

# Die Küste

ARCHIV  
FÜR FORSCHUNG UND TECHNIK  
AN DER NORD- UND OSTSEE

ARCHIVE  
FOR RESEARCH AND TECHNOLOGY  
ON THE NORTH SEA AND BALTIC COAST



3950-A-2012-0000085

# Die Küste

ARCHIV  
FÜR FORSCHUNG UND TECHNIK  
AN DER NORD- UND OSTSEE

ARCHIVE  
FOR RESEARCH AND TECHNOLOGY  
ON THE NORTH SEA AND BALTIC COAST

HERAUSGEBER:  
KURATORIUM FÜR FORSCHUNG IM KÜSTENINGENIEURWESEN

Heft 37 – 1982

DRUCK UND KOMMISSIONSVERLAG:  
WESTHOLSTEINISCHE VERLAGSANSTALT BOYENS & CO. HEIDE I. HOLST.

ISSN 0452-7739  
ISBN 3-8042-0282-9

Anschriften der Verfasser dieses Heftes:

DÜCKER, Hans-Peter, Dr.-Ing., Dalmannstraße 1-3, 2000 Hamburg 11; HERRLING, Bruno, Dr.-Ing., Kaiserstraße 12, 7500 Karlsruhe, 1; ROHDE, Hans, Dr.-Ing., Moorweidenstraße 14, 2000 Hamburg 13; SAMU, Gyula, Dr. rer. nat., Moorweidenstraße 14, 2000 Hamburg 13; SIEFERT, Winfried, Prof. Dr.-Ing., Lentzkai, 2190 Cuxhaven.

---

Die Verfasser sind für den Inhalt der Aufsätze allein verantwortlich.  
Nachdruck aus dem Inhalt nur mit Genehmigung des Herausgebers gestattet:  
Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen.  
Vorsitzender: Ministerialrat Dr. K. ZANKER.  
Geschäftsführer: Ltd. Baudirektor J. SINDERN, Feldstraße 251/253, 2300 Kiel.  
Schriftleiter: Erster Baudirektor Dr.-Ing. H. GÖHREN, Dalmannstraße 1-3, 2000 Hamburg 11.

## Inhaltsverzeichnis

SIEFERT, Winfried, Prof. Dr.-Ing. Bemerkenswerte Veränderungen der Wasserstände in den deutschen Tideflüssen . . . . .	1
SAMU, Gyula, Dr. rer. nat. Zur Morphogenese des Seegebietes vor Borkum und des Südweststrandes der Insel	37
HERRLING, Bruno, Dr.-Ing. Berechnung der Tide im Elbeästuar mit direkter Kopplung von ein- und zwei- dimensionalen finiten Elementen . . . . .	59
ROHDE, Hans, Dr.-Ing. Die Forschungsarbeiten des KFKI 1979 bis 1981 . . . . .	73
DÜCKER, Hans Peter, Dr.-Ing. Suspensionsgehalte in Flachwassergebieten – Messungen im Watt von Scharhörn . . . . .	85

# Bemerkenswerte Veränderungen der Wasserstände in den deutschen Tideflüssen

Von Winfried Siefert

## Zusammenfassung

Umfangreiche Analysen der Tide- und Sturmflutverhältnisse in der Deutschen Bucht und ihren Tideästuaren lassen erkennen, daß sich die Entwicklung in den letzten 20 Jahren grundlegend von derjenigen der davorliegenden Jahrzehnte unterscheidet. Bei der Suche nach den Ursachen stellt sich heraus, daß – neben den wahrscheinlichen Folgen baulicher – solche nicht auszuschließen sind, die aus Veränderungen in der Nordsee herrühren. Wege und Ansätze für die zukünftige Arbeit werden aufgezeigt.

## Summary

*Extensive analyses of tide and storm surge conditions in the German Bight and its estuaries point to a development during the last 20 years that distinctly differs from that of earlier decades. Going in search of the roots it turns out that – beyond influences of artificial changes in the estuaries – such can not be excluded that result of modifications in the North Sea. Hints and possible treatments of future investigations are noted.*

## Inhalt

1. Veranlassung . . . . .	2
2. Entwicklung der Tideverhältnisse . . . . .	2
2.1 Vorbemerkungen . . . . .	2
2.2 MThw, MTnw an der Küste . . . . .	6
2.3 MThw, MTnw in den Flüssen . . . . .	8
2.4 Spring- und Nippanomalien in der Elbe . . . . .	21
3. Entwicklung der Sturmflutverhältnisse . . . . .	23
3.1 Erkennbare Trends am Beispiel Elbe . . . . .	23
3.2 Küste . . . . .	23
3.3 Flüsse . . . . .	26
4. Hypothesen zur weiteren Arbeit . . . . .	32
4.1 Überblick . . . . .	32
4.2 Erarbeitung weiterer Indizien . . . . .	33
4.3 Auf der Suche nach den Ursachen . . . . .	34
5. Liste der verwendeten Pegel-Abkürzungen . . . . .	36
6. Schriftenverzeichnis . . . . .	36

## 1. Veranlassung

In der Bundesrepublik Deutschland leben rd. 10 Mio Menschen so nahe an der Nordseeküste, daß ihr Leben dadurch in irgendeiner Weise beeinflußt wird – sei es durch die Häfen mit Hamburg und Bremen/Bremerhaven an der Spitze, sei es durch den Tourismus auf den Ost- und Nordfriesischen Inseln und an den Küsten, durch die Fischerei, die Schifffahrt, den Sport oder einfach das Klima. Bei 450 km langer Nordseeküste „gehören“ damit jedem dieser Menschen 4,5 cm Küste. Bedenkt man, daß dieser Wert z. B. in Australien etwa bei 150 cm liegt, so wird hierdurch bereits deutlich, welch konzentrierte Aufmerksamkeit bei uns dieser Küste und dem, was vor ihr (und damit eben auch mit ihr) vorgeht, geschenkt werden sollte.

Aber das wird nur bedingt so gehalten, obwohl die Küste immer dichter besiedelt wird und damit z. B. die Frage nach der Deichsicherheit immer wieder neu gestellt werden müßte, zumal wenn weiterführende Beobachtungen und Erkenntnisse vorliegen. Es wird immer schwieriger und kostspieliger, die Zufahrten etwa zu den großen Häfen für tiefergehende Schiffe herzurichten, so daß in diesem Zusammenhang Probleme durch eine ungünstige Tideentwicklung auftreten können. Zudem sind in den letzten Jahren die Inseln und die Küste weiter für den Tourismus erschlossen worden, auch im Hinblick auf Angebote in der verlängerten Vor- und Nachsaison. Das führt zwangsläufig dazu, daß Kureinrichtungen außerhalb der Deichlinie auch noch in Jahreszeiten vorgehalten werden, die schon durch Sturmfluten beeinträchtigt sind. Für den Betrieb von Sturmflutpoldern und -sperrwerken ist es selbstverständlich, aber eben auch für einen reibungslosen und sicheren Kurbetrieb erforderlich, hohe wie auch mittlere (und damit häufiger auftretende) Sturmfluten rechtzeitig vorherzusagen und längerfristige Entwicklungen zu beobachten, um daraus Schlüsse für die Zukunft ziehen zu können.

In den letzten Jahren haben sich Ereignisse und Entwicklungen gezeigt, die in Fachkreisen und vor allem in der Öffentlichkeit Verunsicherung hervorgerufen und zu teilweise interessanten, teils aber auch utopischen Vorstellungen und Vorschlägen geführt haben. Dafür auslösend waren u. a.:

- die Folge hoher Sturmfluten im Nov./Dez. 1973,
- die Sturmfluten vom 03. 01. und 20./21. 01. 1976,
- die Absenkung der Tnw in den oberen Tideflüssen.

In der vorliegenden Arbeit soll versucht werden, diese und andere Entwicklungen in einem örtlich und zeitlich größeren Rahmen zu fassen und Gedanken zu möglichen Lösungswegen darzulegen.

## 2. Entwicklung der Tideverhältnisse

### 2.1 Vorbemerkungen

Es gibt verschiedene Parameter, die die mittleren Tideverhältnisse charakterisieren. Am häufigsten verwendet – weil am leichtesten auswertbar – werden die mittleren Scheitelhöhen MThw und MTnw als Mittel über bestimmte, willkürlich wählbare Zeiträume. Die Analyse solcher Werte hat in unserer Küstenforschung eine große Tradition. Für viele Fragen ist sie sehr aussagekräftig, für einige Vorgänge jedoch nicht ausreichend. Es bedarf daher weiterer Detailuntersuchungen, etwa folgender Parameter (Abb. 1):

- Form der Tidekurven: Dazu können z. B. entsprechend dem Vorschlag von LÜDERS (1950) 20 geeignete Tiden aus einem möglichst kurzen Zeitraum gemittelt und zu einer mittleren

Tidekurve zusammengefaßt werden. Solche Kurven liegen für einige Orte vor, aber nach verschiedenen Verfahren, unter unterschiedlichen Gesichtspunkten und für nicht immer vergleichbare Zeiträume ausgewertet. Sie gestatten jedoch Einblicke in die Entwicklung von Flut- und Ebbedauer sowie Steilheit und charakteristische Form (und ihre Veränderungen) der Flut- und Ebbeäste.

- Flut- und Ebbestromkenterpunkte: Sie sind strenggenommen keine Zeitpunkte, sondern -räume, nur grob bekannt und teilweise schwer zu bestimmen und festzulegen, besonders an Küstenorten oder in Flußmündungen. Veränderungen der Flutstrom- und Ebbestromdauer geben jedoch wertvolle Hinweise auf Änderungen der Strömungsverhältnisse.
- Strömungsverlauf: Kontinuierliche Strömungsmessungen, aus denen mögliche Veränderungen in den letzten Jahrzehnten abgeleitet werden könnten, sind so spärlich, daß auf sie nur für wenige Gebiete zurückgegriffen werden kann. Hier bleibt heute vor allem die Aufgabe, durch den Beginn kontinuierlicher Messungen für spätere Analysen Material zu schaffen.

Zur Analyse möglicher Anomalien steht also nur eine begrenzte Anzahl von Messungen und Parametern zur Verfügung. So lassen sich Anomalien zwar deutlich an der Entwicklung der Scheitelwasserstände demonstrieren, zu ihrer Erklärung ist man bis heute aber weitgehend auf Indizien angewiesen.

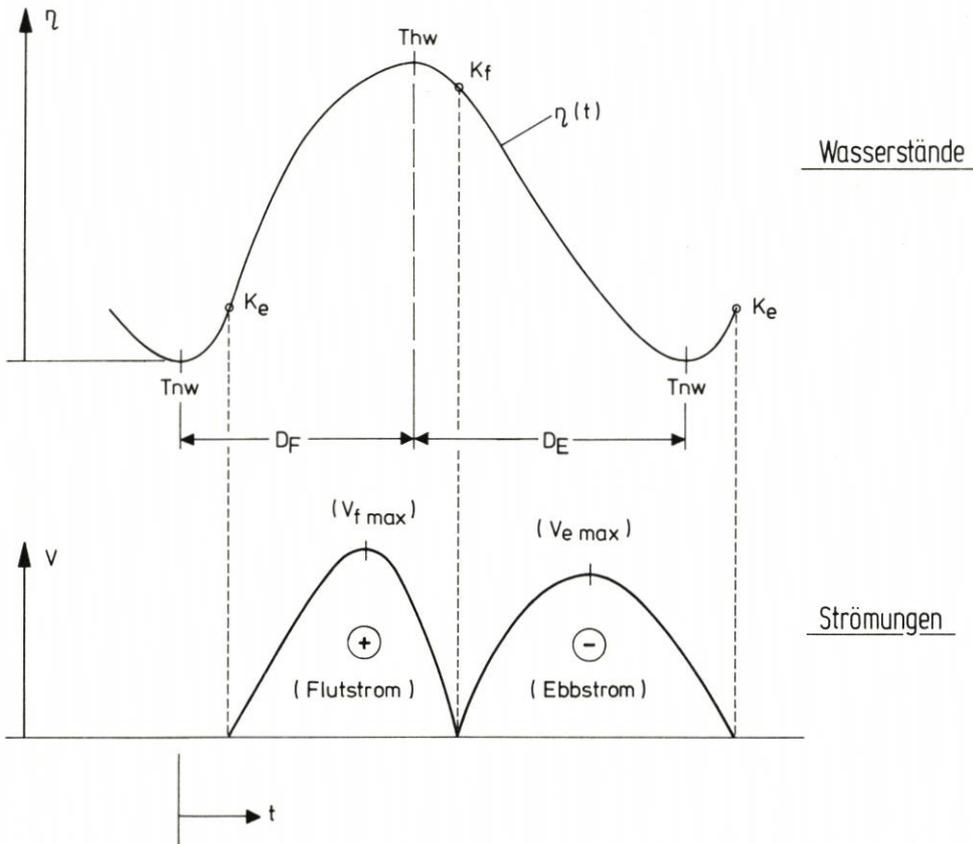


Abb. 1. Tideverhältnisse mit Angabe der meßbaren Parameter (schematisch)

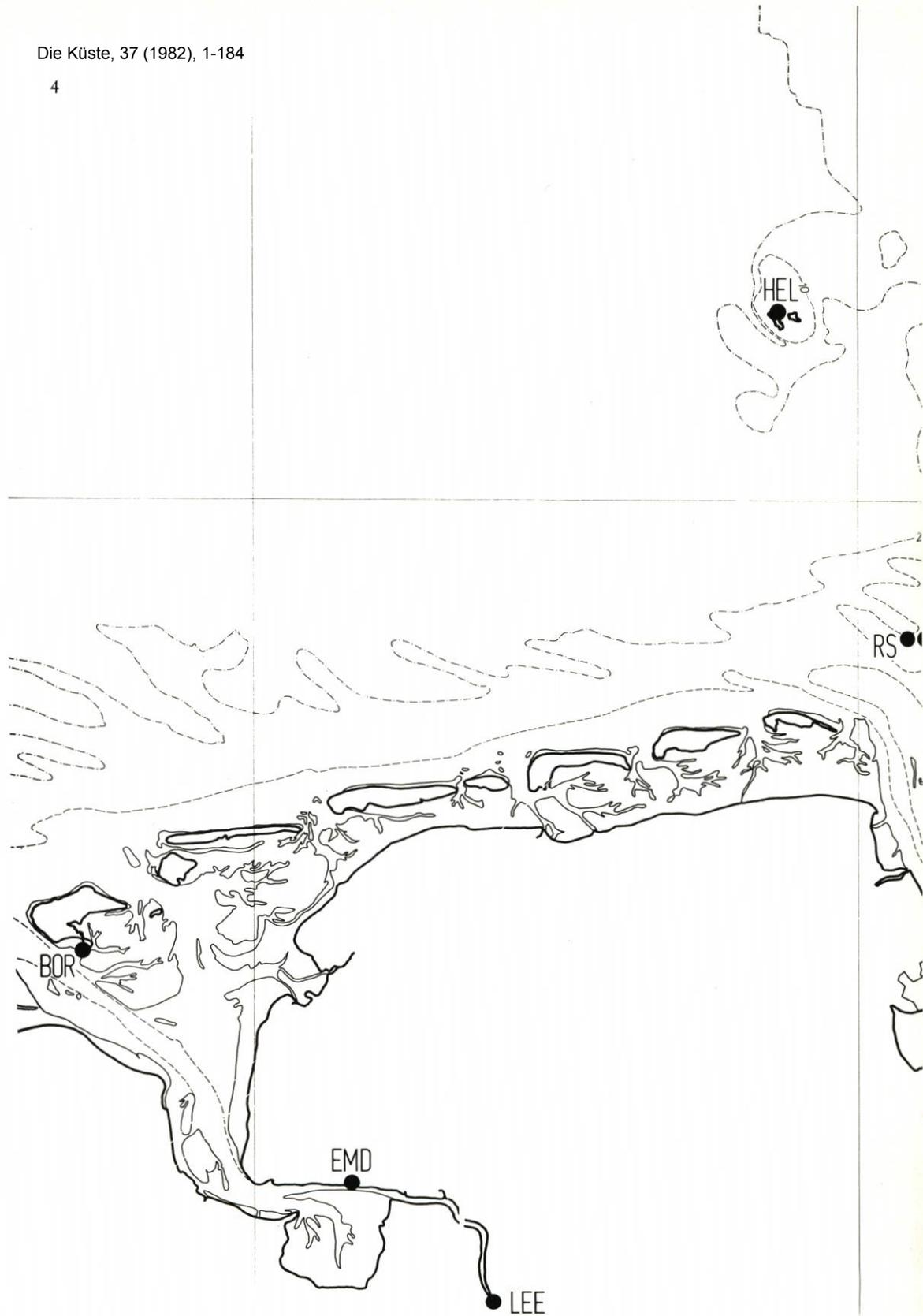
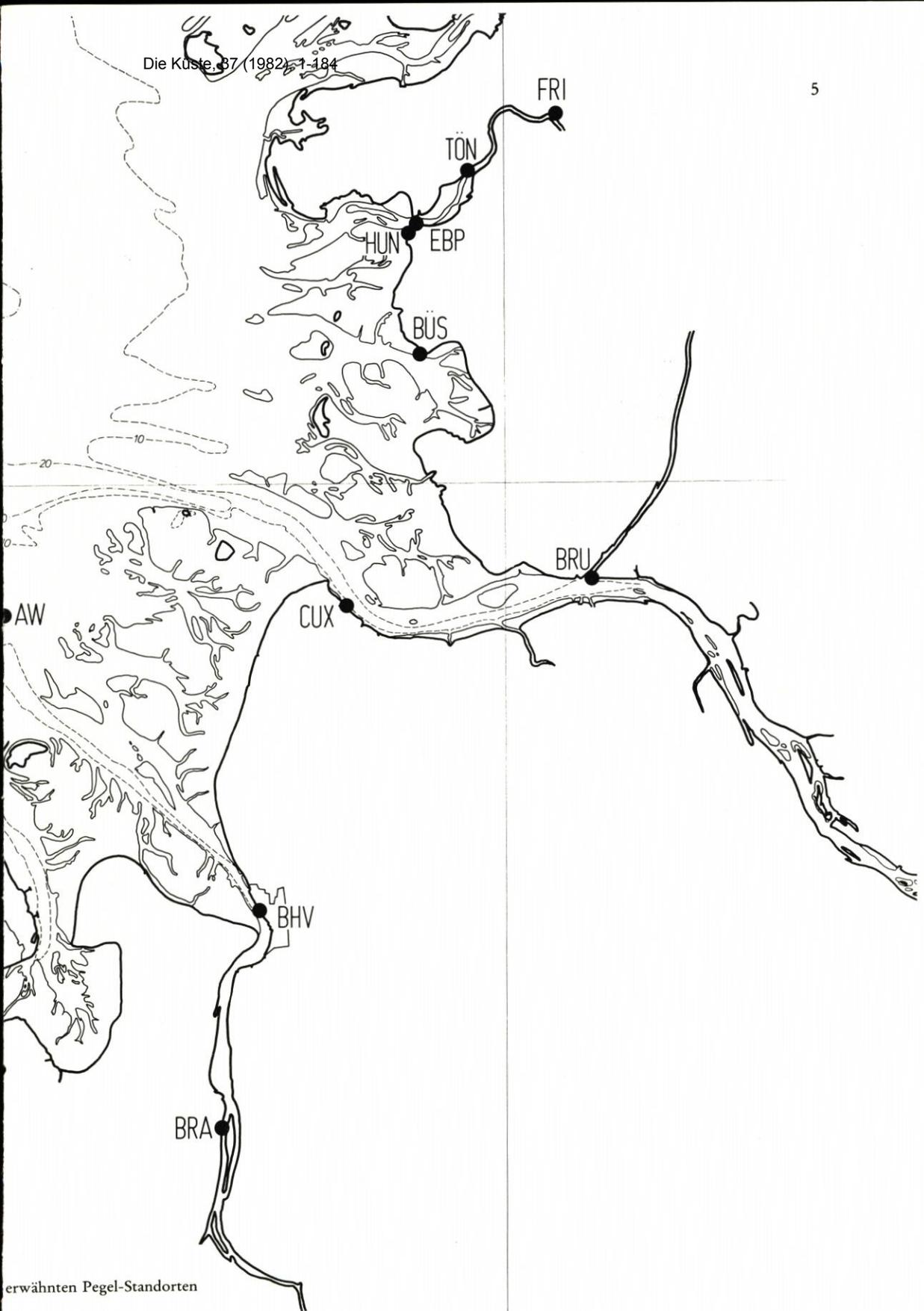


Abb. 2. Deutsche Bucht mit



erwähnten Pegel-Standorten

## 2.2 MThw, MTnw an der Küste

Mittelwerte über verschieden lange Zeiträume, bis hin zu 19jährigen, liegen von vielen Küstenpegeln veröffentlicht vor. Der dabei verfolgte Sinn besteht häufig in einer möglichst exakten Definition des „säkularen Meeresspiegelanstiegs“. Dieser wird üblicherweise aus der Entwicklung der MThw abgeleitet; die MTnw werden meist als örtlichen Einflüssen unterliegend angesehen und bei solcher Analyse zumindest dann nicht berücksichtigt, wenn sie sich anders als die MThw entwickeln. In diesem Zusammenhang taucht also der Bedarf nach der Auswahl repräsentativer Küstenpegel auf. Dafür kommen auf Abb. 2 z.B. die Standorte Borkum-Südstrand, Wilhelmshaven, Alte Weser, Cuxhaven und Büsum in Frage.

Die Entwicklung der MThw und MTnw verlief in den letzten Jahrzehnten an der Küste nicht überall gleich, aber sehr ähnlich. Das haben u. a. LIESE und LUCK (1978) festgestellt und bedarf hier keiner weiteren Erläuterung. Auf eine interessante Tendenz sei jedoch verwiesen, nämlich den Gang der MTnw-Differenzen zwischen Roter Sand/Alte Weser und Cuxhaven (Abb. 3), dargestellt an 3jährigen übergreifenden Mitteln dieses Jahrhunderts\*): Bei Schwankungen mit einer Amplitude um 5 cm ist eine Tendenz dergestalt erkennbar, daß die  $Tnw_{RS/AW}$  gegenüber den  $Tnw_{CUX}$  leicht fallen, und zwar um rd. 15 cm/100 Jahre. Die auf Abb. 3 ebenfalls dargestellten Differenzen  $Tnw_{BOR} - Tnw_{CUX}$  zeigen im Gegensatz dazu einen leichten Anstieg in Borkum.

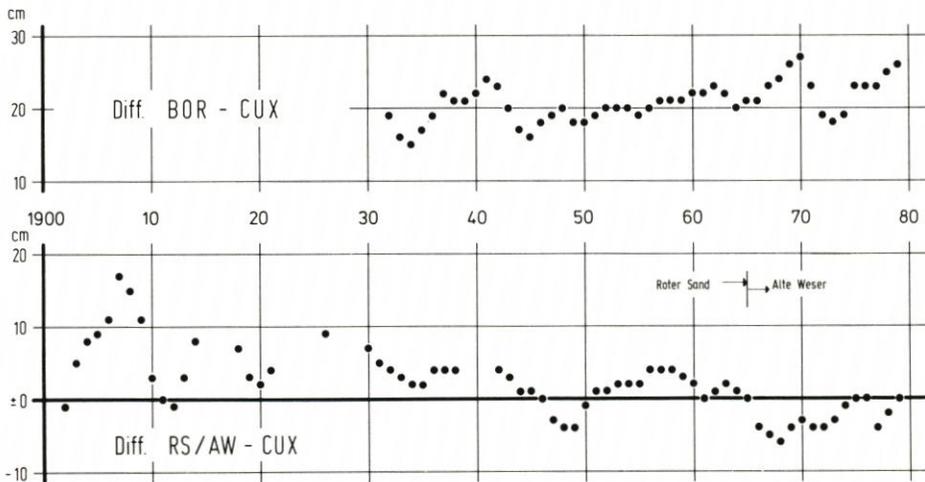


Abb. 3. MTnw-Differenzen 1900 bis 1980 (3jährig, übergreifend)

Die Entwicklung an diesen drei Pegeln (CUX etwa konstant seit 1940, RS/AW leicht fallend, BOR leicht steigend) steht nicht gut im Einklang mit dem Ergebnis von BOWEN (1972), der für die Themsemündung eine Vergrößerung des Tidehubs um rd. 5 cm/Jh. aufgrund des säkularen Meeresspiegelanstiegs vermutet. Solche Vergrößerungen zeigen sich gewöhnlich als  $Tnw$ -Absenkungen.

\*) Die Wasserstände der Pegel Roter Sand und Alte Weser wurden sämtlich umgerechnet mit den gültigen PN, nämlich 482 cm NN - 5 m (RS) und 494 bzw. 496 cm NN - 5 m (AW)

Eine bisher in diesem Zusammenhang selten verwendete, jedoch instruktive Art der Auftragung zu vergleichender Daten stellt die *Doppelsummenkurve* dar. In ihr sind die laufenden Summen

$$\sum_t (MTnw_x + MTnw_y)$$

zweier Pegel x und y enthalten. Statistisch erwartete Abweichungen dieser Ergebnisse stochastischer Prozesse führen bei den nur sehr kleinen Differenzen großer Zahlen zu nahezu exakten linearen Summenkurven, wie Abb. 4 für die Summen (BOR+RS/AW), (BOR+CUX) und (BOR+BÜS) zeigt. Wenn Abweichungen von diesen Linien langfristige oder -periodische Veränderungen zugrunde liegen, so wird dies optisch sehr leicht und exakt erkennbar, wie einige folgende Beispiele noch zeigen werden.

Geht man davon aus, daß nur solche Pegel zusammen betrachtet werden, an denen

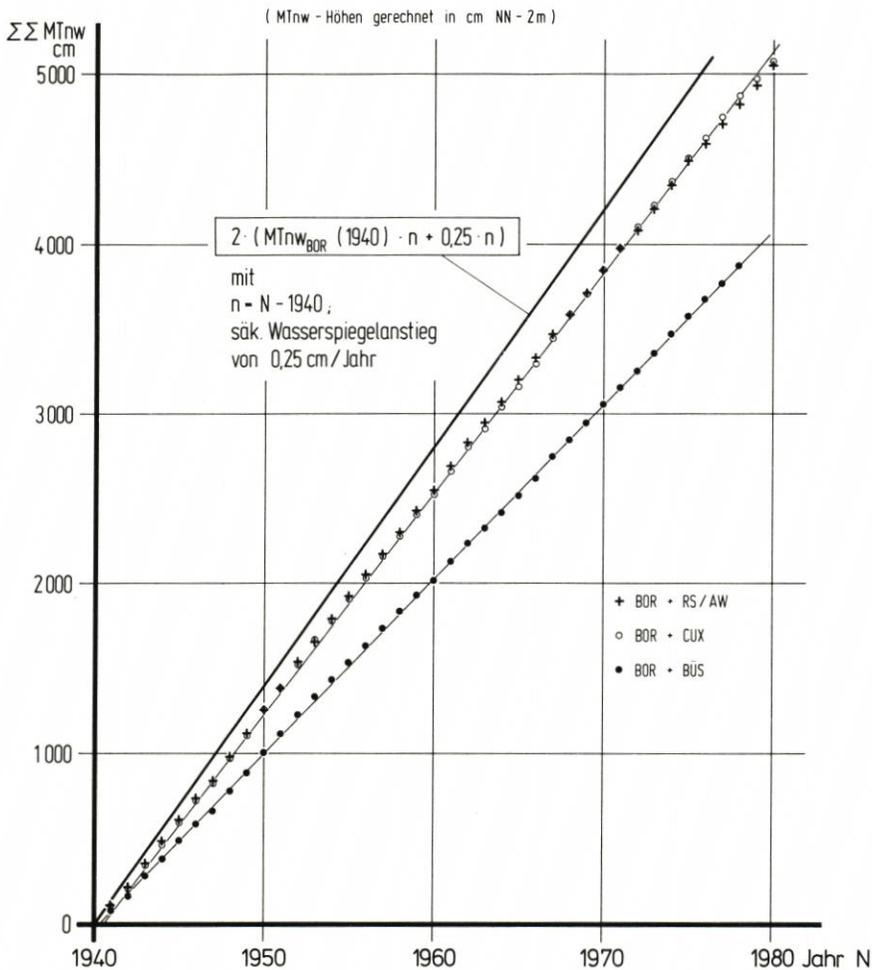


Abb. 4. MTnw-Doppelsummenkurven 1940 bis 1980 für Küstenpegel: BOR + RS/AW, BOR + CUX, BOR + BÜS

gleichsinnige Wechsel zu erwarten sind, so können Knicke in den Summenlinien immer noch auf Veränderungen an einem oder an beiden Pegeln zurückgehen. Die Stärke der individuellen Änderung kann durch Vergleiche mit dritten Pegeln festgestellt werden.

Abb. 4 enthält Doppelsummenkurven von insgesamt vier Küstenpegeln. Alle Beziehungen sind linear, diejenigen für (BOR + RS/AW) und (BOR + CUX) sogar praktisch identisch. Daraus ist nur zu schließen, daß sich die MT<sub>nw</sub> an diesen Pegeln von 1941 bis 1980 gleichmäßig verändert haben. Denn eine Linearität läßt nicht den Schluß zu, daß die Tideverhältnisse dieselben geblieben sind.

Alle drei Doppelsummenkurven liegen unter der Borkum-Kurve, deren Summenlinie als

$$2 \cdot n \cdot (MT_{nwBOR,1940} + 0,25)$$

mit  $n =$  Jahrgang minus 1940

0,25 cm = jährl. säkul. Wasserspiegelanstieg

berechnet worden ist. Die Ursache dafür sind die an den übrigen Pegeln niedriger als in Borkum abfallenden MT<sub>nw</sub>.

### 2.3 MThw, MTnw in den Flüssen

Das Tidegeschehen in einem Fluß kann betrachtet werden als Ergebnis des Zusammenwirkens verschiedener Rand- und Eigenwerte eines Systems. Randwerte treten sowohl von unter- wie von oberhalb des Tidebereiches auf. Die wichtigsten Einflußfaktoren auf den Tideablauf sind u. a. von SIEFERT (1978) zusammengestellt und erläutert.

Wenn symptomatische Veränderungen der Tideverhältnisse im Flusse auftreten, so ist zunächst zu prüfen, ob sich die Randwerte merklich geändert haben. Um dies zu untersuchen, sind auf Abb. 4 bis 7 die MThw und MTnw am unteren Rand, also an den Mündungspegeln<sup>1)</sup> Borkum (Ems), Roter Sand/Alte Weser (Weser) und Cuxhaven (Elbe) sowie teilweise Büsum, Helgoland<sup>2)</sup> und Bremerhaven aufgetragen. Für die Eider gibt es nur den Pegel Hundeknöll, dessen Daten leider nicht gleichwertig sind.

Bei den dargestellten dreijährigen übergreifenden MThw auf Abb. 5 sind gewisse, an allen Pegeln etwa gleich große Schwankungen festzustellen, die – da sie auch am Pegel HEL auftreten – als Variationen der MThw aufgrund von Einflüssen aus der Nordsee zu deuten sind. Fast identische MThw-Veränderungen in Bremerhaven weisen ferner darauf hin, daß diese als untere Randwerte in die Flüsse eindringen und nicht etwa Ausdruck von Schwankungen im Oberwasserabfluß sind, zumal sie dann in Bremerhaven z. B. deutlichere Variationen der MThw als in RS/AW erzeugt hätten. Außerdem zeigt ein Vergleich der MThw-Schwankungen an der Seegrenze mit den Q<sub>0</sub>-Schwankungen auf späteren Abbildungen, daß beide keineswegs phasengleich oder -verschoben verlaufen.

Verwendet man dagegen 10jährige Mittel wie auf Abb. 6 oder gar die zur Glättung aller astronomisch bedingten Ungleichheiten (einschl. des Saros-Zyklus von 18 Jahren, 11 Tagen) herangezogenen 19jährigen Mittel, so verbleiben für die unteren Randwertpegel nur mehr die bekannten säkularen Veränderungen, über die anderen Ortes vielfach berichtet worden ist.

Die MTnw-Entwicklung an den oben zitierten Pegeln sieht etwas anders aus (Abb. 7): In

<sup>1)</sup> Die aufgeführten Pegel sind als Mündungspegel *gewählt* worden; ob sie tatsächlich nur die unteren Randwerte und keine flußspezifischen Eigenschaften enthalten, müßte Gegenstand einer detaillierten Untersuchung werden.

<sup>2)</sup> Höhenbezogen auf „Helgoländer Null“; durchgehende Registrierungen ab 1953.

cm NN-5m

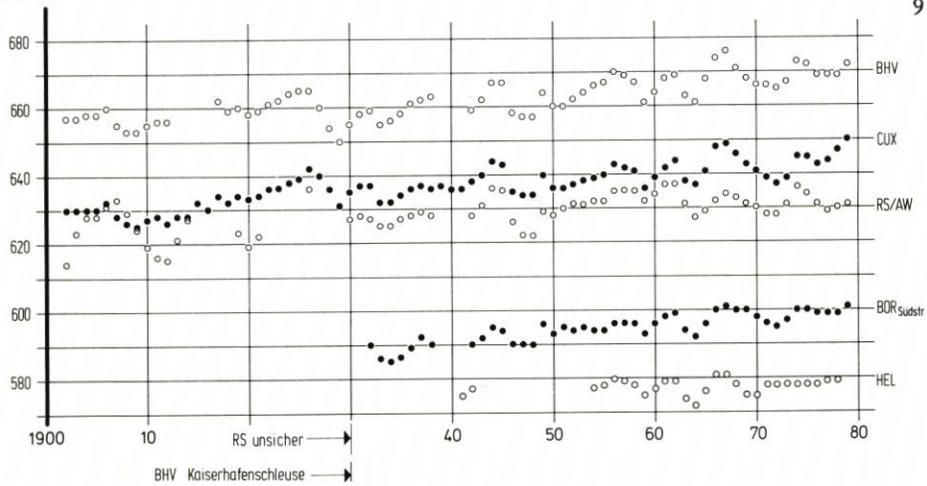


Abb. 5. MThw 1900 bis 1980 für ausgewählte Pegel (3jährig, übergreifend)

cm NN-5m

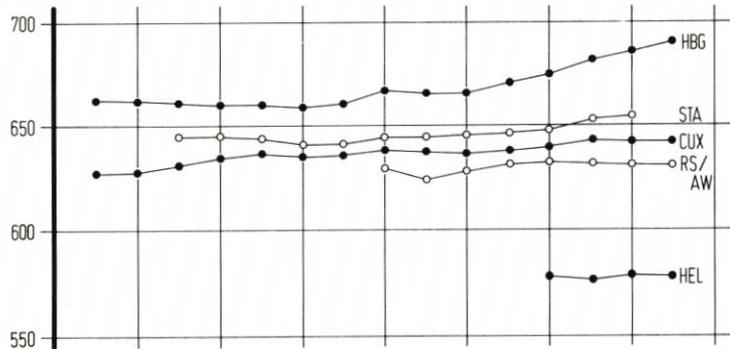
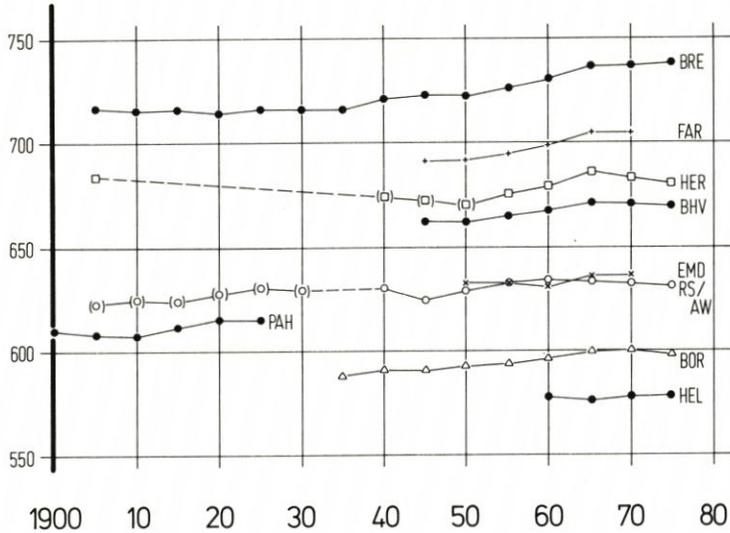


Abb. 6. MThw 1900 bis 1980 für Ems, Weser, Eider (oben), Elbe (unten) und Helgoland (10jährig, übergreifend)

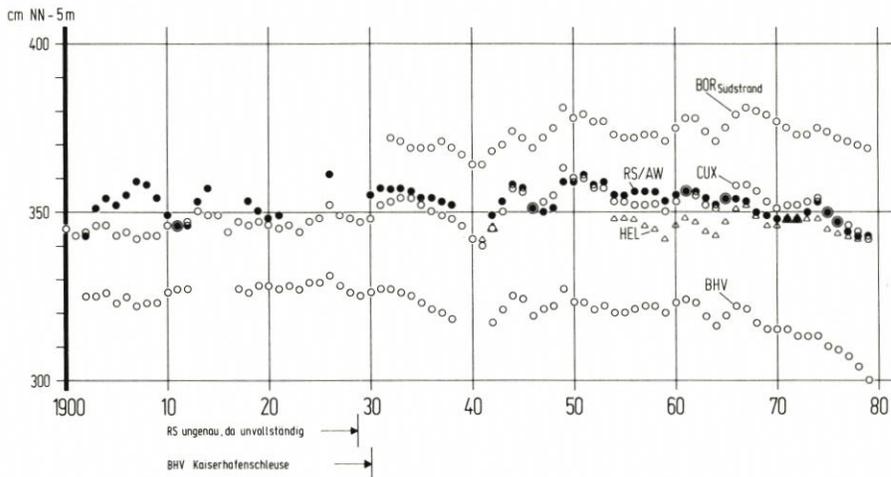


Abb. 7. MTnw 1900 bis 1980 für ausgewählte Pegel (3jährig, übergreifend)

den letzten 30 bis 40 Jahren sind die MTnw in BOR und HEL – mit den bereits diskutierten Schwankungen bei 3jährigen Mitteln – etwa horizontal verlaufen, in RS/AW und CUX dagegen schwach abgefallen. Dazu etwa parallel verlief zunächst die Ganglinie für BHV, bis sie vor rd. 10 Jahren stärker nach unten abbog. Da diese Tendenz an den „Mündungspegeln“ nicht bzw. kaum auftritt, muß davon ausgegangen werden, daß sie in BHV bereits flußspezifischer Art ist.

Wenn deutliche Trendänderungen in der zeitlichen Entwicklung der Tidescheitelwasserstände in den Flüssen festzustellen sind, dann können sie ihre Ursache im Fluß selber durch Veränderung der Eigenwerte haben. Es ist aber auch denkbar, daß sich die unteren Randwerte geändert haben, etwa in der Weise, daß dort ggf. die Strömungsverhältnisse oder die *Tidekurve*, nicht aber die kommentierten mittleren *Scheitelwerte* betroffen sind.

Bei der Analyse von Daten in Tideflüssen muß natürlich auch der obere Randwert berücksichtigt werden: Je weiter stromauf der Beobachtungsort liegt, desto stärker wird die dortige Tide durch den Oberwasserabfluß und natürlich durch den Zustand des Flußbettes beeinträchtigt. Dabei wiederum unterliegen die Thw dem  $Q_0$ -Einfluß in deutlich geringerem Maße als die Tnw:

Pegel	Zeitreihe	Abstand von der oberen Tidegrenze km	MThw-Schwankungen <sup>1)</sup> cm	MTnw-Schwankungen <sup>1)</sup> cm
HER/Ems	1944/76	0,5 bis 1,5 <sup>2)</sup>	30	70
BRE/Weser	1946/78	4,0	20	50
ELB/Elbe	1961/76	4,1	70	130

<sup>1)</sup> Auf der Basis von 3jährigen Mitteln      <sup>2)</sup> Bedingt durch Verlegung des Wehres

Gelingt es heute auch kaum, die Randwerteeinflüsse mathematisch oder visuell festzustellen, und betrachtet man einmal einen Flußabschnitt, der von den Schwankungen vermeintlich

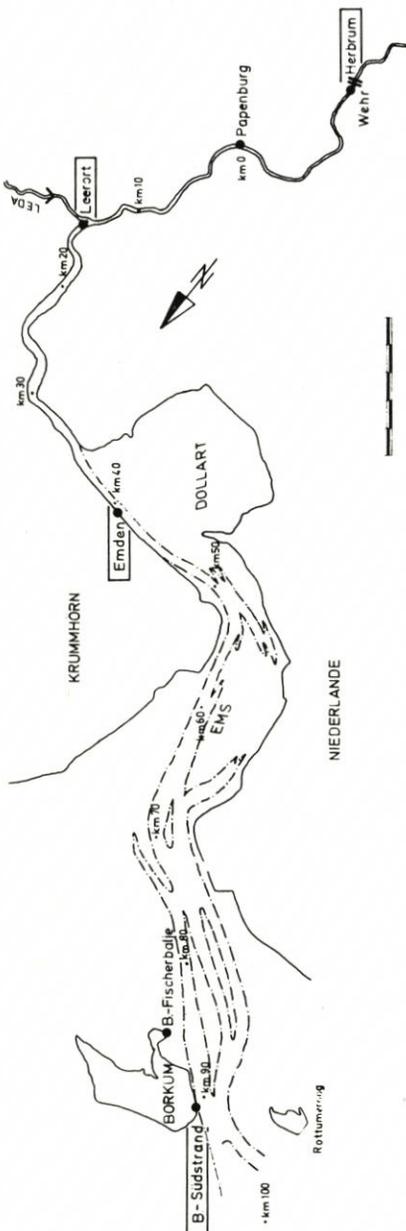


Abb. 8. Lageplan der Ems

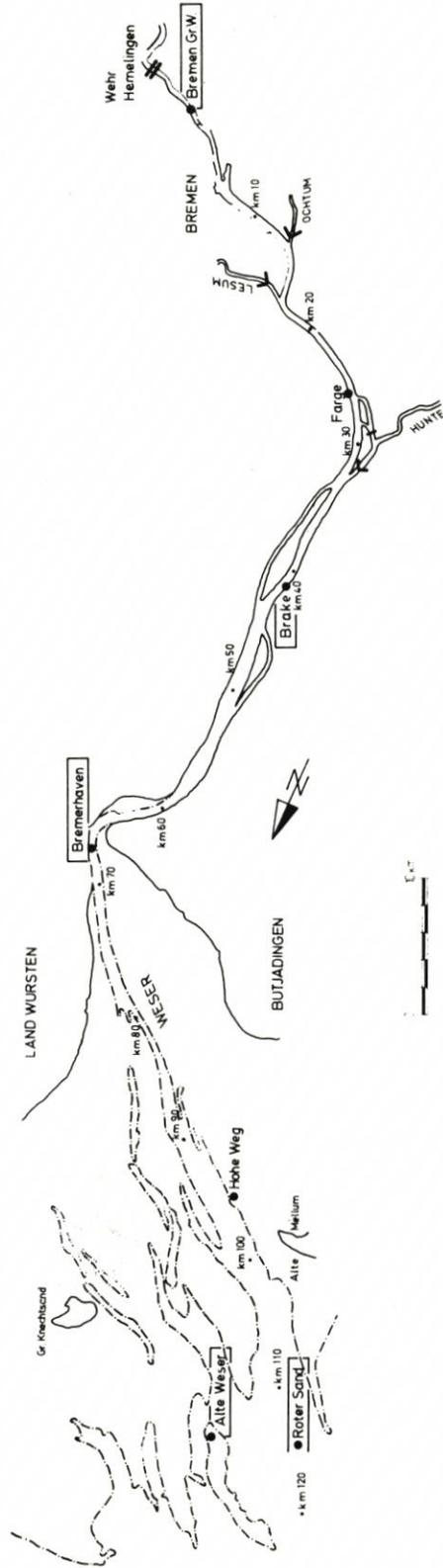
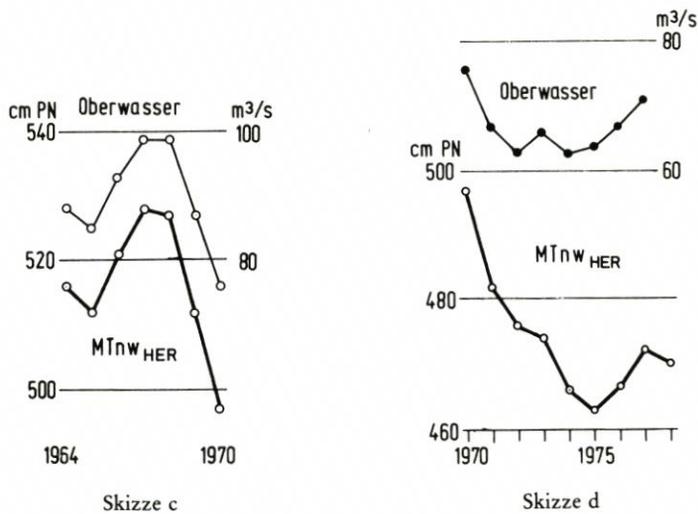
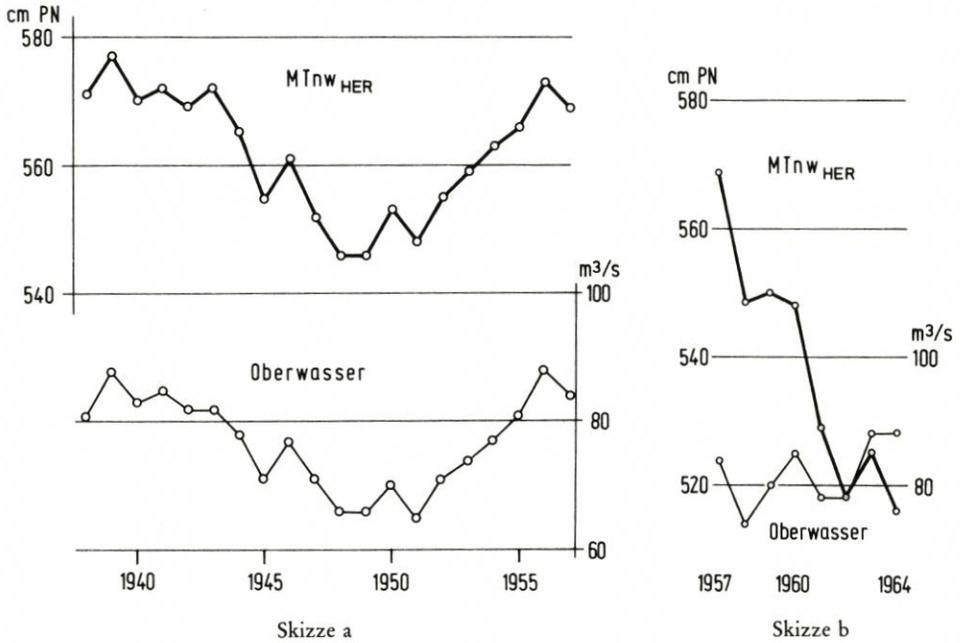


Abb. 9. Lageplan der Weser

relativ gering beeinflusst wird, so verbleiben einige interessante Beispiele für Veränderungen, die einer Klärung bedürfen:

Die Entwicklungen in der oberen Tideeems demonstriert die MTnw-Ganglinie am Pegel Herbrum (Abb. 8), wie sie im folgenden kurz in einigen Skizzen anhand von 5jährigen übergreifenden Mitteln vorgestellt wird:



**Skizze a** zeigt, daß sich die MTnw am Pegel Herbrum von 1938 bis 1957 in vollkommener Weise jeweils linear mit den Oberwasserabflüssen bei Versen verändern. In diese Zeit fallen der Ausbau des Fahrwassers von See bis Emden auf 7 m KN, die Abnahme der Tiefen während des

Krieges und deren Wiederherstellung bis 1950, ferner Flußregulierungen zwischen Herbrum und Papenburg (ab 1950) und der Ausbau der Unteren Ems (ebenfalls ab 1950).

Der Abschnitt der Jahre 1957 bis 1964 in **Skizze b** zeigt, daß ab 1958 das  $MT_{nW_{HER}}$  um (vom  $Q_0$ -Einfluß bereinigte) rd. 55 cm absinkt. Als Ursachen kämen mindestens in Frage: Regulierungen von Herbrum bis Papenburg (bis 1963), Ausbau der Unteren Ems einschl. neuem Wehr Herbrum (bis 1960) oder Vertiefung unterhalb von Emden (seit 1958). Man ist bisher jedoch nicht in der Lage, Ursachen und Wirkungen einander zuzuordnen.

Die  $MT_{nW}$  in Borkum und Emden bleiben in dieser Zeit konstant. Die Vertiefungsarbeiten unterhalb von Emden waren 1964 noch nicht abgeschlossen.

Während der fortschreitenden Arbeiten stellt sich ab 1964 bis 1970 ein „Gleichgewichtszustand“ ein, in dem das  $MT_{nW_{HER}}$  sich wieder gleichmäßig mit  $Q_0$  ändert (**Skizze c**). Eine ähnliche Entwicklung hatte auch schon in der Weser (etwa ab 1932 in Bremen) stattgefunden (Abb. 9 und 10).

Dieser „Gleichgewichtszustand“ in der Ems ändert sich nach 1970 (**Skizze d**): Das  $MT_{nW_{HER}}$  sinkt innerhalb von nur 4 Jahren um weitere (bereinigte) 25 cm ab! Ein direkter Bezug zu Baumaßnahmen scheint zu fehlen.

Es gelingt nicht, die Veränderung der Scheitelwasserstände im oberen Tidebereich mit einer Veränderung der Eigenwerte des Flusses zu erklären. Möglich sind also selbst hier noch Einflüsse vom unteren Rand, wenn man Auswertefehler ausschließt. Das Erstaunliche ist nämlich, daß die seit 1970 in der Ems zu beobachtende Entwicklung in ähnlicher Form auch in Weser und Elbe eintritt: Abb. 11 zeigt dies als zeitgleiche Knicke in den 5jährigen Mitteln ab 1966/70. Bei den 3jährigen Mitteln auf Abb. 12 kommen die Veränderungen differenzierter zum Ausdruck:

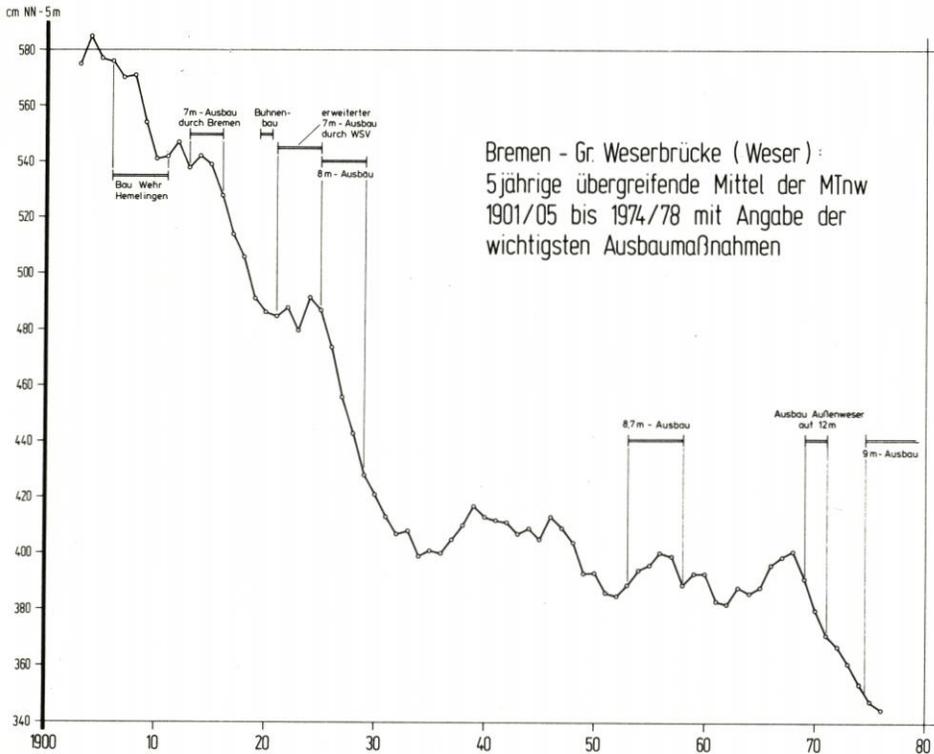


Abb. 10.  $MT_{nW}$  1900 bis 1980 für Bremen (5jährig, übergreifend) mit Angabe der wichtigsten Weser-Ausbaumaßnahmen

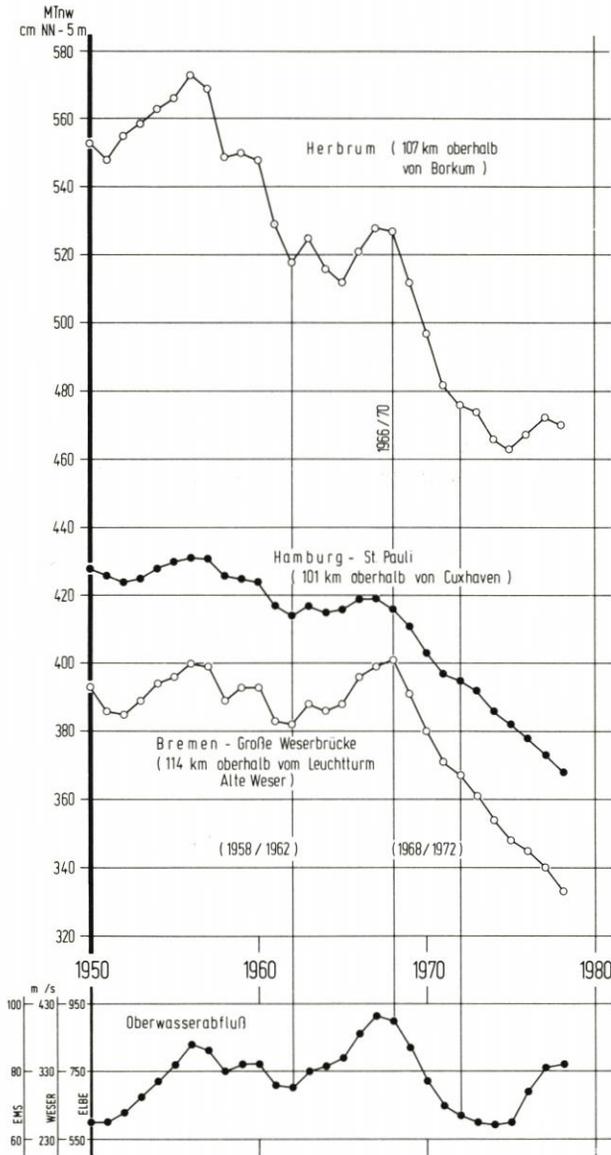


Abb. 11. MTnw und  $Q_o$ -Abfluß 1950 bis 1980 für HER, HBG und BRE (5jährig, übergreifend): Markant ist der Knick nach 1968

Die MTnw ab 1900 an den Pegeln HER, BRE und HBG (Abb. 13) zeigen deutlich drei Tendenzen, und zwar

- eine generelle Abnahme der Höhen,
- eine Zunahme der quasi-periodischen, durch den Oberwasserabfluß hervorgerufenen Schwankungsbreite,
- ein fast gleichzeitiges Absacken der Höhen unter die untere (willkürliche) Variationsgrenze ab 1971.

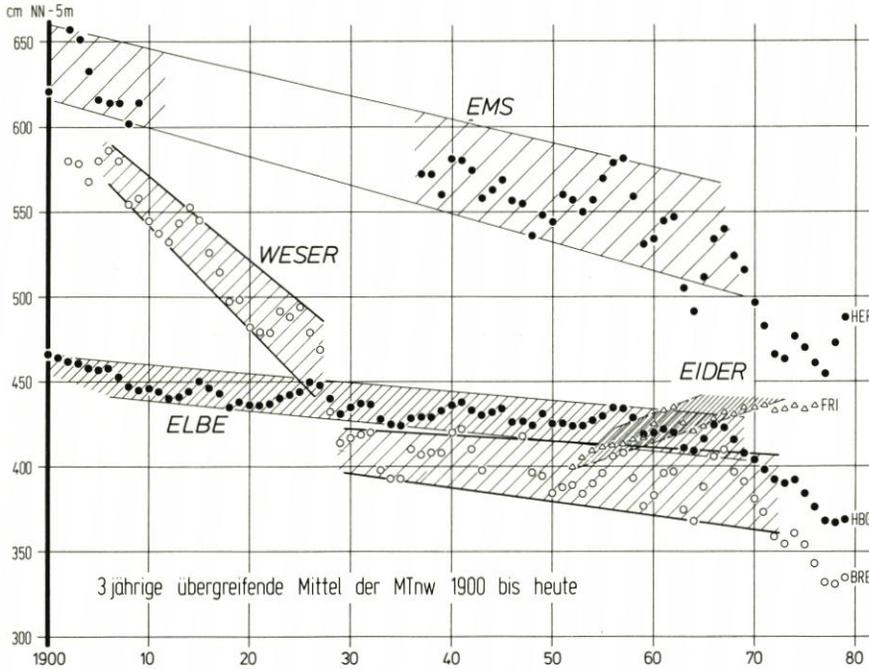


Abb. 12. MTnw 1900 bis 1980 für HER, BRE, HBG und FRI (3jährig, übergreifend): Die Werte fallen etwa ab 1971 unter die untere Variationsgrenze

Das bedeutet also, daß im Oberlauf dieser Flüsse die Tnw nicht nur niedriger geworden sind, sondern auch empfindlicher auf  $Q_o$ -Veränderungen reagieren. Das Unterschreiten des Variationsbandes findet gleichzeitig auch in der Eider (Abb. 12 und 14) statt, wo die Tnw am Pegel FRI nicht länger ansteigen, und zwar schon vor Fertigstellung des zweiten Sperrwerkes!

Die Ganglinien dieser vier Pegel zeigen für die MTnw-Mittel folgende Tendenz:

Pegel	Letztes Mittel im Variationsband (Abb. 12)	Tendenz*) der Unterschreitung cm/Jahr
HER/Ems	1969/71	4,0
BRE/Weser	1970/72	5,0
HBG/Elbe	1968/70	3,5
FRI/Eider	1970/72	2,0

\*) Für die ersten 5 Dreijahresmittel

Wenn es zutrifft, daß auch diese Anomalien zu einer weiteren  $Q_o$ -Empfindlichkeit beitragen, ist noch in den nächsten Jahren mit fortgesetzten Tnw-Absenkungen zu rechnen, da wir in den letzten Jahren sogar relativ hohe Oberwasserabflüsse hatten. Diese Tatsache allein hat wohl zu einem erneuten Anstieg der  $MTnw_{HER}$  geführt, der aber nur kurzzeitig sein dürfte.

In diesem Zusammenhang sei die Bemerkung erlaubt, daß hier die Anomalien über drei- und fünfjährige Mittel herausgearbeitet wurden, daß es aber einer Untersuchung wert wäre

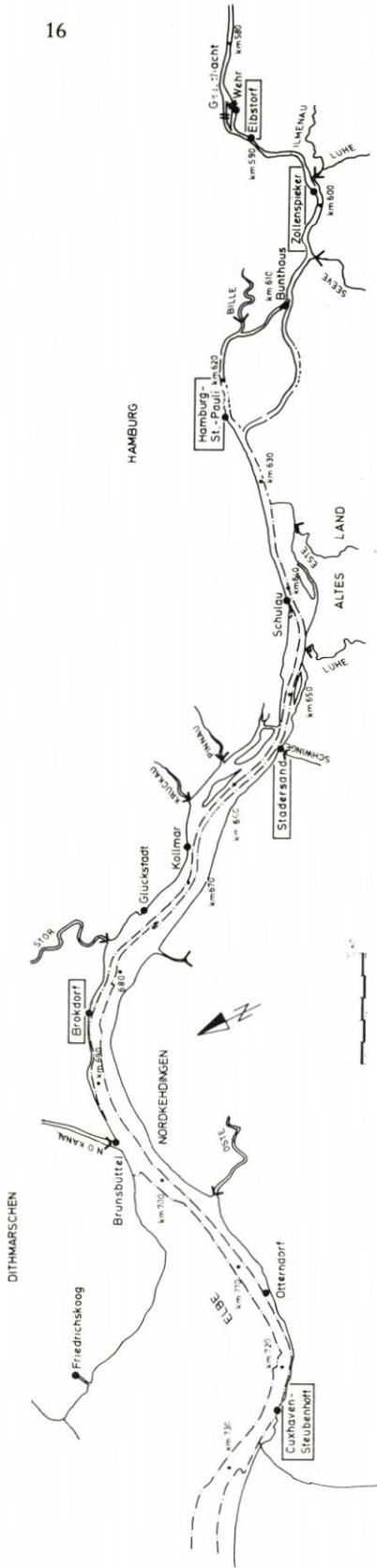


Abb. 13. Lageplan der Elbe

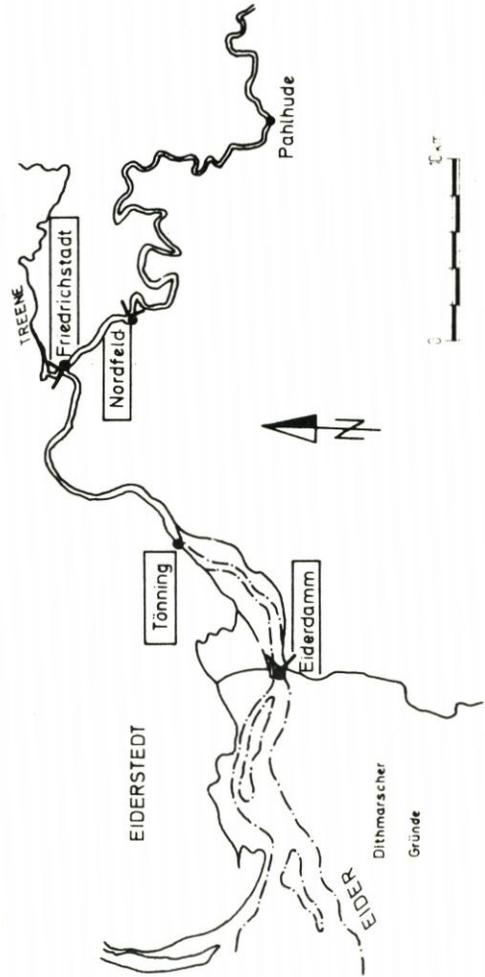


Abb. 14. Lageplan der Eider

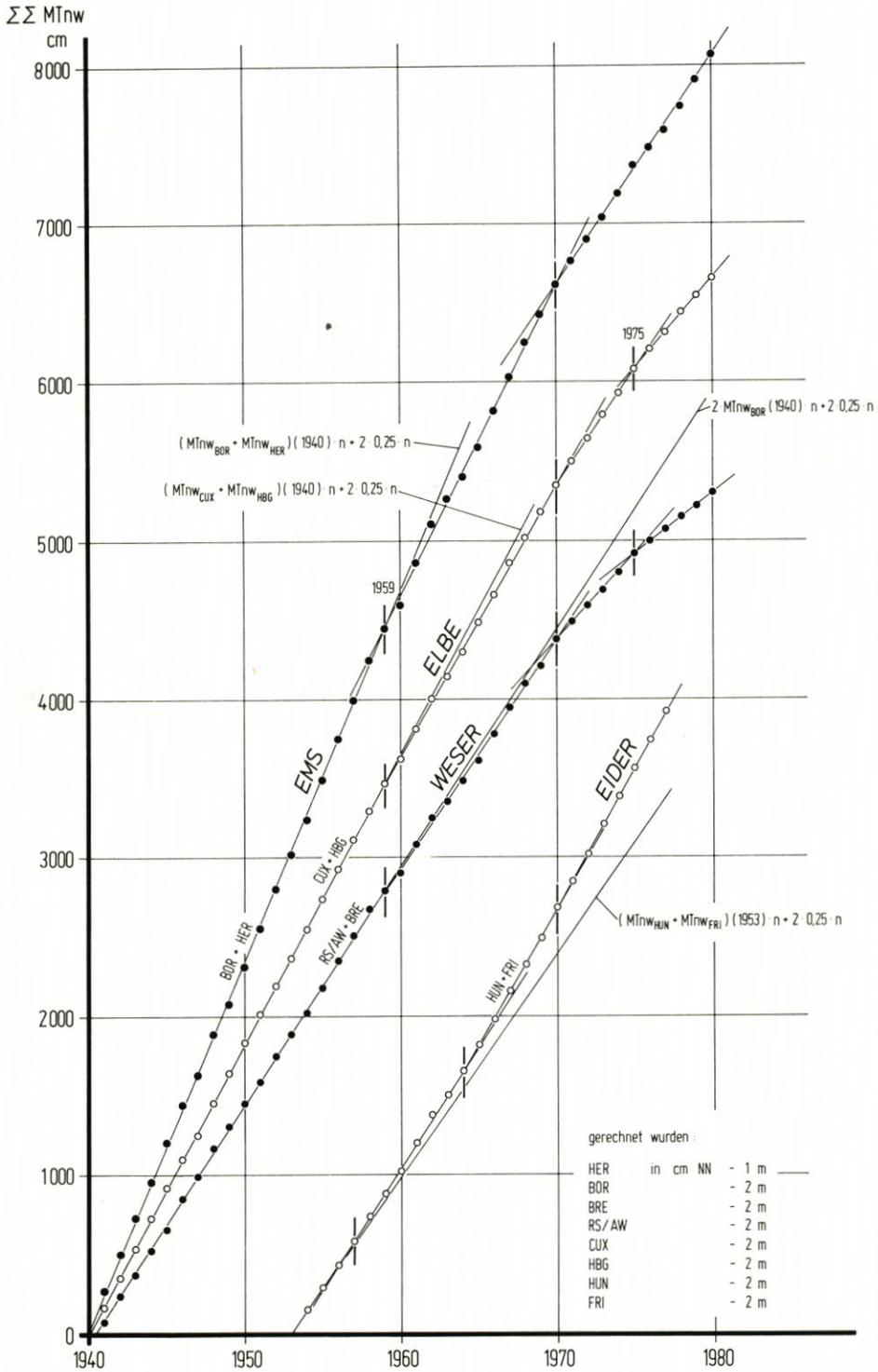


Abb. 15. MTnw-Doppelsummenkurven 1940 bis 1980 für die Ästuar: gleichzeitige Knick in 1959, 1970 und 1975

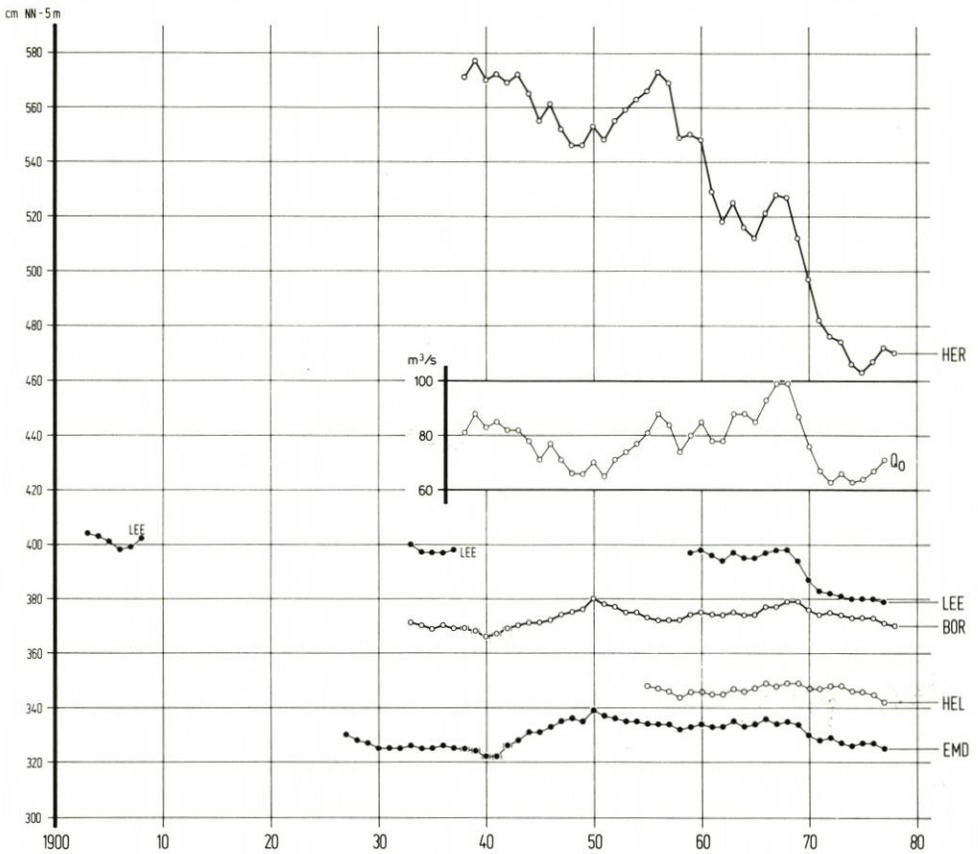


Abb. 16. MTnw 1900 bis 1980 für die Ems (5jährig, übergreifend): Nach 1970 fallen die Werte von Herbrum bis Emden trotz gleichbleibenden Oberwasserabflusses

festzustellen, über welche Zeiträume am sinnvollsten zu mitteln wäre, um die deutlichsten Aussagen zu erhalten.

Eine andere Betrachtungsweise als Abb. 12 erlauben die Doppelsummenkurven auf Abb. 15. Sie bestehen für die vier diskutierten Tideflüsse aus Linienzügen mit charakteristischen Knicken. Da Abb. 4 für die Mündungspegel BOR, RS/AW und CUX keine Knicke zeigt, ist davon auszugehen, daß die Knicke in den Summenkurven (BOR + HER), (RS/AW + BRE), (CUX + HBG) und auch (HUN + FRI) auf Veränderungen an den Flußpegeln HER, BRE, HBG und FRI zurückgehen:

Pegel	Letzter Jahrgang vor Beginn eines charakteristischen Knicks in der Doppelsumme				
HER/Ems	-	1959	-	1970	-
BRE/Weser	-	1959	-	1970	1975
HBG/Elbe	-	1959	-	1970	1975
FRI/Eider	1957	-	1964	1970	-

Interessant sind dabei die Jahrgänge 1959 und 1970, die (teilweise bis auf die Eider) zeitgleiche Knicke in den Tnw-Summen zeigen. Diese einfach auf Ausbaumaßnahmen zurückzuführen, wäre sicherlich oberflächlich. Die Zeitgleichheit kann ebenso auf Einflüsse von außerhalb der Flußmündungen hindeuten. Dasselbe mag für die Knicke ab 1975 in Weser und Elbe gelten.

Über die Veränderungen in der Weser (Abb. 9) schreiben STRÖHMER und WANDER (1979) anhand von Betrachtungen der Differenzhöhen einzelner Pegel zum „Eingangspegel“ Bremerhaven für die Zeit von 1961 bis 1975: „Der Ausbau der Neustädter Häfen 1961/63 führte zu einer Tnw-Hebung unterhalb, während die Schaffung neuer Reedeflächen bei Bremerhaven 1967/68 durch Abbau einer Reflexionsstelle das Einlaufen der Tidewelle erleichterte, was zu

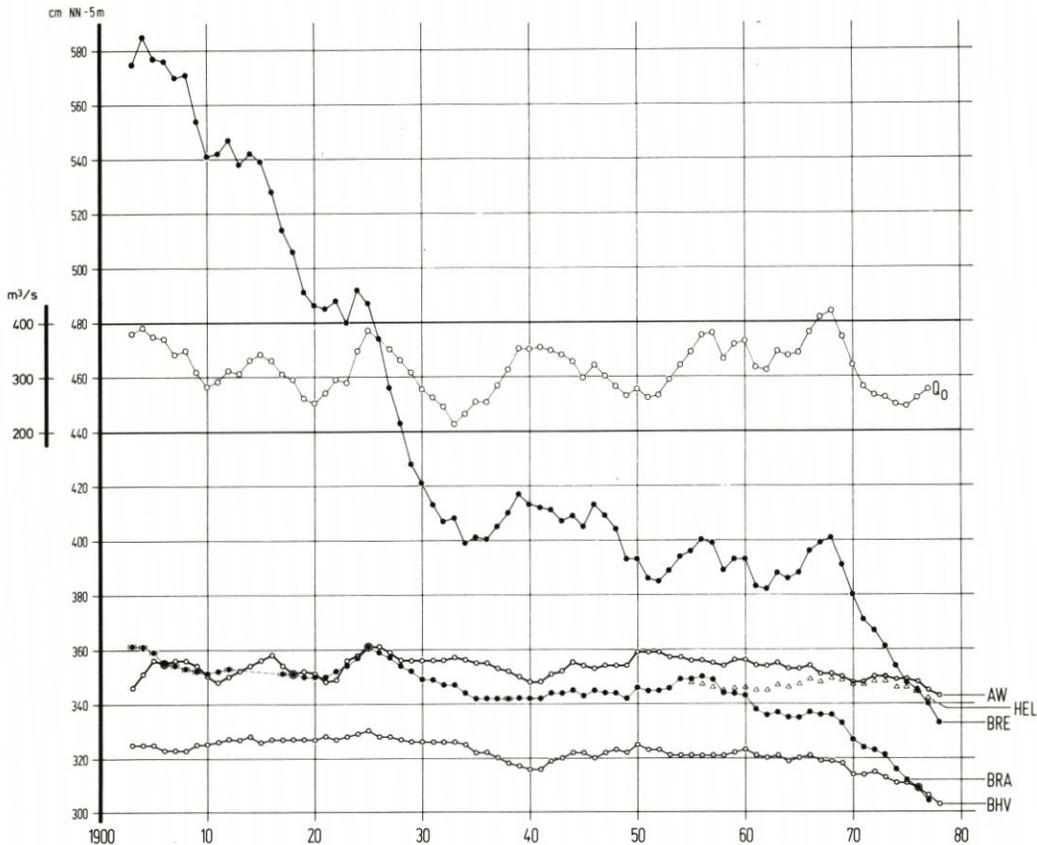


Abb. 17. MTnw 1900 bis 1980 für die Weser (5jährig, übergreifend): Nach 1970 fallen die Werte von Bremen bis Bremerhaven trotz gleichbleibenden Oberwasserabflusses

größerem Tidehub oberhalb führte.“ Ab 1975 stellten die Autoren dann oberhalb von Nordenham deutliche Thw-Erhöhungen und Tnw-Absenkungen fest.

