Die Küste, 45 (1987), 1-57

Umsatz- und Bilanz-Analysen für das Küstenvorfeld der Deutschen Bucht Grundlagen und erste Auswertungen

(Teil I der Ergebnisse eines KFKI-Projektes)

Von Winfried Siefert

Zusammenfassung

Die 1983 in einer Pilotstudie aufgezeigten Aufgaben zur Analyse von Umsatz und Bilanz im Küstenvorfeld der Deutschen Bucht werden hier generell, theoretisch, in Beispielen und statistisch behandelt.

Die Umsatzhöhe als wichtigste physikalische Größe kann über den Vergleichszeitraum als Sättigungsfunktion

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

bestimmt werden (Kap. 2). Für einzelne energetisch ähnliche Gebiete werden charakteristische Werte $\overline{h}_u$ und a_0 ermittelt und in Zusammenhang mit Seegangs- und Strömungsenergie gesetzt (Kap. 3.4.1). Als weiterer wichtiger Parameter erweist sich dabei die Umsatzrate $\overline{h}_u/a_0$.

Die Bilanzhöhe h_b zeigt keinen funktionellen Zusammenhang mit dem Vergleichszeitraum a, wohl aber lassen sich ihr Streubereich eingrenzen (Kap. 3.4.1) und ihr Betrag in Beziehung zu h_u setzen (Kap. 3.4.3). Die Dauer des Vergleichszeitraumes, über den $|h_b|_{max}$ erreicht wird, gibt einen Anhalt für sinnvolle Wiederholungszeiträume von Vermessungen (Kap. 3.4.4).

Ein vorläufiger Kartenvergleich von etwa 1975 und etwa 1980 erbringt für rd. 4000 km² Küstennahbereich (Watt, Priele, Sände, Wattströme) $h_b = +1$ cm und $h_u = 70$ cm, für rd. 4400 km² tieferes Gebiet der Deutschen Bucht $h_b = +3{,}5$ cm und h_u = rd. 50 cm, also insgesamt leichte Sedimentation (Kap. 4). Die Arbeiten werden zur Vervollständigung des Kartenvergleiches und mit weiteren theoretischen, energetischen und statistischen Analysen fortgesetzt (Kap. 5).

Summary

A 1983 pilot study involved the analysis of sand transport rates and balance in the coastal zone of the German Bight; they are treated here generally, theoretically, in examples, and statistically.

The turnover height as the most important physical parameter can be given as a saturation function

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

over the time interval a between two surveys (chap. 2).

Characteristical values $\overline{h}_u$ and a_0 were found for certain energetically similar regions and compared with wave and current energies (chap. 3.4.1). In this context the turnover rate $\overline{h}_u/a_0$ is a significant parameter.

The balance height h_b shows no functional interrelationship with a; nevertheless, the scatter is limited (chap. 3.4.1), and its value dependent on h_u (chap. 3.4.3). The duration of the time interval a for $|h_b|_{max}$ indicates a useful interval between two surveys in order to discover the highest absolute height differences (chap. 3.4.4).

A preliminary comparison between the 1975 and 1980 surveys leads to the following results: An area of about 4000 km² of tidal flats, sands, and gully systems shows $h_b = +1$ cm, $h_u = 70$ cm, about 4400 km² of deeper water area in the German Bight shows $h_b = +3{,}5$ cm, h_u = ca. 50 cm, indicating slight overall sedimentation (chap. 4).

The investigations will go on in order to complete the comparison of the 1975 and 1980 surveys, and to continue the theoretical, energetic, and statistical analyses (chap. 5).

Inhalt

1. Einleitung 2
2. Die MORAN-Funktion 4
2.1 Definitionen; Parametrisierung 4
2.2 Morphologie künstlicher Störungen 5
2.3 Thesen zur Analyse „natürlicher Störungen" 7
2.4 Theoretische Überlegungen 9
2.5 Praktischer Nachweis (Beispiele) 13
3. Analysen zur morphologischen Charakteristik 19
3.1 Bisherige Untersuchungen 19
3.2 Erste Eingrenzung von Gebieten ähnlicher morphologischer Aktivität 26
3.3 Analyse des topographischen Datenmaterials 28
3.3.1 Südliches Elbmündungsgebiet 28
3.3.2 Aufnahmen aus 1974/76 und 1979/81 29
3.3.3 Zur Genauigkeit der Vermessung 29
3.4 Ergebnisse 33
3.4.1 Morphologische Charakteristik kleiner Einheiten 33
3.4.2 Hinweise auf die Verwendbarkeit 40
3.4.3 Zur morphologischen Charakteristik größerer Gebiete 43
3.4.4 Verallgemeinerungen 45
4. Vorläufiger Kartenvergleich über etwa fünf Jahre 48
4.1 Watt und Wattströme 48
4.2 Deutsche Bucht 49
4.3 Ergänzungen über die morphologische Charakteristik 51
5. Ausblick 53
6. Danksagung 54
7. Schriftenverzeichnis 55
8. Symbolverzeichnis 56

1. Einleitung

Im Jahre 1978 wurde im KURATORIUM FÜR FORSCHUNG IM KÜSTENINGENIEURWESEN (KFKI) eine Projektgruppe „Morphologische Analysen Nordseeküste" (MORAN) gebildet mit dem Ziel, durch Vergleich zweier quasi-simultaner Vermessungen des Küstenvorfeldes der deutschen Nordseeküste Aussagen über Materialbilanz und topographische Veränderungen zu finden. Die vorbereitenden Arbeiten begannen 1980, die eigentlichen Analysen zwei Jahre später. Das Projekt wurde von 1980 bis 1985 vom BUNDESMINISTER FÜR FORSCHUNG UND TECHNOLOGIE (BMFT) finanziell und durch die beteiligten Dienststellen des Bundes und der Küstenländer mit Eigenleistungen gefördert. 1986/87 finanziert das Arbeitsamt Niedersachsen zwei Mitarbeiter.

Die 1978 gebildete Projektgruppe formulierte die anstehenden Aufgaben etwa wie folgt:
- Aussagen über topographische Veränderungen von Rinnen und Platen im Küstenvorfeld und in den Ästuaren der deutschen Nordseeküste von etwa 1975 auf etwa 1980 machen,
- Angaben über Sedimentations- und Erosionsgebiete liefern,
- Zusammenhänge zwischen topographischen Parametern und formenden Kräften darstellen,
- Schlußfolgerungen für die praktische Arbeit an der Küste ziehen.

Überlegungen zur Bewältigung der Aufgaben und erste Resultate für das Testgebiet Knechtsand wurden schon frühzeitig veröffentlicht (1981, 1982 und 1983), auf einem speziellen MORAN-Symposium 1983 in Bremen und in Vorträgen auf nationalen und internationalen Tagungen präsentiert. Inzwischen entstanden zudem Diplom- und Staatsexamensarbeiten zu diesem Thema.

Die Küste, 45 (1987), 1-57

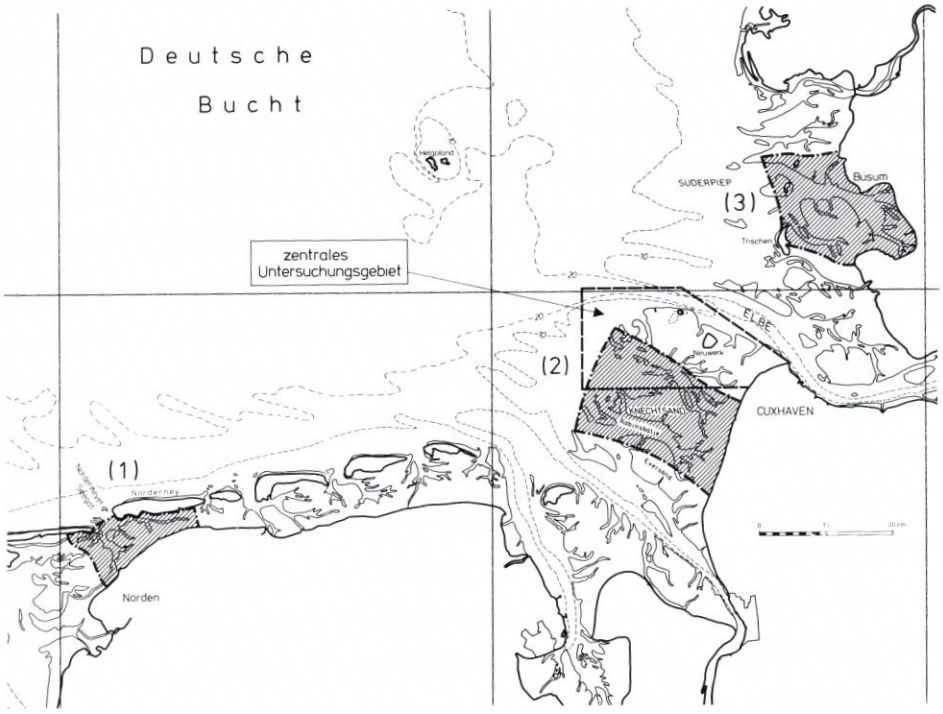


Abb. 1. Lageplan mit den Testfeldern des MORAN-Projektes und dem zentralen Untersuchungsgebiet

Es zeigte sich sehr schnell, daß eine befriedigende Lösung der gestellten Aufgaben nicht durch bloßen Vergleich zweier Karten möglich war, wie er schon früh für das Testgebiet Knechtsand vorlag (BARTHEL, 1981). Allgemein gültige Aussagen über einen fixierten Vergleichszeitraum von fünf Jahren hinaus können nur über den Weg einer umfangreichen morphologischen Analyse mit folgender Generalisierung erreicht werden. Außerdem ergab eine Sichtung des Datenmaterials, daß vergleichbare Aufnahmen nicht immer fünf Jahre auseinanderliegen und dann die Ergebnisse auf diesen Zeitraum „beschickt" werden müssen. Um dafür die Voraussetzungen zu schaffen, sind – wie noch gezeigt werden wird – mehr als zwei topographische Aufnahmen sowie Detailkenntnisse über den Seegang und über die Tideströmung erforderlich. Diese Voraussetzungen erfüllt im wesentlichen das südliche Elbmündungsgebiet. So konzentrierte sich – nach Vorarbeiten für die Testfelder Norderney, Knechtsand und Büsum – bald die Analyse auf den Bereich zwischen Außenelbe, Knechtsand und Küste (Abb. 1).

Hier wiederum konnten bis zu 16 topographische Aufnahmen für einzelne Flächen herangezogen werden; dies stellt eine ausreichende Grundlage zur Erreichung der gesteckten Ziele dar, da somit bis zu 120 Kartenvergleiche ermöglicht werden.

Die Arbeiten wurden begleitet von einer Projektgruppe mit folgenden Mitgliedern:

Dr. BARTHEL, Wasser- und Schiffahrtsamt Bremerhaven (bis 1981)
Prof. Dr. BETTAC, Deutsches Hydrographisches Institut, Hamburg
Dr. LUCK, Forschungsstelle Küste, Norderney (bis 1981)
Dr. RENGER, Landesamt für Wasserhaushalt und Küsten, Kiel
Dr. SAMU, Bundesanstalt für Wasserbau, Außenstelle Küste, Hamburg

Dr. SCHLEIDER, Wasser- und Schiffahrtsdirektion Nordwest, Aurich
Prof. Dr. SIEFERT, Strom- und Hafenbau Hamburg, Cuxhaven (Obmann)
Dr. STEPHAN, Forschungsstelle Küste, Norderney (ab 1981)
Dr. WIELAND, Amt für Land- und Wasserwirtschaft Heide, Büsum
Dr. WISMER, Wasser- und Schiffahrtsdirektion Nord, Kiel

Die Arbeiten waren von Beginn an geprägt von der Grundidee einer flächenhaften Auswertung und der Herleitung bestimmter morphologischer Charakteristiken hinsichtlich längerfristiger Veränderungen und nicht nur eines Kartenvergleichs über fünf Jahre.

Die grundlegenden Gedanken und die entwickelten Ansätze zur Betrachtung der Umsatzhöhen wurden bereits vor längerer Zeit veröffentlicht (SIEFERT, 1983). Sie werden hier soweit wiederholt, wie es – etwa durch die Wahl neuer Symbole oder Parameter – zum Verständnis erforderlich ist. Zu dem damals abschließend genannten Arbeitsprogramm ist zu bemerken:

a) Analysen in den Testfeldern Norderney und Büsum sowie weiteren „morphologischen Fenstern": Sie wurden durchgeführt, soweit dies erforderlich schien, um Erkenntnisse aus dem Testfeld Knechtsand zu erhärten, und werden an den entsprechenden Textstellen behandelt. Weitere Untersuchungen konzentrierten sich auf den Neuwerk-Scharhörner Wattkomplex.
b) Ausdehnung der Kartenvergleiche 1975–80 auf das gesamte Untersuchungsgebiet: Da die Zweitaufnahme bisher nicht vollständig vorlag, konnten nur knapp 3400 km^2 küstennahes und knapp 4400 km^2 küstenfernes Gebiet in beiden Aufnahmen verglichen werden (siehe Kap. 4).
c) Untersuchung kleiner morphologischer Einheiten: Diese Arbeiten wurden stark intensiviert und auf Umsatz und Bilanz ausgedehnt (siehe Kap. 2 und 3).
d) Erarbeitung eines Werkes zur Bestimmung der Umsätze und Bilanzen im Küstenvorfeld: Wesentliche Grundlagen dazu werden in Kap. 3 vorgestellt, einschl. Hinweisen auf die formenden Kräfte.
e) Berücksichtigung der sedimentologischen und biologischen Gegebenheiten: Dieses Thema wurde noch nicht weiter bearbeitet.
f) Festlegung von Gebieten mit starken/schwachen Veränderungen: Dies ist nach den Ausführungen in Kap. 3.4 weitgehend möglich.

2. Die MORAN-Funktion

2.1 Definitionen; Parametrisierung

Vor den eigentlichen Erörterungen sind einige Bemerkungen über die bei den Analysen verwendeten Begriffe und Parameter sinnvoll, um Mißdeutungen zu vermeiden. Sie werden ergänzt durch das Symbolverzeichnis am Ende des Textes.

Morphologie* = Formenlehre, hier im Sinne der Geomorphologie als Lehre von der Oberflächengestalt eines Körpers einschließlich der diese formenden Kräfte und der gesetzmäßigen Abläufe, also der dynamischen Entwicklung. Zur Erforschung bedient man sich dabei der Morphometrie.

---

* Die Definition für Morphologie in dem hier gebrauchten Sinne geht zurück auf GOETHE, der dieses Kunstwort von dem Anatomen BURDACH aufgriff und seine Bedeutung weiterentwikkelte.

Entsprechend ist die Anwendung im Küsteningenieurwesen eine Kombination aus

Topographie als (statische) Oberflächengestalt, hier parametrisiert durch die mittlere topogr. Höhe z (in dm KN) und die topogr. Ungleichförmigkeit (u = topogr. Höhe der 10 % höchsten minus derjenigen der 10 % tiefsten Teilflächen; in dm) von kleinen Einheiten

und

formenden Kräften, beim heutigen Stand der Untersuchungen abzuleiten aus Seegangsparametern ($\overline{H}$, $\overline{H}/d$, $\overline{H}/\overline{L}$) und Tideströmungsparametern (v_m, v_{max}, Richtung, Reststrom).

Kleine Einheiten sind üblicherweise Quadrate von A = 1 km² Größe (gelegentlich auch A = ¼ oder 4 km²), die unterteilt werden in

Teilflächen von je 1 ha Größe. Die Angaben für die kleinen Einheiten stellen die Mittelwerte aus den Daten der n Teilflächen dar.

Auf dem Wege zur Analyse der morphologischen Charakteristik werden Umsatz und Bilanz als Funktionen über der Zeit dargestellt. Dazu wird der Zeitparameter a (in Jahren anzugeben) eingeführt*. Die Untersuchungen haben gezeigt, daß auf diese Weise generelle Aussagen über die Umsatz- und Bilanzhöhen als Funktionen von a möglich sind, wobei gilt:

Umsatz einer kleinen Einheit = Summe aller Höhenveränderungen h′ oder h_u' (in Zentimetern) der Teilflächen, unabhängig vom Vorzeichen, gegeben als mittlere Höhe h_u für die kleine Einheit,

Bilanz einer kleinen Einheit = Differenz zwischen der Summe der Sedimentationshöhen h_s' und derjenigen der Erosionshöhen h_e' der einzelnen Teilflächen, gegeben als mittlere Höhe h_b für die kleine Einheit.

Für jede Teilfläche ist natürlich $h_u' = h_b' = h_s'$ bzw. $= h_e'$.

2.2 Morphologie künstlicher Störungen

Die Morphologie künstlicher Störungen zeigt folgende Zusammenhänge: Eine Verfüllung eines Baggerloches, Abtragung einer Aufspülung oder Verlandung eines Altarmes kann als Funktion der fortlaufenden Zeit t durch

$$V = f(t) = V_{ges} \cdot (1 - e^{-t/t_0})$$

beschrieben werden. Dabei stellt t_0 den Zeitpunkt dar, in dem nach Beginn der Wirkung natürlicher Kräfte auf eine Störung bei zeitlich konstanter Sedimentations- oder Erosionsrate die Störung wieder beseitigt gewesen wäre. Beispiel: Baggerloch im Kl. Vogelsand bei Neuwerk (Abb. 2). Gleicher Verlauf geht aus der Auswertung von drei Kernen aus dem Watt südlich von Nordstrand hervor (Abb. 3; aus Unsöld, 1974).

Hier wird bereits eine Funktion der Art

$$y = \text{const.} + \overline{y} \cdot (1 - e^{-f(t)})$$

für die Sedimentationshöhen genannt.

---

* Dabei soll es sich definitionsgemäß um die Dauer eines Vergleichszeitraumes handeln und nicht um die fortlaufende Zeit. Diese Definition bereitet dem Leser erfahrungsgemäß Verständnisschwierigkeiten, ist aber von großer Wichtigkeit. – Zeiträume unter 1 Jahr werden nicht betrachtet, da kaum topographische Aufnahmen in kürzeren Abständen vorliegen und da das Hauptinteresse dem längerfristigen Verhalten gilt.

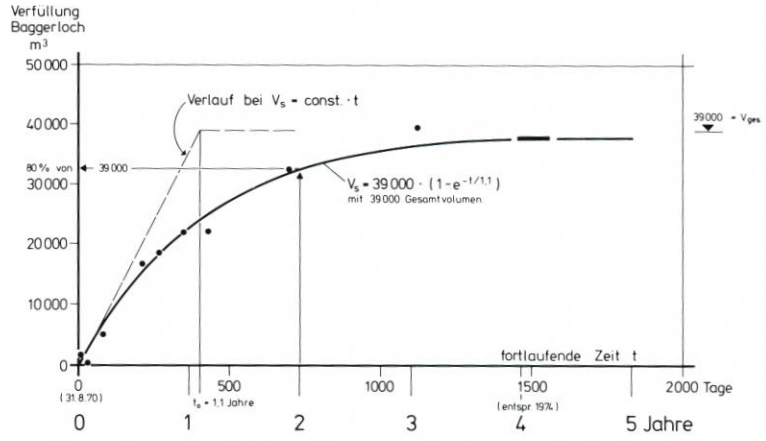


Abb. 2. Sedimentation im Baggerloch auf dem Kleinen Vogelsand (Elbmündung nördlich von Neuwerk)

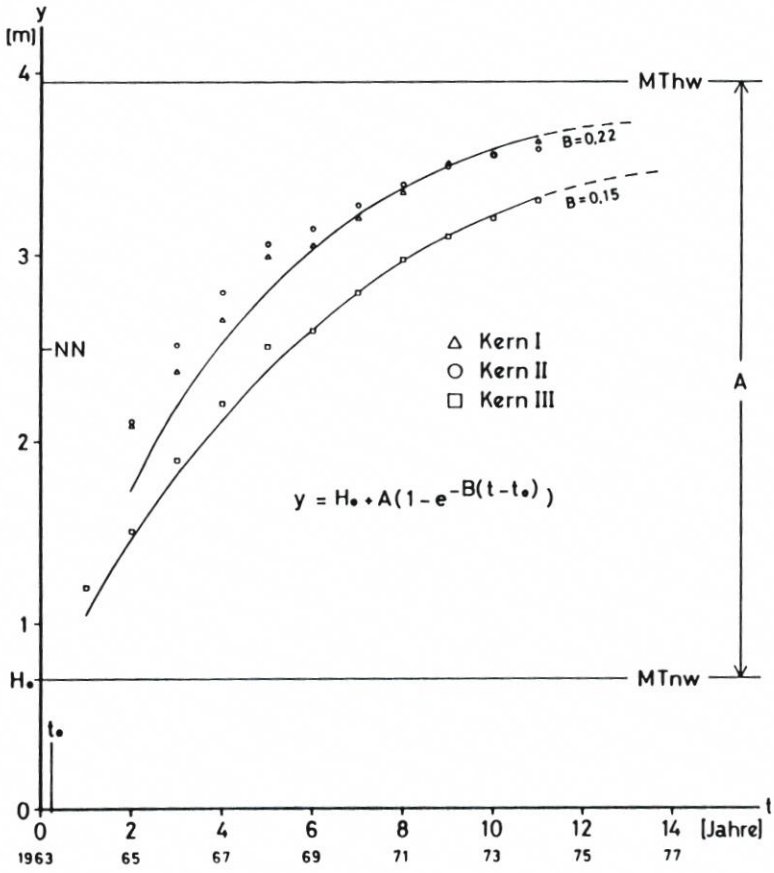


Abb. 3. Höhe y der Sedimentoberflächen in drei Kernen, bezogen auf die Sohle eines ehemaligen Baggerloches (−2,5 m NN), dargestellt in Abhängigkeit von der Sedimentationsdauer t (aus UNSÖLD, 1974)

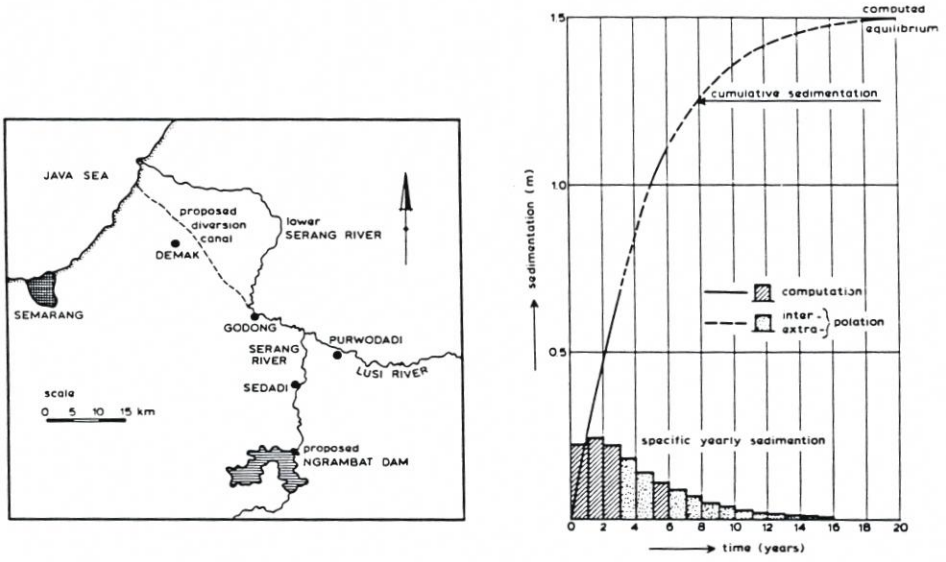


Abb. 4. Sedimentation im unteren Serang auf Java nach Bau eines Kanals (aus KERSSENS, 1980)

Die Kurven auf Abb. 2 und 3 können folgendermaßen interpretiert werden: Z. Zt. $t = 0$ ist ein bestimmter topographischer Zustand geschaffen. An der Untersuchungsstelle mit den dort herrschenden formenden Kräften verändert sich dieser mit der Zeit in ganz bestimmter Weise. Material sedimentiert in dem Loch. Würde nach einer gewissen Zeit der Sedimentation erneut auf die alte Tiefe gebaggert, würde sich derselbe Prozeß, wiederum bei $t = 0$ beginnend, wiederholen, sofern die formenden Kräfte in der Umgebung gleich blieben. Die Meßwerte $V = f(t)$ bzw. $y = f(t)$ stellen also die für diesen Ort und diese Ausgangssituation charakteristischen Daten dar. Sie werden durch Funktionen obiger Form sehr genau beschrieben.

Die Ergebnisse bei Neuwerk und Nordstrand – Verfüllung nach 3 bis 10 Jahren abgeschlossen – entsprechen auch Erfahrungen andernorts, wonach Sandentnahmestellen im Watt nach etwa 5 ± 2 Jahren wieder aufgefüllt sind. Theoretisch erreichen die Funktionen ihre Maxima asymptotisch, d. h., eine solche Störung würde sehr lange bemerkbar bleiben. Deswegen ist z. B. vorstellbar, für praktische Aussagen den Zeitpunkt zu berechnen, zu dem 90 % der Störung beseitigt sind.

Abb. 4 zeigt die Entwicklung in einem Altarm des Serang auf Java (KERSSENS, 1980). Die berechnete Sedimentations-Funktion über der fortlaufenden Zeit entspricht denjenigen von Abb. 2 und 3.

