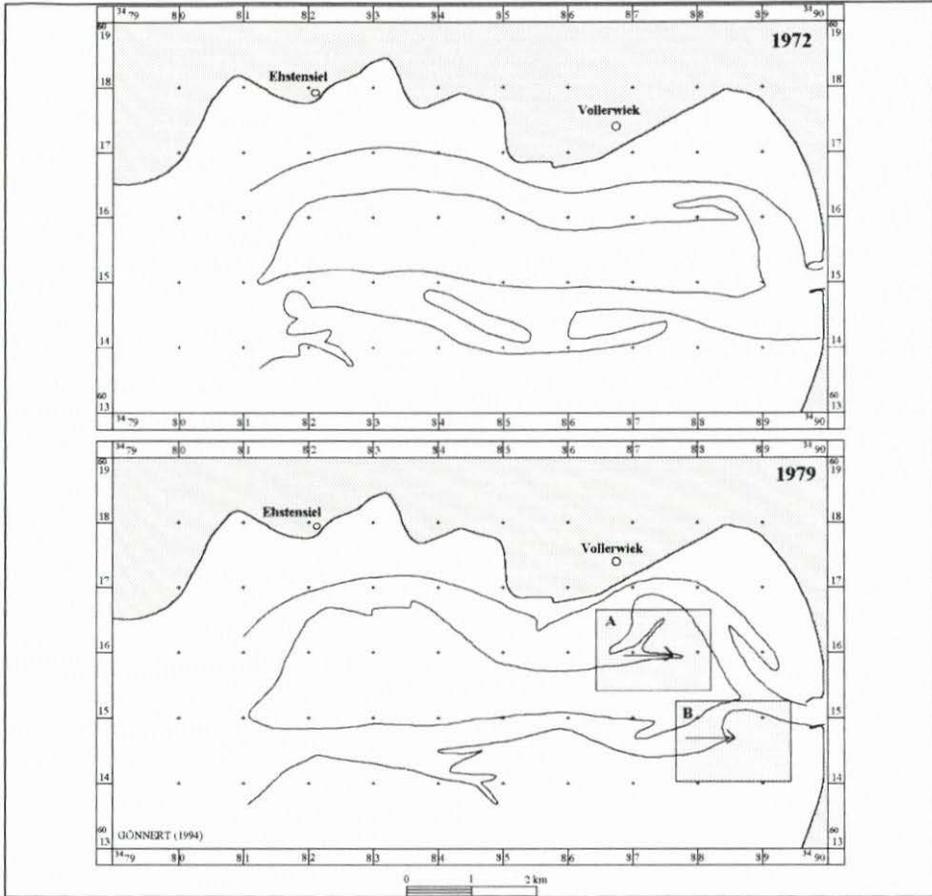


Abb. 6: Topographie der Außeneider 1972 und 1979 (Kartengrundlage: Luftbilder 1972 und 1979 des ALW HEIDE, 1986)

wurde. Inwieweit das Gebiet tatsächlich im dynamischen Gleichgewicht gestört wurde, kann nicht allein von der Wasserraumentwicklung und der Beobachtung der Topographie geschlossen werden, sondern muß über eine Analyse der Morphodynamik und des dynamischen Gleichgewichtes erfolgen.

6. Die Morphodynamik der Außeneider

Die asymptotische Umsatzhöhe für das gesamte Untersuchungsgebiet erreicht 245 cm bei einem a_0 von 4,4 Jahren und einem $a_{0,9}$ von 10,2 Jahren (Abb. 7). Die Umsatzrate liegt bei 56 cm/Jahr. Das bedeutet, daß im Eiderästuar hohe Umlagerungen bei gleichzeitig langanhaltenden, gleichbleibenden Tendenzen vorliegen. So werden 90 % der asymptotischen Horizontale erst nach knapp 10 Jahren erreicht, und β liegt bei 0,24, womit die langfristigen Tendenzen bestätigt werden.

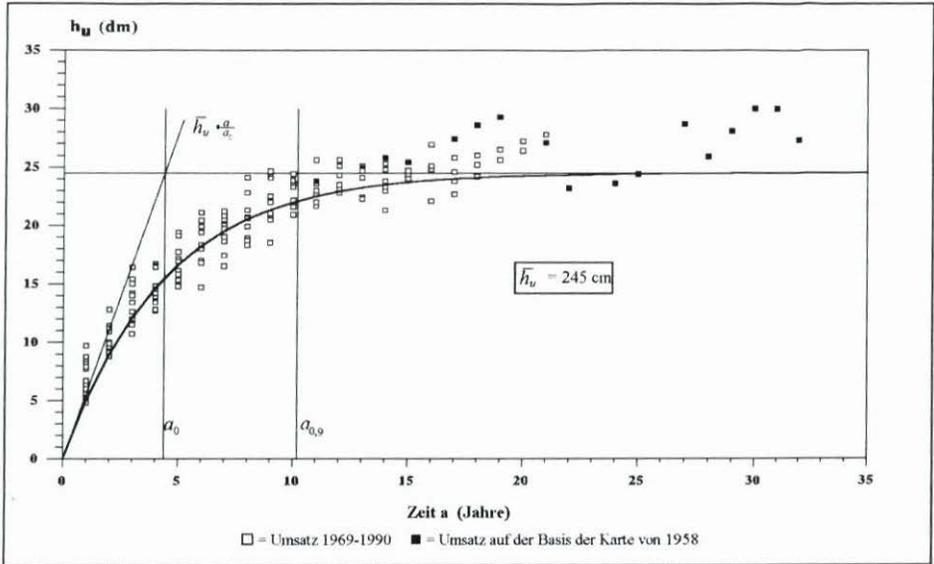


Abb. 7: Umsatzkurve Außeneider: Gesamtes Untersuchungsgebiet vom Sperrwerk (34.90) bis zur Nordseemündung (34.80)

Werden diese Ergebnisse mit den Mittelwerten großräumiger Untersuchungen von GÖHREN (1971) und BARTHEL (1981, zitiert nach SIEFERT, 1987) verglichen (Tab. 5 und Abb. 8), so zeigt sich, daß allen Untersuchungen gemeinsam ist, daß bei einem Kartenvergleich über 5 Jahre für ein Wattgebiet mit angrenzenden Wattströmen Umsatzhöhen von 70 bis 80 cm vorliegen. In der Eider ist die Umsatzhöhe weitaus größer als in den anderen Untersuchungsgebieten. Dies kann mit dem größeren Anteil der berechneten Bereiche morphologischer Aktivität auf Wattströme und Platen im Gegensatz zu den an die Wattströme

Tab. 5: Vergleich der Umsatzanalysen aus großräumigen Berechnungen anderer Untersuchungsgebiete mit der Gesamtberechnung aus dem Eiderästuar (teilw. aus SIEFERT, 1987: 43 ff.)

GEBIET	Neuwerk-Scharhörner Wattgebiet (einschl. Prielen, Wattströmen und Teilen der Außenelbe)	Knechtsandgebiet (einschl. Till und Robinsbalje)	Elbe/Weser und Jade	Eider-Ästuar (Gesamtgebiet)
Autor/in	GÖHREN (1971)	BARTHEL (1981)	SIEFERT (1987)	GÖNNERT (1995)
A	340 km ²	340 km ²	1165 km ²	45 km ²
a	5 Jahre (1965–1970)	5 Jahre (1974–1979)	rd. 5 Jahre	5 Jahre
h_u	73 cm	77 cm	80,2 cm	167 cm
h_b	7 cm (Sedimentation)	17 cm (Erosion)	+3,1 cm/+2,9 cm/ +3,3 cm; unter der Annahme, daß $h_b = 0 / -0,2 * h_u / +0,2 * h_u$	20 cm (Sedimentation)
$ h_b $	$0,10 * h_u$	$0,22 * h_u$		$0,12 * h_u$

angrenzenden Berechnungen von BARTHEL (1981, zitiert nach SIEFERT, 1987) und GÖHREN (1971) begründet werden. Dementsprechend differieren die Umsätze von denen der anderen Gebiete aufgrund der unterschiedlichen Verteilung der Bereiche morphologischer Aktivität bei $a = 5$ Jahre. Unter Berücksichtigung der topographischen Gegebenheiten, des Seegangscharakters und der Strömungsverhältnisse, die insbesondere im Vergleich Wattströme und Flaches Watt stark differieren, sind die Ergebnisse daher nur eingeschränkt vergleichbar.