Über die Absenkung des Tnw in der Elbe (Abb. 13) schreibt LAUCHT (1980): „Vorläufig ist festzustellen, daß die Tnw-Jahresmittel in Hamburg seit der ersten Hälfte der 50er Jahre bis jetzt um etwa 5 dm abgesunken sind. Wie groß das Absenkungsmaß im Hamburger Bereich tatsächlich und endgültig sein wird, läßt sich noch nicht sagen.“ Er führt zwei Gründe an: daß

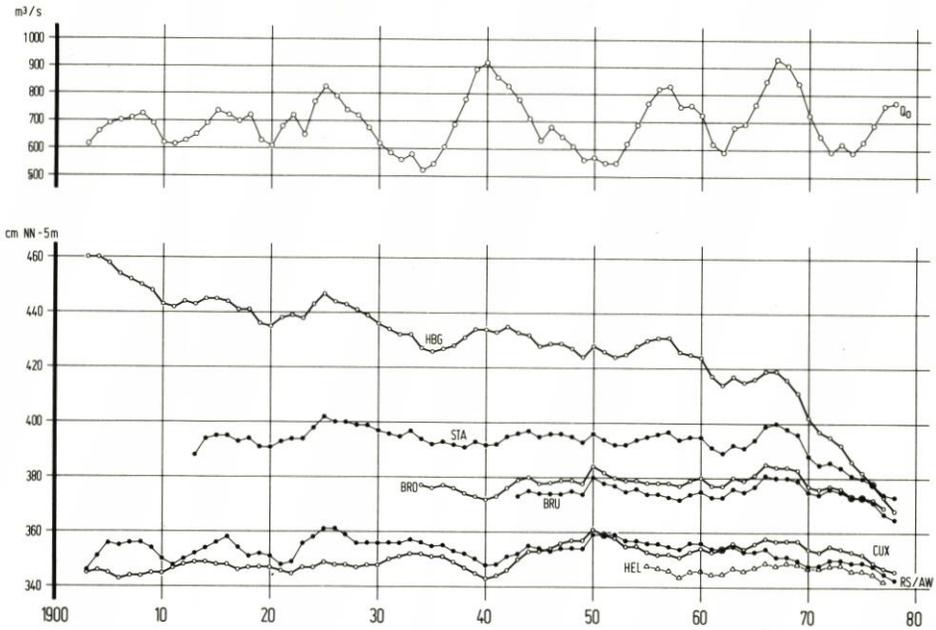


Abb. 18. MTnw 1900 bis 1980 für die Elbe (5jährig, übergreifend): Nach 1970 fallen die Werte von Hamburg bis Brunsbüttel bzw. sogar bis Cuxhaven trotz gleichbleibenden Oberwasserabflusses

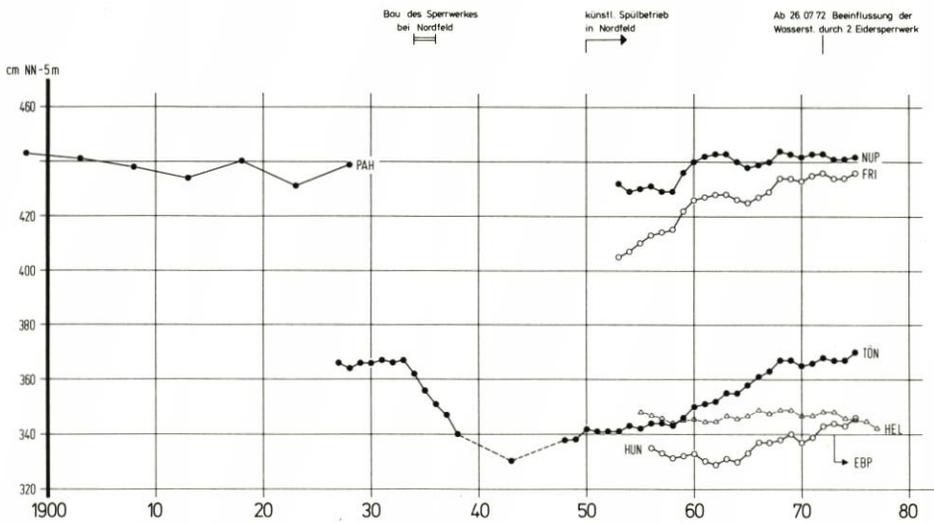


Abb. 19. MTnw 1900 bis 1980 für die Eider (5jährig, übergreifend): Noch vor Beginn der Beeinflussung durch das 2. Sperrwerk steigen die Werte von Nordfeld bis Tönning nicht weiter an

sich die Verhältnisse noch nicht vollkommen auf die 13,5 m-Vertiefung (etwa 1978 abgeschlossen) eingestellt haben und daß man mehr als ein einzelnes Jahresmittel zur Beurteilung benötigt, denn „es handelt sich bei jeder Veränderung der Tidewelle um zahlreiche nicht linear wirkende Faktoren“.

Welchen Veränderungen die MTnw in den drei größten deutschen Tideflüssen unterlagen, zeigen Abb. 16 bis 18. Dabei wird auf Abb. 16 deutlich, daß der für Herbrum nach 1968 (d. h. dem Fünfjahresmittel 1966/70) nachgewiesene Knick nach unterstrom bis Emden erkennbar ist. Ein Knick gleicher Größenordnung ist in der Weser (Abb. 17) zur selben Zeit von Bremen bis Bremerhaven auszumachen, und in der Elbe (Abb. 18) ist die zeitgleiche Entwicklung von Hamburg bis Brunsbüttel – mit einer gewissen Einschränkung sogar bis Cuxhaven – vorhanden. Selbst in der Eider, die bis 1970 ständig steigende MTnw aufwies, taucht dieser Knick in den Ganglinien auf, und zwar gleichsinnig und vor einer möglichen Beeinflussung durch das zweite Sturmflutsperrwerk (Abb. 19).

Bei einer umfassenden Untersuchung müßten die gleichzeitigen Veränderungen der Tnw- und Thw-„Laufzeiten“ in den Tideflüssen ebenfalls analysiert werden. Sie sind schon früher diskutiert worden (SIEFERT, 1978), so daß hier der eingangs gegebene Hinweis wiederholt sein mag, daß die Beurteilung allein von Tnw- und Thw-Höhen nur zum Teil Aufschluß über die Tideverhältnisse gibt. Befriedigende Lösungen wären erst bei Deutungen des Wasserstands wie des Strömungsverlaufes möglich.

#### 2.4 Spring- und Nippanomalien in der Elbe

Es gibt kaum Untersuchungen über Spring- und Nipptiden in den deutschen Tideflüssen. Einige zitierte Arbeiten und sporadische eigene Auswertungen können allenfalls zeigen, wie notwendig es ist, hier weiter tätig zu werden.

In seiner Arbeit, die dann Grundlage aller Tidevorausberechnungen für die Deutsche Bucht wurde, hat LENTZ (1879) sich auch mit astronomisch bedingten Thw- und Tnw-Variationen in der Elbe beschäftigt und ist dabei u. a. zu folgenden Ergebnissen gekommen: In Cuxhaven dauert die Flut 5.25 h bei Spring- und 5.49 h bei Nippzeit. Die halbmonatliche Ungleichheit betrug dort rd. 0,5 m beim Thw und rd. 0,4 m beim Tnw. LENTZ beschrieb gleichzeitig aber auch das Phänomen, daß – im Gegensatz zur allgemeinen Erwartung – in Hamburg die NpThw höher als die SpThw und die NpTnw niedriger als die SpTnw aufliefen.

SCHULTZE (1935) stellte bei ausführlichen statistischen Untersuchungen für die Zeit 1920/30 fest, daß in der Elbe die SpThw höher als die NpThw, die SpTnw etwa gleichhoch wie die NpTnw aufliefen.

HENSEN (1955) erwähnt zu demselben Thema lediglich die größeren Wasserspiegelgefälle der Spring- gegenüber den Nipptiden, woraus zu schließen ist, daß seinerzeit in der Elbe bereits zu beiden Mondphasen analoge Verhältnisse zu Cuxhaven herrschten.

Die neuere Entwicklung der Spring- und Nipptidewasserstände in der Elbe kann hier bisher nur nach unvollständigen Auswertungen für den Pegel Hamburg-St. Pauli skizziert werden. Dazu wurde folgendermaßen vorgegangen: Von 1941 bis 1979 wurden aus jedem Juni – dem erfahrungsgemäß sehr wenig durch Wind und Oberwasser beeinflussten Monat – zwei Spring- und Nippzeiträume ausgewertet, und zwar entsprechend den Definitionen in den Gezeitentafeln. Es wurden jeweils 6 Thw und 6 Tnw gemittelt, die ab dem astronomischen Spring- bzw. Nippdatum in den nächsten drei Tagen auftraten. Bei dieser vorläufigen Auswertung wurden diese Junimittel zunächst als repräsentativ für das jeweilige Jahr angenommen. Abb. 20 zeigt die Ganglinien der 5jährigen übergreifenden Mittel dieser Juniwerte für Hamburg-St. Pauli, dazu die 5jährigen mittleren Wasserstände (als echte Jahresmittel). Um die bei Auswertung nur von Junidaten möglichen Schwankungen auszugleichen, wurden zuvor in einem weiteren Auswertegang die Spring- und Nippwerte des Juni auf das Jahr beschickt über die Differenzen

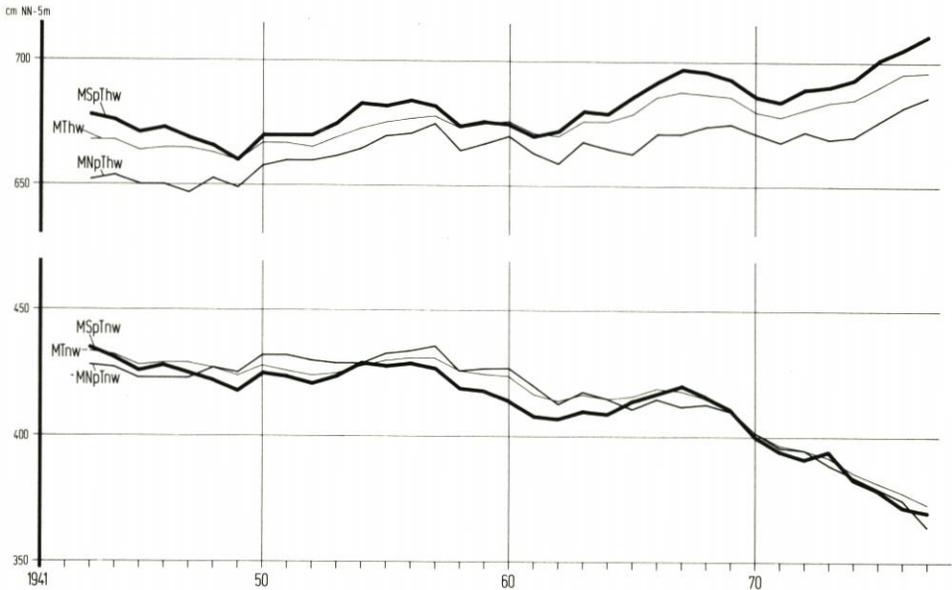


Abb. 20. Spring- und Nipp-Thw und -Tnw 1941 bis 1980 für Hamburg (5jährig, übergreifend; Junimittel besichtigt auf Jahreswerte): Spring- und Nippscheitel haben sich unterschiedlich verändert

$$MThw_{\text{Jahr}} - MThw_{\text{Juni}} = SpThw_{\text{Jahr}} - SpThw_{\text{Juni}}$$

und entsprechend dann auch die Tnw- und die Nippwerte. Auf Abb. 20 ergibt sich das interessante Resultat, daß sich in den letzten vier Jahrzehnten die Spring- und die Nipp tidewasserstände nicht gleich verändert haben:

- MSpThw schwankte bis Mitte der 1960er Jahre um 675 cm PN und stieg danach in 10 Jahren um 20 cm an;
- MNpThw stieg bis Mitte der 1950er Jahre um 20 cm auf 670 cm PN an und blieb seitdem etwa konstant, so daß es heute rd. 25 cm tiefer als das MSpThw liegt;

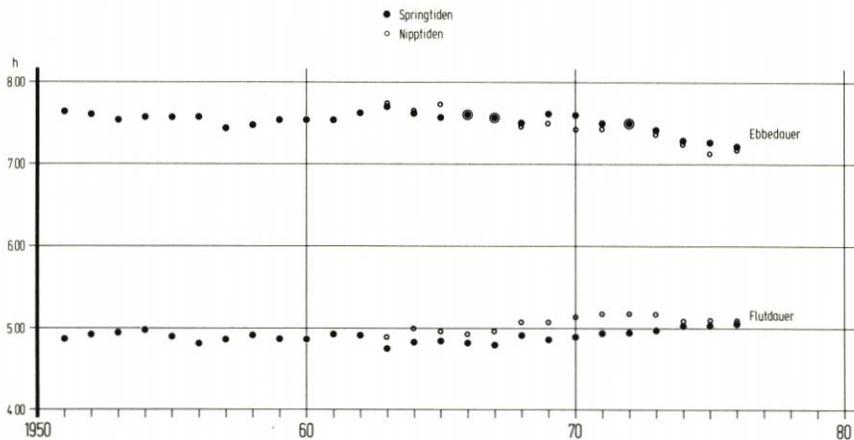


Abb. 21. Flut- und Ebbedauer bei Spring- und Nipptiden 1950 bis 1980 für Hamburg (5jährig, übergreifend): Die Ebbedauer wird nach 1970 kürzer

- MSpTnw scheint in den 1940er Jahren noch etwas über dem MNpTnw gelegen zu haben, blieb dann bis Mitte der 1950er Jahre etwa konstant auf 425 cm PN und fiel seitdem in 2 Wellen zunächst auf 410 und dann auf 370 cm PN ab;
- MNpTnw lag bis Ende der 1950er Jahre etwa bei 430 cm PN und fiel dann zunächst langsam und etwa ab 1970 genauso schnell wie das MSpTnw ab. Seitdem zeigen sich keine Unterschiede mehr zwischen MSpTnw und MNpTnw.

Eine entsprechend, wenn auch nicht ganz so umfangreich, für die Flut- und Ebbedauer in Hamburg durchgeführte Analyse zeigt auf Abb. 21, daß die Flutdauer bei Springtiden in den letzten Jahrzehnten stets etwa 10 Min. kürzer war als diejenige bei Nipptiden. Beider Dauer hat in den letzten Jahren leicht zugenommen, wohl als Folge des vergrößerten Tidehubs. Die Ebbedauer war bei Spring- und Nipptiden stets etwa gleich, hat aber in den letzten Jahren deutlich (um etwa 20 Min.) abgenommen.

Insgesamt verbleibt – trotz der Vorbehalte bei dem Stand der bisherigen Auswertung – der Eindruck, daß sich in der Elbe die Spring- und Nipptideverhältnisse in den letzten Jahrzehnten unterschiedlich entwickelt haben. Eine schlüssige Erklärung kann dafür z. Zt. nicht gegeben werden. Daß diese Auswertung dennoch hier aufgeführt wird, dient dem Zweck, ein weiteres Indiz für mögliche Veränderungen unterhalb der Flußmündungen zu finden, wenn man unterstellt, daß antropogene Einflüsse aus dem Tidefluß selbst auf Tiden in beiden Mondphasen gleiche Auswirkungen hätten.

### 3. Entwicklung der Sturmflutverhältnisse

#### 3.1 Erkennbare Trends am Beispiel Elbe

Wie einleitend bereits erwähnt, häuften sich in den letzten drei Jahrzehnten bemerkenswerte Sturmflutereignisse an der deutschen Nordseeküste, die meistens zu besonders hohen Wasserständen in der Elbe führten. Da allein diese Tatsache bei Fachleuten wie bei Außenstehenden zu einer Reihe von Überlegungen Anlaß gab und gibt, seien hier – schon als Vorgriff auf die Ergebnisse in Kap. 3.3 – einige wichtige Entwicklungen im Sturmflutgeschehen der Elbe skizziert und kurz erläutert. Dazu werden zunächst nur Daten der Pegel Cuxhaven und Hamburg-St. Pauli verwendet:

- Die Anzahl hoher Sturmfluten nach 1950 ist außergewöhnlich.
- Der mittlere Scheitelwasserstand hoher Sturmfluten in Cuxhaven und auch die Scheitelhöhendifferenz zu Hamburg zeigen eine bemerkenswerte Tendenz, wenn man sie mit den Verhältnissen aus der ersten Hälfte dieses Jahrhunderts vergleicht: Beide steigen seit einigen Jahren stark an.

So steht die Frage im Raum, ob es sich hier um eine zufällige Häufung ungünstiger Ergebnisse, um eine elbespezifische Entwicklung oder um eine großräumige Erscheinung handelt. Im folgenden wird versucht, einer Antwort näherzukommen.

#### 3.2 Küste

Jede Sturmflut stellt ein individuelles Ereignis dar. Sie läuft je nach Wind- und anderen Einflüssen unterschiedlich ab. Keine Sturmflut wird einen identischen Nachfolger finden. Dennoch kann man natürlich Kollektive bilden und Mittelwerte bestimmen. Dabei ist folgender Gedankengang von grundsätzlicher Bedeutung:

Setzt man voraus, daß sich die äußeren Kräfte  $W$ , die zur Entwicklung eines vorgegebenen Sturmflutkriteriums – z. B. einer Mindesthöhe  $H_{Thw} = M_{Thw} + 2 \text{ m}$  – führen, über die Zeit nicht verändert haben, also

$$\begin{aligned} H_{Thw} (\Sigma W) &= \text{const} \\ \text{wenn } \Sigma W &= \text{const} \end{aligned}$$

und setzt man ferner voraus, daß sich bei einem genügend großen Kollektiv bzw. über einen genügend langen Zeitraum gewisse Kombinationen der äußeren Kräfte und diese mit der Tide wiederholen, so bedingt dies für  $\Sigma W = \text{const}$ :

$$\frac{\sum_m H_{Thw}}{m} = \text{const}$$

mit  $m = \text{Anzahl der Sturmflutereignisse}$

Wenn sich markante Abweichungen von dieser Konstanz einstellen, so kann dies drei Gründe haben:

- Es wirken veränderliche äußere Kräfte mit, die in  $W$  nicht enthalten sind (also ausgelöst durch anthropogene Einflüsse);
- $\Sigma W$  hat sich verändert aufgrund geogener Einflüsse und des atmosphärischen Geschehens;
- Die Wechselwirkung zwischen auslösenden Kräften, dem Medium Wasser und den reagierenden Kräften hat sich geändert.

Wenn „Küstenorte“ betrachtet werden, scheidet der erstgenannte Grund i. d. R. aus. In der Gleichung, die PUGH und VASSIE (1979) bei der Entwicklung einer Methode zur Ableitung der Eintrittswahrscheinlichkeit extremer Sturmfluten durch Kombination der Wahrscheinlichkeitsfunktionen von Stau und Tide aufgestellt haben, nämlich

$$\begin{aligned} h_o &= h_p + h_w + h_r \\ \text{mit } h_p &= \text{astron. bedingt} \\ h_w &= \text{durch Wettereffekte hervorgerufen} \\ h_r &= \text{andere als Tide- und Wettereffekte} \end{aligned}$$

wird damit  $h_r = 0$  sein. Es verbleibt als Ursache für  $h_o$ -Schwankungen lediglich eine Veränderung der auslösenden Kräfte, durch Tide und Wetter entstehend. Damit hängen unmittelbar – und bisher weder theoretisch noch empirisch davon trennbar – die Wechselwirkungen zwischen den sich entwickelnden Tide- und Windstaukurven zusammen. Diese Wechselwirkungen selbst können außerdem weiteren Veränderungen unterworfen sein, so daß hier äußerst komplexe Verhältnisse angenommen werden müssen.

Die tatsächliche Entwicklung vor der Küste der inneren Deutschen Bucht zeigt Abb. 22 für die letzten Jahrzehnte an den Pegeln der Küste und der Tideflüsse für Sturmfluten nach verschiedenen Auswertungen. Außer der Kurve von LIESE und LUCK (1978) für einen durch Mittelung mehrerer Küstenpegelaufzeichnungen gebildeten „mittleren Küstenpegel“ haben alle anderen Kurven gemeinsam während der letzten beiden Jahrzehnte einen deutlichen Trend zu höheren  $H_{Thw}$ . Die Entwicklungen in Herbrum, Bremen und Hamburg unterstreichen dies besonders, da die für diese Orte verwendeten Kollektive nach den Höhen an der Mündung des jeweiligen Flusses und nicht am Ort ausgewählt wurden. Zwar läßt sich dieser deutlich erkennbare Trend je nach Auswertart verschieden darstellen, aber er wird

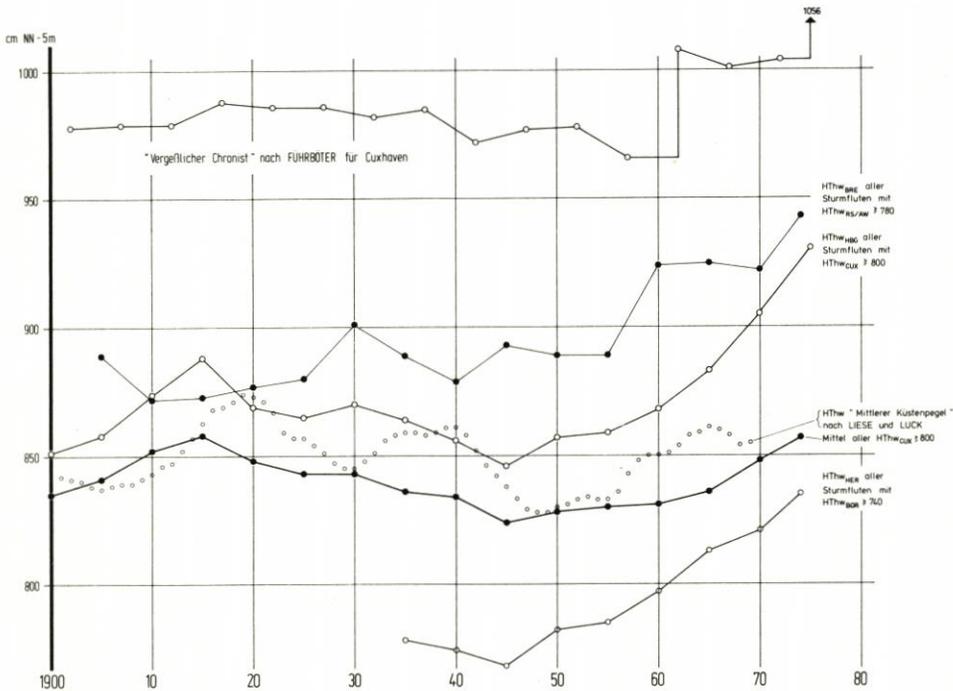


Abb. 22. Entwicklung gemittelter Sturmflutwasserstände 1900 bis 1980 für Ems, Weser und Elbe sowie die Ergebnisse von FUHRBÖTER (1976) und LIESE und LUCK (1978)

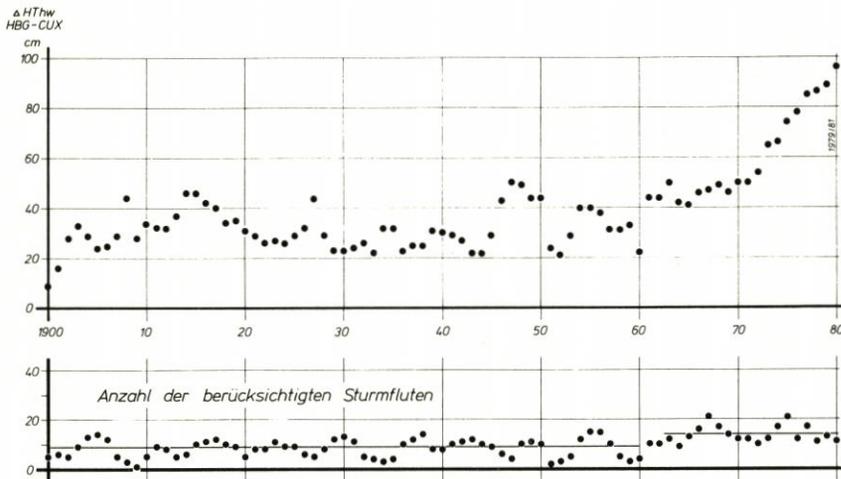


Abb. 23. Höhendifferenzen der Sturmflutscheitel  $\Delta HTHw_{HBG-CUX}$  1900 bis 1980 sowie die Anzahl dieser Sturmfluten (3jährig, übergreifend;  $HTHw_{CUX} \geq 800$  cm NN - 5 m oder max.  $Windstau_{Cux} \geq 200$  cm): deutliche Differenz- und Häufigkeitszunahmen nach 1960

damit quantitativ im Sinne obiger Gleichung von PUGH und VASSIE noch nicht faßbar. Um hier einen Schritt weiterzukommen, wurden auf Abb. 23 die HTHw-Differenzen HBG-CUX sowie die zur Berechnung verwendete Sturmflutanzahl dargestellt. Die Auswahl erfolgte wiederum nach den Daten an der Mündung, und zwar wurden nur solche Ereignisse berücksichtigt, die

- in CUX ein HThw  $\geq 800$  cm NN - 5 m oder
- in CUX einen Windstau  $\geq 200$  cm

erreichten.

Man erkennt, daß sich nicht nur die HThw-Differenzen zwischen HBG und CUX seit etwa 1955 von rd. 30 cm auf fast 100 cm vergrößert haben, sondern daß sich in derselben Zeit - genauer gesagt sogar innerhalb von rd. 10 Jahren - auch die Anzahl dieser Sturmfluten um rd. 50% erhöht hat!

$$\text{Mit} \quad h_0(1980) = 1,5 h_0(1955)$$

für den „Mündungspegel“ Cuxhaven sind dermaßen große Veränderungen zu verzeichnen, daß es lohnen sollte, der Frage nachzugehen, ob dies allein durch Wettereffekte möglich ist oder ob nicht auch - wie in Kap. 2 insbesondere bezüglich der Tnw bereits angedeutet - nordseespezifische Veränderungen eine Rolle spielen.

Es gibt hierzu allerdings auch scheinbar widersprüchliche Aussagen. So bringt die Arbeit von ROHDE (1977) eine Entwicklung für die Küste, die bei Sturmfluten etwa gleich der bei mittleren Tiden ist. Allerdings zieht ROHDE nur die höchsten Sturmfluten im Laufe der letzten Jahrhunderte heran. LIESE und LUCK (1978) ermittelten für einen „mittleren Küstenpegel“ durch mehrfache Mittelung mehrerer Aufzeichnungen gewisse Schwebungserscheinungen (Abb. 22). Wie die Darstellung zeigt, ist dabei der Trend gerade des letzten Jahrzehnts nicht gut repräsentiert. Dagegen brachte die Ermittlung der Sturmfluten mit der Auftretenswahrscheinlichkeit 1:100 Jahre durch FÜHRBÖTER (1976) deutliche Sprünge, hin zu höheren möglichen Sturmfluten (Abb. 22).

Nach GRAFF und BLACKMAN (1979) zeigen die jährlichen HThw für die englische Südküste denselben Trend wie der mittlere Meeresspiegel; allerdings deutet - wie bei uns - eine Häufung hoher Sturmfluten in letzter Zeit auf eine Zunahme von deren Eintrittswahrscheinlichkeit. So ergaben ihre dadurch ausgelösten Untersuchungen, daß in der Periode 1819/1970 in Sheerness (Themsemündung) eine generelle Zunahme des Auftretens extremer HThw zu verzeichnen ist, erkennbar an dem Trend der - ähnlich wie bei FÜHRBÖTER - ausgewerteten Höhen mit der Wahrscheinlichkeit 1:100 Jahren. Ferner wird dies durch eine Erhöhung der Auftretenswahrscheinlichkeit für alle Sturmflutklassen in Hoek van Holland unterstrichen.

### 3.3 Flüsse

Bei der Betrachtung der Sturmflutentwicklung in allen deutschen Tideflüssen darf das letzte Glied der Gleichung von PUGH und VASSIE nicht vernachlässigt werden, denn es spielt hier eine wesentliche Rolle. Das wird im vorigen Kapitel an der Diskussion von Abb. 23 bereits deutlich.

Nun ist eine solche isolierte Betrachtung natürlich nicht erschöpfend. So zeigt Abb. 24 für zwei weitere HThw-Kollektive in Ems und Weser seit 1900 bei einem Vergleich der Ganglinien an den oberen Pegeln mit denen an den „Mündungspegeln“, daß ein Großteil der Entwicklung an den oberen Tidepegeln - etwa der deutliche Anstieg in den letzten drei Jahrzehnten - schon an den Mündungspegeln - allerdings in schwächerer Form - aufgetreten ist und entsprechend nach oberstrom wirkt. Dennoch werden Zäsuren deutlich (Abb. 25): Trotz der groben Darstellung zeigen die Doppelsummenkurven in beiden Flüssen übereinstimmend ab 1960 den Beginn zu höheren Sturmfluten. Daß diese Tendenz stärker auf Kosten

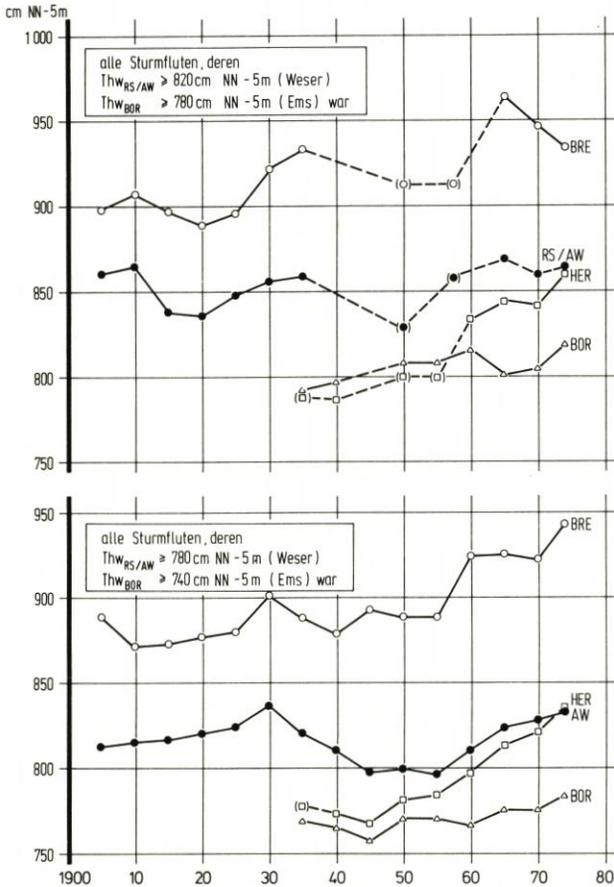


Abb. 24. HThw 1900 bis 1980 für Ems und Weser (als 10jährige übergreifende Mittel der gen. Sturmflut-Scheitelhöhen) nach SIEFERT, 1978: nach 1960 deutlich zunehmende Differenzen HER-BOR und BRE-RS/AW

des oberen gewählten Pegels geht, zeigt Abb. 24. Die Ursache dafür ist so nicht erkennbar; dazu bedarf es weiterer Analysen.

Für vier verschiedene HThw-Kollektive in der Elbe weisen Abb. 26a und b auf entsprechende Tendenzen, wie sie oben für Ems und Weser festgestellt wurden. Nur wird hier durch das bis in das 18. Jahrhundert zurückreichende Datenmaterial andererseits auch nachgewiesen, daß in Cuxhaven und in Hamburg die Sturmflutscheitel früher bereits ganz ähnliche Höhen wie in den letzten Jahren erreichten. Das deutet zum einen darauf hin, daß – Tide- und Wettereffekte betreffend – ähnliche Verhältnisse wie heute zwischen 1800 und 1850 schon einmal geherrscht haben müssen. Dann muß sich die Entwicklung ab 1960 auch anders als mit anthropogenen Effekten erklären lassen! Aber darauf ist früher schon ausführlich hingewiesen worden (SIEFERT, 1978). Inzwischen ist es LINKE (1981) sogar gelungen, Wechsel in der Sturmflutintensität während der letzten 6.000 Jahre nachzuweisen.

Für alle Kollektive wird allerdings die Aussage von Abb. 23 über die deutliche Zunahme der Sturmfluthöhen in den letzten Jahren bestätigt. Die Doppelsummenkurven auf Abb. 27 weisen ergänzend auf eine mögliche weitere Nuancierung: Die Sturmfluten aus dem Kollektiv  $HThw_{CUX} > 767$  cm NN - 5 m beginnen nach 1965 von der Norm abweichend zu steigen, und

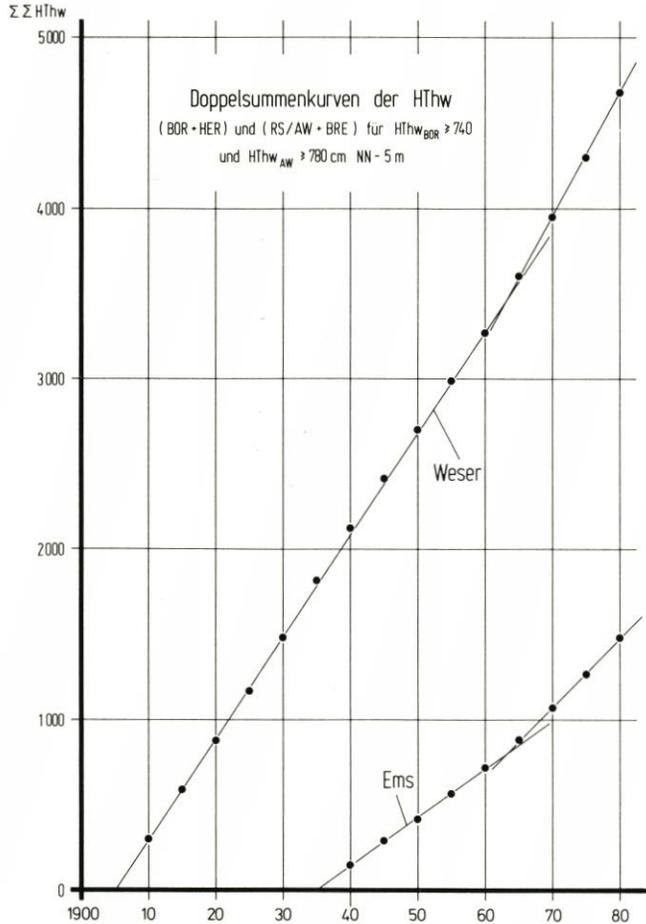


Abb. 25. Doppelsummenkurven der HThw 1900 bis 1980 für Ems und Weser (nach den Daten von Abb. 24): Knicke nach 1960 zum steileren Anstieg

zwar schneller als noch bis 1930. Diejenigen Sturmfluten, die  $\geq 800$  cm NN - 5 m erreichten, zeigen einen temporär und qualitativ gleichen Knick. Wenn man diesen mit Eindeichungs- und Absperrungsmaßnahmen im Flußgebiet erklären wollte, so müßten dafür besonders die höchsten Sturmfluten ( $\geq 850$  cm NN - 5 m) aus dem Kollektiv geeignet sein, auf die die Wirkung durch Verringerung des „Flutraumes“ am größten wäre. Bei diesen jedoch setzt der Knick schon knapp 10 Jahre eher und v o r diesen Baumaßnahmen ein!

Ein anderer Gesichtspunkt, der a. a. O. auch schon diskutiert worden ist, muß in diesem Zusammenhang noch erwähnt werden, nämlich die Entwicklung der HThw-Eintrittszeit-Differenzen (Abb. 28 und 29), wie sie sich parallel zu den Höhenveränderungen abgespielt hat. Für die Elbe liegt eine detaillierte Auswertung vor (Abb. 28). Danach ist bis Mitte der 1960er Jahre eine deutliche „Sortierung“ nach Höhenstufen auszumachen. Später treten vornehmlich solche Sturmfluten auf, deren „Laufzeiten“ absolut und gegen die Jahresmittel wesentlich kürzer sind. Die Tendenz ist zwar in allen drei Flüssen unterschiedlich verlaufen, jedoch logisch zueinander passend (SIEFERT, 1978), werden daran doch Verschiebungen in der Phasenlage von Windstau- und Tidemaximum deutlich. So wird bei der weiteren Analyse, wie

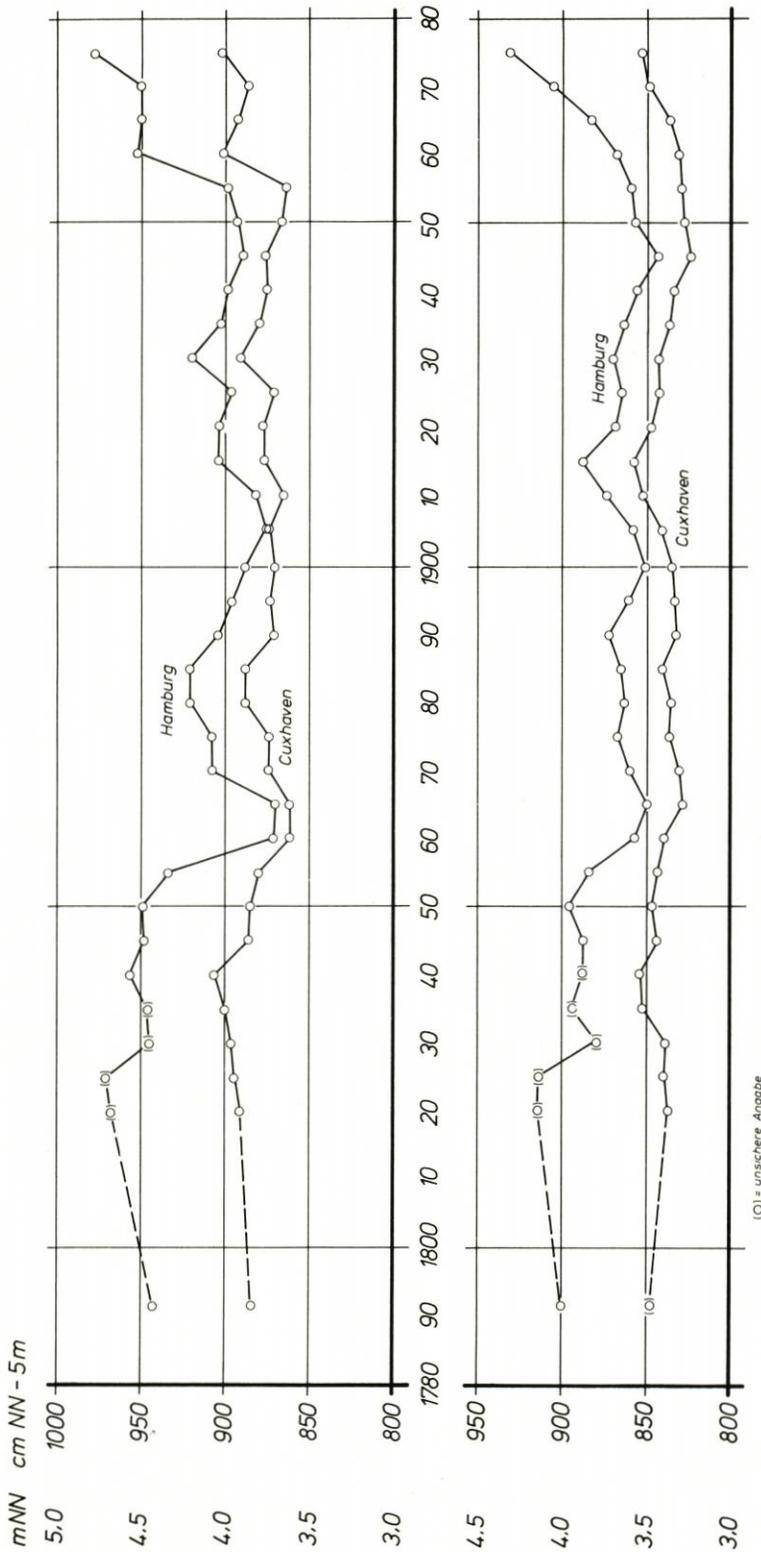


Abb. 26a. HThw 1780 bis 1980 für die Elbe (10jährig, übergreifend) nach SIEFERT, 1978 (ergänzt): nach 1960 deutlich zunehmende Differenzen HBG-CUX, die aber sowohl bei HThw<sub>CUX</sub>  $\geq$  850 (oben) wie bei HThw<sub>CUX</sub>  $\geq$  800 cm NN - 5 m (unten) auch schon in der Zeit 1800 bis 1850 eingetreten waren!

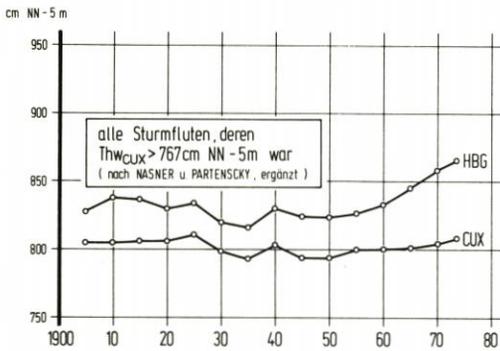
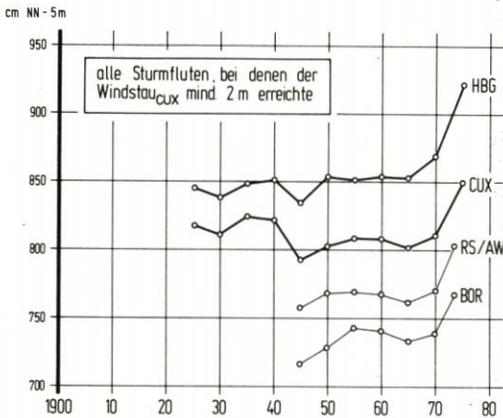


Abb. 26b

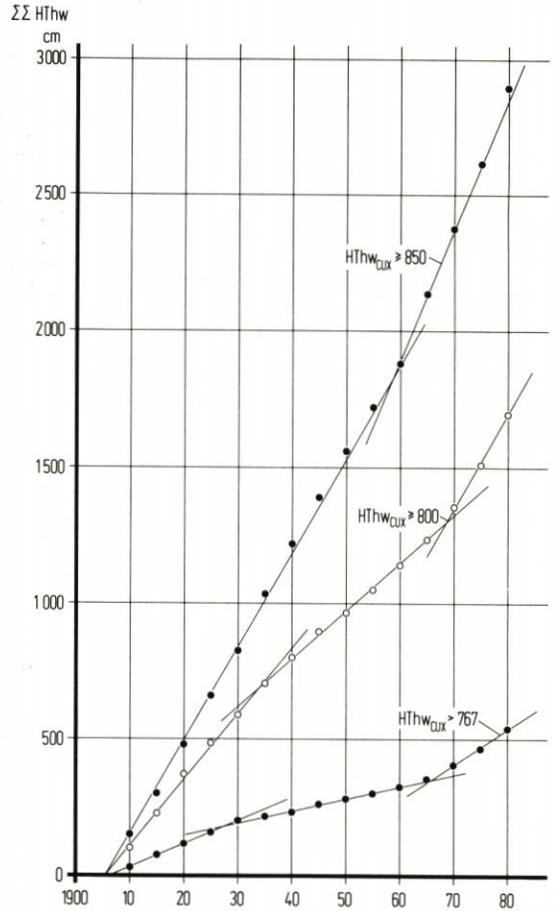


Abb. 27

Abb. 26b. HThw 1900 bis 1980 für die Elbe (10jährig, übergreifend) nach SIEFERT, 1978 (ergänzt): nach 1960 deutlich zunehmende Differenzen HBG-CUX auch für das Kollektiv  $HThw_{CUX} > 767$  cm NN - 5 m (unten), dagegen erst nach 1970 starker Anstieg der Absolutwerte der nach dem Windstau ausgewählten Tiden (oben)

Abb. 27. Doppelsummenkurven der HThw 1900 bis 1980 für die Elbe (nach den Daten von Abb. 26a,b): Der Knick zum steileren Anstieg der Kurve liegt für die höchsten Sturmfluten 5 bis 10 Jahre früher als für die mittleren

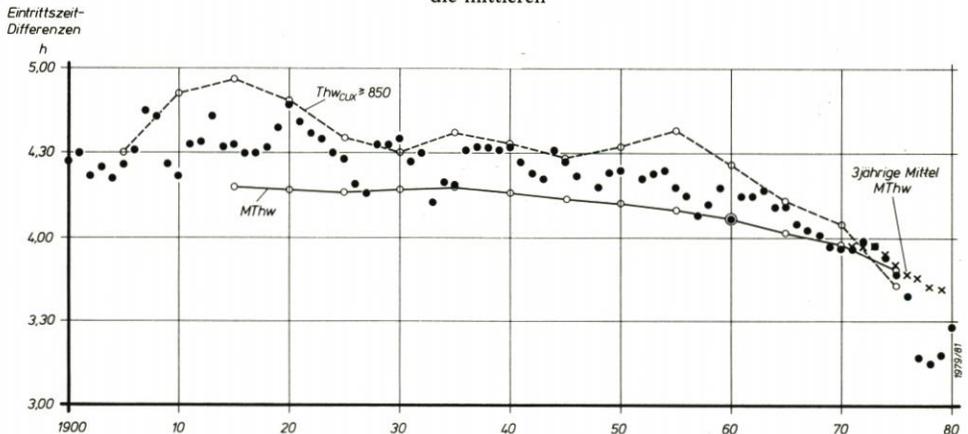


Abb. 28. HThw-Eintrittszeit-Differenzen HBG-CUX 1900 bis 1980 (3jährig, übergreifend für  $HThw_{CUX} \geq 800$  cm NN - 5 m oder max. Windstau  $CUX \geq 200$  cm; 10jährig, übergreifend für MThw und  $HThw_{CUX} \geq 850$  cm NN - 5 m): deutliche Abnahme der Differenzen nach 1960

auch PUGH und VASSIE (1979) schreiben, die Hauptschwierigkeit in der Berücksichtigung der Wechselwirkung (Interaction) zwischen diesen Wellen liegen, wie sie in der südlichen Nordsee üblich ist. Sie gehen z. B. auf das Phänomen ein, daß das Windstau maximum in der Themse überwiegend im Flutast auftritt (Abb. 30) und „irgendwie davon abgehalten wird, mit dem astronomischen Thw zusammenzufallen“ (PUGH und VASSIE, 1979). Man will dort jetzt versuchen, eine Funktion für die Wechselwirkung zu finden, so daß dann Windstau und Tide korrekt kombiniert werden können.

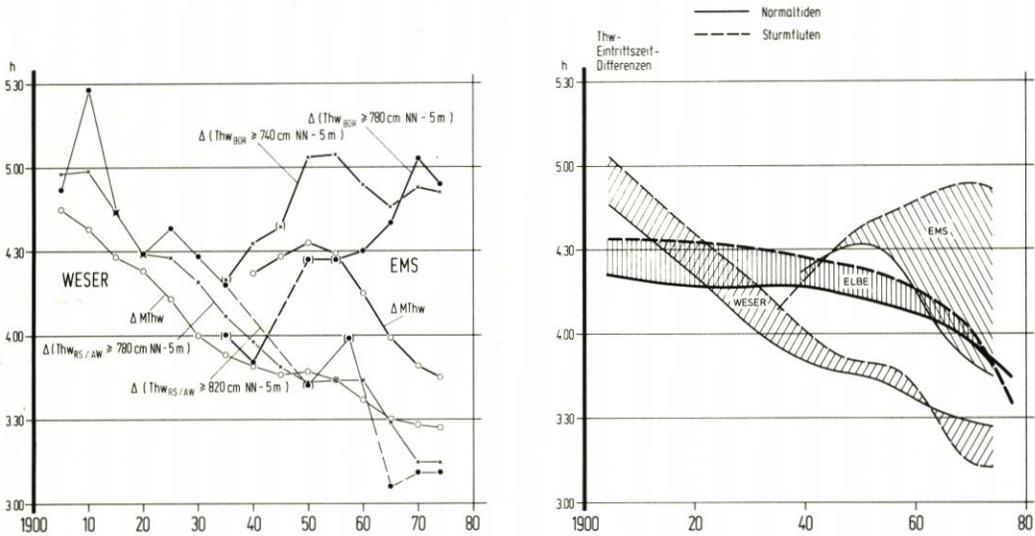


Abb. 29. HThw-Eintrittszeit-Differenzen BRE-RS/AW und HER-BOR 1900 bis 1980 (links; 10jährig, übergreifend) sowie eine generalisierte Darstellung aus dieser und Abb. 28 (rechts) für HER-BOR (107 km), BRE-RS/AW (114 km) und HBG-CUX (101 km); SIEFERT, 1978 (ergänzt)

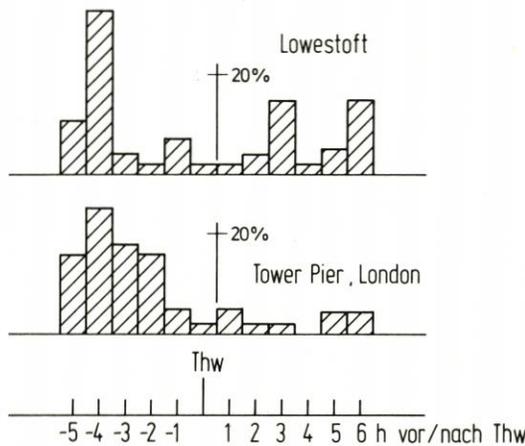


Abb. 30. Verteilung der Windstau maxima an der englischen Ostküste und in der Themse (nach PRANDLE und WOLF, 1978)

4. Hypothesen zur weiteren Arbeit

4.1 Überblick

Die Nordsee ist ein Randmeer des Atlantischen Ozeans. Die hier durch die astronomischen Verhältnisse entstehenden Tiden laufen von Norden und durch die Straße von Dover in das Randmeer ein. Die Tiden setzen sich entspr. der unterschiedlichen Wirkung der einzelnen Gestirne auf die Bewegung des Wassers auf der Erde aus mehreren Partialtiden zusammen. In

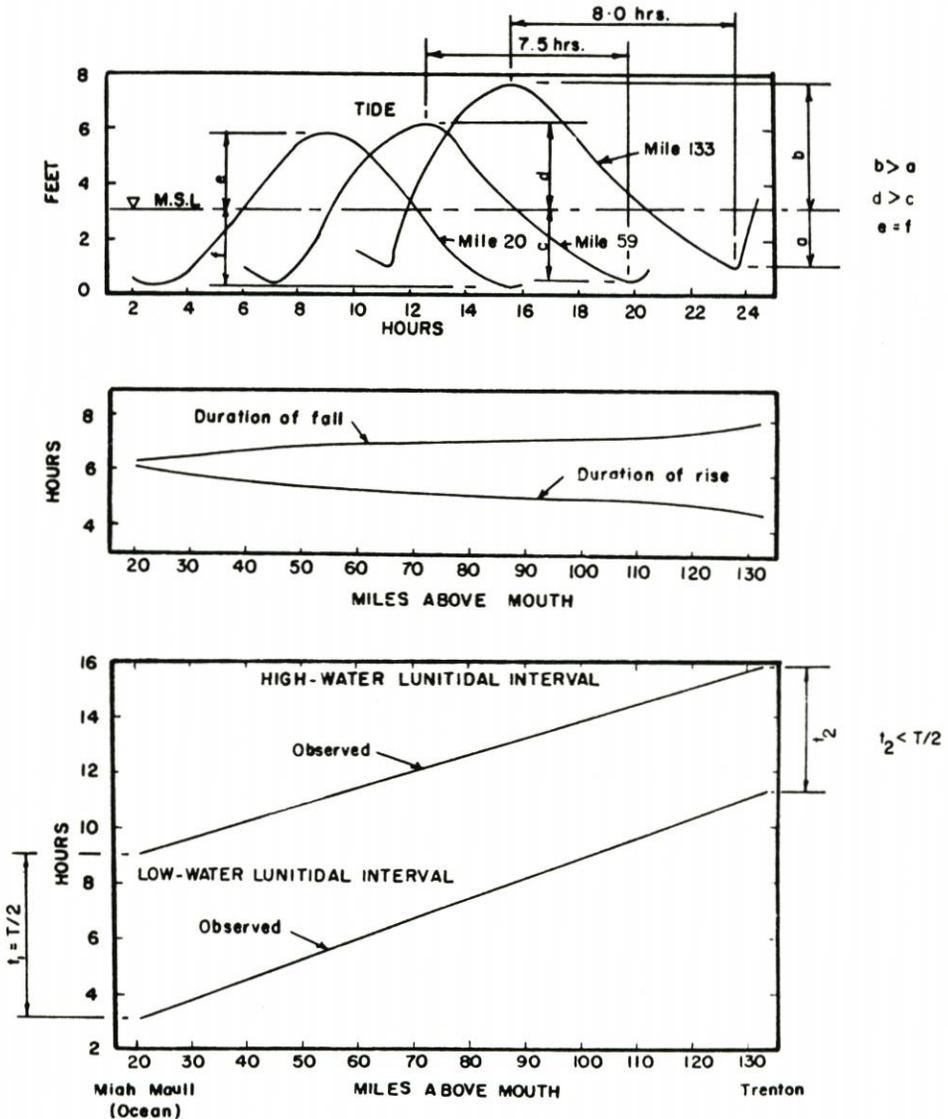


Fig.1 Tidal Data on the Delaware Estuary

Abb. 31. Grunddaten zur Beurteilung der Tideverhältnisse (nach HARLEMAN und LEE, 1969)

der Nordsee werden diese Wellen umgeformt, und zwar durch die Beckenform, die Tiefenverhältnisse und die Coriolisbeschleunigung. Die Nordseetiden dringen dann über das Küstenvorfeld in die Tideflüsse ein. Die in dieser Arbeit diskutierten Daten geben nun Veranlassung zu der Annahme, daß hierbei in den letzten Jahren Veränderungen stattgefunden haben, während gleichzeitig die Flüsse ausgebaut wurden.

Bevor einige Arbeitshypothesen erläutert werden, sollen noch einmal die Indizien zusammengestellt werden:

- Die MTnw in den Tideflüssen Ems, Weser, Elbe und Eider haben sich in den letzten vier Jahrzehnten zeitgleich und gleichsinnig verändert, ohne daß etwa alle Flüsse in derselben Zeit gleichartig künstlich verändert wurden.
- Eine vorläufige Auswertung für die Elbe scheint zu bestätigen, daß sich das Verhältnis der Spring- zu den Nipptiden verändert hat.
- Es gibt Hinweise, daß sich die Strömungsgeschwindigkeiten in Flußmündungen erhöht haben.
- Die Sturmfluten haben an der Küste der Deutschen Bucht wie auch an der englischen und niederländischen Küste an Zahl und Höhe zugenommen.
- Die „Aufsteilung“ der Sturmfluten bei ihrem Lauf ems-, weser- wie elbaufwärts ist in den letzten Jahren markant.
- Untersuchungen mit verschiedenen Sturmflutklassen in der Elbe zeigen, daß deren Höhenentwicklung nicht schlüssig mit Baumaßnahmen erklärt werden kann.
- Die Höhen hoher Sturmfluten erreichten vor rd. 150 Jahren, als die Elbe noch ganz anders aussah, in Cuxhaven und in Hamburg fast dieselben Werte wie heute.
- Die Sturmfluten sind in den letzten Jahren absolut (wie auch relativ zur mittleren Tide) „schneller“ geworden.

Die Sturmflutentwicklungen enthalten klimatische und anthropogene Einflüsse. Dennoch verbleiben ungeklärte Tendenzen, und sicherlich ließen sich weitere Indizien dafür finden, daß wir in den letzten 20 Jahren in den Tideflüssen Veränderungen feststellen, deren Ursachen an, in und über der Nordsee zu suchen sind.

Somit erhebt sich die Frage, welche Möglichkeiten wir haben, einerseits diese Indizien zu erhärten oder fallenzulassen und andererseits Ursachen aufzuspüren.

#### 4.2 Erarbeitung weiterer Indizien

Wie eingangs bereits vermerkt, wurden hier nur wenige Parameter diskutiert. Abb. 1 ebenso wie Abb. 31 geben Hinweise auf dem weiteren Weg:

- a) Wesentlich stärker als bisher muß möglichen Veränderungen in den Tidekurven nachgegangen werden. Daten sind vorhanden; das geeignetste Auswerteverfahren muß bestimmt werden. Bisher ist unbekannt, ob mit der Tnw-Absenkung im Oberlauf etwa eine Veränderung der Kurvenform an der Mündung einhergeht (erste Untersuchungen für die Elbe deuten das an; die Entwicklung in Helgoland wird untersucht).
- b) Der Entwicklung der Flut- und Ebbedauer ebenso wie der Spring- und Nipptideentwicklung muß erhöhte Aufmerksamkeit geschenkt werden. Daten sind vorhanden; die Auswertung ist einfach, aber umfangreich. In welcher Hinsicht die Ergebnisse hilfreich sein können, zeigen Abb. 20, 21 und 31.
- c) Die Flut- und Ebbwassermengen sämtlicher Tideflüsse sollten an ihren Mündungen möglichst exakt gemessen werden; bisher liegen nur sporadische Messungen an unterschiedlichen Stellen in wenigen Punkten oder auch Meßlotrechten vor, die nicht immer für

die Mündung repräsentativ sind. Die Meßdurchführung ist schwierig und aufwendig; Messungen sollten regelmäßig wiederholt werden, da die Durchflußmengen wie auch ihre zeitlichen Schwankungen möglichst exakt erfaßt werden müssen. Es ist zu prüfen, ob durch Kubizierungen bzw. mathematische Flußmodelle das Ziel vielleicht einfacher zu erreichen wäre.

- d) Wasserstände werden an einigen Stellen bereits seit Jahrhunderten gemessen – es ist an der Zeit, nun auch dasselbe mit den Strömungen zu tun. Die Auswahl repräsentativer Meßorte ist sehr schwierig; Aufbereitungs- und Analysenmethoden müssen erarbeitet werden, damit heutige vage Hinweise auf die Zunahme von Strömungsgeschwindigkeiten erhärtet werden können.
- e) Dem Ablauf von Sturmfluten an der Küste und in den Tideflüssen muß erhöhte Aufmerksamkeit geschenkt werden. Daten sind vorhanden, allerdings sollte sich die Analyse nicht nur auf die Scheitelhöhen beschränken. Die Windstauverhältnisse müssen nach bestimmten Verfahren ausgewertet, die Wechselwirkungen zwischen Tide- und Windstauwellen herausgearbeitet werden.
- f) Vergleiche zwischen verschiedenen Tideflüssen und verschiedenen Zeiträumen müssen intensiviert werden, um theoretisch wie empirisch (und evtl. über begleitende Modelluntersuchungen) die Einflüsse flußspezifischer Eigenschaften und Veränderungen festzustellen. Wenn so die Palette der Indizien verändert oder erweitert wird, dann sollte gleichzeitig oder anschließend nach den Ursachen für die Veränderungen gesucht werden.

#### 4.3 Auf der Suche nach den Ursachen

Die Ursachen für die Veränderungen der Tide- und Sturmflutverhältnisse sind in den bekannten Veränderungen in den Flüssen selbst (Vertiefungen, Eindeichungen, Absperrung von Nebenflüssen u. ä.), aber eben wohl auch in den unterhalb der Mündungen maßgebenden hydrologischen und meteorologischen Vorgängen zu suchen. Aus dem zuvor Diskutierten ergeben sich für die letztere folgende Anhaltspunkte.

- a) Änderung der windunbeeinflussten Tideverhältnisse im Küstenvorfeld können ein Hinweis auf langfristige Variationen im Tidegeschehen der Nordsee sein, etwa durch Verlagerung oder Veränderung der Amphidromie in der südlichen Nordsee (Abb. 32). Diese wiederum könnte Folge einer anders aus dem Atlantik angeregten Nordseezeit sein.
- b) Die Zunahme der Sturmflut-Scheitelwasserstände, z. B. in Hamburg, deutet an, daß wir uns in einer zum Zeitraum 1800 bis 1850 vergleichbaren Phase meteorologischer Verhältnisse befinden, bei der häufiger stauwirksame Starkwindlagen auftreten. Es bedarf also des Versuches, aus älteren meteorologischen Unterlagen (etwa über „kleine Eiszeiten“) auf solche wiederkehrenden Bedingungen zu schließen.
- c) Die Erscheinung, daß heute die Phasen von Windstaukurven und astronomischen Tiden in der Deutschen Bucht häufiger dicht beieinanderliegen als vor einigen Jahrzehnten und dadurch über Wechselwirkungen zu ungünstigeren Überlagerungen, d. h. höheren Scheitelwasserständen in den Flüssen, führen (SIEFERT, 1978), deutet auf Zufallseffekte hin, die als solche bisher keineswegs nachgewiesen sind.

Um hier voranzukommen, ist interdisziplinäre Forschung von Physikern, Ozeanographen, Meteorologen und Küsteningenieuren erforderlich. Das erfordert Zeit, Geld und eine Menge unkonventioneller Ansätze. In Kap. 4.2 ist aufgezeigt, wie wir durch intensive Meß- und Auswertekampagnen bei entsprechendem Einsatz innerhalb weniger Jahre unsere Kenntnisse verbessern und den Blick für die zukünftige Entwicklung schärfen können.

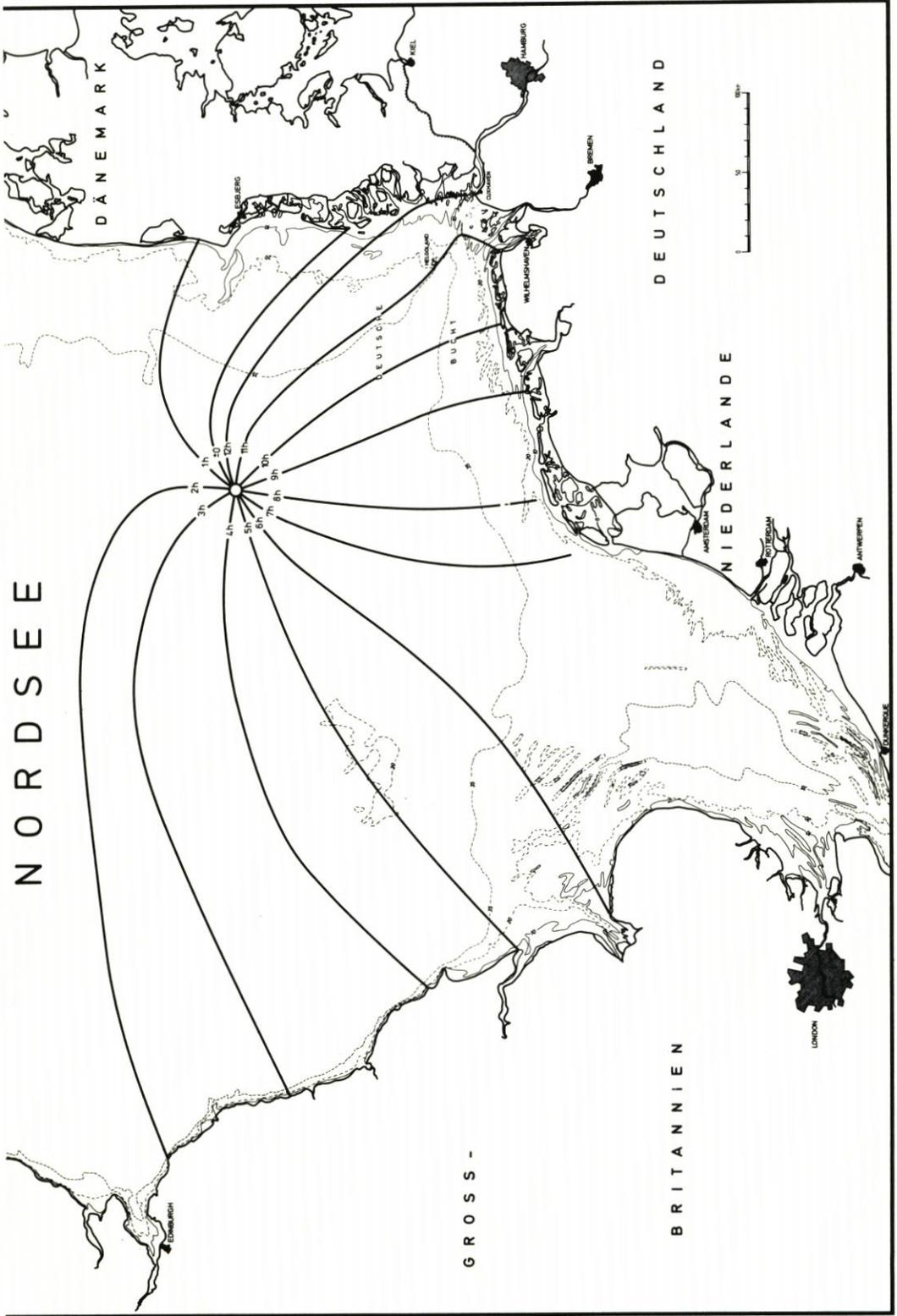


Abb. 32. Die Amphidromie in der südöstlichen Nordsee (aus Stiefert, 1978)

## 5. Liste der verwendeten Pegel-Abkürzungen

AW	Alte Weser		FAR	Farge	Weser
BHV	Bremerhaven-Doppelschleuse	Weser	FRI	Friedrichstadt-Straßenbrücke	Eider
BOR	Borkum-Südstrand		HBG	Hamburg-St. Pauli	Elbe
BRA	Brake	Weser	HEL	Helgoland	
BRE	Bremen-Gr. Weserbrücke	Weser	HER	Herbrum-Hafendamm	Ems
BRO	Brokdorf	Elbe	HUN	Hundeknöll	
BRU	Brunsbüttel	Elbe	LEE	Leerort	Ems
BÜS	Büsum		NUP	Nordfeld UP	Eider
CUX	Cuxhaven-Steubenhöft		PAH	Pahlhude	Eider
EBP	Eidersperrwerk BP	Eider	RS	Roter Sand	
ELB	Elbstorf	Elbe	STA	Stadersand	Elbe
EMD	Emden-Neue Schleuse	Ems	TÖN	Tönning	Eider

## 6. Schriftenverzeichnis

- BOWEN, A. J.: The Tidal Regime of the River Thames; Long-Term Trends and Their Possible Causes. *Phil. Trans. R. Soc., A* 272, London, 1972.
- FÜHRBÖTER, A.: Über zeitliche Änderungen der Wahrscheinlichkeit von Extremsturmfluten an der deutschen Nordseeküste. *Mitt. Leichtweiß-Inst. der TU Braunschweig*, H. 51, 1976.
- GRAFF, J. u. BLACKMAN, D. L.: Analysis of Maximum Sea Levels in Southern England. *Proc. 16th Int. Conf. on Coastal Eng., Hamburg, 1978; ASCE, New York, 1979.*
- HARLEMAN, D. R. F. u. LEE, C. H.: The Computation of Tides and Currents in Estuaries and Canals. *Mass. Inst. of Techn., Hydrodyn. Lab., Techn. Bull. No. 16, Cambridge Mass., 1969.*
- HENSEN, W.: Stromregelungen, Hafengebauten, Sturmfluten in der Elbe und ihr Einfluß auf den Tideablauf. *Festschr. 30. Dt. Geographentag, Hamburg, Verlag F. Hirt, Kiel, 1955.*
- LAUCHT, H.: Kann das Fahrwasser der Unterelbe noch weiter vertieft werden? *Schiff und Hafen*, H. 2, 1980.
- LENTZ, H.: Fluth und Ebbe und die Wirkungen des Windes auf den Meeresspiegel. *Verl. Otto Meissner, Hamburg, 1879.*
- LIESE, R. u. LUCK, G.: Verfahren zum Nachweis von Veränderungen der Tidehochwasserstände in der Deutschen Bucht. *Dt. Gew. Mitt.*, H. 5, 1978.
- LINKE, G.: Ergebnisse und Aspekte zur Klimaentwicklung im Holozän. *Geol. Rundschau*, Bd. 70/2, 1981.
- LÜDERS, K.: Über die Genauigkeit verschiedener Verfahren zum Entwerfen der „mittleren Tidekurven“. *Neues Archiv für Nds.*, H. 19, 1950.
- NASNER, H. u. PARTENSKY, H. W.: Sturmfluten in der Elbe und an der deutschen Nordseeküste von 1901 bis zum Januar 1976. *Mitt. des Franzius-Inst. der TU Hannover*, H. 45, 1977.
- PUGH, D. T. u. VASSIF, J. M.: Extreme Sea Levels from Tide and Surge Probability. *Proc. 16th Int. Conf. on Coastal Eng., Hamburg, 1978; ASCE, New York, 1979.*
- ROHDE, H.: Sturmfluten und säkularer Wasserstandsanstieg an der deutschen Nordseeküste. *Die Küste*, H. 30, 1977.
- SIEFERT, W.: Über das Sturmflutgeschehen in Tideflüssen. *Mitt. des Leichtweiß-Inst. der TU Braunschweig*, Heft 63, 1978.
- SCHULTZE, E.: Die nichtperiodischen Einflüsse auf die Gezeiten der Elbe bei Hamburg. *Archiv der Dt. Seewarte*, Nr. 53, 1935.
- STRÖHMER, P. u. WANDER, K.: Ermittlung der nach Ausbaumaßnahmen in Tideflüssen eingetretenen Wasserstandsänderungen. *Dt. Gew. Mitt.*, H. 6, 1979.

# Zur Morphogenese des Seegebietes vor Borkum und des Südweststrandes der Insel

Von Gyula Samu

## Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wird versucht, die Morphogenese des küstennahen Seegebietes und des Südweststrandes der Insel Borkum zueinander in Beziehung zu setzen. Die Auswertung der vorhandenen Meßunterlagen ermöglicht es, die Veränderung der Morphologie und die Bewegung des Materials unter Berücksichtigung der anthropogenen Einflüsse zu beurteilen.

Der charakteristische Gestaltwandel der morphologischen Großformen ist nicht nur mit erheblichen Massenumlagerungen verbunden, sondern übt auch einen nicht abschätzbaren Einfluß auf den Inselsockel aus. Im Bereich der morphologischen Großheiten (Hubertgat, Horsbornplate, Möwensteert etc.) verliert der Ost-West-Sandtransport seine Kontinuität und führt gewisse Materialkreisläufe aus. In der Inselnähe und am Strand zeigen die Meßergebnisse und die Beobachtungen einen starken küstenparallelen Materialversatz.

Die Untersuchungen lassen auch erkennen, daß die Buhnsysteme zum gegenwärtigen Zeitpunkt einen Beharrungszustand herbeigeführt haben, wobei die Oberfläche des Strandes sich den wechselnden Bewegungsbedingungen angepaßt hat.

## Summary

*The presented study tries to relate the morphological development of the sea area near to the coast to that of the south-west shore of the Borkum island. The interpretation of existing methods of treatment enables to estimate the changing of morphology and the movement of material taking into consideration the anthropogenical influences.*

*The characteristic changing of large morphological shapes is not only bound up with considerable mass transposition but also has an inestimable effect on the plinth of the island. In the area of large morphological forms (Hubertgat, Horsbornplate, Möwensteert etc.) the east-west transport loses its continuity and performs certain circulations of material. In front of the island and on shore the measurements and observations indicate a strong material rubble in parallel direction to the coast area.*

*It can be recognized by these tests that a state of continuance is maintained at present and that the surface of the shore is adapting itself to the changing conditions of movement.*

## Inhalt

1. Veranlassung . . . . .	38
2. Natürliche Bedingungen der morphologischen Entwicklung im Untersuchungsgebiet . . . . .	38
3. Grundlagen und Untersuchungsmethodik . . . . .	38
3.1 Unterlagen . . . . .	38
3.2 Aufarbeitung und Analyse der Bodenproben . . . . .	39
3.3 Bewertung und Bearbeitung des Kartenmaterials . . . . .	39
4. Untersuchungsergebnisse . . . . .	42
4.1 Veränderung der Morphologie und Materialumlagerungen . . . . .	42
4.2 Verteilung der Korngrößen . . . . .	50
5. Wechselbeziehungen zwischen Küste und Meer hinsichtlich des Gesamttransports und der Morphogenese . . . . .	50
6. Ausblick . . . . .	56
7. Schriftenverzeichnis . . . . .	56

## 1. Veranlassung

Der Südweststrand von Borkum, der im untersuchten Gebiet das Nordostufer der Ems bildet, ist starken Angriffskräften (Wellen, Gezeitenströmung) ausgesetzt, die im Laufe der Jahrhunderte ein Zurückweichen der Insel bewirkten. Als Gegenmaßnahme wurde zur Sicherung der Küste und Dünen ein System von Buhnen und Deckwerken gebaut, das im wesentlichen den weiteren Abbruch verhinderte. Allerdings entstanden am Ende der Sicherungsstrecke jeweils Schäden im Strand- und Vorstrandbereich. Diese nachteilige Entwicklung und die möglichen Folgen führten zu Überlegungen über die Notwendigkeit weiterer Ausbaumaßnahmen.