2.3 Thesen zur Analyse „natürlicher Störungen"

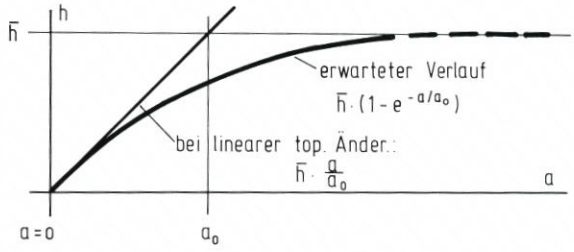
Die stochastischen Prozesse in der Natur führen zu quasi-periodischen und aperiodischen Veränderungen der Topographie. So entstehen „natürliche Störungen" als Reaktionen des Bodens auf die einwirkende Energie aus Strömung und Seegang. Es ist zu prüfen, ob

(1) diese Störungen (d. h. Änderungen der topographischen Höhe von Teilflächen) für eine Fläche A durch eine entsprechende Funktion

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

ausgedrückt werden können, wobei a als einzige Veränderliche dann einen Betrachtungszeitraum angibt, nicht aber die fortlaufende Zeit;

(2) $\bar{h}$ als ein (theoretisch erst für sehr große a erreichbarer) definierbarer Höchstwert der Mittel aus den Werten der Teilflächen realisierbar ist; a_0 ist der Zeitraum, in dem $\bar{h}$ bei gleichsinniger, linearer Veränderung der Topographie der Teilflächen erreicht würde*:



(3) die Parameter $\bar{h}$ und a_0 von den formenden Kräften, der gewählten Flächengröße und der Topographie abhängen;

(4) eine Funktion für ein bestimmtes, energetisch definierbares Gebiet gilt;

(5) eine Veränderung der formenden Kräfte zu neuen $\bar{h}$ und a_0 führt und an diesen erkennbar wird.

Bereits die ersten Untersuchungen hatten gezeigt, daß der Ansatz für die Summe von Sedimentations- und Erosionshöhen, also den Umsatz, gilt. Bei

$$\Sigma\, h_u' = \Sigma |h_s'| + \Sigma |h_e'|$$

ergibt sich als mittlere Umsatzhöhe

$$h_u = \frac{1}{n} \cdot \Sigma\, h_u'$$

Es ist leicht nachzuvollziehen, daß die

$$\Sigma\, h_b' = \Sigma\, (h_s' + h_e')$$

und damit die mittlere Bilanzhöhe

$$h_b = \frac{1}{n} \cdot \Sigma\, h_b'$$

keineswegs gleich h_u sein muß oder sich in einer ähnlichen Funktion von a darstellen läßt. Vielmehr läßt die Beobachtung erwarten, daß

(6) in der Natur stets – auch über sehr kurze Zeiträume – h_u in der hier verwendeten Definition nachgewiesen werden können (wie später auch aus Abb. 20 hervorgeht),

(7) stets eine h_u'-Verteilung vorliegt (was auch schon bei SIEFERT [1983] gezeigt wurde),

(8) allgemein $0 \leqq |h_b| \leqq h_u$ gilt, ohne daß von h_u unmittelbar auf h_b geschlossen werden kann,

(9) die Anzahl n der Teilflächen groß sein muß (möglichst n = 100), um eine charakteristische Funktion $h_u = f(a)$ entwickeln zu können,

---

* Zu Beginn der Arbeiten (SIEFERT, 1983) war ein Parameter β eingeführt worden, der identisch mit a_0^{-1} ist.

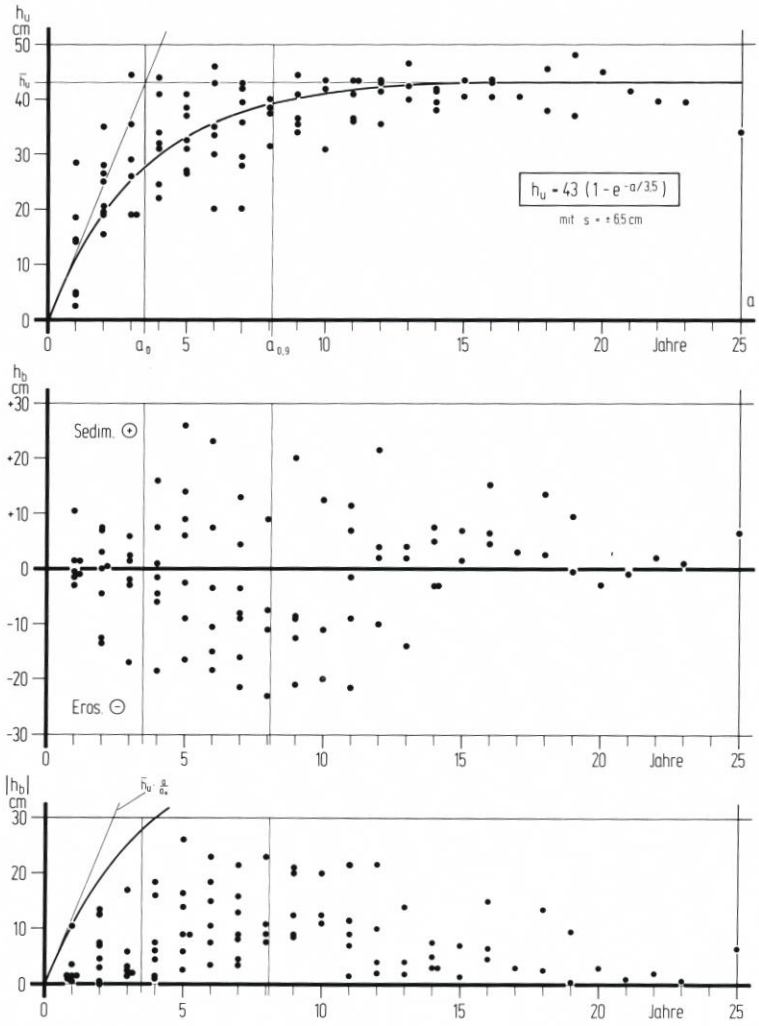


Abb. 5. Umsatzhöhen h_u und Bilanzhöhen h_b über dem Vergleichszeitraum a für eine kleine Einheit auf dem Neuwerker Watt (A = 1 km², n = 100 Teilflächen) für 91 Kartenvergleiche

(10) die Funktionen $h_u = f(a)$ und die Punkthaufen $h_b = f(a)$ stets im Ursprung beginnen. Ein typisches Beispiel für die Thesen 1, 6, 8 und 10 zeigt Abb. 5 mit 91 Kartenvergleichen einer kleinen Einheit von 1 km² Größe auf dem Neuwerker Watt.

2.4 Theoretische Überlegungen

Die Höhen* solcher Teilflächen mögen sich ständig verändern, und zwar quasi-periodisch auf und ab. Abb. 6 zeigt in den ersten beiden Skizzen h_b und h_u als Funktionen von t,

* Um den Bezug zwischen Höhe und Volumen zu veranschaulichen, sei vermerkt: 1 cm Höhenänderung bedeutet Volumenänderungen von 100 m³ (bei A = 1 ha) bzw. 10 000 m³ (bei A = 1 km²).

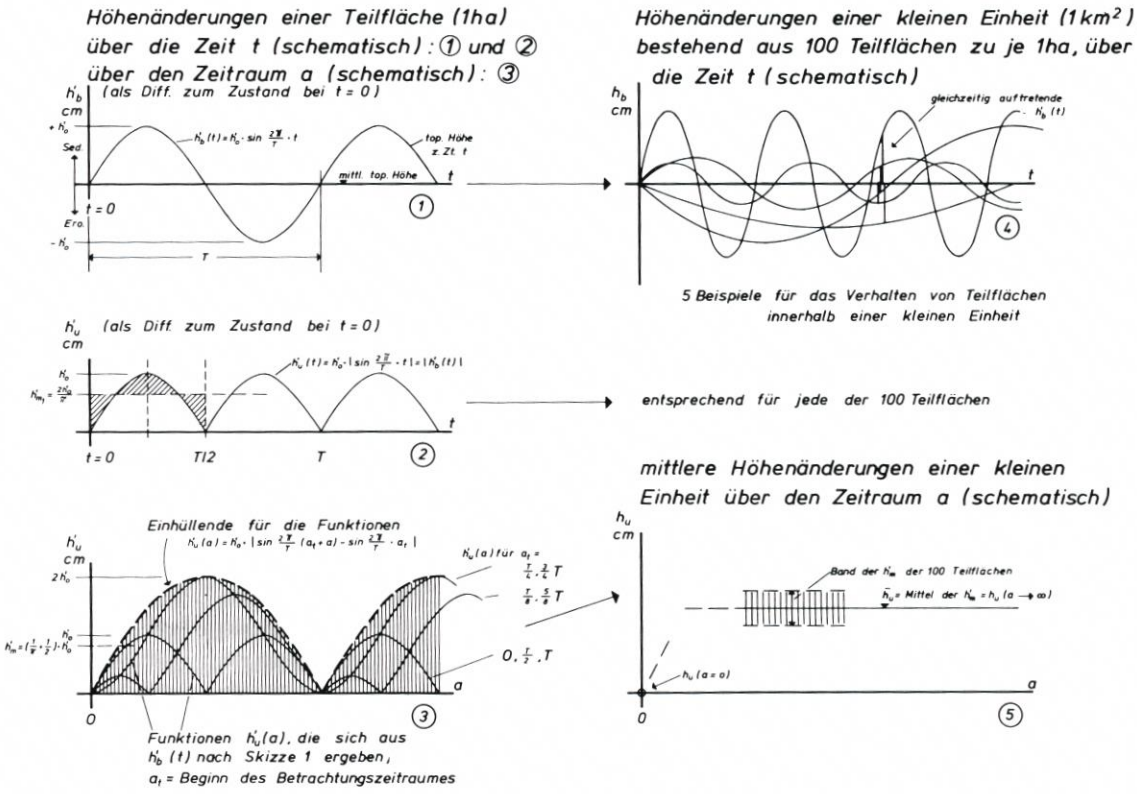


Abb. 6. Skizzen zur Erläuterung von Bilanz- und Umsatzhöhen

dargestellt für eine Teilfläche, wenn idealisierend hierfür sin-Funktionen mit einer Periode T angenommen werden.

$h'_u(a)$ in der 3. Skizze stellen mögliche Funktionen für eine einzelne Teilfläche dar, abhängig von a_t als dem Beginn des Betrachtungszeitraumes:

$$h'_u(a) = h'_0 \cdot \left| \sin \frac{2\pi}{T} (a_t + a) - \sin \frac{2\pi}{T} a_t \right|$$

Zur Berechnung eines Mittelwertes werden die Funktionen integriert:

$$\int h'_u(a)\, da = h'_0 \cdot \left[- \frac{T}{2\pi} \cdot \cos \frac{2\pi}{T} \cdot (a_t + a) - a \cdot \sin \frac{2\pi}{T} \cdot a_t \right]$$

Den niedrigsten Mittelwert erhält man für $a_t = 0$:

$$\int_0^T h'_u(a;\, a_t = 0)\, da = 2 \cdot h'_0 \cdot \left[\frac{T}{2\pi} \cdot \cos \frac{2\pi}{T} \cdot a \right]_{T/2}^{0} = \frac{4T}{2\pi} \cdot h'_0$$

Als Mittelwert über die Zeit (Periode) T wird er zu

$$\frac{2}{\pi} \cdot h'_0 = h'_{m_1}$$

$\int_0^T h_u\, (a;\, a_t = \frac{T}{4})$ liefert als höchsten Mittelwert über die Zeit T:

Die Küste, 45 (1987), 1-57

$$h_0' = h_{m_2}'$$

$$\sum_{a_t=0}^{T} h_u' \rightarrow h_m' \approx \left(\frac{1}{\pi} + \frac{1}{2}\right) \cdot h_0'$$

h_m' ist unabhängig von T. Da in der Natur aber unterschiedliche h_0' für einzelne Teilflächen nebeneinander auftreten (Skizze 4 auf Abb. 6), wird für große a der asymptotische Wert $\overline{h}_u$ zum Mittel der h_m':

$$a \rightarrow \infty \text{ ergibt } h_u \rightarrow \text{Mittel der } h_m' \text{ der n Teilflächen}$$

(Skizze 5 auf Abb. 6). So errechnet sich

$$\overline{h}_u = \frac{1}{n} \cdot \sum_1^n h_0' \cdot \left(\frac{1}{\pi} + \frac{1}{2}\right) = \frac{2+\pi}{2\pi n} \cdot \sum_1^n h_0'$$

Wie die Skizzen 3 und 4 auf Abb. 6 zeigen, gilt andererseits stets

$$a = 0 \rightarrow h_u = 0$$

Es muß also mathematisch ein Übergang vom Ursprung zu einer horizontalen Asymptote formuliert werden, um die Entwicklung der Umsatzhöhen kleiner Einheiten als Funktionen der Dauer eines Vergleichszeitraumes zu erfassen. Dazu bietet sich eine Sättigungsfunktion an. Ein solcher Ansatz mit

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

erlaubt eine weitere Aussagemöglichkeit:

Die Steigung im Ursprung beträgt

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

was bedeutet, daß bereits nach einem Zeitraum a_0 die Umsatzhöhe $\overline{h}_u$ erreicht wäre, wenn der Umsatz linear mit der Länge des Betrachtungszeitraumes zunähme.

Das läßt die Skizze auf S. 8 erkennen. Darüber hinaus ist festzustellen:

(1) Ein über a linear steigender Umsatz

$$h_u = \overline{h}_u \cdot \frac{a}{a_0}$$

ist gleichzeitig ein solcher über t und ist Ausdruck ständig zunehmenden Anwachses (Abtrages).

(2) Nimmt man an, daß die Höhenveränderungen in allen Teilflächen über längere Zeit gleichsinnig verlaufen können, so kann für die kleine Einheit $|h_b|_{max} = h_u$ werden; geschieht je zur Hälfte Sedimentation und Erosion, so wird $h_b = 0$.

(3) Bleibt der Umsatz von Jahr zu Jahr auch fortlaufend gleich, so wird die Höhenänderungsrichtung der einzelnen Teilflächen nicht gleich bleiben (z. B. Wechsel von Sedimentation auf Erosion). Daraus folgt bei einem Kartenvergleich über einen längeren Zeitraum (a_b gegenüber a_a auf Abb. 7), daß der erfaßbare Umsatz kleiner als die Summe der jährlichen Umsätze ist:

$$h_u(a) < \overline{h}_u \cdot \frac{a}{a_0}$$

(4) Je größer a wird, desto größer wird die Differenz zwischen $\overline{h}_u \cdot a/a_0$ und h_u bzw. $|h_b|$; bei a_0 beträgt sie $0{,}37 \cdot \overline{h}_u$, bei $1{,}6 \cdot a_0$ bereits h_u (Abb. 7). Die Differentialgleichung der Funktion lautet

$$\frac{dh_u}{da} = \frac{1}{a_0} \cdot (\overline{h}_u - h_u)$$

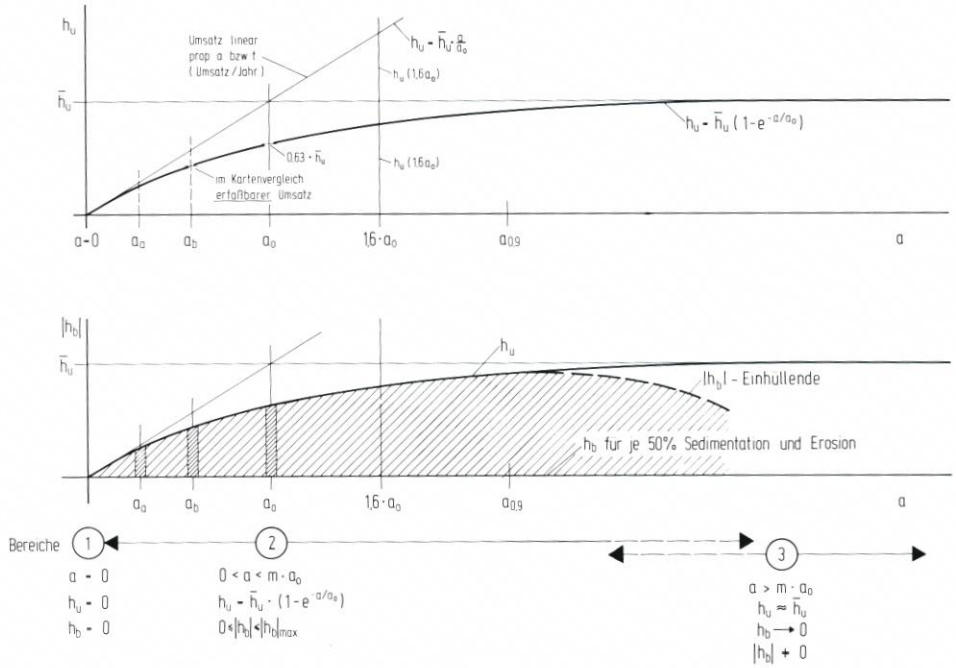


Abb. 7. Skizzen zur Beschreibung der Umsatz- und Bilanzhöhen mit Sättigungsfunktionen und drei unterschiedlichen Bereichen

und weist aus, daß die über einen Vergleichszeitraum a feststellbare Umsatzrate linear von der Differenz zwischen dem asymptotischen Grenzwert und dem gemessenen Umsatz abhängt. Wie Abb. 7 zeigt, gilt dies zunächst auch für die $|h|_{max}$. In diesem Zusammenhang bezeichnet UNSÖLD (1974) die Konstante $1/a_0$ als „Sedimentations-Wirkungsgrad".

(5) Daß $h_u \neq f(a)$ wird und const. bleibt, ist nur möglich, wenn h_b als Mittelwert aus einzelnen Kartenvergleichen gegen Null geht. Wenn dies nicht so ist und h_b für große a einen im Verhältnis zu h_u bemerkenswerten Betrag behält oder gar wächst, muß nach aller Erfahrung h_u wachsen. Damit aber wäre $\bar{h}_u \approx$ const. nicht mehr erfüllt, was auch schon in Pkt. (1) ausgedrückt wird.

(6) Danach stellen sich drei Bereiche ein, die auf Abb. 7 bezeichnet sind und in denen unterschiedliche Entwicklungen von h_u und h_b auftreten.

Aus diesen Überlegungen lassen sich drei Schlußfolgerungen ziehen:

(7) Wenn ein Vergleichszeitraum so groß ist, daß die maßgebende Funktion $h_u = f(a)$ nachweislich den Bereich mit $h_u \approx$ const. $\approx \bar{h}_u$ erreicht hat, so ist davon auszugehen, daß das Gebiet über diesen Zeitraum $a \geq m \cdot a_0$ höhenstabil ist*, kürzere Zeiträume aber durchaus Höhenänderungen zulassen.

(8) Die tatsächliche Umsatzrate (etwa in cm/Jahr) wird – wenn überhaupt – nur bei Kartenvergleichen über sehr kurze Zeiträume erfaßt; je größer a ist, desto stärker weicht der meßbare vom tatsächlichen Umsatz ab. Ersterer ist über den formalen Ansatz berechenbar.

* m muß empirisch bestimmt werden.

(9) Wenn a_0 und $\overline{h}_u$ von Gebiet zu Gebiet wechseln, so sind Aussagen aus Kartenvergleichen über größere Flächen dann problematisch, wenn der Zeitraum zwischen ihnen $a < m \cdot a_0$ (mit a_0 als maximal in diesem Gebiet zu erwartendem Wert) ist. Denn dann werden – je nach morphologischer Charakteristik – die Funktionen $h_u = f(a)$ und $|h_b|_{max} = f(a)$ an Stellen „angeschnitten", die keine gleichgewichtigen Aussagen für h_u und h_b zulassen.

2.5 Praktischer Nachweis (Beispiele)

Umsatzhöhen h_u und Bilanzhöhen h_b in o. g. Form wurden zur Verifizierung für rd. 500 kleine Einheiten* durch Auswertung von topographischen Aufnahmen (teilw. jährlich) ermittelt. Sie konnten bereits in der grundlegenden Untersuchung bestimmten topographischen Gegebenheiten und formenden Kräften (vor allem Seegang) zugeordnet werden. Inzwischen wurden Analysen kleiner Einheiten vom Knechtsand bis Nordfriesland durchgeführt, wobei auch statistische Größen wie Korrelationskoeffizient r und Standardabweichung s ermittelt wurden.

Im folgenden werden auf einer Reihe von Abbildungen Nachweise für die Richtigkeit der Thesen und der Schlußfolgerungen aus den theoretischen Überlegungen gegeben. Dabei handelt es sich nur um ausgewählte, besonders einfache Beispiele, die aus dem vorhandenen Datenkollektiv beliebig vermehrt werden könnten.

(a) Zu Kap. 2.3, Pkt. (1), (2), (10)
Kap. 2.4, Pkt. (4), (7)

Abb. 8 zeigt, daß tatsächlich ein asymptotischer Grenzwert $\overline{h}_u$ erreicht und über sehr lange Zeit gehalten wird. Der Beginn der Asymptote wurde für die Praxis bei

$$a\ (Asy.) = a_{0,9} = 2{,}3 \cdot a_0$$

willkürlich festgelegt, d. h. bei einem Zeitraum, nach dem $0{,}9 \cdot \overline{h}_u$ erreicht ist. Ferner werden auf Abb. 8 die Zusammenhänge zu den Ausführungen am Beginn des Kap. 2.4 hergestellt.

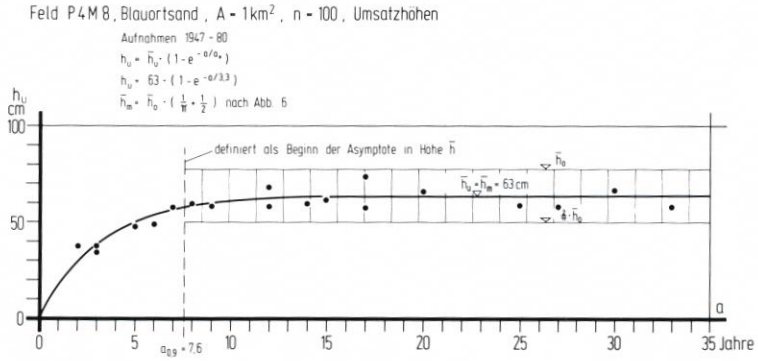


Abb. 8. Umsatzhöhen h_u über dem Vergleichszeitraum a für eine kleine Einheit auf dem Blauortsand (A = 1 km², n = 100 Teilflächen, Aufnahmen 1947 bis 1980)

* Hinweis: auf Abb. 21 sind diese Einheiten bezeichnet.

Abb. 9. Wrackreste eines vermutlich um 1920 auf der Scharhörner Plate gestrandeten Schiffes tauchten um 1970 im Gebiet des Nordweststrandes auf (GÖHREN, 1971). Nach 1976 waren sie wieder bedeckt

(b) Zu Kap. 2.3, Pkt. (8), (9)
2.4, Pkt. (2), (3), (5), (7), (8)
Gelegentlich auftauchende Wrackteile lassen auf Umsatzhöhen von etwa 0,5 m schließen (Abb. 9). Langfristige Vergleiche liefern dann i. M. ausgeglichene Bilanz solch einer Teilfläche.

(c) Zu Kap. 2.3, Pkt. (3), (4), (5)
Abb. 10 und 11 zeigen die Umlagerungsintensität an: Wenn die Umsatzrate sehr klein, d. h. a_0 groß und $\overline{h}_u$ klein sind, dann reicht die Besiedlung des Bodens bis an die Oberfläche. Dies trifft im wesentlichen im hohen, brandungsfreien Watt zu. In Prielgebieten (Abb. 10) und Brandungszonen (Abb. 11) ist dagegen mit häufigen Umlagerungen (d. h. kleinen a_0 und größeren $\overline{h}_u$) zu rechnen, die keine durchgehende Verwühlung gestatten.

(d) Zu Kap. 2.3, Pkt. (3), (4)
Auf die Abhängigkeit der Parameter $\overline{h}_u$ und a_0 von den formenden Kräften war bereits kurz in der grundlegenden Arbeit eingegangen worden (Abb. 25 bei SIEFERT, 1983). Ferner wird auf Kap. 3.4.1 dieser Abhandlung verwiesen.

(e) Kap. 2.3, Pkt. (3), (9)
Kap. 2.4, Pkt. (5), (6), (7)
Eine besondere Untersuchung befaßte sich mit dem Einfluß von n bzw. A auf $\overline{h}_u$ und a_0 (JENSEN, 1983). Im einzelnen wurden statistisch durch Analyse von kleinen Einheiten (meist 1 km^2 und 4 km^2) aus einem 60 km^2 großen Gebiet des Scharhörner Watts u. a. folgende Ergebnisse erhalten:
- Die asymptotische Umsatzhöhe $\overline{h}_u$ ist nach etwa a = 10 Jahren erreicht (was a_0 = 3 bis 5 Jahre bedeutet);

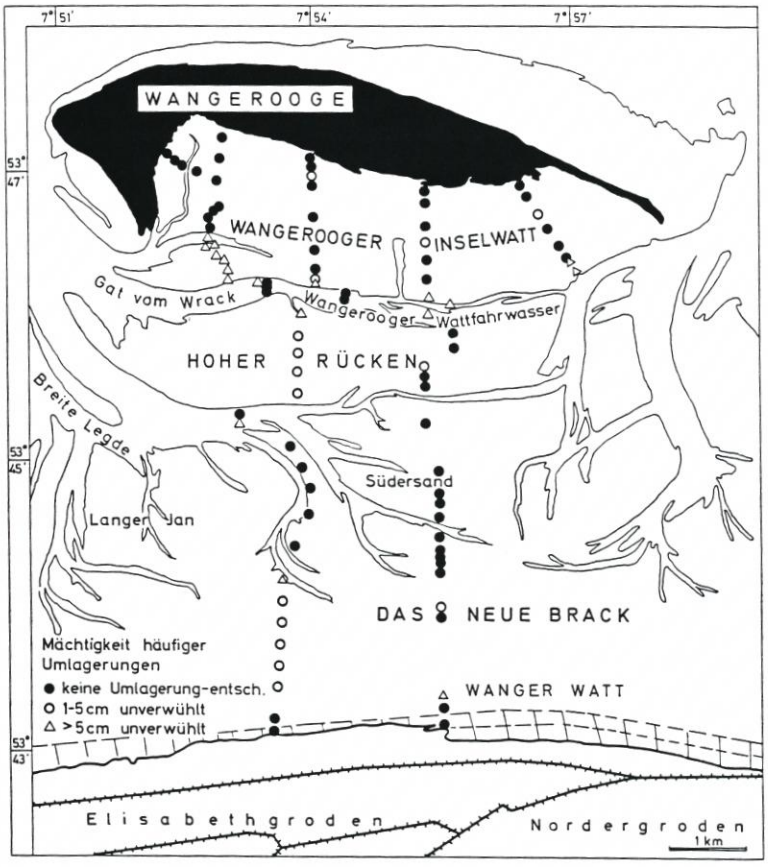


Abb. 10. Mächtigkeit unverwühlter Oberflächenschichten im Watt von Wangerooge. Starke Verwühlung ist verbreitet; nur an Rinnen und durchströmten Senken wird häufig umgelagert (aus REINECK, CHEN und WANG, 1986)

- die mittleren Umsatzhöhen nehmen mit wachsender Einheitsflächengröße A ab (nach einem empirischen Ansatz bleiben sie für $A > 200$ km^2 etwa gleich);
- nach 11 bis 40 Jahren ist für $A = 1$ bis 4 km^2 jeweils ein Zustand mit je 50 % Erosions- und Sedimentationsanteilen am Umsatz gegeben (was $h_b = 0$ bedeutet).