Topographie und Morphologie der Außeneider sind dagegen vergleichbar mit dem Raum von Elbe/Weser und Jade. Es zeigt sich jedoch, daß die Umsätze dieser Gebiete nur 50 % der mittleren Umsatzhöhe im Eiderästuar über $a = 5$ Jahre erreichen (Abb. 8), so daß im Eiderästuar von einer weitaus höheren Morphodynamik ausgegangen werden kann.

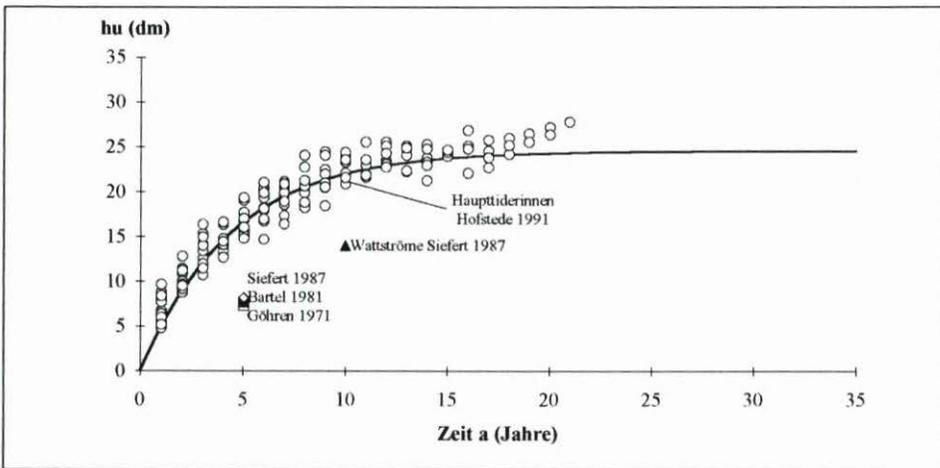


Abb. 8: Die Umsätze der Außeneider im Vergleich zu großräumigen Berechnungen anderer Untersuchungsgebiete

6.1 Differenzierung der Außeneider in Gebiete ähnlicher morphologischer Aktivität

Anhand von morphologischen Parametern ist es möglich, das Untersuchungsgebiet nach seiner Morphodynamik zu untergliedern. Es gibt zwar keinen einfachen linearen Verband zwischen den einwirkenden Energien aus Seegang und Strömung und der daraus resultierenden Materialumlagerung, was mit dem zunehmenden Anteil an der Seegangsumwandlung in Prozesse wie Reibung, Perkolation etc. bei ansteigender Leistungsabgabe zu erklären ist, allerdings erlaubt die Umsatzrate einen direkten Vergleich mit der Hydrodynamik eines Gebietes und läßt sich direkt mit dem Energiespektrum (Scherbeanspruchung) des Gebietes korrelieren (HOFSTEDÉ, 1991).

Die Unterteilung erfolgte zum einen in Bereiche, die durch anthropogene Eingriffe stark beeinflusst wurden, und zum anderen nach den morphologischen Parametern asymptotische Umsatzhöhe, Umsatzrate und morphologische Varianz β . Diese Parameter wurden ausgewählt, da sie folgende notwendige Aussagen zulassen:

1. Die asymptotische Umsatzhöhe ermöglicht in stabilen Gebieten, in denen $h_{\bar{b}}$ über größere Vergleichszeiträume um Null schwankt, eine Aussage über die maximalen Höhenänderungen, die in diesen Gebieten im langfristigen Trend auftreten können.
 2. Die Umsatzrate \bar{h}_u/a_0 , die in cm/Jahr beschrieben wird, entspricht der Steigung im Ursprung und gibt einen Anhaltswert über die mittlere jährliche Umlagerung zwischen zwei Aufnahmen.
 3. Die morphologische Varianz β entspricht dem reziproken Wert von a_0 und erlaubt eine Aussage über gleichbleibende Tendenzen und deren zeitlichen Rahmen.
- Gebiete, die durchgängig Hinweise auf anthropogene Einflüsse aufweisen, wurden separat analysiert und unter dem Aspekt „von anthropogenen Eingriffen stark beeinflusstes Gebiet mit säkularem Anstieg“ kategorisiert.

Tab. 6: Untergliederung des Außeneiderraumes in Teilgebiete unterschiedlicher Morphodynamik

Teilgebiet	\bar{h}_u (cm)	a_0 (Jahre)	$a_{0,9}$ (Jahre)	β	\bar{h}_u/a_0 (cm/Jahr)
Eiderrinnen (B1, B2, B3 / A3, A4, B4)	234 ($\pm 11,0$)	3,3 ($\pm 0,9$)	7,6	0,30 ($\pm 0,1$)	76,1 ($\pm 24,0$)
Wattstrombereich mit hoher Morphodynamik (B1/B2/B3)	233 ($\pm 14,4$)	2,5 ($\pm 0,6$)	5,8	0,42 ($\pm 0,1$)	97,2 ($\pm 24,0$)
Große Einheit B1	250 ($\pm 5,4$)	3	7	0,33	85
Große Einheit B2	225 ($\pm 3,7$)	1,8	4	0,56	125
Große Einheit B3	225 ($\pm 4,4$)	2,7	6	0,37	85
Wattstrombereich mit mittlerer Morphodynamik (A3/A4/B4)	230 ($\pm 9,0$)	3,8 ($\pm 0,4$)	8,7	0,26 ($\pm 0,02$)	60 (± 5)
Große Einheit A3	220 ($\pm 3,1$)	3,7	8,5	0,24	59
Große Einheit A4	235 ($\pm 3,9$)	4,3	10,0	0,23	55
Große Einheit B4	235 ($\pm 2,7$)	3,5	8,0	0,29	67
Bereich mit säkularem Anstieg (A1/A2)	608 ($\pm 10,6$)	12,1 ($\pm 0,2$)	27,8	0,08	50,2 ($\pm 0,3$)
Große Einheit A1	615 ($\pm 5,1$)	12	28,0	0,08	50
Große Einheit A2	600 ($\pm 12,6$)	12	27,6	0,08	50
Mündungsbereich zur Nordsee (C1)	330 ($\pm 7,3$)	8,7	20,0	0,11	38

Die Analyse der Ergebnisse ergibt eine Grobeinteilung des Gebietes in:

1. Wattströme (A3, A4, B1, B2, B3, B4),
2. Bereiche säkularen Anstiegs (A1, A2),
3. Mündungsbereich (C1).

Diese Einteilung ist bereits über eine Kategorisierung der asymptotischen Umsatzhöhen möglich. Die Parameter Umsatzrate, β und a_0 bilden eine Ergänzung der Kategorisierung. Der Bereich der Wattströme dagegen konnte insbesondere aufgrund der differierenden Morphodynamik einer weiteren Untergliederung unterzogen werden, was im Hinblick auf die

Lage der Einheiten und ihrer daraus resultierenden Dynamik und Beeinflussung durch das Sperrwerk auch ein notwendig differenziertes Bild des Eiderästuars mit sich brachte.

Wie in Tab. 6 erkennbar ist, liegt der Kernbereich höchster Morphodynamik mit einer Umsatzrate von 97 cm/Jahr 4 bis 10 km (B1/B2/B3) westlich des Sperrwerkes im Bereich der Südrinne des zweiarmigen Mündungssystems. Deutlich geringer wird die Morphodynamik im abgegrenzten Raum vom Sperrwerk bis zum Durchstich. Unterschiede im Rahmen der Kategorie Wattströme mittlerer Morphodynamik zwischen Nord- und Südrinne im Sperrwerksbereich konnten die Berechnungen nicht nachweisen, so daß das Gebiet als ein in sich geschlossener Komplex betrachtet werden kann. Im Übergangsbereich vom Eiderästuar zum Seegebiet der Nordsee (C1) ist die geringste Morphodynamik mit einer Umsatzrate von nur 40 cm/Jahr und längerfristigen gleichbleibenden Tendenzen bei einem $a_{0,9}$ von 20 Jahren zu verzeichnen. Bemerkenswert ist, daß nur in den zwei Großen Einheiten A1 und A2, die den nach Durchdämmung verbliebenen Nordrinnenbogen umfassen, ein säkularer Anstieg zu verzeichnen ist.

6.2 Die Parameter der Wattströme der Außeneider im Vergleich mit Ergebnissen aus anderen Gebieten

Die in dieser Untersuchung gewählten Großen Einheiten entsprechen, mit Ausnahme des Mündungsbereiches C1 sowie A1 und A2, welche anthropogen verursachte Störungen aufweisen, der morphologischen Charakteristik „Wattströme“. Aufgrund der gezielt nach der Fragestellung angelegten Großen Einheiten konnte hier die morphologische Charakteristik „Wattstrom“ in den Mittelpunkt von Einheit und Berechnung gelegt werden, so daß keine zeitlich und räumlich fließenden Grenzen entstanden sind und somit die Charakteristik des Wattstroms unter besonderer Berücksichtigung von anthropogenen Einflüssen und der Hydrodynamik des Raumes berechnet werden konnte.