Die zu erwartenden Veränderungen über die natürlichen Zusammenhänge zwischen Küste und vorgelagertem Meeresgebiet können in dem offenen System einer Flußmündung, wie dem des Ems-Ästuars, nur unter Berücksichtigung möglichst vieler Faktoren abgeschätzt werden. Die morphologische Betrachtung ist eine der Möglichkeiten, erste Erkenntnisse über das Wirkungsgefüge der gestaltenden Faktoren zu erhalten.

## 2. Natürliche Bedingungen der morphologischen Entwicklung im Untersuchungsgebiet

Das betrachtete Gebiet unmittelbar westlich und südwestlich der Insel Borkum mit einer Fläche von etwa 60 km<sup>2</sup> ist ein Teil der Außenems-Mündung (Abb. 1), der eine Untereinheit des Nordseebeckens mit örtlichen Besonderheiten bildet. Die örtlich speziellen Bedingungen und die großräumigen hydrodynamischen Vorgänge sind die maßgeblichen Ursachen der morphologischen Veränderungen. Die einwirkenden Kräfte sind teils periodischer, teils unperiodischer Natur. Die Gezeitenwelle, die eine halbtägige Form aufweist, verursacht die Wasserstandsschwankungen und die Gezeitenströme. Die in Abb. 1 dargestellte Tidekurve am Pegel Borkum-Südstrand entspricht etwa einer mittleren Tide. Unter den dynamischen Kräften sind die Gezeitenströme die bedeutendsten, die die Materialbewegung bewirken. Die mittleren Strömungsgeschwindigkeiten vor Borkum erreichen einen Wert von 1,2 bis 1,3 m/sec (Abb. 1). Die Gezeitenströmung ist durch den bei überwiegend westlichen Winden erzeugten Seegang überlagert, der bei abnehmender Wassertiefe in seiner Wirkung stärker wird. Über die Windverhältnisse, deren Einfluß auf die Vorstrand- und Strandentwicklung direkt (Seegang) oder indirekt (Brandungslängsströmung) erstrangig betrachtet werden muß, gibt die Darstellung auf Abb. 1 einen Überblick.

Die Oberflächensedimente des küstennahen Seegebietes werden gegenwärtig weitgehend von den holozänen Ablagerungen gebildet, und zwar meist von sandiger Fazies. Im Mündungstrichter der Ems werden in bestimmten Bereichen, meist in den tieferen Rinnen (Randzelgat), die pleistozänen und altholozänen Schichten angeschnitten. Die Unterkante des Holozäns liegt unmittelbar im Strandbereich maximal auf NN - 10 m bis NN - 12 m (BAW 1977); seewärts sinkt die Holozänbasis steil unter NN - 15 m (DECHEND, 1950).

## 3. Grundlagen und Untersuchungsmethodik

### 3.1 Unterlagen

Die Durchführung einer sorgfältigen Kartenanalyse bildet die Grundlage für eine Untersuchung mit morphologischer Fragestellung nach den Veränderungen des Formenschatzes im

marinen Vorfeld der Insel Borkum. Die Ausgangsdaten zur Erfassung der morphologischen Entwicklung bildet ein umfangreiches Kartenmaterial, und zwar:

- a) Tiefenkarten der Ems der Jahre 1970 bis 1978 im Maßstab 1:25 000
  - b) Strandaufnahmen vom Südstrand Borkums von 1975 bis 1978 im Maßstab 1:5000
  - c) spezielle Nivellements vor dem Deckwerk am Südstrand aus den Jahren 1974 bis 1976
- Zur besseren Deutung der gestellten Aufgaben wurden meteorologische und hydrologische Daten sowie Angaben über die Baggerungen verwendet\*).

Die gewonnenen Erkenntnisse aus der morphologischen Betrachtung wurden durch granulometrische Untersuchungen ergänzt, um zu versuchen, eventuelle Beziehungen zwischen den morphologischen Veränderungen und der Korngröße festzustellen. Für die Bearbeitung der Korngrößenanalyse wurden 636 Bodenproben verwendet, die während der Sandbewegungsuntersuchungen mit radioaktiven Leitstoffen im Mai/Juni und Aug./Sept. 1977 entnommen wurden.

### 3.2 Aufarbeitung und Analyse der Bodenproben

Die Korngrößenanalyse erfolgte nach DIN 4188. Die Bezeichnung der Sedimente nach DIN 4022 ist in der nachfolgenden Unterteilung wiedergegeben:

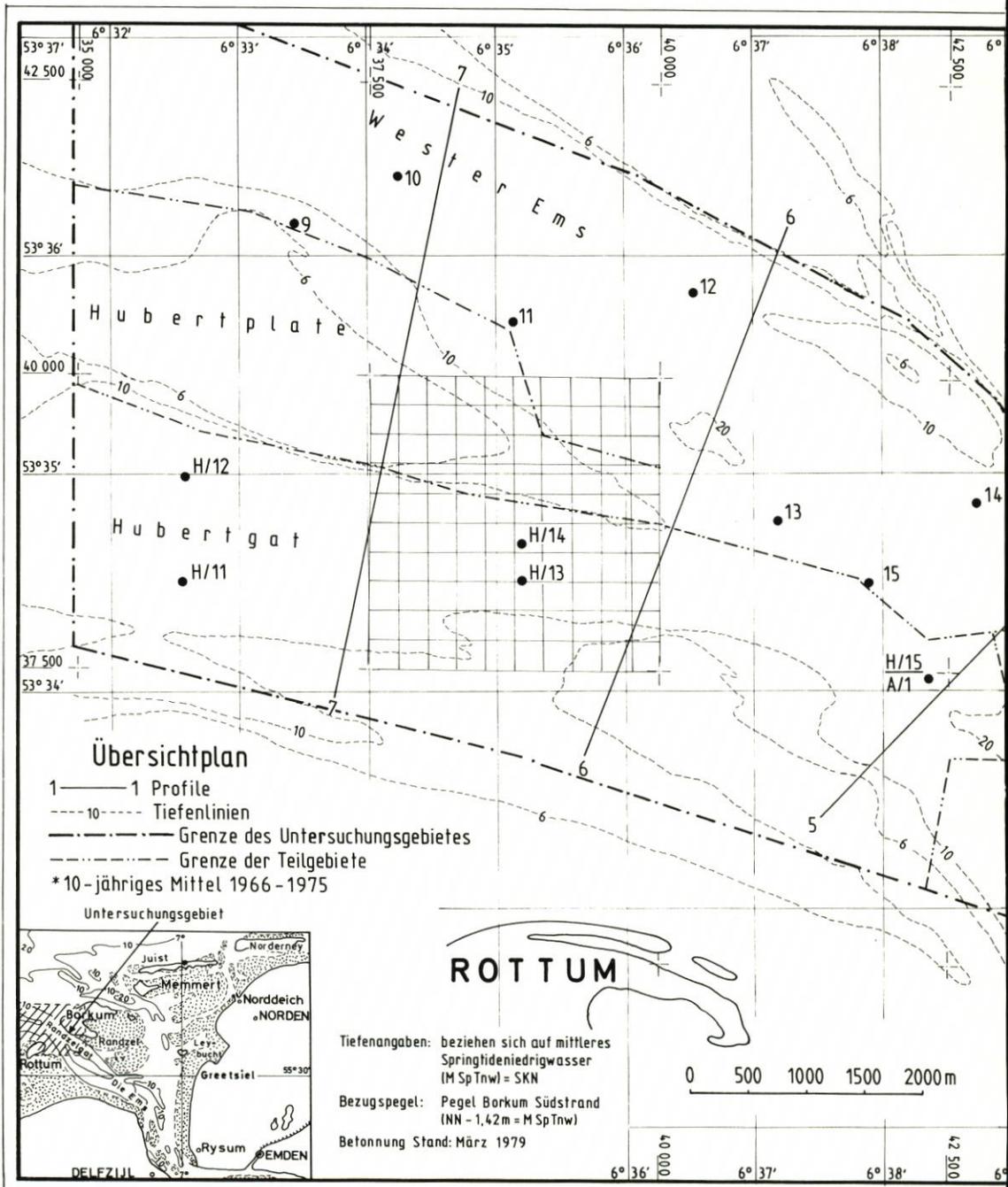
Kies	Grobkies (gKi)	60–20 mm
	Mittelkies (mKi)	20–6 mm
	Feinkies (fKi)	6–2 mm
Sand	Grobsand (gS)	2–0,63 mm
	Mittelsand (mS)	0,63–0,2 mm
	Feinsand (fS)	0,2–0,063 mm
Schluff (Silt)		0,063–0,002 mm
Ton		< 0,002 mm

Neben den Hauptfraktionen werden ein oder zwei Nebenfraktionen genannt, die jeweils der Hauptfraktion vorangestellt und zusätzlich noch als stark oder schwach beteiligt gekennzeichnet sind (DIN 4022, REINECK, 1963): 5–15 % = schwach, 15–30 % = normalhaltig und 30–50 % = stark. Um eine bessere Übersicht der Korngrößenausbildung des Untersuchungsgebietes erhalten zu können, wurden die Bodenarten in gesonderten Gruppen zusammengefaßt (Abb. 7). Die analysierten Proben sind Korngemische, bestehend aus mehreren Kornklassen. Hierzu wird die Summenkurve für die Darstellung der Korngrößen verwendet, da nach zahlreichen Ausführungen (WALGER, 1965; INMANN, 1952; FRIEDMANN, 1962; TRASK, 1932) aus ihnen die wichtigsten Kornkennwerte (Quartil, Median und Sortierung) abgelesen werden können.

### 3.3 Bewertung und Bearbeitung des Kartenmaterials

Die Deutung der morphologischen Entwicklung ist mit einer Reihe von Voraussetzungen verknüpft: ausreichende Anzahl von großmaßstäblichen Karten in zeitlich begrenzter Folge, übersichtliche Erarbeitung der Veränderungen, Zuverlässigkeit des vorhandenen Materials, in

\*) Freundlicherweise stellte das WSA Emden zahlreiche Unterlagen zur Verfügung. Für die Überlassung derselben sei an dieser Stelle gedankt.





der Herstellung auftretende Abweichungen, Auswertungsfehler. Im Rahmen der Untersuchung sind die möglichen navigatorischen und technischen Genauigkeiten berücksichtigt worden. Diese Probleme wurden in zahlreichen wissenschaftlichen Untersuchungen (GÖHREN, 1968; GROTHEN, 1964; LUCHT, 1973 und DHI, 1973) ausführlich analysiert.

Die Beschreibung und Deutung der morphologischen Zustandsänderung des Seegebietes vor Borkum und des Strandes basiert auf folgenden Methoden:

- a) Bestimmung der Veränderung der Tiefenlinien
- b) vergleichende Betrachtung der Querschnittsentwicklung
- c) Ermittlung der Querschnittfläche
- d) Bestimmung einiger hydrologischer Parameter der Rinnen
- e) Erarbeitung von Tiefenänderungsplänen (Differenzkarten)
- f) Massenberechnungen (Bilanzierung)

Die Menge des an dieser Umgestaltung beteiligten Materials wird durch eine Rastermethode bestimmt. Die Größe der einzelnen Raster beträgt  $1 \times 1$  cm ( $250 \times 250$  m in der Natur). Die Differenzwerte werden aus den ermittelten mittleren Tiefen der jährlichen Vermessungen für jede Rasterfläche durch Vergleiche auf halbautomatischem Wege errechnet. Aus diesen Werten lassen sich die Größen der Ablagerungen und Abtragungen berechnen und Konturenkarten zeichnen.

#### 4. Untersuchungsergebnisse

##### 4.1 Veränderung der Morphologie und Materialumlagerungen

Seit die vordringende Nordsee die heutige Küstenlinie erreicht hat, zeigt der Mündungstrichter ein instabiles Verhalten. Der Rinnen-Platenkomplex durchlief, seit eine vergleichbare Betrachtung möglich ist (16. Jahrhundert [LANG, 1954]), charakteristische Veränderungen, wobei die sog. Gats auf Kosten der Mäanderbögen sich immer stärker herausbildeten (z. B. Randzelgat). Die heutige Anordnung der Großformen entstand seit Ende des 19. Jahrhunderts. Über die Ursachen der Verlagerungen des Formenschatzes wurden viele hervorragende, allerdings untereinander in der Erklärung abweichende Berichte geschrieben (HOMEIER u. LUCK, 1971; JANSSEN, 1937; LANG, 1954; NIEBUHR, 1952 und JESSEN, 1922). In den langfristigen Phasen der Formungsprozesse (hier Säkularzeiträume) sind die kurzfristigen Entwicklungsstadien eingebettet, in denen die Einflüsse der einzelnen, zu allen Zeiten wirkenden Faktoren augenfälliger in Erscheinung treten und erfaßbar sind.

Hierzu werden die vorliegenden Beobachtungen gezählt. Bei der Gestaltung des Meeresbodens im Vorfeld der Insel sind andere Kräfte (Gezeitenströmungen) maßgebend als bei der Umformung des Strandes (Seegang, Brandungsströmungen), wobei die Grenzen zwischen denen zweier Wirkungsfelder fließend sind. Daher ist die erwogene Zweiteilung für die Betrachtung (Seegebiet und Strand) nur formal anzusehen.

Gegenüber dem Zustand des Jahres 1970 haben Gestalt und Gliederung in der Untersuchungszeit bis zum Jahre 1978 beachtliche Veränderungen erfahren. Die auffälligste Erscheinungsform auf den Differenzkarten ist die zunehmende Intensität der Materialumlagerung von außen nach innen. Nach dem Verteilungsmuster entstehen die ausgesprochenen Schwerpunkte der Erosion und Sedimentation, die auch mit schnellem Auf- und Abbau der Formen verbunden sind, meist an divergierenden Rinnenteilen. Hierzu gehören der Bereich der Horsbornplate, der Alten Ems und des Möwensteerts mit Umlagerungshöhen von über 60 dm (Abb. 2). Demgegenüber herrscht auf den höheren Teilen der Plate und in der äußeren Mündung eine schwächere flächenhafte Erosion.

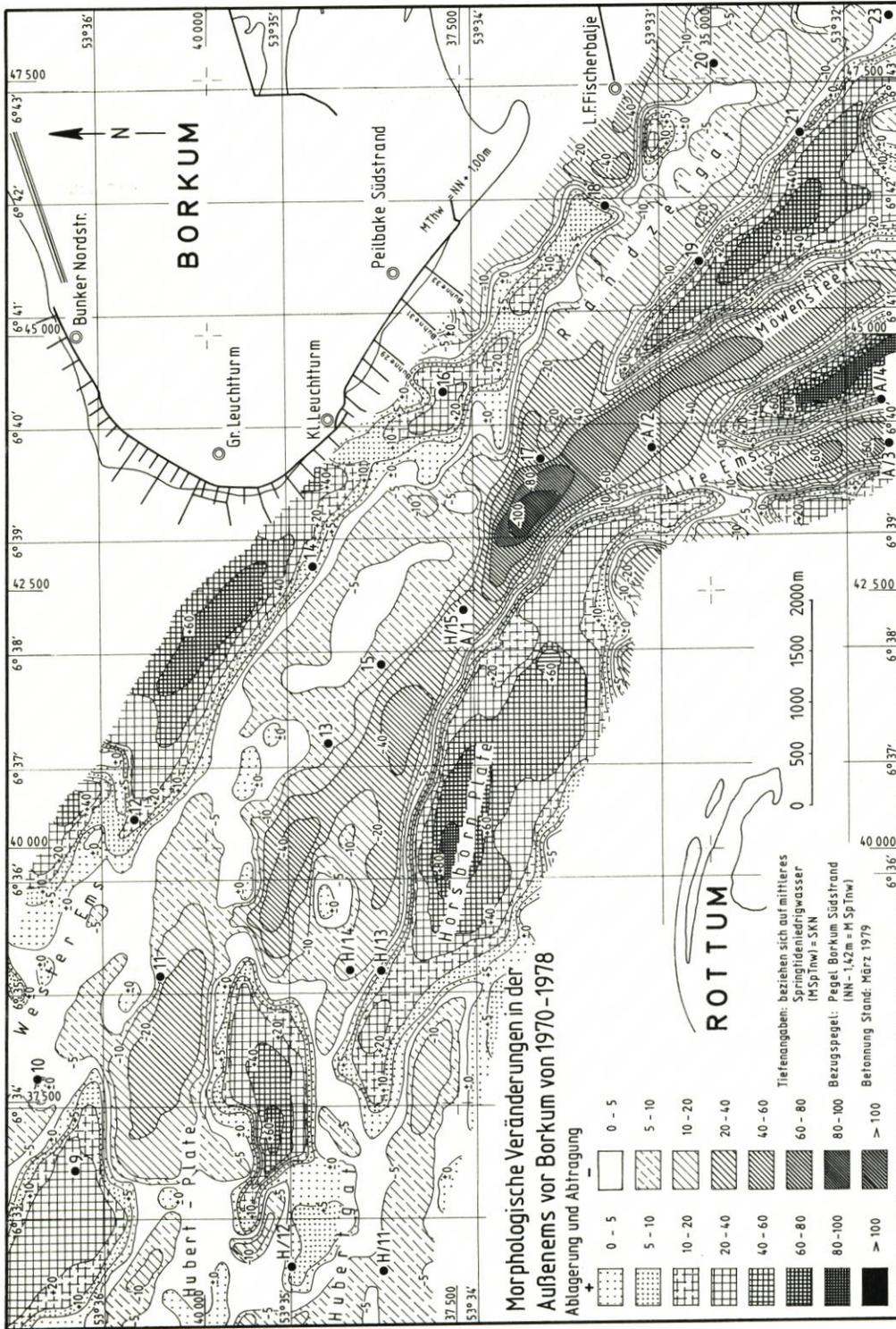


Abb. 2

Gebiet	Profil <sup>1)</sup>	Breite in m				Querschnittsfläche in m <sup>2</sup>				Tiefe in m	
		SKN - 6 m		SKN - 10 m		SKN - 6 m		SKN - 10 m		1970	1978
		1970	1978	1970	1978	1970	1978	1970	1978	1970	1978
Alte Ems	a	1350	940	1225	760	9 223	8 995	3 970	5 455	15,5	20,0
	b	1450	—	975	1 180	8 266	—	3 031	4 530	16,3	18,5
Randzelgat	a	2 150	1 900	1 950	1 800	20 263	18 100	12 951	10 713	23,3	21,0
	b	1 900	—	1 675	1 460	21 258	31 311 <sup>2)</sup>	14 133	12 948	21,2	22,8
Alte Ems Randzelgat	4	1 212	3 080	850	2 860	8 302	37 617	4 065	25 590	19,0	28,7
		1 638		1 512		25 944		19 269		31,0	
Westerems Hubertfahrt	5	3 525	3 150	3 000	2 840	29 578	28 390	16 630	16 136	19,0	19,1
Westerems Hubertgat	6	—	—	2 175	2 480	21 481	29 560 <sup>3)</sup>	11 844	12 203	22,7	21,5
Horsborngat	6	—	—	1 125	820	9 313		1 635	2 303	12,5	14,2
Hubertgat	6	—	875	—	—	3 420		—	—	—	8,9
Hubertgat	7	—	—	1 375	1 500	14 663	14 916	5 934	5 978	16,3	19,3

1) siehe Abb. 1  
2) mit Alte Ems  
3) mit Hubertgat

Veränderung der Breite, Tiefe und Querschnittsflächen  
in ausgewählten Profilen der Außenems

Abb. 3

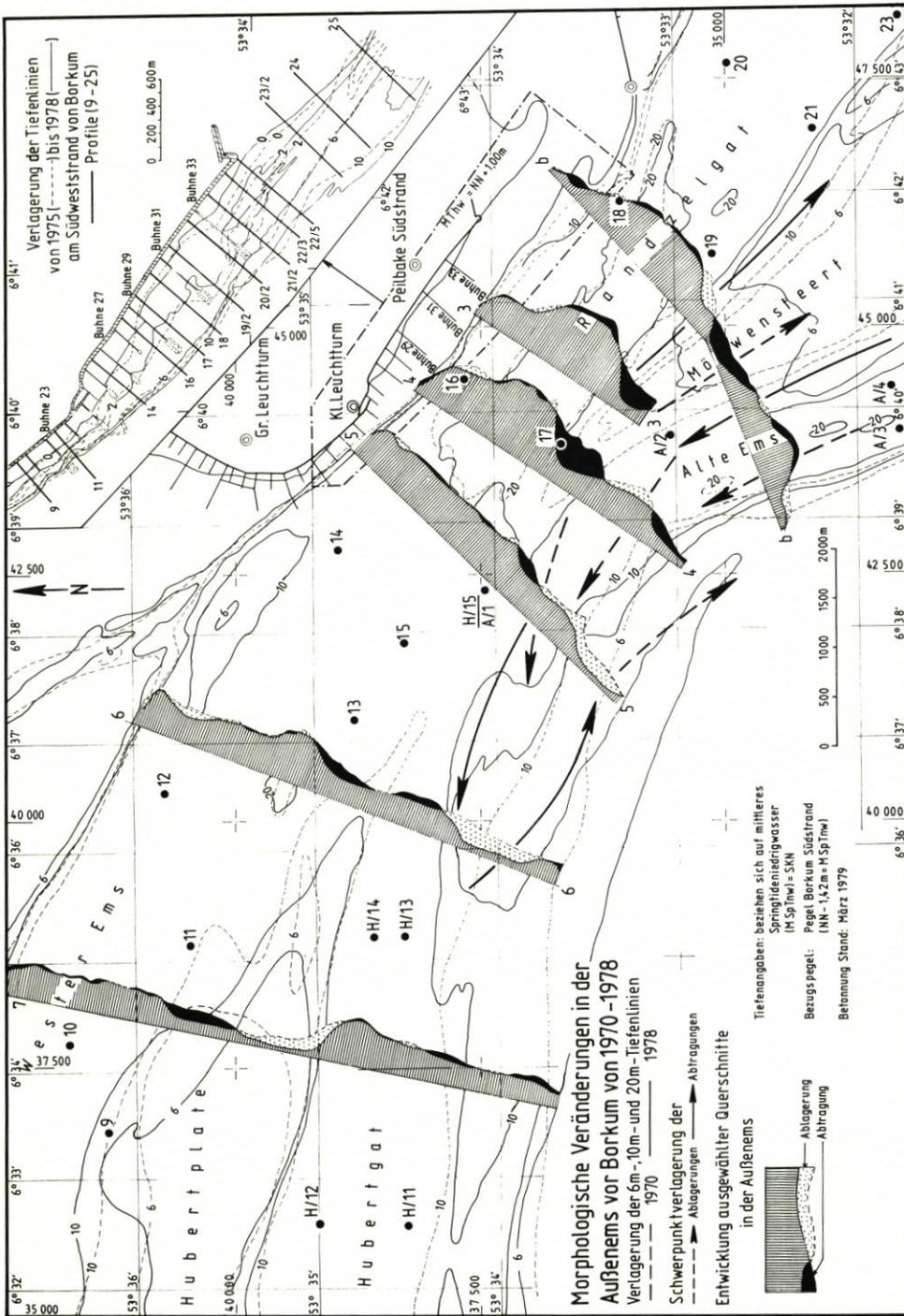
Im Mittelpunkt des morphologischen Geschehens steht die Bildung einer neuen Plate (Horsbornplate) und ihre Verlagerung nach Nordwesten, deren Folge, die Umgestaltung des umgrenzenden Meeresbodens samt der Nordspitze des Möwensteerts bis an den Inselsockel Borkums, erkennbar ist (Abb. 4). Die festgestellten Merkmale der morphologischen Prägung (Abbau großer Teile des Möwensteerts und der Hubertplate, Einengung der Alten Ems und des Hubertgats (Abb. 3), Umrissentwicklung sowie Verlagerungstendenzen) weisen auf veränderte hydrologische Verhältnisse hin. Während der erosiven Phase gingen durch Energieabgabe am Boden erhebliche Materialumlagerungen in Suspension, deren Folge eine gewisse Verwilderung im Querschnitt Borkum-Rottum ist.

Die Entwicklung verläuft in den einzelnen Jahren nicht immer eindeutig in resultierender Richtung. Die Abweichungen bestehen vor allem in dem Wechsel von Sedimentation zu Erosion in örtlich und zeitlich unterschiedlicher Stärke. Die Größen dieser Änderungswerte werden in Tabelle 1 angegeben. Besonders die Profile für den Inselsockel zeigen untereinander erhebliche Schwankungen der Änderungstendenzen, und zwar sowohl horizontal als auch vertikal, wie an dem ausgewählten Beispiel (Abb. 5) sichtbar wird.

Der Strand gehört zu jener geomorphologischen Region, in welcher die Küstengestalt und die in vielfältig miteinander in Wechselbeziehungen stehenden Einflußfaktoren einen spezifischen Formenschatz bilden. Nach LÜDERS (1967) wird der Strand in drei Zonen gegliedert:

- |                     |                               |
|---------------------|-------------------------------|
| der trockene Strand | (zwischen HThw und MThw)      |
| der nasse Strand    | (zwischen MThw und MTnw) und  |
| der Vorstrand       | (zwischen MTnw bis SKN - 7 m) |

Die Breite der drei Zonen ist auf der 4500 m langen Beobachtungsstrecke unterschiedlich ausgebildet. Die Strandbreite nimmt von Nordwesten nach Südosten ständig zu (Abb. 4). Auf dem früheren befestigten Abschnitt vor Borkum bis Buhne 27 folgt auf den flach geböschten schmalen Strand ein relativ steiler Vorstrand mit einem deutlich ausgebildeten Gefälleknick in der SKN-4-m-Tiefenlinie. Erst südöstlich der Buhne 27 wird der Strand breiter. Die mittleren Neigungen betragen für den trockenen Strand 1:30 bis 1:40, für den nassen Strand 1:40 bis 1:50 und im oberen Teil des Vorstrandes 1:80 bis 1:200 bis zum Gefälleknick.



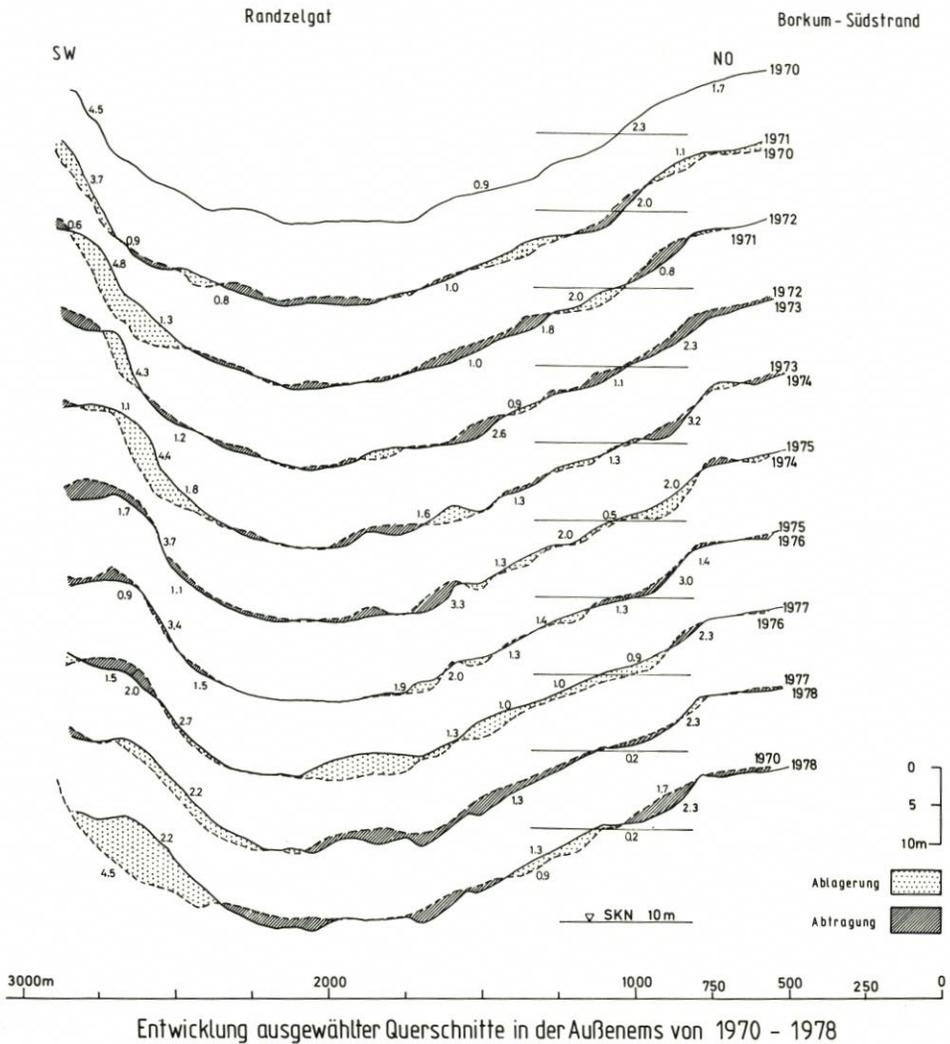
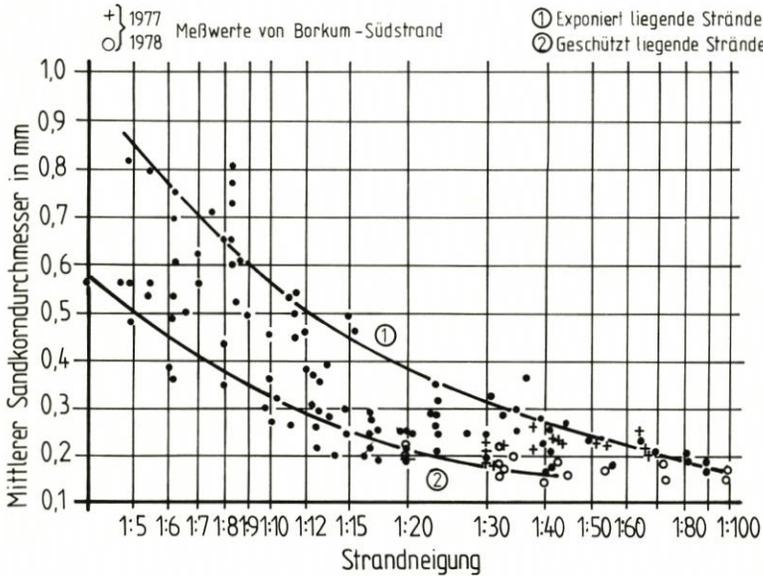


Abb. 5

Die Strandneigung zeigt deutliche Abhängigkeiten zu anderen Parametern, wie zu mittlerem Korndurchmesser, ähnlich entsprechenden Untersuchungen für Strände an der südlichen Nordseeküste (CHRISTIANSEN, 1976). Die Meßwerte, eingetragen in das vorhandene Diagramm, ergeben eine relativ enge Streuung. Der Mittelwert zeigt ebenfalls gute Übereinstimmung zu der gegebenen Ausgleichsfunktion (Abb. 6).

Der Vergleich der Strandprofile und der Verschiebung der Tiefenlinien gestattet nur die Aussage, daß die Veränderungen in den Jahren 1975 bis 1978 örtlich verschieden sind. Der Abschnitt vor den älteren Bauwerken (Buhne 21 und 27) verhält sich relativ stabil. Die deutliche Ausräumungszone des nassen und des oberen Drittels des Vorstrandes mit einem ausgeprägten Maximum von 70 bis 90 m (Abb. 4) beginnt in der Südostseite der Buhne 31. Erst auf dem südlichsten Teil des unbefestigten Südstrandes scheint die Niveauänderung ähnlich wie in einer ungezwungenen Küstenzone zu verlaufen.

## Strandneigung und Korndurchmesser vor den Küsten der USA (nach Wiegel, 31 ) und vor der Küste von Borkum



## Strandneigung und Korndurchmesser im Sommerprofil

Vergleich amerikanischer Untersuchungen (WIEGEL, 31 ) mit denen vor der deutschen und niederländischen Nordseeküste im Gezeitenbereich (Christiansen 6 ), ergänzt durch die

Sandkorn- $\phi$  Werte von Borkum-Südstrand  
 $d_{50}$  (mm)

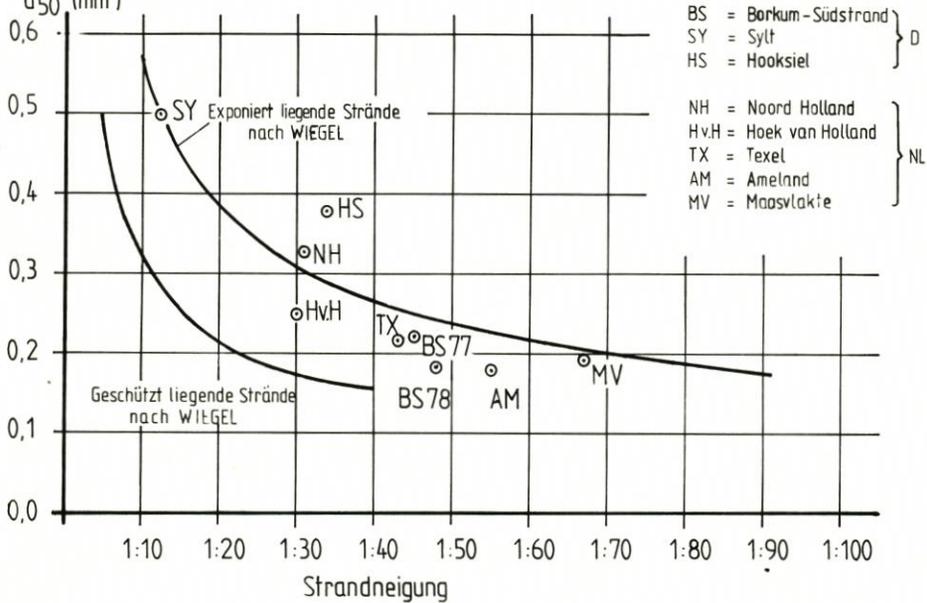


Abb. 6





Die Strandneigungen und die Höhe des Strandes unterliegen Schwankungen innerhalb der Jahrespeilungen. Die mittlere monatliche vertikale Bewegung der vor dem Deckwerk gelegenen ersten 50 m während der Meßperiode 1974 bis 1976 beträgt zwischen 17 und 30 cm/Monat. Mit der Entfernung von der Uferlinie nehmen innerhalb der Profile die Abweichungen zu. An einzelnen Punkten (Buhne 33) können die Änderungen bis zu 1,20 m/Monat betragen. Die bestehenden Entwicklungstendenzen zeigen eine Instabilität des Reliefs mit zunehmender Schwankungsbreite außerhalb der geschützten Abschnitte und mit der Entfernung von der Uferlinie. Die sichtbare Entwicklung des Inselsockels läuft teilweise entgegengesetzt zu der Formung des Strandes.

Die wichtigsten Formenkreise für die Veränderungen sind folgende morphologische Strukturen:

- a) die formbeständige Insel Borkum und der relativ stabile Inselkern von Rottum mit den zugehörigen Wattgebieten, die nur säkularen Änderungen unterworfen sind,
- b) die Kernbereiche der Platen (Hubertplate, Möwensteert) bzw. der Teilrinnen (Westerems, Randzelgat) mit größerer Beweglichkeit und häufigen Umlagerungen in ihren Randbereichen,
- c) die kurzlebigen Formen, wie die Horsbornplate, die zyklisch-periodisch sich immer wieder vor Rottumeroog bildet, sich vom Wattvorsprung löst und nach Norden wandert,
- d) schließlich der Strand mit seiner spezifischen Eigenart.

#### 4.2 Verteilung der Korngrößen

Obwohl der größte Teil des Raumes von gut sortierten Sanden mit Medianwerten von 0,1 bis 0,2 mm bedeckt wird, läßt die kartographische Wiedergabe der Kornkennwerte zwei deutlich unterscheidbare Bereiche erkennen (Abb. 7, 8):

- a) Meeresgrund und Inselsockel
- b) Strand und Vorstrand

Die Grundzüge der Korngrößenverteilung sind in küstenparallele Streifen zerlegbar. Nach KÖSTER (1979) kann die Sedimentbedeckung des Meeresbodens als eine Abfolge von Ausräumungszone (Zentren von grobem Material mit Medianwerten von  $> 0,5$  mm) und Wandersanden (Medianwert 0,1 bis 0,2 mm) aufgefaßt werden. Der Ausräumungsvorgang erfaßt zunächst die schnell beweglichen Feinsandfraktionen, die durch die kritischen Geschwindigkeiten am schnellsten erodiert werden (HJULSTRÖM, 1935). Zurück bleiben grobe Korngemische, wahrscheinlich aus pleistozänem Material stammend. Der angrenzende Bereich des Vorstrandes und Strandes weist wesentlich feineres und einheitliches Material auf, in dem allerdings Nester von verhältnismäßig feinkörnigen Sedimenten anzutreffen sind (Abb. 8). Nach den bestehenden Wind- und Seegangverhältnissen dürften in diesen Strandregionen keine schlickhaltigen Ablagerungen vorkommen. Die Ursache mag in der Tatsache liegen, daß dort vorübergehend die Kleie des Inselsockels zutage treten. Der seegangsbedingte Wechsel in den dynamischen Bedingungen kann als Veränderung der Korngrößenzusammensetzung (Abb. 9), die in den Sommermonaten eingetreten ist, gedeutet werden.

#### 5. Wechselbeziehungen zwischen Küste und Meer hinsichtlich des Gesamttransports und der Morphogenese

Die Morphogenese der Emsmündung kann als Ergebnis langfristiger Entwicklungsprozesse aufgefaßt werden, die durch kurzfristig wechselnde Bedingungen überlagert werden.

Profil	Strandneigung MTnw bis MThw 20.6.-5.7.1977	Korndurch- messer $d_{50}$ in mm	Strandneigung MTnw bis MThw 21.3.-27.4.1978	Korndurch- messer $d_{50}$ in mm
22/5	1 : 30 1 : 30	0,230 0,215	1 : 20	0,205
22/3	1 : 38 1 : 38	0,210 0,255	1 : 43 1 : 20	0,190 0,215
21/2	1 : 65 1 : 65 1 : 43	0,245 0,250 0,238	1 : 33 1 : 71 1 : 100 1 : 100	0,187 0,192 0,17 0,18
20/2	1 : 20	0,195	1 : 32 1 : 32	0,165 0,184
18	1 : 55 1 : 55 1 : 31 1 : 30	0,220 0,220 0,190 0,192	1 : 34 1 : 55 1 : 45 1 : 72 1 : 72	0,2 0,18 0,167 0,157 0,16
17	1 : 34 1 : 42 1 : 67	0,220 0,232 0,201	1 : 33 1 : 33 1 : 40 1 : 34	0,195 0,225 0,152 0,225
im Mittel	1 : 45	0,221	1 : 48	0,186

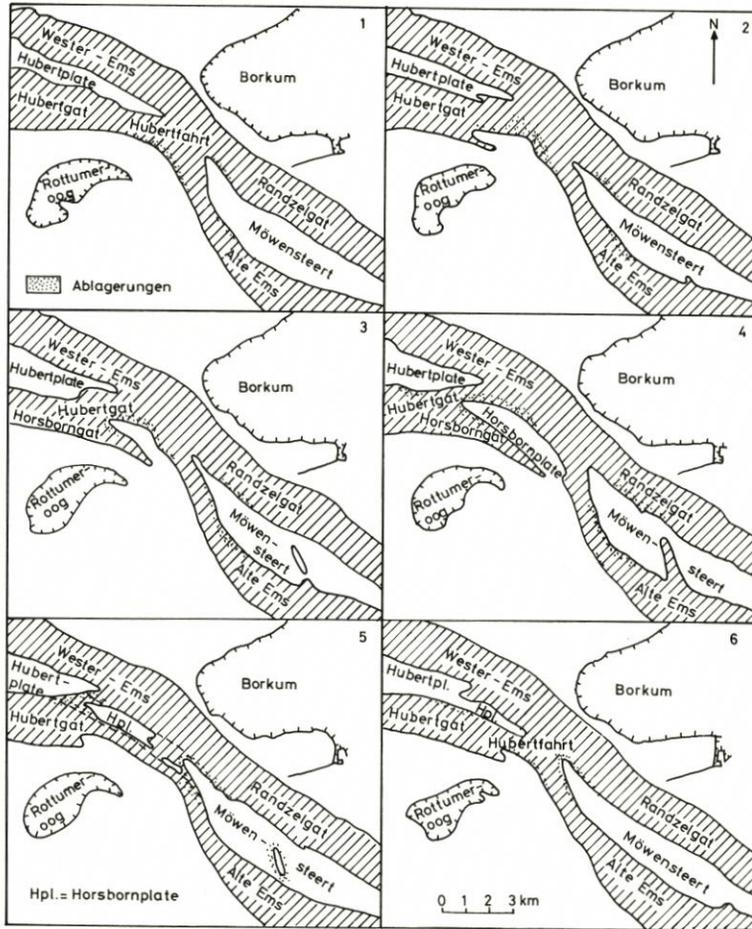
Strandneigung und Korndurchmesser auf dem Südstrand von Borkum (Strandabschnitt Bühne 29-Ende des Deckwerkes)

Abb. 9

Vorübergehend kommt es zu verstärktem Einfluß eines oder auch mehrerer Faktoren. Die Frage ist, ob solche unperiodischen Einflüsse natürlicher oder künstlicher Art permanente Umgestaltung bewirken oder lediglich den bestehenden überregionalen Entwicklungsablauf zeitweise verstärken oder aufheben. Die aus dem Beobachtungsmaterial erkannte Dynamik des Raumes bietet eher eine Modellvorstellung als eine endgültige Erklärung über die Entwicklungstendenzen.

Der Ablauf der Prozesse wird in der Abb. 10 mit den sechs typischen Phasen schematisch dargestellt.

Die in der Anfangsphase starke Vorschüttung der Sedimente am nordöstlichen Wattvorsprung vor Rottum leitet einen Prozeß ein, dessen Folge eine Reihe von Umgruppierungen der Makrostrukturen ist. Mit der Entstehung der (Neuen) Horsbornplate ist die Umformung des umliegenden Raumes gekoppelt, und zwar im wesentlichen des Hubert-, Horsborn- und Randzelgats, des Möwensteerts und der Alten Ems. Der Bewegungsablauf ist zyklisch-periodischer Natur (SAMU, 1972 u. 1978). Unter dem äußeren Zwang der wachsenden Plate beginnt der Flutstrom stärker von Süden einzuströmen und bildet das Horsborngat, das sich gegenwärtig an die Alte Ems angenähert hat. Nach dem Durchbruch verlagert sich die Plate rasch nach Nordwesten, und sie findet an der Hubertplate Anschluß mit einer Verbindung zum Möwensteert. Aus der Verlagerungsrichtung der Sedimentationsschwerpunkte muß geschlossen werden, daß die mit der Flutströmung aus Westen eindringende Sedimentmenge teilweise durch die Ebbströmung zurücktransportiert wird, zusätzlich genährt von Materialmengen aus dem erosiven Prozeß in der Alten Ems. Die Beobachtungen deuten auf einen Materialkreislauf hin (Abb. 4). Die Zentren der stärksten Sedimentation wandern entlang der Nordostseite der Horsbornplate nach außen und an der Südwestseite umgekehrt nach innen. Die Folge dieses Prozesses ist die Einengung der Hauptfahrrinne (Hubertgat) durch die nach



### Schematische Darstellung der Entwicklung einer Plate in der Außenems zwischen Borkum und Rottumer oog

Abb. 10

Nord-Nordwesten sich bewegende Plate. Das Fahrwasser auf der erforderlichen Tiefe zu halten, ist nur durch Baggerungen möglich.

Der Stauungseffekt der Horsbornplate steuert auch die Ausräumung des Untergrundes in dem nördlichen Möwensteert nach Südosten längs der Platenachse. Die stetige Erosion führt zur Neuverteilung des Materials. An der Ostseite entstehen in das Randzelgat hinein Ablagerungen mit südöstlichen Verlagerungstendenzen, und an der Westseite werden ebenfalls erhebliche Sedimentmengen abgesetzt, die langsam nach Norden vorwachsen. Die soeben angedeuteten Zusammenhänge beeinflussen auch je nach der Lage der Platen und Rinnen die Formung des Inselsockels. Während der Nordbewegung der Horsbornplate und des Anschlusses an die Hubertplate (Abb. 10) besteht eine stärkere Erosion der Rinnenböschung an der Borkumer Seite (Abb. 5).

Westerems

Zeit	Materialumlagerungen in m <sup>3</sup>			
	Abtrag	Ablagerung	Überschuß(+) o. Defizit(-)	Verklappte Baggermengen
1970 - 1971	3 725 000	1 525 000	- 2 200 000	5 250 000
1971 - 1972	2 168 750	5 918 750	+ 3 750 000	4 842 810
1972 - 1973	6 275 000	5 687 500	- 587 500	7 243 100
1973 - 1974	2 475 000	3 750 000	+ 1 275 000	6 692 330
1974 - 1975	2 106 250	4 206 250	+ 2 100 000	3 086 120
1975 - 1976	2 362 500	4 718 750	+ 2 356 250	3 272 060
1976 - 1977	5 106 250	2 100 000	- 3 006 250	7 081 250
1977 - 1978	3 075 000	5 287 500	+ 2 212 500	8 362 500
1970 - 1978	27 293 750	33 793 750	+ 5 900 000	60 487 500
1970 - 1978*	7 393 750	13 293 750	+ 5 900 000	20 687 500

Hubert - Plate

Zeit	Materialumlagerungen in m <sup>3</sup>			
	Abtrag	Ablagerung	Überschuß(+) o. Defizit(-)	Baggermengen
1970 - 1971	875 000	981 250	+ 106 250	1 856 250
1971 - 1972	2 850 000	1 725 000	- 1 125 000	4 575 000
1972 - 1973	1 606 250	1 700 000	+ 93 750	3 306 250
1973 - 1974	1 981 250	856 250	- 1 125 000	2 837 500
1974 - 1975	1 125 000	1 850 000	+ 725 000	2 975 000
1975 - 1976	1 025 000	1 868 750	+ 843 750	2 893 750
1976 - 1977	2 675 000	1 281 250	- 1 393 750	3 956 250
1977 - 1978	1 193 750	2 481 250	+ 1 287 500	3 675 000
1970 - 1978	13 331 250	12 743 750	- 587 500	26 075 000
1970 - 1978*	6 225 000	5 637 500	- 587 500	11 862 500

\* errechnet aus dem Vergleich der beiden Jahre

Hubertgat

Zeit	Materialumlagerungen in m <sup>3</sup>			
	Abtrag	Ablagerung	Überschuß(+) o. Defizit(-)	Baggermengen
1970 - 1971	2 493 750	6 112 500	+ 3 618 750	415 000
1971 - 1972	6 243 750	3 056 250	- 3 187 500	1 600 800
1972 - 1973	4 606 250	5 668 750	+ 1 062 500	1 457 200
1973 - 1974	3 843 750	3 787 500	- 56 250	876 800
1974 - 1975	2 331 250	9 706 250	+ 7 375 000	1 053 200
1975 - 1976	6 237 500	6 725 000	+ 487 500	999 900
1976 - 1977	6 068 750	4 506 250	- 1 562 500	750 500
1977 - 1978	6 006 250	8 368 750	+ 2 362 500	794 000
1970 - 1978	37 831 250	47 931 250	+10 100 000	85 762 500
1970 - 1978*	10 418 750	20 518 750	+10 100 000	30 937 500

Möwensteert

Zeit	Materialumlagerungen in m <sup>3</sup>			
	Abtrag	Ablagerung	Überschuß(+) o. Defizit(-)	Baggermengen
1970 - 1971	1 300 000	2 125 000	+ 825 000	3 425 000
1971 - 1972	1 225 000	2 250 000	+ 1 025 000	3 475 000
1972 - 1973	2 931 250	1 243 750	- 1 687 500	4 175 000
1973 - 1974	1 125 000	2 037 500	+ 912 500	3 162 500
1974 - 1975	1 531 250	1 806 250	+ 275 000	3 337 500
1975 - 1976	1 062 500	725 000	- 337 500	1 787 500
1976 - 1977	2 756 250	668 750	- 2 087 500	3 425 000
1977 - 1978	118 750	1 012 500	+ 893 750	1 131 250
1970 - 1978	12 050 000	11 868 750	- 181 250	23 918 750
1970 - 1978*	6 937 500	6 756 250	- 181 250	13 693 750

Tab. 1

## Alte Ems

Zeit	Materialumlagerungen in m <sup>3</sup>				
	Abtrag	Ablagerung	Überschuß (+) o. Defizit (-)	Baggermengen	Materialumsatz
1970-1971	4 037 500	4 437 500	+ 400 000		8 475 000
1971-1972	4 100 000	2 775 000	- 1 325 000		6 875 000
1972-1973	3 662 500	3 018 750	- 643 750		6 681 250
1973-1974	2 787 500	3 075 000	+ 287 500		5 862 500
1974-1975	4 068 750	1 481 250	- 2 587 500		5 550 000
1975-1976	5 150 000	3 631 250	- 1 518 750		8 781 250
1976-1977	3 287 500	2 375 000	- 912 500		5 662 500
1977-1978	1 425 000	3 162 500	+ 1 737 500		4 587 500
1970-1978	28 518 750	23 956 250	- 4 562 500		52 475 000
1970-1978*	9 587 500	5 025 000	- 4 562 500		14 612 500

## Randzelgat

Zeit	Materialumlagerungen in m <sup>3</sup>				
	Abtrag	Ablagerung	Überschuß (+) o. Defizit (-)	Verklappte Baggermengen	Materialumsatz
1970-1971	3 231 250	2 575 000	- 656 250	3 239 370	5 806 250
1971-1972	5 218 750	2 331 250	- 2 887 500	287 990	7 550 000
1972-1973	5 606 250	2 756 250	- 2 850 000		8 362 500
1973-1974	4 843 750	1 875 000	- 2 968 750		6 718 750
1974-1975	2 500 000	4 800 000	+ 2 300 000		7 300 000
1975-1976	2 656 250	5 268 750	+ 2 612 500		7 925 000
1976-1977	4 912 500	3 968 750	- 943 750		8 881 250
1977-1978	4 337 500	4 706 250	+ 368 750		9 043 750
1970-1978	33 306 250	28 281 250	- 5 025 000		61 587 500
1970-1978*	12 906 250	7 881 250	- 5 025 000		20 787 500

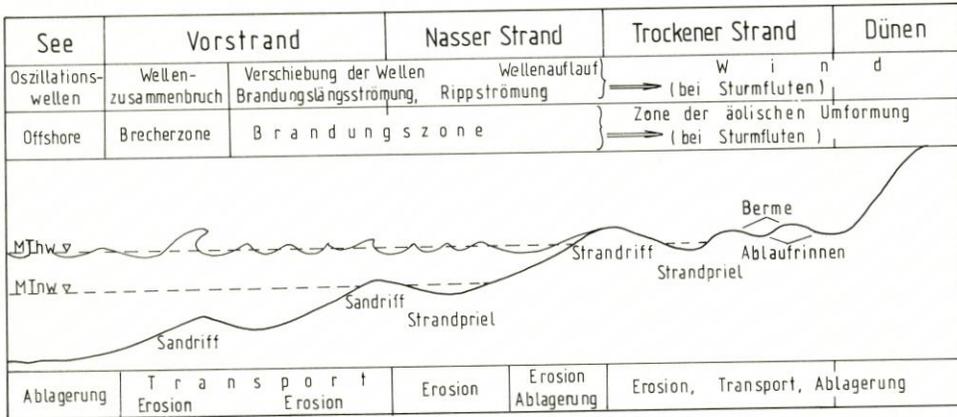
## Untersuchungsgebiet Emsmündung

Zeit	Materialumlagerungen in m <sup>3</sup>					
	Abtrag	Ablagerung	Überschuß (+) o. Defizit (-)	Baggermengen	Verklappte Baggermengen	Materialumsatz
1970-1971	15 662 500	17 756 250	+ 2 093 750	415 000	3 239 370	33 418 750
1971-1972	21 806 250	18 056 250	- 3 750 000	1 600 800	5 130 800	39 862 500
1972-1973	24 687 500	20 075 000	- 4 612 500	1 457 200	7 243 100	44 762 500
1973-1974	17 056 250	15 381 250	- 1 675 000	876 800	6 692 330	32 437 500
1974-1975	13 662 500	23 850 000	+ 10 187 500	1 053 200	3 086 120	37 512 500
1975-1976	18 493 750	22 937 500	+ 4 443 750	999 900	3 272 060	41 431 250
1976-1977	24 806 250	14 900 000	- 9 906 250	750 500		39 706 250
1977-1978	16 156 250	25 018 750	+ 8 862 500	794 000		41 175 000
1970-1978	152 331 250	157 975 000	+ 5 643 750	7 947 400		310 306 250
1970-1978*	53 468 750	59 112 500	+ 5 643 750			112 581 250

\*errechnet aus dem Vergleich der beiden Jahre

Tab. 1

Außer den sichtbaren morphologischen und granulometrischen Hinweisen gibt es neben der vorherrschenden küstenparallelen Materialbewegung auch Anzeichen durch die Leitstoffmessungen (BAW-AK 1977 u. 1977/78) für eine ab- und auflandige Komponente der Materialzufuhr (Abb. 8). Der Scheitel der hufeisenförmigen Insel ist der vorwiegend aus westlicher Richtung kommenden Wellenbewegung entgegengerichtet. In erster Linie bilden das Wellenklima, aus dem die Brandungskräfte resultieren, die Gezeitenhöhe und die Morphologie die dynamischen Bedingungen, die zur Veränderung des Strandes, zur Entwicklung seines Formenschatzes und zum Materialtransport führen. Das verallgemeinert dargestellte Modell (Abb. 11) verdeutlicht die Verflechtung der morphologischen Gegebenheiten mit den hydrologischen Kräften.



Schematische Darstellung eines Strandprofils in Abhängigkeit von den gestaltenden Kräften (abgeändert nach Ingle 15)

Abb. 11

Die Brandungszone bildet einen Streifen starker Wechselwirkungen zwischen Boden und Wasser mit großen Energieübertragungen (FÜHRBÖTER, 1971). Das von den Brandungskräften vom Boden gelöste Material wird dann von dieser Strömung strandparallel in südöstliche Richtung verfrachtet. Die Buhnen unterbrechen die Brandungslängsströmung und damit die Materialbewegung. Die Ausbildung der typischen Strandformen (Sandriffe, Großrippel und Strandpriele) zwischen den Buhnenfeldern ist unvollständig oder bleibt aus; erst am Südstrand hinter dem Deckwerk treten die zahlreichen Transportkörper deutlicher hervor. Eigentlich nur während erhöhter Wasserstände findet ein Materialversatz über die Buhnen statt (BAW-AK 1978b). Gegenwärtig scheint am Südweststrand auf dem befestigten Strandabschnitt (bis Buhne 31) bei dem erzwungenen Gleichgewichtsregime (SONU et al., 1967) zwischen Abtrag und Anlandung ein ausgewogenes Verhältnis zu herrschen (BAW-AK, 1977/78). Für die Erhaltung der Stabilität des Strandes ist die Höhe des Sedimentangebotes ein erstrangiges Problem. Die Quelle des Materials liegt in der Nordsee. Die von der See kommenden Partikel werden unmittelbar der Uferzone zugeführt, oder sie entstammen den an den Weststrand angelagerten Riffen, die sich zeitlich in unregelmäßigen Abständen der Küste nähern, um sich dort schließlich dem Inselstrand anzugliedern. Der Verlauf der Entwicklung eines solchen Riffes wurde in der letzten Zeit durch vergleichende Luftbildaufnahmen festgehalten (LUCK u. WITTE, 1974). Aus diesem Nährgebiet im Westen der Insel wird augenscheinlich die Hauptmenge des Sandes und des Vorstrandes im oberen Drittel an das Südostende Borkums

verdriftet. Möglicherweise gelangen in die Bühnenfelder Sandmengen auch aus den Verklappungen, die zwischen den Tonnen 12 und 14 (Abb. 1) stattgefunden haben und einen platenähnlichen Körper entstehen ließen.

## 6. Ausblick

Die Auswertung der vorhandenen Meßunterlagen und der großen Anzahl von Bodenproben ermöglichte es, einige Zusammenhänge über die Veränderung der Morphologie unter Berücksichtigung der anthropogenen Einflüsse zu beurteilen. Allerdings haben die Erfahrungen gezeigt, daß, solange für wichtige Parameter keine gleichzeitigen Meßreihen vorliegen, die Detailfragen (Größe der Materialmenge, Transportrichtungen, Kausalität zwischen Seegang und morphologischer Entwicklung) nicht genügend beantwortet werden. Über die Erarbeitung dieser Studie hinaus, die zeitlich nur einen Ausschnitt der Entwicklung abdeckt und eine nicht abgeschlossene Phase der gestaltenden Vorgänge umfaßt, sind weitere Untersuchungsreihen anzustreben.

## 7. Schriftenverzeichnis

- BUNDESANSTALT FÜR WASSERBAU – AUSSENSTELLE KÜSTE: Untersuchung der Sandbewegung mit radioaktiven Isotopen in der Westerems bei Borkum 1973. Unveröff. Bericht, 1974.
- BUNDESANSTALT FÜR WASSERBAU – AUSSENSTELLE KÜSTE: Gutachtliche Stellungnahme zur Sicherung der Südküste der Insel Borkum. Unveröff. Bericht, 1977.
- BUNDESANSTALT FÜR WASSERBAU – AUSSENSTELLE KÜSTE: Untersuchung der Sandbewegung mit radioaktiven Isotopen im Gebiet Randzelgat am Südweststrand von Borkum – April bis Juni 1977. Unveröff. Bericht, 1977/78.
- BUNDESANSTALT FÜR WASSERBAU – AUSSENSTELLE KÜSTE: Baugrundgeologisches Gutachten zum Bau der Bühne 31 u. 33 vor dem Deckwerk Südstrand auf der Insel Borkum, 1976/1977. Unveröff. Bericht, 1977.
- BUNDESANSTALT FÜR WASSERBAU – AUSSENSTELLE KÜSTE: Untersuchung der Sandbewegung in den Bühnenfeldern 29 bis 33 am Südweststrand von Borkum – Oktober 1977 bis Januar 1978. Unveröff. Bericht, 1978.
- BUNDESANSTALT FÜR WASSERBAU – AUSSENSTELLE KÜSTE: Gutachtliche Stellungnahme zur Sicherung der Südküste der Insel Borkum. Unveröff. Bericht, 1978.
- CHRISTIANSEN, H.: Umformung von Sandstränden durch Sturmfluten. *Hamburger Küstenforschung*, H. 35, 1976.
- DECHEND, W.: Die geologischen Untersuchungen in der Ems. Unveröff. Bericht des WSA Emden, 1950.
- DEUTSCHES HYDROGRAPHISCHES INSTITUT: Funkortungsverfahren für die Seevermessung im Nahbereich. Publikation Nr. 2232, Hamburg, 1973.
- FRIEDMAN, G. M.: On sorting, sorting coefficients, and the lognormality of the grain size distribution of sandstones. *J. Geol.* 70, Chicago, 1962.
- FÜHRBÖTER, A.: Über die Bedeutung des Lufteinschlages für die Energieumwandlung in Brandungszonen. *Die Küste*, Heft 21, 1971.
- GÖHREN, H.: Über die Genauigkeit der küstennahen Seevermessung nach dem Echolotverfahren. *Hamburger Küstenforschung*, H. 2, Hamburg, 1968.
- GROTHEHN, D.: Untersuchungen zur Wattvermessung (Dissertation). *Wissenschaftliche Arbeiten der Institute für Geodäsie und Photogrammetrie der TH Hannover*, Nr. 23, Hannover, 1964.
- HOMEIER, H. u. LUCK, G.: Untersuchung morphologischer Gestaltungsvorgänge als Grundlage für die Fortführung des Inselfschutzes am Südweststrand Borkums. *Jahresbericht d. Forschungsstelle f. Insel- u. Küstenschutz d. Niedersächs. Wasserwirtschaftsverwaltung* 1969, Bd. 21, 1971.

- HJULSTRÖM, F. H.: Studies on the morphological activity of rivers as illustrated by the River Fyris. Bull. Geol. Inst. Uppsala, 25, 1935.
- INGLE, J. C.: The movement of beach Sand. Development in Sedimentology 5, Elsevier Pub., Com., Amsterdam, 1966.
- INMAN, D. L.: Measures for describing the size distribution of sediments. J. Sediment. Petrol. 22, Manasha, 1952.
- JANSSEN, TH.: Die neuere Entwicklung des Seegebietes vor Borkum. Abh. Naturw. Ver. Bremen, 1937.
- JESSEN, O.: Die Verlegung der Flußmündungen und Gezeitentiefs an der festländischen Nordseeküste in jungalluvialer Zeit. Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart, 1922.
- KÖSTER, R.: Dreidimensionale Kartierung des Seegrundes vor den Nordfriesischen Inseln. DFG Forschungsbericht „Sandbewegung im Küstenraum“, 1979.
- LANG, A. W.: Untersuchung zum Gestaltungswandel des Emsmündungstrichters von der Mitte des 16. Jahrhunderts bis zum Beginn des 20. Jahrhunderts. Unveröff. Bericht des WSA Emden, 1954.
- LÜDERS, K.: Kleines Küstenlexikon. 2. Aufl., Hildesheim, 1967.
- LUCHT, F.: Die Beschickung von Lotungen im Küstengebiet der Deutschen Bucht und im Wattenmeer. Wasser- und Schifffahrtsdirektion Hamburg in Unterstützung der Dtsch. Forschungsgemeinschaft, 1973.
- LUCK, G. u. WITTE, H. H.: Erfassung morphologischer Vorgänge der Ostfriesischen Riffbögen in Luftbildern. DFG Forschungsbericht „Sandbewegung im Küstenraum“, 1979.
- NIEBUHR, W.: Über die neuere Entwicklung der Außenems und ihre vermutlichen Ursachen. Die Küste, Jg. 1, H. 1, 1952.
- REINECK, H. E.: Sedimentgefüge im Bereich der südlichen Nordsee. Senckenbergiana, 505, 1963.
- SAMU, Gy.: Morphologische und granulometrische Untersuchungen im Seegebiet vor Borkum. Die Küste, H. 23, 1972.
- SAMU, Gy.: Die morphologische Gestaltung des Seegebietes vor Borkum bis zum Südweststrand der Insel unter Berücksichtigung der Korngrößenverteilung. Unveröff. Bericht der BAW/AK, 1978.
- SONU, C. G., McLOY, W. H. u. McARTHUR, D. S.: Longshore Currents and Nearshore Topographics. Proc. 10th Conference on Coastal Engineering, New York, 1967.
- TRASK, P. D.: Origin and environment of source sediments of Petroleum. Houston Gulf, Publ. S. 67, 1932.
- WALGER, E.: Zur Darstellung von Korngrößenverteilungen. Geol. Rundschau, 54, 1965.
- WASSER- UND SCHIFFFAHRTSAMT EMDEN: Verschiedene unveröffentlichte Dienstberichte.
- WIEGEL, R. L.: Oceanographic Engineering. Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, New York, 1964.

# Berechnung der Tide im Elbeästuar mit direkter Kopplung von ein- und zweidimensionalen finiten Elementen

Von Bruno Herrling

## Zusammenfassung

Eine numerische Berechnung der Tide im Elbeästuar wird beschrieben. Bei dem verwendeten neuen Verfahren werden ein- und zweidimensionale finite Elemente direkt miteinander gekoppelt, wobei in jedem Zeitschritt nur ein einziges gemeinsames Gleichungssystem für alle Unbekannten zu lösen ist. Die berechneten Wasserstände werden mit gemessenen Ganglinien an verschiedenen Elbepegeln verglichen.

## Summary

*A numerical computation of the tidal flow in the Elbe Estuary is described. A new method is demonstrated with directly coupled one- and two-dimensional finite elements in one model with solving of only one common set of equations for all unknown parameters in each time step. The computed water levels are compared with measured hydrographs at different gauges on the Elbe River.*

## Inhalt

1. Einführung	59
2. Grundlagen	60
2.1 Eindimensionales Modell	60
2.2 Zweidimensionales Modell	62
3. Kopplung der Modelle	64
4. Numerische Berechnung mit dem Programmsystem MECCA	65
5. Berechnung des Elbeästuars	67
6. Schlußbemerkungen	71
7. Schriftenverzeichnis	72

## 1. Einführung

Die Berechnung von Tideströmungen im ausgedehnten Bereich eines Ästuars erfordert heute auch unter Verwendung von modernen Computern noch größte Anstrengungen, falls ein Stromgebiet mit komplexer Geometrie einbezogen werden muß. Will man den Einfluß einer Baumaßnahme in einer Flußmündung auf die Tideverhältnisse in einer größeren Entfernung flußaufwärts untersuchen, so müssen die Ränder des zu berechnenden Gebietes, auf denen die Wasserstände oder die Strömung vorgeschrieben werden, so weit entfernt vom geplanten Bauvorhaben liegen, daß die Randbedingungen die erwartete veränderte Strömungssituation nicht beeinflussen können. Wie im hier vorgestellten Modell des Elbeästuars kann es vorkommen, daß neben dem Flußlauf mit einer Länge von mehr als hundert Kilometern flußaufwärts gleichzeitig auch ein Teil der offenen See unter Einschluß weit

ausgedehnter Wattflächen vor der Küste modelliert werden muß. Hierbei würde eine nur zweidimensionale Berechnung einen sehr großen numerischen Aufwand erfordern und wäre z. B. im oberen Flußlauf von den Genauigkeitsanforderungen auch nicht notwendig, während eine ausschließlich eindimensionale Betrachtung für den der Küste vorgelagerten offenen Meeresbereich untauglich ist.

Die direkte Kopplung von ein- und zweidimensional berechneten Modellbereichen wird seit einiger Zeit unter Verwendung von expliziten Differenzenverfahren durchgeführt, wo sie nur einen geringen Aufwand erfordert (z. B. SÜNDERMANN, 1975). Aber bei diesen expliziten Modellen müssen aus Stabilitätsgründen sehr kleine Zeitschritte für die Berechnung gewählt werden, die die insgesamt benötigte Rechenzeit stark anwachsen lassen.

Mit dieser Veröffentlichung möchte der Autor nun zeigen, daß es möglich ist, Wasserstände und Strömungsgrößen mit ausreichender Genauigkeit für die Gesamtregion eines Ästuars zu ermitteln, indem ein- und zweidimensionale Finite-Elemente-Berechnungen direkt über gemeinsame Parameter im Übergangsbereich gekoppelt werden. Wenn hierbei ein implizites Verfahren wie im vorliegenden Fall verwendet wird, ist es wichtig, daß alle unbekannt Parameter aus einem gemeinsamen Gleichungssystem bestimmt werden. Bei einer sonst erforderlichen getrennten Berechnung verschiedener Teilmodelle müßte andernfalls im Übergangsbereich z. B. eine in der Natur gemessene Wasserstandsganglinie als Randbedingung vorgegeben werden, die in der Regel nicht bekannt ist.

Als Anwendung des neuen Kopplungsverfahrens wird die Tideberechnung im Elbeästuar beschrieben. Der Flußlauf der Elbe, das Prielsystem der Wattflächen sowie die Jade und der äußere Teil der Weser werden eindimensional modelliert, während der südöstliche Teil der Nordsee und die äußere Elbe zweidimensional berücksichtigt werden. Mit den Ergebnissen wird gezeigt, daß mit dem Modell die Tideströmung in der Gesamtregion des Elbeästuars berechnet werden kann. In einem zweiten Schritt, der in dieser Arbeit nicht enthalten ist, könnten die veränderten hydrodynamischen Zustandsgrößen für den Fall ermittelt werden, daß durch mögliche Baumaßnahmen, etwa im Mündungsbereich der Elbe, die Geometrie des Fließquerschnitts verändert wird.

## 2. Grundlagen

### 2.1 Eindimensionales Modell

Seit der Veröffentlichung von DRONKERS (1969) sind eine Reihe von Publikationen erschienen, die die Berechnung von instationären, verzweigten offenen Gerinnen beschreiben. In dieser Arbeit wird auf die von SCHULZE (1973, 1974) entwickelte Methode zur Erstellung des eindimensionalen Modells zurückgegriffen. Hierbei wird wie üblich von den erweiterten SAINT-VENANTSchen Gleichungen ausgegangen. Formuliert man diese in Abhängigkeit von der Wassertiefe  $h$  und dem Durchfluß  $Q$ , ergeben sich die Kontinuitäts- und Bewegungsgleichungen in der folgenden Form:

$$b \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial s} - q = 0 \quad (1)$$

$$\frac{1}{gA} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{Q}{gA^2} \left( \frac{b_F}{b} + \alpha \right) \frac{\partial Q}{\partial s} + \left( 1 - \frac{Q^2}{gA^3} \alpha b_F \right) \frac{\partial h}{\partial s} - I_s + I_v = 0 \quad (2)$$

In Abb. 1 sind die Bezeichnungen in einem Querschnittsprofil dargestellt. Die Querschnittsfläche kann in einen Fließquerschnitt (schraffiert) und einen Staubereich unterteilt

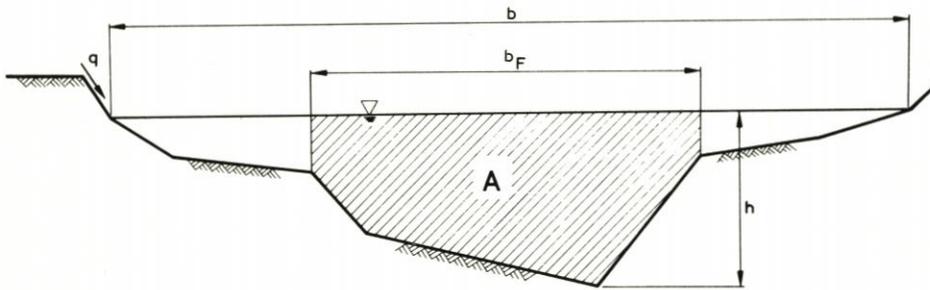


Abb. 1. Bezeichnungen in einem polygonförmigen Querschnitt

werden. In den obigen Gleichungen sind mit den Buchstaben  $s$  und  $t$  die Koordinaten in Richtung der Flußachse und der Zeit, mit  $q$  ein verteilter Zufluß, mit  $g$  die Erdbeschleunigung, mit  $\alpha$  ein Koeffizient zur Berücksichtigung ungleichmäßig geformter Querschnitte, mit  $I_s$  die Neigung der Flußsohle und mit  $I_v$  ein Energieverlustterm gekennzeichnet. Im vorliegenden Fall wird die Bodenreibung mit der MANNING-STRICKLER-Formel

$$I_v = \frac{|v|v}{K_{ms}^2 (D/4)^{4/3}} \quad (3)$$

berücksichtigt, in der  $v$  die mittlere Fließgeschwindigkeit im Querschnitt,  $D$  den hydraulischen Radius und  $K_{ms}$  einen Reibungskoeffizienten darstellen. Letzterer wird bei der Eichung des Modells ermittelt (siehe unten).

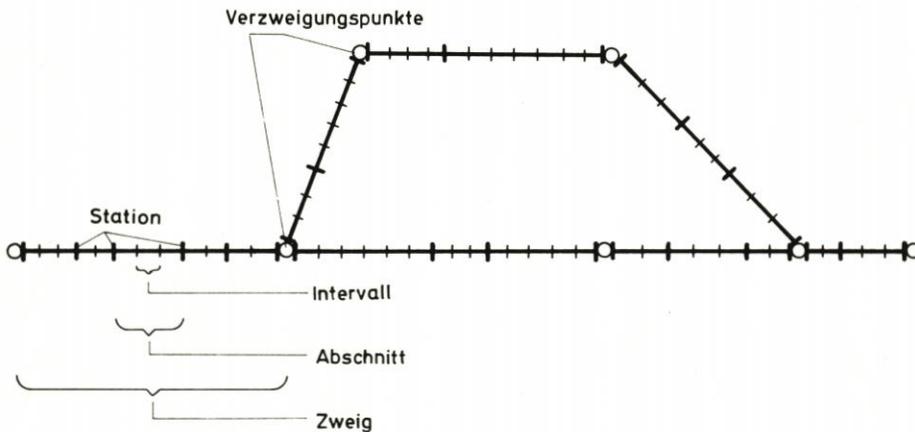


Abb. 2. Unterteilung des eindimensionalen Gerinnesystems

Abb. 2 zeigt die mögliche Unterteilung eines Gerinnesystems (siehe SCHULZE, 1974; HERRLING u. BECKMANN, 1977b). Zweige oder sogenannte Makro-Elemente vereinigen sich an Verzweigungspunkten oder Knoten. Die Makro-Elemente werden unterteilt in Abschnitte und weiterhin in Intervalle oder Mikro-Elemente. Polygonförmige Querschnitte können an jeder Station (Endpunkte von Abschnitten) definiert werden. Querschnittswerte von Intervallgrenzen werden linear zwischen den Stationen interpoliert.