(f) Zu Kap. 2.3, Pkt. (3), (4), (5)

Abb. 12 zeigt ein Beispiel aus dem Mühlenberger Loch, einem Wattgebiet westlich von Hamburg, woraus die unterschiedlichen Entwicklungen vor und nach künstlichen Eingriffen hervorgehen. Die Ausgangswerte z. Zt. 1950 und 1970 weichen stark voneinander ab. Sie führen für a unter 10 Jahren zunächst zu einer Streubreite von $h_u = 25$ bis 140 cm, die es praktisch verböte, eine repräsentative Funktion zu bestimmen. Berücksichtigt man aber, daß bis 1970 stets in dem untersuchten Feld gebaggert wurde und danach starke Sedimentation einsetzte, so verlangt dies eine Trennung. Die große Streuung der Kartenvergleiche ab 1970 geht auf die fortschreitende Sedimentation zurück, die für a = 12 Jahre fast $h_b = \overline{h}_u$ liefert.

(g) Zu Kap. 2.3, Pkt. (7), (8)

Abb. 13 bringt einen der im Projekt verwendeten Kartenvergleiche, der zeigen mag, daß

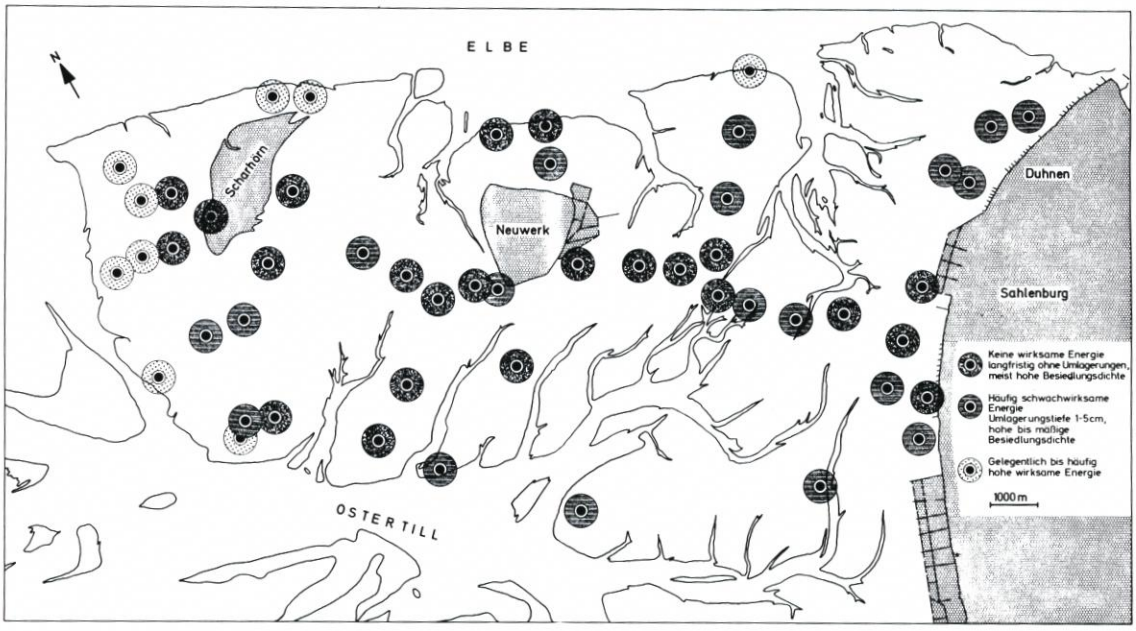


Abb. 11. Darstellung der Umlagerungsintensität im Neuwerk-Scharhörner Watt (aus REINECK, 1975)

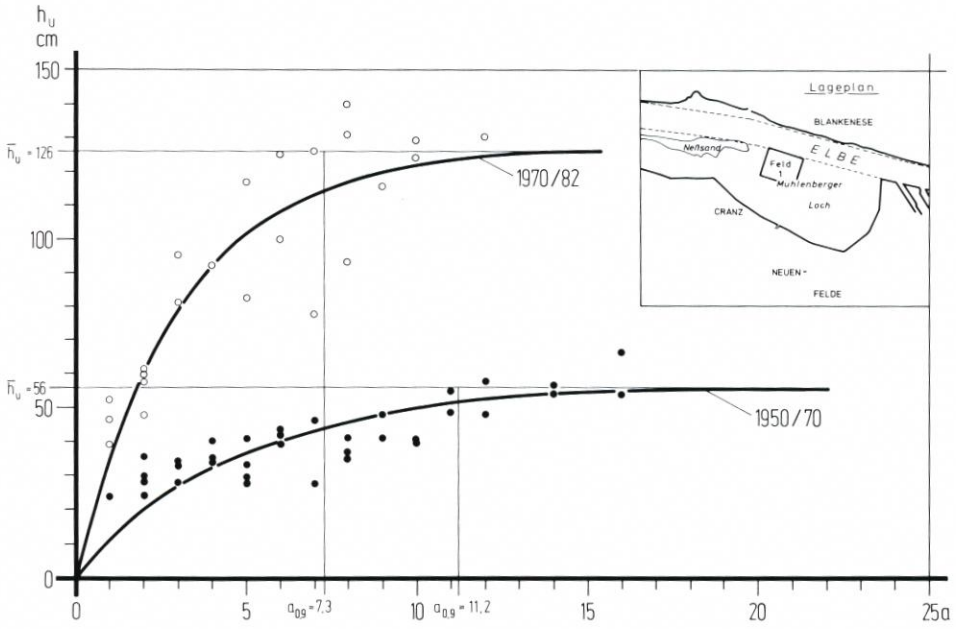


Abb. 12. Umsatzhöhe h_u = f(a) für ein Feld im Mühlenberger Loch bei Hamburg aus zwei unterschiedlichen Zeiträumen (aus SIEFERT, 1984)

Freie u. Hansestadt Hamburg - Strom- u. Hafenbau
Referat Hydrologie - Unterelbe CUXHAVEN

KFKI - Projekt M O R A N

MORPHOLOGISCHE VERAENDERUNGEN 1966-1972
Position: 3469000 5971000 (u.l.)
Planquadrat: N9J1

Bezeichnung	1966	1972
Bezugshor.BH=NN- (m)	1.60	1.60
Mittl. Hoehe unter BH (dm)	-12.33	-10.94
Top.Ungleichfoermigkeit (dm)	14.30	16.20
Punkte	100	100

Differenz in dm
(unter Berucksichtigung moeglicher unterschiedlicher BH)

		Feld 1				Feld 2					
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	1	0	1	-1	-2	-3	-3	-3	-3	-3	-2
	2	1	0	-1	-1	-2	-2	-2	-2	-2	-1
	3	4	0	-1	-2	-1	-1	-1	0	0	1
	4	-2	-3	0	3	1	0	0	1	0	0
Feld 1	5	-3	-4	-2	-2	-1	0	1	1	2	2
Feld 3	6	-5	-5	-4	-2	-2	-1	1	2	1	-1
	7	-7	-2	0	-2	-5	-7	-6	-5	-5	-2
	8	0	0	0	1	2	1	1	0	0	0
	9	-1	-3	-3	-4	-4	-2	-1	-1	-1	-1
	10	-2	-3	-4	-4	-4	-3	-2	-2	-2	-2

Feld 3 | Feld 4

$h'_b = h'_u$

Feld 2

Feld 4

top Änderung einer Teilfläche (1ha)

Bezeichnung	Feld1	Feld2	Feld3	Feld4	Gesamt	Mittel
Anwachshoehe (dm)	10	8	3	6	27	0.27
Abtragshoehe (dm)	31	25	66	44	166	1.66
Bilanzhoehe (dm)	-21	-17	-63	-38	-139	h_b = -1.39
Umsatzhoehe (dm)	41	33	69	50	193	h_u = 1.93
Punkte	25	25	25	25	100	

Aufgestellt: Cuxhaven, den 19.08.1986

St.u.H.82/MORAN-Koe/HP85-82905B

Abb. 13. Beispiel für die Auswertung von Kartenvergleichen für eine kleine Einheit von 1 km^2

stets eine Vielfalt von h′-Werten in einer kleinen Einheit gemittelt wird (und zur Übersichtlichkeit werden sollte), hier mit $-7 \leq h' \leq +4$ dm. Außerdem ist $|h_b| < h_u$. Charakteristische h'_u-Verteilungen werden im Rahmen der bevorstehenden Arbeiten analysiert werden.

(h) Zu Kap. 2.3, Pkt. (4)
Als beste Anpassung für die kleine Einheit von Abb. 5 hat sich die dort angegebene Umsatzfunktion

$$h_u = 43 \cdot (1-e^{-a/3,5}) \pm 1,4$$

ergeben mit s = ± 6,5 cm für 91 Kartenvergleiche. Läßt man den letzten Jahrgang (1979) aus, womit nur noch 78 Kartenvergleiche möglich sind, so erhält man

$$h_u = 45 \cdot (1-e^{-a/3,5}) \pm 1,5$$

mit s = ± 6,7 cm und damit praktisch ein identisches Resultat.

(i) Zu Kap. 2.3, Pkt. (4), (6), (8), (10),
Zu Kap. 2.4, Pkt. (2), (5), (6), (8)
In Abb. 14 bis 17 sind wiederum beispielhaft die Werte h_u, h_b und $|h_b|$ über a dargestellt. Sie zeigen das Erwartete bei verschieden großen $\overline{h}$ und a_0, und zwar aus dem Neuwerker wie dem Wesselburener Watt:

- Die h_u-Daten werden mit geringen Standardabweichungen s (nicht über 11 % von $\overline{h}_u$) durch bestimmte Sättigungsfunktionen erfaßt.
- h_u und h_b erlauben den Rückschluß, daß sie im Ursprung zu Null werden.
- Bei Vergleichen über 1 bis 2 Jahre kann $|h_b|_{max}$ etwa gleich h_u werden, es sind aber alle Werte zwischen $+h_u$ und $-h_u$ möglich.
- Schon ab a = 2 Jahre liegt die Einhüllende der $|h_b|$ unter der h_u-Kurve.
- Ab $a_{0,9}$ steigen die $|h_b|$ nicht mehr, sie fallen langsam ab.
- Die Bereiche von Abb. 7:

$$a = 0;\ h_u = 0;\ h_b = 0$$

und $$0 < a < m \cdot a_0;\ h_u = \overline{h}_u \cdot (1-e^{-a/a_0});\ h_b \neq 0$$

werden jeweils erkennbar, ohne daß m schon bestimmt ist. Der Bereich

$$a > m \cdot a_0;\ h_u \approx \overline{h}_u;\ h_b = 0$$

wird im Beispiel auf Abb. 5 etwa erreicht.

Somit bleibt nachzuweisen, ob

- die Parameter $\overline{h}_u$ und a_0 von den formenden Kräften und der Topographie bestimmt werden,
- für entsprechend definierbare Gebiete bestimmte Funktionen $h_u = f(a)$ gelten,
- Beziehungen zwischen h_u, a_0 und $|h_b|_{max}$ bestehen,
- für $a > m \cdot a_0$ schließlich h_b nach Null geht (also die Bestimmung von m),
- das Verhältnis $h_b/\overline{h}_u$ sich fassen läßt.

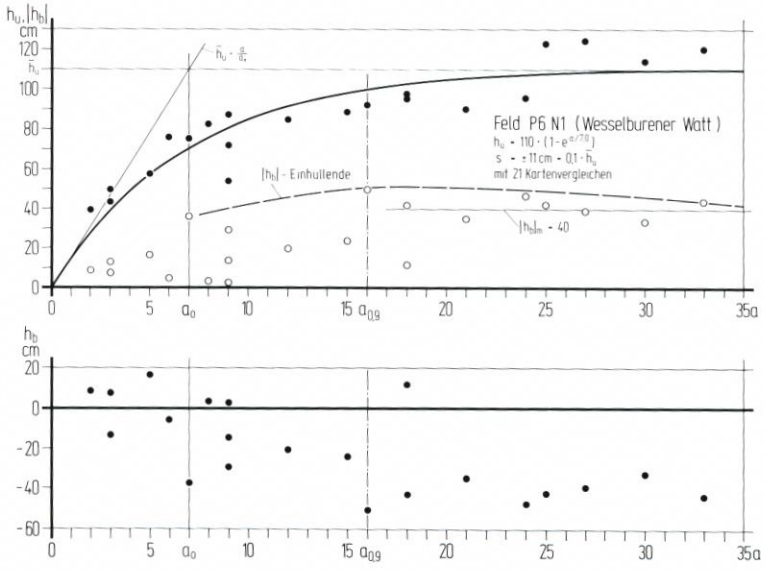


Abb. 14. Umsatzhöhen h_u und Bilanzhöhen h_b am Südrand des Wesselburener Wattes

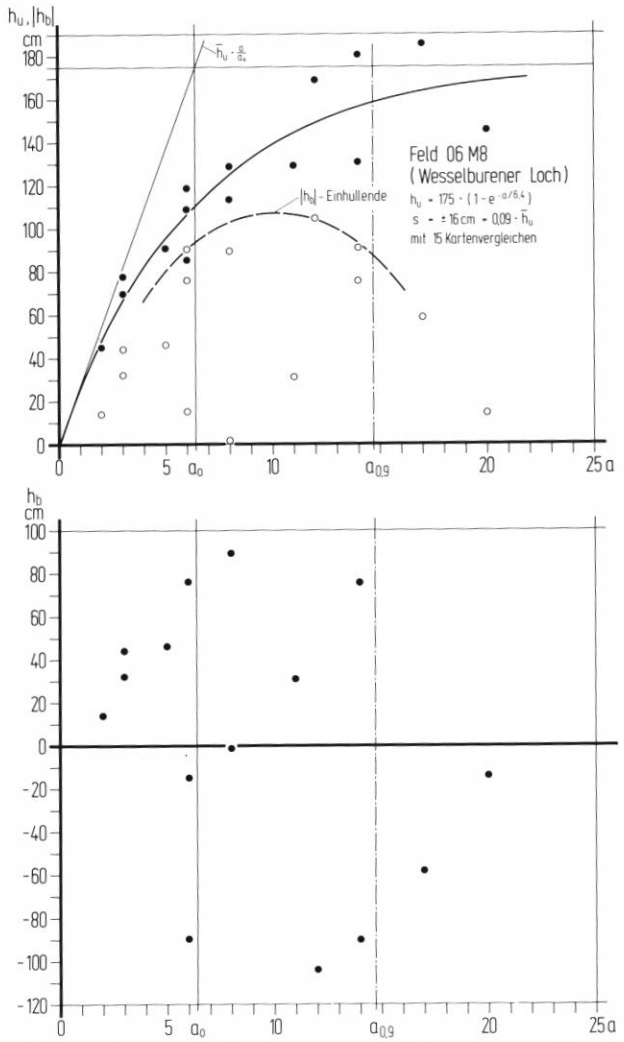


Abb. 15. Umsatzhöhen h_u und Bilanzhöhen h_b im westlichen Wesselburener Loch

3. Analysen zur morphologischen Charakteristik

3.1 Bisherige Untersuchungen

Nach den Ausführungen von Kap. 2 ist zu erwarten, daß über die Funktion $h_u = f(a)$ der Umsatzhöhe Aussagen zur morphologischen Charakteristik, zur Stabilität eines Gebietes und zur Beziehung von Kartenvergleichen über unterschiedlich lange Zeiträume möglich sind. Darüber hinaus aber liefert der Quotient $\bar{h}_u/a_0$ einen guten Anhalt für die Größe des jährlichen Umsatzes, der wohl am ehesten mit den einwirkenden Kräften in Verbindung gebracht werden kann.

Nun wurden im Laufe der letzten Jahrzehnte eine ganze Reihe verschiedener Verfahren

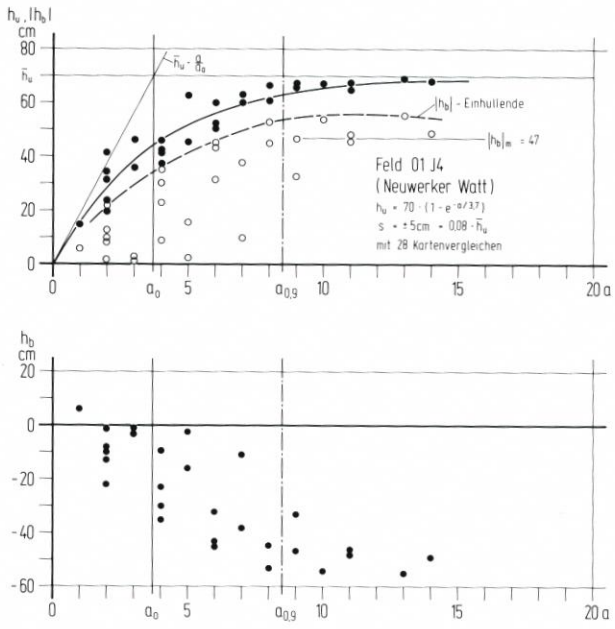


Abb. 16. Umsatzhöhen h_u und Bilanzhöhen h_b im Einzugsgebiet des Buchtloch (Neuwerker Watt)

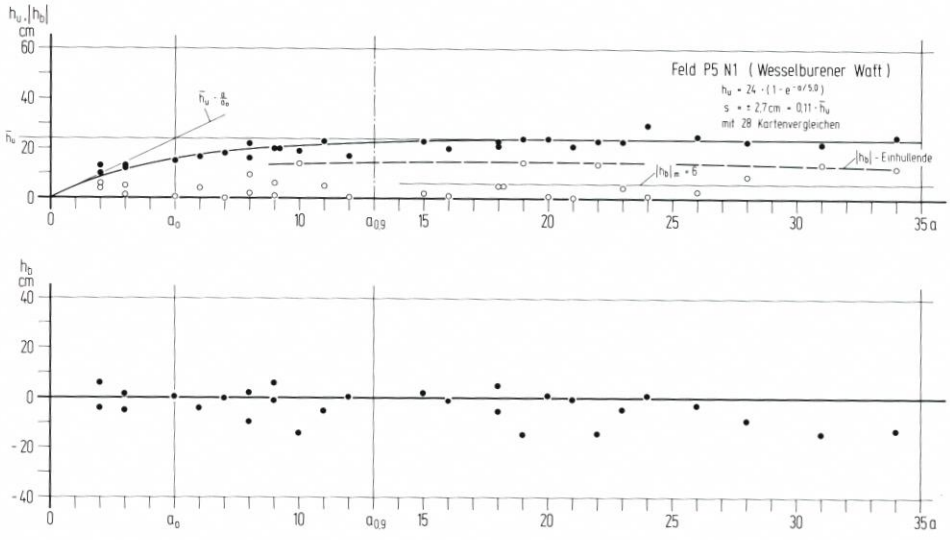


Abb. 17. Umsatzhöhen h_u und Bilanzhöhen h_b auf dem Wesselburener Watt

für topographische und morphologische Analysen entwickelt. Bei der Bearbeitung von Kartenvergleichen handelt es sich vornehmlich um folgende Methoden:

- Übereinanderzeichnen der Tiefenlinien der zu vergleichenden Karten,
- Darstellung bestimmter Profile in Abhängigkeit von der Zeit (Profilganglinien oder Zeit-Weg-Linien),
- flächenhafte Darstellung der Tiefendifferenzen zweier zu vergleichender topographischer Karten (Tiefenänderungspläne).

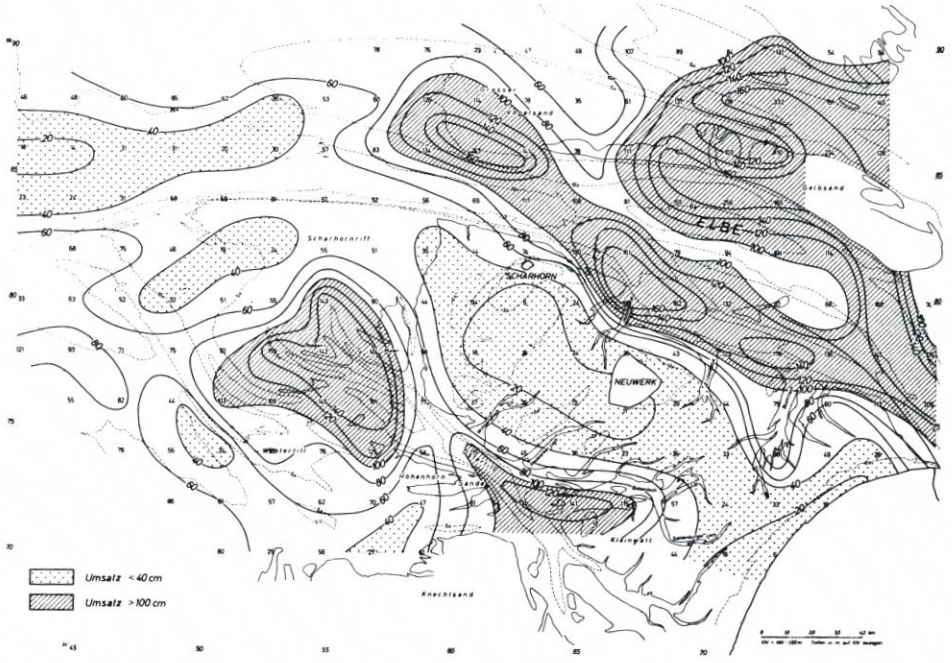


Abb. 18. Topographische Veränderungen in der Außenelbe von 1965 bis 1970; Umsatzhöhen in cm als Mittelwerte in 4 km² großen Flächen (aus GÖHREN, 1971)

Letzteres Verfahren wird von GÖHREN (1970) favorisiert und ausführlich für Untersuchungen im Elbmündungsgebiet genutzt. Zusätzlich bringt er hier noch zwei und 1971 eine weitere
- Darstellung der Umsatzhöhen als Mittel für 4 km² große Felder (Beispiel auf Abb. 18).

RENGER (1976) führt die später im schleswig-holsteinischen Wattenmeer angewandte
- Stabilitätsanalyse von Watteinzugsgebieten und Tidebecken auf der Grundlage von zweidimensionalen Niveauflächen-Darstellungen ein. Er charakterisiert Watteinzugsgebiete durch Verteilungsfunktionen.

Zur Untersuchung von Morphodynamik und Materialbilanz in der Unterelbe verwendet DAMMSCHNEIDER (1983) ein Meßverfahren auf Isolinienbasis:
- Größe von Isobathenflächen unter Kartennull (KN); Berechnung des „morphologischen Volumens" zwischen KN und Sohle über die mittlere Wassertiefe der Fläche; Vergleich der Volumina verschiedener Karten in Rasterflächen.

Schließlich hat TAUBERT (1986) die bisherigen Untersuchungsmethoden erneut zusammengestellt, eine weitere hinzugefügt und den heutigen Wissensstand beschrieben. So verwendet er die
- morphodynamische Kartenanalyse unter Einbeziehung von Geschwindigkeit, Beschleunigung und „Drive" von Veränderungen.

Den Zusammenhang zwischen den äußeren Kräften und den Formänderungen versucht er über den allgemeinen Ansatz aus der Festigkeitslehre herzuleiten als

$$dz = \frac{F \cdot z}{A \cdot M}$$

mit dz = Formänderung der Wattoberfläche

F = äußere Belastung
z = Wassertiefe
A = Wattfläche
M = innerer Widerstand

Als Formänderung setzt TAUBERT also die Höhenänderung dz einer quadratischen Fläche A infolge äußerer Belastung F an und stimmt damit mit einem der Ziele des MORAN-Projektes überein.

Jedes der erwähnten Verfahren hat seine Vorzüge und Nachteile. Eine kurze Diskussion soll veranschaulichen, warum für die Lösung der im Projekt gestellten Aufgaben (Kap. 1) trotz des großen „Angebotes" ein neuer Weg beschritten worden ist:

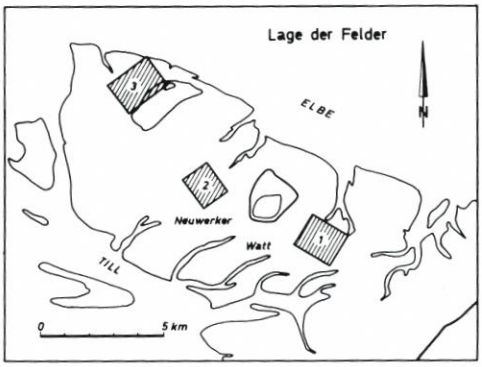
Das Übereinanderzeichnen von Tiefenlinien bleibt nach GÖHREN (1970) „nur dann übersichtlich, wenn man sich auf Kartenausschnitte oder einige wenige Tiefenlinien beschränkt". Zudem ist die „Verlagerung" einer Tiefenlinie kein physikalischer Parameter, sondern nur eine topographische Hilfsgröße zur Demonstration der Bilanz zwischen zwei oder (bei Wahrung der Übersichtlichkeit) drei Aufnahmen. Verallgemeinerungen für Gebiete gleicher morphologischer Charakteristik können höchstens qualitativ sein. So lassen sich zwar Bereiche feststellen, die höhenstabil sind oder – besonders an Wattströmen und Brandungsplaten – die Lage ihrer Ränder verändern. Um welche Massenbilanzen es sich dabei handelt oder wie groß kurzzeitige Wechsel zwischen den Aufnahmen sein können, ist so nicht festzustellen. Auch die Mitteilung über die Zeit (in m Verlagerung je Jahr z.B.) ist durchaus problematisch: Die Differentialgleichung der Umsatzfunktion (Kap. 2.4) und Abb. 14 bis 17 dokumentieren, daß weder der aus Kartenvergleichen ablesbare Umsatz noch die Bilanz linear mit a wechseln.