Tab. 7: Vergleich der MORAN-Ergebnisse der Eider mit SIEFERT (1987) und HOFSTEDE (1991)

	SIEFERT (1987) Scharhörner Watt	HOFSTEDE (1991) Scharhörner Watt	GÖNNERT (1995) Eider
Parameter	Wattströme	Haupttiderinnen	Eiderrinnen (A3, A4, B1, B2, B3, B4)
\bar{h}_u (cm)	140	212 (+/-126)	234 (+/-11)
a_0 (Jahre)	5,0	7,3 (+/-3,1)	3,3 (+/-0,9)
\bar{h}_u/a_0 (cm/Jahr)	30	31,1 (+/-6,5)	76,1 (+/-24)

Während SIEFERT (1987) für Wattströme noch eine asymptotische Umsatzhöhe von 140 cm berechnete, konnte HOFSTEDE (1991) bereits für die Haupttiderinnen des Seegatbereiches einen \bar{h}_u von 212 cm berechnen, wobei er allerdings eine Standardabweichung von +/-126 cm angibt (Tab. 7). Die Ursache für die erhebliche Differenz ist darin begründet, daß SIEFERT (1987) Kleine Einheiten aufgrund ihrer charakteristischen Lage ausgewählt hat, HOFSTEDE (1991) dagegen den gesamten Wattkomplex und damit auch Einheiten an räumlich und zeitlich fließenden Grenzen zwischen den Teilgebieten berücksichtigte. Für die Eiderrinnen konnte dagegen im Mittel ein asymptotischer Umsatzwert von 234 cm berechnet werden. Dieser Wert liegt innerhalb der Standardabweichung von HOFSTEDE (1991).

Ist bei der asymptotischen Umsatzhöhe noch eine relativ gute Vergleichbarkeit mit den Ergebnissen aus dem Neuwerk-Scharhörner Wattkomplex zu verzeichnen, zeigt sich bei der Umsatzrate bereits eine große Diskrepanz. Diese ist in der Außeneider doppelt so hoch wie im Neuwerk-Scharhörner Wattkomplex, was nicht ganz unerwartet ist. Es handelt sich bei den Haupttiderinnen von HOFSTEDE (1991) bzw. Wattströmen von SIEFERT (1987) nicht um dezidiert vergleichbare morphologische Bereiche. Die Rinnen der Außeneider zeigen z. B. eine hohe Dynamik hinsichtlich ihres Mäandrierungsverhaltens. Infolgedessen bieten sie eine große Angriffsfläche für die Tideströmung, die zu einer hohen Erosionstätigkeit an den jeweiligen Prallhängen und wiederum zu einer Sedimentationstätigkeit an den Gleithängen führt. Zusätzlich hat die Corioliskraft einen großen Einfluß, wodurch die „Mäandrierungsfreudigkeit“ unterstützt wird. Weiterhin darf nicht außer acht gelassen werden, daß bei der Einheitenwahl der Schwerpunkt auf die Wattrinnen gelegt wurde. Hierbei ist aber insbesondere die starke Verlagerung der Wattrinnen berücksichtigt und in ihrer maximalen Nord- und Südmäandrierung eingegrenzt worden. Zusätzlich wurde auch der gesamte Platenbereich in die Berechnung der Rinnen einbezogen. Dieser ist durch hohe asymptotische Umsatzhöhen bei einer etwas höheren Umsatzrate gekennzeichnet. In der Außeneider zeigt sich, daß die große Verlagerung der Rinnen direkt mit der Verlagerung der Platen einhergeht. Insbesondere am Rand von Rinne und Plate liegt ein häufiger Wechsel von Erosion und Sedimentation vor, der sich hier in den Berechnungen bemerkbar macht.

6.3 Die Höhenstabilität des Raumes und die Berechnung von Sensibilitätsphasen

Zur Berechnung von Höhenstabilität und sensiblen Phasen eines Raumes müssen neben den Umsatzwerten die Bilanzen berücksichtigt werden. Die Bilanzwerte im Gesamttraum der Außeneider weisen zunächst einen Sedimentgewinn auf. Ab $a = 5$ Jahre sind mit Ausnahme der Kartenvergleiche mit 1958 keine negativen Bilanzen zu verzeichnen (Abb. 9). Bei genauerer Betrachtung zeigt sich jedoch, daß in der Außeneider $|b_b|_{\max}$ erstmals nach 11 Jahren erreicht wird, allerdings erwartungsgemäß nicht mit einem linearen Anstieg verbunden. Bereits bei $a = 7$ Jahre beginnt h_b in Richtung Null zu tendieren. Weiterhin wird $|b_b|_{\max}$ bis $a = 20$ Jahre wiederholt erreicht.

Laut SIEFERT (1987) ist es möglich, einen Vergleichszeitraum $a(|b_b|_{\max})$ zu definieren, bei dem die höchsten Bilanzhöhen auftreten. Bezogen auf das Elbmündungsgebiet und ersten Vergleichen aus anderen Gebieten definiert er:

$$a(|b_b|_{\max}) = \text{rd. } 8 \text{ bis } 12 \text{ Jahre.}$$

Für den Außeneiderraum zeigt sich eindeutig, daß $|b_b|_{\max}$ mit 11 Jahren innerhalb dieses Zeitraumes liegt. Innerhalb der folgenden 10 Jahre sinkt $|b_b|$ leicht ab, um dann wieder anzusteigen auf $|b_b|_{\max}$.

Obwohl SIEFERT seine Annahme auf Kleine Einheiten von 1 km^2 Größe bezog, läßt sich diese auf die Gesamtberechnung der Außeneider übertragen. Weiterhin ergaben die Beträge der Bilanzen etwa 40 bis 50 % des Umsatzes und verzeichnen auch in den Maxima keine Steigerung. Somit läßt sich die These für die Außeneider bestätigen, daß im Zeitraum von 8 bis 12 Jahren die Maxima an Erosion und Sedimentation im Watt erfassbar sind, „deren Beträge (für $A = 1 \text{ km}^2$) 30–100 % des Umsatzes erreichen“ (SIEFERT, 1987: 47).

Bei Diskussion der Kurve und insbesondere des dynamischen Gleichgewichts ist m als

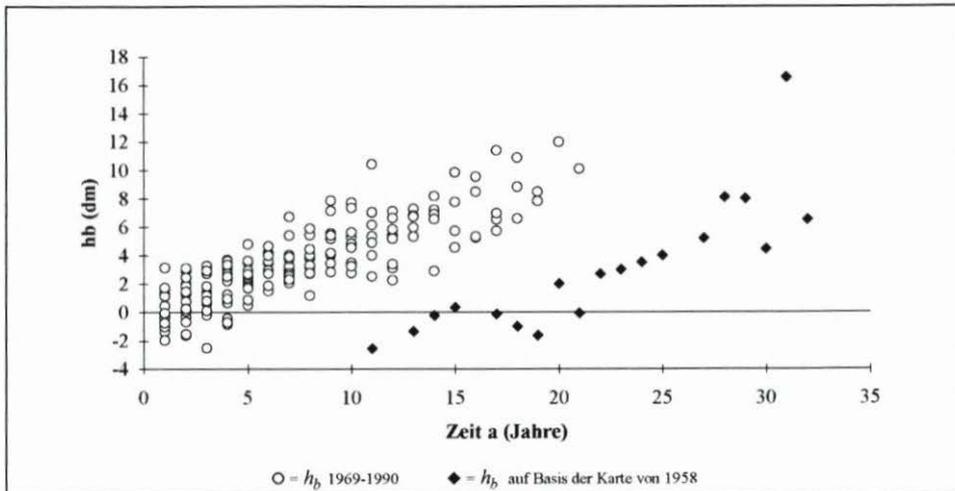


Abb. 9: Die Bilanzwerte der Außeneider: Sperrwerk (34.90) – Nordseemündung (34.80)

Vielfaches von a_0 , bei dem $h_b = 0$ angenommen werden kann, zu berücksichtigen. Dabei gilt: „Wenn ein Vergleichszeitraum so groß ist, daß die maßgebende Funktion $h_u = f(a)$ nachweislich den Bereich mit $h_u \approx \text{const.} \approx \bar{h}_u$ erreicht hat, so ist davon auszugehen, daß das Gebiet über diesen Zeitraum $a \geq m * a_0$ höhenstabil ist, kürzere Zeiträume aber durchaus Höhenänderungen zulassen“ (SIEFERT, 1987: 12) (Abb. 11). Bei Berechnungen über längere Zeiträume wird dagegen die Bilanzauswertung kleinere h_b liefern. In diesem Fall wird m definiert mit

$$m = 2 * a (|b_b|_{\max})/a_0,$$

da nach Erreichen von $|b_b|_{\max}$ die maximalen Bilanzhöhen quasi-periodischen Schwankungen unterliegen müßten (SIEFERT, 1987: 47) (Abb. 10).