Die numerische Berechnung beginnt bei den Intervallen eines Zweiges. Für ein solches Mikro-Element erhält man vier Elementgleichungen, wenn man auf die Grundgleichungen (1) und (2) das GALERKIN-Verfahren mit linearen Ansatzfunktionen für  $h$  und  $Q$  und das CRANK-

NICOLSON-Verfahren für die Zeitintegration anwendet. Die vier Gleichungen lassen sich durch jeweilige Addition der beiden Kontinuitäts- bzw. Bewegungsgleichungen auf zwei je Intervall reduzieren. Die so erhaltenen Gleichungen des Mikro-Elements sind denen sehr ähnlich, die sich aus dem dritten impliziten Differenzschema von DRONKERS (1969) ergeben. Die unbekannt Parameter  $h$  und  $Q$  an den Unterteilungsknoten eines Zweiges werden nun mit dem Double-Sweep-Verfahren (DRONKERS, 1969) eliminiert. Auf diese Weise bleiben nur noch zwei Gleichungen von jedem Zweig oder Makro-Element übrig, welche den Wasserstand  $h$  und den Durchfluß  $Q$  an den Verzweigungspunkten als unbekannte Parameter enthalten. Diese Elementgleichungen können zum Aufbau eines Gleichungssystems für die Wasserstände im gesamten eindimensionalen System verwendet werden. Hierbei lassen sich die unbekannt Durchflüsse mit Hilfe der Kontinuitätsgleichung eliminieren, die aussagt, daß an allen Verzweigungspunkten die Summe der Zu- und Abflüsse aus den Zweigen gleich Null sein muß. Dies gilt für alle Knoten außer denen an den Enden des Gerinnesystems, wo Randbedingungen für  $h$  oder  $Q$  vorgeschrieben werden müssen. Wenn die Wasserstände  $h$  aus der Lösung des Gleichungssystems bekannt sind, lassen sich in einer Nachlaufberechnung in jedem Zeitschritt die Durchflüsse  $Q$  und weitere  $h$ -Werte an Zwischenpunkten bis hin zu den Intervallgrenzen ermitteln.

## 2.2 Zweidimensionales Modell

Die Grundlage für die Berechnung der zweidimensionalen, vertikal-integrierten Flachwasserwellen oder Tidenströmungen bilden die Kontinuitätsgleichung

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q_i}{\partial x_i} - q^* = 0 \quad (4)$$

und die Bewegungsgleichung

$$\frac{\partial v_i}{\partial t} + v_j \frac{\partial v_i}{\partial x_j} + g \frac{\partial h}{\partial x_i} + \frac{\lambda \sqrt{v_j v_j}}{a + h} v_i - \Omega \varepsilon_{ij} v_j - k_i = 0 \quad (5)$$

In der Kontinuitätsgleichung wird der Durchfluß pro Längeneinheit  $q_i$  später durch die Beziehung

$$q_i = (a + h) v_i \quad (6)$$

ersetzt. In diesen Gleichungen stellen der Wasserstand  $h$ , der von der mittleren Meereshöhe bis zum freien Wasserspiegel gemessen wird, und die zwei vertikal integrierten, horizontalen Geschwindigkeitskomponenten  $v_i$ , die in einem kartesischen Koordinatensystem  $x_i$  definiert sind, die unbekannt Parameter dar. Der Buchstabe  $a$  kennzeichnet die Entfernung zwischen Meeresboden und mittlerer Meereshöhe und  $q^*$  einen Zufluß in das zu berechnende Gebiet. Weiterhin ist ein Term zur Berücksichtigung der Bodenreibung mit einem dimensionslosen Reibungskoeffizienten  $\lambda$ , ein Coriolis-Term mit dem Coriolisparameter  $\Omega$  und einem  $\varepsilon$ -Tensor sowie ein Term  $k_i$  zur Berücksichtigung einer äußeren Kraft (z. B. des Windes) eingeführt.

Das zu berechnende Gebiet wird in dreieckige finite Elemente (Abb. 3) unterteilt. Durch Anwendung des GALERKIN-Verfahrens erhält die Kontinuitätsgleichung (4) nach Wichtung mit der Funktion  $\delta h$  und Umformung mit Hilfe einer partiellen Integration die folgende Form:

$$\iint_{A_t} \left( \delta h \frac{\partial h}{\partial t} - \frac{\partial(\delta h)}{\partial x_i} q_i \right) dt dA + \iint_{S_q} \delta h q_i n_i dt dS = \iint_{A_t} \delta h q dt dA + \int_t \delta h_K Q_K dt \quad (7)$$

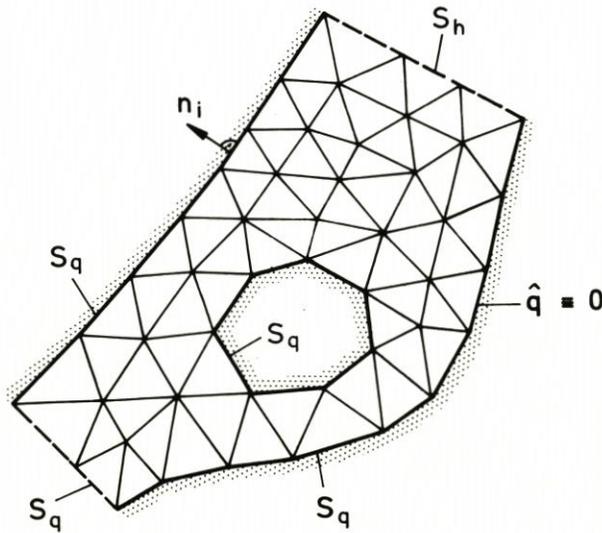


Abb. 3. Diskretisierung und Einteilung der Ränder in der zweidimensionalen Berechnung

Anstelle von  $q^*$  wird ein flächig verteilter Zufluß  $q$  und ein punktförmiger Zufluß  $Q_K$  am Knoten  $K$  des Systems eingeführt. Die Bewegungsgleichungen (5) werden in ähnlicher Weise mit den Funktionen  $\delta v_i$  gewichtet.

Randbedingungen sind die Ganglinien des Wasserstandes oder des Zuflusses über die Ränder:

$$h - \hat{h} = 0 \quad \text{auf } S_h \quad (8)$$

$$q_i n_i + \hat{q} = 0 \quad \text{auf } S_q \quad (9)$$

Der Buchstabe  $\hat{h}$  kennzeichnet einen vorgeschriebenen Wasserstand und  $\hat{q}$  einen senkrecht zum Rand gerichteten, vorgeschriebenen Randzustrom, der längs geschlossener Ränder Null ist. Während Gleichung (8) erst im endgültigen Gleichungssystem berücksichtigt wird, kann die Randbedingung (9) direkt in Gleichung (7) eingesetzt werden.

Unter Verwendung von linearen Ansatzfunktionen für  $h$ ,  $v_i$ ,  $\delta h$  und  $\delta v_i$ , einer üblichen Linearisierung der nichtlinearen Ausgangsgleichungen sowie der CRANK-NICOLSON-Zeitintegration erhält man nach Integration über ein Element neun Elementgleichungen mit neun unbekanntem Parametern. Diese neun Gleichungen werden nun reduziert, indem das Verfahren der hybriden finiten Elemente (HERRLING, 1977a u. 1978) angewandt wird. Hierbei werden die Bewegungsgleichungen nur innerhalb der Elemente erfüllt. Im einzelnen bedeutet dies, daß die sechs Bewegungsgleichungen eines Elementes zunächst so umzuformen sind, daß die sechs Geschwindigkeitskomponenten jeweils als Funktion der drei unbekanntem Wasserstände ausgedrückt werden. Diese Beziehungen werden dann in die drei Kontinuitätsgleichungen des entsprechenden Elements eingesetzt. Auf diese Weise bleiben nur noch drei Gleichungen mit drei unbekanntem Wasserständen pro Element übrig, und diese bilden den Elementanteil zum Aufbau des Gleichungssystems für das Gesamtsystem. Nach Berücksichtigung der Randbedingung (8) kann das globale Gleichungssystem für die Wasserstände gelöst werden. Das Gleichungssystem ist nur ein Drittel so groß wie jenes, welches man bei gleicher Diskretisierung unter Verwendung herkömmlicher Verfahren erhielte.

Die Geschwindigkeitskomponenten werden im Nachlauf elementweise an den drei Knoten eines jeden Elementes berechnet. Wie erwartet, führt dies an den Knoten, die mit

mehr als einem Element verbunden sind, zu unterschiedlichen Werten für die Geschwindigkeitskomponenten. Deshalb ist ein spezieller örtlicher Glättungsprozeß erforderlich, womit schließlich die im nächsten Zeitschritt benötigten Geschwindigkeiten bereitgestellt werden können.

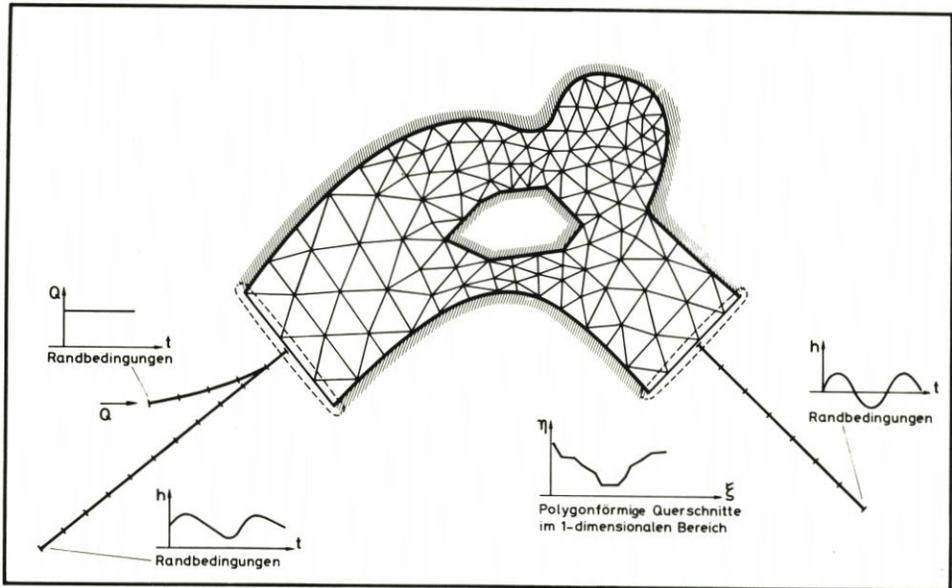


Abb. 4. Skizze zur Darstellung der Kopplung des ein- und zweidimensional berechneten Strömungsbereiches

### 3. Kopplung der Modelle

Die Kopplung der ein- und zweidimensional berechneten Strömungsbereiche (Abb. 4) beruht auf der Verwendung gemeinsamer Parameter, den Wasserständen  $h$ , in den Kopplungsknoten der zwei Diskretisierungssysteme und auf der physikalischen Grundbedingung, daß in diesem Bereich des Modells kein Wasser verloren geht, d. h. die Kontinuitätsbedingung erfüllt ist.

Zur Erläuterung der Vorgehensweise im einzelnen möge zunächst darauf hingewiesen werden, daß in jedem Zeitschritt die Elementgleichungen für den ein- und zweidimensionalen Bereich aufgestellt werden, wie es im letzten Kapitel beschrieben wurde. Anschließend wird mit Hilfe aller Elementmatrizen ein globales Gleichungssystem mit den Wasserständen als den einzigen unbekanntem Parametern aufgebaut. Wie in Abb. 4 dargestellt, werden alle Elementgleichungen, deren zugehörige Knoten zum gleichen Kopplungsbereich gehören (in Abb. 4 jeweils die Knoten, die sich innerhalb der gestrichelten Linie befinden), in dieselbe Gleichung des globalen Gleichungssystems gespeichert. Diese Vorgehensweise wird damit begründet, daß an diesen Kopplungsknoten die Summe der ein- und ausströmenden Wassermengen Null sein muß, wie es entsprechend für das eindimensionale Modell (s. o.) erläutert wurde.

Für die zweidimensionalen Elemente braucht der entsprechende Term  $q_i n_i$  in Gleichung (7) oder die dafür eingesetzte Bedingung (9) nicht bestimmt zu werden, weil der von diesem Randintegral herrührende Wert sich mit dem (unbekannten) Durchfluß  $Q$  aus dem eindimensionalen Modellbereich aufhebt.

In der Berechnung des Elbe-Ästuars werden zwei verschiedene Arten der Kopplung verwendet: neben derjenigen, die oben beschrieben ist, noch eine seitliche Kopplung. Die letztere wird in solchen Fällen angewandt, wo sich infolge des jeweiligen Tidewasserstandes die Uferlinie und damit die äußere Berandung von zweidimensional berechneten Flußläufen laufend verschiebt. Es ist oft vom Rechenaufwand her wirtschaftlicher, diese seitlichen und zeitweise trockenfallenden Flächen durch eine eindimensionale Berechnung zu erfassen, die parallel zum zweidimensional berücksichtigten tiefen Flußbett angesetzt wird, als die wesentlich komplizierteren zweidimensionalen Wattlelemente (HERRLING, 1977c) anzuwenden. In diesem Fall wird zur Einhaltung der Kontinuitätsbedingung nicht die den Rand des zweidimensionalen Bereiches überströmende Wassermenge herangezogen, sondern der Term mit der punktförmigen Quelle  $Q_K$ , wie er in der Gleichung (7) definiert ist. Auch hier bedarf es keiner weiteren Berechnung von  $Q_K$  am Koppelknoten K, da sich diese Größe wie in den anderen geschilderten Fällen mit den Durchflüssen  $Q$  an den Enden der eindimensionalen Zweige aufhebt.

Schließlich sollte noch erwähnt werden, daß in den Koppelknoten der eindimensionalen Berechnung die Wasserstände von der mittleren Meereshöhe aus gemessen werden, wie es entsprechend auch in den zweidimensionalen Elementen erfolgt. Weiterhin sind in diesen Knoten spezielle örtliche Koordinatensysteme einzuführen, so daß die gedrehte Koordinate  $\bar{x}_1$  in die gleiche Richtung weist wie die Koordinate  $s$  in den eindimensionalen Zweigen. Dies ist wegen des örtlichen Mittelungsprozesses der Geschwindigkeitskomponenten in der zweidimensionalen Analysis erforderlich.

Die Kopplung der ein- und zweidimensional berücksichtigten Strömungsbereiche ist anhand einer Berechnung der Strömung in einem Kanal, der an einem Ende geschlossen ist, überprüft worden. Beim Vergleich der Ergebnisse von verschiedenen Berechnungsläufen wurde eine gute Übereinstimmung erzielt. Hierbei erfolgte ein Vergleich der Ergebnisse einer nur eindimensionalen, einer nur zweidimensionalen sowie einer Berechnung, bei der die eine Hälfte des Kanals mit eindimensionalen Gerinneelementen und die andere mit zweidimensionalen Dreieckselementen diskretisiert wurde. Als Randbedingungen sind einmal eine Wasserstandsganglinie (erzwungene Schwingung), die natürlichen Tideverhältnissen entspricht, und in einem zweiten Fall eine einmalige Wasserstandsänderung (freie Schwingung) am offenen Kanalende vorgegeben worden.

#### 4. Numerische Berechnung mit dem Programmsystem MECCA

Das Programmsystem MECCA (*Modular Element Concept for Continuum Analysis*) wird für die numerischen Berechnungen verwendet. Dieses modular aufgebaute System führt die bei der Anwendung der Finite-Elemente-Methode zur Lösung von Anfangs- und Randwertproblemen immer wiederkehrenden Operationen aus, wie z. B. Ein- und Ausgabe, Datenspeicherung auf Hintergrundspeichern, Aufbau und Lösen des Gleichungssystems. Die Eingabe erfolgt mit Hilfe einer problemorientierten Sprache (HERRLING, PFEIFFER u. BEYER, 1979). Für die Speicherung der großen und komplexen Datenmengen ist eine spezielle Datenorganisation erstellt worden.

Die den physikalischen Vorgang beschreibenden Differentialgleichungen und die Eigenschaften eines Elementes werden in einem getrennten Elementprogramm festgelegt, welches an spezielle Moduln oder Bausteine von MECCA als zeitweiliger Overlay angegliedert wird. Dadurch besteht die Möglichkeit, verschiedene Typen von Elementen – in diesem Fall eindimensionale Gerinneelemente und zweidimensionale Dreieckselemente für die Berech-

nung von Tideströmungen – miteinander unter Verwendung gemeinsamer Parameter in den Koppelknoten zu koppeln. Ausführlichere Beschreibungen von MECCA sind bisher von BEYER (1976) sowie von HERRLING, PFEIFFER und BEYER (1979) veröffentlicht worden. MECCA wurde verwendet für die Berechnung von offenen Gerinneströmungen, Flachwasserwellen und Grundwasserströmungen.

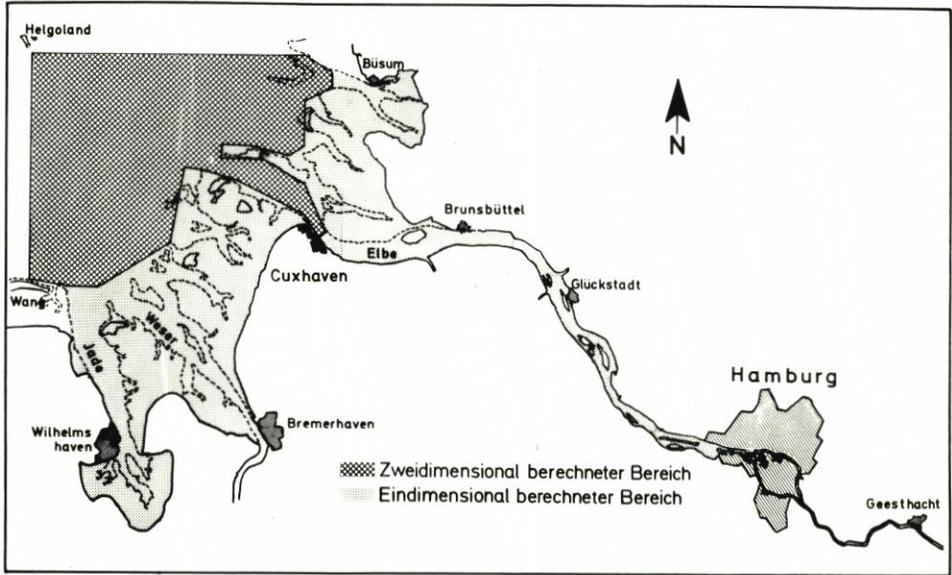


Abb. 5. Lageplan des Elbmodells

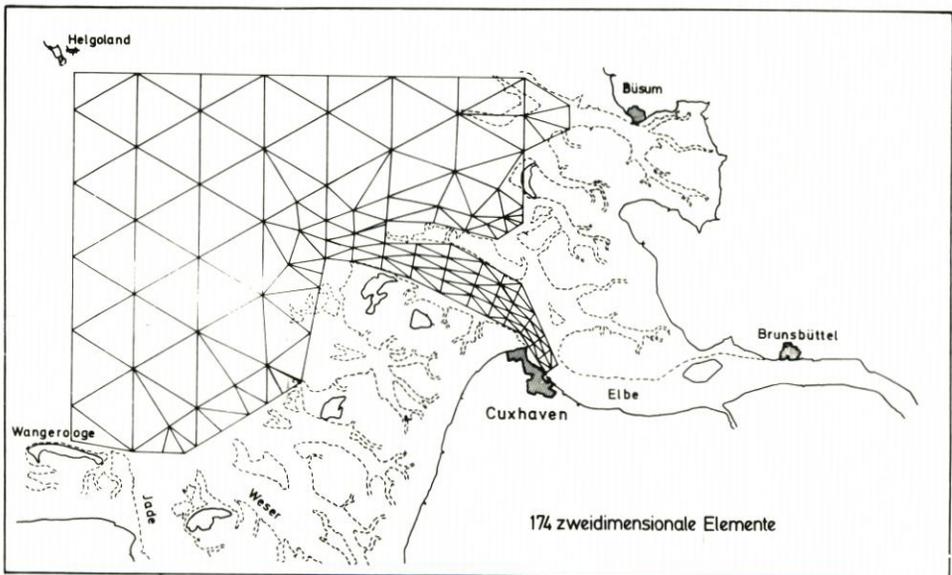


Abb. 6. Elementnetz des zweidimensional berechneten Bereiches

## 5. Berechnung des Elbeästuars

Das Modell des Elbeästuars erstreckt sich von der Linie Wangerooge–Helgoland–Büsum bis zum Elbewehr in Geesthacht, oberstrom von Hamburg (Abb. 5). Es umfaßt damit einen Bereich von insgesamt nahezu 200 km. Das Tidemodell wird durch vorgegebene Wasserstandsganglinien längs des offenen Randes in der Deutschen Bucht angeregt. Im einzelnen werden die gemessenen Ganglinien der Pegel Wangerooge, Helgoland und Büsum verwendet und die Werte von weiteren Zwischenpunkten auf dem Rand durch lineare Interpolation ermittelt. Von oberstrom wird am Wehr in Geesthacht ein konstanter Zufluß von  $200 \text{ m}^3/\text{s}$  als Randbedingung vorgegeben. Der Einfluß der Weser wird durch eine vorgegebene Wasserstandsganglinie in Bremerhaven berücksichtigt. Die Windeinflüsse können vernachlässigt werden, da während des für die Berechnung herangezogenen Zeitraums vom 22. bis 25. August 1976 der Wind sehr schwach war.

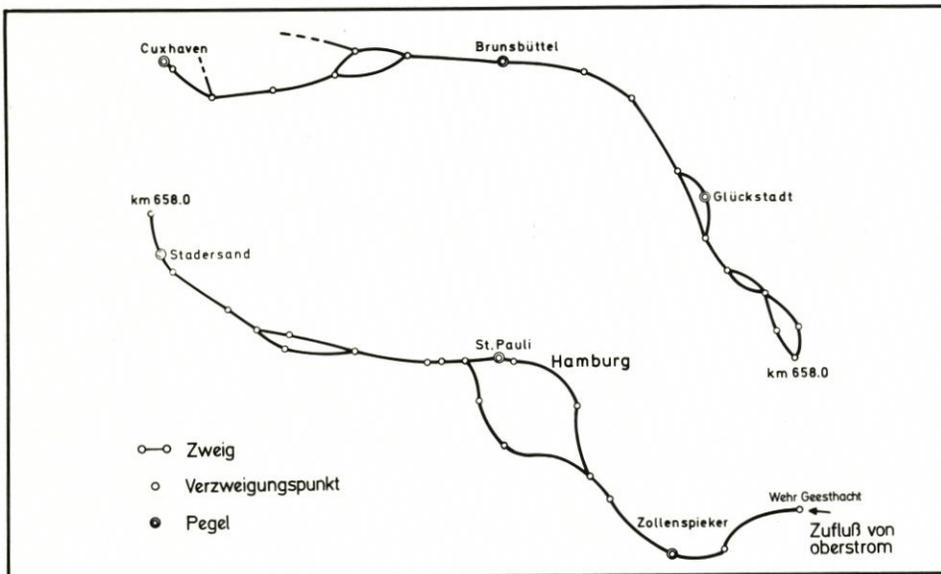


Abb. 7. Untergliederung der Elbe in Zweige

Die offene See und die Elbemündung wird zweidimensional unter Verwendung von 174 dreieckigen Elementen modelliert (Abb. 5 und 6). Die Elbe selbst wird durch ein verzweigtes System von eindimensionalen Zweigen oder Makro-Elementen beschrieben (Abb. 7). Des weiteren berücksichtigen eindimensionale Zweige den Einfluß von Wattflächen bzw. von Prielsystemen, die der Küste vorgelagert sind, sowie von Jade und Weser auf die Tideverhältnisse in der Elbe (Abb. 8). Da mit den Prielsystemen im wesentlichen nur die Füllung und Entleerung der ausgedehnten Wattflächen während der Tide ermöglicht wird und außerdem die jeweiligen Prieleinzugsgebiete weitgehend bekannt sind, werden die wichtigsten Priele und die zugehörigen seitlichen Flächen eindimensional berechnet. Hierbei finden sehr breite und flache Querschnittsflächen Verwendung, die in ihrem tiefsten Punkt jeweils einen äußerst schmalen vertikalen Schlitz aufweisen. Dieser beeinflusst praktisch die Durchflusssmengen nicht und verhindert aber andererseits, daß ein solcher Zweig während der Ebbe trockenfallen kann. Dies vermeidet einen größeren organisatorischen Aufwand während der Berechnung (s.

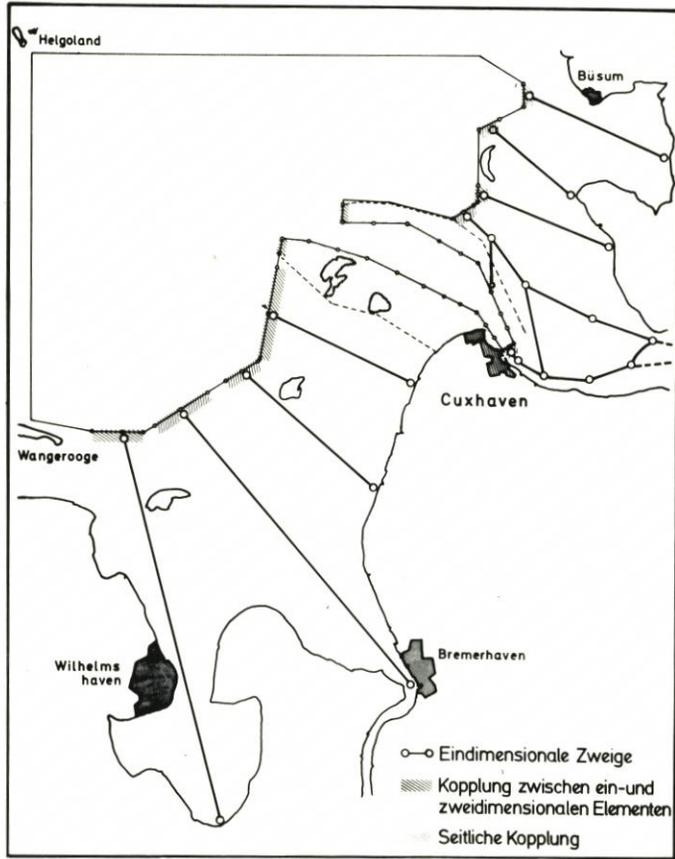


Abb. 8. Berücksichtigung von Jade und Weser sowie der Prielsysteme durch eindimensionale Zweige und Darstellung der verschiedenen Elementkopplungen

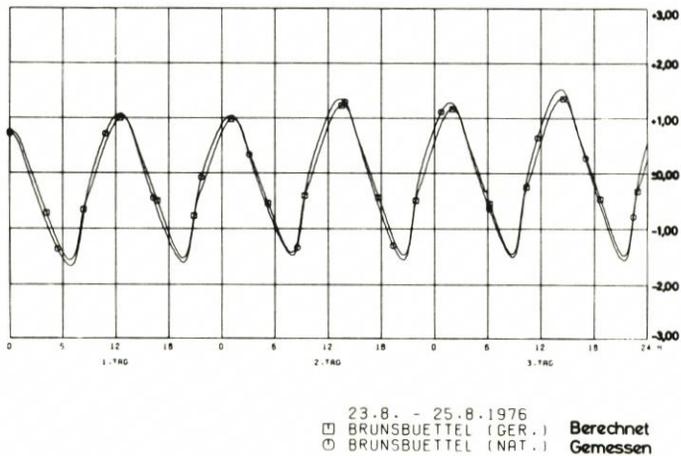


Abb. 9. Vergleich von Wasserstandsganglinien am Pegel Brunsbüttel

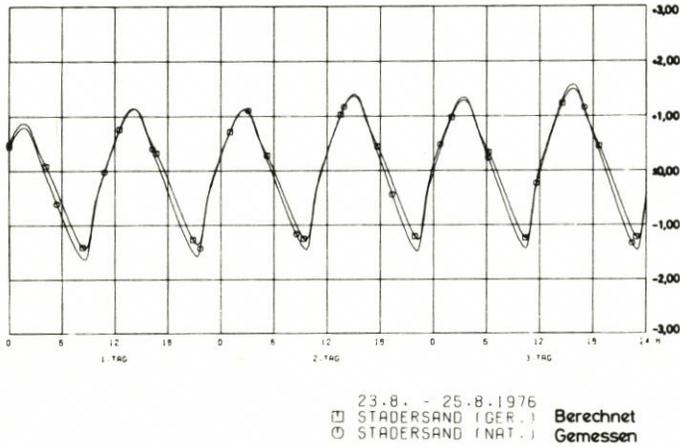


Abb. 10. Vergleich von Wasserstandsganglinien am Pegel Stadersand

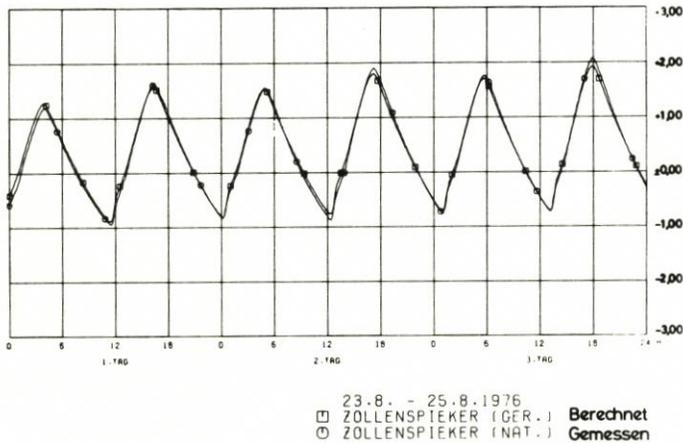


Abb. 11. Vergleich von Wasserstandsganglinien am Pegel Zollenspieker

HERRLING, 1977c), da sich so in jedem Zeitschritt die Anzahl der zu berücksichtigenden Elemente nicht ändert. Für den eindimensional berechneten Bereich werden insgesamt 216 polygonartige Querschnitte verwendet. Der größte Teil davon wird in der Elbe benötigt, wo der Abstand zwischen zwei Profilen nicht größer als 1 km ist. Für die Berechnung werden insgesamt 83 eindimensionale Zweige definiert.

Der Kopplungsbereich des ein- und zweidimensional berechneten Gebietes ist in Abb. 8 dargestellt. Um die während der Flut überströmten Wattflächen im Bereich der Elbemündung zu berücksichtigen, werden seitlich gekoppelte eindimensionale Elemente (Zweige) verwendet, die parallel zum tiefen, zweidimensional berechneten Fahrwasser angeordnet sind. Auch hiermit wird wieder angestrebt, den numerischen Aufwand nicht größer werden zu lassen, als es unbedingt notwendig ist (s. HERRLING, 1977c).

Wenn man die Tideströmung in einem unregelmäßigen Flußsystem eindimensional berechnen will, ist das Modell sorgfältig zu eichen (siehe auch HERRLING u. BECKMANN, 1977b). So ist die Elbe von Geesthacht bis Cuxhaven gesondert geeicht worden, wobei eine

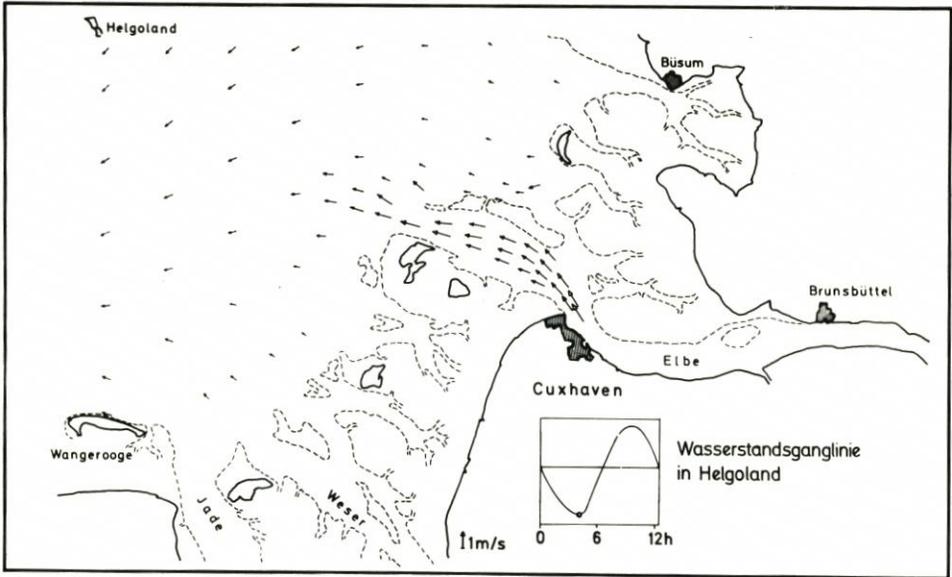


Abb. 12. Geschwindigkeitsvektoren 4 h 10 min nach Tidewasserstand NN in Helgoland

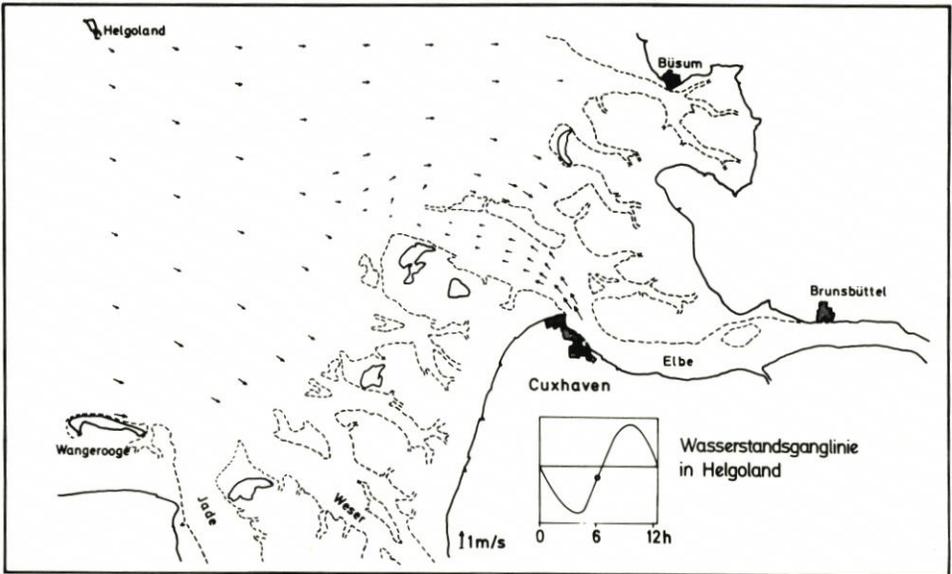


Abb. 13. Geschwindigkeitsvektoren 6 h 10 min nach Tidewasserstand NN in Helgoland

Haupttide verwendet wurde und zahlreiche Wasserstandsganglinien von Pegeln entlang des Flusses vorlagen. Auf diese Weise sind MANNING-STRICKLER-Beiwerte im Bereich von 20 (im Hamburger Hafen) bis zu 67 (in der Nähe von Cuxhaven) ermittelt worden, die weiterhin in einigen Bereichen auch als Funktion der Strömungsrichtung anzusetzen sind. Die so erhaltenen Werte werden unverändert in das gekoppelte Modell übernommen. In den übrigen eindimensionalen Zweigen (Jade, Weser und den Prielen) wird mit  $K_{ms} = 65$  gerechnet und im

zweidimensional berechneten Bereich ein konstanter Reibungsbeiwert  $\lambda = 0,003$  gewählt, wie er häufig verwendet wird. Das gekoppelte Modell wird mit einem Zeitschritt von 10 min berechnet.

Einige Ergebnisse der Berechnung sind in Abb. 9 bis 14 dargestellt. In Abb. 9 bis 11 werden die gerechneten und gemessenen Wasserstandsganglinien der drei Elbpegel Brunsbüttel, Stadersand und Zollenspieker (s. Abb. 7) verglichen. Die Übereinstimmung ist recht gut. Der erste Tag (22. August 1976) ist nicht dargestellt, da hier das Einschwingen des Tide-modells stattfindet. Abb. 12 bis 14 geben die erhaltenen Geschwindigkeitsvektoren im zweidimensional berechneten Bereich für verschiedene Zeitpunkte, bezogen auf die Tideverhältnisse in Helgoland, wieder. Abb. 13 zeigt die Situation unmittelbar bei Flutbeginn in der Elbemündung. In ähnlicher Weise ist die Strömung in der Natur beobachtet worden, nämlich daß die Flut bereits über die nördlich der Elbemündung befindlichen Wattflächen hereinkommt, während die Wassermassen im Hauptfahrwasser noch hinausströmen.

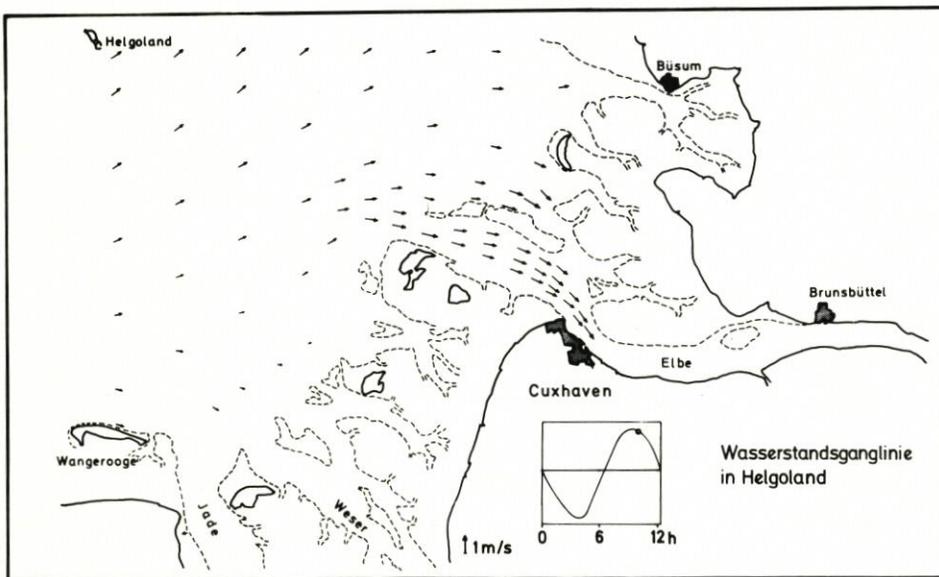


Abb. 14. Geschwindigkeitsvektoren 10 h 10 min nach Tidewasserstand NN in Helgoland

## 6. Schlußbemerkungen

Die Ergebnisse der numerischen Berechnung zeigen, daß die vorgestellte neue Methode der Kopplung von ein- und zweidimensionalen finiten Elementen geeignet ist, die Tideströmung in ausgedehnten Ästuarien zu berechnen. In diesem Zusammenhang sei noch einmal ausdrücklich darauf hingewiesen, daß viel Rechenzeit gespart werden kann, wenn zumindest in Teilen eines Modells eine eindimensionale Berechnung angewandt wird. Unter Verwendung der beschriebenen Kopplung ist es dann immer noch möglich, spezielle Teile des Modells zweidimensional zu diskretisieren, um so z. B. den Einfluß eines Bauwerks in einem Fluß genauer berücksichtigen zu können.

Der Autor dankt der Deutschen Forschungsgemeinschaft, die die Programmentwicklung und die Durchführung der Berechnungen im Rahmen des Sonderforschungsbereiches 79

(SFB 79) „Wasserforschung im Küstenbereich“ in Hannover finanziell unterstützte, ferner Herrn Dr.-Ing. H. HENNLICH für die Eichung des eindimensionalen Elbmodells und den Herren Dipl.-Ing. W. BAUMANN und Dipl.-Ing. A. THÖLE für ihre Unterstützung, diese Berechnungen zu realisieren (BAUMANN, 1977; THÖLE, 1975). Während der Berechnungen war der Autor am Lehrstuhl für Strömungsmechanik der Universität Hannover beschäftigt.

## 7. Schriftenverzeichnis

- BAUMANN, W.: Implizites FE-Modell des Elbeästuars mit direkt gekoppelten Elementen für ein- und zweidimensionale horizontale Strömungen. Diplomarbeit, Universität Hannover, 1977.
- BEYER, A.: Die mathematische Formulierung eines Programmsystems für die FEM. Wiss. Z. Hochsch. Archit. Bauwesen, Weimar, 23. Jahrg., H. 3, 1976.
- DRONKERS, J. J.: Tidal Computations for Rivers, Coastal Areas and Seas. J. Hydr. Div., Vol. 95, No. 1, 1969.
- HERRLING, B.: Eine hybride Formulierung in Wasserständen zur Berechnung von Flachwasserwellen mit der Methode finiter Elemente. Dissertation, Universität Hannover, Fortschr.-Ber. VDI-Z., Reihe 4, Nr. 37, 1977a.
- HERRLING, B. u. BECKMANN, M.: Hydrodynamic State Quantities in the Deepened Weser River. Proc. 17th IAHR Congr., Baden-Baden, Vol. 2, 1977b.
- HERRLING, B.: Ein Finite-Element-Modell zur Berechnung von Tidenströmungen in Ästuarien mit Wattflächen. Die Küste, H. 31, 1977c.
- HERRLING, B.: Computation of Shallow Water Waves with Hybrid Finite Elements. Adv. in Water Resources, Vol. 1, 1978.
- HERRLING, B., PFEIFFER, E. u. BEYER, A.: Das Programmsystem MECCA, ein modulares Elementkonzept für die Kontinuumsanalyse. Angew. Informatik, H. 1, 1979.
- SCHULZE, K.-W.: Eine problemorientierte Sprache für die Dynamik offener Gerinne (DOG). Dissertation, Universität Hannover, Mitt. des SFB 79, Hannover, H. 1, 1973.
- SCHULZE, K.-W.: Zur Untersuchung von Strömungen in Fluß- und Kanalsystemen. Wasserwirtschaft, 64. Jahrg., Nr. 9, 1974.
- SÜNDERMANN, J., WULZINGER, W. u. VOLLMERS, H.: The Effect of Dam Construction on Tidal Processes in an Estuary. 16th IAHR Congr., Sao Paulo, Vol. 1, 1975.
- THÖLE, A.: Entwicklung eines Elementprogramms für das Programmsystem MECCA zur Berechnung von instationären verzweigten Gerinneströmungen. Diplomarbeit, Universität Hannover, 1975.

# Die Forschungsarbeiten des KFKI 1979 bis 1981

Von Hans Rohde

## Zusammenfassung

Anknüpfend an einen Bericht über die Forschungsprojekte des „Kuratoriums für Forschung im Küsteningenieurwesen“ (KFKI) von seiner Gründung bis 1979 (veröffentlicht in „Die Küste“, H. 34, 1979) wird ein kurzer Überblick der seit 1979 ausgeführten Forschungsprojekte und der für die nahe Zukunft geplanten gegeben.

## Summary

*Referring to a report about the research projects of the „Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen“ (KFKI) from its foundation until 1979 (published in „Die Küste“, H. 34, 1979) a brief general view is given of the research projects performed since 1979 and those, which are planned for the near future.*

## Inhalt

1. Einführung	73
2. Gegenwärtiger Stand der Arbeiten an den Forschungsprojekten	74
2.1 Das Küstenkartenwerk	74
2.2 Wiederholungsvermessung	74
2.3 Morphologische Analyse Nordseeküste (MORAN)	75
2.4 Strömungsmessungen	76
2.5 Hydrodynamisch-numerische Modelle (HN-Modelle)	76
2.5.1 Modellentwicklung	76
2.5.2 Überprüfung der Naturähnlichkeit der HN-Modelle	77
2.6 Seegangsmessungen	78
2.7 Schlicksedimentation	79
2.7.1 Schlicksedimentation im Wattenmeer	79
2.7.2 Schlicksedimentation in den Ästuaren	80
2.8 Sturmflutuntersuchungen für die Elbe	80
3. Ausblick	81
3.1 Tide- und Sturmflutentwicklungen im Küstenvorfeld der südlichen Nordsee	81
3.2 Entwicklung und Ablauf von Sturmfluten in den deutschen Tide-Ästuaren	81
3.3 Tiefenstabilisierung von ufernahen Gezeitenrinnen durch Gezeitensteuerung	81
3.4 Untersuchungen über den natürlichen Querschnitt von Außentiefs	82
4. Schriftenverzeichnis	83

## 1. Einführung

In Heft 34 der Schriftenreihe „Die Küste“ wurde ein erster Bericht über die Forschungsarbeiten des Kuratoriums für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI) veröffentlicht, der den Zeitabschnitt von der Gründung des KFKI im Jahre 1973 bis etwa zur Mitte des Jahres 1979 umfaßt (ROHDE, 1979). Darin wurde bereits angekündigt, daß beabsichtigt sei, in gewissen Abständen über den weiteren Fortschritt der Forschungen zu berichten und die

Dokumentation der veröffentlichten Arbeiten fortzusetzen. Diese Absicht wird mit dem vorliegenden Bericht ausgeführt.

Von ROHDE (1979) wurde auch über die Organisation des KFKI sowie über Planung und Vorbereitung von Forschungsvorhaben berichtet. Hier haben sich seitdem keine Änderungen ergeben. Wie im Verwaltungsabkommen von 1973 vorgesehen, wechselt der Vorsitz im KFKI regelmäßig (Hafenbaudirektor Prof. Dr.-Ing. LAUCHT, 1973-1975, MDgt ZÖLSMANN, 1976-1977, MDgt Prof. Dr.-Ing. ZITSCHER, 1978-1979, MDgt BERGMEIER, 1980 und MR Dr. techn. ZANKER, 1981). Geschäftsführer (LBDir SINDERN) und Forschungsleiter Küste (LBDir Dr.-Ing. ROHDE) blieben unverändert. Jährlich zweimal fanden sowohl Sitzungen des KFKI als auch Zusammenkünfte der „Beratungsgruppe“ statt. Außerdem haben sich die verschiedenen Projektgruppen jeweils entsprechend der Notwendigkeit für die einzelnen Forschungsarbeiten mehrfach getroffen. Die Kontakte zu den anderen in der Küstenforschung tätigen Institutionen waren auch in der Berichtszeit eng.

Die zweite Hälfte der Berichtszeit war bereits durch die Knappheit der Haushaltsmittel bei den im KFKI zusammenarbeitenden Verwaltungen gekennzeichnet, was zu Einschränkungen bei den Eigenleistungen führte. Manche Vorhaben konnten daher nicht so zügig vorangetrieben werden, wie es erwünscht gewesen wäre, andere noch nicht angefangen werden. Ihr Beginn ist erst für die Zukunft vorgesehen. Insgesamt kann aber festgestellt werden, daß durch den engagierten Einsatz der einzelnen Mitarbeiter der beteiligten Dienststellen und die uneingeschränkte finanzielle Förderung der Forschungsvorhaben durch den Bundesminister für Forschung und Technologie (BMFT) trotz mancher Schwierigkeiten die Arbeiten überall befriedigend fortgeführt werden konnten und zum Teil gute Ergebnisse erzielt wurden.

## 2. Gegenwärtiger Stand der Arbeiten an den Forschungsprojekten

### 2.1 Das Küstenkartenwerk

Wie schon von ROHDE (1979) mitgeteilt, sind die gesamten Küstengewässer an der deutschen Nordseeküste von 1974 bis 1976 vermessen worden. Aufgrund dieser Vermessung wurden insgesamt 66 Karten im Maßstab 1 : 25 000 in mehrfarbigem Druck hergestellt. Die letzten Kartendrucke konnten Anfang 1981 ausgeliefert werden. Damit steht erstmals ein Kartenwerk zur Verfügung, das die Küstengewässer an der deutschen Nordseeküste in einheitlichem Maßstab, bezogen auf NN, aufgrund einer innerhalb relativ kurzen Zeit ausgeführten Vermessung darstellt. Da die Küstenkarten als Grundlage für einen großräumigen morphologischen Vergleich der einzelnen Gebiete der Küstengewässer verwendet werden sollen und hierbei die ADV eingesetzt werden soll, ist vorgesehen, die Tiefenangaben der Karten zu digitalisieren. Mit diesen Arbeiten wurde 1981 begonnen.

### 2.2 Wiederholungsvermessung

Seit 1979 ist die erste Wiederholungsvermessung der Küstengewässer im Gange. Dabei wird ähnlich vorgegangen wie bei der ersten Vermessung, die dem Küstenkartenwerk zugrunde liegt. Die für 1979 vorgesehenen Vermessungsarbeiten konnten planmäßig ausgeführt werden. 1980 ließ sich das vorgesehene Vermessungsprogramm nicht voll erfüllen, weil

das Wetter im Sommer sehr ungünstig war. Große Teile der Luftbildbefliegung mußten auf 1981 verschoben werden. 1981 konnten die Außenaufnahmen der Wiederholungsvermessung bis auf einen geringen Rest, der im Frühjahr 1982 nachgeholt werden muß, abgeschlossen werden. Die Auswertungen werden sich naturgemäß bis 1982 erstrecken. Dabei sollen die gesamten Daten der Wiederholungsvermessung in digitaler Form auf Datenträger übernommen werden, um sie zusammen mit den digitalisierten Daten der Erstvermessung (s. Abschn. 2.1) für eine morphologische Analyse verwenden zu können (s. Abschn. 2.3).

Die Projektgruppe, die die Wiederholungsvermessung geplant hat, hat sich auch damit befaßt, nach welchem digitalen Geländemodell (DGM) der morphologische Vergleich der Vermessungen vorgenommen werden soll. Sie hat sich für das vom Sonderforschungsbereich (SFB) 149 der Universität Hannover entwickelte Programmsystem TASH entschieden (KRUSE, 1979). Die Luftbildvermessungen der Wiederholungsvermessung sollen auch mit Hilfe der vom SFB 149 entwickelten automatischen Auswerteverfahren des Wasserlinienverfahrens (WEGENER, 1979) in Höhenlinienpläne umgesetzt werden.

Die Ergebnisse der Wiederholungsvermessung sollen nicht nur in digitaler Form für den morphologischen Vergleich im Rahmen des Projektes MORAN aufbereitet werden, sondern das KFKI hat auch beschlossen, neue Küstenkarten herzustellen. Dabei soll der Kartenrahmen des neuen Küstenkartenwerks verwendet werden. Wahrscheinlich werden aber nur neue Karten von den Gebieten hergestellt, in denen sich signifikante Änderungen in der Morphologie ergeben haben. Es wird noch geprüft werden, ob die Karten in Mehrfarbendruck oder nur schwarz/weiß hergestellt werden sollen. Eine für diesen Zweck gebildete Arbeitsgruppe ist mit der Vorbereitung der Kartenherstellung befaßt.

### 2.3 Morphologische Analyse Nordseeküste (MORAN)

Die eigentlichen Arbeiten für eine morphologische Analyse können erst ausgeführt werden, wenn sowohl die Daten aus der ersten Vermessung als auch der Wiederholungsvermessung in digitaler Form vorliegen. Zur Vorbereitung der Arbeiten hat die Projektgruppe drei Testgebiete ausgewählt – Knechtsand, Meldorfer Bucht und Norderneyer Seegat –, um für diese morphologische Analysen auszuführen. Hierfür standen noch keine digitalen Werte aus den beiden Vermessungen zur Verfügung. Deshalb wurde zunächst nach einem Auswerteverfahren herkömmlicher Art gearbeitet und die Ergebnisse mit einer Auswertung nach einem halbautomatischen Verfahren verglichen. Über die ersten Ergebnisse, die im Testgebiet Knechtsand gewonnen werden konnten, hat SIEFERT bei der 48. Tagung der Arbeitsgemeinschaft Nordwestdeutscher Geologen (9. bis 13. Juni 1981) in Wilhelmshaven in einem Vortrag „Morphologische Analysen im Knechtsandgebiet – erste Ergebnisse eines überregionalen Projekts“ und bei der Zusammenkunft der North Sea Coastal Engineering Group (30. Sept. bis 3. Okt. 1981) in Heide in einem Vortrag „First results of German MORAN project“ berichtet. Über die Ziele des Projekts MORAN wurde bei der 17<sup>th</sup> International Conference on Coastal Engineering (ICCE) 1980 in Sydney vorgetragen (SIEFERT u. BARTHEL, 1981). Von BARTHEL (1981 b) wurde aus der morphologischen Auswertung im Knechtsandgebiet eine Massenbilanz aufgestellt.

## 2.4 Strömungsmessungen

Über die Strömungsmessungen, die, beginnend 1975, im Rahmen des KFKI-Projektes vorwiegend an der Westküste von Schleswig-Holstein ausgeführt worden sind, haben SIEFERT et al. (1980) veröffentlicht. Es werden nicht nur die Ergebnisse dargestellt, sondern es wird auch über die bei der Messung und deren Auswertung gemachten Erfahrungen berichtet. Für den nordfriesischen Raum und für die Langzeitmessungen in den drei küstennormalen Profilen sind die Auswertungen noch im Gange. Berichte darüber, wie auch über weitergehende Spezialauswertungen des bei den Strömungsmessungen gewonnenen Datenmaterials, sind in Vorbereitung.

Die Projektgruppe hat ein neues Meßprogramm vorgeschlagen. Danach sollen in einem oder zwei Meßprofilen, die quer über die Mündungen von Jade, Weser und Elbe verlaufen, für mehrere Wochen die Strömungen gleichzeitig gemessen werden, und zwar sowohl in den Stromrinnen als auch auf den Wattflächen. Die Planungen dafür sind noch nicht abgeschlossen; das Projekt wird wahrscheinlich nicht vor 1983 ausgeführt werden können.

## 2.5 Hydrodynamisch-numerische Modelle (HN-Modelle)

### 2.5.1 Modellentwicklung

Die Arbeiten an den Modellen sind planmäßig vorangegangen. Einen Überblick über das Projekt gibt die Arbeit von LUCK und SCHÄFER (1980). Außerdem wurde über Einzelheiten des Projekts bei der „3rd International Conference on Applied Mathematical Modelling“ im Oktober 1980 vorgetragen (BECKMANN, 1981; SCHÄFER, 1981). Über die „Rechenanlage für HN-Modelle des Kuratoriums für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI)“ haben KRÖGER und ZIERZ (1980) berichtet. Am 1. Oktober 1981 hielt BECKMANN bei der Tagung der North Sea Coastal Engineering Group (NSCEG) in Heide einen Vortrag „A system of HN-models for the coasts of the German Bay“.

Am 11. November 1980 hat ein Kolloquium bei der Bundesanstalt für Wasserbau in Hamburg-Rissen stattgefunden. Dabei wurden den potentiellen Anwendern des Projektsystems – Mitarbeitern aller Dienststellen der im KFKI zusammenarbeitenden Verwaltungen – die Grundlagen der HN-Modelle und die Anwendungsmöglichkeiten des von der Arbeitsgruppe des KFKI entwickelten Programmsystems erläutert. Folgende Fachvorträge wurden gehalten:

1. Einführung in die HN-Arbeiten des KFKI (Dr.-Ing. LUCK)
2. Grundlagen der HN-Modelle (Prof. Dr. ZIELKE)
3. Technik der KFKI-Modelle (Dipl.-Ing. BECKMANN)
4. Anwendung von HN-Modellen auf spezielle Probleme des Küstenvorfeldes (Dr.-Ing. LUCK)
5. Anwendung eines HN-Modells im Zusammenhang mit Planungen im Bereich Schwarzsand/Elbe (Dr.-Ing. WISMER)
6. Landfestmachung Mellum (Dipl.-Ing. BECKMANN)
7. Eidersperrwerk mit Tide- und Sielbetrieb (Ing. grad. ZIERZ)
8. Eindeichung und Festlandanschluß „Medemland“ (Dipl.-Ozeanogr. SCHÄFER)

Nach Ablauf des Jahres 1981 werden außer dem Basismodell die drei Regionalmodelle fertiggestellt sein und in der Praxis angewendet werden können. Es ist zu wünschen, daß die Dienststellen der Wasserbauverwaltungen an der Küste die ihnen hier gebotenen Möglichkeiten weitgehend nutzen werden.

### 2.5.2 Überprüfung der Naturähnlichkeit der HN-Modelle

In der Zeit von Mitte September bis Mitte November 1981 wurden durch umfangreiche Naturmessungen im Bereich des Regionalmodells „Innere Deutsche Bucht“ (INDB) zahlreiche Daten gewonnen, anhand derer durch vergleichende Modellrechnungen die Naturähnlichkeit des Modells getestet werden kann. Das Gebiet des INDB-Modells bietet sich dafür an, da es morphologisch und strömungsmäßig recht komplex ist. Wattgebiete, Flußmündungen und tiefes Wasser kommen vor. Die Ausführung dieses Projekts DEBEX 81 (Deutsche Bucht Experiment) wurde in den Herbst 1981 gelegt, da während des Herbstes unterschiedliche Wetterlagen zu erwarten sind und gleichzeitig die meteorologischen Experimente KonTur (Konvektion und Turbulenz) und PUKK (Projekt zur Untersuchung des Küstenklimas) stattfanden. So läßt sich das gesamte umfangreiche meteorologische Datenmaterial teilweise für mehrere Projekte gleichzeitig nutzen.

Der Vergleich der im Projekt DEBEX gewonnenen Daten mit den vom Modell bestimmten Werten soll über die Reproduktionsgüte des Regionalmodells „Innere Deutsche Bucht“ (INDB) für unterschiedliche Tiden unter Berücksichtigung der Meteorologie Auskunft geben. Dabei bietet sich erstmals die Möglichkeit, das Modell mit Hilfe gemessener Daten auf dem offenen Rand zu steuern. Zu diesem Zweck sind im Bereich des INDB-Modells an möglichst vielen Gitterpunkten Wasserstände, Wind (Geschwindigkeit und Richtung), Luftdruck und Fließgeschwindigkeiten des Wassers (Größe und Richtung) gemessen worden. Abb. 1 gibt eine Übersicht über das Meßnetz. Auf dem offenen Rand und auf einer Diagonalen, die von Wangerooge nach Eiderstedt quer zu den Flußmündungen von Weser, Elbe und Eider verläuft, wurden 16 Hochseepiegel ausgelegt, die nach dem Prinzip der Druckmessung arbeiten. Dabei wurden 10 Pegel verwendet, die im Auftrage des BMFT neu entwickelt und in diesem Projekt erstmals erprobt worden sind. Die Wasserstandsaufzeichnungen der Hochseepiegel können allerdings nicht unmittelbar an NN angeschlossen werden. Für die Wasserstandsmessung in Küstennähe, am inneren Rand des Modells, stehen 38 ständig vorhandene Küstenpegel zur Verfügung. Das Netz dieser Pegel wurde noch durch 12 kurzzeitig aufgestellte Rohrschreibpegel verdichtet. Insgesamt sind mit Hilfe von 11 Flachstrommessern und 6 Wattstrommessern Fließgeschwindigkeiten in 1 m bzw. 0,3 m Höhe über der Gewässersohle gemessen worden. In 6 Meßstationen ist für jeweils eine Tide die Vertikalverteilung der Geschwindigkeiten nach Größe und Richtung gemessen worden. Für die Gewinnung der meteorologischen Daten stand das stationäre Netz des deutschen Wetterdienstes mit 26 Meßstationen im Testgebiet bzw. in seiner Umgebung zur Verfügung. Zusätzlich wurden im Bereich der Watten 4 weitere Windmeßstationen eingerichtet.

Für die umfangreiche organisatorische Vorbereitung und Planung des Projektes DEBEX 81 ist die HN-Projektgruppe verantwortlich. An der Durchführung des Meßprogramms arbeiten die Wasser- und Schifffahrtsämter Bremerhaven, Cuxhaven, Tönning und Wilhelmshaven, das Deutsche Hydrographische Institut, das Seewetteramt Hamburg, die Forschungsstelle für Insel- und Küstenschutz Norderney, Strom- und Hafenausbau Hamburg – Referat Hydrologie Unterelbe –, das Amt für Land- und Wasserwirtschaft Heide – Dezernat Gewässerkunde – und die Bundesanstalt für Wasserbau – Abteilung Küste – zusammen. Unmittelbar im Anschluß an die Messungen werden die Auswertungen vorgenommen, so daß im Frühjahr 1982 mit den Testrechnungen begonnen werden kann. Die Testrechnungen werden von der HN-Arbeitsgruppe mit dem Rechner der Bundesanstalt für Wasserbau vorgenommen. Es ist zu erwarten, daß aus diesem recht aufwendigen Meßprogramm, das hohe Anforderungen an alle mitwirkenden Dienststellen stellt, und den anschließenden Testrechnungen wertvolle Erkenntnisse für die Anwendung der HN-Modelle gewonnen werden können.

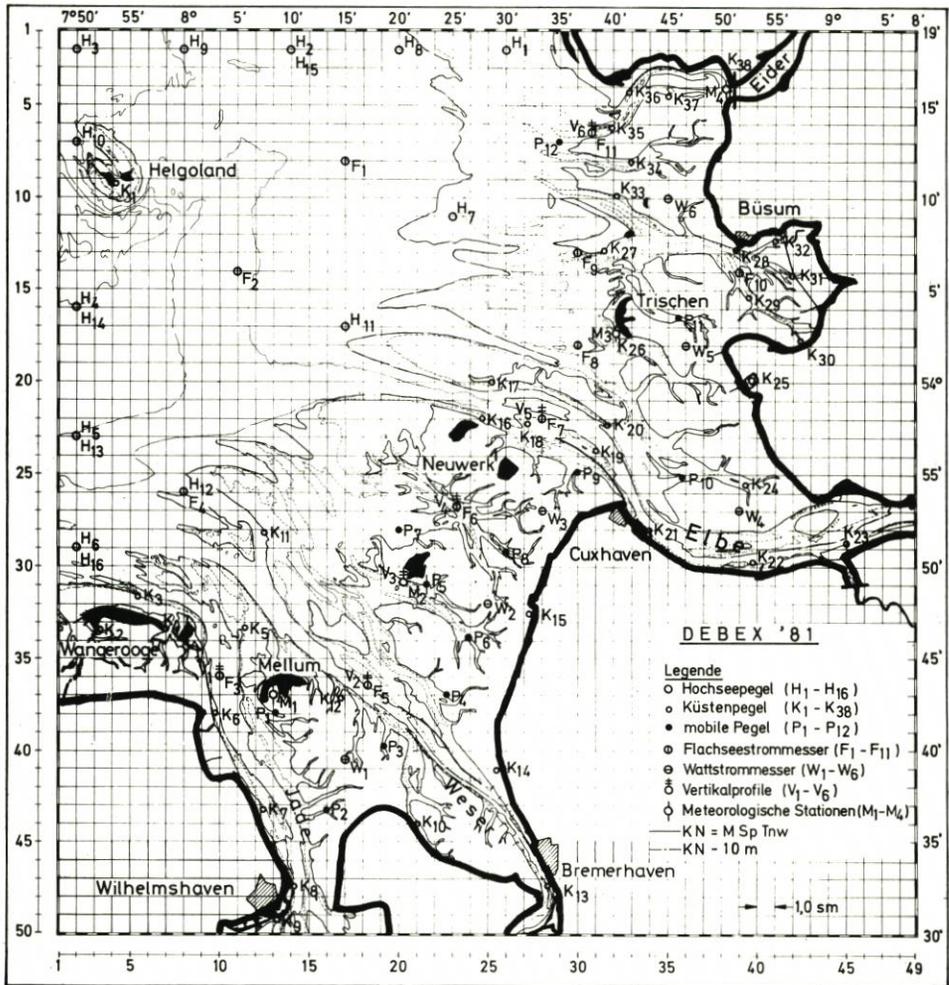


Abb. 1

## 2.6 Seegangsmessungen

Die Seegangsmessungen wurden in der Berichtszeit fortgesetzt. Es konnten weitere wichtige Daten gewonnen werden, obwohl extreme Sturmflutsituationen auch weiterhin ausgeblieben sind. Über das Seegangprojekt im äußeren Weser-Ästuar ist ausführlich im Rahmen einer Dissertation berichtet worden (BARTHEL, 1980); außerdem wurde darüber bei der ICCE 1980 in Sydney vorgetragen (BARTHEL, 1981a). Der Bericht „Über den Seegang in einem Ästuar“, in dem alle wichtigen Daten und Auswertungen enthalten sind, ist abgeschlossen. Er wurde dem BMFT vorgelegt und soll in dessen Berichtsreihe erscheinen. Auch der Bericht über das Seegangprojekt im Gebiet der Ostfriesischen Inseln und Watten steht vor dem Abschluß.

Für die nächste Zukunft ist geplant, zunächst die Messungen im Gebiet der Ostfriesischen Inseln und Watten und auch im äußeren Wester-Ästuar fortzusetzen. Darüber hinaus

wurde angeregt, Seegangsmessungen im Weser-Ästuar weiter stromaufwärts des bisherigen Meßprogramms auszuführen, also etwa im Bereich zwischen Mellum/Tegeler Plate und Bremerhaven. Bei den bisherigen Seegangsuntersuchungen in der Außenweser hatte sich herausgestellt, daß der Energie- und Höhenverlust des Seegangs, der aus der Nordsee in das äußere Weser-Ästuar eindringt, in diesem Bereich nur gering ist, so daß noch bis zu 80% der spektralen Energie in die Region der Platen (Mellum-Plate, Tegeler Plate, Knechtsand) gelangt. Die maximalen Wellenhöhen in diesem Bereich können leicht Werte von mehr als 4 m erreichen mit maximalen Perioden um 15 bis 18 Sekunden. Treten solche Wellen in den enger werdenden Rinnen des Ästuars im Bereich der Strombauwerke auf, so ist neben der Gefährdung der Schifffahrt auch mit Schäden an Bühnen, Leitdämmen und anderen Bauwerken zu rechnen. Außerdem spielt die Kenntnis der Seegangsverhältnisse bei der Beantwortung von Fragen der Schadstoffausbreitung in den Ästuaren eine wichtige Rolle.

Derartige Untersuchungen haben auch Bedeutung für das Elbe-Ästuar. Es werden daher Überlegungen für ein Untersuchungsprogramm über das Verhalten von Seegang in den Ästuaren stromaufwärts der Platenregion angestellt. Ein solches Programm könnte frühestens ab 1983 ausgeführt werden.

## 2.7 Schlicksedimentation

### 2.7.1 Schlicksedimentation im Wattenmeer

Wie schon von ROHDE (1979) angekündigt, ist auf einem Berichtskolloquium, das am 12. September 1979 im Congress-Centrum Hamburg (CCH) im Rahmen des 63. Deutschen Geodätentages stattfand, über die sich bis dahin abzeichnenden Ergebnisse des Schlickprojekts Wattenmeer vorgetragen worden. Folgende Fachvorträge wurden gehalten:

1. Einführung in das KFKI-Forschungsprojekt „Schlicksedimentation an der deutschen Nordseeküste“ (Dr. rer. nat. FIGGE)
2. Versuch einer Systematik des Schlicks (Prof. Dr. KÖSTER)
3. Abhängigkeit der Sedimentationsraten im Sahlenburger und Neuwerker Watt von meteorologischen und hydrologischen Einflüssen (Dr.-Ing. SIEFERT)
4. Morphologische Veränderungen im Wattengebiet der Dithmarscher Bucht (Dipl.-Ing. WIELAND)
5. Kartierung und zeitliche Veränderung des Watts in der nördlichen Meldorfer Bucht (Dipl.-Geol. GAST)
6. Bioturbation und Biodeposition (Dr. rer. nat. THIEL)
7. Bestandsaufnahme der Makrofauna im Testgebiet des Büsumer Watts (Dipl.-Biol. GROSSMANN)
8. Untersuchungen zur Veränderung von Sedimenten durch die Infauna (Dipl.-Biol. SPYCHALA)
9. Elektronenmikroskopische und organisch-chemische Untersuchungen im Wattgebiet bei Büsum (Dr. rer. nat. KEMPE)

Die veröffentlichten Arbeiten von FIGGE et al. (1980) sowie REINECK u. SIEFERT (1980) stellen etwas erweiterte Fassungen der entsprechenden Vorträge des Berichtskolloquiums dar. Über die geochemischen Arbeiten, die das Geologische Institut der Universität Hamburg im Rahmen des Schlickprojekts Wattenmeer ausgeführt hat, ist inzwischen ein umfangreicher Abschlußbericht fertiggestellt worden (DEGENS u. KEMPE, 1980). Außerdem wurden über geochemische Spezialuntersuchungen zwei Diplomarbeiten vorgelegt (MYCKE, 1980; VOGT, 1980).

1980 und 1981 sind die Schlickuntersuchungen im Watt weitergeführt worden. Über Dichtemessungen des Wattbodens, die von der Fachgruppe Geologie der Bundesanstalt für Wasserbau 1980 in den Wattten der Meldorfer Bucht ausgeführt worden sind, wurde Anfang 1981 ein ausführlicher Bericht abgegeben (BAW, 1981). Alle Felduntersuchungen wurden im Frühjahr 1981 abgeschlossen. Die Auswertungen sind zum Teil noch in Bearbeitung. Die Abschlußberichte über die Arbeiten der Gruppe Küstengeologie des Geologischen Instituts der Universität Kiel (KÖSTER, 1981) und des Instituts für Hydrobiologie der Universität Hamburg (THIEL, 1981) wurden im September 1981 vorgelegt. Weitere abschließende Berichte werden in Kürze folgen. Es ist vorgesehen, diese oder Auszüge aus ihnen zu veröffentlichen. Mit diesen Berichten ist das Problem der Kausalität der Schlicksedimentation in Wattgebieten keineswegs gelöst. Aus den Arbeiten können sich lediglich Hinweise ergeben, auf welchen Gebieten und wie künftig verstärkt weitergearbeitet werden sollte. Es wird die Aufgabe der Projektgruppe sein, weiterführende Forschungsvorhaben anzuregen und auszuführen.

### 2.7.2 Schlicksedimentation in den Ästuaren

Der Verfasser hat bereits in seinem ersten Bericht über die Forschungsarbeiten des KFKI (ROHDE, 1979) auf die Notwendigkeit hingewiesen, intensive Untersuchungen über das Verhalten von Schlick und Schwebstoffen in Ästuaren auszuführen. Aus der Erfassung des bei den Dienststellen an der Küste vorhandenen Materials durch einen wissenschaftlichen Mitarbeiter zeichnete sich die Notwendigkeit ab, systematische Untersuchungen einschließlich der erforderlichen Bilanzierungen an Problemstellen in Ästuaren auszuführen, um die kausalen Zusammenhänge der Schlicksedimentation und -erosion möglichst weitgehend zu erfassen und gegebenenfalls Gesetzmäßigkeiten festzustellen.

Die Projektgruppe für das Projekt „Schlicksedimentation in den Ästuaren“ hat ein Meßprogramm entworfen. Bevor längerfristige Messungen ausgeführt werden, durch die möglichst viele Parameter quantitativ und in ihrer zeitlichen Änderung bestimmt werden können, wird es für notwendig angesehen, Meßsysteme zu entwickeln und zu erproben, die die Verteilung des Schlicks in der Wassersäule und am Boden sowie ihre zeitliche Veränderung unter Einfluß der Wasserbewegung und anderer Faktoren erfassen. Für die Erprobung der vorgesehenen Meßsysteme sind zwei Testgebiete in Aussicht genommen: in der Brackwasserzone der Weser bei Bremerhaven und im oberen Elbe-Ästuar unterhalb des Hamburger Hafens. Das KFKI hat dem Meßkonzept grundsätzlich zugestimmt. 1981 und Anfang 1982 sollen die Geräte beschafft und bis etwa 1983 erprobt werden.

### 2.8 Sturmflutuntersuchungen für die Elbe

Die vom KFKI angeregten Sturmflutuntersuchungen für die Elbe sind zum Abschluß gekommen. Der diese Untersuchungen begleitende „Lenkungsausschuß“ hat dem KFKI einen kurzen zusammenfassenden Bericht vorgelegt (BOE, 1980). Das KFKI hat beschlossen, den Bericht und die ihm zugrundeliegenden wissenschaftlichen Arbeiten in der „Küste“ zu veröffentlichen.

### 3. Ausblick

Aus den Ausführungen im Abschnitt 2 geht hervor, daß ein Teil der dort beschriebenen Vorhaben noch nicht abgeschlossen ist und in den nächsten Jahren weitergeführt wird (Wiederholungsvermessung, MORAN, HN-Modelle). Für andere Vorhaben zeichnen sich für die nahe Zukunft Fortsetzungsvorhaben ab (Kartenherstellung aus der Wiederholungsvermessung, Strömungsmessungen vor Jade-Elbe-Weser, Seegangsuntersuchungen in inneren Abschnitten von Ästuaren). Das Schlickprojekt „Ästuar“ steht noch in einer Anfangsphase (Geräteerprobung), und das Schlickprojekt „Wattenmeer“ soll erst später fortgesetzt werden.

Von einzelnen Mitarbeitern der Verwaltungen oder von Arbeitsgruppen sind Vorschläge für neue Forschungsprojekte gemacht worden. Im folgenden werden die Vorhaben genannt und kurz beschrieben, denen das KFKI bereits grundsätzlich zugestimmt hat und mit deren Ausführungen ab 1982 oder 1983 gerechnet werden kann.

#### 3.1 Tide- und Sturmflutentwicklungen im Küstenvorfeld der südlichen Nordsee

Es ist beabsichtigt, die Aufzeichnungen von etwa 80 Hilfspegeln, die während der letzten 10 Jahre zeitweise zusätzlich zu den bestehenden Dauerpegeln im Küstenvorfeld bestanden haben, nach verschiedenen Gesichtspunkten und neu entwickelten Analysemethoden auszuwerten. Dabei wird erwartet, daß sich aus diesen Auswertungen weitere Erkenntnisse über die Tide- und Windstauverhältnisse in der Deutschen Bucht ergeben werden sowie Hinweise auf deren Änderung. Das KFKI hat dem Projekt zugestimmt, mit den Arbeiten soll 1982 begonnen werden.