Zeit-Weg-Linien sind nach GÖHREN (1970) „besonders zur Herausarbeitung langfristiger Veränderungen geeignet, geben jedoch nur ein eindimensionales Bild". Er hat sie dann auch verwendet, um die Tiefenänderungen und Verlagerungen der Außenelbe und die Strandveränderungen bei Scharhörn zu zeigen. So können Veränderungen in der Lage von Tiefenlinien beschrieben und Phasen stärkerer und geringerer Stabilität zeitlich eingegrenzt werden. Aber auch mit diesem Verfahren können allgemeine Aussagen über das Verhalten einer Fläche nur schwer (durch viele eng aneinanderliegende Profile, wie dies auch TAUBERT [1986] für die Norderhever versucht) und Angaben über Umsatz und Bilanz, also die durch die angreifenden Kräfte bewegten Massen, gar nicht gemacht werden.

Tiefenänderungspläne, wie sie LUCHT und HUNDT schon in den 1950er Jahren, danach KNOP (1961, 1963), GÖHREN (1970, 1971), KLUG und HIGELKE (1979) und eine Reihe weiterer Autoren verwendet haben, bieten nach GÖHREN (1970) „die Möglichkeit, die morphologischen Entwicklungen ausgedehnter Gebiete in einfacher und übersichtlicher Form herauszustellen, und sind in dieser Hinsicht den beiden o.g. Verfahren überlegen". Dazu wird das Untersuchungsgebiet gerastert, bei den MORAN-Arbeiten im Gauß-Krüger-Netz in 1 km^2 große Felder. Zur Aufstellung der Pläne können – wie bei KNOP (1961) – Höhendifferenzen durch Übereinanderlegen zweier topographischer Karten oder – wie bei GÖHREN (1970) – die Differenzen der mittleren Höhen begrenzter Felder zweier Aufnahmen bestimmt werden. So ergeben sich die Bilanzhöhen.

Eine der Aufgaben des MORAN-Projektes ist es, auf die letztere Art die Karten um 1975 und um 1980 miteinander zu vergleichen. Da dies aus verschiedenen Gründen nicht für das gesamte Küstenvorfeld möglich sein wird, wurde die Idee geboren, allgemeine Gesetzmäßigkeiten zwischen der Bilanzhöhe h_b und dem Zeitraum a zwischen zwei topographischen Aufnahmen herzuleiten. Dazu zeigen die Beispiele auf Abb. 5 wie auf Abb. 14 bis 17 schon die Schwierigkeiten, die sich bei einer Verallgemeinerung der aus einem einzigen Kartenvergleich hervorgehenden Aussagen einstellen: Über relativ kleine Zeiträume (Anhaltswert: bis

Feld	km²	Anzahl der vermarkten Niv.-punkte (n)
1	3,2	319
2	2,4	240
3	3,5	354



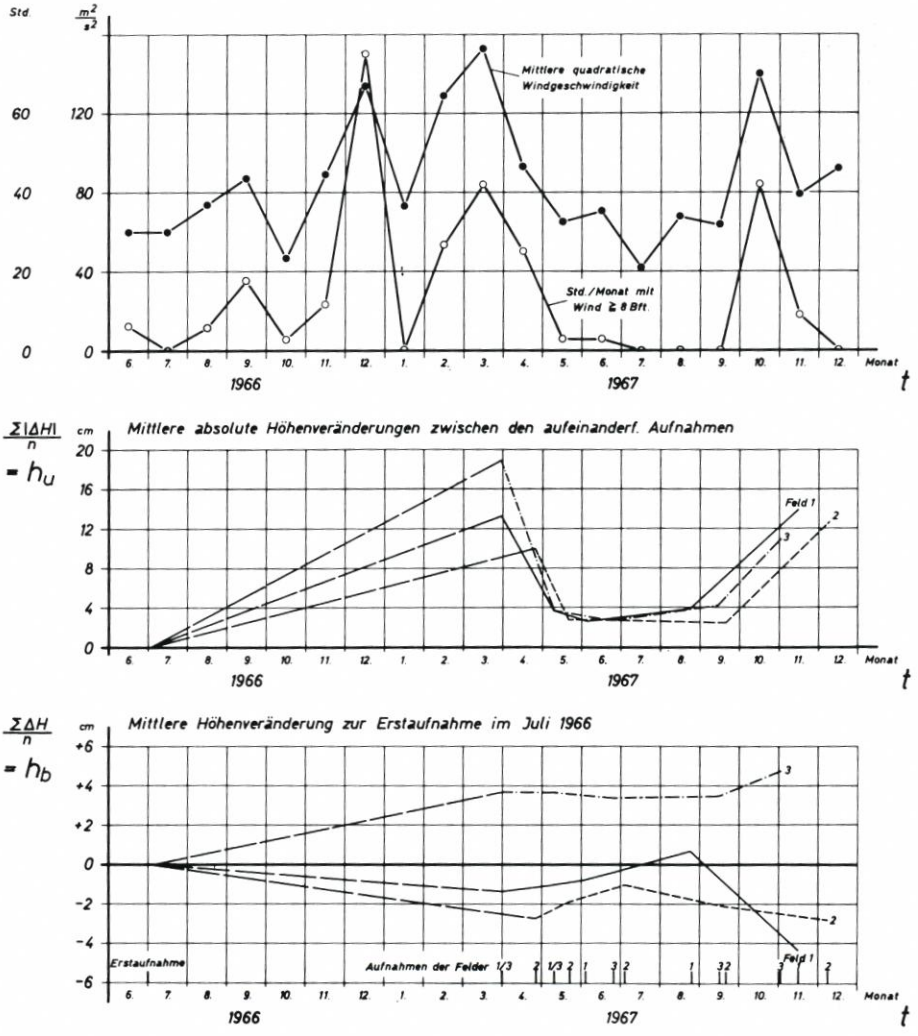


Abb. 19. Höhenveränderungen in drei Testfeldern im Neuwerk-Scharhörner Watt (aus GÖHREN, 1970)

15 Jahre) sind mehr oder weniger „willkürlich" Sedimentation oder Erosion in verschiedenen Beträgen in ein und demselben Gebiet festzustellen. Und nur wenn der Kartenvergleich über ein Jahr geht, besteht die Aussicht, daß die ermittelte Bilanzhöhe Schlüsse auf die in dieser Zeit tatsächlich bewegten Massen zuläßt. Entsprechend kritisch ist die Methode, durch einfache Division mittlere Jahresveränderungen zu bilden oder diese möglicherweise zu extrapolieren.

Die Darstellung der Umsatzhöhen h_u, wie sie GÖHREN parallel nach demselben Verfahren für einige Vergleiche benutzt, liefert ein anschaulicheres Bild über die tatsächlichen Vorgänge, wie dies schon mit Abb. 5 bis 8 zu erläutern versucht wurde. Abb. 18 zeigt einen dieser Vergleiche mit Umsatzhöhen von 4 km² großen Einheiten über einen Zeitraum von fünf Jahren. Er weist auf erwartungsgemäß kleine h_u auf dem brandungsfreien Watt und im tieferen Wasser der äußeren Außenelbe hin, zeigt dagegen große Umsätze im Bereich der Brandungsplaten, des Neuwerker Fahrwassers (u.a. als Folge von Verklappungen) und des Großen Vogelsandes/Gelbsandes (mit dem Resultat längerfristig gleichgerichteter Veränderungen). Dieses Bild wird – soweit dort erfaßt – durch die Untersuchungen auf Abb. 10 und 11 qualitativ bestätigt und erhärtet Aspekte, die in Kenntnis dieser Darstellungen schon in Kap. 2.3 und 2.4 genannt sind.

So weist der Umsatz auf die morphologische Aktivität und auf die Intensität des Materialtransportes (GÖHREN, 1970, 1971). Damit scheint es zwingend, Untersuchungen über Zusammenhänge zwischen Materialtransport und Energie mittels Umsatzhöhen anzustellen. Folglich wurde im MORAN-Projekt beschlossen, Analysen wie auf Abb. 14 bis 17 durchzuführen.

Die diesbezüglichen Arbeiten enthalten als kürzesten betrachteten Zeitraum a = 1 Jahr. Es wurde in Kap. 2.4 auch hergeleitet, daß die jährliche Umsatzrate zu $\bar{h}_u/a_0$ bestimmt werden kann.

Detaillierte Untersuchungen von GÖHREN (1970) erbrachten, daß Umsatzhöhen wie nach 10 Monaten auch schon nach 1 Monat auftreten können: Abb. 19 zeigt die Windverhältnisse sowie die h_u und h_b in drei Testfeldern, für die auf Abb. 20 $h_u = f(a)$ und $h_b = f(a)$

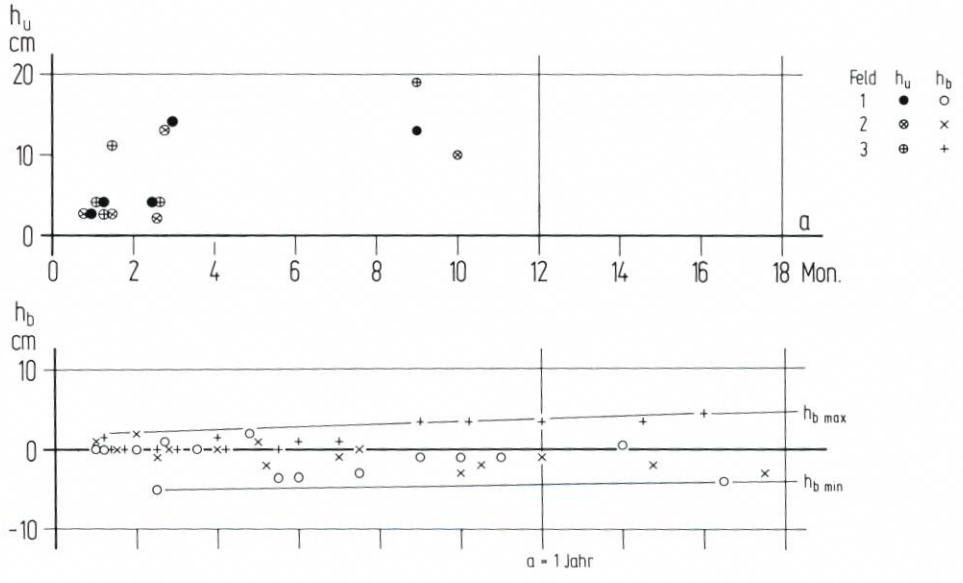
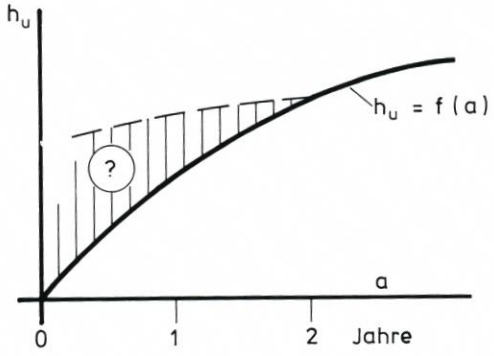


Abb. 20. Umsatz- und Bilanzhöhen über dem Vergleichszeitraum a nach den Daten von Abb. 19

dargestellt sind. Kurzfristige äußere Einwirkungen (siehe Abb. 19) führen beim Umsatz zu Beträgen, die bis zum Vergleichszeitraum a = 10 Mon. kaum weiter ansteigen, absolut aber recht klein bleiben. Da die Bilanz stets um Null verbleibt, ist dies ein weiterer Hinweis auf die Bedeutung des Umsatzes bei energetischen Betrachtungen. So wies auch REINECK (1976) durch Untersuchung der Sedimente auf der Wattwasserscheide von Cuxhaven nach Neuwerk nach, daß die Sturmfluten im Januar 1976 Erosionen von weniger als 20 cm hervorriefen und unmittelbar nach den Sturmfluten wieder Sedimente aufgetragen wurden. Diese Zahl paßt sehr gut zu den ermittelten $\overline{h}_u$ von rd. 20 cm (Kap. 3.4).

So ist zwar generell eine Sättigungsfunktion für die Beschreibung der Umsatzhöhen nachweisbar, es bleibt aber für sehr kleine a eine „Nische", für deren Erfassung bei Bedarf gesonderte Untersuchungen mit Präzisionsnivellements erforderlich würden:



Die Analyse von Watteinzugsgebieten, wie sie RENGER (1976) entwickelt und DIECKMANN (1985) modifiziert haben, wurde in wesentlich einfacherer Form auch von KLUG und HIGELKE (1979) angewendet. Damit lassen sich nach RENGER „morphologische Gleichgewichtszustände und Materialbilanzen näherungsweise vorausberechnen. Für das beobachtete und gemessene Formverhalten der Bodenoberflächen von Watteinzugsgebieten und Tidebecken der Deutschen Bucht wurden umfangreiche quantitative Stabilitätsanalysen durchgeführt. Grundlage war die Erfahrung, daß sich in den unbeeinflußten Watteinzugsgebieten und Tidebecken der Deutschen Bucht, die sich in einem hydrologisch-morphologischen Gleichgewichtszustand befinden, im zeitlichen Mittel bestimmte Verhältnisse zwischen den Durchflußquerschnitten und den jeweils angeschlossenen Wasserflächen bzw. dem mittleren Tidevolumen ausbilden." Das Verfahren ist auf abgrenzbare Gebiete beschränkt und beinhaltet keinen Kartenvergleich, sondern die Auswertung einzelner topographischer Aufnahmen. Es werden Niveauflächen und Volumina in Abhängigkeit von der Längsachse und der topographischen Höhe bestimmt. Die Aussage, daß einzelne Gebiete im Gleichgewicht stehen, läßt sich als „Bilanz gleich Null" deuten. Angaben über den Umsatz sind nicht möglich. Vergleichende Betrachtungen können zwischen verschiedenen Einzugsgebieten (oder einzelnen in verschiedenen topographischen Aufnahmen) auch quantitativ angestellt werden. Insoweit sind Prognosen über den Einfluß menschlicher Eingriffe in ein Prielsystem möglich. Dieses Verfahren könnte ergänzt werden, wenn der MORAN-Ansatz nicht auf feste kleine Einheiten, sondern z.B. auf ein Prielgebiet angewendet wird*.

Dagegen vertritt TAUBERT (1986) die Meinung, es sei „fragwürdig, daß ein Langzeit-

---

* Auf dem MORAN-Symposium 1983 hatte Herr Dr. WIELAND, ALW Heide, dazu bereits einige Gedanken vorgetragen.

gleichgewicht zu einer normierbaren Hohlform an allen Wattenmeerküsten der Deutschen Bucht führt", und begründet dies wie folgt:

- „Mit so wenig bekannten Parametern über die natürlichen Formänderungsprozesse in Wattenbereichen,
- ohne ausreichende Kenntnis über Kausalitäten für die Formänderung von Tidebecken und
- ohne Beachtung der grundlegenden Unterschiede von Prozeßmechanismen in verschieden gearteten Küstenrevieren

läßt sich mit einer Momentaufnahme keine Dynamik darstellen."

Sein „Phoronomieansatz", in dem Veränderungen von Tiefenlinien, Flächen und Volumina über die Zeit dargestellt werden, liefert üblicherweise ebenfalls keine Daten über Umsätze und Bilanzen, die eine physikalisch faßbare Verbindung zur wirkenden Energie gestatten. Aber wie GÖHREN (1970, 1971) und HOVERS (1973) zieht auch TAUBERT (1986) für seine morphologischen Analysen alle ihm brauchbar erscheinenden Ansätze und Verfahren der Kartenanalyse heran, um zu einer umfassenden Beschreibung der Vorgänge zu kommen. Eine genügend große Anzahl von Kartenvergleichen könnte zu der Möglichkeit führen, eine Prognose zu quantifizieren.

DAMMSCHNEIDER (1983, 1985) benutzt seine flächenhafte Auswertemethode – also praktisch gerasterte Tiefenänderungspläne –, um Sedimentations- und Erosionszonen festzustellen und deren Änderungen zu dokumentieren. Er faßt verschiedene Rasterflächen zu Längs- und Querprofilen in der untersuchten Elbe zusammen. Damit wird einerseits ein Schritt in die Richtung getan, in die später TAUBERTS Untersuchungen (1986) gehen, andererseits aufgezeigt, daß die MORAN-Analyse durch Betrachtung des Verhaltens benachbarter Felder sinnvoll zu erweitern ist.

3.2 Erste Eingrenzung von Gebieten ähnlicher morphologischer Aktivität

KNOP (1961, 1963) bringt die topographischen Veränderungen im nordfriesischen Wattenmeer von der Aufnahme 1935/37 bis zur Aufnahme 1955/57 (also a = 18 bis 22 Jahre) vorwiegend mit den mittleren Tideverhältnissen in Zusammenhang. GÖHREN (1970, 1971) stellt eine Fülle von topographischen Veränderungen im Elbmündungsgebiet mit a = 1 Jahr (1965–66) bis a = 34 Jahre (1930–64) zusammen und erläutert sie mit den Erkenntnissen über die Strömungs- und Seegangsverhältnisse, wie HOVERS (1973) es unter spezieller Fragestellung dann auch für die Außenweser tut. BARTHEL (1981) vergleicht die Topographie des MORAN-Testfeldes Knechtsand von 1974 und 1979 (a = 5 Jahre). Darüber hinaus gibt es eine ganze Reihe ähnlicher Arbeiten, auf die hier im einzelnen nicht zurückgegriffen wird.

Um eine erste Eingrenzung sinnvoll vornehmen zu können, bedarf es natürlich möglichst umfassender Kenntnisse über die energetischen Verhältnisse, repräsentiert durch die Strömungen und den Seegang. Aus den Gebieten der o.g. Arbeiten lag dazu schon recht ausführliches Datenmaterial vor, sieht man vom Seegang in Nordfriesland ab. So lassen sich aus den genannten Vergleichen etwa folgende Schlüsse ziehen:

- Hochliegende, brandungsfreie Watten zeigen – über 1 wie über 5 oder über 20 Jahre – relativ kleine Umsätze (unter 4 dm für a = 5 Jahre und A = 4 km^2 auf Abb. 18) und Bilanzen nahe Null;
- im tiefen Wasser der äußeren Außenelbe sind die Bilanzen über 5 Jahre klein bis Null, die Umsatzhöhen liegen bei bzw. unter 4 dm (wiederum für A = 4 km^2); die größten Bilanzhöhen erreichen örtlich 4 dm bei a = 34 Jahre, 10 dm bei a = 3 Jahre;
- die Außenelbe zwischen Cuxhaven und Scharhörn wie der Wattstrom Till zeigen außerhalb

ihrer Ränder Sedimentations- und Erosionshöhen bis 5 dm (a = 1 Jahr), Einzelwerte (für Teilflächen von wenigen ha) bis 5 m bei a = 5 und a = 11 Jahre, bis 8 m bei a = 34 Jahre; Anwachs und Abtrag lösen sich im Laufe der Zeit in vielen Teilflächen ab, und es spielen künstliche Veränderungen mit hinein (Baggern, Verklappen, Leitdammbau), so daß diese Ergebnisse kaum zu verallgemeinern sind; daher war im MORAN-Projekt ein Aussparen solcher Gebiete verabredet;

- in den Brandungsgebieten des Rocheley Sandes, der Pellwormer Plate, des Knechtsandes und des Scharhörnriffs sind die Bilanzen für 1 km² große Felder nach dem optischen Eindruck weitgehend nahe Null; die Umsatzhöhen erreichen für a = 5 Jahre Werte von rd. 3 bis 5 dm; GÖHREN (1970) folgert, „daß hier weder Seegang noch Gezeitenströmungen starken Einfluß ausüben";
- die Umsätze in Prielgebieten liegen bei Werten bis 1 m, örtlich begrenzt auch höher, wobei die Bilanzen für 1 km² große Flächen über 5 wie über 20 Jahre nahe Null liegen dürften, da es sich üblicherweise um die bekannten seitwärtigen Verlagerungen handelt; aus Abb. 18 gehen diese Einzelheiten nicht hervor, da über 4 km² große Einheiten gemittelt wurde;
- die stärksten Umsätze (bis 12,5 m auf einer Teilfläche im Gebiet der Kleinen Knechtsände) finden sich bei den Brandungsplaten durch deren Verlagerung sowie an den Rändern der großen Wattströme: Beträge von 5 m über a = 5 und 20 Jahre, nach KNOP (1961) „in Einzelfällen bis 10 m treten dicht nebeneinander auf. Es handelt sich dabei vor allem um starke Abbrüche an den Kanten des Strombettes, besonders im Tiefenbereich von 1 bis 5 m unter NN. Unmittelbar daneben erfolgt eine Auffüllung." Letzteres deutet auf flächenmäßig kleine Bilanzen. Nach GÖHREN (1970) „dürften hier Rinnenverlagerungen wie flächenhafte Umlagerungen durch Brandungstätigkeit gleichermaßen wirksam sein".

REINECK (1975) schreibt nach Auswertung eigenen Materials und dem von GÖHREN zuvor vorgelegten:

„Die Untersuchungen ergaben, daß mit Ausnahme der Westkante und des seewärts gelegenen Teils der Elb- und Ostertillkante das gesamte Wattgebiet nur selten besonders stark wirksamen hydraulischen Kräften ausgesetzt ist. Nur bei extremen Situationen, die im Mittel seltener als einmal im Jahr auftreten, werden die Wattflächen stärker beeinträchtigt. Auch die jährlichen Vergleichsmessungen zur morphologischen Entwicklung weisen den größten Teil der Wattfläche zwischen Neuwerk und dem Festland in den Jahren 1965 bis 1968 mit Zuwachs- oder Abtragshöhen von nur etwa 1 dm aus. Höhenvermessungen in kurzen Zeitfolgen von Wochen innerhalb dreier Testfelder ergaben Veränderungen, die im Zentimeterbereich und damit in der gleichen Größenordnung liegen (GÖHREN, 1970). Da auf weiten Flächen hydraulische Kräfte außerordentlich schwach einwirken, wäre bei hinreichendem Angebot aller Korngrößen eine nachhaltige Verschlickung zu erwarten, die jedoch nicht vorhanden ist."

Die erste grobe Unterteilung kann durch die wirksam werdenden Kräfte generell bestätigt werden:

- Hochliegende Watten ohne Brandung und mit geringen Tide-, aber großen Triftstromgeschwindigkeiten;
- mehr als 10 m tiefes Wasser mit geringem Seegangseinfluß auf den Boden und mäßigen Stromgeschwindigkeiten;
- Gebiete mit häufiger flächenhafter Brandung als maßgebender Gestaltungskraft;
- kleinere Prielgebiete, die sich relativ kurzfristig in Grenzen seitlich verlagern*, mit gewissem Seegangs- und mäßigem Tideströmungseinfluß;

---

* Nach LÜDERS im Sandwatt bis 100 m/Jahr.

– Brandungsplaten einschließlich zwischenliegender Rinnen sowie Ufer der Wattströme mit starker Brandung und Tideströmung an steilen Kanten.

3.3 Analyse des topographischen Datenmaterials

3.3.1 Südliches Elbmündungsgebiet

Aus dem Forschungsgebiet der ehemaligen FORSCHUNGSGRUPPE NEUWERK, ergänzt durch Messungen vor allem des WASSER- UND SCHIFFAHRTSAMTES CUXHAVEN, liegen topographische Aufnahmen in engen Zeitabständen und auf identischen Rasterlinien vor (SIEFERT und LASSEN, 1968). Die Daten der ersten Karten wurden von GÖHREN (1970), vor allem in Form von Tiefenänderungsplänen, analysiert. 1971 erweiterte er diese Arbeit um Hinweise auf den Sandtransport aus Strömungs-, Leitstoff-, Schwebstoff- und Sedimentmessungen. So war es relativ einfach, die Unterlagen für die MORAN-Ziele aufzubereiten. Dazu wurde das Gebiet in kleine Einheiten von je 1 km^2 Größe unterteilt, diese wiederum in 100 Teilflächen zu je 1 ha, deren mittlere Höhen (in dm zum Bezugsniveau) von GÖHREN digitalisiert vorlagen bzw. für spätere Jahrgänge digitalisiert werden mußten. Die Auswertungen enthalten folgende Daten:

mittl. topogr. Höhen zweier Aufnahmen,
deren topogr. Ungleichförmigkeiten,
Umsatz-, Bilanz-, Sedimentations- und Erosionshöhen als Summen über 4×25 sowie als Summen und Mittel über 1×100 ha.

Die Lagebezeichnung wurde aus einer Buchstaben-Zahlen-Kombination gebildet, wie auf Abb. 21 angedeutet: Im Gauß-Krüger-Netz im Rechtswert bei Borkum mit A0 beginnend, dann A1 . . . A9, B0, B1 usw., im Hochwert in Höhe Wilhelmshaven mit E0, E1 . . . nach Norden, jeweils für die linke untere Ecke des Quadrates geltend.

Das Untersuchungsgebiet wurde also nicht nach topographischen Formen, sondern nach festen geographischen Grenzen gegliedert. Abb. 13 zeigt einen Ausdruck des verwendeten Rechners HP 85.