Wird diese Annahme auf das Außeneidergebiet übertragen, so hieße das:

$$\begin{aligned} m &= 2 * 11/4,4 \\ m &= 5. \end{aligned}$$

Bei einem Vergleichszeitraum für die Außeneider $a \geq m * a_0 = 22$ Jahre weist das Untersuchungsgebiet eine Höhenstabilität auf. Beträgt der Vergleichszeitraum dagegen, wie in der Berechnung der Jahrgänge 1969–1990, 21 Jahre, können die Funktionen $h_u = f(a)$ und $|b_b|_{\max} = f(a)$ so angeschnitten werden, daß sie keine gleichgewichtigen Aussagen für h_u und h_b zulassen. Dies ist vor allem dann relevant, wenn a_0 und \bar{h}_u von Gebiet zu Gebiet wechseln, was in der Außeneider (mit Ausnahme der Einheiten A1 und A2) jedoch nicht der Fall ist. Weiterhin zeigen die Umsätze deutlich konstante Werte um den berechneten \bar{h}_u . Werden zusätzlich die Vergleiche mit 1958 herangezogen, bleibt in der Gesamtberechnung die Ausgangsbedingung $h_u \approx \text{const.} \approx \bar{h}_u$ erhalten. Die Voraussetzungen zur Berechnung der Höhenstabilität des Raumes (a mit 32 Jahren $\geq m * a_0$) sind somit gegeben. Das Untersuchungsgebiet ist bei $a \geq 22$ Jahren höhenstabil.

Es ist zu berücksichtigen, daß innerhalb des Untersuchungszeitraumes zwei Eingriffe zu verzeichnen sind, wobei der zweite bei $a = 10$ Jahren erfolgte (d.h. in der Hälfte des berech-

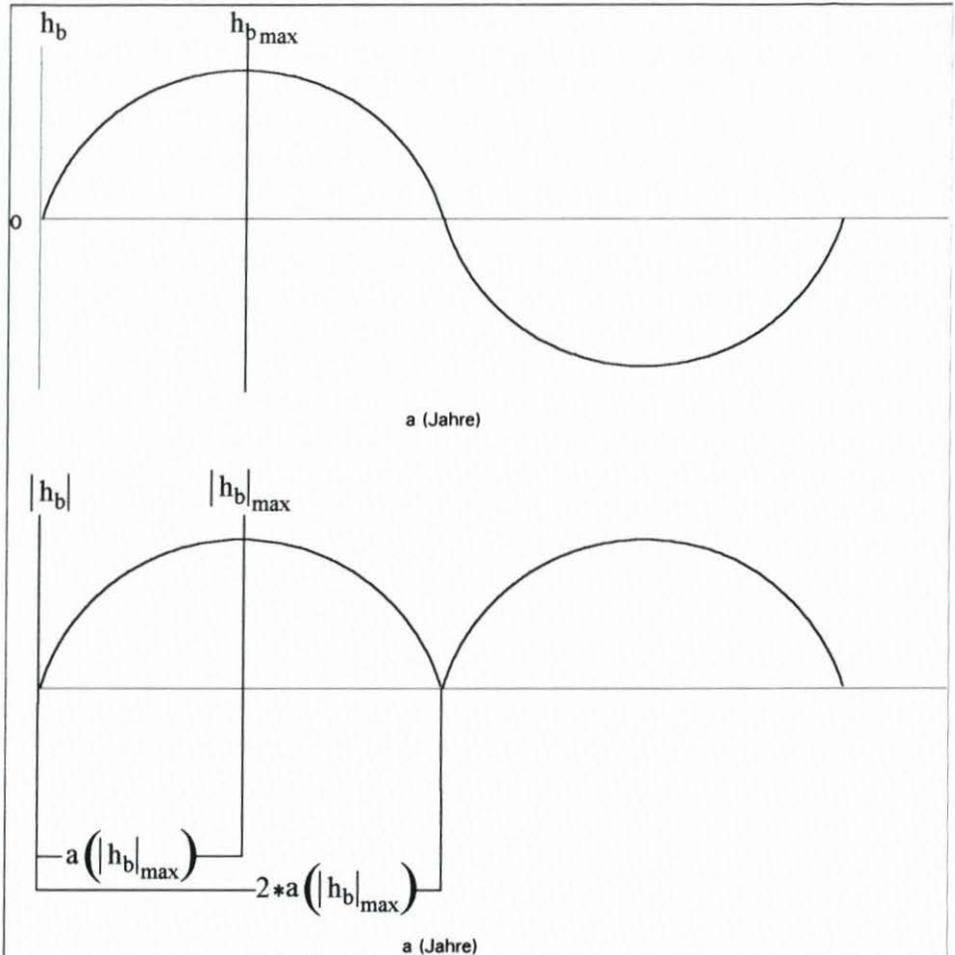


Abb. 10: Periodischer Verlauf der Bilanzen nach Erreichen von $h_{b\max}$ und $|h_b|_{\max}$

neten Zeitraumes unter Auslassung der Kartenvergleiche mit 1958). Es kann aber angenommen werden, daß

$$m = (2 * a (|h_b|_{\max}/a_0))/2$$

$$m = a(|h_b|_{\max})/a_0$$

d. h. $m = 2,5$

gewesen wäre, wenn es nicht zu einem weiteren Eingriff gekommen wäre. Verglichen mit den topographischen Ereignissen im Gelände ist auffällig, daß bis 1975 eine stetige Sedimentation vorlag, die dann erstmalig in Erosion wechselte. In einfacher Übertragung der Berechnungen bedeutet dies, daß sich bei $m = 2,5$ das Gebiet in Höhenstabilität und sich damit theoretisch in einem dynamischen Gleichgewicht bei

$$a \geq m * a_0$$

$$a \geq 2,5 * 4,4$$

$$a \geq 11 \text{ Jahre}$$

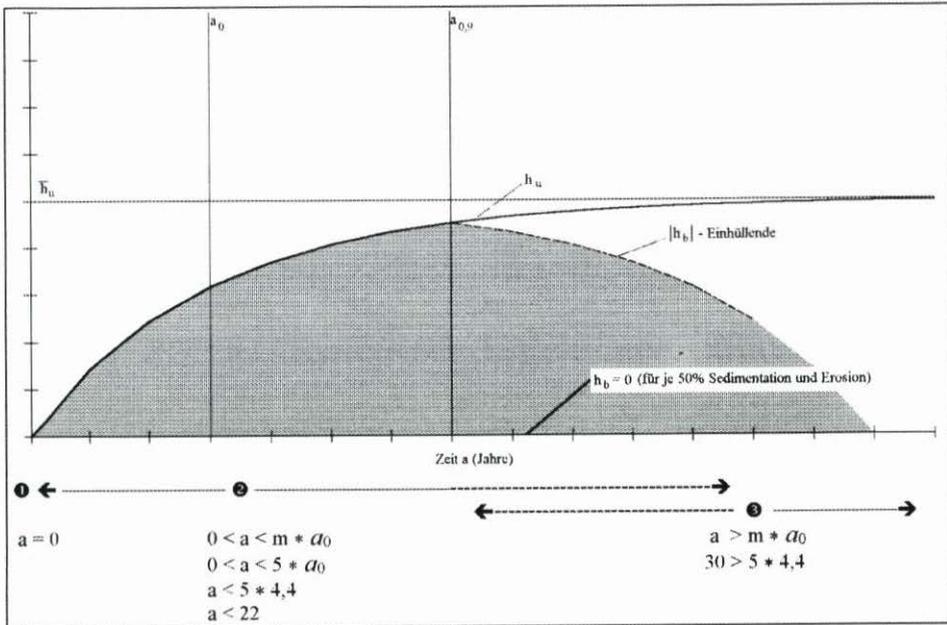


Abb. 11: Skizze zur Beschreibung der Umsatz- und Bilanzhöhen mit Sättigungsfunktion und der drei unterschiedlichen Bereiche zur Erläuterung von m (teilw. aus SIEFERT, 1987: 12)

einpendeln würde. Dementsprechend müssten die Bilanzen zum Zeitpunkt von ca. 5,5 Jahren die Richtung wechseln und gegen Null tendieren, was durch Beginn der Erosion 1975 angezeigt ist. Der Eingriff von 1979 unterbrach jedoch den Prozeß eines Einpendelns auf ein dynamisches Gleichgewicht und setzte einen erneuten Impuls in Richtung Sedimentation (Abb. 12).