#### 3.2 Entwicklung und Ablauf von Sturmfluten in den deutschen Tide-Ästuaren

In den letzten beiden Jahrzehnten hat sich gezeigt, daß Sturmfluten, die im Mündungsgebiet der großen deutschen Tideflüsse nur mittlere Höhe erreichten, im oberen Bereich der Tideflüsse zu Höhen aufliefen, die dort in früheren Jahren wesentlich seltener vorgekommen sind. Es ist daher vorgeschlagen worden, alle mittelhohen Sturmfluten, die in den letzten 20 Jahren aufgetreten sind, hinsichtlich ihres Ablaufs in den deutschen Tideflüssen zu analysieren, um Erkenntnisse über die Entwicklung der Abläufe während dieser Zeit und deren Ursachen zu gewinnen. Daraus lassen sich voraussichtlich auch Schlüsse auf zukünftige Entwicklungen ziehen. Als „mittelhohe Sturmfluten“ werden solche bezeichnet, die in den Flußmündungen Scheitelhöhen zwischen 1,5 und 2,5 m über MThw erreichen. Das KFKI hat die Bildung einer Projektgruppe beschlossen, die das Vorhaben näher ausarbeitet, den Förderungsantrag formuliert und später das Projekt während der Ausführung betreuen soll.

#### 3.3 Tiefenstabilisierung von ufernahen Gezeitenrinnen durch Gezeitensteuerung

Kleinere Vorfluter aus dem Tidebinnengebiet entwässern durch Siele im Deich in die Küstengewässer und Ästuare. Häufig sind die Außentiefs unmittelbar vor den Sieleln zugleich

Häfen für die Kleinschiffahrt. Sie müssen daher vom Siel bis zu ihrer Mündung in den Wattstrom oder den Tidefluß sowohl für die Vorflut als auch für den Schiffsverkehr durch Unterhaltungsmaßnahmen funktionsfähig gehalten werden. Leider versanden und verschlickten die meisten dieser „ufernahen Gezeitenrinnen“ mehr oder weniger stark durch Sedimentation von Feststoffen, vorwiegend Schwebstoffen, die von See herantransportiert werden. Als Unterhaltungsmaßnahmen sind von jeher neben Baggerungen Spülungen mit aufgestautem Binnenwasser ausgeführt worden.

In den letzten 20 Jahren ist mehrfach die Verbesserung der Transportverhältnisse zwischen Ebbe- und Flutstrom mit tiefenstabilisierender Wirkung durch Beeinflussung der Strömungsgeschwindigkeiten vorgeschlagen worden, z. B. bei den Vorarbeiten zur Lösung des Eiderproblems (ROHDE u. TIMON, 1967). Um die Strömungsgeschwindigkeiten wirksam zu beeinflussen, werden Tidewassermengen durch das Sielbauwerk in einen Binnenstauraum langsam eingelassen und je nach beabsichtigter Wirkung entweder transportschwächend entgegen dem Flutstrom (Gegenstaubetrieb) oder transportverstärkend mit dem Ebbestrom (Spülbetrieb) ausgelassen. Ziel des Forschungsprojekts ist die systematische Untersuchung der optimalen Transportwirkungsverhältnisse von Ebbe- und Flutstrom in Außentiefs und Hafenzufahrten unter den verschiedenen Bedingungen der Gezeitensteuerung. Durch vergleichende Betrachtung der wesentlichsten Parameter wie Tidehub, Beckengröße, Außentiefgeometrie, Füll- und Entleerungsganglinie, Ein- und Auslaufdauer, resultierende Transportwirkung usw. sollen die Gesetzmäßigkeiten zwischen den Haupteinflußgrößen ermittelt werden.

Das KFKI hat diesem Projekt im Grundsatz zugestimmt. Die Projektgruppe ist damit befaßt, Einzelheiten für den Versuchsbetrieb und die Meßkonzeption auszuarbeiten. Für den Versuchsbetrieb sind das Lundenbergharder Siel/Eiderstedt (mit Binnenwasserzufluß) und das Neßmersiel/Ostfriesland (ohne Binnenwasserzufluß) vorgesehen. Voraussichtlich wird 1982 oder 1983 mit der Ausführung des Forschungsprojekts begonnen werden.

### 3.4 Untersuchungen über den natürlichen Querschnitt von Außentiefs

Während das unter 3.3 beschriebene Projekt die Untersuchung systematischer Einwirkungen auf die Strömungs- und Sedimentationsverhältnisse in zwei ausgewählten Außentiefs betrifft, sollen in dem unter 3.4 aufgeführten Projekt Aussagen über die Beziehungen zwischen den verschiedenen Einflußfaktoren und Querschnittsgrößen von Außentiefs gewonnen werden. Als Einflußfaktoren kommen in Frage: Größe des Einzugsgebiets, mittlerer Binnenwasserstand, Länge des Außentiefs, Morphologie eines etwaigen Wateinzugsgebiets, mittlere Tidewasserstände, Tidehub, Art und Häufigkeit von Schiffsverkehr. Wenn bekannt ist, welchen Einfluß diese und andere Faktoren auf Größe und Stabilität der Durchflußquerschnitte der Außentiefs haben, lassen sich bei Veränderung der Faktoren Prognosen für die zukünftige Querschnittsentwicklung aufstellen.

Das KFKI hat die Bildung einer Projektgruppe beschlossen, die zunächst Vorüberlegungen zu dem Projekt anstellen soll, um dann ein Forschungsprogramm auszuarbeiten. Die Projektgruppe hat ihre Arbeit aufgenommen. Im Rahmen einer Fragebogenaktion, die sich an alle Wasserbaudienststellen an der deutschen Nordseeküste und in den Ästuaren wendet, ist sie zunächst mit der Erfassung von Grunddaten für alle Außentiefs vor Entwässerungsbauwerken und Häfen befaßt. Es wird erwartet, daß sich daraus charakteristische Gruppen bilden lassen und daß die weiteren Untersuchungen an einzelnen, für die jeweilige Gruppe typischen Außentiefs vorgenommen werden können.

## 4. Schriftenverzeichnis

- BARTHEL, V.: Seegang in einem Ästuar am Beispiel der Außenweser. Die Küste, H. 35, 1980.
- BARTHEL, V.: Energy-distribution in an estuary. Proc. 17th ICCE, Sydney, 1980, New York, 1981 (a).
- BARTHEL, V.: Vergleich der Topographie 1974-1979 des Testfeldes „Knechtsand“ im Rahmen des MORAN-Projekts. Strom- und Hafenausbau, Hamburg, - Referat Hydrologie Unterelbe-, Studie Nr. 51, 1981 (b).
- BECKMANN, M.: Numerical Modelling of shallow water areas. Mitt. Inst. f. Meereskunde, Univ. Hamburg, Nr. 25, 1981.
- BOE, K.: Sturmflutuntersuchungen, Abschlußbericht des Lenkungsausschusses für Sturmflutuntersuchungen Elbe. Hamburg, November 1980 (unveröffentlicht).
- BUNDESANSTALT für WASSERBAU: Dichtemessungen im Watt vor Büsum im Rahmen des KFKI-Schlickprogramms. Bericht der Fg. Geologie der Bundesanstalt für Wasserbau, Kiel, 1981 (unveröffentlicht).
- DEGENS, E. T. u. KEMPE, S.: Geochemische und elektronenmikroskopische Untersuchungen der Schlickbildung im Büsumer Watt. Bericht des Geol. Inst. d. Univ. Hamburg, 1980 (unveröffentlicht).
- FIGGE, K., KÖSTER, R., THIEL, H. u. WIELAND, P.: Schlickuntersuchungen im Wattenmeer der Deutschen Bucht - Zwischenbericht über ein Forschungsprojekt des KFKI. Die Küste, H. 35, 1980.
- KÖSTER, R.: Abschlußbericht über die Arbeiten der Gruppe Küstengeologie des Geologischen Instituts der Universität Kiel im Forschungsvorhaben des KFKI „Schlicksedimentation an der deutschen Nordseeküste“. Kiel, September 1981 (unveröffentlicht).
- KRÖGER, A. u. ZIERZ, R.: Rechenanlage für HN-Modelle des Kuratoriums für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI). Jahresbericht 1979 der Forschungsstelle für Insel- und Küstenschutz, Norderney, Bd. 31, 1980.
- KRUSE, J.: TASH, ein System zur EDV-unterstützten Herstellung topographischer Grundkarten. Nachr. aus dem Karten- und Vermessungswesen, Reihe I, H. 79, Inst. f. angew. Geodäsie, Frankfurt a. M., 1979.
- LUCK, G. u. SCHÄFER, P.: Hydrodynamisch-numerische Modelle des Kuratoriums für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI). Die Küste, H. 35, 1980.
- MYCKE, B.: Organisch-geochemische Charakterisierung rezenter Wattsedimente. - Zucker als Indikatoren für Herkunft und Umsetzung organischer Substanzen im Watt. Diplomarbeit Univ. Hamburg, 1980 (unveröffentlicht).
- REINECK, H.-E. u. SIEFERT, W.: Faktoren der Schlickbildung im Sahlenburger und Neuwerker Watt. Die Küste, H. 35, 1980.
- ROHDE, H.: Die Forschungsarbeiten des KFKI. Die Küste, H. 34, 1979.
- ROHDE, H. u. TIMON, A.: Die Vorarbeiten zur Lösung des Eiderproblems. Die Wasserwirtschaft, 57. Jg., H. 5, 1967.
- SCHÄFER, P.: A system of numerical models of the German Bight. Mitt. Inst. f. Meereskunde d. Univ. Hamburg, Nr. 25, 1981.
- SIEFERT, W. u. BARTHEL, V.: The German „MORAN“ project. Proc. 17th ICCE, Sydney 1980, New York, 1981.
- SIEFERT, W., FAHSE, H., MIESSNER, F., RICHTER, H.-H., TAUBERT, H. u. WIELAND, P.: Die Strömungsverhältnisse vor der Westküste Schleswig-Holsteins. Die Küste, H. 35, 1980.
- THIEL, H.: Abschlußbericht für das Forschungsvorhaben „Schlicksedimentation an der deutschen Nordseeküste“, Teilprojekt „Einwirkung von Organismen auf Wattsedimente“. Institut für Hydrobiologie der Universität Hamburg, September 1981 (unveröffentlicht).
- VOGT, J. H.: Organisch-geochemische Charakterisierung rezenter Wattsedimente. - Aminosäure, Adsorptionsmechanismen und frühdiagenetische Effekte. Diplomarbeit Univ. Hamburg, 1980 (unveröffentlicht).
- WEGENER, B.: Rechnergestützte Erfassung und Beschickung von Wasserlinien in Verfahren der Wattvermessung. Wiss. Arb. d. Fachr. Vermessungswesen d. Univ. Hannover, H. 91, 1979.

# Suspensionsgehalte in Flachwassergebieten

## Messungen im Watt von Scharhörn

Von Hans Peter D ü c k e r

### Z u s a m m e n f a s s u n g

Messungen des Suspensionsgehaltes in der Natur liegen bisher nur in sehr geringem Umfang vor. Da aber gerade die hiermit verbundenen Fragen der morphologischen Veränderung für den im Küstengewässer planenden und bauenden Ingenieur von großer Bedeutung sind, ist bei den Untersuchungen im Gebiet Neuwerk/Scharhörn ein Meßprogramm zur Bestimmung des Suspensionsgehaltes bei unterschiedlichen Witterungsverhältnissen durchgeführt worden. Ziel dieses Programms ist es gewesen, neben den von CHRISTIANSEN (1974) im Elbestrom angegebenen Zusammenhängen auch Aussagen für die Vorgänge auf dem hohen Watt zu treffen.

Da aufgrund von Naturbeobachtungen immer wieder auf den mit zunehmendem Windeinfluß stark ansteigenden Suspensionsgehalt hingewiesen worden ist (z. B. GÖHREN und LAUCHT, 1972 u. 1979; WOHLBERG, 1954), ist das Meßprogramm unter besonderer Berücksichtigung der auf dem Watt in Abhängigkeit von der Seegangscharakteristik (SIEFERT, 1973) unterschiedlichen Wellenverhältnisse durchgeführt worden. Hierfür sind im Bereich des brandungsbeaufschlagten Randwattes (Standort (S)) und des brandungsfreien Wattes (Standort (SB)) die Suspensionskonzentration (C) und die Parameter Windgeschwindigkeit (V), Windrichtung (R), Strömungsgeschwindigkeit (u), Wellenhöhe um Hochwasser (H) und Wassertemperatur (T) gemessen worden.

Das Datenmaterial ist nach Windeinflußrichtungen (Windsektoren), durch die auch die Unterschiede in den morphologischen und Tide-Randbedingungen erfaßt werden, gegliedert. Das Meßmaterial des für die morphologischen Veränderungen maßgebenden auflandigen Windsektors (SW-N) ist detailliert aufbereitet worden zu Suspensionsganglinien über eine Tide für unterschiedliche Windstärken und Wellenhöhen sowie zu mittleren Suspensionsgehalten während einer Tide in Abhängigkeit von den Parametern Windgeschwindigkeit, Wellenhöhe und Stromweg. Aufgrund der Streuung der Einzelmesswerte hat sich eine am Einzelwert orientierte Aufbereitung als nicht sinnvoll erwiesen. Deshalb sind sowohl die Ganglinien als Mittelwert aus mehreren Messungen als auch die über eine Tide integrierten Suspensionskonzentrationen den Untersuchungen zugrundegelegt worden. Zur Feststellung des Einflusses des Seegangs sind anhand der von SIEFERT (1973) angegebenen Beziehungen Grundberührung bzw. Brechen des Seegangs unterschieden und die für die Aufwirbelung in Suspension maßgebende Schergeschwindigkeit (35 cm über Sohle) aus Überlagerung der mittleren Tideströmung mit der aus der mittleren Wellenhöhe um Hochwasser abgeleiteten Orbitalgeschwindigkeit gebildet worden.

Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in Abschn. 5.3 zusammengefaßt. Als wesentlichste sollen nachstehende angeführt werden:

- Brandungsbeaufschlagte Wattens sind wesentliches Entstehungsgebiet von Suspensionen, die dann mittels der Tide- und Triftströmung versetzt werden.
- In Wattgebieten mit ausgedehnter Brandung geht bei auflandigen Winden ab etwa 6 Bft mit einsetzendem Brechen des Seegangs, bedingt durch die erhöhten Turbulenzen und den Luftein-schlag, der bis dahin lineare Konzentrationsanstieg mit der Windstärke in einen überproportionalen Anstieg über. Zur gleichen Zeit kommt es auf den brandungsfreien Wattens durch den ab 6 Bft stark ansteigenden Triftstrom ebenfalls zu diesem Übergang.
- Für den auflandigen Windsektor kann die Zunahme der Suspensionskonzentration mit der Windgeschwindigkeit, bezogen auf den Konzentrationswert (4 °C) bei einsetzender Brandung auf den Rand- und Brandungswatten (> 6 Bft), für die untersuchten Wattengebiete mit unterschiedlicher Seegangscharakteristik durch den gleichen Ansatz in Abhängigkeit von der mittleren Windgeschwindigkeit ( $\bar{V}_T$ ) während einer Tide beschrieben werden. Der Konzentrationsanstieg erfolgt bis zum Einsetzen der Brandung bzw. mittleren Windgeschwindigkeiten  $\bar{V}_T = 11,5$  m/s linear und dann überproportional mit der dritten Potenz von  $\bar{V}_T$ .
- Die Maximalwerte der Konzentration sind wesentlich von der Größe der strömungsbedingten Einzugsgebiete und der dort maßgebenden Seegangsverhältnisse abhängig. Sie ergeben sich, bezogen auf 4 °C (DILLO, 1960) und ein Bezugsniveau von 0,35 m über der Sohle, zu: max. 500 mg/l (S) und max. 1200 mg/l (SB).

- Der anhand der gemessenen Suspensionskonzentrationen für das untersuchte Wattgebiet ermittelte Suspensionstransport als Trockenmasse beträgt für den auflandigen Windsektor bei mittleren Tideverhältnissen:
- |                      |      |                            |
|----------------------|------|----------------------------|
| (10 °C)              | (S)  | ca. 225 t/Tide nach SW     |
|                      | (SB) | ca. 75 t/Tide nach SW      |
| Sturmtiden (20 m/s): | (S)  | ca. 42 000 t/Tide nach O   |
| (4 °C)               | (SB) | ca. 63 000 t/Tide nach O   |
| über einem Jahr:     | (S)  | ca. 530 000 t/p. a. nach O |
|                      | (SB) | ca. 750 000 t/p. a. nach O |

Allgemein zeigen die Ergebnisse, daß für genauere Suspensionsgehaltsuntersuchungen in Tidegebieten für befriedigende Aussagen großräumige Betrachtungsweisen wesentlich in ihrer Bedeutung und lokale Messungen in diesen Zusammenhang einzuordnen sind. Dieser Gesichtspunkt ist insbesondere bei der Übertragung von im Labor ermittelten Ergebnissen auf die Natur zu beachten, da hierbei die Umgebungseinflüsse meist nur unzureichend erfaßt sind.

Für die praktische Nutzenanwendung ist gezeigt worden, daß die erzielten Ergebnisse im Rahmen von großräumig angelegten EDV-Programmen Anwendung finden und damit bei einer großräumigen Meßanordnung behilflich sein können.

### Summary

To date there exist only a very limited number of field measurements of sediment concentrations in suspension. Obviously, however, the related questions of morphological changes in the coastal environment are of significant importance to engineers engaged in planning and construction in these areas. For this reason the studies in the region *Newwerk/Scharhörn* included a program of measurements to determine the sediment concentration for various weather conditions. The goal of this program was to augment the conclusions derived by CHRISTIANSEN (1974) for the river Elbe to enable prediction of behavior in the upper portions of the „Watt“, as the tidal shoals along west coast of Germany are known.

Previous authors (e.g. GÖHREN and LAUCHT, 1972 and 1979 and WOHLBERG, 1954) have observed and reported a significant dependence between wind strength and increased sediment concentrations. As a result, the program of measurements was designed to take into special consideration the different wave types in the „Watt“ region associated with salient characteristics of sea motion (SIEFERT, 1973). For an exposed location at the edge of the „Watt“ subjected to surf action (point (S)) and a sheltered surf-free location (point (SB)) the sediment concentration (C) was measured as a function of the wind velocity (V), wind direction (R), current (u), wave height at high tide (H) and water temperature (T).

To take into account morphological and tidal boundary conditions, the data are organized with respect to the wind-influence direction (wind sector). The wind sector (SW-N), corresponding to land-directed wind, is of predominant importance for morphological changes. The measured data in this direction are processed in detail to yield time histories of sediment concentration during a single tide for various wind strengths and wave heights. Furthermore, the average sediment concentration during a tidal period is computed in relationship to the parameters wind velocity, wave height and length of flow. Because of scatter it is difficult to draw significant conclusions from single measurements. As a result, the study is based on statistically averaged time histories and sediment concentrations integrated over a tidal period. In order to determine the influence of sea motion, the criteria proposed by SIEFERT (1973), namely „bed contact“ and „breaking“, are employed. The critical velocity for sediment uptake (35 cm above the sea bed) is computed as the sum of the average tidal current and the orbital velocity associated with the average wave height at high tide. The principal conclusions are listed below:

- „Watt“ areas subjected to surf action are the principal sources for suspensions, which are subsequently transported by tidal and drift currents.
- In „Watt“ areas subjected to surf action, waves begin to break when the wind velocity toward land exceeds about 6 Bft. This results in higher turbulence and air entrainment. The relationship between sediment concentration and wind speed, which is approximately linear for lower velocities, becomes strongly non-linear. The same effect is also observed in sheltered, surf-free regions of the „Watt“ and is caused by the rapid increase in drift current for winds in excess of 6 Bft.

- Regardless of nature of sea motion and for "Watt" regions studied, the same empirical relationship for the increase in sediment concentration ( $4^{\circ}\text{C}$ ) is derived. The governing parameter is the average wind velocity toward land ( $\bar{V}_T$ ) during a tidal period. The increase in concentration is linear up to the onset of breaking, that is, up to an average wind velocity  $\bar{V}_T$  of 11,5 m/s. For higher velocities the concentration increases with the third power of  $\bar{V}_T$ .
- The maximum concentrations depend significantly upon the size of the current-dependent tributary area and the salient characteristic of sea motion; for a reference depth 0.35 m above the sea bed and a temperature of  $4^{\circ}\text{C}$  (DILLO, 1960): (S): max. 500 mg/l, (SB): max. 1200 mg/l.
- Corresponding to the measured sediment concentration, the transport of suspended materials (dry weight) was computed as follows for the "Watt" region under study and wind toward land:
 

average tidal conditions	(S)	approx. 225 t/tide to SW
( $10^{\circ}\text{C}$ )	(SB)	approx. 75 t/tide to E
storm tides (20 m/s)	(S)	approx. 42 000 t/tide to E
( $4^{\circ}\text{C}$ )	(SB)	approx. 63 000 t/tide to E
per year	(S)	approx. 530 000 t/year to E
	(SB)	approx. 750 000 t/year to E

In general the results show that widespread measurements are a prerequisite for more exact studies of sediment concentration in suspension in tidal regions. The role of localized measurements must be understood in this global context. Particular care must be taken in the extrapolation of laboratory results to predict large-scale natural phenomena.

It is shown that the results of the present study can be incorporated into large-scale computer programs employed to design the widespread network of measurement stations mentioned above.

## Inhalt

1.	Einführung	88
1.1	Allgemeines	88
1.2	Aufgabenstellung und Zielsetzung	91
2.	Zur Theorie des Suspensionstransportes	91
2.1	Problemabgrenzung	91
2.2	Vertikale Verteilung suspensierter Feststoffe	92
2.3	Erörterung einzelner Einflussfaktoren	98
2.3.1	Seegang und Strömung	98
2.3.2	Temperatur des Wassers	105
2.3.3	Salzgehalt und Koagulation	106
2.4	Folgerungen für die Aufgabenstellung	107
3.	Messungen und Fehlerabschätzungen	107
3.1	Meßprogramm und Geräteinsatz	107
3.2	Meßgeräte und Meßverfahren mit Fehlerabschätzung	108
3.2.1	Suspensionsmessungen	108
3.2.2	Messungen weiterer Parameter	118
4.	Aufbereitung der Messungen	119
4.1	Allgemeines zum Datenmaterial	119
4.2	Suspensionskonzentration, Windsektoren	120
4.3	Seegang	121
4.4	Strömung	121
4.5	Wind	125
4.6	Tide	125
4.7	Sohlmaterial	125
4.8	Übersicht	126
5.	Meßergebnisse aus dem Watt und ihre Diskussion	126
5.1	Ergebnisse früherer Untersuchungen	126
5.2	Ergebnisse der Untersuchungen der Jahre von 1972 bis 1977	131
5.2.1	Suspensionskonzentrationen und ihre morphologischen Randbedingungen	131
5.2.1.1	Abhängigkeit der Konzentrationen von Abweichungen von der mittleren Tide	131
5.2.1.2	Veränderung der Konzentration mit der Windstärke	136

5.2.2	Verhältnisse im auflandigen Windsektor und ihre Parameter (Sektoren 4 [S, SB])	141
5.2.2.1	Suspensionsganglinien über die Tide	141
5.2.2.2	Über die Tide integrierte Konzentrationswerte	148
5.2.2.3	Einfluß der wellenerzeugten Strömungen und der Brandungen	154
5.2.3	Extremwertbetrachtungen zur Suspensionskonzentration	162
5.3	Schlußfolgerungen aus Abschn. 5.2	165
6.	Anwendungsmöglichkeiten	166
6.1	Mathematische Modellierung des Sedimenttransports	166
6.1.1	Allgemeines	166
6.1.2	Modelle zur Untersuchung des Sedimenttransports	167
6.1.3	Folgerungen	169
6.2	Abschätzung der Suspensionstransportmengen im Untersuchungsgebiet	171
7.	Meßdatenzusammenstellung	175
8.	Verzeichnis der Symbole	180
9.	Schriftenverzeichnis	181

## 1. Einführung

### 1.1 Allgemeines

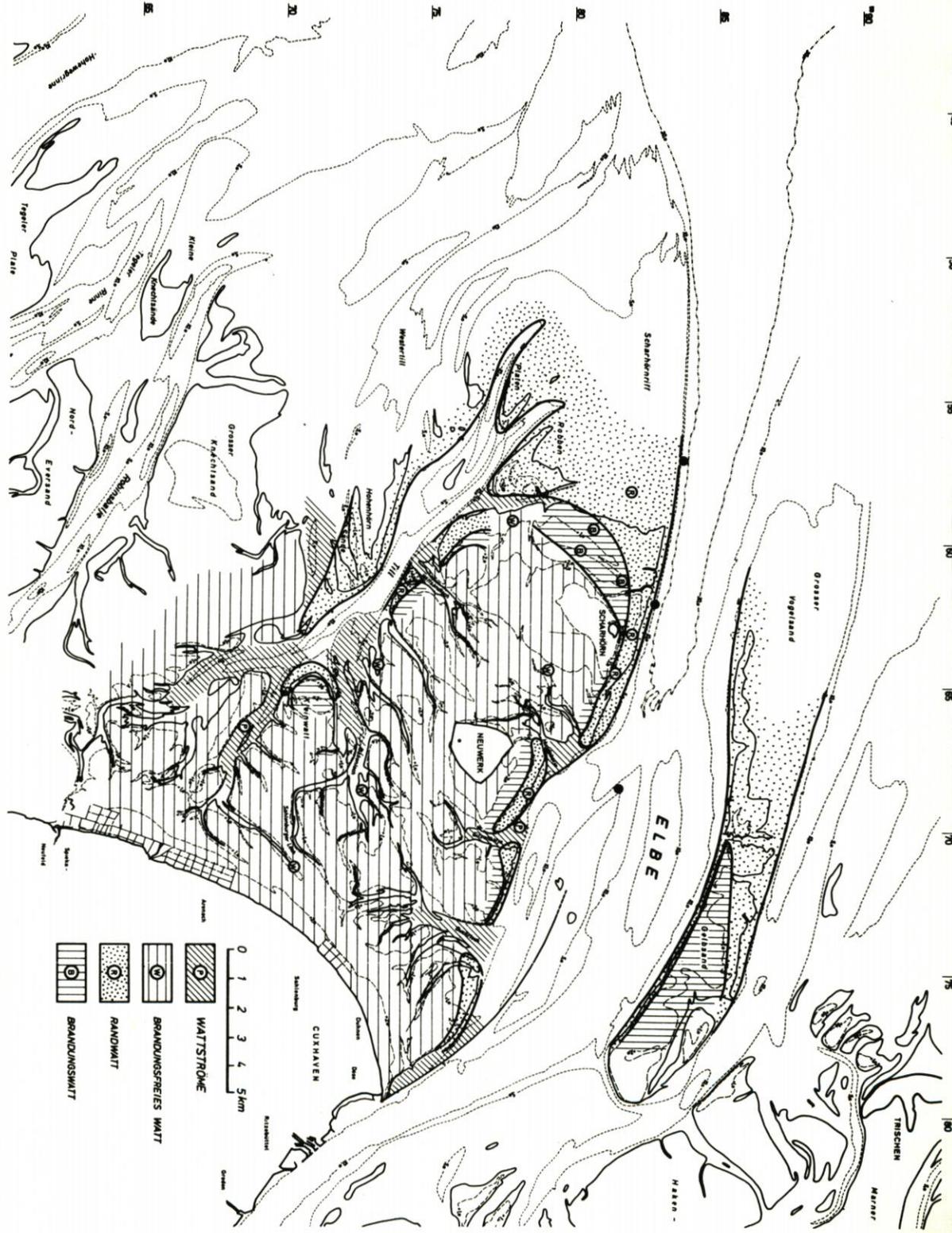
Die Freie und Hansestadt Hamburg hat seit 1962 im Rahmen ihrer zukunftsgerichteten, langfristigen Hafenpolitik die Planung und Vorbereitung für einen Tiefwasserhafen mit direktem Zugang zur 20 m tiefen Stromrinne der Außenelbe im Watt von Neuwerk und Scharhörn betrieben (Abb. 1.01). Die Forschungs- und Vorarbeitenstelle Neuwerk beim Amt Strom- und Hafenbau der Behörde für Wirtschaft, Verkehr und Landwirtschaft hat als Voraussetzung für diese Planung ein Forschungsprogramm durchgeführt mit dem Ziel, die bis dahin noch unzureichend erfaßten Zusammenhänge in Tideästuarien näher zu beschreiben. Die Ergebnisse dieser Forschungsarbeiten sind in der Schriftenreihe „Hamburger Küstenforschung“ veröffentlicht, in deren ersten Heft LAUCHT (1968) über die Ziele dieser Arbeiten berichtet.

Dieses Programm sollte u. a. auch die Entstehungsursachen und die Transportmechanismen suspendierter Feststoffe zu klären versuchen. Hierzu liegen bislang nur wenige Meßergebnisse aus anderen Tidegebieten vor (z. B. GRY, 1942; POSTMA, 1961; WOHLBERG, 1954), die wegen nicht angegebener bzw. anderer Randbedingungen nur bedingt übertragbar sind. GÖHREN (1971) hat im Rahmen seiner Untersuchung der Sandbewegungen im Elbemündungsgebiet Messungen auf den W a t t e n durchgeführt. Diese ermöglichen jedoch wegen der Streuung der Meßergebnisse nicht die Zuordnung der Suspensionskonzentrationen zu einzelnen Tideparametern. CHRISTIANSEN (1974) hat in der S t r o m r i n n e der Elbe ein Meßprogramm durchgeführt und daraus u. a. einen empirischen Ansatz für die Abhängigkeit des Suspensionstransportes vom Stromweg entwickelt.

Um vergleichbare Angaben für die W a t t g e b i e t e machen zu können, haben GÖHREN und LAUCHT (1972) ein automatisch arbeitendes, sogenanntes „Schwebstoffmeßgerät“ für Meßreihen über längere Zeiträume auch bei schlechten Witterungsbedingungen entwickelt. Die Ergebnisse hieraus werden mit den gleichzeitig zu messenden Tideparametern – Strömung, Seegang, Wind, Wasserstand und Wassertemperatur – in Zusammenhang gebracht. In den Jahren 1972, 1975 und 1976 sind mit diesem Gerät Messungen durchgeführt worden. Das in diesen Jahren gewonnene Datenmaterial ist gekennzeichnet durch besonders schlechte Witterungsbedingungen während der Messungen, so daß eine ausreichende Auswertungssub-



Abb. 1.02. Gliederung in Gebiete gleicher Seegangcharakteristik; Watt im Elbemündungsgebiet (Siefert, 1973)



stanz noch nicht gegeben war. Der Verfasser hat deshalb 1977 ein weiteres Meßprogramm durchgeführt mit dem Ziel, vorhandenes Datenmaterial zu ergänzen und eine umfassende Auswertung zu ermöglichen.

## 1.2 Aufgabenstellung und Zielsetzung

Es wird allgemein davon ausgegangen, daß die auf der Gewässersohle liegenden Sedimentteilchen durch strömungsbedingte Schubkräfte in Bewegung kommen. Mit zunehmender Schubspannung in Abhängigkeit von verschiedenen Parametern werden sie in Suspension gehoben. Wie Messungen in Tidegebieten zeigen, z. B. auch von WÜNSCHE (1976), beinhalten bislang diese nur auf der Strömung aufbauenden Schubansätze den für die Aufwirbelung des Sohlmateriale wesentlichen Einfluß des Seegangs nicht.

Da die direkte Messung der wellenbedingten Orbitalgeschwindigkeiten im Rahmen von längerfristigen, auch in den Wintermonaten durchzuführenden Meßprogrammen in der Natur nur mit erheblichem Aufwand gelingt (BÜSCHING, 1974; DETTE, 1974), sollen über die Wellenhöhen die für grundberührenden bzw. brechenden Seegang maßgebenden Orbitalgeschwindigkeiten (WIEGEL, 1964) ermittelt und der Tidebewegung überlagert werden. Der Einfluß der bei brechenden Wellen in das Wasser eingeschlagenen Luft (FÜHRBÖTER, 1971) muß dabei gesondert betrachtet werden.

Ziel dieser Arbeit ist es, die mit zunehmendem Windeinfluß auftretenden Veränderungen der Suspensionskonzentrationen auf dem Watt unter besonderer Berücksichtigung des Seegangs zu beschreiben. Für den auflandigen Windsektor soll ein allgemeingültiger Zusammenhang zwischen den Suspensionskonzentrationen und den Windverhältnissen angegeben werden. Daneben sind Suspensionsganglinien über die Tide zu entwickeln, Extremwerte der Konzentrationen abzuschätzen und die gewonnenen Ergebnisse in den Zusammenhang bereits vorliegender Arbeiten zu stellen.

Wegen der örtlich grundsätzlich unterschiedlichen Seegangscharakteristik auf den Watt (STEFERT, 1973, s. Abb. 1.02) sind die Standorte der Meßstationen im Brandungs- bzw. Randwatt vor Scharhörn (S) und im brandungsfreien Watt zwischen Neuwerk und Scharhörn an der Scharhörnbalje (SB) angeordnet.

## 2. Zur Theorie des Suspensionstransportes

### 2.1 Problemabgrenzung

Ein theoretischer Ansatz für den Transport von Feststoffen in Suspension muß in den Zusammenhang des Gesamttransportes von Feststoffen in Flachwassergebieten gestellt werden. Dieses ergibt sich aus:

- der bisher nicht möglichen, exakten Abgrenzung zwischen den zu unterscheidenden Bereichen „bed-load“ und „suspension-load“ (VANONI, 1977). Während der erste Bereich die sohlnahe Wasserschicht umfaßt, in der der Feststofftransport überwiegend durch eine rollende und hüpfende Bewegung größerer Feststoffteilchen über Grund gekennzeichnet ist (Geschiebetrieb), beschreibt der zweite Bereich nur den in Suspension erfolgenden Feststofftransport. Der Übergang ist naturgemäß fließend. Eine theoretische Abgrenzung der Bereiche erfolgt anhand der von ROUSE (1937) mitgeteilten Ergebnisse, in denen „suspension-load“ für den Tiefenbereich 0,05 bis 1,0 d über der Sohle festgelegt wird (Abb. 2.08).

- Dieser Ansatz hat allgemein Eingang in die Literatur gefunden (VANONI, 1977; RAUDKIVI, 1976; GRAF, 1971);
- der Vielzahl in Wattgebieten zu erfassender, sich wechselseitig beeinflussender bzw. voneinander abhängiger Parameter
  - windbeeinflussten Tideparametern
    - Wasserstand
    - Strömungsgeschwindigkeit
    - Triftstrom
    - Seegang
- } Turbulenzintensität
- Ortsparametern
    - Seegangscharakteristik
    - Sohlprofil
    - Sohlmaterial
    - umgebenden Wattgebieten
  - weiteren Parametern
    - Salzgehalt
    - Wassertemperatur
    - Koagulation
    - Oberwasser

Die durch den Wind ausgelösten wechselseitigen Beziehungen zwischen Wasserstand, Strömungsgeschwindigkeit und Seegang sind in Abhängigkeit von der Seegangscharakteristik und der Umgebung eines Standortes die für den Feststofftransport wichtigen Parameter. Sie bestimmen über die Turbulenzintensität und die Stromversetzung den Transport in den Bereichen „bed-load“ und „suspension-load“. Wegen der Vielzahl in ihrer Größenordnung örtlich und über die Tide laufend wechselnder Parameter sowie der Schwierigkeit der Einflußtrennung der einzelnen Parameter ist eine Abgrenzung beider Bereiche voneinander bisher nicht gelungen. Dieses ist hauptsächlich darauf zurückzuführen, daß für die Bereiche „bed-load“ und „suspension-load“ physikalisch unterschiedliche Gesetzmäßigkeiten gelten (GRAF, 1971) und deshalb der Übergangsbereich in Abhängigkeit von den sich ändernden Parametern nicht ausreichend beschrieben werden kann.

Die in der Literatur (z. B. VANONI, 1977) angegebenen theoretischen Beziehungen für den Feststofftransport sind deshalb gesondert für den jeweilig gültigen Bereich angegeben bzw. durch Vergleich mit Messungen empirisch auf den Gesamttransport umgesetzt (z. B. EINSTEIN-BROWN-Formel [„total-load“]). Im Rahmen dieser Arbeit wird bei den weiteren theoretischen Betrachtungen nur der Suspensionsbereich erläutert. Für den Bereich „bed-load“ wird auf die Angaben in der Literatur (z. B. RAUDKIVI, 1976) verwiesen.

Nachfolgend werden die für die Suspensionskonzentration maßgebenden Ansätze über die Turbulenzintensität zusammengestellt und der Einfluß des Seegangs erörtert.

## 2.2 Vertikale Verteilung suspendierter Feststoffe

Die Bewegung eines Feststoffteilchens in Suspension ist so definiert, daß während eines Bewegungsvorganges das Teilchen ständig von Flüssigkeit umgeben ist. Entsprechend des Gewichts dieses Teilchens muß während des Bewegungsvorganges für eine bestimmte Zeiteinheit Gleichgewicht zwischen der nach unten gerichteten Schwerkraft und der nach oben wirkenden Komponente der Turbulenzbewegung bestehen. Die Turbulenzintensität

bestimmt damit, ob ein Feststoffteilchen aus der unteren Wasserschicht („bed-load“) in Suspension gehoben wird und wie lange es dort verbleiben kann, bevor es wieder absinkt.

Aufbauend auf der hierfür formulierten Gleichgewichtsbeziehung (Abb. 2.01)

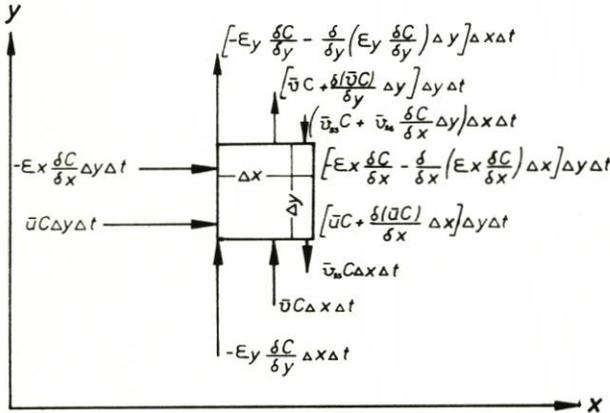


Abb. 2.01. Suspensionstransport durch ein Volumenelement für zweidimensionale Strömungsverhältnisse (VANONI, 1977)

$$0 = v_{ss} \cdot C + \epsilon_s \frac{dC}{dy} \tag{Gl. 2.01}$$

hat SCHMIDT (1925) die Verteilung von Staubteilchen in der Luft beschrieben. Diese Beziehung ist von JAKUSCHOFF und LEIGHTLY (1932) auf den Transport suspendierter Feststoffe im Wasser übertragen, von O'BRIEN weiter entwickelt und von ROUSE (1937) als sogenanntes „Diffusions- und Dispersions-Modell“ in nachstehende Form gebracht worden:

$$\frac{C_y}{C_a} = \left( \frac{d-y}{y} \cdot \frac{a}{d-a} \right)^z \tag{Gl. 2.02}$$

- $C_y$ : Konzentration der suspendierten Feststoffe in der Wassertiefe  $y$  [mg/l]
- $C_a$ : bekannte Konzentration in einer Wassertiefe  $a$  (Bereich 0,05 bis 1,0  $d$  über der Sohle [mg/l])
- $d$ : Wassertiefe im betrachteten Querschnitt [cm]
- $y$ : mit  $C_y$  korrespondierende Wassertiefe [cm]
- $a$ : mit  $C_a$  korrespondierende Wassertiefe [cm]
- $z$ : Exponent der Suspensionsverteilung

Die Gleichung beschreibt die relative Veränderung der Suspensionskonzentration über die Wassertiefe bei bekannter Konzentration auf einem Niveau. Der Exponent  $z$  beinhaltet in der Form

$$\frac{\epsilon}{\epsilon_s} \cdot \frac{v_{ss}}{k \cdot u_*} = z \tag{Gl. 2.03}$$

den Einfluß der für Flüssigkeiten ( $\epsilon$ ) und Feststoffteilchen ( $\epsilon_s$ ) unterschiedlichen Diffusionskoeffizienten [cm<sup>2</sup>/s], die materialabhängige Absinkgeschwindigkeit des Feststoffteilchens  $v_{ss}$  [cm/s], die im Querschnitt maßgebende Schubspannungsgeschwindigkeit an der Sohle  $u_*$

[cm/s] und die vertikale Geschwindigkeitsverteilung mit der sogenannten KARMAN-Konstante  $k = 2,3 u_* S$ .  $S$  ist die Steigung der im halblogarithmischen Maßstab dargestellten linearen Geschwindigkeitsverteilung. Für  $k$  ist aufgrund der von VANONI und EINSTEIN durchgeführten Untersuchungen (GRAF, 1971) zu berücksichtigen, daß der für klares Wasser gültige Wert  $k = 0,4$  mit anwachsender Suspensionskonzentration kleiner wird (Abb. 2.02), was zu einer Veränderung der vertikalen Geschwindigkeitsverteilung führt (Abb. 2.03).

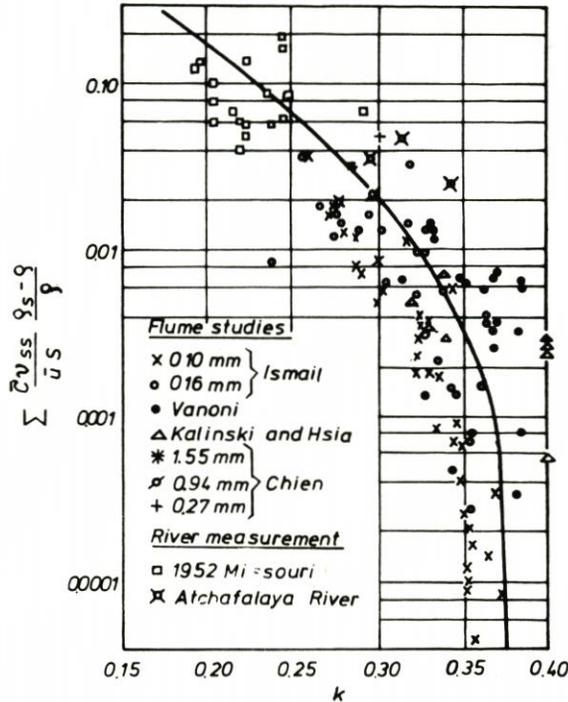


Abb. 2.02. Veränderung der KARMAN-Konstante mit der Suspensionskonzentration (EINSTEIN und CHIEN, 1954)

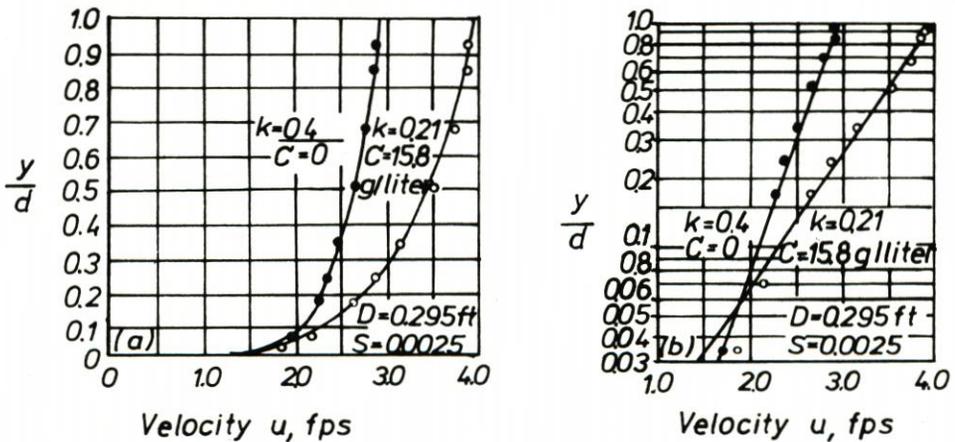


Abb. 2.03. Vertikale Geschwindigkeitsverteilung für unterschiedliche Suspensionskonzentrationen (VANONI, 1960)

Ab einem Tiefenverhältnis  $y/d = 0,15$  kann die Geschwindigkeitsverteilung zur Sohle hin nicht mehr mit einer linearen Beziehung im halblogarithmischen Maßstab beschrieben werden, weil die Schubkräfte in Sohlnähe zum Teil in Rotation der Feststoffteilchen umgesetzt werden (Abb. 2.04). Neben diesen Veränderungen sind bei der Absinkgeschwindigkeit eines Feststoffteilchens der Einfluß aus der zur Sohle hin anwachsenden Suspensionskonzentration (Abb. 2.05), der Einfluß der Änderung der Wassertemperatur (Abb. 2.06) und der Einfluß der Kornform und Dichte (Abb. 2.07) zu beachten. Der Parameter der Turbulenz ist über die Diffusionskoeffizienten und die KARMANKONSTANTE berücksichtigt, wobei nach FIELD und HOUGHTON (VANONI, 1977) der Schlupf zwischen den Feststoffteilchen und der Flüssigkeit ( $\epsilon/\epsilon_s$ ) die Absinkgeschwindigkeit gegenüber ruhigem Wasser verringert.

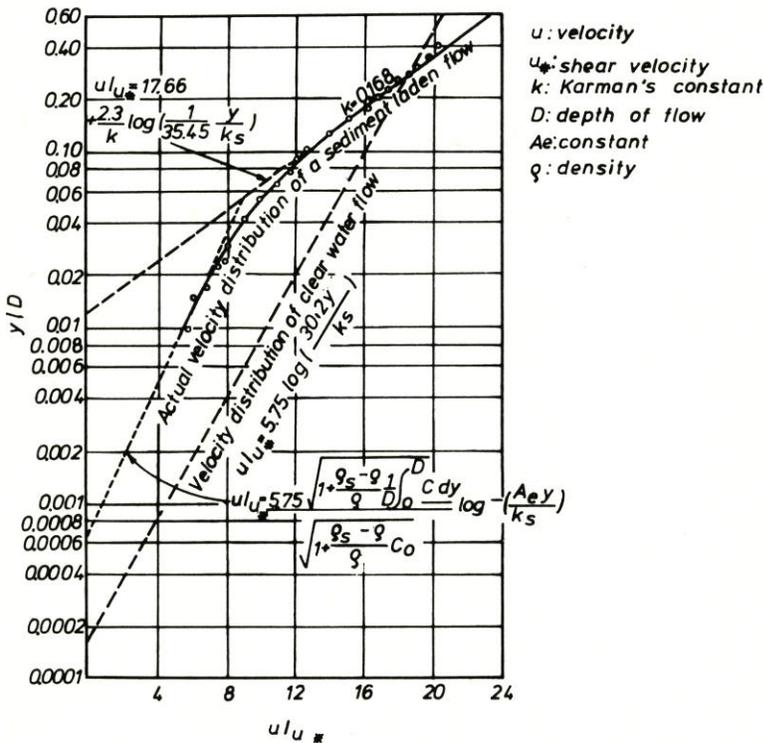


Abb. 2.04. Vertikale Geschwindigkeitsverteilung für unterschiedliche Suspensionskonzentrationen im Übergangsbereich „bed-suspension-load“ (EINSTEIN und CHIEN, 1955)

Für diesen auf ROUSE zurückgehenden Ansatz hat VANONI im Labor- und Feldversuch gute Übereinstimmung der Werte nachgewiesen (GRAF, 1971). Die ermittelten vertikalen Suspensionsverteilungen sind in Abb. 2.08 dargestellt und beruhen auf Vereinfachungen folgender Randbedingungen:

Ansatzimmanente Randbedingungen:

- Die Abflußverhältnisse sind stationär und zweidimensional darstellbar.
- Die Dichte der Suspension ist gleich der des Wassers.
- Der Turbulenzmechanismus im Untersuchungsgebiet ist über den zu beschreibenden

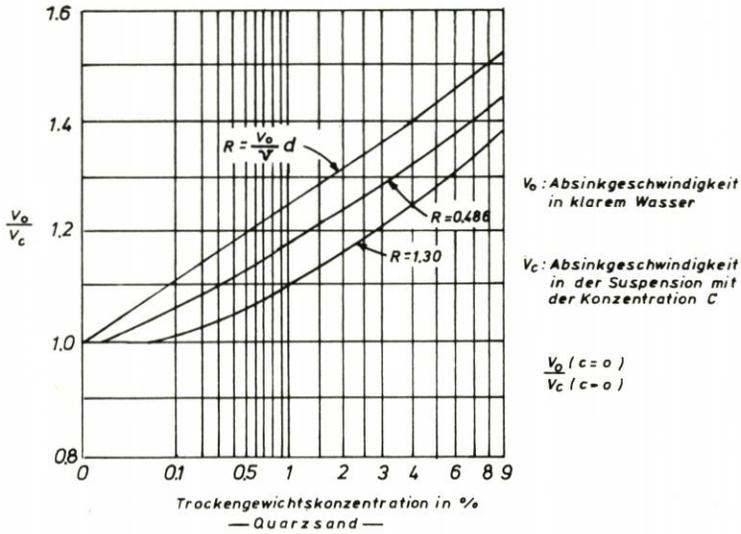


Abb. 2.05. Einfluß der Konzentration auf die Absinkgeschwindigkeit der Suspensionsteilchen für Einheitsquarzsand (McNOWN u. LIN, 1952)

Zeitraum unverändert.

- Die Summe der auf- und abwärtsgerichteten Turbulenzströmungen durch eine Einheitsfläche ist Null.

Parameterimmanente Randbedingungen:

- Der Schlupf ( $\epsilon/\epsilon_s$ ) kann nur qualitativ beschrieben werden, und zwar so, daß mit wachsender Turbulenz und Teilchengröße der Schlupf zunimmt.
- Örtliche Messungen des Diffusionskoeffizienten sind nicht möglich.
- Die mit der KARMAN-Konstante beschriebene vertikale Geschwindigkeitsverteilung enthält die turbulenzbedingten Geschwindigkeitsglieder höherer Ordnung „secondary-flow“ (GRAF, 1971) nicht, die nach Beobachtungen von VANONI et al. die Geschwindigkeitsverteilung in ihrer Form und Regelmäßigkeit verändern und zur Ausbildung von in Strömungslängsachse orientierten Bändern höherer Suspensionskonzentration führen.
- Die Beschreibung des Einflusses der Suspensionskonzentration auf die Absinkgeschwindigkeit der Feststoffteilchen kann bisher nur im STOKESCHEN Bereich des Reibungsgesetzes, d. h. für REYNOLDSZahlen  $< 2$  und für kleinere Konzentrationen bis ca. 6 %, ausreichend genau angegeben werden.

Bei der Anwendung dieser Beziehung auf tidebeeinflusste Flachwassergebiete sind die instationären und nicht mehr richtungskonstanten Abflußvorgänge sowie die windbedingten Veränderungen des Wellenklimas (DETTE, 1977) und der Strömungsverhältnisse (GÖHREN, 1969) zu beachten. In der Literatur (s. weiter unten) sind Beziehungen zwischen dem Suspensionsgehalt und einzelnen Parametern angegeben, ohne daß die jeweiligen Ansätze vollständige Beschreibungen des Gesamtproblems hergeben. CHRISTIANSEN (1974) hat eine Vielzahl dieser Ansätze zusammengestellt. Im wesentlichen sind hierbei Beziehungen zwischen dem Suspensionsgehalt (gemittelt über die gesamte oder für eine bestimmte Wassertiefe) und folgenden Parametern hergestellt:

- Mittlere Strömungsgeschwindigkeit (VICK, 1952; NIEBUHR, 1955)
- Tidehub und Temperatur (HALLIWELL, O'CONNOR, 1966; JACKSON, 1964)
- Mittlere Strömungsgeschwindigkeit und Wassertiefe (ROY, 1969)

- Temperatur und Salzgehalt (DILLO, 1960)
- Stromweg (CHRISTIANSEN, 1974; GÖHREN, 1971)

Die angegebenen Beziehungen führen gebiets- bzw. versuchsabhängig zu unterschiedlichen Ergebnissen, so daß eine allgemeingültige Erweiterung der mit Gl. 2.02 gegebenen vertikalen Suspensionsverteilung für tidebeeinflusste Abflußvorgänge, wie von O'CONNOR (1971) angestrebt, noch nicht möglich ist.

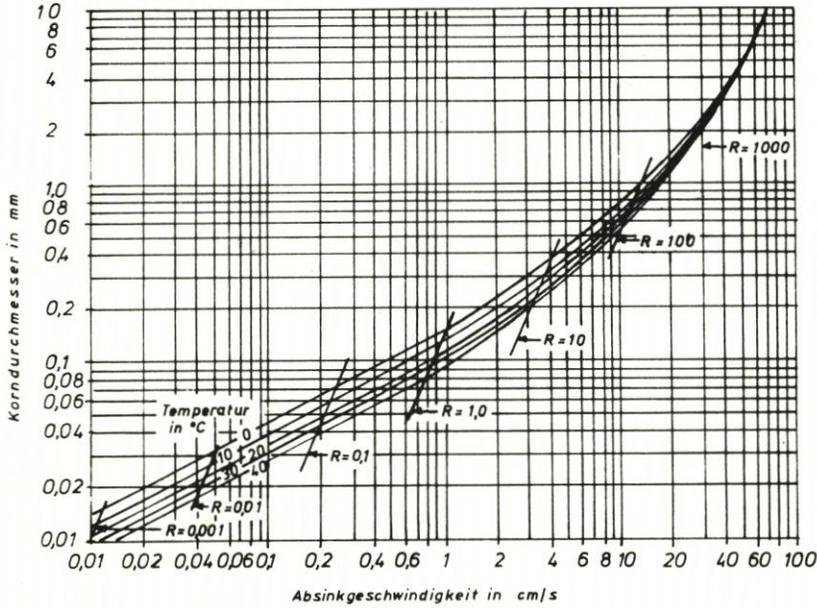


Abb. 2.06. Absinkgeschwindigkeit von Einheitsquarzsand für unterschiedliche Wassertemperaturen (ROUSE, 1937)

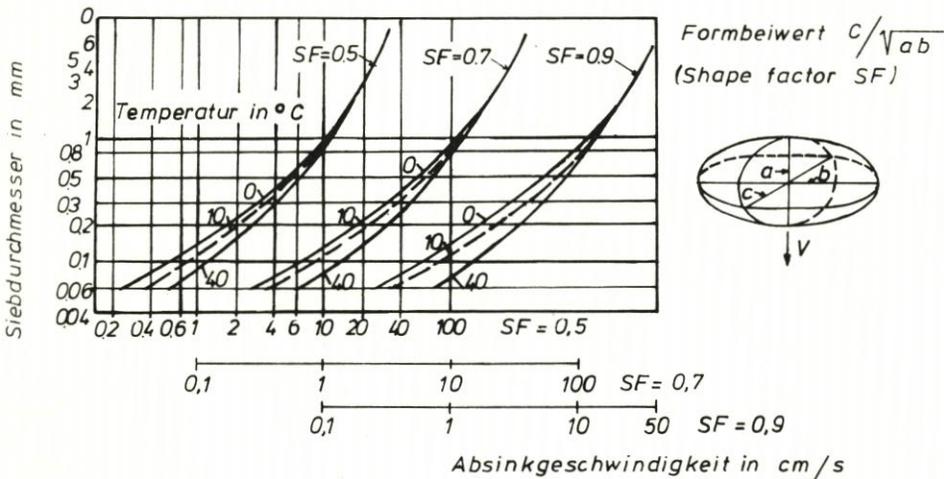


Abb. 2.07. Absinkgeschwindigkeit von natürlichem Quarzsand in destilliertem Wasser für unterschiedliche Formbeiwerte (INTERAGENCY COMMITTEE, 1957)

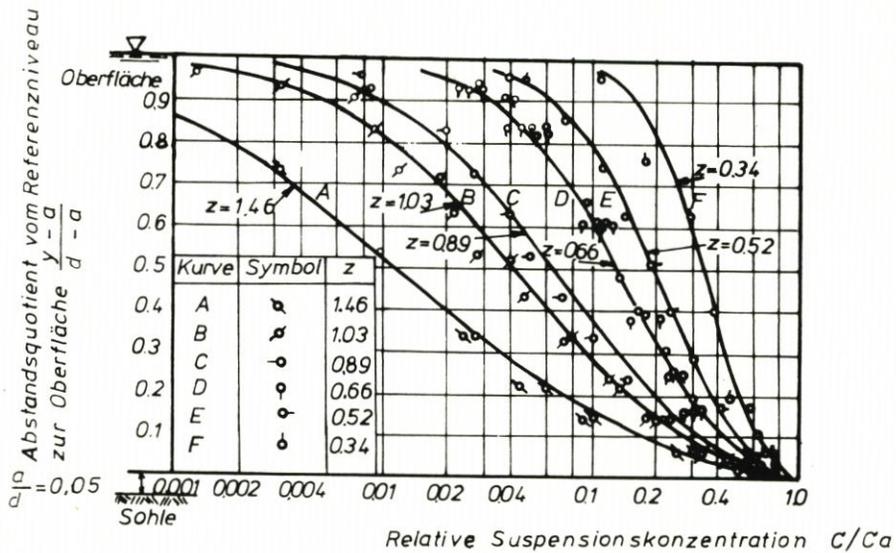


Abb. 2.08. Vertikale Suspensionsverteilung (VANONI, 1977)

## 2.3 Erörterung einzelner Einflußfaktoren

### 2.3.1 Seegang und Strömung

In der Literatur ist vielfach auf den mit der Seegangsintensität zunehmenden Suspensionsgehalt im Flachwassergebiet hingewiesen. GÖHREN (1971) führt hierzu sinngemäß aus, daß unmittelbare Beobachtungen des Einflusses von Orbital- und Brandungsströmungen auf den Suspensionsgehalt im Wattgebiet bisher nicht vorliegen und nach dem Stand der Meßtechnik (vgl. z. B. HOM-MA, HORIKAWA, KOMORI, 1966) vorläufig nicht zu erwarten seien; derartige Unterlagen seien aber für den Materialtransport bei höheren Windstärken von wesentlicher Bedeutung. Inzwischen sind einige qualitative und auch quantitative Aussagen für den Brandungstransport gemacht (RAUDKIVI, 1976; WÜNSCHE, 1976; BIJKER und VELLINGA, 1976). Sie erfassen aber nur den klassischen Brandungsstrand, gekennzeichnet durch ein vorgelagertes Riff und ein verhältnismäßig steiles Strandprofil, bei dem auf kleinstem Raum die gesamte Wellenenergie umgewandelt wird. Aus der Wellenrichtung zur Strandlinie läßt sich über einen Schubspannungsansatz der strandparallele Transport ermitteln. Hierfür haben MADSON et al. (1976) nachgewiesen, daß die auf stationäre Abflußvorgänge zurückgehenden Diagramme von SHIELDS und HYULSTRÖM (Abb. 2.15) auch auf instationäre Abflußvorgänge in Tidegebieten übertragbar sind. Die Aussagen beschränken sich in der Regel aber auf den Geschiebetrieb („bed-load“). Der hier interessierende Transport in Suspension wird vernachlässigt bzw. nur mit Näherungsansätzen erfaßt. Wie die von SIEFERT (1969 u. 1973) für seine Seegangsuntersuchungen in Flachwassergebieten aufgenommenen Luftbilder des Wattgebietes (Abb. 2.09) westlich von Scharhörn bei Windstärke um 6 Bft aus WNW zeigen, trifft die Randbedingung einer vollständigen Wellenenergieumwandlung im Bereich der Brandungskante dort nicht zu. Vielmehr wird, wie anhand der langgestreckten weißen Schaumbrecher in Abb. 2.09 erkennbar ist, die Wellenenergie flächenhaft über weite Bereiche des Flachwassergebietes abgegeben.

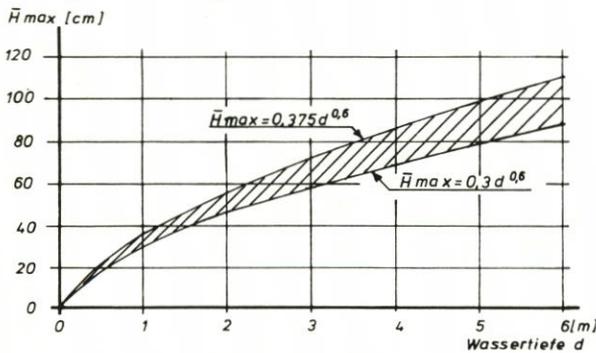


Abb. 2.09. Luftaufnahme der Brandungszonen im südlichen Elbemündungsgebiet (Robbenplatten bis Scharhörn) bei WNW-Wind um 6 Bft aus rd. 4000 m Höhe (GÖHREN, 1971)

Den vielschichtigen Mechanismus der Veränderung der Wellenkennwerte beim Lauf der Welle aus tiefem in flaches Wasser hat SIEFERT (1973 u. 1974) erläutert. Die qualitative Feststellung, daß beim Lauf einer Welle über die Diskontinuitätszone in gleichmäßig flaches Wasser die relative Wellenhöhe um so mehr zunimmt, je höher die Ausgangswelle, je flacher die Böschung und je kleiner die Wassertiefe ( $d$ ) ist, hat SIEFERT durch eigene Messungen untermauert. Er hat hierbei die Veränderung der Wellenhöhe, der Wellenperiode und der Wellensteilheit betrachtet. Die wesentlichen Ergebnisse sind nachstehend zusammengestellt:

- Standort und Morphologie der Umgebung bestimmen die Seegangscharakteristik und damit, ob der Übergang der Wellen in flaches Wasser weitgehend brandungsfrei oder mit ausgedehnter Brandung erfolgt (Abb. 1.02).
- Die Wellenhöhen ( $H$ ) sind in Flachwassergebieten wesentlich abhängig von der Wassertiefe ( $d$ ), wobei der Einfluß mit abnehmender Wassertiefe zunimmt (Abb. 2.10).
- Der Quotient aus kennzeichnender und mittlerer Wellenhöhe ( $H_{1/3}/\bar{H}$ ) ist in Abhängigkeit von der Seegangscharakteristik kleiner als in tiefem Wasser und für größere Wellenhöhen konstant (Abb. 2.11).
- Der Zusammenhang zwischen den Mittelwerten von Wellenhöhe ( $\bar{H}$ ) und -periode ( $\bar{T}$ ) verändert sich beim brandungsfreien Übergang nur unwesentlich. Bei ausgedehnter Brandung werden davon abweichend die Perioden größer (Abb. 2.11).
- Die Perioden der Wellen sind nicht nur von der Wellenhöhe und der Wassertiefe, sondern auch von der Tidephase abhängig. Die größten Wellenperioden ( $\bar{T}$ ) und -höhen ( $\bar{H}$ ) treten kurz nach Tidehochwasser (Thw) auf, wenn mit fallendem Wasserstand leichte Dünungseffekte wirksam werden (Abb. 2.12).
- Die Welle wird beim Übergang in Abhängigkeit vom Quotienten  $\bar{H}/d$  aufgesteilt und zunehmend asymmetrisch, bis der obere Teil des Wellenspektrums bricht (Abb. 2.13).
- Die Wellen überlaufen die Diskontinuitätszonen weitgehend ohne Richtungsänderung; sie folgen allerdings tieferen Rinnen und Prielen auch unter starken Richtungsänderungen (Abb. 2.14).
- Die Wellen zerfallen beim Überschreiten einer von der Wassertiefe abhängigen Grenzperiode ( $T_{gr}$ ) in Sekundärwellen unterschiedlicher Höhe.

A. Weitgehend brandungsfreies Watt



B. Gebiete mit ausgedehnter Brandung

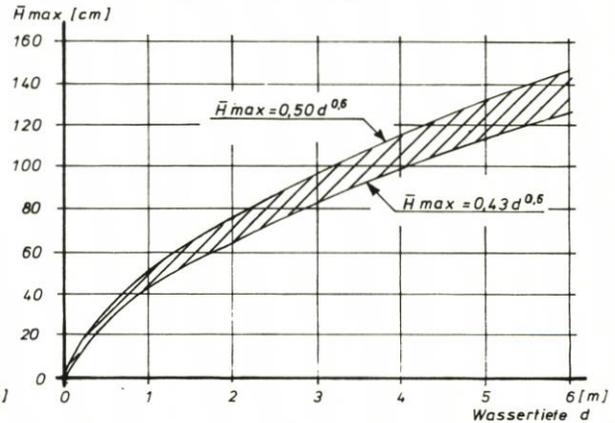


Abb. 2.10. Maximale mittlere Wellenhöhen  $\bar{H}_{max}$  auf dem Watt in Abhängigkeit von der Wassertiefe (nach SIEFERT, 1973)

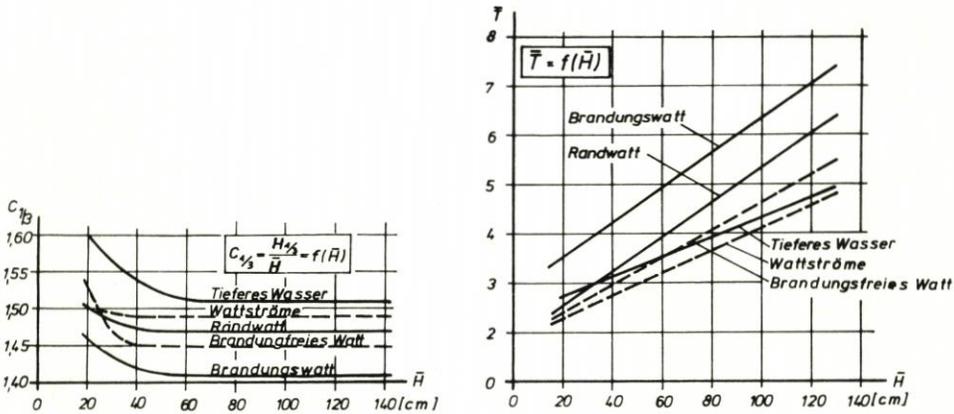


Abb. 2.11. Seegangskennwerte im küstennahen Flachwasserbereich (nach SIEFERT, 1973)  
 links: Veränderung der Zusammenhänge zwischen mittlerer und kennzeichnender Wellenhöhe beim Übergang in flaches Wasser  
 rechts: Veränderung der Zusammenhänge zwischen den Mittelwerten von Wellenhöhe und -periode beim Übergang in flaches Wasser.

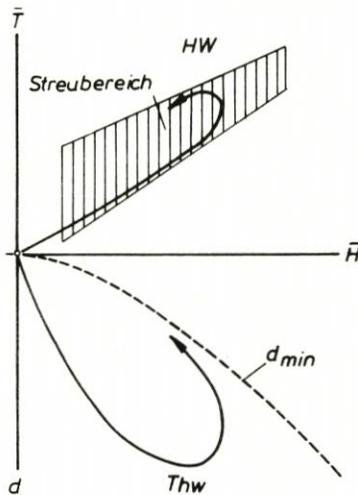


Abb. 2.12. Veränderung der Wellenkennwerte im Watt über die Tide (SIEFERT, 1973)

Die Beschreibung dieser Veränderungen des Seegangs ist für die Aufwirbelung des Sohlmaterials in Suspension von Bedeutung, da hierdurch die Grenzwerte für die Grundberührung des Seegangs im Watt bestimmbar sind. Mit Überschreitung des Grenzwertes wirkt die Orbitalbewegung auf das Sohlmaterial ein. Nach der linearen Wellentheorie von AIRY-LAPLACE hat eine Welle Grundberührung, wenn

$$L / 2 \geq d \tag{Gl. 2.04}$$

ist.

Für den nichtlinearen natürlichen Seegang gibt es einen gleichwertigen Ansatz nicht. Um in jedem Fall eine Grundberührung zu erfassen, wird die für Einzelwellen gültige Beziehung (Gl. 2.04) auf die Parameter einer mittleren Welle ( $\bar{H}$  u.  $\bar{L}$ ) im natürlichen Spektrum übertragen.

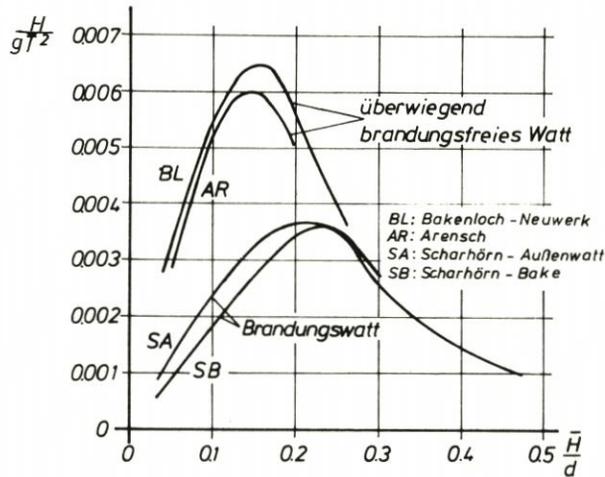


Abb. 2.13. Obere Begrenzung des Streubereichs für  $\frac{\bar{H}}{g\bar{T}^2}$  über  $\frac{\bar{H}}{d}$  für vier Stationen im Watt (SIEFERT, 1973)

Unter Verwendung der von SIEFERT (1973) in Abhängigkeit von der Seegangcharakteristik für mittlere Wellenperioden  $\bar{T}$  angegebenen Beziehung

$$\bar{T}_w = a_w \bar{H} + b_w \quad (\text{Gl. 2.05})$$

( $a_w$  und  $b_w$ : von der Wassercharakteristik abhängige Konstanten) und mit dem für Flachwasser geltenden Mittelwert

$$\bar{L} = \bar{T}^2 \quad (\text{Gl. 2.06})$$

ergeben sich nachstehende mittlere Wellenhöhen für grundberührenden Seegang als Minimalwerte:

brandungsfreies Watt:  $d \text{ (MThw)} \leq 5 \text{ m}$

$$\bar{H}_{g \text{ min}} = 0,5 \cdot \sqrt{d} - 0,64 \text{ [m]} \quad (\text{Gl. 2.07})$$

Randwatt:  $d \text{ (MThw)} \geq 2 \text{ m und } \leq 5 \text{ m}$

$$\bar{H}_{g \text{ min}} = 0,4 \cdot \sqrt{d} - 0,51 \text{ [m]} \quad (\text{Gl. 2.08})$$

Brandungswatt:  $d \text{ (MThw)} \geq 1 \text{ m und } \leq 4 \text{ m}$

$$\bar{H}_{g \text{ min}} = 0,4 \cdot \sqrt{d} - 0,8 \text{ [m]} \quad (\text{Gl. 2.09})$$

Voraussetzung für das Entstehen dieser Wellenhöhen ist in Abhängigkeit von der Windstärke eine ausreichende Streichlänge des Windes.

Die Größenordnung der horizontalen Orbitalgeschwindigkeit der so in Abhängigkeit von der Wassertiefe ( $d$ ) angebbaren minimalen Wellenhöhen kann über die Theorien von LAITONE und MAC COWAN (WIEGEL, 1964) abgeschätzt werden. Die hierfür geltenden Beziehungen sind in Abb. 2.15 dargestellt, wobei für die Laufgeschwindigkeit ( $c$ ) der Wellen im flachen Wasser ausreichend genau nach SIEFERT (1973) gilt

$$\bar{c} = \sqrt{g \cdot d \left(1 + \frac{3}{4} \frac{\bar{H}}{d}\right)} \quad (\text{Gl. 2.10})$$



Abb. 2.14. Beispiele für die Wellenbeugung in Prielen (SIEFERT, 1973)

Vergleichsweise gibt ZENKOVICH (1967) für die maximale Orbitalströmungsgeschwindigkeit über Grund bei  $d/L < 0,5$ , hergeleitet aus dem hydrodynamischen Ansatz der Wellenbewegung, den Ausdruck an:

$$\max \bar{u}_{\bar{H}} = \pi \cdot \bar{H} / \sqrt{\pi \cdot \frac{\bar{H}}{g} \cdot \sinh 4 \pi \frac{d}{L}} \quad (\text{Gl. 2.11})$$

Die hiermit ermittelten Orbitalgeschwindigkeiten weichen erheblich von den im Labor und in der Natur gemessenen Werten ab (ZENKOVICH, 1967), was u. a. auf die in diesem Ansatz nicht berücksichtigten Sohlreibungskräfte und Turbulenzeinflüsse zurückzuführen ist.

Eine Abschätzung der maßgebenden Orbitalgeschwindigkeit kann nur unter Berücksichtigung der Parameter für Sohlreibung und Turbulenz erfolgen. Die o. g. Ansätze von LAITONE und MAC COWAN (WIEGEL, 1964) bieten diese Voraussetzungen, kommen aber insbesondere für größere Verhältnisse  $\bar{H}/d (> 0,3)$  zu unterschiedlichen Ergebnissen (vgl. Abb. 2.15).