Entsprechend der 1983 publizierten Vorgehensweise wurden für die einzelnen Felder auf der Basis von wenigstens 45 Vergleichen der Jahrgänge

1954	1967	1974	(KFKI-Gesamtaufn.)
61	68	75	
63	70	76	
64	72	77	
65	73	79	(KFKI-Gesamtaufn.)
66			

untereinander (also bis zu 120 Kartenvergleiche je kleiner Einheit) die Umsatz- und die Bilanzhöhen

$$h_u = f(a),\ h_b = f(a)$$

analysiert.

Die Küste, 45 (1987), 1-57

3.3.2 Aufnahmen aus 1974/76 und 1979/81

Die quasi-simultanen KFKI-Vermessungen liefen 1974/76 und 1979/81. Das Ergebnis der ersten Aufnahme liegt als farbiges Kartenwerk im Maßstabe 1:25 000 vor (BETTAC et al., 1984). Allerdings ist dabei zu berücksichtigen, daß große Teile des nordfriesischen Wattenmeeres, Jadebusens und Dollarts aus älteren Karten übernommen wurden. Die Aufnahmen selbst beruhen auf drei Verfahren unterschiedlicher Genauigkeit, nämlich Nivellements in Teilen des Wattes, Luftbildbefliegungen in weiteren trockenfallenden Gebieten und Peilungen. Voraussetzungen und Durchführung der Verfahren sind nicht Gegenstand dieser Arbeit.

Die zweite Aufnahme umfaßt zwar das gesamte Gebiet, die Kartenherstellung verzögerte sich jedoch so stark, daß es nicht gelang, beide Aufnahmen, also 1974/76 und 1979/81, bis zum Ende des geförderten Projektzeitraumes (1985) vollständig miteinander zu vergleichen. Als Handikap erwies sich dabei auch, daß das gesteckte Ziel nur auf der Basis von Arbeitskarten mit Angaben von Tiefenzahlen zu erreichen war, weil Vergleiche von Tiefenlinien relativ ungenau sind. Sofern die Vermessungsgebiete beflogen worden waren, lagen aber – wenn überhaupt – nur Tiefenlinien vor. In diesen Fällen sind dann Peilpläne 1:20 000 des DEUTSCHEN HYDROGRAPHISCHEN INSTITUTS (für das nord- und ostfriesische Küstenvorfeld) verwendet worden. Da diese aber nur die Rinnen, Priele und tieferen Watten erfaßten, deren Lage sich innerhalb von fünf Jahren auch noch verändern kann, mußte das Mosaik der Kartenvergleiche unvollständig bleiben. So zeigt Abb. 21 an, welche Gebiete in vielfachen Vergleichen, in Vergleichen 1974/76 mit 1979/81 in den Maßstäben 1:10 000 und 1:20 000 und welche durch automatischen Vergleich digitalisierter Aufnahmen untersucht wurden. Bei letzteren handelt es sich im wesentlichen um die sog. „blauen Karten" vor dem Flachwassergebiet. Hier ist der Vergleich mittlerer Tiefen ein unbefriedigender Ersatz für die gescheiterte Verwendung des TASH-Programmes.

Kartenvergleiche über einen Zeitraum von fünf Jahren gelangen nicht überall, wie oben bereits erwähnt. Abb. 22 zeigt, wie lang der „KFKI-Zeitraum", der den hier vorgelegten Ergebnissen zugrunde liegt, tatsächlich ist. Er variiert zwischen zwei und acht Jahren.

3.3.3 Zur Genauigkeit der Vermessung*

Bei den synoptischen Vermessungen wurden wegen der natürlichen Gegebenheiten verschiedene Aufnahmeverfahren angewendet (BETTAC et al., 1984):

Die Wattflächen oberhalb SKN wurden durch Tachymetrie oder durch Serien-Einzelbild-Auswertung des Wasserlinienverfahrens erfaßt, die Flächen unterhalb SKN durch Echolotvermessung. Parallel hierzu wurde die gerätetechnische Ausrüstung bei den beteiligten Küstendienststellen für eine automatische Datenverarbeitung optimiert. Die Ortsbestimmung wurde durch Einführung des Syledis-Vermessungssystems im Hyperbel-Modus der Firma Sercel, Nantes, im Frequenzbereich 406–410 MHz gegenüber HiFix/Decca verbessert. Die Aufnahme- und besonders die Auswertesoftware wird genutzt, durch Vorgabe entsprechender Fehlerschranken nur plausible Messungsdaten zu verarbeiten bzw. „Falschwerte" zu überprüfen.

Die verfahrenstechnischen Voraussetzungen für die Herstellung der höchstmöglichen

* Dieser Abschnitt wurde weitgehend von Herrn Dr.-Ing. SCHLEIDER, WSD Nordwest, Aurich, zusammengestellt.

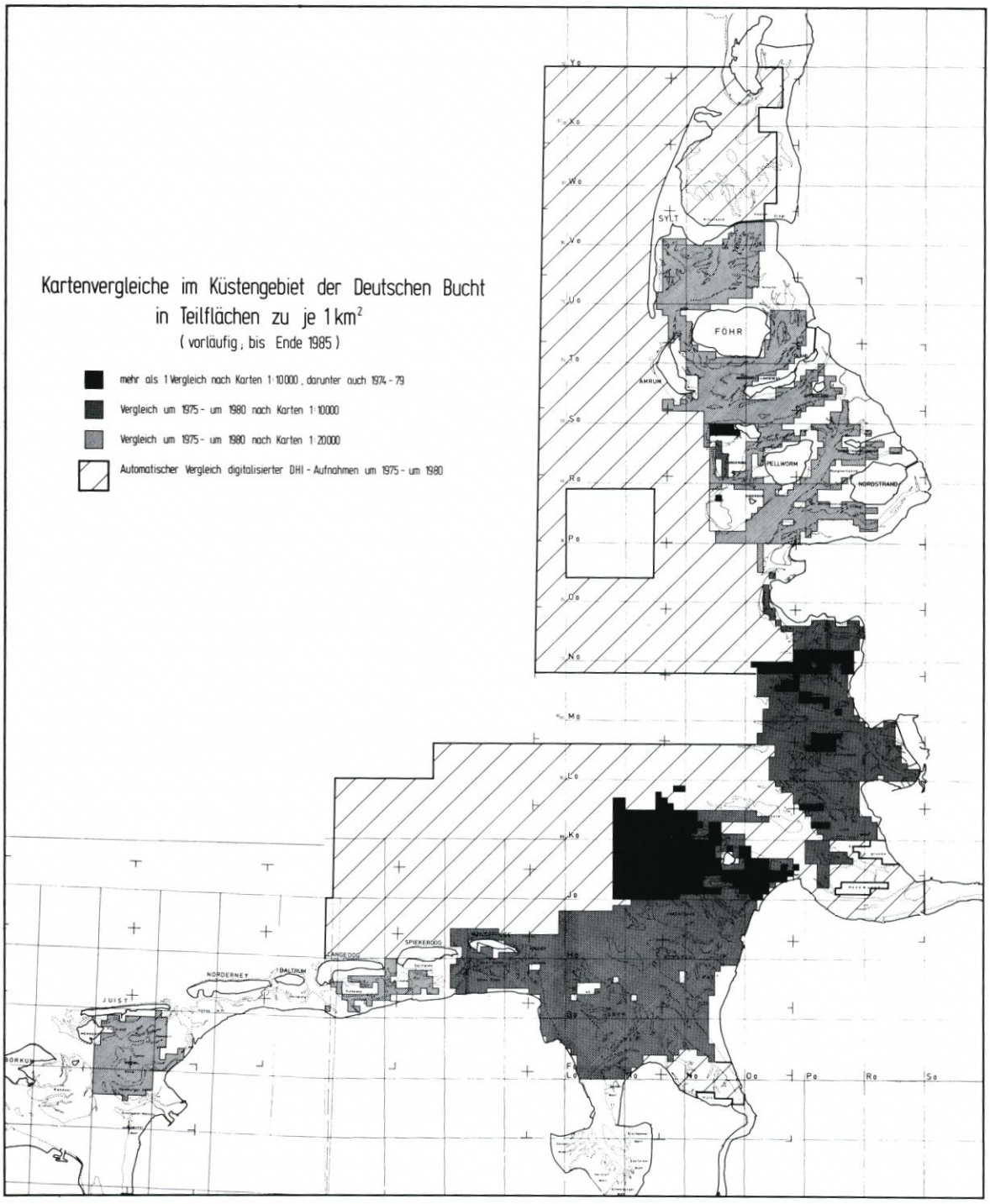


Abb. 21. Kartenvergleiche im Küstengebiet der Deutschen Bucht um 1975 bis um 1980 (Zwischenstand)

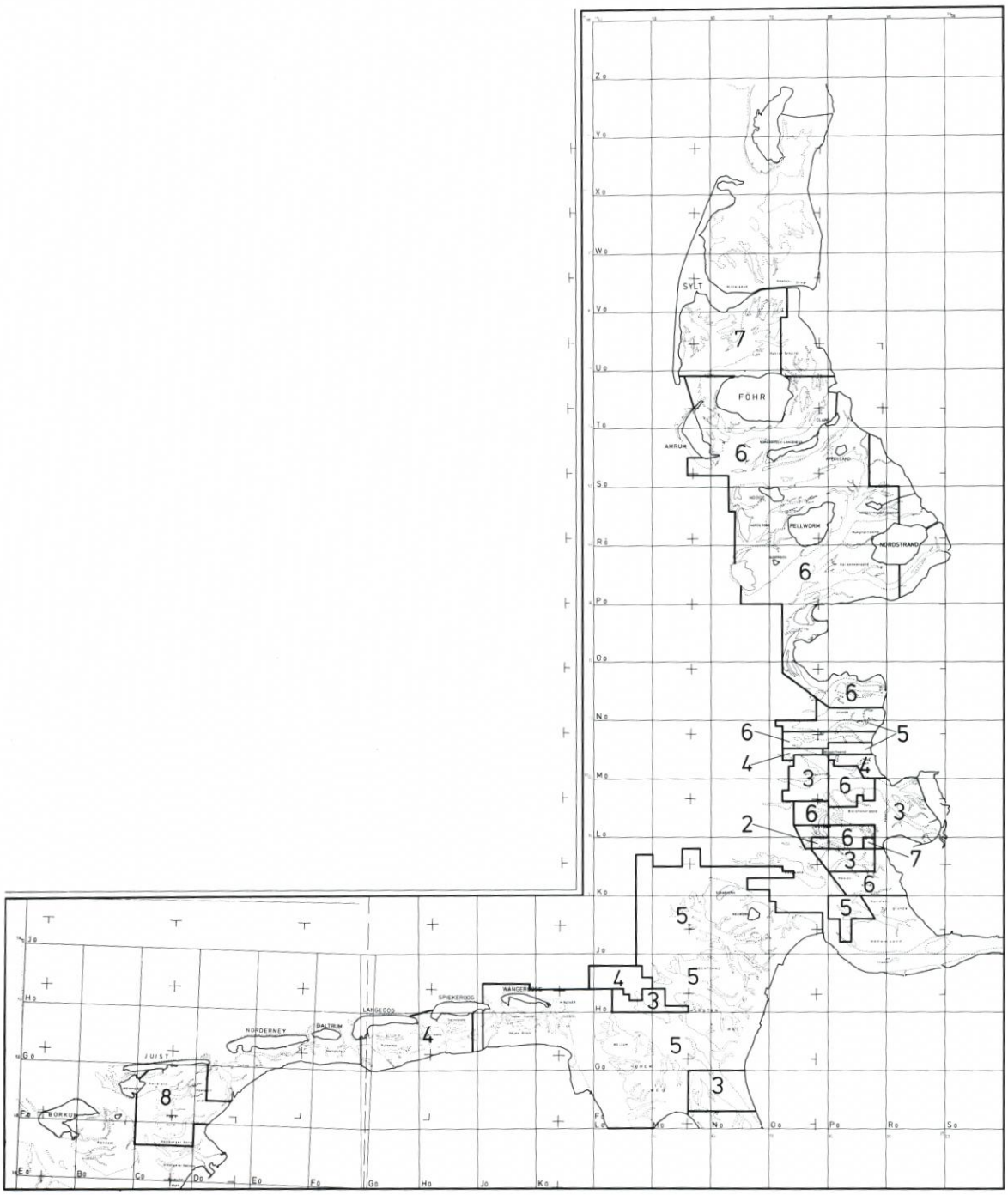


Abb. 22. Vergleichszeitraum a in Jahren für den Kartenvergleich „etwa 1975“ bis „etwa 1980“

Auswertegenauigkeit sind gegeben. Die Erwartungen an die Genauigkeit wurden 1978 von der Projektgruppe wie folgt definiert:

Nivellements: 0,2 bis 4 cm (Zusammenstellung bei SIEFERT und LASSEN, 1968)

Peilungen:
a) nahe bei Hilfspegeln: durch Beschickungsfehler bis 1 dm; Lotungsfehler wegen geringer Wassertiefen deutlich unter 1 dm (GÖHREN, 1968)
b) im äußeren Küstenvorfeld: durch Lotungsfehler 1 bis 2 % der Tiefe, bis 4 dm bei 20 m Tiefe; durch Beschickungsfehler, bei Distanzen von 10 bis 30 km, 3 bis 5 dm (GÖHREN, 1968; durch HOVERS [1973] für die Außenweser bestätigt);
c) gerätetechnische Unsicherheit: 0,25 % vom Endwert oder 5 cm (SCHLEIDER, 1981).

In diesem Zusammenhang müssen auch die Genauigkeiten der Pegelaufzeichnungen bedacht werden (GÖHREN, 1968; SIEFERT, 1970).

Die Höhengenauigkeit ist für Punkte aus terrestrischen Vermessungen und aus dem Wasserlinienverfahren (Wattflächen oberhalb SKN) nach entsprechenden Untersuchungen im Sonderforschungsbereich 149 der Universität Hannover – Vermessungs- und Fernerkundungsverfahren an Küsten und Meeren – erreicht (1981, 1982).

Die Höhengenauigkeit für Tiefenpunkte aus Echolotvermessungen unter SKN kann durch direkte Soll-/Ist-Vergleiche kaum ermittelt werden. Die Genauigkeiten können aber durch Anwendung des Fehlerfortpflanzungsgesetzes realistisch abgeschätzt werden, sofern sie für die einzelnen Parameter bekannt sind. Hierfür war es wiederum erforderlich, Ungenauigkeiten der Ortsbestimmung und der Tiefenmessung durch Kalibrierung gering zu halten oder durch Meßanordnung einzuschränken, z.B. durch Wahl einer „hohen" Meßfrequenz für die Tiefenvermessung bzw. Vermessungen im näheren Bereich von Pegeln. Dazu zählt auch die Anpassung der Peilgeschwindigkeit an die jeweilige Wassertiefe.

Entscheidende Einflüsse haben danach die Genauigkeit der Echolotung, der Beschickung und der Ortsbestimmung. Zu berücksichtigen ist aber auch, daß die verwendeten Daten für die Standortkoordinaten x, y, z im Gauß-Krüger-Koordinaten-System der vorgegebenen Software entstammen. Hier wurden bereits Mittelbildungen oder Fehlergrenzen (Fenster) vorgegeben.

Unter Berücksichtigung dieser Faktoren lassen sich

die Echolotung mit $m_E = \pm 1$ dm
die Beschickung mit $m_B = \pm 2$ dm
die Ortsbestimmung mit ± 10 m (zur Berechnung von m_P)

(wiederholbarer Unsicherheit für das Gebiet der synoptischen Vermessungen unterhalb der SKN-Linie vertreten.

Hiermit ergibt sich bei Anwendung des Fehlerfortpflanzungsgesetzes und einer „Sohlenneigung" von 1 % mit

$$m_T = \pm \sqrt{m_E^2 + m_B^2 + m_P^2}$$

und eingesetzt

$$m_T = \pm \sqrt{0{,}1^2 + 0{,}2^2 + 0{,}1^2}\ [\text{m}]$$

---

* GÖHREN (1968) schreibt: „Um die Genauigkeit von Echolotungen unter natürlichen Meßbedingungen zu prüfen, wurden im Außenelbegebiet zwei rd. 3 km lange Profile in dichter Zeitfolge wiederholt aufgenommen. Die maximalen Abweichungen (Differenzen zwischen den höchsten und niedrigsten Werten der Aufnahmeserien) der gemessenen Einzeltiefen lagen überwiegend im Bereich 2 bis 5 dm, bei den mittleren Profiltiefen betrugen sie 1,5 und 2,0 dm. Es ließ sich nachweisen, daß die Streuung der mittleren Profiltiefen im wesentlichen auf Beschickungsungenauigkeiten zurückzuführen ist."

ein praxisnaher Wert für die Unsicherheit eines errechneten Tiefenpunktes zu $m_T = \pm 2{,}5$ dm*.

Hiermit können die im folgenden skizzierten Umsatzhöhen als tatsächlich aufgetreten angesehen werden. Die Größenordnung liegt außerhalb der Genauigkeitsgrenzen, wie diese durch die Vermessungsverfahren begründet sind. Zumindest für diejenigen Gebiete, in denen mit Genauigkeiten unter 1 dm gerechnet werden muß, gilt dies auch für die Bilanzhöhen.

Zu den Datenvergleichen für das Gebiet der „blauen Karten" (DHI-Vermessungen) werden folgende Hinweise gegeben:

- Die verglichenen Aufnahmen liegen 3 bis 7 Jahre auseinander, ohne daß dies im einzelnen angegeben ist; im Schnitt kann wohl von a = 5 Jahren ausgegangen werden;
- die mittleren Höhen der 1-km^2-Felder wurden vom DHI durch Mittelung der in diesen Flächen vorhandenen Lotungen bestimmt; deren Zahl liegt zwischen 1 und 200 je km^2 und wechselt auch von Jahrgang zu Jahrgang; die großen Nachteile einer solchen Mittelung hätten nur über die Verwendung digitaler Geländemodelle über das TASH-Programm gemindert werden können.

3.4 Ergebnisse

3.4.1 Morphologische Charakteristik kleiner Einheiten

Untersuchungen aus dem Elbmündungsgebiet zeigen – am ersten Beispiel ausführlich erläutert – folgende Charakteristiken:

Brandungsfreies Watt (FW)

a) Das brandungsfreie Watt ist auf Watten begrenzt, deren Wassertiefe bei MThw bis zu 2 m, im Bereich kleiner Priele auch etwas mehr, beträgt.

b) Die Beziehungen zwischen mittlerer Wellenperiode und -höhe werden für dieses Gebiet durch

$$\overline{T} = 2{,}8 \cdot \overline{H} + 1{,}8$$

empirisch beschrieben, die mittlere Wellensteilheit liegt bei

$$\overline{H}/\overline{T}^2 = \overline{H}/\overline{L} = \delta = 0{,}050$$

Die höchsten mittleren Wellenhöhen erreichen

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

mit d als Wassertiefe in Metern. Die kennzeichnenden Wellen zeigen

$$H_{1/3} = 1{,}45 \cdot \overline{H}$$
$$T_{H1/3} = 1{,}15 \cdot \overline{T}$$

(Siefert, 1974). Die Gesamtintensität im Seegang ist nach Airy-Laplace je Kammlängeneinheit

$$E^* = \frac{1}{8} \rho \cdot g \cdot H^2 \cdot L \quad [Nm]$$

und damit für einen 1 km breiten Streifen bei Berücksichtigung der natürlichen Seegangsverhältnisse im Flachwassergebiet (Siefert, 1972, 1974):

$$E^* = 1{,}23 \cdot H^2_{1/3} \cdot T^2_{H1/3} \quad [MNm]$$

oder für brandungsfreies Watt

$$E^* = 3{,}41 \cdot \overline{H}^2 \cdot \overline{T}^2 = 68{,}2 \cdot \overline{H}^3$$

und bei Berücksichtigung von $\overline{H}_{max}$

$$E^*_{max} = 3{,}6 \cdot d^{1{,}8} \quad [MNm]$$

c) GÖHREN (1969) ermittelte in diesem Gebiet maximale Strömungsgeschwindigkeiten bei mittlerer Tide zwischen 20 und 40 cm/s, in Einzelfällen unter 20 bzw. bis 50 cm/s. Daraus läßt sich eine Strömungsenergie je Volumeneinheit von

$$E_k = \varrho \cdot \frac{v^2}{2} \quad [Nm]$$

und damit für einen 1 km breiten Streifen:

$$E_k = 0{,}5 \cdot d \cdot v^2 \quad [MNm]$$

und mit Berücksichtigung von v_{max} für brandungsfreies Watt dann

$$E_{k_{max}} = (0{,}02 \text{ bis } 0{,}12) \cdot d \quad [MNm]$$

ableiten, wobei die biologische Stabilisierung des Bodens den tatsächlichen Materialtransport stark beeinflußt (FÜHRBÖTER, 1983).

d) Für kleine Einheiten von 1 km² Größe, die sich nach den Kriterien unter a) bis c) auswählen lassen[1], ergeben sich für die Beschreibung der Umsatz- und Bilanzhöhen folgende Parameter und Daten:

Parameter	Einheit	Mittel	Vertrauensber. ±	Stand.-Abw. ±	Max. +	Min. −
$\underline{u}$	dm	8,9	1,5	2,9	14,6	2,5
$\overline{h}_u$	cm	19,5	3,8	7,7	32	8
a_0	Jahr	4,03	0,46	0,93	5,7	2,6
$\overline{h}_u/a_0$	cm/Jahr	4,59	0,80	1,61	8,3	2,3
$\lvert h_b \rvert_{max}$	cm				23	8
$\lvert h_b \rvert_{max}/\overline{h}_u$	–				1,0	0,5
a $(\lvert h_b \rvert_{max})/a_0$	–	2,89	0,19	0,38	3,5	2,3

Es sei darauf hingewiesen, daß die Genauigkeit der Karten für das hier klassifizierte Gebiet besser als 4 cm ist.

Kleine Einheiten mit Prielen (WP)

a) Wassertiefen um MThw bis 5 m, also Prieltiefen bis etwa 2 m unter KN.

b) Seegangscharakteristik des brandungsfreien Wattes mit

$$\overline{T} = 2{,}8 \cdot \overline{H} + 1{,}8$$
$$\overline{H}_{max} = 0{,}375 \cdot d^{0{,}6}$$
$$T_{H1/3} = 1{,}15 \cdot \overline{T}$$

aber – im Übergang zu den Wattströmen –

[1] Felder N4K0, N2J9, N3J9, N1J8, N2J8, N3J8, N4J8, N1J7, N3J7, N8J4, N9J4, 00J4, 05J3, 06J3, 00J1, 01J1, 02J1, 03J1, 02J0.

$$\delta = 0{,}055$$
$$H_{1/3} = 1{,}47 \cdot \overline{H}$$
$$E^* = 3{,}51 \cdot \overline{H}^2 \cdot \overline{T}^2 = 63{,}9 \cdot \overline{H}^3$$
$$E^*_{max} = 3{,}4 \cdot d^{1{,}8}\ \text{MNm}$$

c) Maximale Strömungsgeschwindigkeiten bei mittlerer Tide wie bei Sturmfluten zwischen 60 und 100 cm/s, meist zwischen 80 und 90 cm/s. Das liefert

$$E_{k_{max}} = (0{,}3 \text{ bis } 0{,}4) \cdot d$$

d) Nach den Kriterien unter a) bis c) ausgewählte kleine Einheiten[1] liefern:

Parameter	Einheit	Mittel	Vertrauensber. ±	Stand.-Abw. ±	Max. +	Min. −
u	dm	23,6	3,3	6,0	34,8	15,4
$\overline{h}_u$	cm	44,5	12,7	23,1	89	13
a_0	Jahr	4,08	0,75	1,37	6,5	2,2
$\overline{h}_u/a_0$	cm/Jahr	11,26	3,65	6,63	24,3	3,6
$\lvert h_b \rvert_{max}$	cm				86	10
$\lvert h_b \rvert_{max}/\overline{h}_u$	–				1,0	0,3
$a(\lvert h_b \rvert_{max})/a_0$	–	3,04	0,22	0,40	3,7	2,3

Die großen Streubreiten sind für solch „inhomogenes" Gebiet zu erwarten. Denn in den ausgewählten kleinen Einheiten sind die Priele unterschiedlich tief (was durch u zum Ausdruck kommt), und das Verhältnis Priel- zu Wattfläche ist natürlich nicht überall gleich. So ist ebenfalls einleuchtend, daß das Spektrum der h'-Werte der Teilflächen in der kleinen Einheit sehr viel größer sein muß, als wenn die Fläche nur aus brandungsfreiem Watt bestehen würde. Mit der Einteilung in eine Kategorie „WP" kann somit nur die Größenordnung der Mittelwerte angegeben werden.