Werden weiterhin die topographischen Geschehnisse zugrunde gelegt, kann an dem Teilbereich vom Sperrwerk bis zum Durchstich nachgewiesen werden, daß sich auch im Gesamtgebiet ein dynamisches Gleichgewicht und eine Änderung der Topographie eingestellt hätten (Abb. 6). Demnach kann die Erosion von 1975–1979 als ein Einstellen auf ein dynamisches Gleichgewicht gedeutet werden. Nach Aufschüttung des Sanddammes ist acht Jahre später ein erneutes Einpendeln auf ein dynamisches Gleichgewicht zu beobachten, was mit dem berechneten $a_{0,9}$ von 10,2 Jahren korreliert.

Mittels der o. g. Berechnungen kann von einer rechnerischen Höhenstabilität ab 11 Jahren und einem beginnenden dynamischen Gleichgewicht ab 10 Jahren ausgegangen werden. Werden weiterhin die Umsatzwerte betrachtet, so ist auffällig, daß für die Gesamtuntersuchung des Eiderästuars sich sowohl die Funktion

$$dh_u / da (a = 0) = \bar{h}_u / a_0$$

als auch

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

als auch die asymptotische Horizontale durch Verlauf der Umsätze „von selbst“ ergibt: Wegen der erfüllten Voraussetzung, daß sich ein Gebiet dann in einem dynamischen Gleichge-

wicht befindet, wenn sich eine asymptotische Horizontale berechnen läßt, befindet sich das Eiderästuar nach dem Bau des Sperrwerkes und des Sanddammes wieder in einem dynamischen Gleichgewicht. Insbesondere die Berechnungen der Bilanzen zeigen, daß die Überlagerung der Auswirkungen der Abdämmung bei Nordfeld durch den Bau des Sperrwerkes ganz offensichtlich einen Impuls zu weiterer Sedimentation gegeben hat. Die Berechnung des dynamischen Gleichgewichtes erlaubt jedoch auch die These, daß die Sedimentation nach Bau des Sperrwerkes eine verspätete Auswirkung der Abdämmung bei Nordfeld bedeutet, wie es PARTENSKY (1983) sieht, das Sperrwerk selbst jedoch kaum Auswirkungen auf das dynamische Gleichgewicht des Raumes hatte. Des weiteren hat der Sanddambau das Einpendeln auf ein dynamisches Gleichgewicht erneut unterbrochen und führte zu einem erneuten Sedimentationsimpuls.

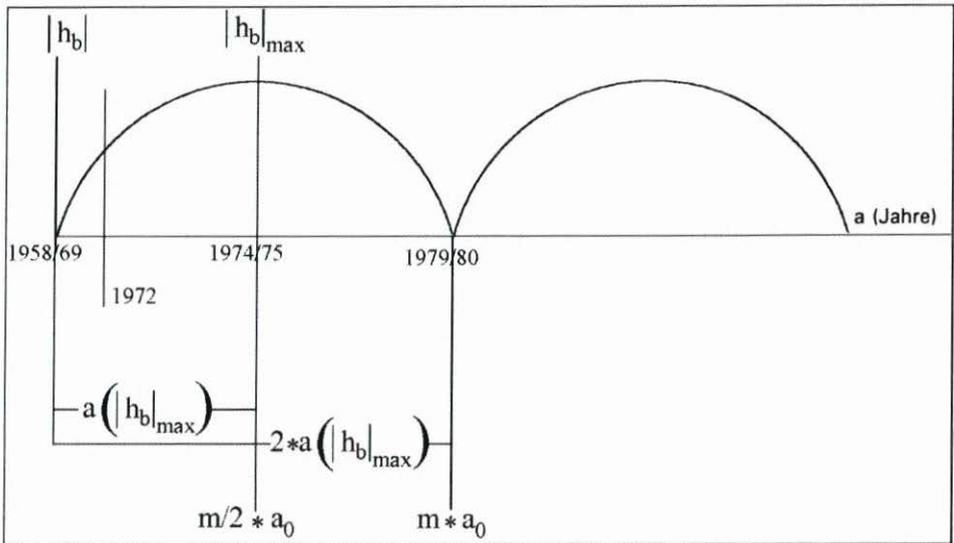


Abb. 12: Anwendung der theoretischen Betrachtung auf die Phasen der Außeneider

Wird die Grundbedingung, daß ein Gebiet im dynamischen Gleichgewicht bezogen auf Erosion und Resedimentation ausgeglichen ist (Abb. 10), mit den theoretischen Berechnungen von m und der Übertragung der topographischen Veränderung in den jeweiligen Zeiträumen in einen Zusammenhang gestellt, so kann abgeleitet werden, daß bei $(m/2) * a_0$ und bei Erreichen von $m * a_0$ das Gebiet sich in einer „sensiblen“ Phase befindet (Abb. 10 u. 12). Dies entspricht den Zeitpunkten, in denen sich ein Gebiet jeweils im Rahmen der periodischen Schwankungen in den Umbruchsphasen befindet, also von $|h_b|_{\max}$ in Richtung $h_b = 0$ und von $h_b = 0$ wieder zu $|h_b|_{\max}$.

Der Begriff „sensible“ Phase beinhaltet, daß sich zu diesem Zeitpunkt Eingriffe durch deutliche und sofortige Veränderungen der Morphologie bemerkbar machen. Dagegen sind Eingriffe in zwischenzeitlichen Phasen geprägt durch verspätete oder geringere morphodynamische Reaktionen. Werden z. B. die Ergebnisse der Untersuchung von PARTENSKY (1983) betrachtet, so gibt er nach Bau des Sperrwerkes bei Nordfeld für die Außeneider eine zeitliche Verzögerung der Reaktion auf die Baumaßnahme von 12 Jahren an. Die Reaktion war hier Sedimentation, wobei es sich um den Zeitraum ab 1947 handelt. Die Angabe von

12 Jahren entspricht etwa der genannten Berechnung. Im Untersuchungsgebiet lag der Bau des Sperrwerkes in einer Phase beginnender Stabilität, was sich durch die Möglichkeit der Berechnung der Asymptote nachweisen läßt. Dagegen befand sich das Untersuchungsgebiet zur Zeit des Sanddammbaus bei $m * a_0$ in einer „sensiblen“ Phase und wurde somit sofort in eine neue Instabilität versetzt.

Werden weiterhin die Ergebnisse einer Teilberechnung des Eiderästuars von HOFSTEDE (1991) mit herangezogen, kann das Ergebnis einer nur zeitweiligen Beeinflussung des dynamischen Gleichgewichtes bestätigt werden, und es zeigt sich, daß der Eingriff bei $m * a_0$ eine sofortige Beeinträchtigung des dynamischen Gleichgewichtes mit sich brachte. HOFSTEDE (1991) untersucht 13 topographische Aufnahmen aus dem Zeitraum 1971–1989 mit einer Gesamtfläche von 16 km² und teilt, in Anlehnung an SIEFERT (1984), die Umsatzwerte in drei zeitliche Abschnitte ein: 1971–1979 und 1985–1989 sowie davon getrennt 1979–1985. Für 1971–1979 und 1985–1989 postuliert HOFSTEDE ein dynamisches Gleichgewicht, für das die asymptotische Umsatzhöhe zusammengefaßt ermittelt werden kann. Er berechnet ein \bar{h}_u von 238 cm bei einem a_0 von 3,8 Jahren und einer Umsatzrate von 61 cm/Jahr. Obwohl für wenige Jahrgänge und einen kleineren Bereich berechnet, zeigen sich hier erstaunliche Parallelen zur vorliegenden Arbeit. Auffällig ist insbesondere, daß auch in dieser Untersuchung keine nennenswerte Störung des dynamischen Gleichgewichtes aufgrund des Sperrwerkbaus festgestellt werden konnte. Dagegen stellte er fest, daß aufgrund des Sanddammbaus zwischen 1979 und 1985 eine deutliche Verkleinerung von \bar{h}_u bei Verdoppelung der Umsatzrate auf 122 cm/Jahr erfolgte.