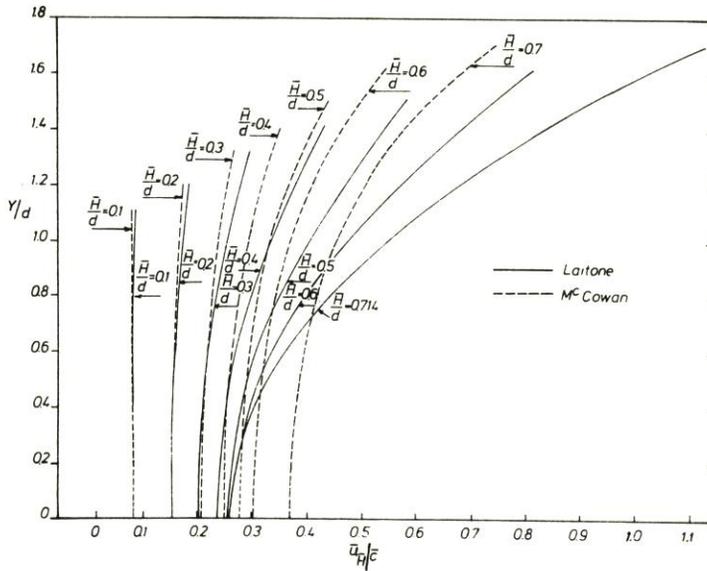


Abb. 2.15. Bestimmung der höchsten horizontalen Orbitalgeschwindigkeit  $\bar{u}_{\bar{H}}$  für mittlere Wellenhöhen  $\bar{H}$  nach Einzelwellentheorien (nach LAITONE u. McCOWAN, WIEGEL, 1964)

Es ist somit in Abhängigkeit von der Wassertiefe ( $d$ ) der untere Grenzwert der Wellenhöhe  $\bar{H}$  angebar, ab dem der Einfluß auf das Sohlenmaterial einsetzt. Dieser Einfluß wächst mit steigender Wellenhöhe weiter an und hat in der höchstmöglichen, dann brechenden Welle mit zusätzlichen Turbulenzen durch den Lufteinschlag (FÜHRBÖTER, 1971) sein Maximum. Auf dem Watt brechen allerdings nicht nur die Wellen der Höhe  $H_{\max}$ , sondern, in Abhängigkeit von der Wassertiefe und der Seegangcharakteristik, ein größerer Teil des Seegangsspektrums. SIEFERT (1973) schlägt vor, den brechenden Teil des Höhengspektrums zwischen  $H_{b \min}$  und  $H_{\max}$  zu legen, und zwar in der Form

$$H_{b \min} = 0,5 d \text{ für } d < 0,1 T^2 \quad (\text{Gl. 2.12})$$

Dieser Grenzwert kann allerdings von den Naturmessungen heutiger Durchführung nicht geliefert werden, wie SIEFERT (1973) selbst angibt. Der Wert kann als plausibler Richtwert angesehen werden wegen des überwiegenden Einflusses der Wassertiefe auf die Wellenhöhe im Flachwasser unter Vernachlässigung der Wellensteilheit und weiterer Parameter.

Bei  $H > H_{b \min}$  setzen Brandungserscheinungen ein. Auf  $\bar{H}$  bezogen, läßt sich somit unter Verwendung der von SIEFERT angegebenen Beziehungen

$$H_{\max} \sim 2,5 \bar{H} \quad (\text{Gl. 2.13})$$

der Schwellenwert der einsetzenden Brandung mit

$$\bar{H}_{b \min} > 0,2 d \quad (\text{Gl. 2.14})$$

angeben, wobei der auf mittlere Perioden  $\bar{T}$  umzurechnende Gültigkeitsbereich in Flachwassergebieten immer erfüllt ist.

Für den Bereich der sohlbeeinflussenden Wellenhöhen kann damit in Abhängigkeit von der Wassertiefe die Größenordnung der horizontalen Komponente der Orbitalgeschwindigkeit angegeben werden und mit der windbeeinflussten Tideströmung (Triftstrom, vgl. GÖH-

REN, 1968) überlagert werden. Mit Hilfe der von HJULSTRÖM (1935) angegebenen und von ZANKE (1977) erweiterten Beziehung (Abb. 2.16) ist der für den einsetzenden Geschiebetrieb („bed-load“) und die Aufwirbelung maßgebende Geschwindigkeitsgrenzwert in Abhängigkeit vom Korndurchmesser des Sohlenmaterials bestimmt, über den dann auf eine zunehmende Suspensionskonzentration geschlossen werden kann.

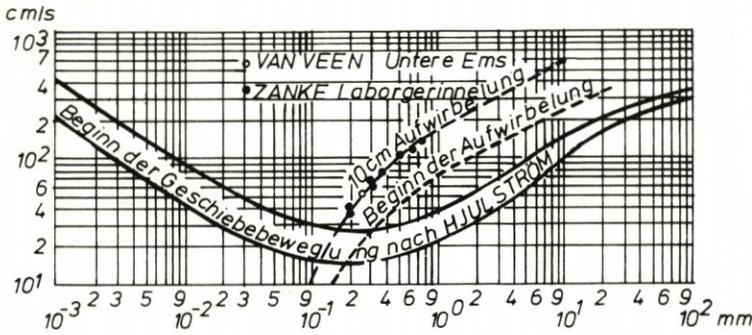


Abb. 2.16. Grenzgeschwindigkeit für einsetzenden Geschiebetrieb und beginnende Aufwirbelung in Suspension (nach HJULSTRÖM und ZANKE, 1977)

### 2.3.2 Temperatur des Wassers

CHRISTIANSEN (1974) hat im Elbemündungsgebiet den Einfluß der Wassertemperatur auf die Suspensionskonzentration festgestellt und mit der temperaturabhängigen Zähigkeit des Wassers und der damit verbundenen Änderung der Sinkgeschwindigkeit der suspendierten Feststoffteilchen begründet. Danach steigt bei sonst gleichen Voraussetzungen mit abnehmender Temperatur die Suspensionskonzentration an. Er stützt sich hierbei auf die von DILLO (1960) im Modellgerinne ermittelte, nicht dimensionsreine Beziehung (Abb. 2.17)

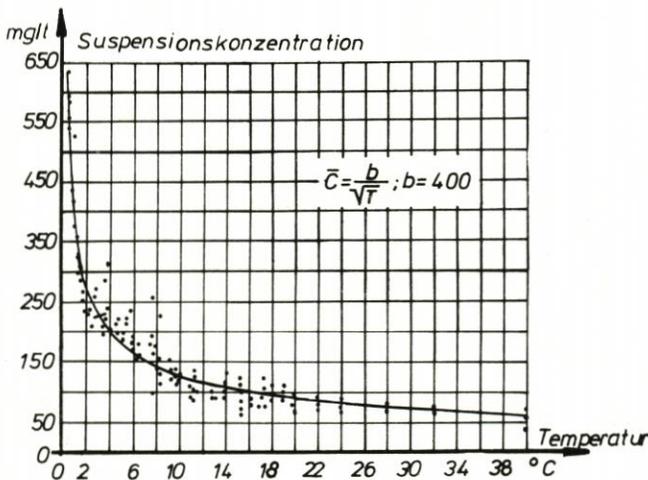


Abb. 2.17. Veränderung der Suspensionskonzentration mit den Wassertemperaturen für Süßwasser (DILLO, 1960)

$$\bar{C} = b \sqrt{T_C} \quad (\text{Gl. 2.15})$$

$$\bar{C} \text{ [mg/l], } b = 400 \text{ [-], } T_C \text{ [}^\circ\text{C]}$$

und den von LANE, CARLSON und MANSON (1949) angegebenen Korngrößenbereich  $< 0,3 \text{ mm}$ . Die aufgrund der temperaturabhängigen Sinkgeschwindigkeit (Abb. 2.06) zu erwartende Veränderung des Exponenten  $z$  (Gl. 2.02 und 2.03) hat DILLO allerdings nicht eindeutig feststellen können.

### 2.3.3 Salzgehalt und Koagulation

Beim Einfluß des Salzgehaltes sind grundsätzlich die Abhängigkeiten der Suspensionskonzentration vom Absolutwert des Salzgehaltes und vom Wert der Salzgehaltsschwankungen zu unterscheiden. Für steigende Absolutwerte des Salzgehaltes kommt DILLO (1960) im Versuchserginis zu dem Ergebnis, daß mit dem Salzgehalt auch die Suspensionskonzentration wächst (Abb. 2.18) und bei 30 ‰ etwa viermal so groß ist wie in reinem Wasser. Weiterhin wird die vertikale Verteilung der Suspension mit zunehmendem Salzgehalt gleichmäßiger, d. h., der Exponent  $z$  der Gl. 2.02 wird kleiner. In oberflächennahen Schichten ist demnach die Konzentrationszunahme größer als in tieferen Schichten. Die in Abb. 2.18 angegebene Beziehung gibt Mittelwerte der Konzentration dieser Verteilung an.

Die in Tideflüssen in Abhängigkeit vom Oberwasser und der Tidephase vorhandene Verschiebung der Brackwasserzone führt je nach Standort zu Schwankungen des Salzgehaltes. Diese lösen chemische und biologische Prozesse aus, die u. a. die Koagulation sehr feiner Partikel zu größeren Einheiten bewirken. Das Partikelpaket erhält hierdurch eine erhöhte Absinkgeschwindigkeit, was wiederum zu den bekannten Ausfällungen und Ablagerungen, insbesondere zu Stauwasserzeiten führt. LUCHT (u. a. 1953 u. 1964) hat über diese Erscheinung des Schlickfalles für das Elbeästuar umfangreiches Material zusammengestellt, auf das hier nicht näher eingegangen wird (vgl. Abschn. 3.2.2).

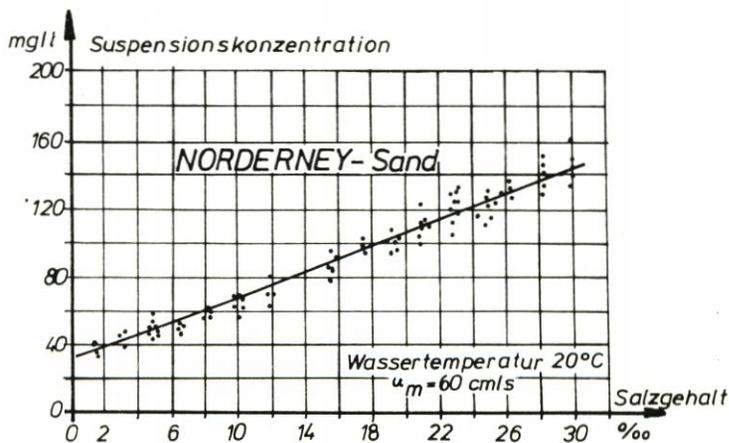


Abb. 2.18. Veränderung der Suspensionskonzentration mit dem Salzgehalt (DILLO, 1960)

## 2.4 Folgerungen für die Aufgabenstellung

Mit den vorgehenden Ausführungen ist erläutert, daß befriedigende Ansätze für die Suspensionsverteilung bisher nicht angegeben werden können. Dieses gilt insbesondere für die instationären Tidevorgänge. Es liegen heute nur vereinfachende Beschreibungen einzelner Einflußfaktoren (Parameter) auf die Suspensionsverteilung und -konzentration vor. Sie gehen auf Modellversuche mit den auftretenden Verzerrungen aus den Modellmaßstäben und auf Naturmessungen mit den jeweiligen ortsgebundenen Randbedingungen zurück.

In Anbetracht dieser Voraussetzungen wird das im Rahmen dieser Arbeit vorzustellende Datenmaterial beschrieben und kritisch gewertet mit dem Ziel, allgemeinere Aussagen über die Suspension in Flachwassergebieten zu erarbeiten.

## 3. Messungen und Fehlerabschätzungen

### 3.1 Meßprogramm und Geräteeinsatz

Für die in Abschn. 1 formulierte Zielsetzung sind die Suspensionskonzentrationen mit dem von GÖHREN und LAUCHT (1979) entwickelten Gerät für automatische Messungen und Registrierungen suspendierter Feststoffe durchgeführt worden. Dieses Gerät ist im Rahmen des Schwerpunktprogramms der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) „Sandbewegung im deutschen Küstenraum“ entwickelt worden.

Aufbauend auf die mit diesem Gerät durch GÖHREN vor Scharhörn (S) in den Jahren 1972, 1975 und 1976 erzielten Meßergebnisse, ist das weitere Meßprogramm 1977 sowohl vor Scharhörn als auch an der Scharhörnbalje (SB) durchgeführt worden. Die Wahl des zusätzlichen Standorts Scharhörnbalje (SB) ergab sich aus dem Bestreben, nicht nur aus dem brandungsbeaufschlagten Bereich vor Scharhörn, sondern auch aus brandungsfreien Watten Meßergebnisse vorzulegen und damit unterschiedliche Seegangscharakteristiken zu erfassen.

Die Standorte der Stationen sind in Abb. 1.01 eingetragen und mit nachstehenden GAUSS-KRÜGER-Koordinaten beschrieben:

- Scharhörn (S), brandungsbeaufschlagtes Randwatt:  $R = 34636 / H = 59822$
- Scharhörnbalje (SB), brandungsfreies Watt:  $R = 34655 / H = 59791$

Zur Messung der wesentlichen Einflußparameter sind den Hauptgeräten weitere Geräte für die Messungen von Wellen, Strömung und Wassertemperatur zugeordnet worden. Die Winddaten wurden von der ständig arbeitenden Windstation auf Scharhörn geliefert.

Die Geräte und insbesondere die elektrischen Anlagenteile des Schwebstoffmeßgeräts (vgl. hierzu Abschn. 3.2) sind wöchentlich gewartet worden. Auf die erschwerten Bedingungen für die praktische Durchführung der Wartungsarbeiten wird hier nicht näher eingegangen. Die ordnungsgemäße Arbeitsweise der Schwebstoff-, der Wellen- und der Temperaturmeßgeräte ist nur in der Zeit der Wasserführung (ca. 3 Stunden vor bis nach Hochwasser), die des Strömungsmeßgerätes aber nur um Niedrigwasser überprüfbar.

Die Höhenkoten der Geräte sind bestimmt einerseits durch das Streben nach möglichst langen Meßreihen und demzufolge tiefen Standorten und andererseits durch die für Aufbau, Wartung und Reparatur erforderliche, ausreichend lange Trockenfallzeit und damit hohen Standorten. Unter Berücksichtigung mittlerer Tideverhältnisse sind deshalb beide Stationen auf einer Höhenkote von +0,5 m SKN aufgestellt worden.

Die Einsatzzeit der Geräte über das Jahr ist durch die eisfreie Zeit vorgegeben und schwankt je nach Dauer des Winters. Da die Geräte in jedem Fall über Winter abgebaut

werden mußten, konnten die eigentlichen Meßprogramme nur in der eisfreien Zeit etwa zwischen Anfang April und Ende November jeden Jahres abgewickelt werden. Dabei ist der besonders interessierende Zeitraum der Starkwindmessungen im allgemeinen begrenzt auf die Monate Oktober und November.

### 3.2 Meßgeräte und Meßverfahren mit Fehlerabschätzung

#### 3.2.1 Suspensionsmessungen

Zur Ermittlung des Feststoffgehaltes im Wasser gibt es zahlreiche ältere Verfahren, die überwiegend von der Bestimmung der Feststoffmasse durch Filtern oder Zentrifugieren ausgehen (CHRISTIANSEN, 1974). Daneben sind auch fotoelektrische Trübungsmessungen mit gutem Erfolg angewendet worden (WÜNSCHE, 1976). Alle diese Meßmethoden erfordern aber einen erheblichen manuellen Bedienungsaufwand. Sie können deshalb nur vom Schiff oder von größeren bemannten Stationen aus durchgeführt werden und verbieten in der Regel einen Einsatz bei stürmischem Wetter (etwa ab 5 Bft).

Das von GÖHREN und LAUCHT (1972) entwickelte Gerät ist so konzipiert, daß es auch bei schweren Wetterlagen zu Meßergebnissen führt, um gerade diesen für die küstenmorphologischen Veränderungen wichtigen Windstärkenbereich erfassen zu können. Diesem Gerät (Abb. 3.01 bis 3.07) liegt als meßtechnisches Verfahren die direkte Bestimmung der Feststoffmasse in der Volumeneinheit Wasser zugrunde. Hierbei wird auf den Einsatz der fotoelektrischen Trübungsmessmethode wegen des zu erwartenden Bewuchses der Optik und der Schwierigkeit der Eichung bei sich verändernder Zusammensetzung der suspendierten Feststoffe verzichtet.

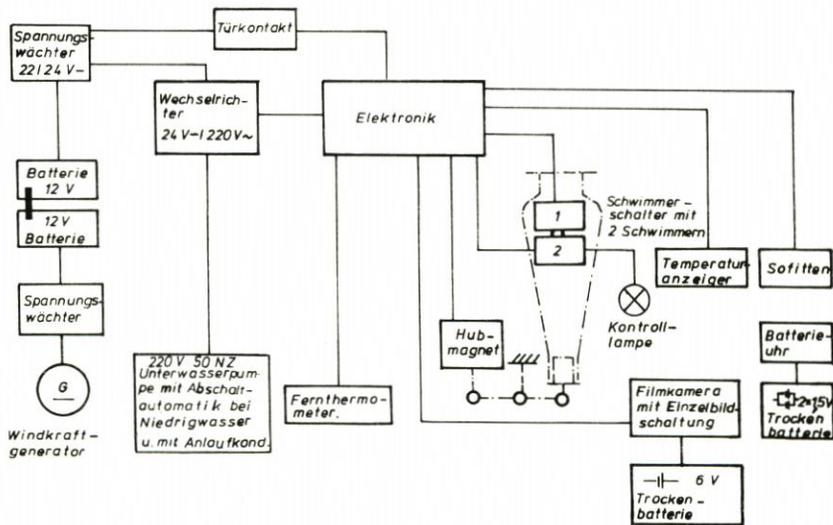


Abb. 3.01. Übersichtsplan Schwebstoffmeßgerät

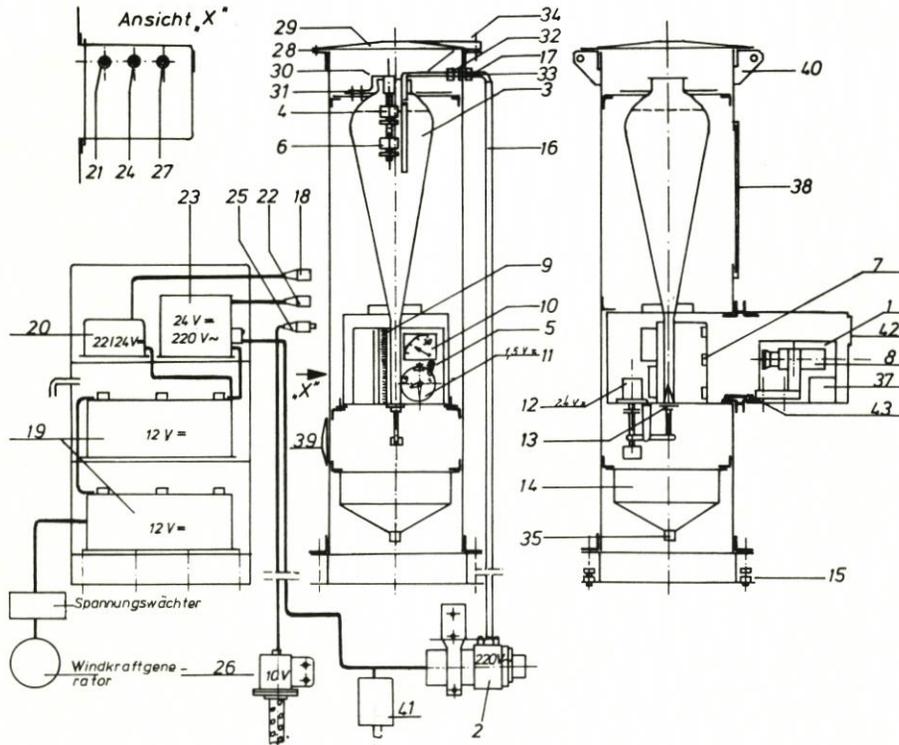


Abb. 3.02. Schwebstoffmeßgerät (nach GÖHREN und LÄUCHT)

- |  |   |
|--|---|
| 1. Elektronik zur Funktionssteuerung                         | 22. Steuerkabel für die Förderpumpe (2)                       |
| 2. Wechselstrompumpe, 220 V, zur Förderung der Probe         | 23. Wechseltrichter für den Betrieb der Wechselstrompumpe (2) |
| 3. Absetzgefäß, Inhalt 20 l                                  | 24. Gerätebuchse für Wechseltrichter am Schwebstoffmeßgerät   |
| 4. Schwimmerschalter zur Begrenzung der Füllhöhe             | 25. Stromversorgungs- und Meßkabel für Thermometer            |
| 5. Kontrolllampe für ordnungsgemäßes Arbeiten des Gerätes    | 26. Temperaturgeber   |
| 6. Schwimmerschalter als Geber für die Kontrolllampe         | 27. Gerätebuchse für Thermometer am Schwebstoffmeßgerät       |
| 7. Soffitten zur Beleuchtung der Meßeinheiten                | 28. Griffmuttern  |
| 8. Super-8-Filmkamera in Einzelbildschaltung                 | 29. Deckel des Schwebstoffmeßgeräts                           |
| 9. Meßskala für Suspensionsmessung                           | 30. Halterung der Schwimmerschalter                           |
| 10. Anzeigergerät des Fernthermometers                       | 31. Schraubverbindung zum Herausnehmen der Schwimmerschalter  |
| 11. batteriegetriebene Zeit- und Datenuhr                    | 32. Überwurfmutter  |
| 12. Hubmagnet zum Öffnen des Meßrohrverschlusses             | 33. Rohrverschraubung zum Lösen des Einlaufrohres (34)        |
| 13. konischer Meßrohrverschluß                               | 34. Einlaufrohr   |
| 14. Abflußtrichter   | 35. Stützen des Abflußtrichters (14)                          |
| 15. Justierschrauben für lotrechte Aufstellung               | 36. Auffangbehälter (entfallen)                               |
| 16. Förderleitung zwischen Pumpe (2) und Absetzgefäß (3)     | 37. Hochleistungsbatterie für Kamera (8)                      |
| 17. Schlauchanschluß   | 38. mit Deckel verschlossene Kontrollöffnung                  |
| 18. Stromversorgungskabel für das Schwebstoffmeßgerät        | 39. Kontrollöffnung für Magnetverschluß                       |
| 19. 2 Pufferbatterien, 12 V                                  | 40. Heisaugen für Transport                                   |
| 20. Überspannungswächter                                     | 41. Gerätabshalter bei Niedrigwasser                          |
| 21. Gerätestecker für Stromversorgung am Schwebstoffmeßgerät | 42. abdeckbares Sichtfenster                                  |
|  | 43. Schalter für Stromunterbrechung beim Öffnen des Deckels   |

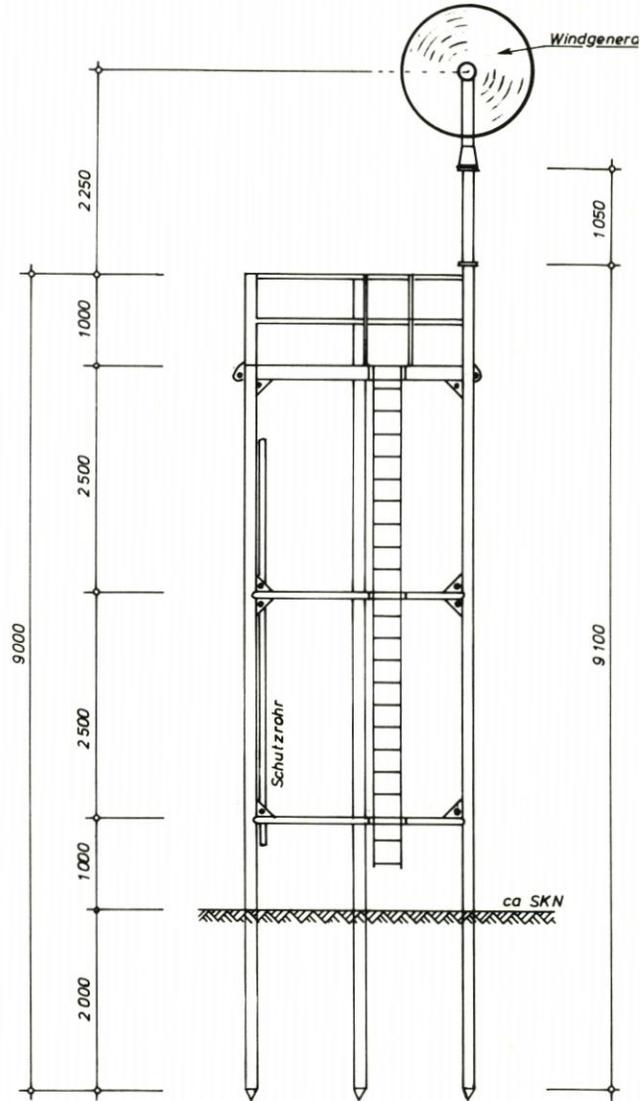


Abb. 3.03. Träger des Schwebstoffmeßgerätes

Eine Unterwasserpumpe fördert in regelmäßigen Zeitabständen eine Wasserprobe in einen hochwasserfrei angebrachten Absetztrichter. Die suspendierten Feststoffe setzen sich dann in einem darunterliegenden zylindrischen Meßrohr ab und werden am Ende der Sedimentierzeit fotografisch registriert. Danach wird der Behälter über ein Magnetventil geleert und steht zum neuen Meßvorgang zur Verfügung. Das Auffangen der ablaufenden Suspension zur Feststellung der Kornverteilung ist wegen räumlicher und auch meßtechnischer Beschränkungen nicht durchführbar gewesen (GÖHREN u. LAUCHT, 1972).

Die für die Pumpen, die fotografische Beleuchtung und die Verschlussöffnung erforderliche Energie wird durch einen Windkraftgenerator mit zwischengeschalteten Pufferbatterien erzeugt. Das Gerät ist somit unabhängig von fremden Energiequellen.

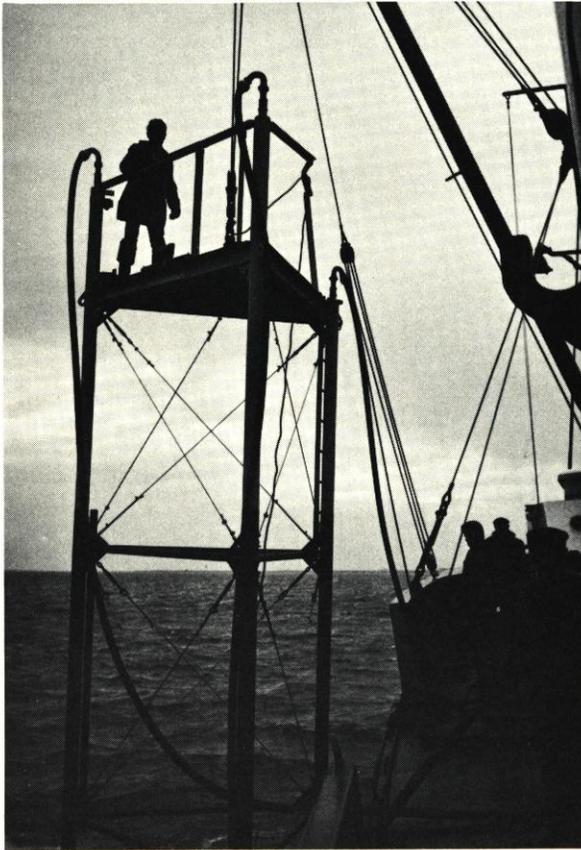


Abb. 3.04. Aufbau der Station – Einspülvorgang



Abb. 3.05. Meßstation vor Scharhörn mit „MS Hundebalje“

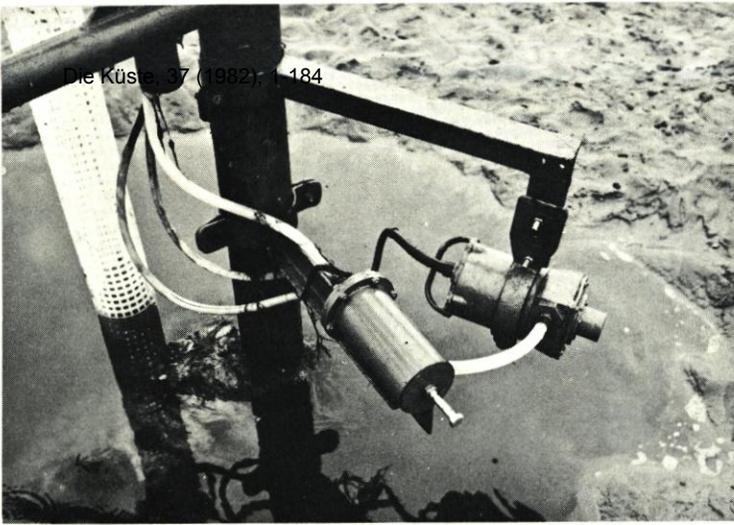
Das Probenvolumen beträgt 20 l bei einer geringfügig mit der Förderhöhe schwankenden Pumpenförderzeit von 3 bis 4 Minuten. Dieses Volumen ergibt auch bei geringen Feststoffkonzentrationen noch meßbare Absetzmengen. Das Volumen des Meßrohres selbst ist in Anlehnung an die bisher im Watt vor Cuxhaven/Neuwerk gemessenen Feststoffkonzentrationen auf einen maximalen Wert von 2000 mg/l (GÖHREN, 1971) ausgelegt worden. Für die Messungen ist ein einstündiger Zeitrhythmus gewählt worden, um zwischen den Pumpvorgängen eine ausreichende Zeitspanne (ca. 55 Minuten) für das Absetzen zur Verfügung zu haben.

Die eigentliche Registrierung der Meßdaten erfolgt mittels handelsüblicher Super-8-Schmalfilmkamera, die in Einzelbildschaltung, gesteuert über einen an die Elektronik angeschlossenen Magnetauslöser, zu jeder vollen Stunde den Meßzylinder, die Zeituhr, den Temperaturanzeiger und die Kontrollampe der Pumpe fotografiert (vgl. Abb. 3.07).

Bezüglich der Fehlermöglichkeiten beim Pumpvorgang der Probenentnahme müssen folgende Punkte besonders beachtet werden:

- Höhe des Absaugstutzens der Pumpe über der Sohle,
- Absauggeschwindigkeit und Absaugrichtung im Pumpenstutzen relativ zur Anströmung,
- Entmischung in der Förderleitung,
- Eichung der Meßeinheit.

Die Höhe des Absaugstutzens wird dadurch bestimmt, daß ROUSE für turbulente Fließvorgänge den Wert  $y = 0,05 d$  für den Trennungsbereich zwischen „bed-load“ und „suspension-load“ angibt. Angewandt auf die Tiefenverhältnisse der beiden Stationen (S) und (SB) mit  $d = \text{ca. } 3 \text{ m}$  bei mittlerem Tidehochwasser, ergibt dieses einen Wert von  $a = 0,15 \text{ m}$

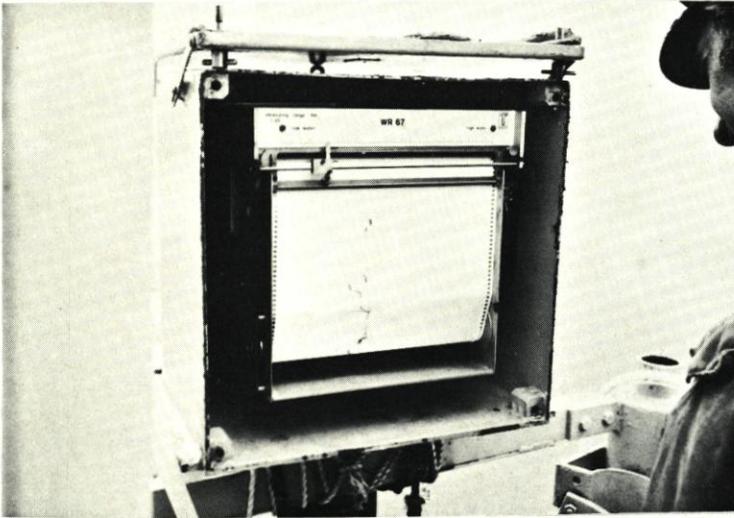


113

Förderpumpe

Tnw-Abschalter

Wellenrohr



Wellenschreiber  
( DHI )



Wattstrommesser

Abb. 3.06. Einzelgeräte

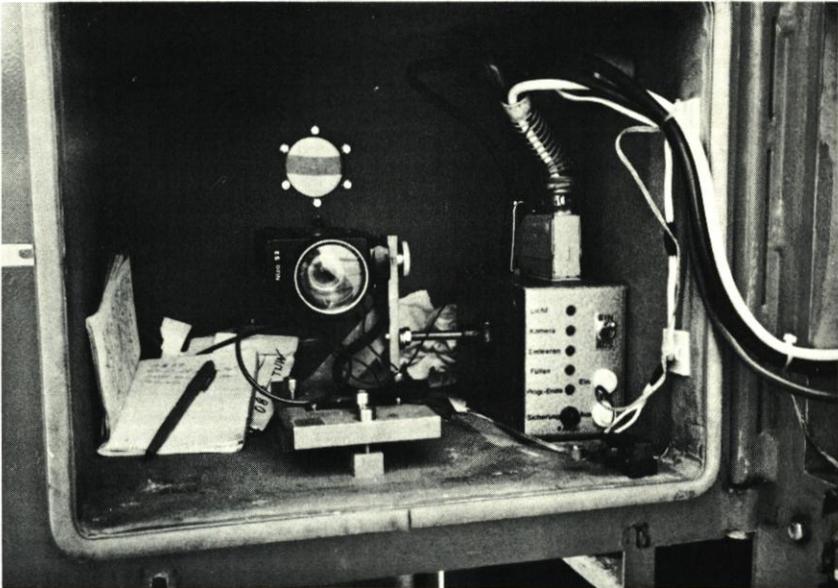
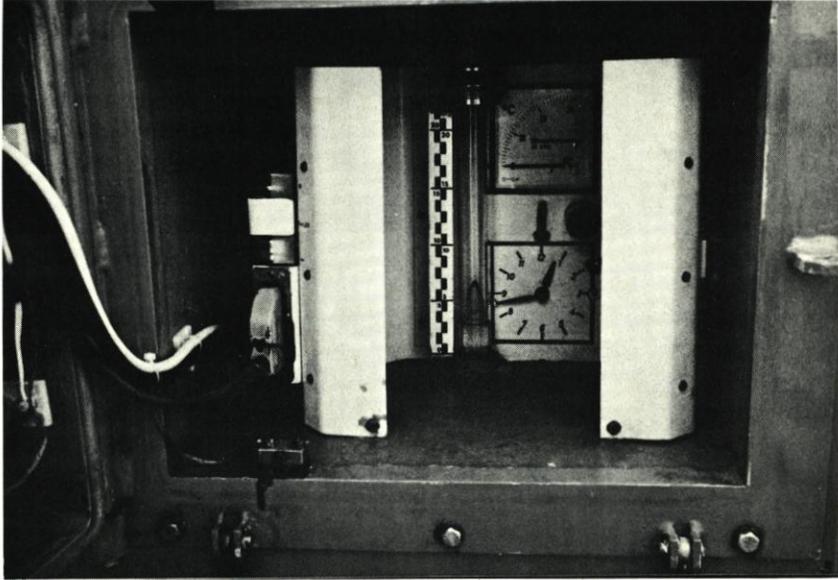


Abb. 3.07. Meß- und Registriereinheit

über der Sohle. Da aber insbesondere bei auflandigen Starkwinden bei mehr als 5 m hohen Wasserständen zu messen ist, wird dann  $a = 0,25$  bis  $0,3$  m. Um für die schwankenden Wassertiefen in jedem Fall oberhalb des Übergangsbereiches von „bed-load“ zu „suspension-load“ zu messen, ist  $a = 0,35$  m gewählt worden.

Der Einfluß der Geschwindigkeit und der Richtung beim Absaugen der Meßprobe ist von CHRISTIANSEN (1974) anhand der Untersuchungsergebnisse von NELSON und BENEDICT (1931) diskutiert worden. Das für Stromrinnen ermittelte Ergebnis kann sinngemäß auf die Verhältnisse auf dem Watt übertragen werden. Ideale Verhältnisse liegen vor, wenn

- die Anströmgeschwindigkeit gleich der Absauggeschwindigkeit ist,
- der Absaugstutzen in Richtung auf die Strömung zugestellt wird,
- ein gleichmäßiger Abpumpvorgang gewährleistet ist,
- die Absaugvorrichtung möglichst strömungsgerecht ausgebildet ist.

Diese Voraussetzungen sind bei einem automatisch arbeitenden Gerät mit sich über die Tide ändernden Strömungsrichtungen und mit in Abhängigkeit von den Windverhältnissen schwankenden Strömungsgeschwindigkeiten nicht zu erfüllen. Deshalb sind die auftretenden Fehler abzuschätzen und in die weiteren Betrachtungen mit einzubeziehen. Die Pumpe ist aus konstruktiven Gründen starr montiert worden (ohne die ideal um  $360^\circ$  schwenkbare Absaugvorrichtung), unter Berücksichtigung der Hauptstromrichtungen für die Tidephasen.

Die Absauggeschwindigkeiten in der durch ein Reduzierstück verjüngten Absaugöffnung der Pumpe beträgt rd.  $50$  cm/s. Sie entspricht damit nach GÖHREN (1971) dem Häufigkeitsmaximum der Strömungsgeschwindigkeit bei Starkwinden (Abb. 3.08).

CHRISTIANSEN (1974) hat die von NELSON/BENEDICT angegebene Beziehung zwischen gemessenem und wahren Suspensionsgehalt interpretiert in Hinblick auf die für das Elbestuar geltenden Verhältnisse (mittlerer Korndurchmesser der Suspension  $d \sim 0,08$  mm in Abhängigkeit vom Quotienten Absaug-/Anströmgeschwindigkeit). Der Einfluß der Vergrößerung der Absaugstutzenöffnung von  $6,4$  auf  $20$  mm ist in Abb. 3.09 eingetragen. Auch der Fehlereinfluß der Schräganstellung des Absaugstutzens zur Stromrichtung ist aus der hierfür

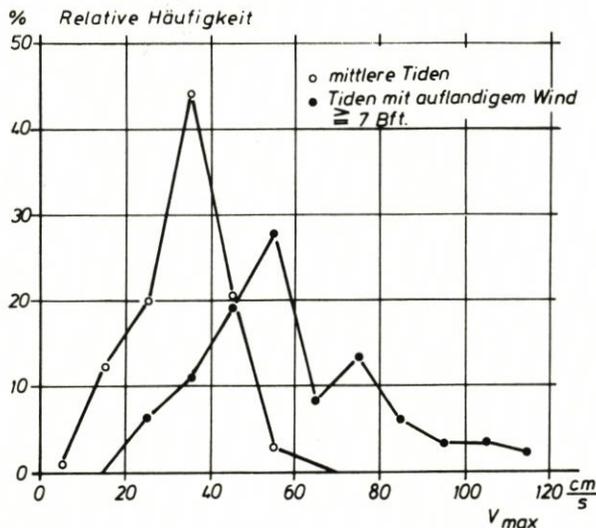


Abb. 3.08. Maximale Strömungsgeschwindigkeiten im Neuwerker Watt bei mittlerer Tide und Starkwindwetterlagen (GÖHREN, 1971)

	Min.	Max (90%)	
Anströmgeschwindigkeit ( $u_{An}$ )	0	80	[cm/s]
Absauggeschwindigkeit ( $u_{Ab}$ )	40	50	[ " ]
Quotient $u_{Ab}/u_{An}$ (90%)	0,5	$\infty$	
Ansaugöffnung $\phi$	20	20	[mm]
Schräganströmung	0	90	[°]
Mittlerer Korndurchmesser der Suspension	0,08	0,08	[mm]

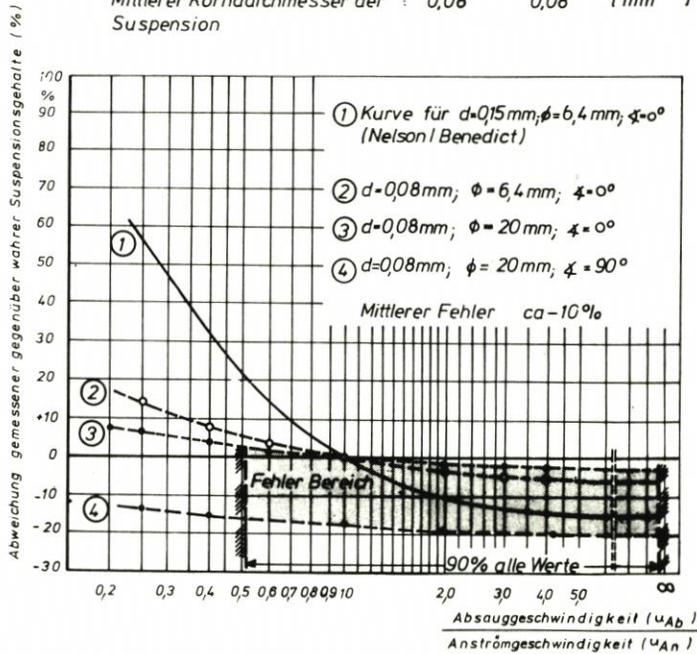


Abb. 3.09. Fehlerabschätzung beim Ansaugen der Wasserprobe nach NELSON und BENEDICT (1931)

von NELSON/BENEDICT angegebenen Beziehung herzuleiten. Bei Beachtung der demgegenüber geringeren Korngrößen und der größeren Anströmwinkel ist eine mittlere Fehlersumme von 10 % plausibel abzuschätzen. Die gemessenen Konzentrationen liegen damit etwa 10 % unter den tatsächlich vorhandenen.

Die Proben können sich in der Förderleitung in gewissem Umfang wegen des Schlupfes zwischen Feststoffteilchen und dem transportierten Wasser (größen- und gewichtsbedingte Unterschiede der Sinkgeschwindigkeiten der Feststoffteilchen) entmischen. Bei einem Größtkorn von  $d_{max} \sim 0,3\text{ mm}$  (Abb. 4.03) ergibt sich unter Berücksichtigung der von ROUSE (Abb. 2.06) angegebenen Fallgeschwindigkeitsdifferenzen zwischen Größt- und Kleinstkorn für eine mittlere Geschwindigkeit in der Förderleitung von rd. 50 cm/s eine Fehlermöglichkeit von etwa 1 %. CHRISTIANSEN (1974) kommt bei seinen mit größerem Material und größerer Fördergeschwindigkeit durchgeführten Versuchen zu vergleichbaren Ergebnissen.

Die Eichung der Meßeinheit ist von GÖHREN und LAUCHT (1972) mitgeteilt. Die dort beschriebenen Eichkurven sind für die hier vorliegenden Verhältnisse durch Kontrollversuche überprüft worden. Für die Eichung des Gerätes geht es um die Beziehungen

- Feststoffkonzentration [ $\text{cm}^3/\text{l}$  bzw.  $\text{mg}/\text{l}$ ] in Abhängigkeit von der Absetzhöhe im Meßzylinder und
- Absetzvolumen [% v. Ges.Vol.] in Abhängigkeit von der Absetzzeit.

Kornverteilungen des Versuchsmaterials und mit diesem Material im IMHOFF-Becher ermittelte Absetzkurven sind in Abb. 3.10 dargestellt. Sie bestätigen im Mittel den von

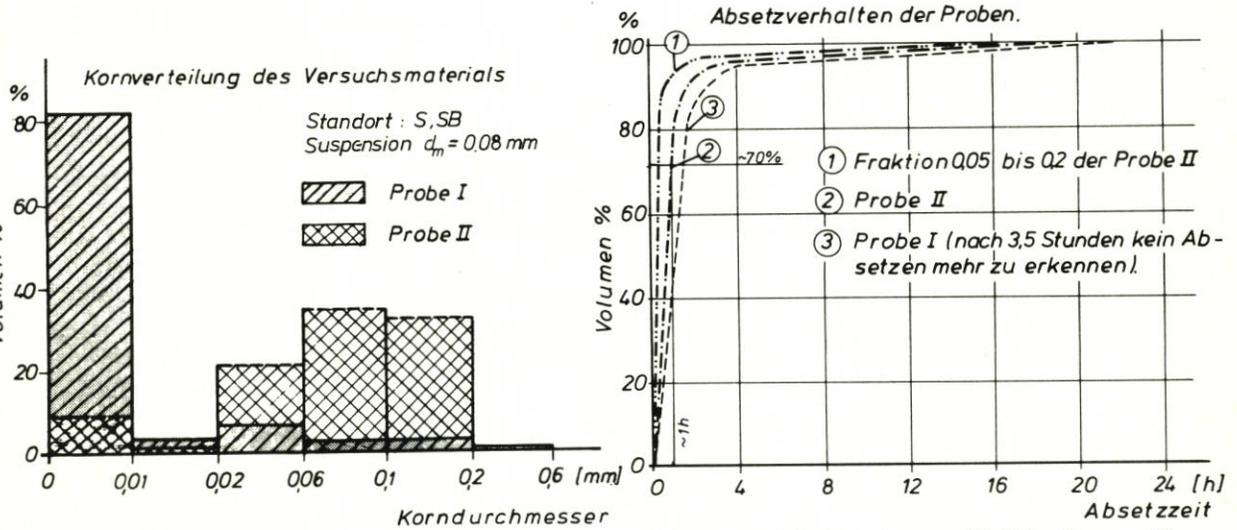


Abb. 3.10. Bestimmung des Absetzverhaltens an zwei Proben mit unterschiedlicher Kornverteilung

GÖHREN und LAUCHT (1972) bei einer Streuung von rd. 10 % angegebenen Kurvenverlauf (Abb. 3.11). Die Anwendung des Mittelwertes auf die Standorte S und SB im Watt vor Cuxhaven ist plausibel, zumal es sich in beiden Fällen nicht um „Schlickwatt“ mit feinem Material und entsprechend langen Absetzzeiten handelt. Der in der Eichfunktion auf eine Stunde Absetzzeit bezogene Maßstab der Feststoffkonzentration ist anhand der mittleren Absetzkurve auf 24 Stunden Absetzzeit und damit auf 100 % Feststoffvolumen umrechenbar (Abb. 3.12). Die Umrechnung des aus der Eichfunktion abzulesenden Feststoffvolumens in die Trockengewichtseinheit aus den bei unterschiedlichen Wetter- und Tidebedingungen genommenen Proben ergibt als Mittelwert ein Verhältnis von Feststoffvolumen zu Trocken-

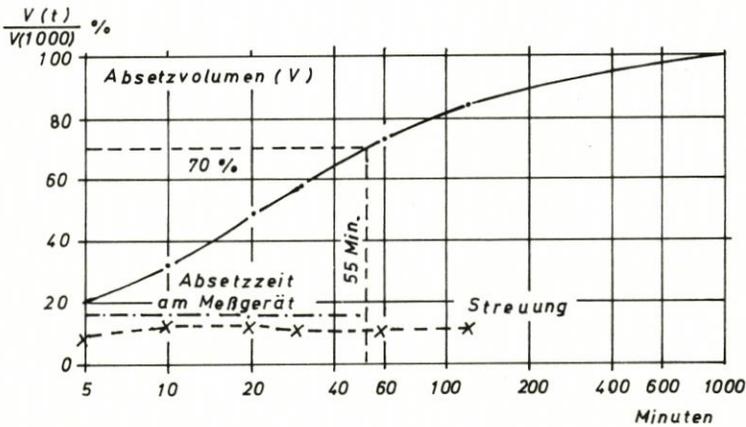


Abb. 3.11. Normierte Absetzkurve für Meßbehälter, ermittelt aus 16 Einzelversuchen (GÖHREN u. LAUCHT, 1972)

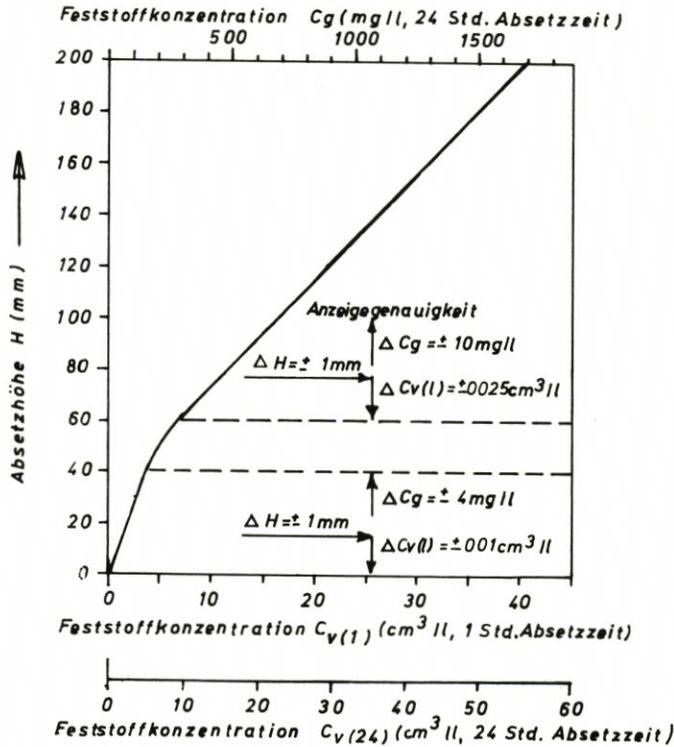


Abb. 3.12. Eichfunktion (GÖHREN u. LAUCHT, 1972)

gewicht von 3,3 mit einer Streuung von 30 %. Auf diese Streuungen haben auch GÖHREN und LAUCHT (1972) hingewiesen und mit der von den wechselnden Kornverteilungen abhängigen Lagerungsdichte erklärt.

### 3.2.2 Messungen weiterer Parameter

Neben den in Abschn. 3.2.1 beschriebenen Messungen sind nach den gegebenen personellen und witterungsabhängigen Möglichkeiten nachstehende Parameter gemessen worden:

- Richtung und Geschwindigkeit der Tideströmungen,
- Wellenkennwerte,
- Wassertemperaturen,
- Kornverteilung des Sohlmaterials im Umfeld der Stationen,
- Windrichtung und -stärke am Standort Scharhörn,
- Tidekurve am Pegel Scharhörn.

Für die Strömungsmessungen sind die von GÖHREN (1964 u. 1968) für den Einsatz im Flachwasser entwickelten und in vielen Meßreihen bewährten Wattdauerstrommesser (Abb. 3.06) verwendet und auf gleicher Höhenkote wie das Schwebstoffgerät (0,35 m über der Sohle) installiert worden.

Die Wellenmessungen sind mit fest auf den Meßgerüsten (Abb. 3.03) montierten

„DHI-Wellenschreibern“ durchgeführt worden. Die Aufzeichnungen der Geräte erfolgen in Abhängigkeit von der Wellenintensität und ermöglichen über die mittlere Wellenperiode  $\bar{T}$  die Berechnung der mittleren Wellenhöhe  $\bar{H}$  und der sich daraus ableitenden weiteren Kenngrößen (vgl. SCHRADER, 1968). Mit dieser Meßeinheit hat u. a. auch SIEFERT (1973) einen Teil seiner Messungen zur Bestimmung der Seegangscharakteristik im Flachwassergebiet durchgeführt.

Die Wassertemperaturen sind elektrisch über ein Fernthermometer gemessen und unter Mitbenutzung der Filmkamera als Registriereinheit aufgezeichnet worden.

Die Kornverteilung des Sohlmaterials wurde im Umkreis von rd. 50 m der Station anhand von Proben aus den oberen 10 cm des Wattes bestimmt.

Windrichtung und Windstärke standen als 3-Stunden-Mittelwerte über die Hamburger Windstation auf Scharhörn zur Verfügung (ANTFANG, 1969; SIEFERT, 1972). Die auf Scharhörn gemessenen Winddaten wurden als Bezugswerte für beide Standorte herangezogen, da die Stationen (S) und (SB) nur 1 bzw. 3 km bei flachem Watt von der Windstation Scharhörn entfernt lagen und damit ausreichend genau die Windverhältnisse erfaßt haben.

Die Tidekurven wurden dem von der Wasser- und Schiffsverkehrsverwaltung betriebenen Schreibpegel Scharhörn entnommen. Diese Aufzeichnungen sind genügend genau für die Stationen (S) und (SB) gültig.

Auf die Messung der Parameter Salzgehalt und Koagulation ist verzichtet worden. SIEFERT (1970) hat zu den Salzgehaltsverhältnissen im Elbemündungsgebiet erläutert, daß der Salzgehalt im Watt um Scharhörn für mittlere Verhältnisse etwa 24 bis 26 ‰ beträgt und über die Tide und die Tiefe nur wenig schwankt. Lediglich das Oberwasser führt zu Salzgehaltsveränderungen von etwa  $\pm 3$  ‰. Unter Zuhilfenahme der von DILLO (1960) angegebenen Beziehung (Abb. 2.18) ergibt sich hieraus eine Fehlermöglichkeit für die Suspensionswerte von etwa  $\pm 10$  mg/l.

Über die Koagulation, wie sie aus Schwankungen des Salzgehaltes abgeleitet wird, hat CHRISTIANSEN (1974) berichtet, daß sie im Bereich Neuwerk/Scharhörn praktisch ohne Einfluß auf die Suspensionskonzentrationen ist. Hierbei wird nicht ausgeschlossen, daß kleinere Flockenteilchen anderer Herkunftsorte durch die Strömungsverhältnisse den Meßstellen zugeführt und damit meßtechnisch erfaßt werden.

#### 4. Aufbereitung der Messungen

##### 4.1 Allgemeines zum Datenmaterial

Die Messungen der Suspension sind, wie bereits w. o. ausgeführt, mit Streuungen und systematischen Fehlern behaftet. Für die weitere Auswertung wurde eine Idealisierung in folgender Form vorgenommen:

Wegen der Streuung wurden aus zugeordneten Einzelmessungen Mittelwerte gebildet. Die in Abschn. 3.2.1 angegebenen systembedingten Fehlereinflüsse (max. etwa 11 % zu geringe Werte) beziehen sich jeweils auf eine vollständige Tide. Sie können wegen der Veränderungen während einer Tide nicht ohne weiteres auf den einzelnen Meßwert übertragen werden. Der hieraus resultierende Fehlereinfluß blieb deshalb unberücksichtigt. Die angegebene Fehlermöglichkeit aus den Salzgehaltsschwankungen von  $\pm 10$  mg/l wurde ebenfalls nicht in Ansatz gebracht.

Weiter wurde in Anlehnung an SCHRADER (1968) der Begriff „Windsektor“ eingeführt,

und zwar zwecks Unterscheidung der bereichsweise unterschiedlichen Zusammenhänge zwischen Suspension, Wind, Strömung und Tide für die zwei Standorte (S) und (SB) mit deren unterschiedlichen morphologischen und Tiderandbedingungen.

#### 4.2 Suspensionskonzentrationen, Windsektoren

Insgesamt sind etwa 400 Meßreihen mit über 3000 Einzelwerten bearbeitet worden. Eine Meßreihe umfaßt bei mittleren Tideverhältnissen etwa acht Einzelmessungen. Je nach Windstärke und -richtung verändert sich diese Anzahl für eine Tide in Abhängigkeit vom Wasserstand.

Die Suspensionsmessungen wurden nach den Schmalfilmen über Kleinbildprojektoren mit einer Ablesegenauigkeit der Höhen der abgesetzten Feststoffe von  $\pm 1$  mm ausgewertet. Über die Eichkurve (Abb. 3.12) ergeben diese im unteren Bereich des Suspensionsgehaltes eine Genauigkeit von  $\pm 4$  mg/l, im Bereich höherer Konzentrationen von  $\pm 10$  mg/l.

Da die Suspensionsmessungen über einen mehrmonatigen Zeitraum und damit bei unterschiedlichen Wassertemperaturen durchgeführt worden sind, bleiben die von DILLO (1960) im Gerinne ermittelte Temperaturabhängigkeit zu berücksichtigen (vgl. 2.3.2) und die Übertragbarkeit auf die Meßreihen zu überprüfen. Die Versuche von DILLO basieren auf  $d_{50} = 0,2$  mm für Norderney-Sand. Das Sohlmaterial des Standortes Scharhörn (S) hat einen Mittelwert  $d_{50} = 0,15$  mm und das des Standortes Scharhörnbalje (SB) einen Mittelwert  $d_{50} = 0,13$  mm. Wegen der Vergleichbarkeit der Korngrößen und wegen  $d < 0,3$  mm (vgl. 2.3.2) wird von der Übertragbarkeit dieser Beziehung ausgegangen. Die Suspensionswerte wurden nach DILLO zum Meßwert mit der niedrigsten Wassertemperatur ( $T_C = 4$  °C) in der Form

$$C_C = C \cdot \sqrt{T_C} \quad (\text{Gl. 4.02})$$

ins Verhältnis gesetzt. Die Suspensionsmessungen sind dann für die weitere Bearbeitung als temperaturbereinigte und auf 4 °C bezogene Konzentrationswerte anzusehen.

Zur Beschreibung der Veränderung der Suspensionskonzentration über die Tide – Suspensionsganglinie – sind aus Einzelwerten  $C_C$  der Meßreihen für zugehörige Wellenergebnisse  $\bar{H} = n \cdot 10 \text{ cm} \pm 4 \text{ cm}$  die Mittelwerte  $\bar{C}_{CH}$  aus 4 bis 10 Einzelwerten gebildet worden. Die so ermittelten Werte geben die zu einem vorgegebenen Wellenergebnis gehörende mittlere Suspensionskonzentration zu einem bestimmten Tidezeitpunkt an.

Weiterhin sind zur Beschreibung einer vollständigen Tide die Einzelwerte einer Meßreihe zu Mittelwerten  $\bar{C}_C$  zusammengefaßt. Eine Aufgliederung in Halbtidewerte, wie in der Literatur häufig vorgenommen (z. B. CHRISTIANSEN, 1974) erfolgte nicht, da eine sinnvolle Trennung mit zunehmendem Windeinfluß nicht mehr möglich ist, wie später erläutert wird (vgl. 5.2.2.1). Der über eine Tide integrierte Wert wurde mit Hilfe des Quotienten  $t_T/t_M$  (Dauer der zugehörigen Tide zur Dauer der mittleren Tide) auf mittlere Tideverhältnisse bezogen:

$$\bar{C}_{CT} = 1/n \cdot t_T/t_M \int_0^n C_C \cdot dn \quad (\text{Gl. 4.01})$$

(n: Anzahl der Meßwerte  $C_C$  während einer Tide [Tnw bis Tnw])

$\bar{C}_{CT}$  gibt dann die auf eine mittlere Tidedauer bezogene mittlere Feststoffkonzentration pro Liter Wasserprobe an.

Die nach vorstehenden Betrachtungen aufbereiteten Suspensionswerte werden weiterhin nach Windsektoren geordnet (vgl. Abschn. 4.1). Diese Aufgliederung ist bereits von SCHRADER (1968) und insbesondere von SIEFERT (1971 u. 1973) eingeführt worden, um bei den Wellenuntersuchungen die Unterschiede der Wellenkennwerte für die einzelnen Bereiche (Sektoren) und für die verschiedenen Standortbedingungen (hier für S und SB) zu bestimmen. Diese sektorale Gliederung wird wegen der besonderen Bedeutung der Wellen für die Suspensionskonzentration auf die Ordnung der Meßwerte übertragen. Die über drei Stunden ermittelten Windwerte mit den darin enthaltenen Richtungsschwankungen rechtfertigen hier nicht die genaue Sektorentrennung nach SIEFERT (1971). Die Sektoren werden deshalb mit 10° Überlappung wie folgt festgelegt:

Standort Scharhörn:

Sektor 1: Windrichtung: 350°–120°

Sektor 2: Windrichtung: 110°–220°

Sektor 3: Windrichtung: 210°–250°

Sektor 4: Windrichtung: 240°–360°

Standort Scharhörnbalje:

Sektor 1: Windrichtung: 350°– 70°

Sektor 2: Windrichtung: 60°–120°

Sektor 3: Windrichtung: 110°–220°

Sektor 4: Windrichtung: 210°–360°

Die Windsektoren sind in Abb. 4.01 eingetragen.

#### 4.3 Seegang

Die Wellenmessungen sind aus Block- und Schnellschrieben mit jeweils 50 aufeinanderfolgenden Wellen ausgewertet. Aus den ermittelten Wellenkennwerten wurden die mittleren Wellenhöhen um Hochwasser ( $\bar{H}$ ) als Bezugsgrößen zur Suspension gewählt. Der sonst häufig für Wellenbetrachtungen angesetzte Quotient aus  $\bar{H}/d$  bleibt hier wegen der im Tidegebiet wechselnden Wassertiefen und des dadurch in den Bereich kleinerer Wasserstände verschobenen Maximums außer Betracht. Auf eine Verknüpfung der mittleren Wellenhöhe mit der Tidedauer wurde verzichtet, da die Wellenhöhe nur sekundär von der Tidedauer, aber primär von der Einwirkdauer des Windes auf die tieferen Wasserbereiche sowie von der für den Windangriff verfügbaren Streichlänge abhängt.

Aus meßtechnischen Gründen sind die Wellenmessungen nicht geeignet für eine den Suspensionsganglinien entsprechende Aufbereitung (die Veränderungen der Wellenkennwerte über eine Tide sind nicht ausreichend erfaßt). Die durch zeitlich begrenzten Geräteausfall fehlenden Wellenmessungen sind ergänzt worden in Übereinstimmung mit SIEFERT (1971), vgl. Abb. 4.02.

#### 4.4 Strömung

Die Strömungsmessungen mit Wattdauerstrommesser (vgl. Abschn. 3.2.2) wurden mit EDV-Programm zu Geschwindigkeits- und Richtungsganglinien ausgewertet. Damit sind dann, entsprechend der Auswertung der Suspensionswerte für Wellenereignisse  $\bar{H} = n \cdot 10 \text{ cm} \pm 4 \text{ cm}$ , aus 5 bis 10 Meßtiden die mittleren Strömungsganglinien (Richtung und Geschwindigkeit) ermittelt worden.

Der Stromweg, der zu den über eine Tide gebildeten Suspensionsmittelwerten gehört, ergibt sich aus den Strömungsganglinien zu

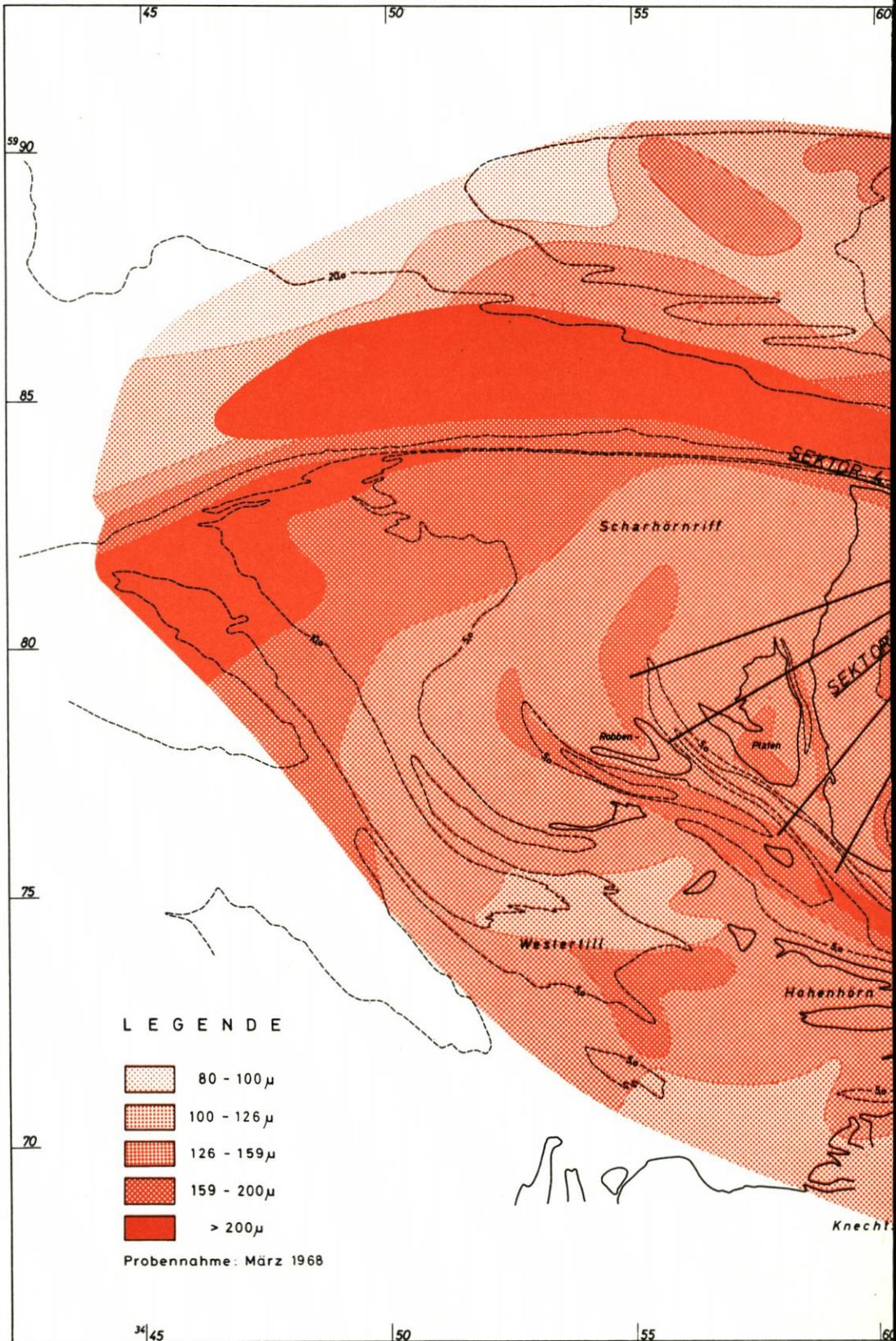
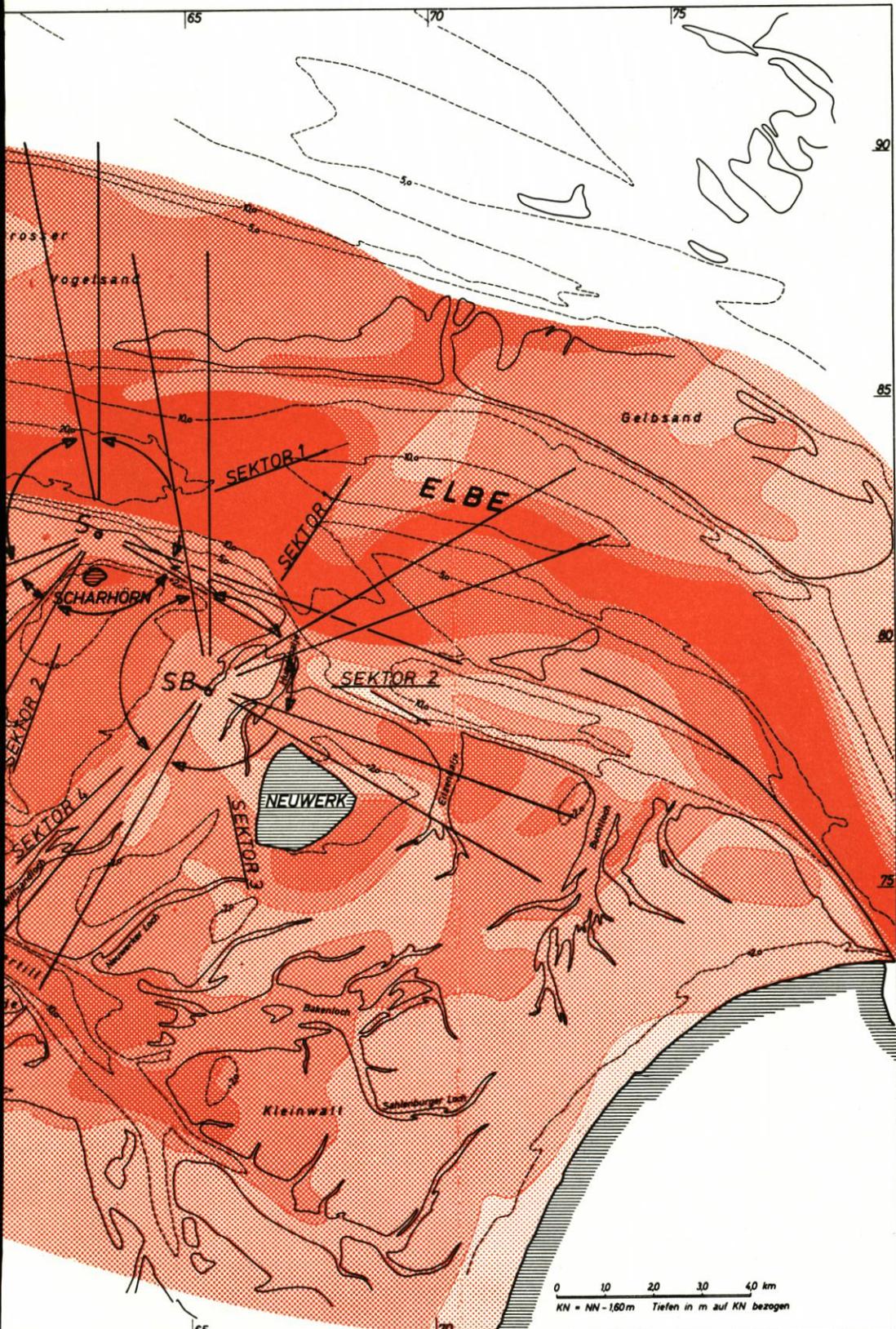
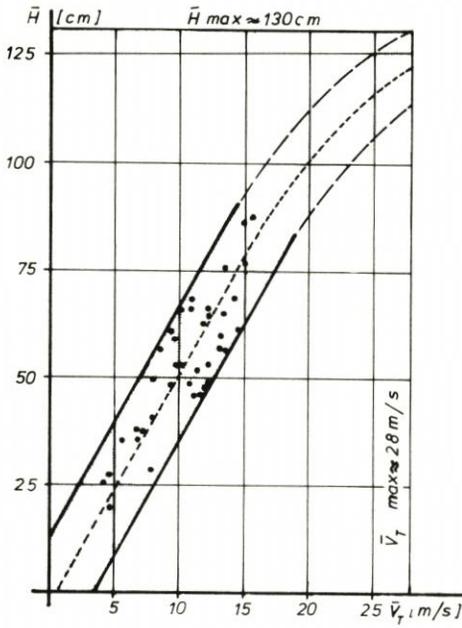


Abb. 4.01. Sedimentpetrographische Karte (Medianwert)

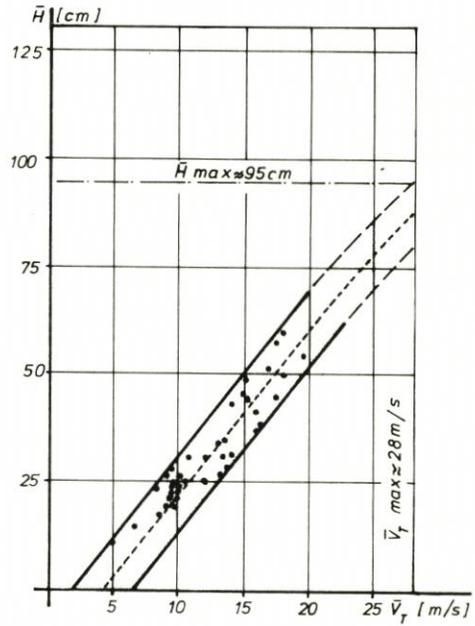


nach LINKE, 1970) mit Windsektoreneinteilung

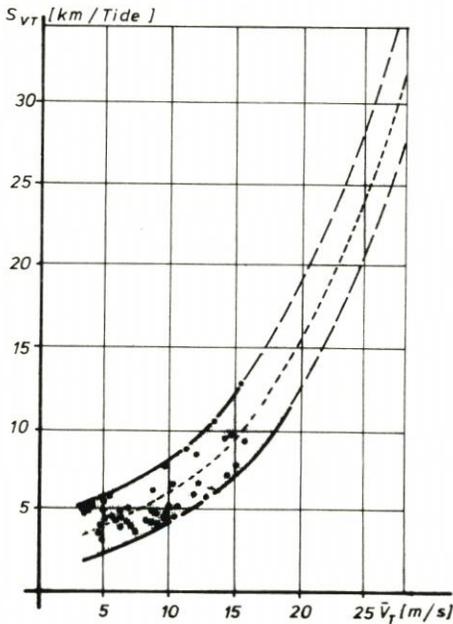
Standort: Scharhörn  
(Windrichtung: 240° - 360°)



Standort: Scharhörnbalje  
(Windrichtung: 210° - 360°)



Standort: Scharhörn  
(Windrichtung: 240° - 360°)



Standort: Scharhörnbalje  
(Windrichtung: 210° - 360°)

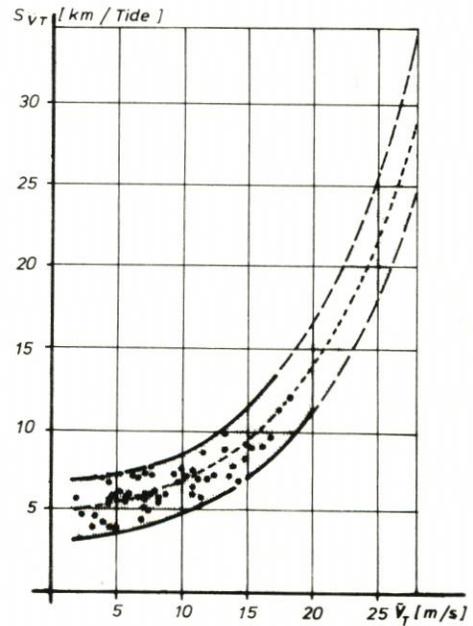


Abb. 4.02. Veränderung der Wellenhöhe ( $\bar{H}$ ) und des Stromweges ( $S_{VT}$ ) mit der Windgeschwindigkeit

$$S_V = \int_0^{t_E} u_E \cdot dt + \int_0^{t_F} u_F \cdot dt \text{ [km]} \quad (\text{Gl. 4.03})$$

und auf mittlere Tide bezogen zu

$$S_{VT} = \frac{t_T}{t_M} \cdot S_V \text{ [km]} \quad (\text{Gl. 4.04})$$

Durch zeitlich begrenzten Geräteausfall fehlende Strömungsmessungen sind ergänzt worden in Übereinstimmung mit GÖHREN (1969 u. 1971), vgl. Abb. 4.02.