Brandungswatt (BW)

a) Wattgebiete mit Wassertiefen bei MThw von 1 bis 4 m, die hinter der primären Brandungszone des Randwattes liegen.

b) Seegang mit relativ langen Wellen mit

$$\overline{T} = 3{,}5 \cdot \overline{H} + 2{,}8$$
$$\delta = 0{,}025$$
$$T_{H1/3} = 1{,}15 \cdot \overline{T}$$

und größere Wellenhöhen als im brandungsfreien Watt mit

$$\overline{H}_{max} = 0{,}5 \cdot d^{0{,}6}$$
$$H_{1/3} = 1{,}41 \cdot \overline{H}$$
$$E^* = 3{,}23 \cdot \overline{H}^2 \cdot \overline{T}^2 = 129{,}4 \cdot \overline{H}^3$$
$$E^*_{max} = 16{,}2 \cdot d^{1{,}8}$$

c) Maximale Strömungsgeschwindigkeiten bei mittlerer Tide liegen um 40 cm/s und führen zu

$$E_{k_{max}} = \text{rd. } 0{,}1 \cdot d$$

[1] Felder N4J9, N5J9, N2J7, N2J6, N3J6, N2J5, N5J5, 00J5, N3J4, N4J4, N5J4, N6J4, 01J4, 04J4, 03J3, 06J4.

d) Nach den Kriterien unter a) bis c) ausgewählte kleine Einheiten[1] liefern:

Parameter	Einheit	Mittel	Vertrauens-ber. ±	Stand.-Abw. ±	Max. +	Min. −
u	dm	13,6	2,5	3,8	23,6	8,5
$\overline{h}_u$	cm	41,3	11,2	17,3	77	19
a_0	Jahr	3,89	0,78	1,18	6,5	1,7
$\overline{h}_u/a_0$	cm/Jahr	10,83	2,62	4,03	19,7	5,9
$\lvert h_b\rvert_{max}$	cm				77	10
$\lvert h_b\rvert_{max}/\overline{h}_u$	–				1,0	0,4
a $(\lvert h_b\rvert_{max})/a_0$	–	2,48	0,23	0,35	3,0	1,8

Randwatt (RW)

a) Als Randwatt kann die äußere Zone des Wattsockels bezeichnet werden, auf der der Seegang – nach Überwindung der meist relativ steilen Kanten – gewöhnlich flächenhaft brandet. Die Wassertiefen liegen hier bei MThw etwa bei 4 bis 10 m.

b) Seegang:

$$\overline{T} = 3{,}5 \cdot \overline{H} + 1{,}8$$
$$\delta = 0{,}040$$
$$T_{H1/3} = 1{,}19 \cdot \overline{T}$$
$$\overline{H}_{max} = 0{,}5 \cdot d^{0{,}6}$$
$$H_{1/3} = 1{,}47 \cdot \overline{H}$$
$$E^* = 3{,}76 \cdot \overline{H}^2 \cdot \overline{T}^2 = 94{,}1 \cdot \overline{H}^3$$
$$E^*_{max} = 11{,}8 \cdot d^{1{,}8}$$

c) Die maximalen Strömungsgeschwindigkeiten bei mittlerer Tide liegen mit nur kleiner Streubreite um 40 cm/s, damit zu

$$E_{k_{max}} = \text{rd. } 0{,}1 \cdot d$$

führend.

d) Für kleine Einheiten von 1 km², die sich nach den Kriterien unter a) bis c) auswählen lassen[1], ergeben sich für die Beschreibung der Umsatz- und Bilanzhöhen folgende Parameter:

Parameter	Einheit	Mittel	Vertrauens-ber. ±	Stand.-Abw. ±	Max. +	Min. −
u	dm	13,5	2,4	5,0	23,9	7,7
$\overline{h}_u$	cm	65,6	10,3	21,8	100	38
a_0	Jahr	3,16	0,58	1,24	5,9	1,5
$\overline{h}_u/a_0$	cm/Jahr	21,31	3,16	6,72	32,3	11,9
$\lvert h_b\rvert_{max}$	cm				99	38
$\lvert h_b\rvert_{max}/\overline{h}_u$	–				1,0	0,7
a $(\lvert h_b\rvert_{max})/a$	–	2,70	0,24	0,51	4,0	2,1

[1] Felder M9K1, N0K1, N1K1, M9K0, N0K0, M9J9, N0J9, M9J8, N0J8, M9J7, N0J7, N1J7.

[1] Feld M7J8, M7J9, M0K0, M0K1 M0K2, M1K0, M1K1, M1K2, M2K0, M2K1, M2K2, M3K0, M3K1, M3K2, M4K2, M5K2, M6K1, M7K2, M8K1, M8K2.

Tiefes Wasser vor dem Watt (T)

a) Dieser Bereich wird etwa begrenzt durch Wassertiefen um MThw von 8 m und soll das Gebiet vor dem Watt außerhalb der Wattströme umfassen, wobei die großen Ästuare in ihren äußeren Teilen eingeschlossen sind. Bevor genauere Analysen vorliegen, sollten die folgenden charakteristischen Merkmale auch für die Deutsche Bucht verwendet werden.

b) Der Seegang wird beschrieben durch

$$\begin{aligned} \overline{T} &= 2\,\overline{H} + 2{,}3 \\ \delta &= 0{,}055 \\ H_{1/3} &= 1{,}51 \cdot \overline{H} \\ T_{H1/3} &= 1{,}25 \cdot \overline{T} \end{aligned}$$

Die Wellenhöhen sind hier nicht mehr so stark von der Wassertiefe, sondern – in ihrem Entstehungsgebiet – vornehmlich von den Windverhältnissen abhängig, so daß nur der Zusammenhang

$$E^* = 4{,}38 \cdot \overline{H}^2 \cdot \overline{T}^2 = 79{,}7 \cdot \overline{H}^3$$

gegeben werden kann.

c) Die maximalen Strömungsgeschwindigkeiten bei mittleren Tideverhältnissen bedecken ein breites Spektrum von 0,3 bis 1,2 m/s. Daraus errechnet sich

$$E_{k_{max}} = (0{,}05 \text{ bis } 0{,}7) \cdot d$$

d) Insgesamt 9 kleine Einheiten zu je 1 km² Größe in Außenelbe und Außeneider[1] liefern folgende Ergebnisse hinsichtlich der Umsatz- und Bilanzhöhen:

Parameter	Einheit	Mittel	Vertrauensber. ±	Stand.-Abw. ±	Max. +	Min. –
u	dm	40,6	12,1	15,7	64,3	18,5
$\overline{h}_u$	cm	63,7	6,7	8,7	75	50
a_0	Jahr	2,02	0,57	0,74	3,0	1,2
$\overline{h}_u/a_0$	cm/Jahr	34,6	7,5	9,7	47,5	20,0
$\lvert h_b \rvert_{max}$	cm				70	39
$\lvert h_b \rvert_{max}/\overline{h}_u$	–				1,0	0,6
$a\,(\lvert h_b \rvert_{max})/a_0$	–	3,17	0,71	0,92	5,0	2,1

Die Streuung der u und der $\overline{h}_u$ gehen teils auf Ungenauigkeiten bei der Vermessung zurück. So können die 9 kleinen Einheiten nur die Größenordnung der Charakteristik andeuten und sind sicherlich weniger repräsentativ als die Erkenntnisse über das Watt. Hier ist ein Feld für vertiefende Studien aufgezeigt.

Wattströme (WS)

a) Wassertiefen, die im Mittel über die kleine Einheit bei MThw 8 m überschreiten.

b) Seegangscharakteristik:

$$\begin{aligned} \overline{T} &= 2{,}3 \cdot \overline{H} + 1{,}8 \\ \delta &= 0{,}060 \\ H_{1/3} &= 1{,}49 \cdot \overline{H} \\ T_{H1/3} &= 1{,}20 \cdot \overline{T} \end{aligned}$$

[1] Feld M6K4, M7K4, M8K4, M9K4, N0K4, 02M8, L9K2, L9K4, M5K4.

Da bei diesen Wassertiefen die Wellenhöhen vor allem durch die Windverhältnisse und die Lage der Wattströme zum Wind bestimmt werden, kann keine Begrenzung in Form von $\overline{H}_{max}$ gegeben werden. So wird E* zu

$$E^* = 3{,}93 \cdot \overline{H}^2 \cdot \overline{T}^2 = 65{,}5 \cdot \overline{H}^3$$

c) Die maximalen Strömungsgeschwindigkeiten bei mittlerer Tide liegen zwischen 60 und 120 cm/s, meist jedoch um 80 cm/s. Daraus resultiert

$$E_{k_{max}} = (0{,}2 \text{ bis } 0{,}5) \cdot d$$

d) Um einen Überblick über die in einem Wattstrom zu erwartenden morphologischen Parameter zu erhalten, wurden sechs kleine Einheiten aus der Westertill[1], die keine Böschungsanteile enthalten, analysiert. Sie brachten als Anhalt

u	um 50 dm
$\overline{h}_u$	um 140 cm
a_0	um 5,0 Jahre
$\overline{h}_u/a_0$	um 30 cm/Jahr

und damit deutlich andere Werte als im sog. tiefen Wasser. Da a_0 etwa 5 Jahre erreicht, kann nach den Analysen aus anderen charakteristisch eingrenzbaren Gebieten mit dem Erreichen von $|h_b|_{max}$ bei 12 bis 15 Jahren gerechnet werden. Die längsten verfügbaren Vergleichszeiträume liegen aber bei 14 Jahren. Daher ist hier ein Nachweis noch nicht möglich.

Über das Verhalten von Wattströmen bedarf es weiterer Untersuchungen auf der Basis exakter Peilungen. Aufteilungen in Felder von 0,25 km², wie sie nach Abb. 13 unschwer möglich sind, lassen deutlich langfristige seitliche Verlagerungen von Wattströmen erkennen: Einzelne kleine Einheiten zeigen durchgehend über alle Vergleichszeiträume z. B. Sedimentation, während im benachbarten, auf der anderen Seite der Wattstromachse liegenden Feld gleichzeitig gleiche Beträge an Erosion festgestellt werden. Man wird also sehr leicht Einheiten von wenigen km² Größe finden können, in denen die Umsatzhöhe Werte zwischen 1 und 2 m erreichen kann, die Bilanz aber ausgeglichen ist. Darauf lassen beispielsweise auch die Darstellungen

- bei Knop (1961) für Norderhever und Strand,
- bei Knop (1963) für Süderaue und Schlütt,
- auf den Karten des Amtes für Land- und Wasserwirtschaft Husum (1978) über Watthöhenänderungen innerhalb von etwa 25 Jahren für Schlütt, Strand, Süderaue, Rummelloch, Norderhever und Heverstrom,
- bei Göhren (1970, 1971) für Till und Norderelbe (das Neuwerker Fahrwasser und die Außenelbe bis östlich von Scharhörn wurden künstlich beeinflußt),
- bei Samu (1982) für große Teile der Außenems,
- bei Wieland (1984) für Piep und Sommerkoog-Steertloch

schließen.

Brandungsplaten; Ränder der Wattströme (PR)

a) b) Mit den schwierigen Transportvorgängen in diesen Gebieten hat sich Göhren (1971) intensiv auseinandergesetzt. Hier treten bei MThw Wassertiefen von weniger als 2 m (auf den Platen und an den oberen Rändern der Wattströme) und mehr als 13 m (in den

[1] Feld M9J4, M2J4, M1J5, M0J6, L8J8, L9J8.

Rinnen zwischen den Platen und in den Wattströmen) auf. Die hohen Bereiche werden unmittelbar durch Brandung beeinflußt, so daß hier die Seegangscharakteristik wie bei RW gilt (s. o.). Die Rinnen werden dagegen durch die Tideströmung geprägt. Hier gilt ähnliche Seegangscharakteristik wie bei WS.

c) Die maximalen Strömungsgeschwindigkeiten erreichen in den Rinnen Werte wie in Wattströmen, auf den Platen etwa die Größe wie im Randwatt. Damit wird deutlich, daß das Gebiet PR sehr heterogen ist und die energetischen Belastungen uneinheitlich sind.

d) Anhaltswerte über die Materialumlagerungen können dennoch gegeben werden. Aus dem Bereich der Robbenplaten und der Till[1] wurden 22 kleine Einheiten statistisch analysiert, die den Beschreibungen unter a) bis c) entsprechen.
Sie liefern:

Parameter	Einheit	Mittel	Vertrauens-ber. ±	Stand.-Abw. ±	Max. +	Min. −
u	dm	105,8	17,0	38,7	158	42
$\overline{h}_u$	cm	245,1	39,7	90,2	500	100
a_0	Jahr	6,6	1,4	3,1	14,8	3,0
$\overline{h}_u/a_0$	cm/Jahr	39,1	5,3	12,0	63,5	20,8
$\lvert h_b \rvert_{max}$	cm				270	40
$\lvert h_b \rvert_{max}/\overline{h}_u$	–				0,8	0,4
a $(\lvert h_b \rvert_{max})/a_0$	–	2,41	0,11	0,26	3,0	2,2

Nach Schilderungen unter a) bis c) waren hohe Standardabweichungen zu erwarten. Dennoch sind die Zahlen aussagekräftig, ohne zukünftige Analysen überflüssig zu machen.
Abb. 23 zeigt an zwei unterschiedlichen Beispielen, wie die zur Verfügung stehenden Kartenvergleiche über maximal 14 Jahre nur schwer eine Funktion $h_u = f(a)$ bestimmbar machen, wie verschieden die Streuungen um diese Funktion sein können und daß das Spektrum der $|h_b|$ in der Tat auch bei großen Beträgen von 0 bis h_u reichen kann, wie dies Abb. 7 schematisch zeigt.

Daneben gibt es eine schmale Zone am seeseitigen Rand des Küstenvorfeldes, also am Rand des hier als „Tiefes Wasser" deklarierten Gebietes, die selbst über längere Zeit nahezu lineare Zunahme der Umsatz- und Bilanzhöhen zeigt, ohne daß es bisher möglich ist, den asymptotischen Wert $\overline{h}_u$ oder a_0 zu bestimmen. Lediglich das Verhältnis $\overline{h}_u/a_0$ ist feststellbar. Es liegt häufig um 20 cm/Jahr, erreicht Werte bis 80 cm/Jahr und tritt z. B. auf in Streifen mit langfristiger Erosion (Südrand des Gelbsandes nach GÖHREN, 1971; Westrand des nordfriesischen Wattes nach TAUBERT, 1986) oder Sedimentation (westliche Ausläufer des Großen Vogelsandes nach GÖHREN, 1971). Da Vergleichszeiträume von 15 und mehr Jahren noch keine eindeutigen Aufschlüsse geben, müssen weitere Aufnahmen mit größeren Zeitabständen verglichen werden, wenn die morphologische Charakteristik im hier gebrauchten Sinne festgestellt werden soll. Bei Annahme von $a_0 = 20$ Jahre erhält man als häufigen Wert $\overline{h}_u = 4$ m, der durchaus belegbar ist, aber auch Werte von $\overline{h}_u$ weit über 10 m, die als Grenzwerte bei der Verlagerung einer Tiefwasserzone in das Watt oder umgekehrt vorstellbar sind.

[1] Feld N0J4, N3J1, M0J7, M2J5, M3J5, M3J8, M4J6, M4J7, M4J8, M5J6, M5J7, M5J8, M5J9, M6J6, M7J6, M7J7, M8J5, M8J6, M8J7, M8J8, M8J9, M9J5.

[2] $|h_b|_{max}$ konnte nur bei 8 Feldern einwandfrei ermittelt werden.

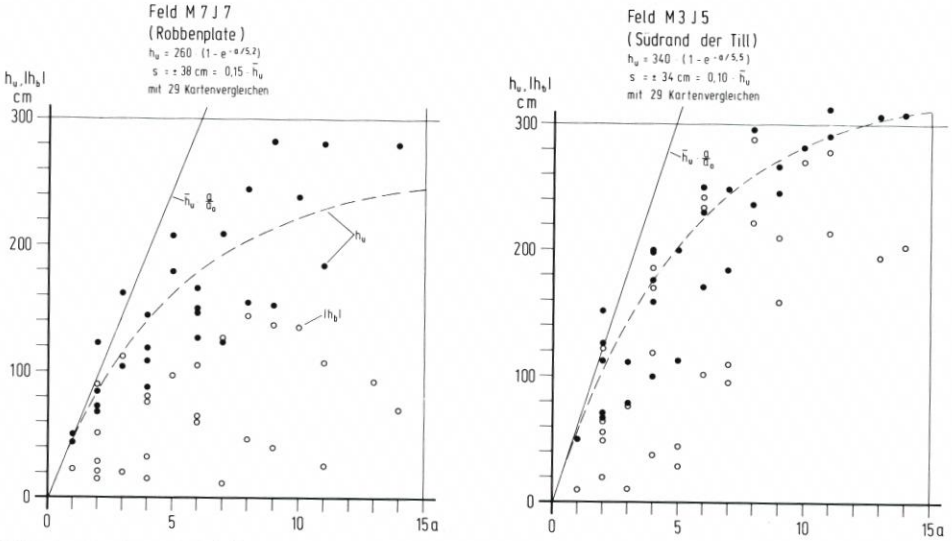


Abb. 23. Je ein Beispiel für Umsatz- und Bilanzhöhen auf Brandungsplaten und an Prielrändern mit relativ großer Streuung der Einzelwerte ($s = 0,15$ bzw. $0,10 \cdot \bar{h}_u$), aber vertretbarem Vertrauensbereich für die h_u-Funktion ($C = 0,06$ bzw. $0,04 \cdot \bar{h}_u$ oder 13 bis 14 cm)

Die hier gegebenen Zahlen beziehen sich stets auf kleine Einheiten von 1 km² Größe, unterteilt in 100 Teilflächen. In einem Zwischenstadium des Projektes waren Einheiten von 0,25 km² Größe analysiert worden, um den topographischen Verhältnissen besser gerecht zu werden. Die dabei ermittelten $\bar{h}_u$-Werte für Flächen, die ein Vielfaches an 0,25-km²-Einheiten ausmachen, decken sich weitgehend mit den o. g., während die a_0 oft kürzer als die o. g. sind: Beide Parameter sind in gewissen Grenzen von der Größe A abhängig.

3.4.2 Hinweise auf die Verwendbarkeit

Die morphologische Charakteristik kleiner Einheiten wurde in Kap. 3.4.1 nach Daten aus dem südlichen Elbmündungsgebiet entwickelt. Daß die Erkenntnisse verallgemeinerungsfähig sind, kann stichprobenartig an einigen Beispielen aus dem schleswig-holsteinischen Küstengebiet gezeigt werden:

Brandungsfreies Watt (FW):

Feld P5N1 (Wesselb. Watt, Abb. 17), Feld P0M4 (Blauortsand) und Feld P2M3 (Blauortsand):

Parameter	Einheit	P5N1	POM4	P2M3	nach Kap. 3.4.1 zu erwarten
d (MThw)	m	1,0	2,0	0,5	$\leqslant 2$
u	dm	14,0	12,4	9,1	$8,9 \pm 2,9$
$\bar{h}_u$	cm	24	18	28	$19,5 \pm 7,7$
a_0	Jahr	5,0	2,4	4,8	$4,0 \pm 0,9$
$\lvert h_b \rvert_{max}$	cm	15	15	18	$(0,5$ bis $1,0) \cdot \bar{h}_u$
a ($\lvert h_b \rvert_{max}$)	Jahr	18	8	16	$(2,9 \pm 0,4) \cdot a_0$

Watt mit Prielen (WP):

Feld P3L6 (Bielshövensand), Feld P2K5 (Hakensand) und Feld P4N0 (Wesselb. Watt):

Parameter	Einheit	P3L6	P2K5	P4N0	
d (MThw)	m	3,0	1,5	1,0	$\leqslant 5$
u	dm	30,0	20,9	25,0	$23{,}6 \pm 6{,}0$
$\overline{h}_u$	cm	68	52	43	$44{,}5 \pm 23{,}1$
a_0	Jahr	3,9	5,4	4,3	$4{,}1 \pm 1{,}4$
$\lvert h_b \rvert_{max}$	cm	51	45	38	$(0{,}3 \text{ bis } 1{,}0) \cdot \overline{h}_u$
$a(\lvert h_b \rvert_{max})$	Jahr	11	11	20	$(3{,}0 \pm 0{,}4) \cdot a_0$

Brandungswatt (BW):

Feld P0N1 (Wesselb. Watt), Feld P3N0 (Wesselb. Watt) und Feld P4L7 (Bielshövensand):

Parameter	Einheit	P0N1	P3N0	P4L7	
d (MThw)	m	1,2	1,5	1,7	1 bis 4
u	dm	17,7	22,7	14,2	$13{,}6 \pm 3{,}8$
$\overline{h}_u$	cm	50	42	36	$41{,}3 \pm 17{,}3$
a_0	Jahr	3,0	5,5	4,8	$3{,}9 \pm 1{,}2$
$\lvert h_b \rvert_{max}$	cm	20	42	30	$(0{,}4 \text{ bis } 1{,}0) \cdot \overline{h}_u$
$a(\lvert h_b \rvert_{max})$	Jahr	17	20	12	$(2{,}5 \pm 0{,}4) \cdot a_0$

Randwatt (RW):

Feld O7M8 (Wesselb. Watt), Feld O3M9 (Wesselb. Watt) und Feld P2L7 (Bielshövensand):

Parameter	Einheit	O7M8	O3M9	P2L7	
d (MThw)	m	4,5	6,0	5,0	4 bis 10
u	dm	46,7	24,6	31,7	$13{,}5 \pm 5{,}0$
$\overline{h}_u$	cm	75	58	80	$65{,}6 \pm 21{,}8$
a_0	Jahr	6,0	5,0	3,3	$3{,}2 \pm 1{,}2$
$\lvert h_b \rvert_{max}$	cm	50	55	80	$(0{,}7 \text{ bis } 1{,}0) \cdot \overline{h}_u$
$a(\lvert h_b \rvert_{max})$	Jahr	>20	>10	10	$(2{,}7 \pm 0{,}5) \cdot a_0$

Bei Durchsicht der ausgewerteten kleinen Einheiten vor der schleswig-holsteinischen Küste fällt auf, daß häufig die Werte a_0 und $a(\lvert h_b \rvert_{max})$ sowie deren Quotient größer als im Elbmündungsgebiet sind. Ob dieses zu verallgemeinern ist, bedarf weiterer Untersuchungen.

Tiefes Wasser vor dem Watt (T):

Aus dem Gebiet der Deutschen Bucht liegt eine großflächige, gröbere Auswertung unter Kap. 4.2 vor. Die dort ermittelten Beträge $h_u = 50 \pm 28$ cm für a = rd. 5 Jahre und kleine Einheiten von 100 km² Größe bestätigen die Größenordnung des Ergebnisses unter Kap. 3.4.1 mit $\overline{h}_u = 64 \pm 7$ cm, die bei $a_0 = 2{,}0$ Jahre einem Wert von $h_{u5} = 58$ cm für a = 5 Jahre entsprechen. Es ist sogar folgerichtig, daß letzterer Wert (über A = 1 km² ermittelt) etwas größer als der über A = 100 km² bestimmte ist.

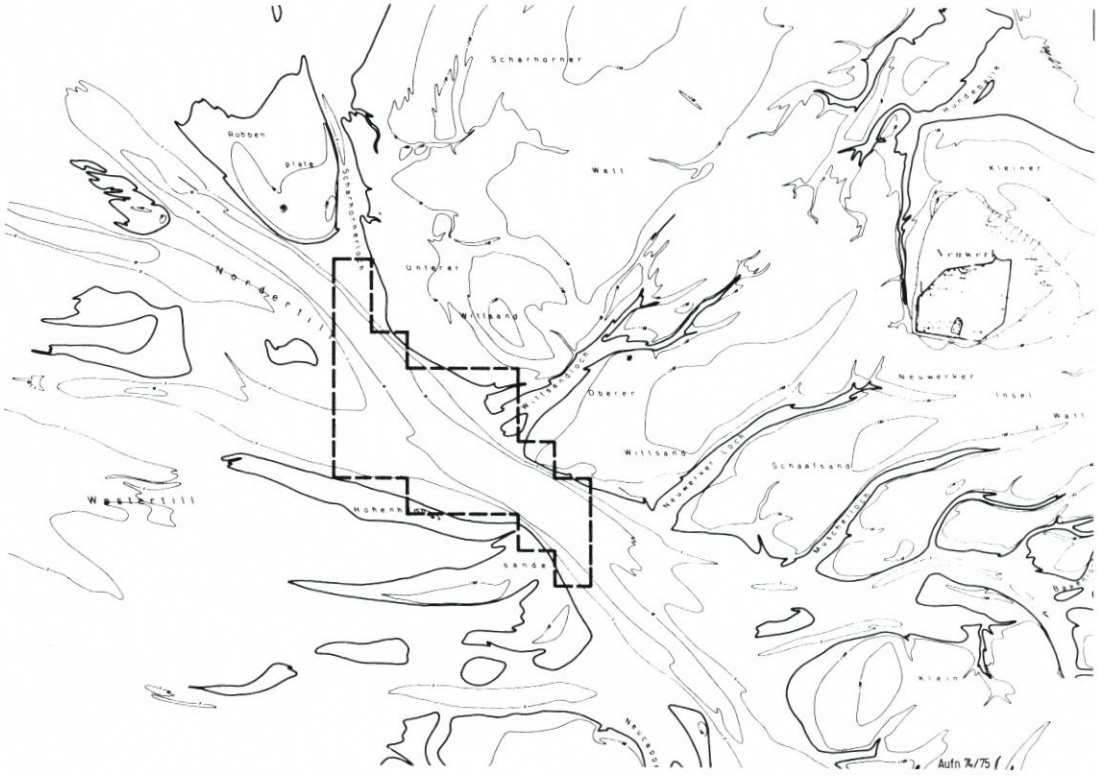


Abb. 24. Lageplan für ein 7 km² großes Gebiet der Till westlich von Neuwerk

Wattströme, Brandungsplaten und Stromränder

weisen so große Spannweiten für h_u und a_0 auf, daß ein Nachweis der bisherigen Ansätze bei dem jetzigen Stand der Untersuchungen nicht möglich ist. Einen Anhalt liefern Berechnungen für 28 zusammenhängende kleine Einheiten verschiedener Wassertiefen von insgesamt 7 km² in der unteren Till zwischen Wittsand und Hohenhörn Sänden (Abb. 24). Die tiefe Rinne war 1969 knapp 12 m tief, 1979 dagegen über 15 m; die KN-Linie im Norden ist etwa stabil geblieben, im Süden dagegen auf die Rinne zugewandert. So enthält dieses Gebiet Bereiche mit zeitweilig, aber auch einige mit langfristig wechselnder topographischer Höhe. Für die gewählte Fläche zeigt Abb. 25 die Entwicklung der Umsatzhöhen, zunächst über der fortlaufenden Zeit t für fünf verschiedene Ausgangsjahre. Daneben ist die Konstruktion der Kurve $h_u = f(a)$ erläutert. Es wird deutlich, daß die Mittel der Umsatzhöhen von 28 Einheiten für kleine Zeiträume a nur wenig um die Funktionen streuen, daß der Streubereich andererseits mit a zunimmt. Dennoch läßt sich ohne Schwierigkeiten eine charakteristische Funktion bestimmen. Die PR- und RW-Anteile an der Fläche von 7 km² mit h_u = 245 cm bzw. 66 cm sowie a_0 = 6,6 Jahre bzw. 3,2 Jahre sind offenbar so verteilt, daß sich mit h_u = 140 cm und a_0 = 5,2 Jahre Werte ergeben, die den zuvor allein aus WS-Flächen ermittelten gleichen.