Die Darstellung der Störung des dynamischen Gleichgewichtes infolge des Sanddammbaus und der künstlichen Nordrinnenumlenkung (1979–1985) zeigt auf, daß der Eingriff bei $m * a_0$ zu einer heftigen und sofortigen Reaktion führt. Bei $m * a_0/2$, d. h. nach 5,5 Jahren, beginnt sich das dynamische Gleichgewicht ab etwa 1985 einzupendeln, weshalb HOFSTEDE den Vergleichszeitraum 1985–1989 ausgliedern und dementsprechend dem dynamischen Gleichgewicht von 1970–1979 zuordnen konnte. Insgesamt bilden diese Ergebnisse eine Ergänzung zu folgender Erkenntnis:

Das Sperrwerk bewirkte für größere Bereiche des Außeneiderraumes keine Störung des dynamischen Gleichgewichtes. Demzufolge geben die topographischen Veränderungen, die in der Außeneider zu einer Gefährdung von Deich und Mensch hätten führen können, nicht an, ob das dynamische Gleichgewicht gestört wurde oder nicht. Vielmehr können dies Veränderungen im Rahmen eines natürlichen dynamischen Gleichgewichtes sein.

6.3.1 Diskussion: Beeinflussung der Morphodynamik aufgrund der künstlichen Störung

In der vorliegenden Analyse des Außeneiderraumes konnte ein dynamisches Gleichgewicht über das MORAN-Verfahren ermittelt werden. Weiterhin konnte durch Berechnung von m und der Analyse der Bilanzergebnisse festgestellt werden, daß bei $m * a_0$ und bei $m * a_0/2$ das Untersuchungsgebiet sich in einer „sensiblen“ Phase befindet, in der durch Eingriffe stärkere Störungen des dynamischen Gleichgewichtes hervorgerufen werden als in den Zeiträumen zwischen diesen Phasen.

Diesen Erkenntnissen stehen folgende Argumente gegenüber:

1. Das Gebiet unterliegt insgesamt einem Sedimentgewinn. Von einem dynamischen Gleichgewicht kann nur dann gesprochen werden, wenn über längere Zeiträume $h_b = 0$ wird. In Gebieten mit hoher Morphodynamik kann jedoch auch $|h_b| = h_u$ werden. Als Gegen-

argument muß jedoch berücksichtigt werden, daß, wie in der Wasserraumentwicklung bereits angesprochen, der Eiderraum grundsätzlich einem Sedimentgewinn unterliegt (Abb. 3). So kann dies als ein Sedimentgewinn innerhalb eines dynamischen Gleichgewichtes betrachtet werden.

2. Der Berechnungszeitraum beginnt mit den Baumaßnahmen 1969. Es könnte somit angenommen werden, daß der Störungszeitraum in sich als ein dynamisches Gleichgewicht berechnet wurde, das von einem natürlichen dynamischen Gleichgewicht abweicht.

Dies kann nicht der Fall sein, da die Einheiten A1 und A2 deutlich eine Störung des dynamischen Gleichgewichtes aufweisen. Der Sedimentgewinn ist hier derartig hoch, daß kein \bar{h}_u berechnet werden kann. Es kann somit kein dynamisches Gleichgewicht innerhalb einer Störung berechnet werden, sondern es ist davon auszugehen, daß sich das Gebiet bei Berechnung von \bar{h}_u im Gleichgewicht befindet.

3. Demgegenüber steht die Aussage von PARTENSKY (1983), der von einer Überlagerung der Auswirkungen der Bauwerke Nordfeld und Hundeknöll spricht. Demzufolge ist die Sedimentation mit den Bauwerken in Verbindung zu setzen, und es kann nicht von einem dynamischen Gleichgewicht gesprochen werden.

Diese Ergebnisse von PARTENSKY (1983) beziehen sich allein auf die Volumenermittlung und beziehen nicht die Berechnung des dynamischen Gleichgewichtes etwa nach seinen Stabilitätskriterien oder aber, wie hier, über das MORAN-Verfahren mit ein. Wie in GÖNNERT (1995) nachgewiesen wird, kann von der Bilanzentwicklung allein nicht auf das dynamische Gleichgewicht geschlossen werden. Infolgedessen muß der Sedimentgewinn im Untersuchungsgebiet, wie in Punkt 1 diskutiert, berücksichtigt und interpretiert werden. Auf die Aussage, daß das Gebiet sich deshalb nicht im dynamischen Gleichgewicht befindet, kann damit aber nicht unmittelbar rückgeschlossen werden.

Bereits bei der Analyse des gesamten Untersuchungsgebietes wird deutlich, daß im Eiderästuar insbesondere die Wattströme eine große topographische und morphologische Dominanz aufweisen. Wie in den Ergebnissen der Gesamtberechnung deutlich zum Ausdruck kommt, bestimmen sie erheblich das morphologische Gefüge und die Morphodynamik.

6.3.2 Berechnung der Sensibilitätsphasen für ausgewählte Einheiten im Sperrwerksbereich

Am Beispiel der Einheiten A3, A4 und B4 wird die Möglichkeit geprüft, Sensibilitätsphasen für kleinere Bereiche zu berechnen. Die gewählten Einheiten liegen im Sperrwerksbereich und können als ein in sich geschlossener Komplex betrachtet werden. Sie unterlagen starken anthropogenen Eingriffen und können charakterisiert werden als Wattströme mit einer mittleren Morphodynamik.

Die Große Einheit A3, die sowohl als Bereich des Durchstichs als auch als vormaliger Bereich des Südmänders der Nordrinne bezeichnet werden kann, zeichnet sich durch eine Umsatzrate von fast 60 cm/Jahr aus (Abb. 13).

In B4 liegt die höchste Morphodynamik mit 67 cm/Jahr vor (Abb. 14). Dies ist mit der Lage der Einheit direkt am Sperrwerk zu erklären. Hier bündelt sich der gesamte Flut- und Ebbestrom und wird durch eine verengte Öffnung – das Sperrwerk – geführt. Ebbe- und Flutstrom verlaufen in einem relativ schmalen Bett aneinander vorbei. Diese Bündelung kann zu einer Beschleunigung der Strömungsgeschwindigkeit führen, die sich unmittelbar hinter dem Sperrwerk in erhöhter Morphodynamik auswirkt.

In A4 (Abb. 15) sind β mit 0,23 und die Umsatzrate mit 55 cm/Jahr für diesen Teilbe-

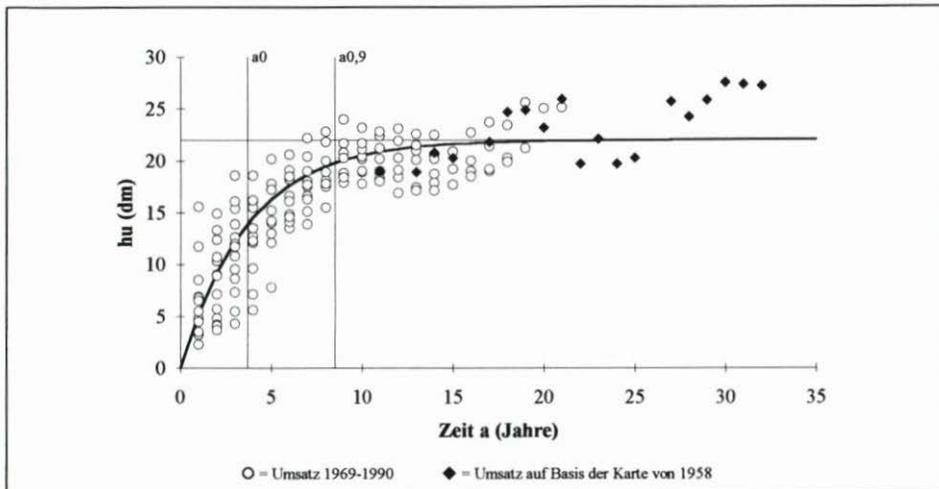


Abb. 13: Umsatzkurve A3: $\bar{h}_u = 220$ cm, $a_0 = 3,7$ Jahre, $a_{0,9} = 8,5$ Jahre, $\bar{h}_u/a_0 = 59$ cm/Jahr

reich der Außeneider am kleinsten. Dies ist zunächst erstaunlich, da auch hier hohe Scherbeanspruchung in den Rinnen vorliegt. Insbesondere nach Bau des Sanddammes entstand jedoch ein mehr oder minder geschlossenes System zwischen dem Sanddamm und der Deichlinie bei Hundeknöll, welches zu einer Verringerung des Energiespektrums geführt hat. Vermutlich wird sich nach Beendigung der Sedimentation ein neues dynamisches Gleichgewicht in Anpassung an den erneuten Volumenbedarf mit verringertem Energieeinfluß einstellen.