#### 4.5 Wind

Windmessungen liegen von Scharhörn als 3-h-Mittelwerte für Richtung und Stärke vor. Sie waren Grundlage für die Beziehungen Wind/Strömung und Wind/Welle, die zur Ergänzung bei Geräteausfällen herangezogen worden sind (vgl. Abschn. 4.3 und 4.4). Die der jeweiligen Tide zugehörigen Windwerte sind  $\bar{V}_T$  (Geschwindigkeit) und  $\bar{R}_T$  (Richtung). Der für die Herstellung der Beziehungen zu den Suspensionsmessungen verwendete Zeitraum beginnt drei Stunden vor der ersten Einzelmessung des Schwebstoffmeßgeräts und endet mit der letzten. Dadurch wurde erreicht, daß auch die zeitlich vor der Suspensionsmessung liegenden Windereignisse erfaßt werden konnten. Der Dreistundenzeitraum ist in Anlehnung an die von SIEFERT (1973 u. 1979) für seine Seegangsuntersuchungen und für seine neueren Sturmflutüberlegungen angegebene wirksame Winddauer gewählt worden.

#### 4.6 Tide

Die Tidekurve wurde nach Wasserstandsganglinien mit eingetragenen Pegelablesungen für Hoch- und Niedrigwasser gezeichnet. Zur Beschreibung der Abweichung vom mittleren Tideverlauf wurde die Wasserstandsganglinie über die zum jeweiligen Suspensionswert gehörende Tidedauer, d. h. von Niedrigwasser bis Niedrigwasser, integriert und zum für mittlere Tideverhältnisse geltenden Integrationswert in Beziehung gesetzt.

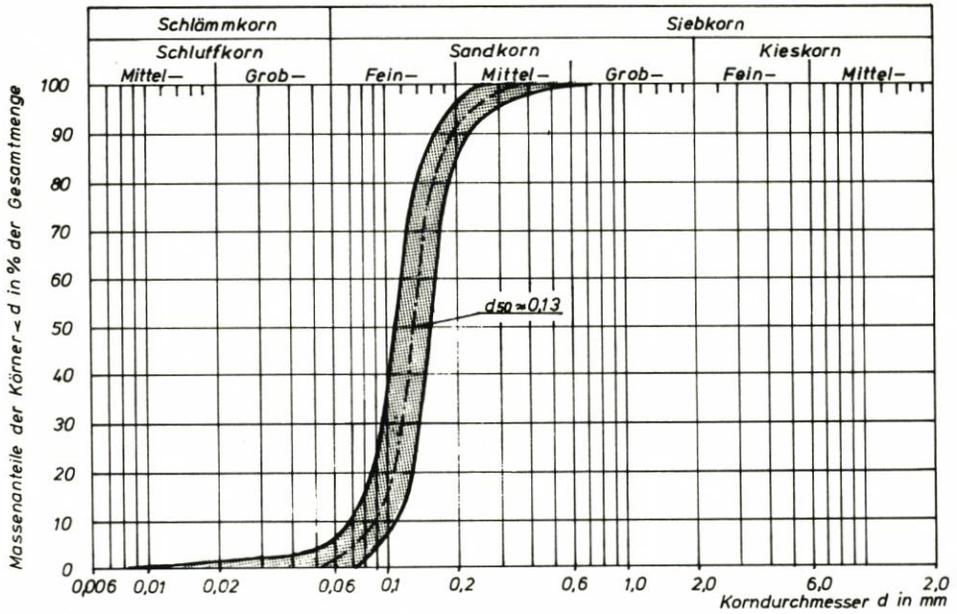
$$K_T = \int_0^{t_T} d \, dt / \int_0^{t_M} d \, dt \text{ [-]} \quad (\text{Gl. 4.05})$$

Mit  $K_T$  ist die durch Windrichtung und Windstärke bestimmte Abweichung des Tideverlaufs von mittleren Verhältnissen beschrieben. Die durch den Wind vorgegebenen Strömungs- und Wellenverhältnisse sind in  $K_T$  impliziert. Die Tidekurve wird für die Bestimmung von  $K_T$  genügend genau als Parabel zweiter Ordnung ausgerundet. Hierbei bleibt der von DILLO (1960) genannte Einfluß der Tidebeschleunigung ( $dd/dt$ ) unberücksichtigt.

#### 4.7 Sohlmaterial

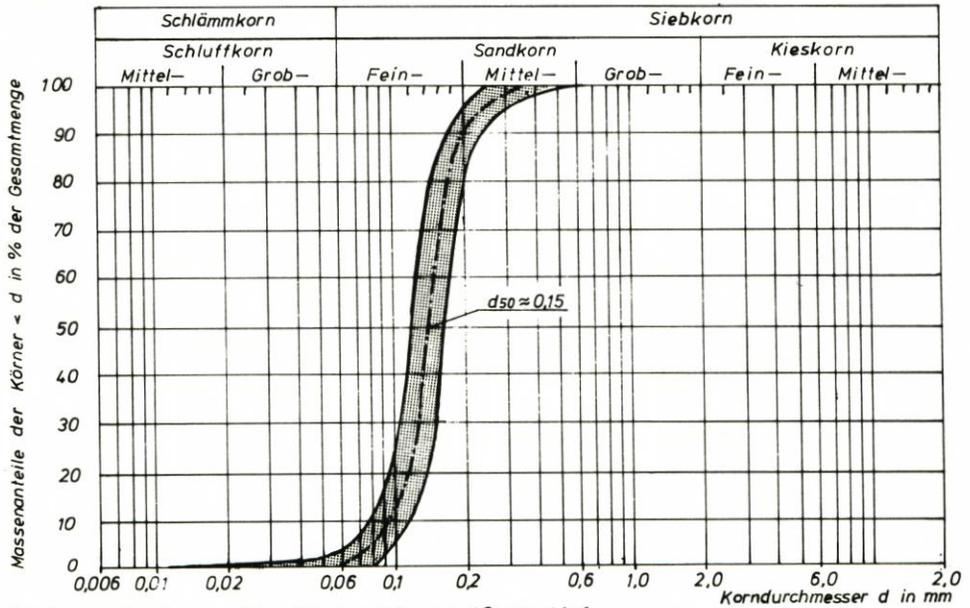
Für die Kornanalyse des Sohlmaterials sind für beide Stationen (S und SB) Proben von jeweils sieben Punkten (vgl. 3.2.2) genommen worden. Die Kornverteilung wurde durch Sieben und Schlämmen bestimmt. Eine exakte Bestimmung innerhalb des Schluffbereiches ( $d < 0,06 \text{ mm}$ ) ist trotz des mit ca.  $1000 \text{ cm}^3$  möglichst groß gewählten Probenvolumens wegen

Standort: Scharhörnbalje



Probenentnahme: Oberfläche bis ca 10cm tief  
 Probenvolumen : Im Mittel ca 1000cm<sup>3</sup>  
 Entnahmezeit : Mai bis September 1977

Standort: Scharhörn



Probenentnahme : Oberfläche bis ca. 10cm tief  
 Probenvolumen : Im Mittel ca. 1000m<sup>3</sup>  
 Entnahmezeit : Mai bis September 1977

Abb. 4.03. Kornverteilungskurven

des geringen Schluffanteils meßtechnisch schwierig. Der für die Betrachtung wichtige Gesamtanteil des Schluffkorns an der Probe ist aber in jedem Fall bestimmt. Die Einhüllenden der ermittelten Körnungslinien sind in Abb. 4.03 dargestellt.

#### 4.8 Übersicht

Das nach den Erläuterungen unter Abschn. 4.1 bis 4.7 aufbereitete Meßmaterial kann aufgrund des Umfangs genutzt werden zur Untersuchung der Suspensionskonzentrationen (vgl. hierzu 5.2):

für alle Windsektoren in Abhängigkeit von

- der Abweichung gegenüber der mittleren Tide,
- der Windstärke und

für die Windsektoren 240°–360° (S) sowie 210°–360° (SB) in Abhängigkeit von

- dem Tideverlauf,
- der Windgeschwindigkeit und -stärke,
- dem Stromweg,
- den Wellenhöhen,
- der Orbitalgeschwindigkeit,
- der überlagerten Orbital- und Tideströmung.

Das Datenmaterial ist in den Tabellen 1 bis 4 zusammengestellt.

### 5. Meßergebnisse aus dem Watt und ihre Diskussion

#### 5.1 Ergebnisse früherer Untersuchungen

Systematische Untersuchungen der Suspensionsfrage auf dem Watt liegen bisher nur in geringem Umfang vor. GÖHREN (1965) begründet dieses mit den Schwierigkeiten bei den Meßverfahren. Insofern haben Göhren und andere Autoren im allgemeinen nur Messungen von Suspensionskonzentrationen ohne nähere Angabe der die Konzentration beeinflussenden Parameter vorgelegt. Auch sind deshalb die jeweiligen Probenvolumen meist nur auf 1000 cm<sup>3</sup> begrenzt gewesen, was bei der häufig in „Konzentrationswolken“ auftretenden Suspension zu erheblichen Streuungen der Ergebnisse geführt hat. Das für die vorliegende Arbeit verwendete Meßgerät ist deshalb für ein Probenvolumen von 20 000 cm<sup>3</sup> und eine Förderzeit von 3 bis 4 Minuten ausgerüstet.

GÖHREN (1971) hat in den Jahren 1964 und 1965 mit einem von ihm entwickelten Vorläufer des hier verwendeten Gerätes (GÖHREN, 1965) 0,35 m über der Sohle Proben entnommen und analysiert (vgl. Abschn. 1.1). Als Ergebnis sind Mittelwerte der Suspensionskonzentration für einzelne Wattbereiche (Abb. 5.01) sowie Häufigkeitsverteilungen der Konzentrationen (Abb. 5.02) mitgeteilt worden. Das Datenmaterial ist wegen der begrenzten Eignung des Meßgerätes auf Messungen bei gemäßigten Windstärken beschränkt. Hiernach sind im Untersuchungsgebiet Neuwerk Konzentrationen zwischen 100 und 150 mg/l am häufigsten, wobei nur 15 % aller Meßwerte über 300 mg/l liegen. Konzentrationen über 500 mg/l sind nur bei stärkerer Windeinwirkung mit zugehörigem Seegang festgestellt worden. GÖHREN hat hierzu zwei besondere Meßreihen jeweils über eine volle Tide bei westlichen Winden von 6 und 7 Bft angegeben (Abb. 5.03).

Die von GÖHREN für das Untersuchungsgebiet Neuwerk-Scharhörn festgestellten Kon-

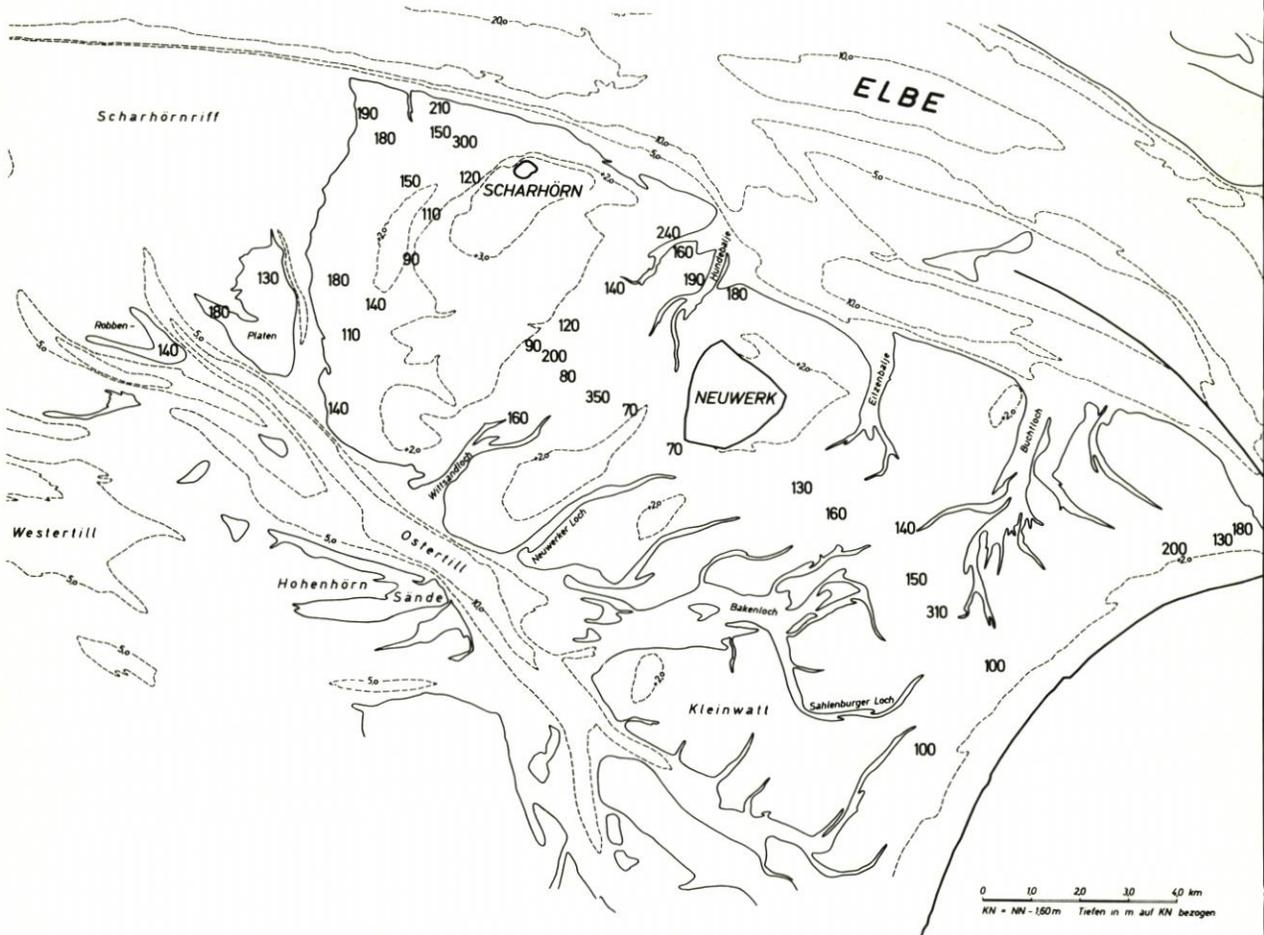


Abb. 5.01. Mittlere Schwebstoffkonzentration im Watt (mg/l, Serienmittelwerte, 35 cm über Sohle) (GÖHREN, 1971)

zentrationen decken sich in der Tendenz gut mit Messungen von GRY (1942) im Watt von Skallingen und von POSTMA (1961) in holländischen Watten sowie von WÖHLENBERG (1954) am Hindenburgdamm.

Weiterhin haben GÖHREN und LAUCHT (1972) Mittelwerte über jeweils eine Tide aus den Testreihen des auch für diese Arbeit verwendeten Meßgerätes veröffentlicht. Es handelt sich um kurze Meßzeiträume bei einer Entnahmehöhe von nur 0,15 m über der Sohle. Trotz der geringen Entnahmehöhe zeigt das Maximum der Verteilungskurve (Abb. 5.04) für die Standorte „Kleiner Vogelsand“ und „Arensch“ eine erheblich geringere Suspensionskonzentration als die oben für 0,35 m Entnahmehöhe angegebenen Ergebnisse von GÖHREN (1971), obwohl die Messungen überwiegend bei Starkwindwetterlagen durchgeführt worden sind. GÖHREN und LAUCHT erklären die Abweichungen in den Konzentrationen mit den unterschiedlichen Absetzverfahren insofern, als die von GÖHREN (1971) beschriebenen Meßwerte durch Filtrieren von Literproben gewonnen sind und damit einen größeren Teil feinsten, nicht absetzbarer Partikel enthalten, während die mit dem neuen Gerät gemessenen Werte auf der reinen Absetzung in der vorgegebenen Zeiteinheit von ca. 55 Minuten basieren. Bei letzteren

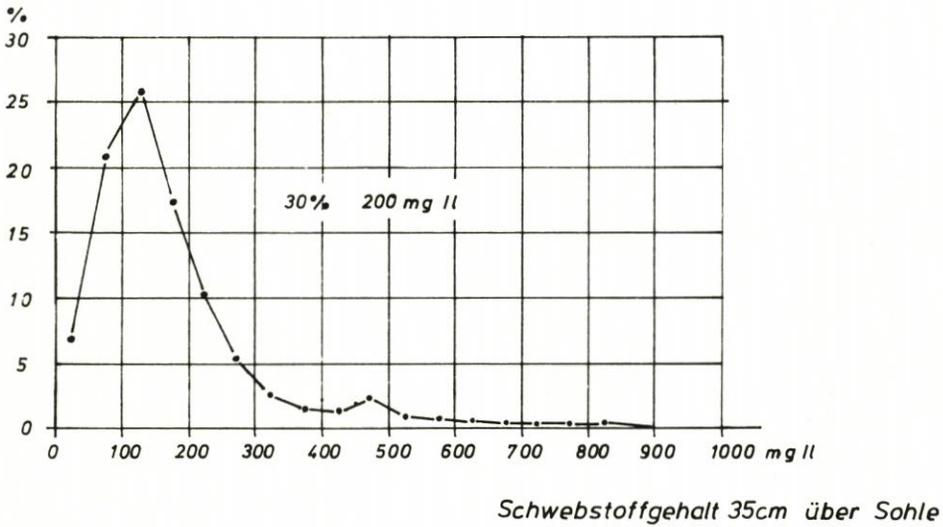


Abb. 5.02. Häufigkeitsverteilung gemessener Schwebstoffkonzentration im Neuwerker Watt, 1500 Proben (nach GÖHREN, 1971)

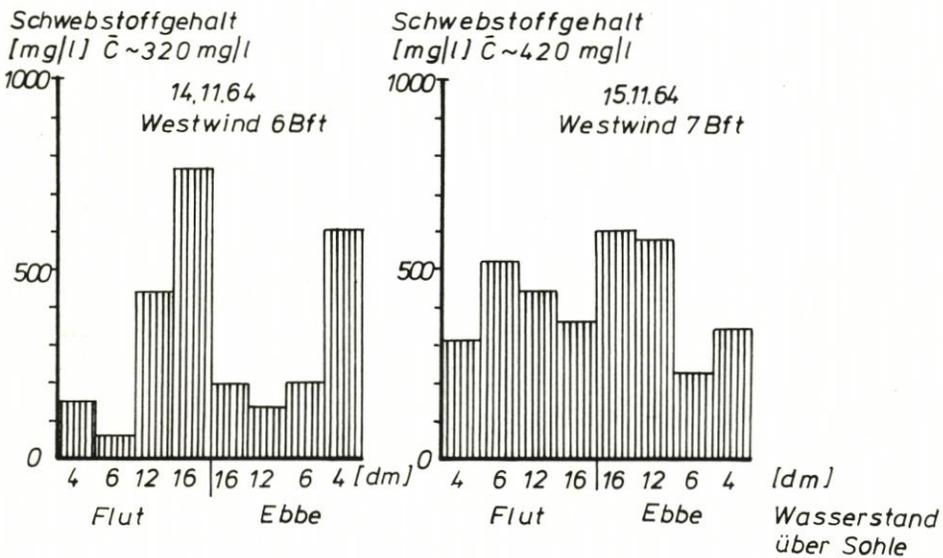


Abb. 5.03. Ergebnisse von Schwebstoffmessungen im Neuwerker Watt (nach GÖHREN, 1965)

werden nur die absetzbaren Feststoffteilchen und damit entsprechend weniger Feststoffvolumen erfasst. GÖHREN und LAUCHT (1972) weisen darauf hin, daß aber gerade dieses Absetzverfahren den für küstenmorphologische Veränderungen bedeutsamen Gehalt an suspendierten Feststoffen wiedergibt. GÖHREN und LAUCHT (1972) haben aus den Testreihen mit dem neuen Gerät auch eine vier Tage umfassende Meßreihe an der Station „Kleiner Vogelsand“ bei Windstärken zwischen 5 und 7 Bft angegeben (Abb. 5.05). Die stündlich gemessenen Suspensionswerte bestätigen den Einfluß des Windes auf die Konzentrationswerte. Am Anfang der

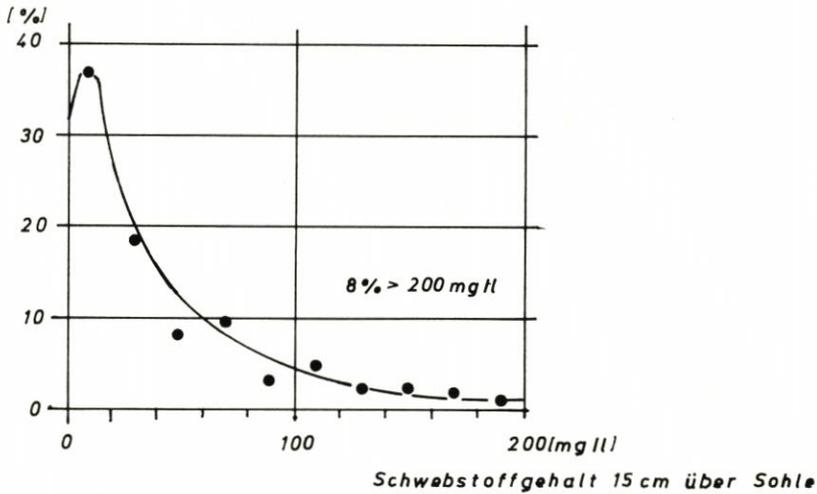


Abb. 5.04. Häufigkeitsverteilung gemessener Schwebstoffkonzentrationen an den Stationen Kl. Vogel-sand und Arensch (GÖHREN u. LAUCHT, 1972)

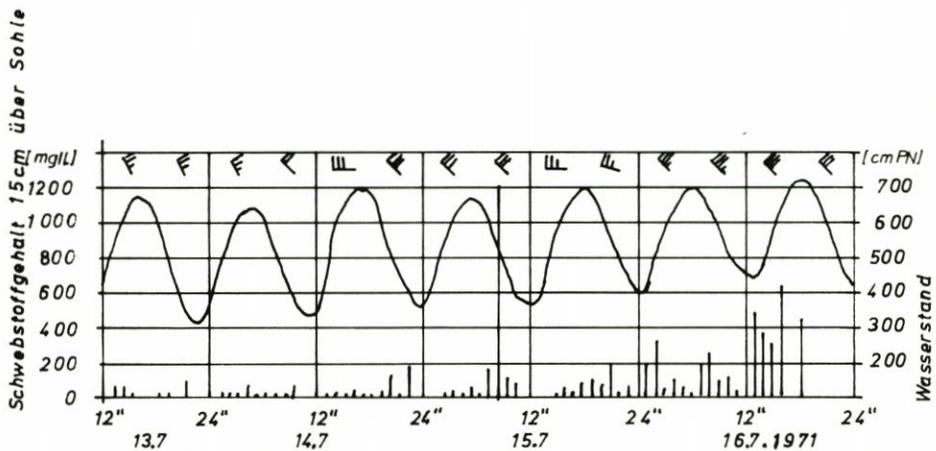


Abb. 5.05. Meßserie über 7 Tiden an der Station Kl. Vogelsand (GÖHREN u. LAUCHT, 1972)

Meßreihe bei etwa 5 Bft liegen die Konzentrationen im Mittel bei 30 mg/l und steigen mit zunehmender Windstärke bei etwa 7 Bft im Mittel auf etwa 200 mg/l an. Diese Meßreihe unterstreicht die von WOHLBERG (1954) gemachte allgemeine Beobachtung der starken Suspensionszunahme bei höheren Windstärken.

Außerhalb des Wattgebietes Neuwerk/Scharhörn hat WÜNSCHE (1976) vor Sylt auf einem Sandriff Suspensionskonzentrationen gemessen. Er hat ebenfalls festgestellt, daß bei zunehmendem Seegang und insbesondere bei starker Brandung die Suspensionskonzentration deutlich ansteigt. Bezogen auf eine Meßebe 40 cm über der Sohle, kommt er bei ruhigem Wetter zu Konzentrationen von 200 mg/l, während er für starke Brandung Spitzenwerte von etwa 1000 mg/l angibt. Darüber hinaus macht er Angaben über die Luftkonzentration in brechenden Wellen mit deren Bedeutung für die Energieumwandlung (vgl. FÜHRBÖTER, 1971) und daraus folgender Aufwirbelung des Sohlmaterials.

## 5.2 Ergebnisse der Untersuchungen der Jahre 1972 bis 1977

Die Messungen an beiden Standorten (S) und (SB) werden parallel diskutiert, um die aus den Standortbedingungen herrührenden Unterschiede vergleichen zu können.

Unter Abschn. 4.8 ist der unterschiedliche Aufbereitungsaufwand für die Meßergebnisse aufgelistet. Dieser ist begründet durch den Datenumfang in den einzelnen Windsektoren, wie er sich aus der Windhäufigkeit ergibt. Die Daten nur für den Sektor 4 mit auflandigen Winden aus SW bis N (Sturmflutbereich enthalten) überwiegen mit rd. 50 % der Gesamtdaten (vgl. Tab. 1 bis 4) und eignen sich vom Umfang her für eine weitere Aufbereitung entsprechend Abschn. 4.8.

### 5.2.1 Suspensionskonzentrationen und ihre morphologischen Randbedingungen

#### 5.2.1.1 Abhängigkeit der Konzentrationen von Abweichungen von der mittleren Tide

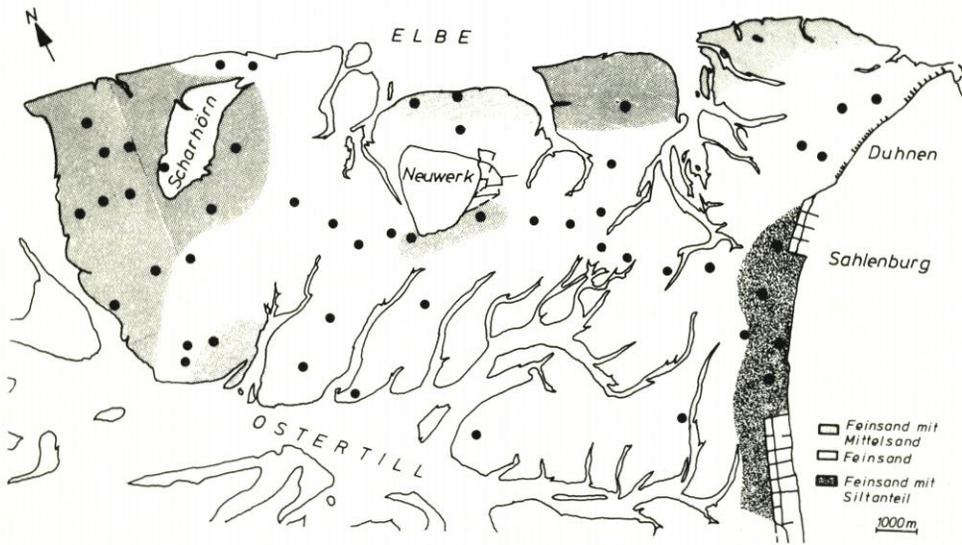
Abb. 5.06 zeigt für die Standorte (S) und (SB) die mittleren Suspensionskonzentrationen für verschiedene Tiden, wobei die mittlere Tide mit der Abszisse 1,0 angegeben ist. Die Richtungen der Windsektoren 1 bis 4 (vgl. Abb. 4.01) sind außerdem eingetragen. Die Änderungen der Konzentrationswerte sind für beide Standorte einander ähnlich. Bei den auflandigen Winden der Sektoren 3 und 4 – Standort (S) – bzw. des Sektors 4 – Standort (SB) – mit erhöhten Wasserständen steigt die Suspensionskonzentration etwa linear mit der Abweichung von der Mitteltide an. Auch für die ablandigen Winde der Sektoren 1 und 2 (S) bzw. 1 bis 3 (SB) mit abgesenkten Wasserständen zeigen sich gleiche Erscheinungen.

Diese sind plausibel, da die Abweichungen gegenüber den mittleren Tidewasserständen – Spring- und Nippeinflüsse vernachlässigt – auf zunehmenden Windeinflüssen beruhen, mit Folgeerscheinungen für die Turbulenz des Wassers auf dem Watt. Mit der eingetragenen Energie ändern sich die Seegangs- und Strömungsverhältnisse und mit ihnen die Suspensionskonzentrationen. Der unterschiedliche Anstieg der Konzentrationen in den einzelnen Sektoren wird durch die verschiedenen Standortbedingungen bestimmt, wie sie sich wesentlich aus der Morphologie (Abb. 1.01), der Sedimentverteilung (LINKE, 1970, s. Abb. 4.01 u. REINECK, 1975, s. Abb. 5.07) und den von GÖHREN (1969) aufgezeigten Strömungsverhältnissen im Watt von Neuwerk/Scharhörn ergeben.

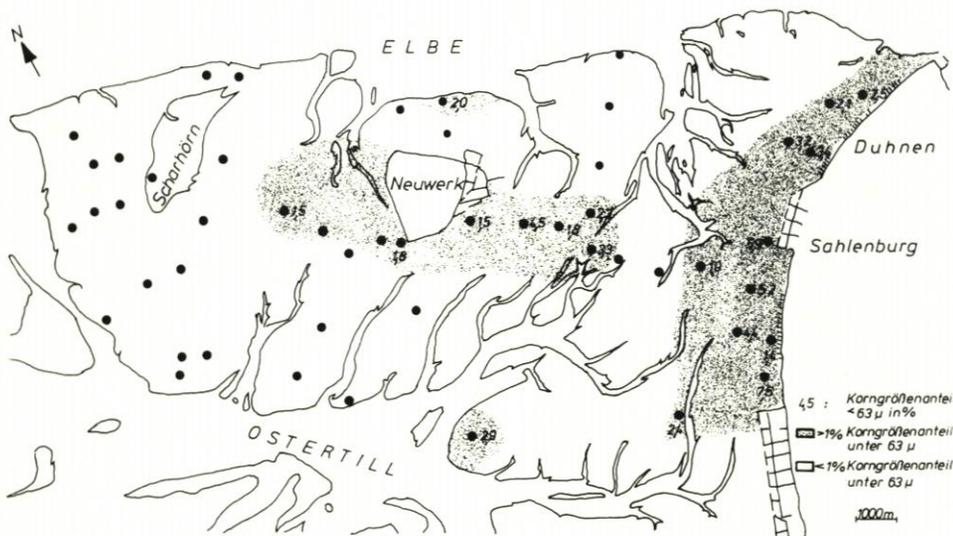
Die gemessenen Suspensionsgehalte sind Ergebnisse aus den Witterungsverhältnissen, wie sie im Zeitintervall vor der Messung in Strömungsrichtung vor der Entnahmestelle und wie sie zur Entnahmezeit am Standort selbst herrschen. Sie sind somit Summen aus Werten der lokalen Ereignisse und den durch die Tideströmungen bzw. durch die windorientierten Triftströmungen (GÖHREN, 1969) an die Entnahmestelle herangeführten Materialien, wie nachstehend für die einzelnen Windsektoren der Standorte (S) und (SB) gezeigt wird.

Der Sektor 1 des Standortes (S) – 350° bis 120° – hat keine vorgelagerten Wattflächen, da er durch die Wattkante und das unmittelbar anschließende tiefe Wasser der Elbe begrenzt ist. Wegen der ablandigen Lage des Sektors werden mit zunehmendem Windeinfluß die Wasserstände abgesenkt. Die dann für den Suspensionsgehalt maßgebenden Einflußfaktoren sind durch die Brandung und durch den zu den Wattkanten parallelen Brandungsstrom des über der Elbe aufgebauten Seegangs gekennzeichnet. Der Seegang folgt unter erheblichen Abweichungen von der Windrichtung mit seinen hohen Wellen den tiefen Rinnen und damit der





Sedimentverteilung, dargestellt in der Sedimenteinteilung nach DIN 4188. Nach dieser Darstellung besteht das Sediment an der Oberfläche des Wats aus Feinsanden. An der Elbseite, im Norden und NW sind es Feinsande mit einer mittelsandigen Komponente > 5 %. Am Festland beginnt ab Sahlenburg nach S ein Gebiet mit einem Silt- und Tonanteil. Dieser Anteil wurde dann angegeben, wenn er mehr als 5 % betrug (nach REINECK, 1975)



Verteilung der Sedimente mit einem Silt- und Tonanteil < 1 % und > 1 %. Bei einem Anteil von > 1 % wurde der Meßwert in Gewichtsprozenten neben dem Entnahmepunkt angegeben. Außer dem Streifen vor dem Festland liegt auch auf der Wattenwasserscheide ein Gebiet mit einer schwachen Siltanreicherung (nach REINECK, 1975)

Abb. 5.07. Korngrößenverteilung der oberflächennahen Sedimente

Elbe, so daß der Welleneinfluß auf das Watt begrenzt ist. Dieses gilt insbesondere für die mit diesem Sektor erfaßten östlichen Windrichtungen. Nur die auf den Strand hin gebeugten Wellen werden wirksam. Weiterhin ist zu berücksichtigen, daß der unmittelbar benachbarte tiefe Elbestrom bei diesen Windrichtungen einen erheblichen Austausch mit suspensionsärmerem Elbewasser bewirkt.

Der Suspensionsgehalt ist deshalb mit 30 mg/l sehr gering und steigt mit der Abweichung von der mittleren Tide nur schwach an.

Die Sektoren 1 und 2 des Standortes (SB) – 350° bis 120° – unterscheiden sich in den maßgebenden Einflußfaktoren von dem in der Windrichtung vergleichbaren Sektor 1 des Standortes (S). Im Sektor 1 des Standortes (SB) – 350° bis 70° – folgen Wellen und Strömung der gegenüber dem Watt tieferen Rinne des Priels Scharhörnbalje, der direkt auf die Meßstation zuführt (vgl. Abb. 2.14). Hierdurch gelangt ein höherer Teil des auf der Elbe entstehenden Seegangsspektrums in das Wattinnere und wird erst dort an den Prielbegrenzungen in Abhängigkeit von der kritischen Wassertiefe energiemäßig umgesetzt. Die dadurch bedingten erhöhten Turbulenzen werden an die umgebenden und allseitig vorgelagerten Wattflächen abgegeben. Sie führen in Verbindung mit der im Priel erhöhten Suspensionsfracht (CHRISTIANSEN, 1974), die bei Flutstrom direkt an der Meßstelle vorbeigeführt wird, zu einer Suspensionskonzentration von etwa 130 mg/l.

Im Sektor 2 des Standorts (SB) – 60° bis 120° – ist aufgrund der unterschiedlichen morphologischen Randbedingungen die Suspensionskonzentration im Bereich der mittleren Tide mit ca. 40 mg/l kleiner als im Sektor 1. Dieses ergibt sich aus den für mittlere Tideverhältnisse geltenden Strömungen (GÖHREN, 1969), die in beiden Tidephasen keinen wesentlichen Transport aus dem Einzugsgebiet zur Meßstelle hin zeigen. Dieses ändert sich jedoch bei zunehmender Abweichung von der mittleren Tide. Der dann einsetzende Triftstrom, der während der Ebbphase noch durch die normale Tideströmung vergrößert wird, transportiert in Verbindung mit dem zwischen dem Leitdamm und der Wattkante aufgebauten Seegang das in Suspension aufgewirbelte Material parallel zur Wattkante in den Meßbereich. Die gut 1 km nach NO vorspringende Wattkante begünstigt in ihrer Trichterwirkung diese Situation zusätzlich. Unter weiterer Berücksichtigung des mit zwei Gewichtsprozenten relativ hohen Silt- und Tonanteils im nordöstlich vorgelagerten flachen, auf NN – 0,5 m liegenden Wattgebiet von Neuwerk (vgl. Abb. 4.01 und 5.07) ist der sehr rasch mit der Abweichung von der mittleren Tide auf 130 mg/l ansteigende Suspensionsgehalt plausibel. Er entspricht dann dem des Sektors 1 (SB).

Für den über das hohe Watt hinweg angreifenden Wind (Sektor 2 (S) und Sektor 3 (SB)) – 110° bis 220° – weisen die Konzentrationen nur eine geringere Zunahme mit der Abweichung von der mittleren Tide auf. Bemerkenswert sind die absolut und auch in der Steigerung größeren Suspensionskonzentrationen am Standort (S) gegenüber den sonst in allen anderen Sektoren stets größeren Konzentrationen am Standort (SB).

Dieses ist zunächst nicht verständlich, da um Neuwerk (SB) großflächig das Sohlmaterial mit Silt- und Tonanteilen (bis zu 1,8 %) angereichert ist, während vor Scharhörn (S) gröberes Material ansteht (vgl. Abb. 5.07). Der Welleneinfluß gibt hierzu wegen der an beiden Standorten vorgelagerten Inseln bzw. hohen Wattrücken und der bei dieser Windlage abgeminderten Wasserstände keine Erklärung. Somit müssen besondere Strömungsverhältnisse die Suspensionskonzentrationen beeinflussen.

Die von GÖHREN (1969) für mittlere Tiden angegebenen und im Hinblick auf größeren Windeinfluß interpretierten Strömungsverhältnisse zeigen, daß die Strömung bei (SB) hart westlich an Neuwerk entlang setzt. Sie folgt dem Sattel der zwischen der Insel und der NO-SW verlaufenden Watterhöhung, die zwischen dem Wittsandloch und dem Neuwerkloch auf

über SKN +2 m ansteigt, und mündet direkt in die Hundebalje (Abb. 5.01). Dadurch werden die von feinerem Sohlmaterial (Silt und Ton) herrührenden Suspensionsanteile überwiegend durch die Hundebalje ohne Wirkung auf (SB) abgeführt. Außerdem ist bei Wasserständen unter SKN +2 m, d. h. bei Absenkung des Wasserspiegels um mehr als 1 m gegenüber MThw, die Überströmung des Watttrückens zwischen Scharhorn und Neuwerk höhenmäßig unterbunden. Diese Strömungsverhältnisse begründen also absolut und im Anstieg geringere Suspensionskonzentrationen am Standort (SB).

Am Standort (S) ist im Gegensatz zu (SB) eine kräftige und zur Wattkante parallele Strömung vorhanden, die die vom Watt abgeschwemmten Feinstoffe an die Meßstelle (S) führt. Wegen der Durchmischung mit dem suspensionsärmeren Elbewasser bleibt der Anstieg der Konzentration allerdings relativ gering. Die Suspensionskonzentrationen steigen bei (S) von etwa 40 auf 65 mg/l an. Am Standort (SB) liegen diese Werte zwischen 35 und 45 mg/l. Das Datenkollektiv der Suspensionskonzentrationen für die von Land über das Watt angreifenden Winde weist somit im Vergleich zu den übrigen Windsektoren sowohl bei (S) als auch bei (SB) die geringsten Absolut- und Anstiegswerte der Konzentrationen aus, wenn man von den besonderen Randbedingungen des Sektors 1 am Standort (S) absieht.

Die auflandigen Windsektoren 3 und 4 (S) und Sektor 4 (SB) – 210° bis 360° – mit durch Windeinfluß erhöhten Wasserständen zeigen die deutlichsten Steigerungen der Suspensionsgehalte mit der Tideabweichung (Abb. 5.06). Während bei mittleren Tideverhältnissen die Konzentrationswerte in der Größenordnung der anderen Sektoren (S) bzw. leicht darüber (SB) liegen, nimmt die Konzentration mit steigender Wasserbewegung (erhöhte Hoch- und Niedrigwasser) stark zu. Sie erreicht am Standort (S) Werte um 200 mg/l und am Standort (SB) um 400 mg/l. Diese Suspensionsanreicherungen erklären sich aus Brandungserscheinungen an der Wattkante und auf den Wattflächen gemäß Seegangscharakteristik (vgl. Abschn. 2 und Abb. 1.02 sowie 2.09) in Verbindung mit dem Triftstrom (Abb. 5.08). Dieses bedeutet für den

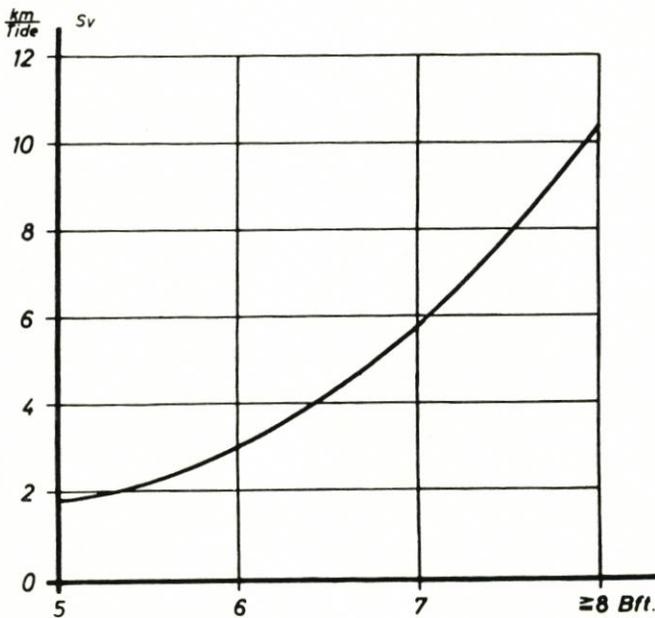


Abb. 5.08. Mittlere Triftströmung im Watt in Abhängigkeit von der Windstärke bei auflandigem Wind (nach GÖHREN, 1968)

Standort (SB), daß das auf den vorgelagerten großen Wattflächen zwischen Till und Elbe und auf dem Scharhörnriff aufgewirbelte Material mit dem Triftstrom zwischen den Inseln Scharhorn und Neuwerk hindurch der Meßstelle zugeführt wird. Der in Verlängerung des Wittsandloches SW-NO orientierte und bis zur Hundebalje und Scharhornbalje reichende Sattel begünstigt diese Strömungsrichtung (Abb. 1.01). Der Vergleich der Einzugsgebiete für die Windsektoren 3 und 4 (S) sowie 4 (SB) ergibt für (SB) eine erheblich größere Einflußfläche gegenüber (S). Letztere ist auf Teile des Scharhörnriffs und den wattkantenparallelen Transport beschränkt. Nach Abb. 4.01 und 5.07 sind für den Standort (S) und sein Einzugsgebiet größere Sohlmaterialien mit Feinsand- und Mittelsandanteilen als auf dem Wattrücken des Einzugsbereichs von (SB) vorhanden. Das gröbere Sohlmaterial muß größere Grenzgeschwindigkeiten (vgl. Abb. 2.16) bis zur Mobilisierung überwinden. Die an beiden Standorten der Höhe und dem Anstieg nach unterschiedlichen Konzentrationswerte sind demnach plausibel.

Nach den besonderen morphologischen Randbedingungen und den dadurch bestimmten Strömungsverhältnissen ist der Sektor 3 am Standort (S) gesondert abgegrenzt. Die Konzentrationen liegen in diesem Sektor bei mittlerer Tide höher als im Sektor 4 (S) und vergleichsweise auch höher als am Standort (SB). Der Anstieg mit der Tideabweichung erfolgt beim Sektor 3 (S) parallel zu dem des Sektors 4. GÖHREN (1970) hat hierfür bei seinen Überlegungen zum Sandtransport eine auf den Suspensionstransport übertragbare Erklärung gegeben. Auf Abb. 5.09 sind diese Zusammenhänge wiedergegeben. Sie weisen einen parallel zur Scharhorn-Düne verlaufenden Brandungs- und Triftstrom aus. Das auf der südwestlich vorgelagerten Sandbank (SKN + 2 m) und an der gleichfalls SW-NO orientierten Dünenkante (SKN > + 2 m) aufgewirbelte Material wird in einer parallel zur Dünenkante laufenden, kräftigen Strömung in Richtung auf die Meßstelle geführt. In ihr sind auch die auf den in Luv vorgelagerten Wattflächen entstandenen Suspensionsanteile enthalten. Hieraus ergeben sich Gesamtkonzentrationen von 100 bis 170 mg/l.

Für den Windsektor 4 (S) treten gleichgroße Werte erst mit größerer Abweichung von der Mitteltide auf. Bei mittleren Tiden wird das Watt westlich von Scharhorn überflutet mit überwiegender NS-Stromrichtung, wobei nur eine kleinere Komponente durch die Dünenkante in Richtung auf den Standpunkt (S) verbleibt (GÖHREN, 1969), so daß deshalb bei Mitteltide nur geringere Konzentrationen verzeichnet werden. Erst bei der in Abb. 5.09 dargestellten intensiven Überströmung der steilen Dünenkante mit brechendem Seegang werden die höheren Werte der Konzentrationen im Sektor 3 (S) erreicht und überschritten.

Die vorstehenden Betrachtungen über die Abhängigkeit der Suspensionskonzentrationen von den Abweichungen zur Mitteltide und von den Standortbedingungen zeigen, daß die gem. Abschn. 4.2 gewählte Zuordnung zu Windsektoren sinnvoll ist.

#### 5.2.1.2 Veränderung der Konzentration mit der Windstärke

Die Beschreibung der Veränderung der Suspensionskonzentration mit der Abweichung vom mittleren Tideverlauf enthält den Nachteil, daß die Wasserstandsveränderungen den Windereignissen mit einer Phasenverschiebung folgen. Dieses führt zu größeren Streuungen der Ergebnisse. Auf dem Watt, im flachen Wasser, werden die Windkräfte schneller in entsprechende Wellen und Strömungen und damit auch veränderte Suspensionswerte umgesetzt, als dies durch die Abweichungswerte zur Mitteltide angegeben wird. Die Einführung der Abhängigkeit von der Windstärke stellt somit eine straffere Beziehung zur Suspensionskonzentration her.

Zunächst sind in Abb. 5.10 die Suspensionskonzentrationen in Abhängigkeit von den

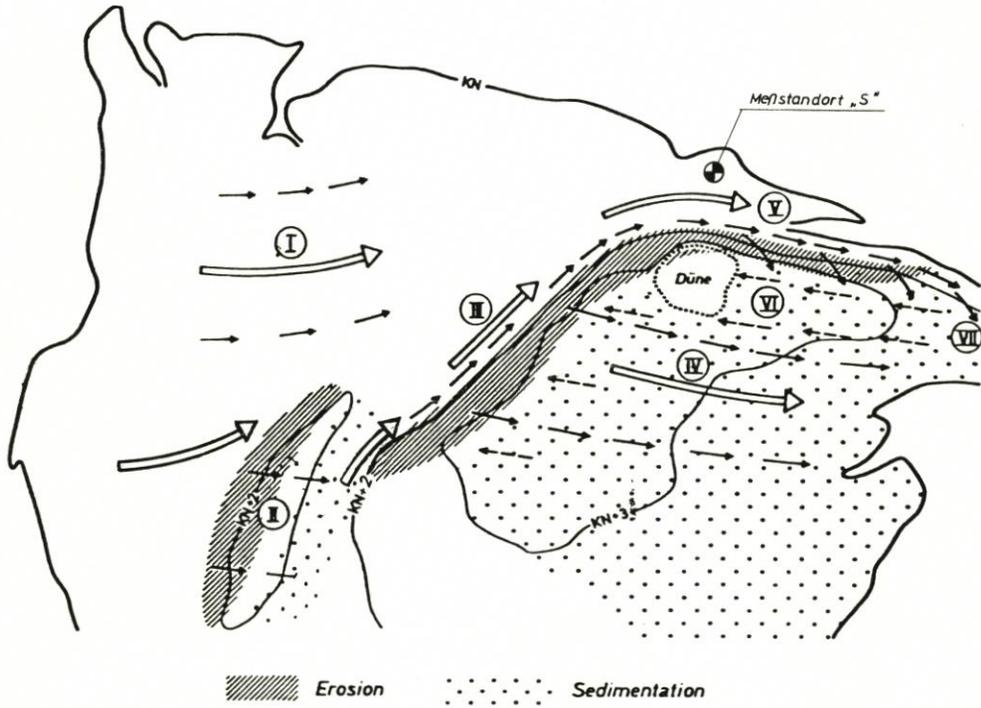


Abb. 5.09. Transportvorgänge und morphologische Formung von Scharhorn (schematisch)  
(GÖHREN, 1970)

- I Vorherrschender Sandtransport mit östlicher Triftströmung im Außenwatt (Bei ungestörter Gezeitenbewegung verläuft die Materialbewegung in südlicher Richtung.)
- II Materialüberschüttung auf den Brandungsbänken; Erosion auf der Luvseite, Sedimentation auf der Leeseite
- III Brandungserosion am Nordwestrand der Plate, Transport des erodierten Materials im strandparallelen Brandungsstrom und in dem über die Plate setzenden Triftstrom
- IV Triftstrom auf der Plate bei erhöhten Wasserständen, Sedimentation des Materials aus dem Strandabbruch. Dabei Sortierung grob-fein mit zunehmender Entfernung von der Brandungszone
- V Brandungserosion und strandparalleler Transport am Nordstrand; Aufschüttung der Plate durch Strandwallvorbau; Triftstrom und Brandungsstrom setzen bei allen auflandigen Windrichtungen von West nach Ost
- VI Äolischer Sandtransport, vorwiegend bei östlichem Wind und beschränkt auf die hochliegenden, schluffarmen Zonen der Plate. Die Düne wird ausschließlich aus Flugsand von der östlichen, riffartigen Plate aufgebaut
- VII Riffartiger Vorbau der Plate nach Osten durch Sedimentation des strandparallelen Materialstromes am auslaufenden Strand

Windstärken (ohne Untergliederung nach Windsektoren) aufgetragen. Dabei ist der jeweilige Konzentrationswert das Mittel aus den Werten bei einer Windstärke. Die Werte sind außerdem nach DILLO (1960) auf  $+4\text{ }^{\circ}\text{C}$  bezogen (vgl. Abschn. 4.2).

$$\bar{C}_{CT} = \tau_r / \tau_M \bar{C}^{1/2} \sqrt{T_C} \quad (\text{Gl. 4.01 u. 4.02})$$

Die zugehörigen Kurven sind einander ähnlich. Bei den gemessenen Werten ist im Mittel von Wassertemperaturen von rd.  $+11\text{ }^{\circ}\text{C}$  auszugehen, was zwecks Temperaturbereinigung auf  $+4\text{ }^{\circ}\text{C}$  einem Zuschlag zu den Konzentrationswerten entspricht, wie er sich nach DILLO und Gl. 4.02 zu rd. 65 % ergibt.

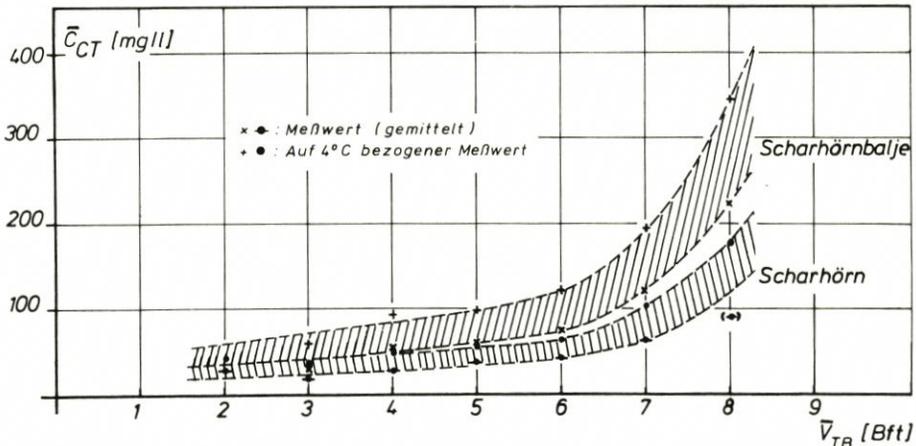


Abb. 5.10. Veränderungen der Suspensionskonzentration mit der Windstärke. Mittelwerte aller Messungen für einzelne Windstärken Scharhörn/Scharhörnbalje

Der Kurvenvergleich für beide Standorte ergibt einander ähnliche Anstiege der Suspensionskonzentration mit der Windstärke. Im Wattinnern (SB) liegen die Konzentrationswerte etwa doppelt so hoch wie am Wattrand (S). Sie steigen bis 6 Bft linear nur wenig mit der Windstärke an, wobei für Windstille am Standort (S) etwa  $20\text{ mg/l}$  und am Standort (SB) etwa  $40\text{ mg/l}$  angegeben sind.

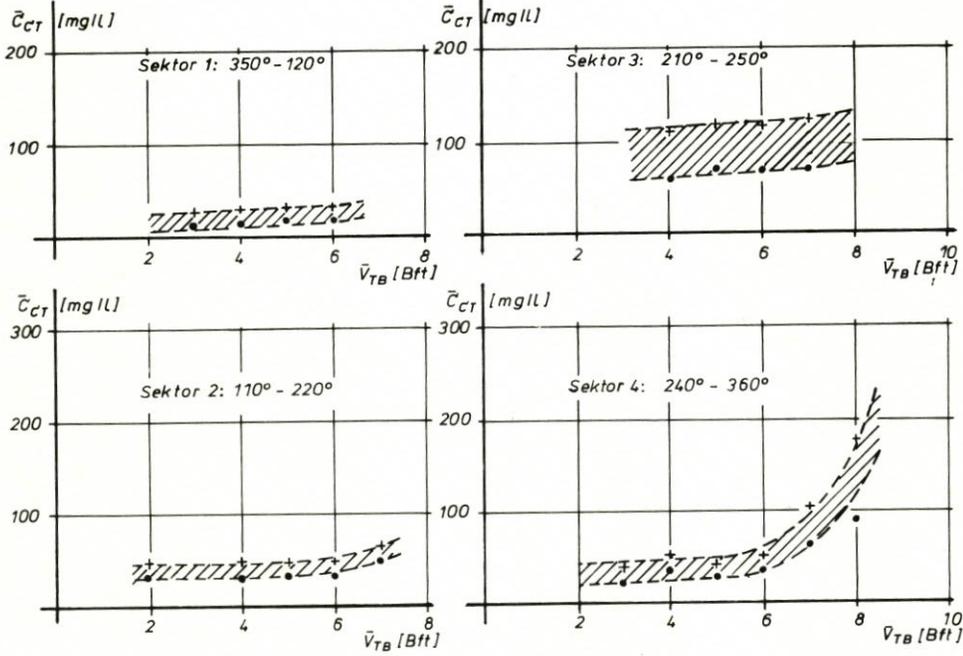
Bei Windstärken ab 6 Bft steigt die Suspensionskonzentration überproportional an. Die Mittelwerte der temperaturbereinigten Kurven liegen bei 6 Bft für (SB) bei etwa  $120\text{ mg/l}$ , für (S) bei etwa  $60\text{ mg/l}$  und steigen bis 8 Bft auf über  $300\text{ mg/l}$  (SB) bzw.  $150\text{ mg/l}$  (S) an.

Unter Zugrundelegung der bisher über einen Tidezeitraum (12 + 3 Stunden) gemessenen Windstärken von max. 10 Bft erfaßt die Kurve der Abb. 5.10 mit Windstärken bis 8 Bft den größten Teil des abzudeckenden Bereichs.

Der vorstehend über die Windstärken gemittelte Kurvenverlauf gibt keine Auskunft über die Verhältnisse in den einzelnen Windsektoren. Die Meßergebnisse werden deshalb für diese Einzelsektoren noch einmal getrennt analog aufbereitet (Abb. 5.11).

In den Sektoren 1 (S) sowie 1 und 2 (SB) wird das bei der Tideabweichung festgestellte Ergebnis dahingehend bestätigt, daß die Suspensionskonzentration bei (S) mit der Windstärke nur unwesentlich ansteigt. Meßergebnisse liegen nur bis 6 Bft vor, so daß der mit einsetzender Brandung zu erwartende überproportionale Anstieg hier nicht erfaßt ist. Die Konzentrationen werden aber aus den bereits erläuterten Gründen (vgl. Abschn. 5.2.1.1) kleiner als in den anderen Sektoren bleiben, da im wesentlichen nur das lokale Ereignis Einfluß hat.

Standort: Scharhörn ((·) Meßwert gemittelt, (+) auf 4 ° C bezogen)



Standort: Scharhörnbalje ((·) Meßwert gemittelt, (+) Meßwert auf 4 ° C bezogen)

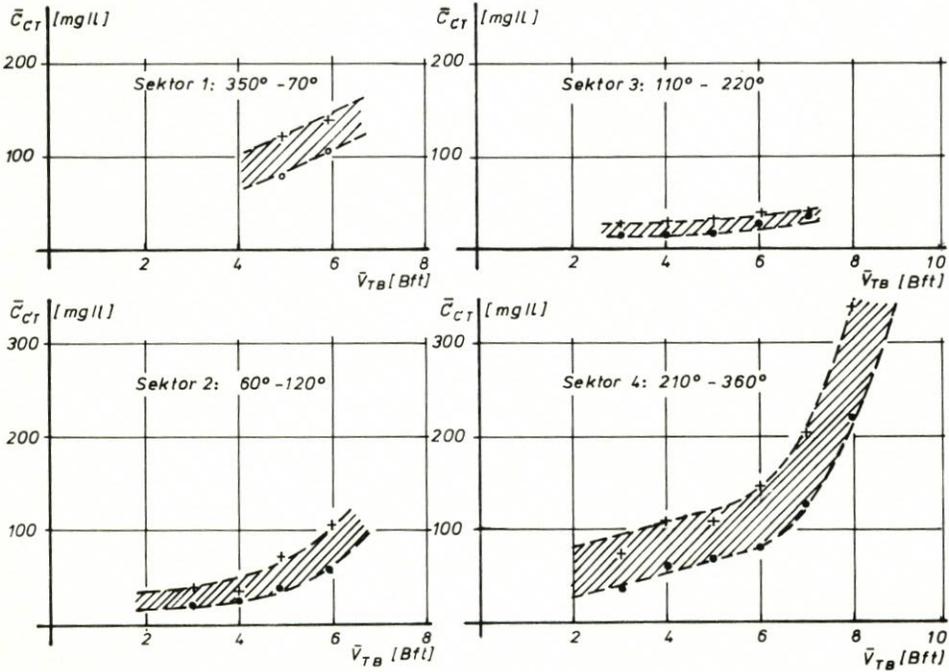


Abb. 5.11. Mittelwerte der Suspensionskonzentration pro Tide und Windstärke – sektoral

Für (SB) liegen im Windsektor 1 keine Messungen für niedrige Windstärken vor. Aufgrund des Datenumfanges kann lediglich im Sektor 2 eine deutliche Zunahme der Suspensionskonzentration mit der Windstärke angegeben werden. Im Sektor 1 liegen Werte nur für 5 und 6 Bft vor, die entsprechend der Abweichung zur mittleren Tide (Abb. 5.06) höhere Konzentrationen als im Sektor 2 aufweisen.

Im Sektor 2 (SB) tritt die überproportionale Steigerung der Konzentration bereits bei Windstärken  $> 4$  Bft auf. Dieses stimmt mit der Erklärung des steilen Anstieges bei der Tideabweichung überein. Die an der Wattkante und auf den vorgelagerten Watten aufgewirbelten Feststoffteilchen gelangen also, durch den Wattkantenvorsprung begünstigt, bereits bei Windstärken um 5 Bft mit der Strömung zur Meßstelle. Für Windstärken  $> 6$  Bft liegen hierzu keine Meßergebnisse vor. Es kann aber aufgrund der weiter bei hohen Windstärken ansteigenden Turbulenz davon ausgegangen werden, daß die Suspensionskonzentrationen im Sektor 2 weiter überproportional wachsen, wie der Kurvenverlauf (Abb. 5.11) bereits andeutet. Bei entsprechender Extrapolation des Kurvenverlaufs werden beide Sektoren bei Windstärken von etwa 7 Bft gleiche Konzentrationswerte aufweisen.

Für die ablandigen Windsektoren 2 (S) und 3 (SB) liegen Meßergebnisse bis 7 Bft vor. Die Konzentrationen steigen bis 6 Bft linear nur sehr gering von 45 mg/l (S) bzw. 30 mg/l (SB) auf 55 mg/l (S) bzw. 40 mg/l (SB) an. Bei Windstärken  $> 6$  Bft sind einsetzende überproportionale Steigerungen zu erkennen.

Der Kurvenverlauf ist damit für beide Standorte bis 7 Bft ähnlich, wobei die Konzentrationen bei (S) etwas höher als bei (SB) liegen. Der Anstieg bei Windstärken  $> 7$  Bft wird, wie bei der Tideabweichung erläutert, am Standort (S) größer sein als am Standort (SB), da bei diesen Windstärken wegen der abgesenkten Wasserstände keine nennenswerten Mengen suspendierter Feststoffe mit der Wasserbewegung über den Wattrücken dem Standort (SB) zugeführt werden (vgl. Abschn. 5.2.1.1).

In den auflandigen Windsektoren 3 und 4 (S) sowie 4 (SB) zeigt sich erwartungsgemäß die deutlichste Zunahme der Suspensionskonzentration mit der Windstärke. Bis 6 Bft ist der Anstieg an beiden Standorten linear und relativ gering. Für (S) steigt die Konzentration von ca. 40 mg/l auf ca. 50 mg/l, für (SB) von ca. 80 mg/l auf ca. 130 mg/l an. Bei Windstärken größer 6 Bft nehmen die Konzentrationen überproportional zu, und zwar für (S) auf etwa 170 mg/l und für (SB) auf 350 mg/l bei 8 Bft. Die Zunahme der Konzentrationen an beiden Standorten paßt zu den über alle Sektoren gebildeten Mittelwerten (Abb. 5.10), was auf einen mit steigender Windstärke abnehmenden Einfluß der örtlichen Faktoren und auf die Zunahme des Einflusses der großräumigen Zusammenhänge (Strömungsverhältnisse) hindeutet. Da für die Sektoren 3 und 4 (S) sowie 4 (SB) die weitergehenden Parametermessungen vorliegen, werden hierzu ausführlichere Betrachtungen in Abschn. 5.2.2 angestellt.

Insgesamt gilt für die Windsektoren des Standorts (S), daß die Anstiege der Konzentration mit der Windstärke bis 6 Bft ähnlich verlaufen und lediglich die Konzentrationshöhen entsprechend der durch die Morphologie bedingten Strömungsverhältnisse (vgl. Sektor 3) gegeneinander verschoben sind. Soweit Meßergebnisse vorliegen, steigt in allen Sektoren des Standorts (S) ab 7 Bft die Konzentration überproportional an. Eine Ausnahme stellt lediglich der Sektor 3 (S) mit den oben erläuterten besonderen Strömungsverhältnissen dar. Wegen der bereits bei geringen Windstärken hohen Konzentration setzt der überproportionale Anstiegsbereich hier erst ab 8 Bft ein. Die für den auflandigen Windbereich charakteristischen Konzentrationen des Sektors 4 überschreiten erst ab 8 Bft die Konzentrationen des Sektors 3.

Ein vergleichbar einheitliches Bild ergibt sich am Standort (SB) nicht. Lediglich in den Sektoren 3 und 4 entspricht es mit seinem linearen Anstieg bis 6 Bft und dem anschließenden Überproportionalitätsbereich dem des Standortes (S). In den Sektoren 1 und 2 ist das Bild

wegen der besonderen Randbedingungen verändert, wobei der überproportionale Anstieg bereits bei kleinerer Windstärke (4/5 Bft) einsetzt.

Die mittlere Suspensionskonzentration kann demnach unter Vernachlässigung eines linearen Gliedes in erster Näherung mit dem allgemeinen Ansatz

$$\bar{C}_{CT} = a \cdot \bar{V}_T^b + \bar{C}_0 \quad (\text{Gl. 5.01})$$

beschrieben werden. Die Konstanten (a) und (b) fassen dabei den Einfluß der einwirkenden Parameter zusammen, deren Zusammenwirken, bezogen auf den Konzentrationswert, bisher nicht ausreichend beschrieben werden kann. Die Konstante (a) wird wesentlich durch die den Standort kennzeichnenden morphologischen und strömungsmäßigen Randbedingungen bestimmt, während der Exponent (b) vornehmlich durch die maßgebende Windrichtung und damit durch den Windsektor mit dem zugehörigen Seegang und den daraus resultierenden Turbulenzen und Orbitalbewegungen bestimmt wird.  $\bar{C}_0$  gibt den sich rein aus der Tidedrömung für Windstille ergebenden Konzentrationswert an.

### 5.2.2 Verhältnisse im auflandigen Windsektor und ihre Parameter (Sektoren 4 [S, SB])

Durch die unter Abschn. 5.2.1 abgeleiteten Zusammenhänge zwischen der Suspensionskonzentration und der Abweichung zur mittleren Tide bzw. der Windstärke werden die ursächlich suspensionserzeugenden Parameter überwiegend nur indirekt beschrieben. Entsprechend Abschn. 4.8 wird deshalb die Suspensionskonzentration mit den gemessenen und direkt beschreibenden Parametern – Strömung und Wellenhöhe – in Verbindung gebracht. Zunächst werden für Wellenhöhen um Hochwasser Suspensionsganglinien über die Tide mit Ganglinien der Strömungsgeschwindigkeit und der Strömungsrichtung verglichen. Sodann werden Beziehungen ermittelt zwischen den über eine Tide integrierten Suspensionskonzentrationen und den Windgeschwindigkeiten, Wellenhöhen und Stromwegen.

Danach werden aus den Wellenhöhen hergeleitete Orbitalgeschwindigkeiten und Seegangscharakteristiken mit den Suspensionskonzentrationen in Zusammenhang gebracht.

#### 5.2.2.1 Suspensionsganglinien über die Tide

Die Suspensionsganglinien sind für 10-cm-Stufen der mittleren Wellenhöhen  $\bar{H}$  um Hochwasser (vgl. Abschn. 4.2) mit zugehörigen Strömungs- und Richtungsganglinien aufgetragen (Abb. 5.12 bis 5.14). Mit Hilfe der Beziehungen zwischen mittlerer Wellenhöhe  $\bar{H}$  und Windgeschwindigkeit  $\bar{V}_T$  (Abb. 4.02) ist gleichzeitig die zugehörige Windstärke numerisch angegeben.

Die Wahl der mittleren Wellenhöhe um Hochwasser ergibt sich aus dem Meßverfahren (vgl. Abschn. 4.3). Sie ist sinnvoll, da hiermit die Grenzwerte (vgl. Abschn. 2.3.1) für grundberührenden und brechenden Seegang beschrieben werden können. Näherungsweise gleichbleibende Wellenhöhen vorausgesetzt, hat der Einfluß der Orbitalbewegung auf die Sohle bei maximaler Wassertiefe sein Minimum. Sind die Wellenhöhen bereits bei dieser Wassertiefe höher als die o. a. Grenzwerte, so ist auch bei geringerer Wassertiefe und größerem Verhältnis  $\bar{H}/d$ , d. h. während der gesamten Tide, von einem Überschreiten der Grenzwerte auszugehen.

Die für den einzelnen Meßwert charakteristische Seegangsart ist in den Tabellen 1 bis 4

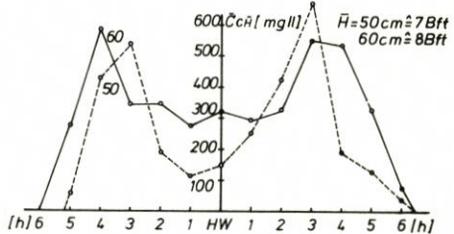
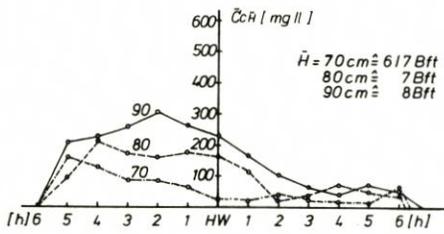
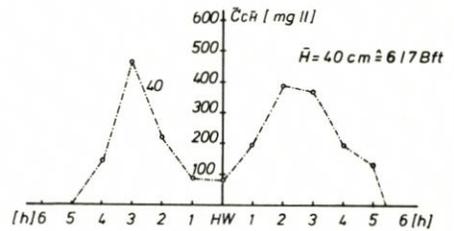
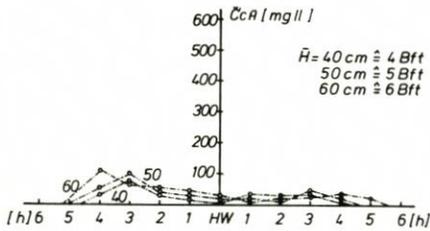
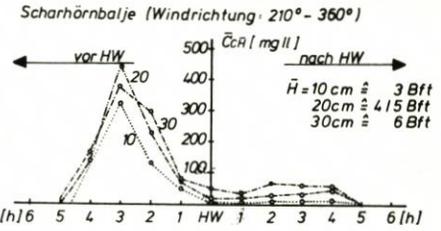
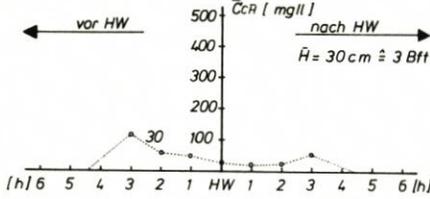


Abb. 5.12. Suspensionskonzentrationsganglinien über die Tide für Wellenhöhen  $\bar{H}$  um Hochwasser (HW)

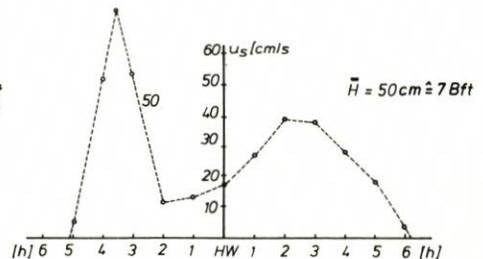
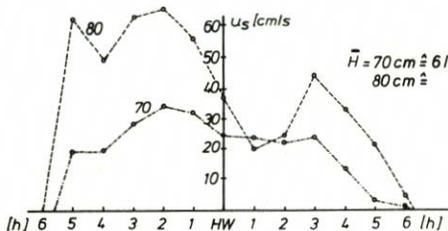
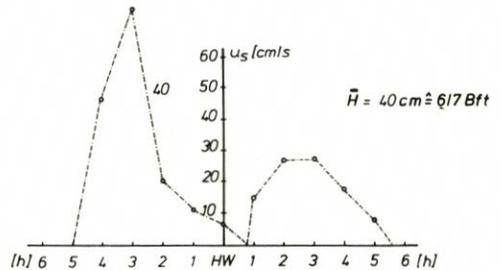
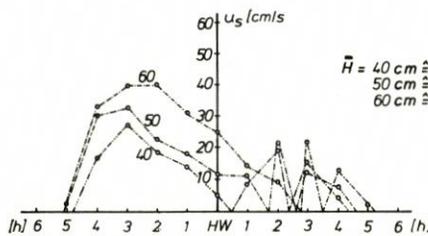
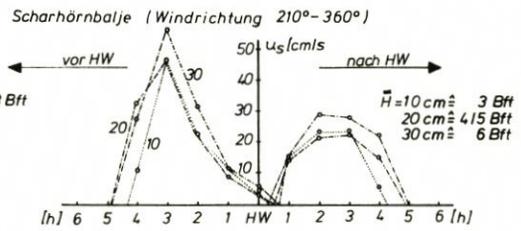
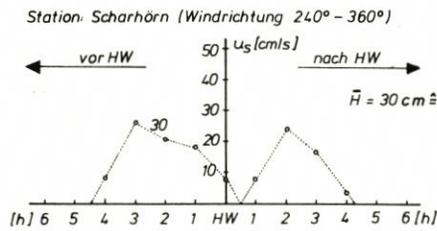


Abb. 5.13. Strömungsgeschwindigkeitsganglinie über die Tide für Wellenhöhen  $\bar{H}$  um Hochwasser (HW)

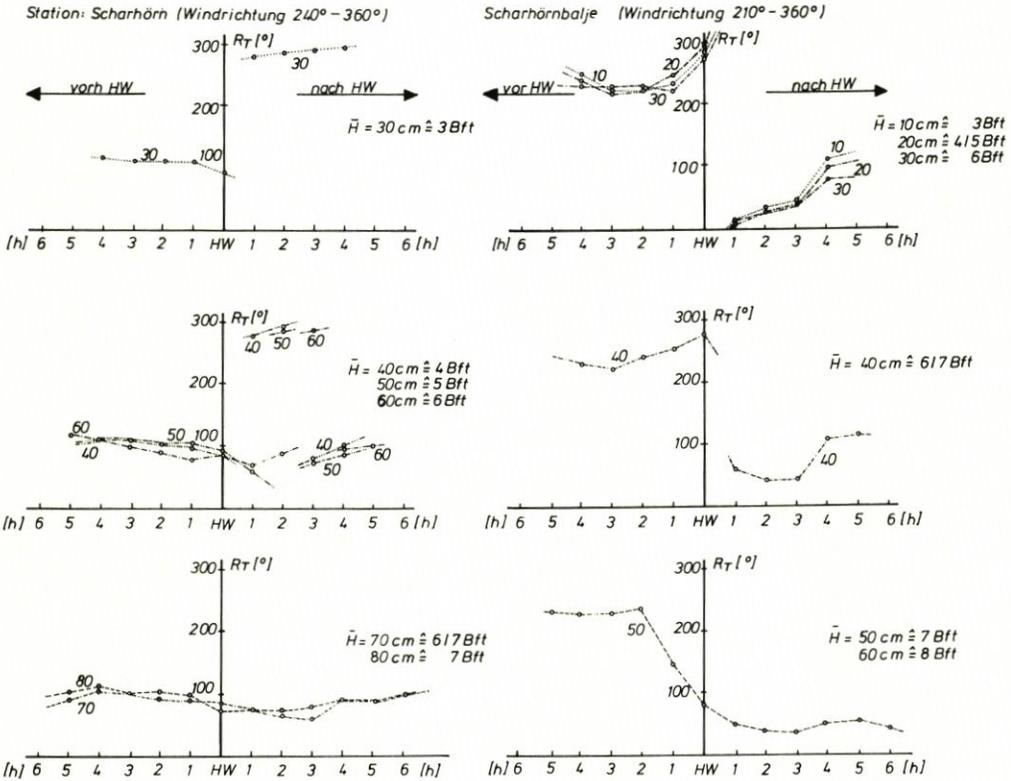


Abb. 5.14. Strömungsrichtungsganglinie über die Tide für Wellenhöhen  $\bar{H}$  um Hochwasser (HW)

(vgl. hierzu auch Abb. 5.19) angegeben. Hiernach setzt am Standort (S), Randwatt, der grundberührende Seegang in Abhängigkeit von der Wassertiefe bereits bei mittleren Wellenhöhen  $\bar{H}$  um 10 cm ein und bricht spätestens bei Wellenhöhen  $\bar{H}$  um 70 cm. Am Standort (SB), brandungsfreies Watt, setzt die Grundberührung spätestens bei mittleren Wellenhöhen  $\bar{H}$  um 30 cm ein.