Die o. g. Vertiefung der Rinne muß sich an den Bilanzhöhen zeigen. Diese erreichen nach Abb. 25 bis zu 40 % von h_u und müßten für Zeiträume a über 15 Jahre wieder abnehmen.

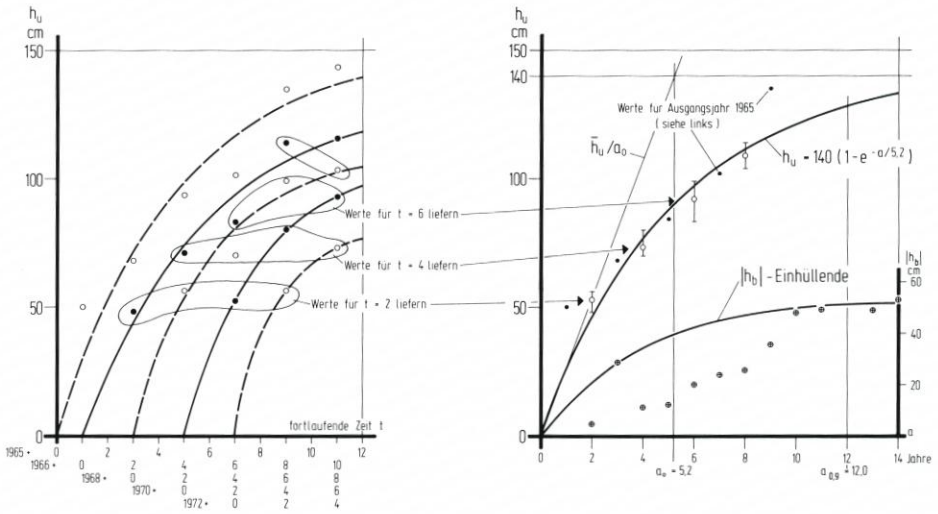


Abb. 25. Umsatz- und Bilanzhöhen für das Gebiet von Abb. 24: $h_u = f(a)$ für die Ausgangsjahre 1965, 1966 . . . 1972 (links) sowie $h_u = f(a)$ und $|h_b| = f(a)$ bis a = 14 Jahre (rechts)

3.4.3 Zur morphologischen Charakteristik größerer Gebiete

Um die natürlichen Verhältnisse in der Zusammensetzung verschiedener morphologischer Charaktere näher zu beleuchten, sei auf die Mittelwerte großflächiger Auswertungen hingewiesen:

– Göhren (1971) ermittelte für das Neuwerk-Scharhörner Wattgebiet einschl. Prielen, Wattströmen und Teilen der Außenelbe:

$A = 690\ km^2$
$a = 5$ Jahre (1965–1970)
$h_u = 73$ cm
$h_b = 7$ cm Sedimentation
$|h_b| = 0{,}10 \cdot h_u$

– Barthel (1981) verglich die KFKI-Karten aus dem JESP-Programm für das Knechtsand-Gebiet einschl. Till und Robinsbalje:

$A = 340\ km^2$
$a = 5$ Jahre (1974–1979)
$h_u = 77$ cm
$h_b = 17$ cm Erosion
$|h_b| = 0{,}22 \cdot h_u$

Dabei verteilen sich auf der Fläche die Umsatz- und Bilanzhöhen (als Mittel über kleine Einheiten von je 1 km^2) wie folgt:

h_u in m	%	h_b in m	%
3,0–7,0	2	+3,0 bis +0,4	9
2,0–3,0	4	+0,4 bis 0	24
1,2–2,0	11	0 bis −0,4	45
0,8–1,2	17	−0,4 bis −0,8	15
0,4–0,8	33	−0,8 bis −4,0	7
0 –0,4	33		

Zwei Drittel der Flächen zeigen also Umsatzhöhen unter 80 cm, und etwas größer noch ist der Anteil, bei dem die Bilanzhöhen zwischen −40 cm und +40 cm liegen.

– Für das „morphologische Fenster" in der Till (48 km², siehe SIEFERT, 1983) ergeben sich als Mittelwerte:

a	= 5 Jahre	11 Jahre
h_u	= 38 cm	62 cm
h_b	= 3,5 cm	7,7 cm Erosion
$\|h_b\|$	$= 0{,}09 \cdot h_u$	$0{,}12 \cdot h_u$

Alle berechneten Werte $|h_b|$ über a sind auf Abb. 26 festgehalten. Die beiden obigen h_u-Werte gestatten als Anhalt die Berechnung einer Umsatzfunktion

$$h_u = 65 \cdot (1 - e^{-a/4{,}5})$$

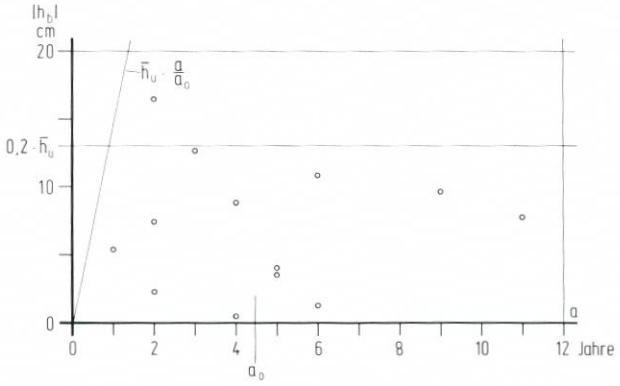


Abb. 26. Beträge der Bilanzhöhen $|h_b|$ über dem Vergleichszeitraum a für das 48 km² große „morphologische Fenster" bei SIEFERT (1983)

Die sich daraus ergebende Umsatzrate $\bar{h}_u/a_0$ ist auf Abb. 26 angegeben.

Alle drei Gebiete enthalten in unterschiedlicher Prozentzahl Bereiche verschiedener morphologischer Aktivität. So sind Anteile aus brandungsfreiem Watt, Prielsystemen, Brandungsgebieten und tieferem Wasser vorhanden. Insbesondere die beiden größeren Beispiele zeigen Zusammensetzungen, wie sie im Küstengebiet der deutschen Nordsee typisch sind. Insoweit ist der allgemeine Schluß erlaubt, daß bei einem Kartenvergleich über fünf Jahre für ein Wattgebiet mit angrenzenden Wattströmen Umsatzhöhen von 70 bis 80 cm zu erwarten sind und Bilanzhöhen, die wesentlich kleiner ausfallen, nämlich nur 10 bis 20 % dessen ausmachen. Letzterer Wert wird für die Ergänzungsflächen in Kap. 4.3 verwendet.

Daß aber in einem dermaßen gegliederten Küstenfeld die asymptotischen Höhen der Umsätze noch nicht erreicht sind, kann aus dem dritten Beispiel geschlossen werden, wo Umsatz- und Bilanzhöhen mit dem Zeitraum a scheinbar weiter angestiegen sind. Auf längere

Zeiträume sind dann aber eine Stabilisierung der Umsatz- und eine Abnahme der Bilanzhöhen zu erwarten. Die Auswertung mehrerer Kartenvergleiche auf Abb. 26 zeigt denn auch, daß der größte $|h_b|$-Einzelwert schon bei a = 2 Jahren erreicht ist und $|h_b|$ von da an etwa linear abfällt.

Ebenso weisen diese Beispiele darauf hin, daß das Verhältnis

$$|h_b|_{max}/\overline{h}_u = f(A)$$

ist, weil die unter Kap. 3.4.1 für 1 km² große Flächen ermittelten Werte nicht ohne weiteres für größere Gebiete übernommen werden dürften. Darauf macht bereits der Kommentar zu „WS" in Kap. 3.4.1 aufmerksam. Weitere Untersuchungen können hier ansetzen.

Für die Dithmarscher Bucht bis zum Beginn der Vordeichung (1970) gibt WIELAND (1984) folgende Werte an:

$A = 96\ km^2$
a = 18 bis 33 Jahre (1936/51–1969)
h_b = 6 cm Sedimentation

Die Bilanzhöhe erscheint klein, wird sie mit denen der o. g. Gebiete verglichen. Ein Hinweis auf Abb. 5 mag einerseits noch einmal die Zufälligkeit eines solchen Ergebnisses in Erinnerung rufen, andererseits aber auch eine Bestätigung dafür bringen, daß bei großen Vergleichszeiträumen a kleine $|h_b|$ sehr wahrscheinlich sind.

Ergänzend sei eine Aufstellung von BROLSMA (1982) über die Sedimentation im niederländischen Wattgebiet aufgeführt. Er kommt (umgerechnet auf $h_b = h_s$) zu folgenden Werten:

gesamtes Wattgebiet	für a = rd. 5 Jahre:	h_b = 1,0 cm
westliches Wattgebiet	für a = 10 bis 12 Jahre:	h_b = 3,5 cm
östliches Wattgebiet	für a = rd. 8 Jahre:	h_b = 1,5 cm

Die Beträge liegen unter denjenigen von Elbmündungsgebiet, Knechtsand und Dithmarscher Bucht; die Flächen A, über die gemittelt wurde, sind allerdings auch erheblich größer (bis rd. 3000 km²).

3.4.4 Verallgemeinerungen

Nach den Ausführungen unter 3.4 lassen sich für das Watt folgende wesentliche morphologische Parameter, für etwa gleichartige Gebiete getrennt, aber mit der Möglichkeit von allmählichen Übergängen, zusammenstellen (Mittelwerte und deren Vertrauensbereiche):

Parameter	Einheit	brandungsfr. Watt FW	Watt mit kl. Prielen WP	Brandungswatt BW	Randwatt RW
d (MThw)	m bei MThw	≤ 2	≤ 5	1 bis 4	3 bis 8
u	dm	10 ± 2	25 ± 4	15 ± 3	15 ± 3
$E^*/\overline{H}^3$	MNm/m^3	70	65	130	90
$E^*_{max}/d^{1,8}$	$MNm/m^{1,8}$	3,5	3,5	16	12
$E_{k_{max}}/d$	MNm/m	bis 0,1	0,3 bis 0,4	rd. 0,1	rd. 0,1
$\overline{h}_u$	cm	20 ± 4	45 ± 13	40 ± 12	65 ± 10
a_0	Jahr	$4,0 \pm 0,5$	$4,0 \pm 1,0$	$4,0 \pm 1,0$	$3,2 \pm 0,7$
$\overline{h}_u/a_0$	cm/Jahr	5 ± 1	11 ± 4	10 ± 3	20 ± 4
$\lvert h_b\rvert_{max}/\overline{h}_u$	–	0,5 bis 1,0	0,3 bis 1,0	0,4 bis 1,0	0,7 bis 1,0
a ($\lvert h_b\rvert_{max}$)/a_0	–	2,5 bis 3,5	2,5 bis 3,5	2 bis 3	2 bis 4

Ob E^* und E_k umfassende hydrologische Parameter für die gestellte Aufgabe sind oder ob besser auf die Ausgangserscheinungen (Seegangs-, Strömungsspektrum) zurückgegriffen werden sollte, wie 1983 in der grundlegenden Arbeit angedeutet, bedarf weiterer intensiver Untersuchungen. Wenn bei obiger Gegenüberstellung die Seegangs- sehr viel größer als die Strömungsenergie erscheint, so ist dabei folgendes zu berücksichtigen: $\overline{H}$ erreicht Werte zwischen 0 und $\overline{H}_{max}$ und ist bei mittleren Tideverhältnissen nur sehr klein (0,1 bis 0,2 m); E^*_{max} gilt bei Sturm, wenn zum Vergleich mit $E_{k_{max}}$ für letztere die maximalen Triftstromgeschwindigkeiten (bis 1,5 m/s nach GÖHREN, 1969) herangezogen werden müssen.

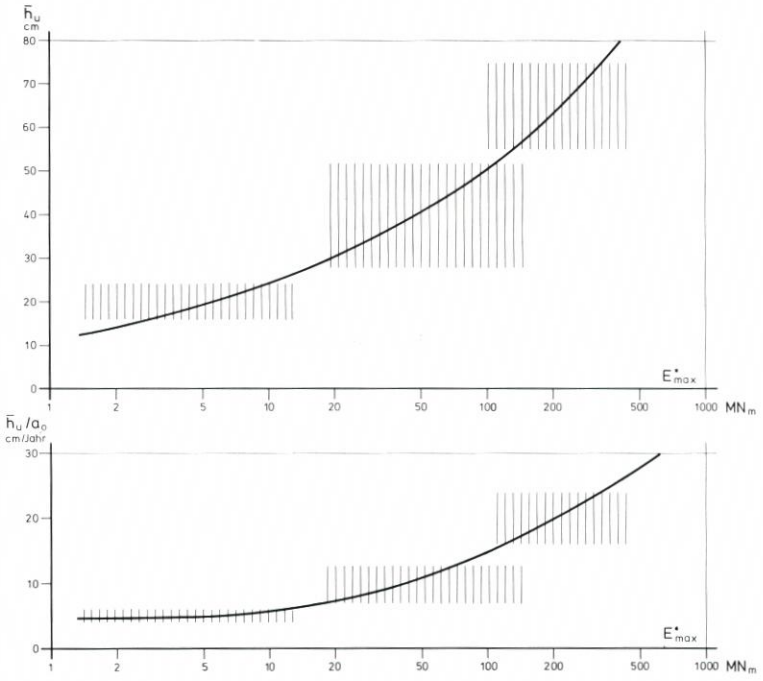


Abb. 27. Umsatzhöhen $\overline{h}_u$ und Umsatzraten $\overline{h}_u/a_0$ im Wattgebiet über der maximalen Seegangsenergie E^*_{max}

Es wird deutlich, daß die Seegangsenergie von außen (RW) nach innen (FW) abnimmt, wenn man die ebenfalls abnehmenden $\overline{H}$ und d bei obiger Tabelle berücksichtigt. Ferner nimmt die Strömungsenergie ab, wenn man dabei das Geschehen in den Prielen ausspart. Hiermit wird eine Möglichkeit gegeben, quantitativ die einwirkende Energie und die daraus resultierende asymptotische Umsatzhöhe $\overline{h}_u$ sowie den jährlichen Umsatz $\overline{h}_u/a_0$ primär zu verknüpfen, wie dies Abb. 27 beispielhaft zeigt. Die Abnahme letzteren Wertes geht auch auf eine Verlängerung von a_0 zurück. Sekundär sind damit darüber auch Angaben zur Bilanz möglich:

Interessant ist, daß die Auswertungen erlauben, einen Vergleichszeitraum a ($|h_b|_{max}$) zu definieren, über den die höchsten Bilanzhöhen auftreten. Dieser liegt im Watt – nach den Ergebnissen aus dem Elbmündungsgebiet sowie ersten Vergleichen mit denen aus anderen Bereichen bewußt weit gefaßt – bei

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

Daraus ist einerseits zu folgern, daß bei Kartenvergleichen über solche Zeiträume die größte Chance besteht, die Maxima an Erosion oder Sedimentation im Watt zu erfassen, deren Beträge (für A = 1 km^2) 30 bis 100 % derer des Umsatzes erreichen. Andererseits werden Vergleiche über längere Zeiträume kleinere h_b liefern (siehe dazu Abb. 7). Der dort genannte Parameter m wird dann zu

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

denn konsequenterweise müßten die maximalen Bilanzhöhen im Watt dann quasi-periodische Schwankungen zeigen. Ob dies der Fall ist, konnte wegen des zeitlich begrenzten Datenmaterials noch nicht nachgewiesen werden.

Für den Tiefwasserbereich, d.h. in diesem Falle Wassertiefen über 8 m bei MThw außerhalb der Wattströme und inneren Ästuare, können die morphologischen Parameter

u	=	40 ± 15 dm
E^*	=	$80 \cdot \overline{H}^3$ mit $\overline{H}$ von 0 bis $\overline{H}_{max}$
$E_{k_{max}}$	=	(0,1 bis 0,7) · d je nach v_{max} (0,3 bis 1,2 m/s)
$\overline{h}_u$	=	60 ± 10 cm
a_0	=	$2{,}0 \pm 1{,}0$ Jahre
$\overline{h}_u/a_0$	=	30 ± 10 cm/Jahr
$\|h_b\|_{max}/\overline{h}_0$	=	0,6 bis 1,0
$a\,(\|h_b\|_{max})/a_0$	=	2 bis 4

angegeben werden. Die Energiebeträge sind größer als auf dem Watt; bei größeren Wassertiefen hält sich der asymptotische Wert der Umsatzhöhe in engen Grenzen in der Größenordnung wie auf dem Randwatt. a_0 ist aber schon wesentlich schneller erreicht, d.h., kurzfristiger treten entsprechende Umsatzhöhen auf (mit etwa 30 cm/Jahr für $\overline{h}_u/a_0$). Das Verhältnis $a\,(|h_b|_{max})/a_0$ weist darauf hin, daß außerhalb des Wattgebietes die Maxima der Bilanzhöhen schon bei Vergleichen über vier bis acht Jahre ermittelt werden können. Die Folgen für die Praxis liegen auf der Hand: Der optimale Peilabstand ist hier kürzer als im Watt.

Aussagen für die Wattströme können beim heutigen Stand der Auswertungen nur – wie in Kap. 3.4.1 geschehen – in allgemeinerer Form gegeben werden:

d im Mittel über 8 m bei MThw		
u	um	50 dm
E^*	=	$65 \cdot \overline{H}^3$ mit $\overline{H}$ von 0 bis $\overline{H}_{max}$
$E_{k_{max}}$	=	(0,2 bis 0,5) · d je nach v_{max} (0,6 bis 1,2 m/s)
$\overline{h}_u$	um	140 cm
a_0	um	5 Jahre
$\overline{h}_u/a_0$	um	30 cm/Jahr

Es wird deutlich, daß zwar die jährlichen Umsätze $\overline{h}_u/a_0$ ähnlich groß wie im übrigen tiefen Wasser sind, jedoch längerfristig überwiegend Erosion oder Sedimentation vorherrschen und somit wesentlich größere h_u und h_b auftreten können. Zur genauen Erfassung sind Peilungen in kurzen Abständen (unter 5 Jahre) erforderlich.

Das breite Spektrum der natürlichen Vorgänge im Platenbereich und an den Rändern der Wattströme kann näherungsweise wie folgt eingegrenzt werden:

d bei MThw weniger als 2 m bis mehr als 13 m

u	=	50 bis 150 dm
E^*	=	$90 \cdot \overline{H}^3$ (in der Brandung) bis $65 \cdot \overline{H}^3$ (in den Rinnen) mit $\overline{H}$ von 0 bis $\overline{H}_{max}$
$E_{k_{max}}$	=	rd. $0{,}1 \cdot d$ (in der Brandung) bis $0{,}5 \cdot d$ (in den Rinnen) mit v_{max} = 0,4 bis 1,2 m/s
$\overline{h}_u$	=	150 bis 350 cm
a_o	=	4 bis 10 Jahre
$\overline{h}_u/a_0$	=	35 ± 15 cm/Jahr
$\lvert\overline{h}_b\rvert_{max}/\overline{h}_u$	=	0,4 bis 0,8
$a\,(\lvert h_b\rvert_{max})/a_0$	=	2 bis 3

Daran wird deutlich, daß in diesem Gebiet die größten Umsätze, die höchsten Umsatzraten und die längstfristig gleichgerichteten Höhenänderungen stattfinden. Zur Gewinnung genauer Kenntnisse müssen die topographischen Aufnahmen sehr dicht liegen, was in solch schwierigem Gebiet erheblichen Aufwand erfordert.

4. Vorläufiger Kartenvergleich über etwa fünf Jahre

4.1 Watt und Wattströme

Für das Gebiet von Abb. 21 o h n e den Kartenvergleich des DHI, soweit er nördlich bzw. westlich der Inselketten liegt, wurde über den auf Abb. 22 angegebenen Vergleichszeitraum nach der auf Abb. 13 gezeigten Methode ein Kartenvergleich durchgeführt. Die vorläufige und unvollständige Bilanzierung ergibt folgende Werte für den unbeschickten Vergleich:

Gesamtfläche A:	3379 km²
Vergleichszeitraum a:	2 bis 8 Jahre
Umsatzhöhe h_u:	78,1 cm
Bilanzhöhe h_b:	+1,3 cm

Die Bilanz ist damit etwa identisch mit der unter 3.4.3 für das niederländische Wattenmeer angegebenen, wo ebenfalls Sedimentation vorherrscht.

Zur Beurteilung des Gesamtergebnisses sei allerdings an GÖHREN (1971) erinnert, der für ein 690 km² großes Gebiet einen Wert $h_b = 7\text{ cm} = 0{,}1 \cdot h_u$ in fünf Jahren für „zu gering" hält, „um auf eine Materialzufuhr zu schließen".

Folgende grobe regionale Gliederung – bei zunächst willkürlicher Abgrenzung – kann bis jetzt vorgenommen werden (für a = 2 bis 8 Jahre):

Küstengebiet	km²	h_b (cm)	h_u (cm)	$\lvert h_b\rvert/h_u$
Nordfriesland	752 + 273*	+1,4	83,2	0,02
Dithmarschen	596	−2,7	75,7	0,04
Elbe/Weser/Jade	1034 + 71*	+3,3	83,8	0,04
Ostfriesland	653	+1,2	62,8	0,02
gesamt	3379	+1,3	78,1	0,02

* Unkorrigiert vom DHI übernommen.

Mit aller Vorsicht ist auf eine positive Materialbilanz zu schließen, die rechnerisch zu einem Sedimentationsbetrag von rd. $40 \cdot 10^6$ m^3 innerhalb von zwei bis acht Jahren führte. Dabei ist die negative Bilanz vor Dithmarschen bemerkenswert, insbesondere weil sich dort auch im küstenfernen Gebiet Erosionen zeigen (vgl. Abb. 28) und WIELAND (1984) als Folge der Vordeichung noch bis 1976 starke Sedimentation feststellte.

Auf eine Kartierung der Umsatz- und Bilanzhöhen in den einzelnen kleinen Einheiten wurde bei dem jetzigen Stand der Untersuchungen mit unvollständig erfaßten Flächen verzichtet (vgl. Abb. 21).

4.2 Deutsche Bucht

Trotz großer Anstrengungen wurde das Ziel nicht erreicht, die sog. blauen Karten, also das Gebiet außerhalb des Insel- und Wattbereiches, mit dem TASH-Programm vollautomatisch zu vergleichen. Das hätte zur Folge gehabt, vollständig auf Ergebnisse aus einer Fläche von rd. 9000 km^2 zu verzichten. Um dies zu vermeiden, wurde mit dem DHI vereinbart, eine vereinfachte Auswertung für das in Frage kommende Gebiet vorzunehmen. Grundlage sollten die im Institut vorhandenen Datenbänder sein. Schließlich fertigte das DHI für das Gebiet von Abb. 21 folgende Ausdrucke für 6900 Einzelflächen von je 1 km^2 Größe:

mittl. Höhe 1974/76
mittl. Höhe 1979/81
Anzahl der Meßpunkte je Aufnahme
Höhendifferenz (= Bilanzhöhe)

Für die Berechnung wurden alle vom DHI auf Datenträgern vorliegenden Tiefeninformationen der genannten Jahre verwendet. Zusätzlich wurden die digitalisierten Karten der Westküste Schleswig-Holsteins mit eingespielt, von denen hier aber nur kleine Teile (insbesondere nördlich des Hindenburgdammes) verwendet wurden. Das Gebiet westlich von Langeoog kann erst bearbeitet werden, wenn die Daten aus der Digitalisierung vorliegen.

Die „Teilflächengröße" beträgt in diesem Gebiet 1 km^2. Daher wurden analog zu den Untersuchungen im Flachwassergebiet hier „kleine Einheiten" zu je 10×10 km^2 gebildet, um ebenfalls Umsatz und Bilanz parallel untersuchen zu können, allerdings in einem wesentlich gröberen Verfahren.