Die Einheiten A4 und B4 stehen in enger Wechselbeziehung zueinander. Während in A4 (Nordrinne) zunächst Erosion und Verlagerung der Watrinne erfolgte, lag in B4 (Südrinne) eine Verengung und Sedimentation vor. Seit 1979 übernahm die Südrinne nach dem Sand-

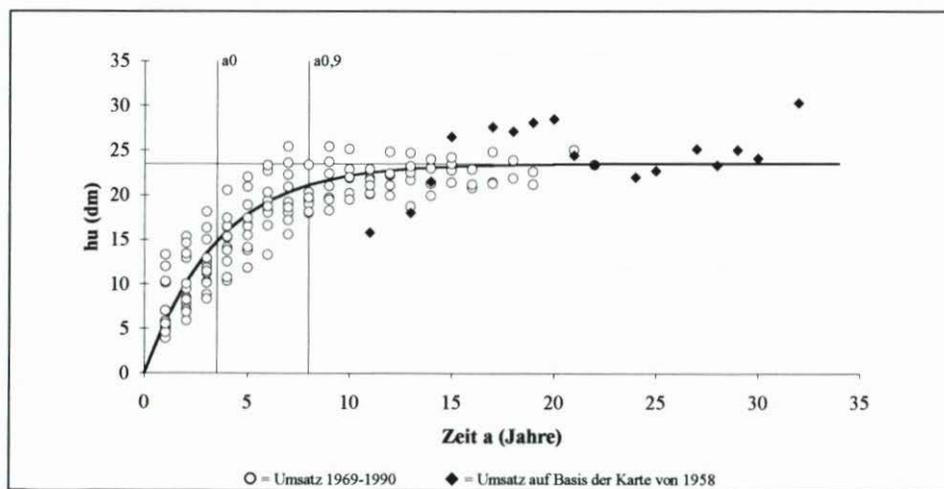


Abb. 14: Umsatzkurve B4: $\bar{h}_u = 235$ cm, $a_0 = 3,5$ Jahre, $a_{0,9} = 8$ Jahre, $\bar{h}_u/a_0 = 67$ cm/Jahr

dammbau den Großteil des Ebbestroms und verbreiterte sich, während die verminderte Strömung in der Nordrinne eine Sedimentation bewirkte. Demzufolge unterlagen die Einheiten anthropogenen Beeinflussungen, die jeweils entgegengesetzte Impulse bewirkten. Es ist hier jedoch anzumerken, daß diese Tendenzen bereits vor dem Bau des Sperrwerkes vorlagen. So zeigte sich in der Nordrinne bereits seit 1958 eine deutliche Erosion bei einem Sedimentgewinn für den gesamten Raum. Weiterhin lag bereits vor Aufschüttung des Sanddammes eine Sedimentation in der Nordrinne seit 1977 vor und eine beginnende Erosion in der Südrinne seit 1976. Somit befand sich das Gebiet auch topographisch vor Aufschüttung des Sanddammes in einer „sensiblen“ Umstrukturierungsphase, was durch die Berechnung von m nachweisbar ist.

In den Einheiten A4 und B4 zeigt sich, daß der asymptotische Umsatzwert mit 235 cm in beiden Einheiten gleich hoch ist (Abb. 15 u. 13). Dies bestätigt die Annahme, daß dieser Bereich, trotz auf den ersten Blick völlig differierender topographischer Reaktionen, ähnlichen Einflußfaktoren und einer daraus resultierenden maximalen Umlagerung unterliegt. Das Ergebnis liegt trotz der massiven Eingriffe deutlich im Bereich der asymptotischen Umsatzhöhen der Wattströme.

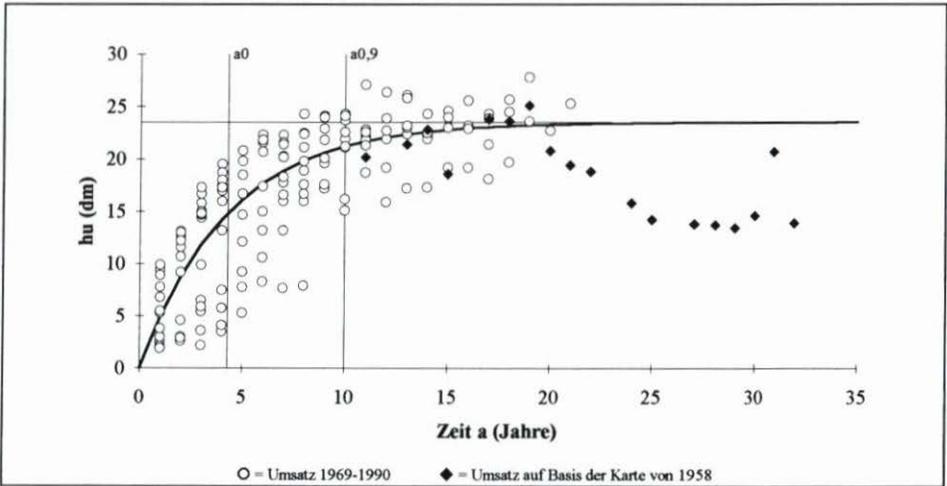


Abb. 15: Umsatzkurve A4: $\bar{h}_u = 235$ cm, $a_0 = 4,3$ Jahre, $a_{0,9} = 10$ Jahre, $\bar{h}_u/a_0 = 55$ cm/Jahr

Für $a_{0,9}$ liegen in A4 mit 10 Jahren und in B4 mit 8 Jahren längerfristige, gleichbleibendere Tendenzen als im Übergangsbereich A3 vor. Es wäre somit anzunehmen gewesen, daß der gleichbleibende Trend der Nordverlagerung nur noch im geringen Umfang angehalten hätte, wäre der Sanddamm nicht gebaut worden, da das dynamische Gleichgewicht in A4 zu 90 % innerhalb von 10 Jahren erreicht worden wäre, in B4 nach 8 Jahren, und damit wäre auch ein Wechsel in der gleichbleibenden Tendenz erfolgt. Dies kann über Berechnung von m bestätigt werden. In A4 wäre $m = 2$, was ein $h_b = 0$ bei 8,4 Jahren bedeuten würde. Für die ersten 8 Jahre trifft dies in A4 auch zu. Das würde bedeuten, daß der Bereich vom Sperrwerk bis 4 km westlich eine Höhenstabilität und ein dynamisches Gleichgewicht aufweist. Es kann damit abgeleitet werden, daß die beschriebene Tendenz der Verlagerung der Nordrinne nach Norden innerhalb der nächsten Jahre geendet und sich ein neues morphologisches Gefüge gebildet hätte. Erst bei $2 * (m * a_0)$ trifft dies nicht zu, was mit dem Sanddammbau im Zu-

sammenhang steht. Das jetzt einsetzende Einpendeln auf ein dynamisches Gleichgewicht muß bei Verkleinerung des Wateinzugsgebietes aufgrund des Sanddammbaus länger andauern als in „ungestörten“ Phasen, da hier völlig neue topographische und morphodynamische Bedingungen geschaffen wurden. Offensichtlich hat das Gebiet auf das Sperrwerk ohne jegliche Störung reagiert, auf den Sanddamm jedoch mit deutlicher Irritation des dynamischen Gleichgewichtes.

In B4 ist $a_0 = 3,5$ Jahre. Der Faktor $m = 2$, d. h. das Gleichgewicht tritt über einen Zeitraum von 7 Jahren ein. Dies bestätigt, daß die Südrinne sich bereits in einem Gleichgewicht befindet, wobei entsprechend der Umlagerungsintensität Änderungen der Topographie eingeschlossen sind. Die Bilanz bewegt sich in dieser Einheit um Null mit negativem Trend. Dies ist damit zu erklären, daß aufgrund der Durchdämmung der Nordrinne eine neue morphologische Situation entstanden ist, die insbesondere die Südrinne mit Aufnahme des Großteils der Wassermengen und damit verbundener Erosion betrifft. Daher gibt der anthropogen induzierte Wechsel von Sedimentation zu Erosion in der Südrinne ein scheinbares Schwanken um Null, d. h. ein dynamisches Gleichgewicht an.

In der Nordrinne (A4) hingegen weisen die Bilanzen einen positiven Trend auf. Die anthropogen induzierte Sedimentation aufgrund des Sanddammbaus und die damit verbundene künstliche Entstehung eines neuen, verkleinerten Wateinzugsgebietes liefern hierzu Erklärungen.