Die Ergebnisse der Auswertungen des DHI wurden für 4379 km^2 verwendet und können aus Abb. 28 entnommen werden. Die unkorrigierten Daten liefern Höhendifferenzen h_b zwischen -9 m und $+12$ m für einzelne 1-km^2-Felder und – jeweils in Quadrate von 100 km^2 zusammengefaßt und gemittelt – folgende Werte:

h_u zwischen 0,1 und 3 m, i. M. 98 cm
h_b zwischen -2 und $+0{,}4$ m, i. M. $+6$ cm

Leider standen nur ungeprüfte Daten von den beiden topographischen Aufnahmen zur Verfügung. Auf die Schwierigkeiten hinsichtlich des Kartenvergleiches wird in Kap. 3.3.3 hingewiesen. Es konnten zunächst 10 m-Fehler in einigen km^2-Feldern festgestellt werden. In anderen traten zu Nachbarfeldern bemerkenswert große Differenzen – bis 8 m – auf, bei denen der Grund möglicher Ungenauigkeit unbekannt ist. Daher wurden in einem zweiten Rechengang die Daten derjenigen der 4379 Felder, die um mehr als 5 m von denen der Nachbarfelder abwichen, verändert: Die Höhenänderungen der umgebenden Felder wurden gemittelt und dann als korrigierter Wert verwendet. Die Resultate dieses letzten Rechenganges zeigt Abb. 28. Als generelle Aussagen können gelten:

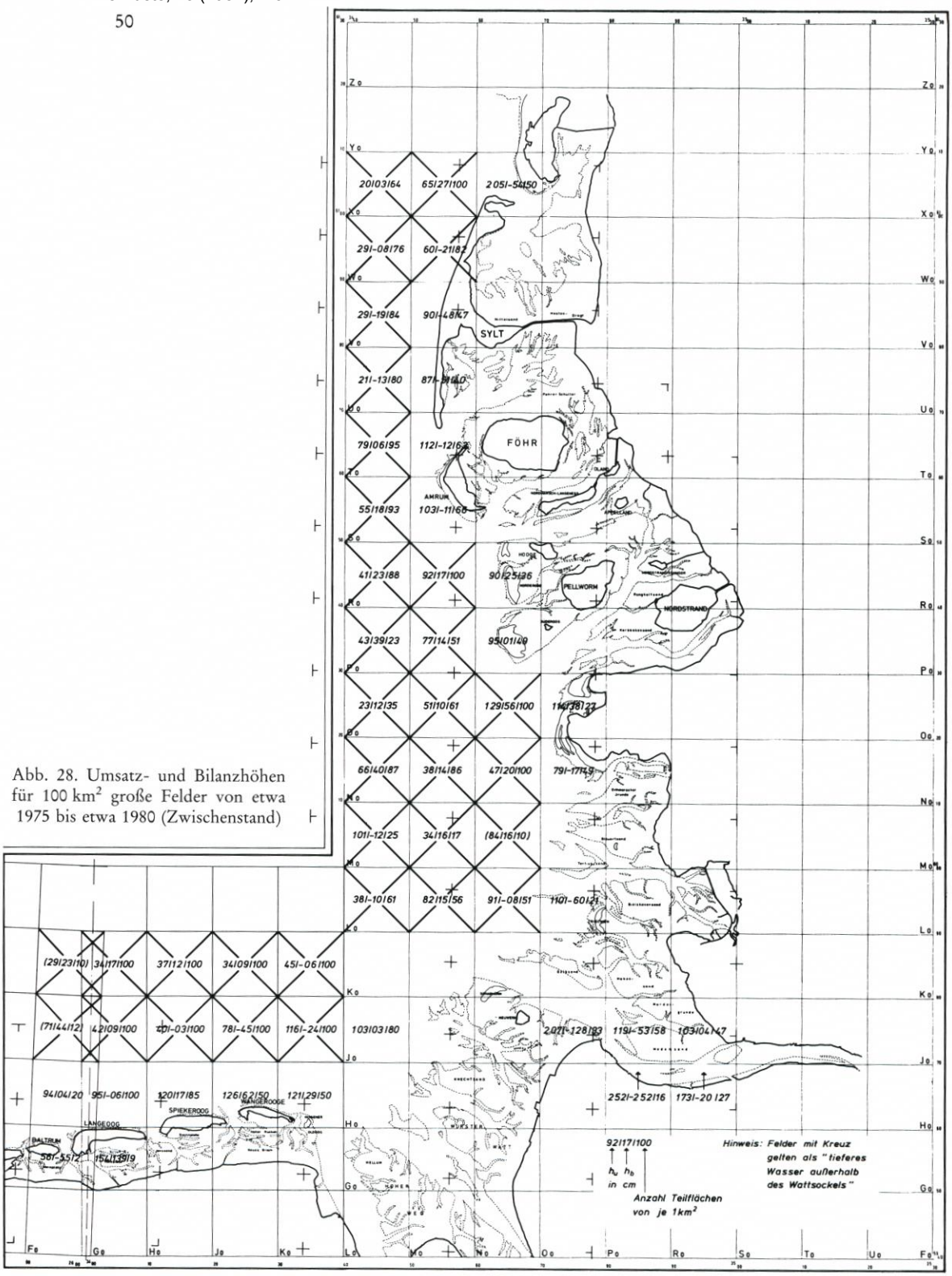


Abb. 28. Umsatz- und Bilanzhöhen für 100 km² große Felder von etwa 1975 bis etwa 1980 (Zwischenstand)

- Im Gebiet der sog. blauen Karten wurden Flächen über je 100 km², soweit sie ausreichend entfernt von Riffbögen und Außensänden liegen (dazu Kennzeichnung auf Abb. 28) und Daten von mehr als 20 km² enthalten, zusammengefaßt. Sie liefern
  h_u zwischen 20 und 129 cm, i. M. 50 cm mit C = ± 10 cm und s = ± 28 cm
  h_b zwischen +56 und −45 cm, i. M. +7 cm mit C = ± 7 cm und s = ± 21 cm.
- Für die Tiefwasser-Fläche von 34 × 100 km² ergibt sich rechnerisch eine Sedimentation von rd. 240 · 10^6 m³/rd. fünf Jahren und damit bei gleicher Flächengröße etwa der sechsfache Betrag desjenigen im Küstenbereich.
- Die großen Standardabweichungen, wegen der Vermessungsungenauigkeit und der Datenbeschaffenheit zu erwarten, müssen dieses Ergebnis relativieren.
- Die sechs Felder nördlich von Baltrum bis zur Wesermündung zeigen größeren Umsatz (h_u zwischen 94 und 126 cm) und mit +19 cm ein wesentlich höheres mittleres h_b, entspr. einer Sedimentation von rd. 110 · 10^6 m³/rd. fünf Jahren.
- Schließlich liefern 10 küstennahe Felder von Trischen bis zum Lister Tief h_u zwischen 79 und 205 cm und eine mittlere Bilanzhöhe von h_b = −19 cm, damit eine Erosion von rd. 190 · 10^6 m³/rd. 5 Jahren.
- Insgesamt zeigen die grob korrigierten Daten – je nach Berechnungsart – für das Gebiet außerhalb des Wattrandes auf Abb. 28 eine Sedimentation von 130 bis 160 Mio. m³, worin größere regionale Erosionsgebiete von Röm bis Amrum und Eiderstedt bis Trischen eingeschlossen sind. Hingewiesen sei in diesem Zusammenhang aber nochmals auf die mangelnde Genauigkeit.

4.3 Ergänzungen über die morphologische Charakteristik

Für den Zweck der Beschickung von Umsatzhöhen, die aus zwei topographischen Aufnahmen im Abstand von i Jahren stammen, auf einen anderen Vergleichszeitraum ist folgender Weg gangbar:

1. h_{ui} einer kleinen Einheit ermittelt als h_u über a = i Jahre;
2. Bestimmung bzw. Schätzung der topographischen Gegebenheiten, des Seegangscharakters und der Strömungsverhältnisse in dem entspr. Gebiet;
3. nach Kap. 3.4.4 Ansprache der „morphologischen Charakteristik"; damit Festlegung von $\overline{h}_u$ und a_0;
4. Berechnung des Wertes

$$h_u = \overline{h}_u \cdot (1 - e^{-i/a_0})$$

   zur Kontrolle und evtl. Korrektur von $\overline{h}_u$, so daß $h_u = h_{ui}$ erreicht wird;
5. Berechnung $h_u = f(a)$ für den gewünschten Vergleichszeitraum.

Auf diesem Wege können die Ergebnisse von Kap. 4.1 und 4.2 korrigiert werden, was im Rahmen der vorliegenden Arbeit noch nicht geschieht.

Abb. 21 weist vor der gesamten schleswig-holsteinischen Küste sowie im bisher erfaßten ostfriesischen Raum vor allem Lücken auf dem Watt aus. Dabei handelt es sich fast ausschließlich um Brandungswatt und brandungsfreies Watt mit und ohne kleine Priele. Dafür gelten nach Kap. 3.4.4

$$h_u = 20 \cdot (1 - e^{-a/4}) \text{ für FW}$$
$$h_u = 45 \cdot (1 - e^{-a/4}) \text{ für WP}$$
$$h_u = 40 \cdot (1 - e^{-a/4}) \text{ für BW}$$

Generell liefert a = 5 Jahre (wie im Projekt MORAN vorgesehen) für alle drei Gebiete

$$h_{u5} = 0{,}71 \cdot \overline{h}_u$$

Ferner ist festgestellt worden, daß $|h_b|_{max}$ für kleine Einheiten erst nach dem 2- bis 3,5fachen von a_0 zu erwarten ist, also nach 8 bis 12 Jahren, und dann den Betrag von $\overline{h}_u$ erreichen kann. Da stets $|h_b| \leqslant h_u$ sein muß, wäre generell von

$$h_{b5} = -h_{u5} \text{ bis } +h_{u5}$$

auszugehen; andererseits ist nach Kap. 3.4.3 zu erwarten, daß der Wert h_b für größere Gebiete, wie sie im folgenden betrachtet werden sollen, zwischen den Grenzen

$$h_{b5} = -0{,}2 \cdot h_{u5} \text{ bis } +0{,}2 \cdot h_{u5}$$

zu suchen sein und im Mittel nahe Null auftreten wird. Entsprechend wurden die Berechnungen vorgenommen. In der Unterteilung von Kap. 4.1 liefert dies:

Nordfriesland:	Bisher erfaßt:	1025 km²
	Hinzu kommen: brandungsfr. Watt:	180 km²
	Watt mit Prielen:	100 km²
	Brandungswatt:	50 km²
	Damit liefert die Ergänzung:	
	A = 1355 km²	
	a = rd. 5 Jahre	
	h_b[1] = +1,1 cm/+0,1 cm/+2,1 cm	
	h_u = 68,2 cm	
Dithmarschen:	Bisher erfaßt:	596 km²
	Hinzu kommen: brandungsfr. Watt:	30 km²
	Brandungswatt:	20 km²
	Damit liefert die Ergänzung:	
	A = 646 km²	
	a = rd. 5 Jahre	
	h_b[1] = −2,5 cm/−2,8 cm/−2,2 cm	
	h_u = 71,4 cm	
Elbe/Weser/Jade:	Bisher erfaßt:	1105 km²
	Hinzu kommen: brandungsfr. Watt	60 km²
	Damit liefert die Ergänzung:	
	A = 1165 km²	
	a = rd. 5 Jahre	
	h_b[1] = +3,1 cm/+2,9 cm/+3,3 cm	
	h_u = 80,2 cm	
Ostfriesland	(nur südl. von Juist und südl. von Langeoog bis zur Außenjade):	

[1] Unter der Annahme $h_b = 0/-0{,}2 \cdot h_u/+0{,}2 \cdot h_u$.

Bisher erfaßt:	653 km²
Hinzu kommen: brandungsfr. Watt:	100 km²
Watt mit Prielen:	30 km²
Brandungswatt:	20 km²
Wattströme[1]:	20 km²

Damit liefert die Ergänzung:

$A = 823\ km^2$

a = rd. 5 Jahre

h_b[2] = +1,0 cm/−0,1 cm/+2,1 cm

$h_u = 55{,}6$ cm

Zwar führen die Ergänzungen immer noch zu groben Anhalten, die aber wegen Vollständigkeit der Gebiete unterschiedlicher morphologischer Charakteristik einigermaßen repräsentativ sind. Daher darf hier zusammenfassend auch noch das Ergebnis für das gesamte, bisher untersuchte Küstenvorfeld genannt werden:

	betrachtete Fläche km²	Bilanzhöhe h_b cm	Umsatzhöhe h_u cm	$\lvert h_b \rvert / h_u$
Küstennahbereich	rd. 4000	+1,1	70	0,02
Deutsche Bucht	rd. 4400	rd. +3,5	rd. 50	0,07
gesamt	rd. 8400	rd. +2,4	rd. 60	rd. 0,04

Die Zahlen gelten für einen Vergleichszeitraum von rd. fünf Jahren. Sie weisen allgemein Sedimentation aus.

5. Ausblick

Die weiteren Arbeiten im Rahmen des hier behandelten Projektes sind im Grunde genommen in zwei Kategorien einzuteilen. Da sind einmal diejenigen, die zur Bewältigung der ursprünglich gestellten Aufgaben gehören. Auf sie wird jeweils an passender Stelle im Text hingewiesen, und sie werden unten noch einmal zusammengestellt. Zum anderen sind es Arbeiten, die mit den hier entwickelten Ansätzen und Ideen auf der Basis des aufbereiteten Datenmaterials zu weiterführenden morphologischen Analysen beitragen könnten. Auch dazu folgen unten einige Hinweise. Es wird angestrebt, das Projekt MORAN für eine gewisse Zeit weiter zu fördern, um diesen Zielen näherzukommen.

Arbeiten zum Abschluß der ursprünglich gestellten Aufgaben:

- Durchführung des Kartenvergleiches etwa 1975–etwa 1980, soweit dies nicht schon im Detail geschehen ist (vgl. Abb. 21);
- Kartierung von Umsatz und Bilanz für das gesamte Untersuchungsgebiet, soweit dies möglich ist (einschl. Beschickung auf a = 5 Jahre, soweit dies erforderlich ist);
- Interpretation des Kartenvergleiches hinsichtlich der Verlagerung von Rinnen, Platen, Sänden und Prielen.

[1] Gerechnet mit $\bar{h}_u = 140$ cm, $a_0 = 5$ Jahre, $h_{u5} = 0{,}63 \cdot \bar{h}_u$, $h_{b5} = 0/-18/+18$ cm.

[2] Unter der Annahme $h_b = 0/-0{,}2 \cdot h_u/+0{,}2 \cdot h_u$ für die ergänzten Flächen.

Weiterführende Arbeiten:

Üblicherweise werden topographische Veränderungen zwischen zwei Aufnahmen interpretiert, indem Erkenntnisse über Strömungen (meist aus 14-Tage-Messungen) und Seegang (meist aus unterbrochenen Reihen aus 1 bis 3 Jahren und nicht unbedingt aus derselben Zeit stammend) verallgemeinert werden. Hier ist ein Ungleichgewicht erkennbar: Wenn präzise Aussagen gemacht werden sollen, dann benötigt man Messungen über den gesamten Zeitraum a; wenn allgemeine Aussagen angestrebt werden, dann allgemein auch hinsichtlich der Kartenvergleiche. Diese Möglichkeit ist in Kap. 2 und 3 aufgezeigt worden. Das Ziel ist Quantität über statistische Zusammenhänge. Dazu bedarf es weiterer Anstrengungen:

- Genauere Untersuchung der morphologischen Zusammenhänge in den hier mit T, WS und PR bezeichneten Gebieten; dazu evtl. Auflösung des bisherigen Quadrate-Mosaiks in brauchbarere Formen;
- die Abhängigkeit morphologischer Parameter von weiteren Faktoren analysieren; dazu gehört etwa, wie das Verhältnis Bilanz- zu Umsatzhöhe von der Flächengröße A abhängt, wie genau und mit welchen Gesetzmäßigkeiten ein Bilanzmaximum über a zu bestimmen ist und ob Werte für m angegeben werden können; evtl. ergeben sich dabei auch regionale Differenzierungen;
- typische h_u'-Verteilungen erarbeiten, um aus einem Mittelwert über eine kleine Einheit auch auf Extremwerte für Teilflächen schließen zu können; hieraus können detaillierte Schlußfolgerungen auf den Materialtransport abgeleitet werden;
- Untersuchungen darüber anstellen, welche hydrologischen Parameter für diese morphologischen Analysen am besten geeignet sind;
- Kartenvergleiche auf die Aufnahme 1985/87 ausdehnen: Damit wird in vielen Gebieten erstmals die Möglichkeit gegeben, über den wichtigen Zeitraum von 10 Jahren zu vergleichen, und vielerorts werden Vergleiche über mehr als 15 Jahre angestellt werden können;
- Behandlung der sedimentologischen und biologischen Aspekte. Es ist heute z.B. bekannt, daß die Besiedlung dort besonders dünn ist oder sogar fehlt, wo der Umsatz ausgesprochen stark ist, d.h. an den Rändern der Wattströme und im Platengebiet;
- Erweiterung des hier verwendeten Verfahrens auf größere topographische Einheiten in Anlehnung an Renger (1976) und Dammschneider (1983);
- Prüfung, ob dieses Verfahren brauchbar ist zur Quantifizierung des Einflusses künstlicher Veränderungen; dazu finden sich Anregungen u.a. in den Arbeiten von Hovers (1973), Samu (1982), Dieckmann (1985), Dammschneider (1985) und Wieland (1984).

6. Danksagung

Es ist dem Autor ein besonderes Bedürfnis, dem langjährigen Mitarbeiter an diesem Projekt, Herrn Heinrich Siemssen, für seine engagierte Tätigkeit bis zum letzten Tag vor Erreichung des Ruhestandes zu danken. Als einer der beiden Männer der „ersten Stunde" der damaligen Forschungsgruppe Neuwerk hat er wesentlichen Anteil an der Herstellung der topographischen Aufnahmen, deren Daten er in den letzten Jahren sehr erfolgreich nach Gesichtspunkten bearbeitete, die einem Mann aus der Vermessungs-Praxis von Haus aus fremd sind. Er hat wesentlich zum Gelingen der Arbeit beigetragen, und sein Name wird mit dem Projekt „MORAN" stets verbunden bleiben.

Weiter gilt der Dank den engagierten Mitgliedern der vorn genannten Projektgruppe

sowie den Herren Drs. GÖHREN, LUCK und ROHDE, die in vielen langen Diskussionen mit dazu beigetragen haben, das Projekt voranzubringen und die Analysen in die richtigen Bahnen zu lenken.

7. Schriftenverzeichnis

BARTHEL, V.: Vergleich der Topographie 1974–79 des Testfeldes „Knechtsand" im Rahmen des MORAN-Projektes. Strom- und Hafenbau, Ref. Hydrologie Unterelbe, Studie 51, 1981 (unveröff.).

BETTAC, W., SCHLEIDER, W. u. SINDERN, J.: Das Küstenkartenwerk 1:25 000 der Deutschen Bucht – Vermessung und Kartographie. Die Küste, H. 40, 1984.

BROLSMA, P.: Sedimentbalans Waddenzee. Rijkswaterstaat, Nota WWKZ-82. H002, Hoorn 1982 (unveröff.).

DAMMSCHNEIDER, H.-J.: Morphodynamik, Materialbilanz und Tidewassermenge der Unterelbe. Berliner Geogr. Studien, Bd. 12, 1983.

DAMMSCHNEIDER, H.-J.: Quantitative Morphodynamik im Sohlenregime der Unterelbe. Die Küste, H. 42, 1985.

DIECKMANN, R.: Geomorphologie, Stabilitäts- und Langzeitverhalten von Watteinzugsgebieten der Deutschen Bucht. Mitt. des Franzius-Inst. der Univ. Hannover, H. 60, 1985.

FÜHRBÖTER, A.: Über mikrobiologische Einflüsse auf den Erosionsbeginn bei Sandwatten. Wasser und Boden, H. 3, 1983.

GÖHREN, H.: Über die Genauigkeit der küstennahen Seevermessung nach dem Echolotverfahren. Hamb. Küstenf., H. 2, 1968.

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.

HOVERS, G.: Der Einfluß von Strombauwerken auf die morphologische Entwicklung der Stromrinnen im Mündungsgebiet eines Tideflusses, untersucht am Beispiel der Außenweser. Mitt. der Bundesanst. für Wasserbau Karlsruhe, Nr. 34, 1973.

JENSEN, G.: Auswertung von Tiefenänderungen über verschiedene Zeiträume und Flächengrößen hinsichtlich Erosion, Sedimentation und Umsatz. Dipl.-Arbeit, Leichtweiß-Inst. der TU Braunschweig, 1983 (unveröff.).

KERSSENS, P. J. M.: New Development in Suspended Sediment Research. 2nd Intern. Conf. on Inland Waterways Transp. and Harbour Eng., Basrah, Irak, 1980.

KLUG, H. u. HIGELKE, B.: Ergebnisse geomorphologischer Seekartenanalysen zur Erfassung der Reliefentwicklung und des Materialumsatzes im Küstenvorfeld zwischen Hever und Elbe 1936–1969. DFG-Forschungsber. Sandbewegung im Küstenraum, Verl. H. Boldt, Boppard, 1979.

KNOP, F.: Untersuchungen über Gezeitenbewegung und morphologische Veränderungen im nordfriesischen Wattgebiet als Vorarbeiten für Dammbauten. Mitt. des Leichtweiß-Inst. der TU Braunschweig, H. 61/1, 1961.

KNOP, F.: Küsten- und Wattveränderungen Nordfrieslands – Methoden und Ergebnisse ihrer Überwachung. Die Küste, Jg. 11, 1963.

REINECK, H.-E.: Die Größe der Umlagerungen im Neuwerk/Scharhörner Watt. Hamb. Küstenf., H. 33, 1975.

REINECK, H.-E.: Einwirkung der vier Sturmfluten im Januar 1976 auf die Wattensedimente zwischen dem Festland und der Insel Neuwerk. Hamb. Küstenf., H. 35, 1976.

REINECK, H.-E., CHEN, C. M. u. WANG, S. S.: Die Rückseitenwatten zwischen Wangerooge und Festland, Nordsee. Senckenbergiana marit., Bd. 17, Nr. 4/6, 1986.

RENGER, E.: Quantitative Analyse der Morphologie von Watteinzugsgebieten und Tidebecken. Mitt. des Franzius-Inst. der Univ. Hannover, H. 43, 1976.

SAMU, G.: Zur Morphogenese des Seegebietes vor Borkum und des Südweststrandes der Insel. Die Küste, H. 37, 1982.

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

SIEFERT, W.: Zur Meßgenauigkeit der Pegelaufzeichnungen in der Außenelbe. Hamb. Küstenf., H. 13, 1970.
SIEFERT, W.: Über Formen, Längen und Fortschrittsrichtungen von Wellen in küstennahen Flachwassergebieten. Hamb. Küstenf., H. 24, 1972.
SIEFERT, W.: Über den Seegang in Flachwassergebieten. Mitt. des Leichtweiß-Inst. der TU Braunschweig, H. 40, 1974.
SIEFERT, W.: Morphologische Analysen für kleine Einheiten. Proc. INTERMARITEC, Hamburg, 1982.
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. u. BARTHEL, V.: The German „Moran" Project. Proc. 17th Intern. Conf. on Coastal Engin., Sydney 1980, ASCE, New York, 1981.
SIEFERT, W. u. LASSEN, H.: Vermessungsarbeiten im Elbmündungsgebiet. Hamb. Küstenf., H. 2, 1968.
SONDERFORSCHUNGSBEREICH 149: Jahresberichte 1980 und 1981, Hannover, 1981 und 1982.
TAUBERT, A.: Morphodynamik und Morphogenese des Nordfriesischen Wattenmeeres. Hamb. Geogr. Schriften, H. 42, 1986.
UNSÖLD, G.: Jahreslagen und Aufwachsraten in Schlicksedimenten eines künstlichen, gezeitenoffenen Sedimentationsbeckens (Wattgebiet südlich Nordstrand/Nordfriesland). Meyniana, 26, 1974.
WIELAND, P.: Untersuchungen über geomorphologische Veränderungen in der Dithmarscher Bucht. Die Küste, H. 40, 1984.
WIELAND, P.: Umfang und Häufigkeit topographischer und fotografischer Erfassung des Wattenmeergebietes zwischen Hever- und Elbemündung von 1934 bis 1984. Die Küste, H. 42, 1985.

8. Symbolverzeichnis

a	Vergleichszeitraum (Zeitdiff. zwischen zwei topogr. Aufnahmen)	Jahr
a_0	Zeitraum, in dem $\bar{h}_u$ bei gleichsinniger, linearer Veränderung der Topographie der Teilflächen einer Einheit erreicht würde (siehe Kap. 2.3)	Jahr
$a_{0,9}$	Zeitraum bis zum Erreichen von $0{,}9 \cdot \bar{h}_u$	Jahr
$a\,(\lvert h_b \rvert_{max})$	Zeitraum für das Erreichen der höchsten Bilanz-Beträge	Jahr
d	Wassertiefe	m
h_b	mittlere Bilanzhöhe einer Fläche A (siehe Kap. 2.1)	m
h_e	mittlere Erosionshöhe einer Fläche A (siehe Kap. 2.1)	m
h_s	mittlere Sedimentationshöhe einer Fläche A (siehe Kap. 2.1)	m
h_u	mittlere Umsatzhöhe einer Fläche A (siehe Kap. 2.1)	m
$\bar{h}_u$	asymptotischer Grenzwert von h_u	m
h'	Höhenänderung einer Teilfläche von 1 ha Größe ($h'_u = h'_b = h'_s$ bzw. h'_e)	m
h'_0	max. Umsatzhöhe einer Teilfläche [$h_u = f(t)$ auf Abb. 6]	m
h_{ui}	Umsatzhöhe für $a = i$ Jahre (h_{u2} ist also die Umsatzhöhe für einen Zeitraum von 2 Jahren zwischen topogr. Aufnahmen)	m
m	Vielfaches von a_0, bei dem $h_b = 0$ angenommen werden kann (siehe Abb. 7)	–
n	Anzahl der Teilflächen einer kleinen Einheit	–

s	Standardabweichung des Einzelwertes	m; Jahr
t	fortlaufende Zeit; $t = 0$ im Jg. der 1. Aufnahme	Jahr
t_0	entspr. a_0	Jahr
u	topogr. Ungleichförmigkeit (Höhe der 10 % höchsten minus Höhe der 10 % tiefsten Teilflächen einer Einheit)	m
v_m, v_{max}	mitt. (max.) Strömungsgeschwindigkeit	m/s
z	mittl. topogr. Höhe einer Fläche	m KN
A	Fläche	km^2
C	Vertrauensbereich des Mittelwertes für die statist. Sicherheit 95 %	m; Jahr
E^*	Seegangsenergie	Nm
E_k	kinetische Energie	Nm
$\overline{H}$	mittl. Wellenhöhe	m
$\overline{H}_{max}$	höchste mögliche mittlere Wellenhöhe	m
$H_{1/3}$	kennzeichnende Wellenhöhe	m
KN	Kartennull, definiert als Höhe des mittl. Springtideniedrigwassers	m NN
$\overline{L}$	mittl. Wellenlänge	m
$\overline{T}$	mittl. Wellenperiode	s
$T_{H1/3}$	Periode der kennzeichnenden Welle	s
V	Volumen	m^3
δ	Wellensteilheit	–