In A3 zeigt sich ein kontinuierlicher Kurvenverlauf, der durch eine gleichmäßige Punkterverteilung vorgegeben wird (Abb. 14). Insbesondere die Vergleiche des Jahrgangs 1969 mit den Jahrgängen von 1988, 1989 und 1990 ergeben, bezogen auf die Bilanz, daß die Punkte bei diesen Jahresvergleichen deutlich die Tendenz haben, gegen Null zu gehen.

Aus den Umsatz- und Bilanzvergleichen ergibt sich, daß die Inbetriebnahme des Sperrwerkes im Bereich A3 kaum Einfluß auf das dynamische Gleichgewicht hatte, obwohl die topographischen Folgen für den Menschen ausgeprägt waren. Dies wird besonders ersichtlich, wenn die Daten von 1958 unter Berücksichtigung des Datensprunges miteinbezogen werden. Hier spiegeln die Bilanzvergleiche des Jahrgangs 1958 mit den Jahrgängen 1969–1979 die periodischen Schwankungen wider, die Kartenvergleiche von 1958 mit denen von 1980–1990 einen von den periodischen Schwankungen abweichenden Trend. Auch die Kartenvergleiche der Umsätze weisen bei Inbetriebnahme des Sperrwerkes $\bar{h}_u \approx \text{const.} \approx h_u$ auf. Dagegen bestätigt HOFSTEDE (1991) die Störung durch Nachweis einer Steigerung der Morphodynamik nach Durchdämmung der Nordrinne. Entsprechend der Analyse der Höhenstabilität für das gesamte Untersuchungsgebiet läßt sich auch für A3 nachweisen, daß sich das Untersuchungsgebiet bei Aufschüttung des Sanddammes und Schaffung einer neuen Verbindung zwischen Nord- und Südrinne (1979) in einer „sensiblen“ Phase befand. In A3 wird $|b_b|_{\text{max}}$ bei 10 Jahren erreicht; es liegt ein a_0 von 3,7 Jahren vor. Das bedeutet, daß

$$\begin{aligned} m &= 2 * a \left(|b_b|_{\text{max}} / a_0 \right) \\ m &= 2 * 10 / 3,7 \\ m &= 5,4 \end{aligned}$$

für den gesamten Untersuchungszeitraum beträgt. Da zwei anthropogene Eingriffe vorlagen, ist

$$m = 2,7.$$

Bei $m * a_0$ kann von einer Höhenstabilität des Raumes ausgegangen werden, nach der das Gebiet periodischen Schwankungen unterliegen müßte und sich in der Umbruchsituation in einer „sensiblen“ Phase befindet. Dies trifft demzufolge in A3 bei 10 Jahren und bei $m/2 * a_0$ zu, also bei 5 Jahren. Die Störung 1979 erfolgte somit im Umbruch der periodischen

Schwankungen, die im Untersuchungsgebiet stark ausgeprägt sind. Der Untersuchungsabschnitt A3 befand sich in einer „sensiblen“ Phase, als der Sanddamm aufgeschüttet wurde, was zu einer Störung der Morphodynamik führte. Aus den Ergebnissen wird daneben deutlich, daß die aufgeführten topographischen Veränderungen nicht zwingend mit einer Störung der Morphodynamik erklärt werden können bzw. dürfen.

Zusammenfassend läßt sich somit festhalten, daß es sowohl für großräumige Untersuchungen als auch für kleinräumige möglich ist, Sensibilitätsphasen mit dem MORAN-Verfahren für ein Gebiet zu ermitteln. Notwendig sind hierzu jedoch langfristige Berechnungen, um die quasi stochastischen Prozesse im Gleichgewicht erfassen zu können. Anzumerken ist, daß die vorliegende Untersuchung sich auf das kleinste Ästuar in der Deutschen Bucht bezieht und vertiefende Studien in anderen Ästuarien und Tideflüssen notwendig sind.

7. Schriftenverzeichnis

- ALW HEIDE (= Amt für Land- und Wasserwirtschaft Heide), Abteilung Wasserwirtschaft: Teilsachstandsbericht Eider. Büsum, (Büsumer Gewässerkundliche Berichte, 52, unveröffentlicht), 1986.
- GÖHREN, H.: Über die Genauigkeit der küstennahen Seevermessung nach dem Echolotverfahren. In: Hamburger Küstenforschung, 2: 67-100, 1968.
- GÖHREN, H.: Untersuchungen über die Sandbewegungen im Elbmündungsgebiet. Hamburg, (Hamburger Küstenforschung, 19), 1971.
- GÖNNERT, G.: Morphologische Untersuchungen für das Seegat Vlie. In: Essener Geographische Arbeiten, 17: 57-89, 1989.
- GÖNNERT, G.: Mäandrierung und Morphodynamik im Ästuar am Beispiel der Eider. Berlin (Berliner geographische Studien, 42), 1995.
- GROTHENN, D.: Untersuchungen zur Wattvermessung. Hannover (Wissenschaftliche Arbeit des Institutes für Geodäsie und Photogrammetrie der Technischen Hochschule Hannover, 23), 1964.
- HOFSTEDE, J. L. A.: Hydro- und Morphodynamik im Tidebereich der Deutschen Bucht. Berlin (Berliner geographische Studien, 31), 1991.
- LUCHT, F.: Die Sandwanderung im unteren Tidegebiet der Elbe. In: Deutsche Hydrographische Zeitschrift, (6)4/5/6: 186-207, 1953.
- MARNITZ, U.: Über den Einfluß baulicher Veränderungen in der Elbe auf die Morphologie im Gebiet Mühlenberger Loch/Hahnöfer Nebenelbe. Hamburg (Staatsexamensarbeit, unveröffentlicht), 1991.
- PARTENSKY, H. W.: Untersuchungen über die Herkunft der Sedimente infolge von flutraumverändernden Baumaßnahmen in Watt-Priel-Systemen und Morphologische Untersuchungen im Außeneiderbereich. Hannover, (unveröffentlicht), 1983.
- SCHLEIDER, W.: Das Peilwesen der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes im Küstengebiet. In: Der Seewart, 6: 261-270, 1981.
- SIEFERT, W.: Morphologische Analysen für das Knechtsandgebiet (Pilotstudie des KFKI-Projektes MORAN). In: Die Küste, 38: 1-57, 1983.
- SIEFERT, W.: Hydrologische und morphologische Untersuchungen für das Mühlenberger Loch, die Außeneste und den Neßsand. Hamburg (Hamburger Küstenforschung, 43), 1984.
- SIEFERT, W.: Umsatz- und Bilanzanalysen für das Küstenvorfeld der Deutschen Bucht. In: Die Küste, 45: 1-57, 1987.
- WIELAND, P.: Die Eiderabdämmung. Büsum (unveröffentlicht), 1990.
- WIELAND, P. u. THIES, E.: Methoden der Wattvermessung an der schleswig-holsteinischen Westküste. In: Wasserwirtschaft, 65: 194-198, 1975.

8. Symbolverzeichnis

Symbol	Begriffsbestimmung	Einheit
a	Vergleichszeitraum (Zeitdifferenz zwischen zwei topographischen Aufnahmen)	Jahr
a_0	Zeitraum, in dem \bar{b}_u bei gleichsinniger, linearer Veränderung der Topographie der Teilflächen einer Einheit erreicht würde	Jahr
$a_{0,9}$	Zeitraum bis zum Erreichen von $0,9 * \bar{b}_u$	Jahr
h'	Höhenänderung einer Teilfläche von 1 ha Größe ($h'_u = h'_b = h'_s =$ bzw. h'_c)	cm
h_e	mittlere Erosionshöhe einer definierten Fläche	cm
h_s	mittlere Sedimentationshöhe einer definierten Fläche	cm
h_b	mittlere Bilanzhöhe einer definierten Fläche	cm
\bar{h}_b	h_b hervorgehend aus Kartenvergleichen 1958 mit 1969–1990	cm
\hat{h}_b	h_b hervorgehend aus Kartenvergleichen 1969–1989 mit 1970–1990	cm
$a(h_b _{\max})$	Zeitraum für das Erreichen der höchsten Bilanz-Beträge	Jahr
h_u	mittlere Umsatzhöhe einer definierten Fläche	cm
\bar{h}_u	asymptotischer Grenzwert von h_u (= mittlere asymptotische Umsatzhöhe)	cm
$\bar{\bar{h}}_u$	h_u hervorgehend aus Kartenvergleichen 1958 mit 1969–1990	cm
$\hat{\bar{h}}_u$	h_u hervorgehend aus Kartenvergleichen 1969–1989 mit 1970–1990	cm
β	morphologische Varianz (reziproker Wert von a_0)	–
m	Vielfaches von a_0 , bei dem $h_b = 0$ angenommen werden kann	–