Für den Standort Scharhörh (S) ist bei Wellenhöhen bis 30 cm, das entspricht einer Windstärke bis etwa 3 Bft, die normale Tidebewegung ausgebildet mit Flut-, Stauwasser- und Ebbe phase. Die Stromrichtungen sind bei Flut und Ebbe parallel zum Wattrand gegenläufig. Das Maximum der Strömungsgeschwindigkeit (rd. 25 cm/s) in der Flutphase stimmt zeitlich mit dem der Suspensionskonzentration (rd. 120 mg/l) überein. In der Ebbe phase ist das Maximum der Konzentration schwächer ausgebildet (50 mg/l) und tritt gegenüber dem Strömungsmaximum (rd. 25 cm/s) etwa um 1 Stunde später ein. Diese Verschiebung ergibt sich aus der entgegengesetzt zur Windrichtung verlaufenden Strömung, was zu einer Aufsteilung des mit dem Wind laufenden Seegangs, insbesondere bei geringen Wassertiefen, führt. In der Flutphase liegen die Werte der Suspensionskonzentration im Mittel etwa doppelt so hoch wie die in der Ebbe phase. In der Tendenz entsprechen sie damit der Strömungsganglinie.

Bei Wellenhöhen zwischen 40 und 60 cm, d. h. Windstärken bis 6 Bft, ändert sich die Konzentrationsganglinie nur unwesentlich. Deutliche Veränderungen treten nur in den Strömungsganglinien auf. Sie zeigen während der Flut mit  $\bar{H}$  steigende und während der Ebbe verminderte Strömungsgeschwindigkeiten bei mehreren Stromkenterpunkten. Eine Unter-

scheidung in Ebbe- und Flutphasen ist problematisch, da die Flutdauer 1 bis 2 Stunden über das Hochwasser hinaus andauert, der Ebbstrom nur 1 bis 2 Stunden läuft und gegen Ende der Tide bereits wieder in die Flutstromrichtung kentert. Das mehrfache Kentern des Stromes vor Scharhörn ist mit der Ausbildung einer küstenparallelen Walzenströmung während der Ebbphase erklärt (GÖHREN, 1971). Die in Abschn. 4.2 als nicht sinnvoll bezeichnete Einteilung der Suspensionskonzentration, z. B. nach Halbzeiten, wird hier deutlich. Eine Orientierung am Hochwasser oder am Kenterpunkt ist anhand der Strömungs- und Richtungsganglinien nicht gerechtfertigt. Nach dem Vergleich der Strömungsganglinien mit den Suspensionsganglinien ist auffällig, daß in der Tidezeit nach Hochwasser höhere Suspensionskonzentrationen eintreten, als die Strömungsganglinien im Hinblick auf die Betrachtungen für  $\bar{H} = 30$  cm erwarten lassen.

Für weiter zunehmende Windstärken und gemessene mittlere Wellenhöhen bis 90 cm, das entspricht etwa 8 Bft, steigt die Suspensionskonzentration in der Zeit vor Hochwasser bis etwa 2 Stunden danach überproportional bis auf 300 mg/l an, während in den letzten 4 Tidestunden nur ein kleinerer Konzentrationsanstieg bis auf maximal 70 mg/l zu verzeichnen ist. Die Strömungsrichtung-Ganglinie weist ab 70 cm Wellenhöhe, d. h. bei 6 bis 7 Bft, keine Kenterpunkte mehr auf und läuft nahezu richtungskonstant in Flutstromrichtung während der ganzen Tide. Die Strömungsgeschwindigkeiten betragen ab  $\bar{H} = 80$  cm (ca. 7 Bft) in der Zeit vor Hochwasser 50 bis 60 cm/s und in der Zeit nach Hochwasser 20 bis 40 cm/s. Für  $\bar{H} = 90$  cm (8 Bft) liegen keine Strömungsmessungen vor. Es kann davon ausgegangen werden, daß die Strömungsgeschwindigkeiten entsprechend  $\bar{H} = 80$  cm weiter steigen und insbesondere in der Flutphase die von GÖHREN (1971) für Sturmfluten angegebenen Strömungsgeschwindigkeiten von mehr als 100 cm/s erreichen werden.

Die Interpretation der von HYULSTRÖM/ZANKE (vgl. Abschn. 2.3.1, Abb. 2.16) für wellenfreie Verhältnisse angegebenen Kurven ergibt bei Korngrößen  $d_{50} = 0,15$  mm eine Grenzgeschwindigkeit der Aufwirbelung 35 cm über der Sohle von etwa 60 cm/s. Dieses stimmt mit Naturmessungen von FÜHRBÖTER et al. (1981) überein, die unter Berücksichtigung einer biogenen Stabilisierung des Wattbodens für  $d_{50} = 0,16$  mm zu kritischen mittleren Strömungsgeschwindigkeiten zwischen rd. 45 und 65 cm/s kommen. Nach den Strömungsmessungen (vgl. Abb. 5.13) für Scharhörn (S) wird  $u_s = 60$  cm/s erstmals bei Wellenhöhen  $\bar{H} = 80$  cm (entsprechend etwa 7 Bft) erreicht. Dagegen zeigen die Vergleiche der Suspensionsganglinien (Abb. 5.12) bereits bei  $\bar{H} = 70$  cm und  $u_s = 30$  cm/s den die Aufwirbelung kennzeichnenden Anstieg der Suspensionskonzentration, da die Einflüsse von Wellen einschließlich Brandung nicht berücksichtigt sind. Bei Überlagerung der Geschwindigkeiten aus Tideströmung und aus wellenbedingter Orbitalbewegung ergibt sich die genannte Grenzgeschwindigkeit (60 cm/s) bereits bei 3 Bft mit mittleren Wellenhöhen  $\bar{H} = 30$  cm (vgl. Abschn. 5.2.2.3), ohne daß damit der erwartete Anstieg der Suspensionskonzentration eintritt (vgl. Abb. 5.12). Der Geschwindigkeitsgrenzwert (60 cm/s) allein ist also ungeeignet, das Einsetzen des Konzentrationsanstieges zu erklären. Es bleiben noch die Einflüsse des Brechens der Wellen zu berücksichtigen.

Bei Wellenhöhen  $\bar{H} = 70$  cm bricht der Seegang auf dem Randwatt großflächig und im Bereich der Brandungskante konzentriert. Es kommt zu Schwallbrechern (STIEFERT, 1973), die in gleichmäßig flachen Gebieten auch als Rollbrecher bezeichnet werden, weil sie auf langen Brandungs-(Reibungs-)strecken die vorgelagerten Flachwassergebiete durchlaufen (Abb. 2.09). Das Brechen der Wellen führt zu einem sprunghaften Anstieg der Turbulenz, wobei insbesondere durch den Lufteinschlag ein erheblicher Teil der Brandungsenergie in Durchmischungsturbulenz und Schwingungen des wassergesättigten Bodens (FÜHRBÖTER, 1971) umgesetzt wird. Der Größtwert der Wasser-Boden-Wechselwirkung ist unmittelbar am

Brechpunkt zu erwarten, wo hohe Strömungsgeschwindigkeiten und Turbulenzen auf die Sohle einwirken.

ZENKOVICH (1967) weist darauf hin, daß die eingeschlagenen Luftblasen imstande sind, beim Aufsteigen nach dem „Air-lift-Prinzip“ Sand in höhere Wasserschichten zu fördern. Hierbei sind Sandwolken mit maximal 30 000 mg/l und im Mittel mit 10 000 mg/l festgestellt worden. Im Watt von Scharhör, wo das Sohlmaterial nur wenig feinste Bestandteile enthält (vgl. Abb. 4.03 u. 5.07), sind bei Windstärken bis 8 Bft maximale Einzelwerte von 550 mg/l (Abb. 5.25) und maximale Tidemittelwerte von 300 mg/l (bezogen auf + 4 °C) gemessen worden. Diese Werte werden bei weiterem Ansteigen der Windgeschwindigkeit überschritten. Wie die Grenzwertbetrachtungen in Abschn. 5.2.3 zeigen, werden die von ZENKOVICH angegebenen Extremwerte jedoch nicht erreicht. Vermutlich beruhen die hohen Werte von ZENKOVICH auf Messungen bei Sturzbrechern an stärker geneigten Brandungskanten, wo auf kürzestem Weg die gesamte Wellenenergie umgesetzt wird. Diese Voraussetzung trifft jedoch für den Standort (S) nicht zu. Außerdem gehen die Angaben von ZENKOVICH auf Messungen an Einzelbrechern zurück und sind nicht mit den Messungen vor Scharhör (S) bei drei- bis vierminütiger Probenförderzeit vergleichbar.

Der überproportionale Anstieg der Suspensionskonzentration bei Windstärken  $> 6$  Bft ( $\bar{H} > 60$  cm) ist somit verursacht durch:

- die Überschreitung des Grenzgeschwindigkeitswertes (Beginn der Aufwirbelung des Sohlmaterials) und
- die Brandung mit sprunghaft erhöhter Turbulenz, insbesondere durch den Lufteinschlag der Wellen.

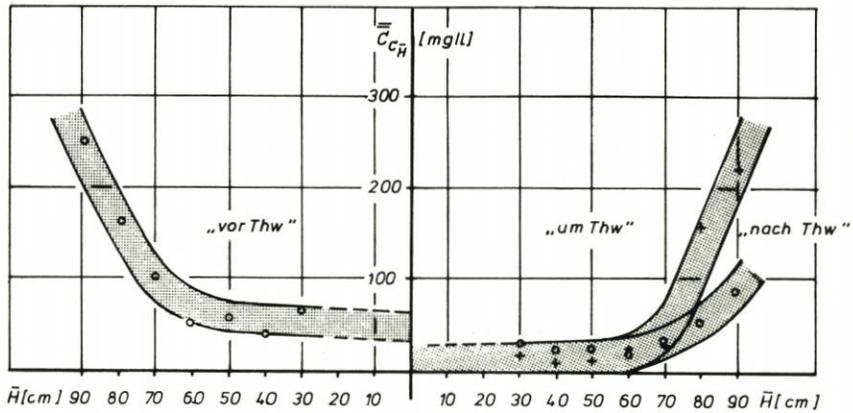
Eine genauere Trennung dieser beiden Einflußgrößen ist schwierig, da hohe Wellen zwangsläufig mit größeren Strömungsgeschwindigkeiten und umgekehrt verbunden sind. Der Einfluß der brechenden Welle dominiert bei Windstärken  $> 6$  Bft, da der Geschwindigkeitsgrenzwert für die Aufwirbelung bei einer Überlagerung von Tide- und von Orbitalströmung bereits bei kleineren Windstärken überschritten wird, ohne zu überproportionalen Suspensionssteigerungen zu führen.

Zusätzlich ist auch der mit dem Triftstrom aus den vorgelagerten Watten herangeführte Suspensionsanteil zu betrachten, der nicht einem am Standort Scharhör (S) gemessenen Ereignis zugeordnet werden kann und damit zusätzlich eine Trennung erschwert.

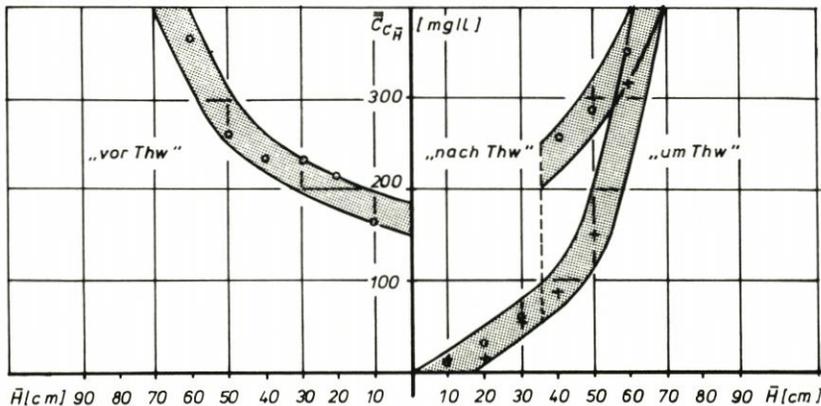
Zur Veranschaulichung des überproportionalen Anstiegs der Suspensionsganglinien (Abb. 5.12) für die Zeiträume vor, um und nach Hochwasser werden für gleiche Wellenenergien zusätzlich Konzentrationsmittelwerte aufgetragen (Abb. 5.15).

Für den Standort Scharhörnbalje (SB) sind entsprechend der Seegangskarakteristik (Abb. 1.02, brandungsfreies Watt) die gemessenen Wellenhöhen für gleiche Windstärken geringer als am Standort (S). Bei Wellenhöhen bis  $\bar{H} = 30$  cm (Windstärken bis etwa 6 Bft) ist eine „normale“ Tidebewegung ausgebildet. Das Maximum der Strömungsgeschwindigkeit bei Flut hat etwa den doppelten Wert der Geschwindigkeit bei Ebbe. Die max. Strömungsgeschwindigkeit bei Flut liegt mit ca. 50 cm/s im Bereich der beginnenden Aufwirbelung des Sohlmaterials (vgl. FÜHRBÖTER et al., 1981, und Abb. 2.16). Im Vergleich zum Standort Scharhör (S), wo die Grenzgeschwindigkeit mit 60 cm/s angegeben ist, erklärt sich für (SB) der niedrigere Wert von ca. 50 cm/s aus dem gegenüber (S) etwas feinkörnigerem Material ( $d_{50} = 0,13$  mm). In der Flutphase ist die Suspensionsganglinie dem Strömungsverlauf ähnlich, und die max. Konzentrationen steigen mit zunehmenden Windstärken auf Werte zwischen 300 und 450 mg/l an. Die Strömung läuft in dieser Tidephase etwa entgegengesetzt zur Windrichtung und führt mit zunehmender Windstärke zur Ausbildung asymmetrisch aufgesteilter Wellen, die nur am Anfang der Tide bei geringeren Wassertiefen und bei

Standort: Scharhörn (Windrichtung: 240° – 360°)



Standort: Scharhörnbalje (Windrichtung: 210° – 360°)

Abb. 5.15. Suspensionskonzentrationen für Tidephasen und steigende Wellenhöhen  $\bar{H}$  um Hochwasser (HW)

Wellenhöhen  $\bar{H} \geq 30$  cm Grundberührung haben. Das ausgeprägte Suspensionsmaximum liegt in der zweiten Tidestunde und ist bestimmt durch die aufgestellten Wellen, das zur gleichen Zeit auftretende Strömungsmaximum und durch die der Meßstelle aus östlich vorgelagerten Wattflächen zugeführten Materialien. Die parallel zum Elbelauf liegenden Wattflächen sind zum großen Teil dem Rand- bzw. Brandungswatt zuzuordnen (Abb. 1.02), auf denen der in Prielrichtung gebeugte Seegang (Abb. 2.14) energiemäßig in entsprechende Turbulenzen und damit Suspensionskonzentrationen umgesetzt wird. Der Anteil der durch den Priel mit der Tideströmung herangeführten Suspension ist signifikant, wie sich aus den Beobachtungen für Windstärken  $> 6$  Bft ergibt.

In der Ebbephase ist eine Ähnlichkeit der Suspensionsganglinie mit der Strömungsganglinie nicht festzustellen. Die Konzentrationen sind hier über die Zeit wenig verändert und steigen von 10 mg/l bei 3 Bft auf Konzentrationen bis 70 mg/l bei 6 Bft an. Da die gegenüber der Flutphase sehr geringen Konzentrationen bereits zur Stauwasserzeit erreicht sind, ist der

oben als signifikant bezeichnete Herantransport der Suspension mit der Tideströmung von vorgelagerten Wattflächen als wesentlich bestätigt. Bei Ebbestrom liegt das Einzugsgebiet im Schutz des Wattrückens und der vorgelagerten Scharhörn-Düne, so daß sich ein ausgeprägter, grundberührender Seegang nicht ausbilden kann. Die damit für die Suspensionsaufwirbelung maßgebende Tideströmung erreicht mit max. 20 bis 30 cm/s Strömungsgeschwindigkeit den Grenzwert der Aufwirbelung (50 cm/s) nicht. Eine Wechselwirkung zwischen Wasser und Sohlmaterial findet somit nur noch in sehr geringem Maße statt. Dieses drückt sich unmittelbar in den abgeminderten Konzentrationswerten aus.

Bei Windstärken von 6 bis 7 Bft ( $\bar{H}$  etwa 40 cm) ändert sich der Verlauf der Suspensionsganglinie während der Zeit vor Hochwasser unbedeutend; lediglich das Konzentrationsmaximum steigt auf Werte zwischen 400 und 500 mg/l an. Demgegenüber ergibt sich in der Zeit nach Hochwasser (HW) ein sprunghafter Anstieg der Konzentration auf gleiche Werte wie vor HW. Die Steigerung der max. Flutstromgeschwindigkeit auf über 70 cm/s beeinflusst die Konzentrationswerte nur wenig. In der Zeit nach Hochwasser ist die Strömungsganglinie fast identisch mit deren Verlauf bei geringeren Windstärken. Trotzdem ist der sprunghafte Anstieg der Konzentration zu verzeichnen.

Die bereits für Winde  $< 6$  Bft gegebene Erläuterung zu den Suspensionsganglinien für die Zeit vor HW gelten auch hier. Die über dem Watt durch die gegenläufige Strömung asymmetrisch aufgesteilteten Wellen laufen in Windrichtung und treffen auf die sich entgegengesetzt bewegendes Wellen aus dem Elbeseegang (Abb. 2.14), was im Bereich des östlich vorgelagerten Randwatts zum frühzeitigen Brechen der Wellen führt. Die hieraus resultierende Erwartung größerer Suspensionskonzentrationen wird durch die Messungen am Standort (SB) nicht bestätigt (Abb. 5.12).

Der Anstieg der Suspensionskonzentration in der Zeit nach HW bei Windstärken von 6 bis 7 Bft ist durch Veränderungen auf den Watten in Luv von der Meßstelle bedingt. Sie sind durch eine flächenhafte Brandung auf den westlich vorgelagerten Rand- und Brandungswatten gekennzeichnet, wie sie auch am Standort (S) zum überproportionalen Anstieg der Konzentrationen führen. Außerdem wird durch den bei diesen Windstärken zunehmend einsetzenden Triftstrom (Abb. 5.08) das an der Wattufluvseite aufgewirbelte Material über den hohen Wattrücken hinweg zur Meßstelle geführt. Das Einsetzen des Triftstroms ist durch die Änderung des Drehsinns der Stromrichtung angezeigt (Abb. 5.14). Die Strömungsrichtung dreht nicht mehr wie bei geringeren Windstärken von West über Nord nach Ost, sondern über Süd. Nach den Suspensionsganglinien für diesen Windstärkenbereich sind die örtlichen Wellenverhältnisse auf dem brandungsfreien Watt von untergeordneter Bedeutung. Vielmehr sind die Verhältnisse auf den in Stromrichtung vorgelagerten Wattflächen in Verbindung mit den Strömungen, die das aufgewirbelte Material zur Meßstelle verfrachten, maßgebend.

Bei weiter bis auf 8 Bft ansteigenden Windstärken, Wellenhöhen  $\bar{H}$  bis 60 cm, wird die triftstrombedingte Drehsinnveränderung der Strömungsrichtung deutlich. Ein Kenterpunkt mit Stauwasserzeit tritt nicht mehr auf. Die Drehung in die Ebbestromrichtung setzt bereits um die vierte Tidestunde ein. Die Strömung setzt danach zunehmend richtungskonstant über den zwischen Scharhörn und Neuwerk ausgebildeten Sattel. In Verbindung mit der Geschwindigkeitganglinie ergibt sich hieraus ein kräftiger Triftstrom von der Luvseite zur Leeseite des Wattes mit maximalen Strömungsgeschwindigkeiten vor Hochwasser von über 70 cm/s und nach Hochwasser von rd. 40 cm/s.

Der Einfluß des Triftstroms ist an der Suspensionsganglinie abzulesen. Die Ganglinie ist in der Zeit nach Hochwasser in der Regel ausgerundeter, die Konzentrationsmaxima sind gleich oder größer als in der Zeit vor HW, und die Konzentrationswerte um HW steigen wegen des bereits laufenden Triftstroms erheblich an. Die Werte der Suspensionskonzentra-

tionen werden wie im vorhergehenden Windstärkenbereich auch hier durch die Ereignisse auf den in Strömungsrichtung vorgelagerten Watten bestimmt. Die Maxima der Strömungsgeschwindigkeiten decken sich auch hier gut mit denen der Suspensionsganglinien. Letztere steigen gegenüber denen bei geringeren Windstärken um über 100 mg/l auf 550 bis 600 mg/l in der Zeit vor HW und auf 550 bis 650 mg/l in der Zeit nach HW an.

Analog zum Standort (S) ist auch für den Standort (SB) die Veränderung der Konzentrations-Mittelwerte über der Wellenhöhe in den Zeiten vor HW, um HW und nach HW aufgetragen (Abb. 5.15). Auch hier setzt der überproportionale Anstieg der Konzentration bei einer bestimmten Wellenhöhe ein. Der Kurvenverlauf ist an beiden Standorten ähnlich. Allerdings differieren die zugehörigen Wellenhöhen entsprechend der Seegangskarakteristik. Bei Wellenhöhen  $\bar{H}$  bis 30 cm, d. h. ca. 6 Bft, ist der Anstieg der Suspensionskonzentration im Vergleich zu Scharhörn steiler. Hier kommen die im Bereich des brandungsfreien Wattes ansteigenden Turbulenzen in Verbindung mit dem feineren Sohlmaterial ( $d_{50} = 0,13$  mm) der näheren Umgebung sowie die weiträumig vorgelagerten Wateinzugsflächen zum Ausdruck. Der sprunghafte Anstieg der Konzentration in der Zeit nach HW bei Windstärken  $> 6$  Bft ( $\bar{H} \approx 40$  cm) tritt hervor. Zur gleichen Zeit setzt der überproportionale Anstieg der Konzentration ein, wie es dem Standort (S) entspricht. Der Anstieg der Konzentrationswerte mit der Wellenhöhe ist in allen Phasen bei Windstärken  $> 6$  Bft im Vergleich zum Standort (S) nur wenig steiler. Die anhand von Suspensions-Mittelwerten bereits angegebene Windstärke von 6 Bft für das Einsetzen des überproportionalen Anstiegs der Konzentrationen (Abb. 5.10 u. 5.11) wird aufgrund der Suspensionsganglinie und der vorgenommenen Trennung nach Phasen (Abb. 5.15) als richtig bestätigt.

Aufbauend auf obige Feststellungen kann die Suspensionskonzentration an einem Standort auf dem Watt durch den allgemeinen Ansatz

$$C = f(C_2, S_V) + f(C_1) + C_w \quad (\text{Gl. 5.02})$$

beschrieben werden. Hierbei ist  $C_2$  die auf den vorgelagerten Watten aufgewirbelte Suspension, die mit der Strömung (Stromweg  $S_V$ ) dem Meßstandort zugeführt wird,  $C_1$  die örtlich am Standort aufgewirbelte Suspension und  $C_w$  die von außerhalb des Betrachtungsraumes herangeführte Suspension.  $C_1$  und  $C_2$  sind anhand der wesentlichen örtlichen Einflußgrößen durch

$$C_{1/2} = f(D_H, \bar{d}) + f(F_{(u_s + u_H)}, \bar{d}) \quad (\text{Gl. 5.03})$$

näher bestimmt. Die örtlich aufgewirbelte Suspension wird hierbei mit Hilfe der seegangsbedingten (inkl. Luftschlag der brechenden Welle) Turbulenzkräfte ( $D_H$ ) und mit Hilfe der strömungsbedingten Schubkräfte ( $F_{(u_s + u_H)}$ ) auf das Sohlmaterial ( $\bar{d}$ ) ausgedrückt. Für  $C_w$  kann aufgrund der großen Variationsbreite der Randbedingungen keine weitergehende Angabe gemacht werden. Die Ergebnisse im Untersuchungsgebiet weisen allerdings für  $C_w$  auf einen sehr geringen Anteil an der Gesamtkonzentration hin.

### 5.2.2.2 Über die Tide integrierte Konzentrationswerte

Die vorhergehenden Ausführungen zeigen, daß mit zunehmendem Windeinfluß die Diskussion der Konzentrationen anhand von Teilabschnitten einer Tide erschwert wird, da der Einfluß des Triftstroms durch die an den Standorten (S) und (SB) gemessenen Strömungsgrößen nicht ausreichend beschrieben wird. Es fehlt die Erfassung der großräumigen Strömungsverhältnisse im Umfeld der Standorte, um die Materialzufuhr als wesentlichen Konzentrationsanteil zu erfassen. Für mittlere Tideverhältnisse hat GÖHREN (1969) zwar eine

Beschreibung der Strömungsverhältnisse im Untersuchungsgebiet angegeben. Es fehlen aber, mit Ausnahme einiger Triftstromvektoren, die unter Abschn. 5.2.2.1 bereits zur qualitativen Abschätzung der Einzugsgebiete verwendet worden sind, Angaben für Starkwinde.

Für die weiteren Betrachtungen sind die Suspensionskonzentrationen als über die Tide integrierte Mittelwerte gewählt und in Beziehung gebracht zu Parametern gemäß Abschn. 5.2.2. Hierdurch werden auch die Einflüsse aus den Ganglinien der Strömungsverhältnisse berücksichtigt, die die Parallelität von Wind- und Strömungsrichtungen bei steigenden Windstärken ausweisen.

Die entsprechend Abschn. 4.2 aufbereiteten Mittelwerte der Suspensionskonzentrationen sind über der Windgeschwindigkeit/-stärke (Abb. 5.16), über der mittleren Wellenhöhe  $\bar{H}$  um Hochwasser (Abb. 5.17) und über dem Stromweg (Abb. 5.18) aufgetragen. Zusätzlich sind die Suspensionswerte anhand der zugehörigen Wellenereignisse in Abhängigkeit von der Wassertiefe klassifiziert nach brechendem, grundberührendem bzw. nicht grundberührendem Seegang (vgl. Abschn. 2.3.1 u. Abb. 5.19).

Es ergeben sich am Standort (S) nur Werte bei brechendem bzw. grundberührendem Seegang. Meßwerte für nicht grundberührenden Seegang, d. h. Wellenhöhen  $< 5$  bzw.  $15$  cm, liegen nicht vor und sind auf Windstärken  $< 1$  bis  $2$  Bft bei anhaltenden Ruhigwetterphasen beschränkt.

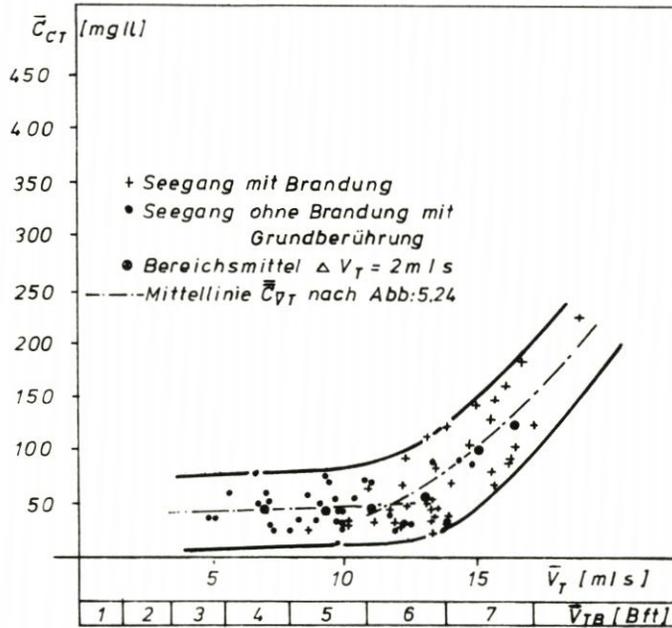
Am Standort (SB) liegen entsprechend der Definition „brandungsfreies Watt“ nur Meßwerte mit grundberührendem bzw. nicht grundberührendem Seegang vor. Das Einsetzen des grundberührenden Seegangs ist in Abhängigkeit von der Wassertiefe  $d$  bei Wellenhöhen  $\bar{H}$  zwischen  $15$  und  $35$  cm, d. h. etwa ab  $5$  Bft, gegeben. Die vorstehenden Klassifizierungen beziehen sich auf die um Hochwasser vorherrschende Seegangsart und gelten für die Gesamttiefe näherungsweise (vgl. Abschn. 5.2.2.3).

Die über die Windgeschwindigkeit bzw. Windstärke aufgetragenen Suspensionskonzentrationen (Abb. 5.16) zeigen, daß der Übergang vom linearen zum überproportionalen Anstieg bei einer Windgeschwindigkeit von etwa  $6$  Bft ( $11,5$  m/s) beginnt. Dies entspricht dem Ergebnis der über der Windstärke aufgetragenen Konzentrationsmittelwerte (Abb. 5.10).

Am Standort (S) ist die Windgeschwindigkeit von  $11,5$  m/s mit dem Einsetzen des überwiegend brechenden Seegangs gekoppelt, so daß der Einfluß des Brechens der Wellen als wesentlicher Parameter für die überproportionale Erhöhung der Konzentrationswerte bestätigt ist. Am Standort (SB) setzt bei etwa gleichen Windverhältnissen die Grundberührung des Seegangs ein und läßt zunächst eine Kopplung des Konzentrationsanstiegs mit diesem Ergebnis vermuten. Für gleiche Windgeschwindigkeiten weist aber die von GÖHREN (1968) angegebene Veränderung des Triftstroms mit der Windstärke (Abb. 5.08) ab  $6$  Bft eine ausgeprägte Zunahme des Triftstroms aus. Unter Berücksichtigung des an beiden Standorten nur wenig differierenden Sohlmaterials – (S):  $d_{50} = 0,15$  mm, (SB):  $d_{50} = 0,13$  mm (vgl. Abb. 4.01 u. 4.03) – müßte der überproportionale Anstieg am Standort (S) ebenfalls an das Ereignis des grundberührenden Seegangs gekoppelt sein. Wie weiter oben ausgeführt, ist dieses jedoch nicht der Fall, so daß am Standort (SB) der einsetzende Triftstrom und damit der Transport aus den vorgelagerten Watten als Steuerelement anzusehen ist. Das lokale Ereignis (SB) tritt damit bei Windstärken  $> 6$  Bft in der Bedeutung hinter dem Triftstrom zurück. Ursache des überproportionalen Anstiegs ist demnach auch am Standort (SB) das Brechen des Seegangs auf den in Luv vorgelagerten Brandungs- und Randwatten bei Windstärken  $> 6$  Bft.

Die Zusammenhänge zwischen dem Suspensionsgehalt und der Wellenhöhe bzw. dem Stromweg (Abb. 5.17 und 5.18) bestätigen die oben getroffene Feststellung. Am Standort (S) ergibt sich in Übereinstimmung mit den Suspensionsganglinien (Abb. 5.12) bei einer Wellenhöhe  $\bar{H}$  von ca.  $70$  cm und überwiegend brechendem Seegang ( $> 6$  Bft) der Übergang zum

Standort: Scharhörn (Windrichtung: 240° - 360°)



Standort: Scharhörnbalje (Windrichtung: 210° - 360°)

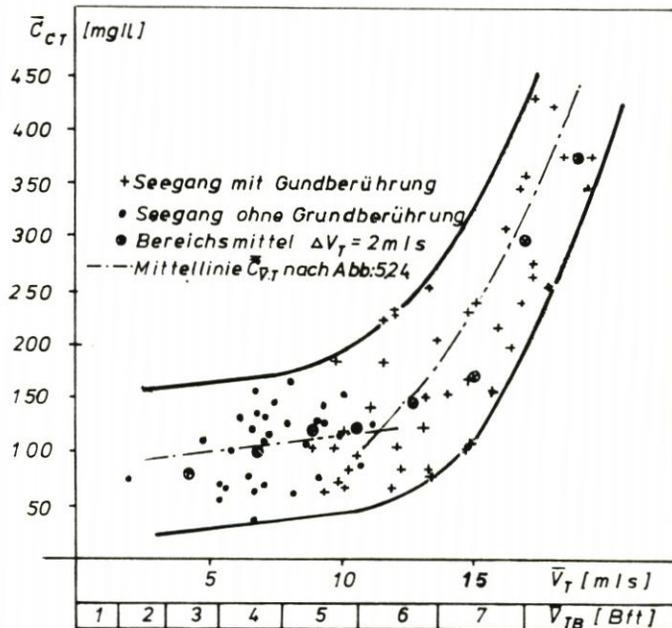
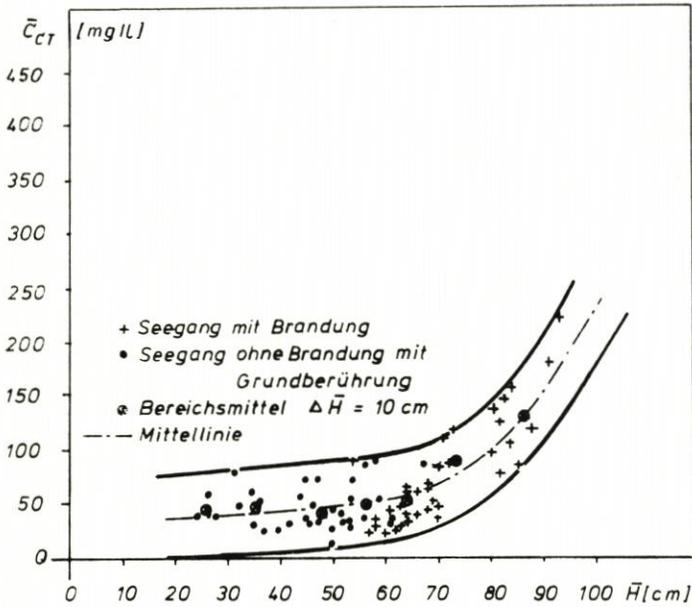


Abb. 5.16. Veränderung der Suspensionskonzentration mit der Windgeschwindigkeit - tidebezogene Mittelwerte

Standort: Scharhörn (Windrichtung: 240° - 360°)



Standort: Scharhörnbalje (Windrichtung: 210° - 360°)

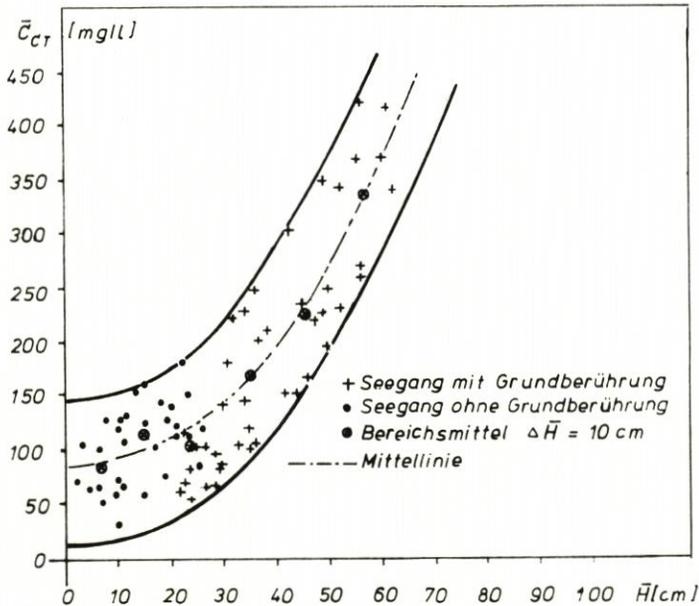
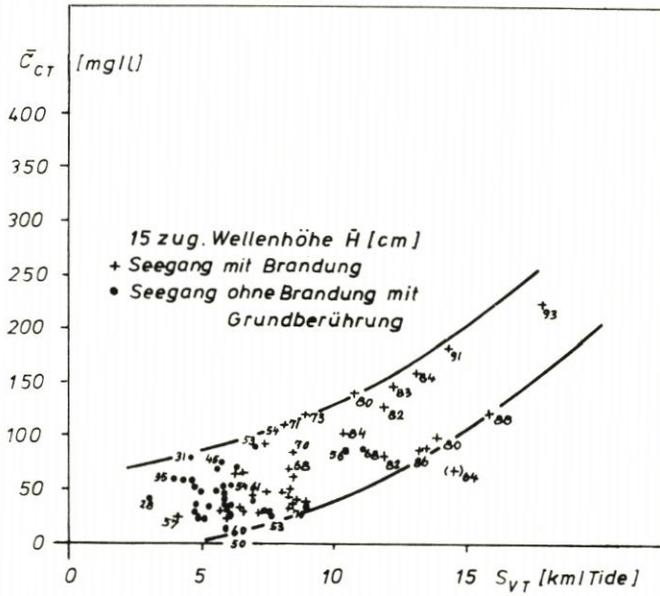


Abb. 5.17. Veränderung der Suspensionskonzentration mit der Wellenhöhe - tidebezogene Mittelwerte

Standort: Scharhörn (Windrichtung: 240 ° – 360 °)



Standort: Scharhörnbalje (Windrichtung: 210 ° – 360 °)

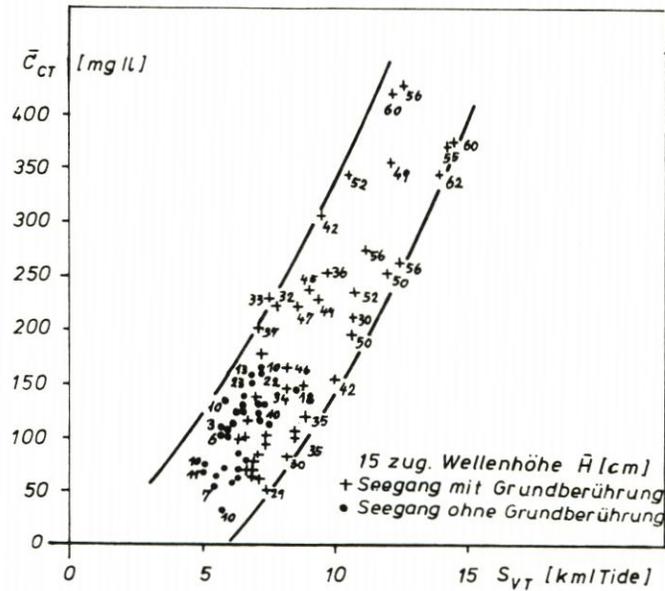
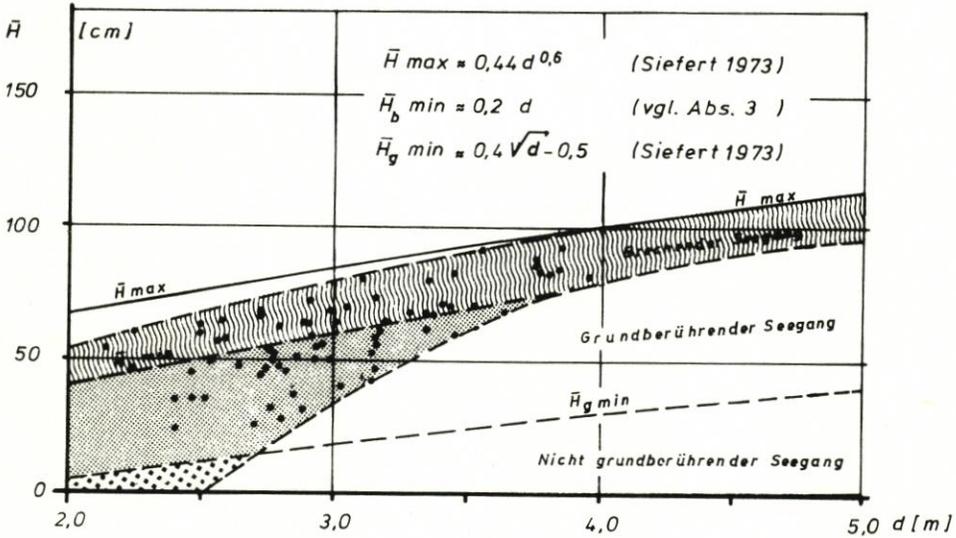


Abb. 5.18. Veränderung der Suspensionskonzentration mit dem Stromweg – tidebezogene Mittelwerte

Standort: Scharhörn (Windrichtung: 240° – 360°)



Standort: Scharhörnbalje (Windrichtung: 210° – 360°)

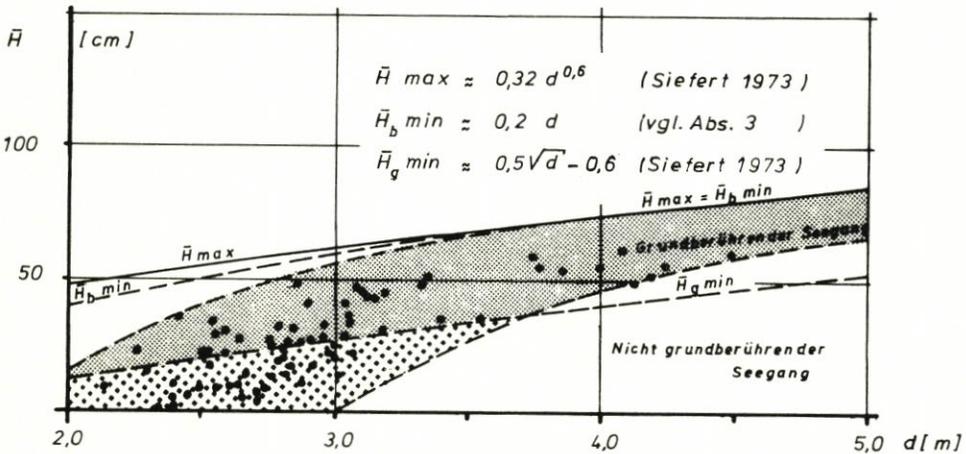


Abb. 5.19. Einflußbereiche des grundberührenden und brechenden Seegangs in Abhängigkeit von der Wassertiefe

überproportionalen Anstieg der Suspensionskonzentration. Am Standort (SB) ist eine derart deutliche Veränderung nicht erkennbar. Vielmehr steigt die Suspensionskonzentration von Anbeginn zunehmend mit der Wellenhöhe an.

Die Abhängigkeit der Konzentrationswerte vom Stromweg zeigt ein ähnliches Bild. Am Standort (SB) steigen die Konzentrationswerte erheblich steiler mit dem Stromweg an als am Standort (S), was für (SB) auf den besonderen Einfluß des Triftstroms hinweist. Die Abweichungen im Sohlmaterial sind nicht so erheblich, als daß sie eine derart unterschiedliche Abhängigkeit an beiden Standorten durch zunehmende Strömungsgeschwindigkeiten erklären können.

Zur Verdeutlichung der maßgebenden und an beiden Standorten unterschiedlichen Einflußgrößen auf die Suspension ist die Beziehung zwischen dem Stromweg und der Suspensionskonzentration (Abb. 5.18) um die zugehörigen mittleren Wellenhöhen um Hochwasser ergänzt. Hieraus ergibt sich für den Standort (S) ein geordneter Anstieg der Wellenhöhe mit dem Stromweg und damit eine klarere Abhängigkeit von der Wellenhöhe als am Standort (SB). Dort streuen die Werte der mittleren Wellenhöhen bei gleichem Stromweg stärker, was den vorherrschenden Einfluß des Triftstroms bestätigt.

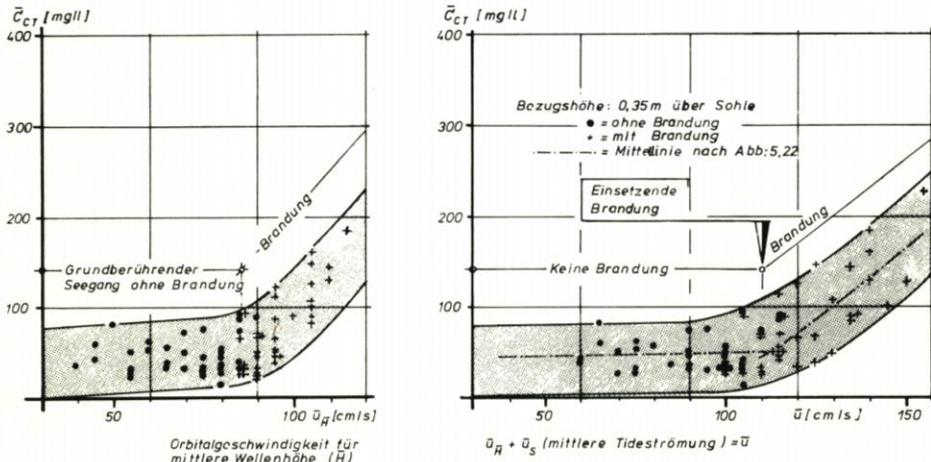
Der Streubereich der gemessenen Suspensionskonzentrationen ergibt sich für das Einsetzen des brechenden Seegangs auf den Rand- und Brandungswatten bei 6 Bft am Standort (S) zu 15 bis 85 mg/l (im Mittel etwa 50 mg/l) und am Standort (SB) zu 50 bis 210 mg/l (im Mittel etwa 130 mg/l).

GÖHREN (1971, s. Abb. 5.01) gibt vergleichsweise für beide Standorte – (S und SB) – mittlere Suspensionskonzentrationen von 120 bis 140 mg/l an. Die außerdem von GÖHREN (1965, s. Abb. 5.03) bei 6 Bft angegebene Meßreihe im Neuwerker Watt (ohne nähere Orts- und Parameterbezeichnung) zeigt demgegenüber mit einer mittleren Konzentration von etwa 320 mg/l höhere Werte. Die bei 7 Bft gemessenen Konzentrationen betragen am Standort (S) maximal etwa 200 mg/l und am Standort (SB) maximal etwa 350 mg/l (Abb. 5.16). Sie liegen damit für den Standort (SB) ebenfalls unter dem aus der von GÖHREN angegebenen Einzelmeßreihe (Abb. 5.03) gebildeten Mittelwert von ca. 420 mg/l. Die Maximalwerte der gemessenen Suspensionskonzentrationen ergeben sich bei Windstärken von 8 Bft am Standort (S) zu etwa 220 mg/l und am Standort (SB) zu etwa 420 mg/l.

### 5.2.2.3 Einfluß der wellenerzeugten Strömungen und der Brandungen

Weiteren Aufschluß über den Einfluß der Wellen auf die Konzentrationshöhe liefert die Untersuchung der maßgebenden Strömungsgeschwindigkeiten 0,35 m über der Sohle unter Berücksichtigung der wellenerzeugten Orbitalgeschwindigkeiten. Die Abschätzung der für mittlere Wellenhöhen um Hochwasser anzusetzenden Orbitalgeschwindigkeit erfolgt entsprechend Abschn. 2.3.1 nach LAITONE und MCCOWAN (Abb. 2.15). Die über der Orbitalgeschwindigkeit aufgetragenen Suspensionskonzentrationen sind außerdem entsprechend der dem Einzelwert zuzuordnenden Seegangsart gekennzeichnet (Abb. 5.20). Für den Standort (SB) ergeben sich Orbitalgeschwindigkeiten nahe der Sohle auch für den von SIEFERT als nicht grundberührend klassifizierten Seegang. Auf diese Abweichungen, die auf unterschiedliche Ansätze zurückzuführen sind, ist bereits hingewiesen worden. Während LAITONE und MCCOWAN die höchstmögliche Orbitalgeschwindigkeit für eine Einzelwelle angeben, geht SIEFERT von mittleren Wellen im natürlichen Spektrum aus. Die ermittelten Orbitalgeschwindigkeiten sind demnach Maximalwerte für mittlere Wellenhöhen. Die Angabe von Orbitalge-

Standort: Scharhörn (Windrichtung: 240° – 360°)



Standort: Scharhörnbalje (Windrichtung: 210° – 360°)

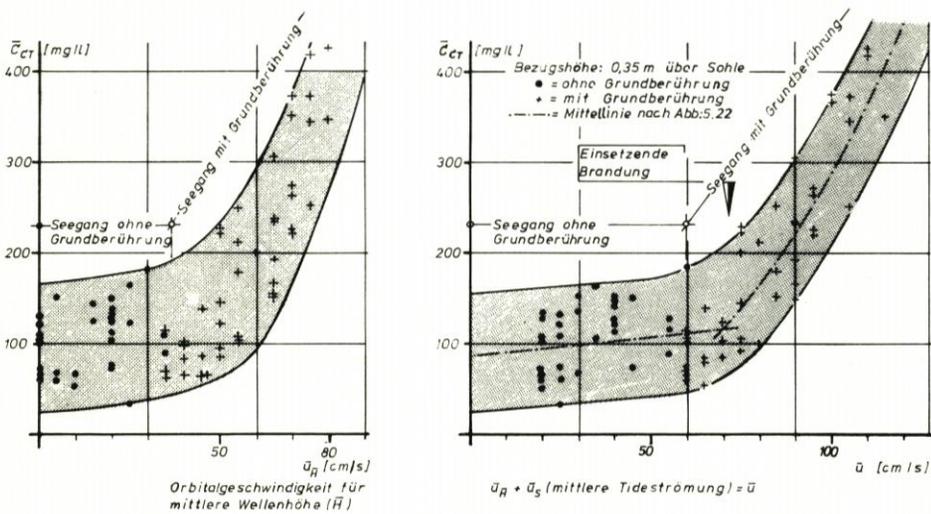


Abb. 5.20. Veränderung der Suspensionkonzentration mit  $\bar{u}_H$  (Orbitalströmung) und mit  $\bar{u}_H + \bar{u}_S = \bar{u}$  (überlagerte Orbital- und Tideströmung)

schwindigkeiten in einem Übergangsbereich auch unterhalb des von SIEFERT angegebenen Grenzwertes ist damit plausibel.

Die wellenerzeugten Orbitalströmungen sind mit der zum Welleneignis gehörenden Tideströmung zu überlagern. Nach der geltenden Wellentheorie oszillieren die Orbitalströmungen und führen in Abhängigkeit von Strömungs- und Wellenfortschrittsrichtung im Wellental bzw. auf dem Wellenberg zu einer beschleunigten oder verzögerten Tideströmung. Für die hier anzustellenden Betrachtungen wird von der für die Aufwirbelung ungünstigen Addition der beiden Strömungsanteile ausgegangen. Die zu überlagernde Tideströmung wird dabei als Mittelwert aus dem ermittelten Stromweg gebildet, der auf die tatsächliche Tidedauer bezogen ist.

Dieses Vorgehen stimmt mit den Feststellungen von WÜNSCHE (1976) überein, der in Wellenfortschrittsrichtung unter dem Wellenberg die maßgebenden Geschwindigkeiten für die Aufwirbelung des Materials ermittelt hat, da mit zunehmender Windstärke in diesem Windsektor Wellenfortschrittsrichtung und Strömungsrichtung übereinstimmen.

Für die weiteren Untersuchungen sind die für die Orbitalgeschwindigkeit zugrundegelegten Wellenhöhen um Hochwasser bezüglich ihrer Gültigkeit für das gesamte Tideereignis zu überprüfen. Um Hochwasser ergeben sich die höchsten mittleren Wellenhöhen, aber nicht zwingend gleichzeitig die größten Orbitalgeschwindigkeiten. Bei abnehmenden Wasserständen vergrößert sich das Verhältnis  $\bar{H}/d$  und  $y/d$  (Abb. 2.12), während die Wellenfortschritts-  
geschwindigkeit  $c$  abnimmt. Die Wellensteilheit  $\bar{H}/(g \cdot T^2)$  wächst dabei solange, bis die Welle nach Erreichen des oberen Grenzwertes der Wellensteilheit (Abb. 2.13) und nach Maßgabe der Seegangscharakteristik unter weiterem Anstieg des Verhältnisses  $\bar{H}/d$  bricht. Entsprechend Abschn. 2.3.1 gelten für das Einsetzen der Brandung der Grenzwert

$$\bar{H}_b \text{ min} \approx 0,2 d \quad (\text{Gl. 5.04})$$

und für die maximale Wellenhöhe

$$(S) : \bar{H}_{\text{max}} = 0,44 d^{0,6} \quad (\text{Gl. 5.05})$$

$$(SB) : \bar{H}_{\text{max}} = 0,32 d^{0,6} \quad (\text{Gl. 5.06})$$

Entsprechend Abb. 2.12 baut sich die maximale Wellenhöhe kurz nach Thw auf. Bei dann absinkenden Wasserständen wird den aufgebauten Wellen die erforderliche Wassertiefe  $d_{\text{min}}$  entzogen, so daß bei ablaufendem Wasser schnell die maximalen Wellenhöhen  $\bar{H}_{\text{max}}$  erreicht werden. Dieses wirkt sich auf die Orbitalgeschwindigkeiten aus, wie nachstehend am Beispiel eines Meßwertes für die Zeit von Hochwasser bis Niedrigwasser deutlich wird.

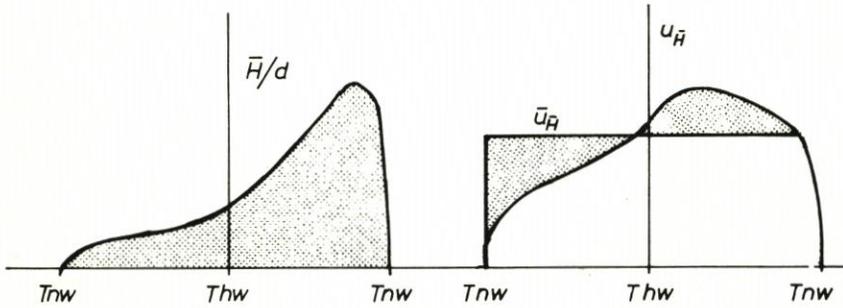
Tabelle 5.01

d [cm]	$\bar{H}$ [cm]	$\bar{H}_{b \text{ min}}$ [cm]	$\bar{H}_{\text{max}}$ [cm]	$\bar{H}/d$ [-]	$y/d$ [-]	$\bar{c}$ [cm/s]	$u_{\text{H}}/c$ [-]	$u_{\text{H}}$ [cm/s]
350	60	70	93	0,17	0,10	622	0,13	81
250	70	50	76	0,28	0,14	544	0,19	103
150	56	30	56	0,37	0,23	433	0,24	104
100	44	20	44	0,44	0,35	361	0,27	97
50	29	10	29	0,58	0,70	265	0,34	90

Für den Zeitraum von Niedrig- bis Hochwasser sind die Verhältnisse umgekehrt. Der Wasserstand steigt schneller, als sich die zugehörigen maximalen Wellenhöhen aufbauen können (Abb. 2.12). Da keine Meßergebnisse für die Veränderung der Wellenkennwerte über die Tide vorliegen, kann das oben gegebene Beispiel nicht für den Zeitraum vor Hochwasser ergänzt werden. Es kann aber nach Abb. 2.12 davon ausgegangen werden, daß die Orbitalgeschwindigkeiten hinter den Maximalwerten bei ablaufendem Wasser zurückbleiben, wie schematisch auf Abb. 5.21 dargestellt.

Die Ganglinie der Orbitalgeschwindigkeiten über eine Tide zeigt, daß die mit der Wellenhöhe um Hochwasser ermittelte Orbitalgeschwindigkeit  $u_{\text{H}}$  einen brauchbaren Tide-mittelwert  $\bar{u}_{\text{H}}$  ergibt, der mit dem ebenfalls über die Tide gebildeten Suspensionswert gekoppelt werden kann.

Unter Berücksichtigung der vorstehenden Ausführungen werden die aufgetragenen Ergebnisse (Abb. 5.20) interpretiert.

Abb. 5.21. Veränderung von  $\bar{H}/d$  und  $u_{\bar{H}}$  über eine Tide (schematisch)

Am Standort (S) ergibt sich ein etwa linearer Anstieg der Suspensionskonzentration bis zum Einsetzen des weitgehend brechenden Seegangs bei 6 Bft. Die diesem Ereignis zugehörigen Strömungsgeschwindigkeiten sind bei isolierter Betrachtung der Orbitalgeschwindigkeit mit rund 80 cm/s, bei der Überlagerung von Orbital- und Tideströmung mit rund 110 cm/s angegeben. Sie liegen damit weit oberhalb der von HYULSTRÖM/ZANKE für das Sohlmaterial ( $d_{50} = 0,15$  mm) in Abschn. 5.2.2.1 genannten Grenzwerte der Aufwirbelung (ca. 60 cm/s). Der Kurvenverlauf am Standort (SB) ist ähnlich dem von (S), allerdings sind die zugehörigen Strömungsgeschwindigkeiten entsprechend der Seegangscharakteristik kleiner. Der lineare Anstiegsbereich ist begrenzt auf maximale Geschwindigkeitswerte  $\leq 40$  cm/s für reine Orbitalströmung bzw. auf  $\leq 70$  cm/s für die überlagerten Strömungen. Die überlagerten Strömungsgeschwindigkeiten liegen damit für das Sohlmaterial ( $d_{50} = 0,13$  mm) ebenfalls über den Grenzwerten der Aufwirbelung (ca. 50 cm/s). Nach den Messungen ist der überproportionale Anstieg der Suspensionskonzentrationen für beide Standorte an etwa 40 cm/s voneinander abweichende Strömungsgeschwindigkeiten gekoppelt, obwohl demgegenüber die Grenzwerte der Aufwirbelung aufgrund des an beiden Standorten nur wenig differierenden Sohlmaterials nur etwa um 10 cm/s voneinander abweichen. Wie unter Bezug auf Abb. 5.20 in Abschn. 5.2.2.1 bereits ausgeführt, kann demnach der überproportionale Anstieg nicht mit Hilfe des Überschreitens eines Geschwindigkeitsgrenzwerts allein näher beschrieben werden. Vielmehr zeigen auch die über den überlagerten Strömungsgeschwindigkeiten aufgetragenen Konzentrationen die Bedeutung der einsetzenden Brandung auf den Rand- und Brandungswatten. Auch WÜNSCHE (1976) hat hierauf anhand der von ihm in brechenden Wellen gemessenen Lufteinschlagsmengen von bis zu 47 % hingewiesen.

Am Standort (SB) kann das vorhergehend festgestellte gleichzeitige Einsetzen der Grundberührung des Seegangs an der Meßstelle und das Brechen des Seegangs auf den Brandungs- und Randwatten dahingehend differenziert werden, daß der Beginn des grundberührenden Seegangs noch in den linearen Anstiegsbereich der Suspensionskonzentrationen fällt und erst mit dem Einsetzen der Brandung auf den vorgelagerten Watten der überproportionale Anstieg beginnt (Abb. 5.20). Der untergeordnete Einfluß der Grundberührung des Seegangs auf die Suspensionskonzentrationen wird hierdurch bestätigt.

Da am Standort (SB) ein brechender Seegang nicht möglich ist, aber gleichwohl mit dem Einsetzen der Brandung auf den Randwatten und Brandungswatten der überproportionale Anstieg beginnt, bestätigt sich hier die bereits festgestellte Bedeutung des Triftstromes. Er transportiert das aufgewirbelte Material zur Meßstelle und führt darüber hinaus in Verbindung mit dem nicht brechenden Seegangsanteil zu einer etwa linear mit der überlagerten Strömungsgeschwindigkeit  $\bar{u}$  ansteigenden Suspensionsgrundlast. Diese Grundlast steigt in

Abhängigkeit von der Größe und der Charakteristik der in Luv vorgelagerten Wattflächen, wobei das einmal aufgewirbelte Material wegen der hohen Turbulenzen nur in geringem Umfang wieder sedimentiert (vgl. WÜNSCHE, 1976) und damit zu einer fortschreitenden Konzentrationsanreicherung führt. Dieser Suspensionsanteil wird dann bei entsprechenden Windvoraussetzungen durch die erhöhte und überproportional mit der Wellenhöhe ansteigende Brandungssuspension überlagert.

Zur weiteren Untersuchung der Zusammenhänge von Konzentrationsanstieg und überlagerter Orbital- und Tideströmung sind die Suspensionswerte über der Strömungsgeschwindigkeit  $\bar{u}$  zu Mittelwerten zusammengefaßt aufgetragen (Abb. 5.22). Der lineare und der überproportionale Anstiegsbereich der Kurven werden anhand der festgestellten Veränderung mit dem Einsetzen überwiegender Brandung auf den Rand- und Brandungswatten abgegrenzt. Am Standort (S) ist der Beginn des Wellenbrechens durch das Wellenerignis

$$\bar{H}_b \min \approx 0,2 d \quad (\text{Gl. 5.04})$$

beschrieben. Für den Standort (SB) liegen Parallelmessungen der Wellenhöhen auf den vorgelagerten Rand- und Brandungswatten nicht vor. Vereinfachend wird die Unterscheidung der Anstiegsbereiche anhand der für das Einsetzen der Brandung maßgebenden Windgeschwindigkeit (Abb. 5.16) von 11,5 m/s gewählt.

Die aus den Meßergebnissen gebildeten Mittelwerte (Abb. 5.22) bestätigen für beide

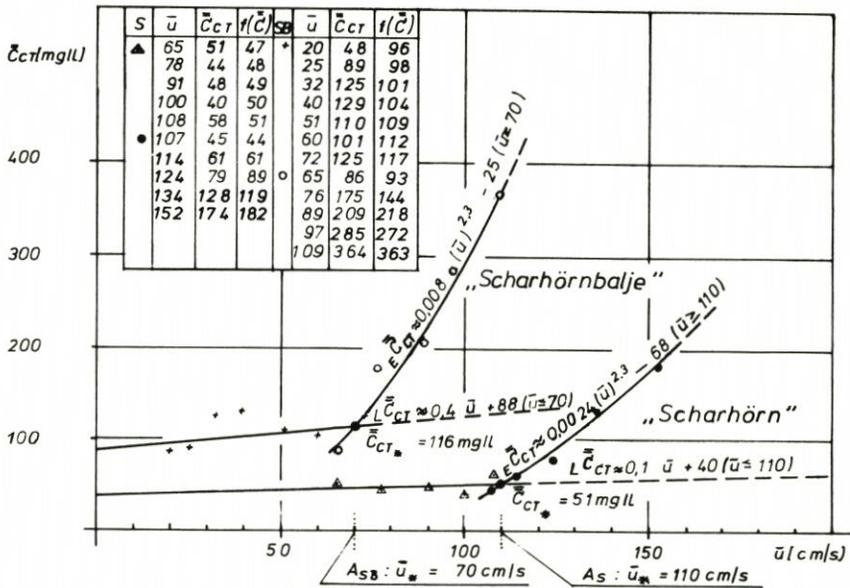


Abb. 5.22. Mittelwerte der Suspensionskonzentration/überlagerte Strömungsgeschwindigkeit ( $\bar{u}_H + \bar{u}_S = \bar{u}$ )

Standorte (S und SB) grundsätzlich den Kurvenverlauf mit anfänglich linearem und anschließend überproportionalem Anstieg mit dem Einsetzen der Brandung.

Der Vergleich der Kurven für beide Standorte zeigt auch, daß im linearen Bereich der Anstieg der Suspensionskonzentrationen mit der Strömungsgeschwindigkeit am Standort (SB) stärker, im überproportionalen Bereich sogar deutlich stärker als am Standort (S) ist. Die unterschiedlichen Anstiegsbereiche an beiden Standorten können näherungsweise mit nachstehenden, nicht dimensionsechten Funktionen beschrieben werden:

(S):  $L\bar{C}_{CT} = 0,1 \bar{u} + 40$  [mg/l];  $\bar{u} \leq 110$  [cm/s] (Gl. 5.07)

$E\bar{C}_{CT} = 0,0024 \bar{u}^{2,3} - 68$  [ " ];  $\geq 110$  [ " ] (Gl. 5.08)

(SB):  $L\bar{C}_{CT} = 0,4 \bar{u} + 88$  [mg/l];  $\bar{u} \leq 70$  [cm/s] (Gl. 5.09)

$E\bar{C}_{CT} = 0,008 \bar{u}^{2,3} - 25$  [ " ];  $\geq 70$  [ " ] (Gl. 5.10)

Eine Weiterentwicklung zu dimensionsechten Beziehungen ist wegen der in Abschn. 2 erläuterten Einschränkung nicht sinnvoll. Hiernach ist zu bedenken, daß weniger die Überwindung der kritischen Schubspannung, die z. B. mit dem Ansatz von HYULSTRÖM oder SHIELDS (vgl. z. B. VANONI, 1977) beschrieben werden kann, als vielmehr die hohen Turbulenzen in den brechenden Wellen mit dem schwer zu erfassenden Lufteinschlag wesentlichen Einfluß auf die Suspensionskonzentration haben.

Zur weiteren Diskussion werden die Quotienten gebildet aus den Mittelwerten  $\bar{C}_{CT}$  und  $\bar{C}_{CT_0}$  (Abb. 5.23). Hierbei gibt  $\bar{C}_{CT_0}$  den Konzentrationsmittelwert am Standort bei einsetzender Brandung auf den Rand- und Brandungswatten bzw. die Schnittpunkte der Kurven für  $L\bar{C}_{CT}$  und  $E\bar{C}_{CT}$  (vgl. Abb. 5.22) an. Diese Werte sind in Abb. 5.23 über  $\Delta\bar{u} = \bar{u} - \bar{u}_0$

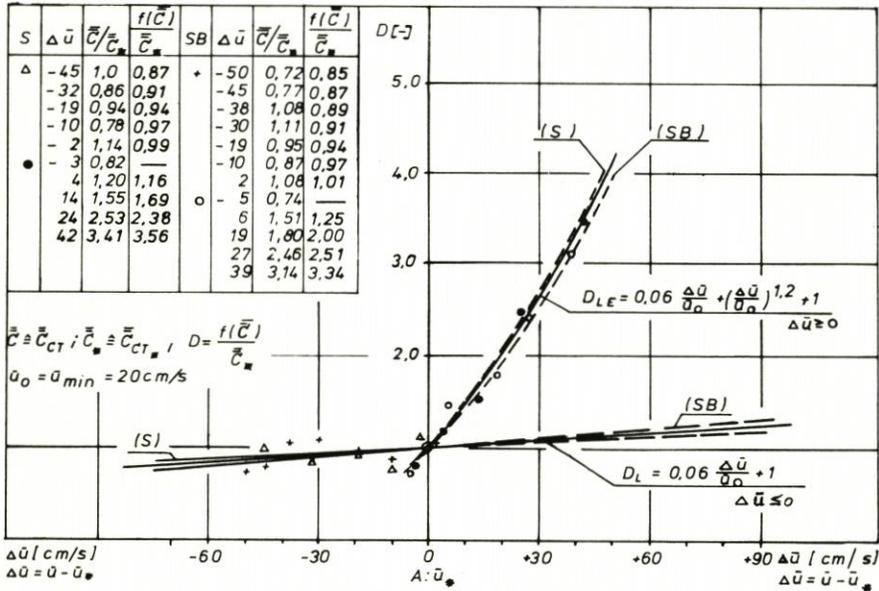


Abb. 5.23. Veränderung der Suspensionskonzentration mit der überlagerten Strömungsgeschwindigkeit  $\bar{u}$ , bezogen auf den Konzentrations- und Geschwindigkeitswert ( $\bar{C}_{CT_0}$  u.  $\bar{u}_0$ ) bei einsetzender Brandung auf den Rand- und Brandungswatten

aufgetragen, wobei  $\bar{u}_0$  dem Wert  $\bar{C}_{CT_0}$  zugeordnet ist. Die Kurven beschreiben den relativen Konzentrationsanstieg an den Standorten (S und SB), bezogen auf den Konzentrationswert bei einsetzender Brandung auf den Rand- und Brandungswatten in Abhängigkeit von der Differenz  $\Delta\bar{u}$  der Strömungsgeschwindigkeiten (Differenz zwischen der Geschwindigkeit für das Einzelereignis und der Geschwindigkeit für das Ereignis des Einsetzens der Brandung auf den Rand- und Brandungswatten). Für beide Standorte zeigen sich praktisch einander deckende Kurven, die genähert in den beiden Anstiegsbereichen durch folgende Funktionen beschrieben werden:

linearer Anstiegsbereich (keine Brandung,  $\Delta \bar{u} \leq 0$ )

$$D_L = 0,06 \frac{\Delta \bar{u}}{\bar{u}_0} + 1 \quad (\text{Gl. 5.11})$$

überproportionaler Anstiegsbereich (mit Brandung,  $\Delta \bar{u} \geq 0$ )

$$D_{LE} = 0,06 \frac{\Delta \bar{u}}{\bar{u}_0} + 1 + \left( \frac{\Delta \bar{u}}{\bar{u}_0} \right)^{1,2} \quad (\text{Gl. 5.12})$$

(Strömungs-Brandungsanteil)

$\Delta \bar{u} = \bar{u} - \bar{u}_*$ ,  $\bar{u}_*$ : Bezugsströmungsgeschwindigkeit am Standort bei einsetzender Brandung auf den Rand- und Brandungswatten.

$$\bar{u}_0 = \bar{u}_{\min} = 20 \text{ cm/s}$$

Die Absolutwerte der Suspensionskonzentration ergeben sich durch Multiplikation des Konzentrationswertes  $\bar{C}_{CT_0}$  mit dem Anstieg  $D$ .

Die mit den o. a. Gleichungen angegebenen Beziehungen lassen erkennen, daß unabhängig von der Seegangcharakteristik beider Standorte der relative Suspensionsanstieg gleich groß ist, wenn die Strömungsverhältnisse auch die Zufuhr suspendierten Materials aus in Strömungsrichtung vorgelagerten und mit Brandung beaufschlagten Watten ausweisen. Eine Übertragbarkeit dieser Beziehung auf andere Wattgebiete wird nur nach Überprüfung durch weitere Vergleichsmessungen an anderen Standorten möglich sein. Allgemeinere Aussagen können hier nur insoweit getroffen werden, als das Verhältnis der Suspensionskonzentrationen an beiden Standorten (z. B. 116 mg/l zu 51 mg/l  $\approx 2,3$ ) etwa den aus den Strömungsverhältnissen herzuleitenden Einzugsgebieten entspricht und damit die Konzentrationshöhe etwa der Größe des Einzugsgebietes proportional ist. Dieses ist in Übereinstimmung mit Meßergebnissen aus Prielen, die im Vergleich zur Umgebung höhere Konzentrationswerte ausweisen (CHRISTIANSEN, 1974).

Der in Abb. 5.23 dargestellte Zusammenhang setzt voraus, daß neben der Suspensionskonzentration auch die mit dem Windeinfluß veränderte mittlere Tideströmung sowie die aus der mittleren Wellenhöhe um Hochwasser zu berechnende Orbitalgeschwindigkeit bekannt sind. Entsprechende Messungen sind mit erheblichem Aufwand verbunden und erschweren damit die Handhabung. Da für die hier durchgeführten Messungen auch die zugehörigen Mittelwerte der Windgeschwindigkeiten vorliegen, kann dieser Zusammenhang unter geringfügiger Vergrößerung in Abhängigkeit von der Windstärke dargestellt werden (Abb. 5.24). Diese Beziehung zeigt dann am anschaulichsten, welche Windverhältnisse zu welcher Größenordnung der Suspensionskonzentration führen. Ab Windstärken um 6 Bft und dem dann deutlich in der Natur auf den Rand- und Brandungswatten zu erkennenden Brechen des Seegangs steigt die Suspensionskonzentration mit jeder weiteren Windstärke um etwa das Zweifache des Ausgangswertes an.

Die Anstiegsbereiche können dabei mit nachstehenden vereinfachten Funktionen angegeben werden:

Linearer Anstieg ( $\bar{V}_T \leq 11,5 \text{ m/s}$ )

$$F = F_L = 0,23 \frac{\bar{V}_T}{\bar{V}_*} + 0,77 [-] \quad (\text{Gl. 5.13})$$

Überproportionaler Anstieg ( $\bar{V}_T \geq 11,5 \text{ m/s}$ )

$$F = F_L + F_E = 0,23 \frac{\bar{V}_T}{\bar{V}_*} + 0,77 \left( \frac{\bar{V}_T}{\bar{V}_*} \right)^3 \quad [\text{-}] \quad (\text{Gl. 5.14})$$

$\bar{V}_* = 11,5 \text{ m/s}$ : Windgeschwindigkeit bei einsetzendem Brechen des Seegangs auf den Rand- und Brandungswatten

Die Suspensionskonzentration  $\bar{C}_{\bar{V}_T}$  am Standort ergibt sich dann in Abhängigkeit von dem Konzentrationswert  $\bar{C}_{CT_*}$  bei einsetzender Brandung auf den Rand- und Brandungswatten ( $\bar{V}_* = 11,5 \text{ m/s}$ ) mittels der o. a. Gleichungen zu

$$\bar{C}_{\bar{V}_T} = F \times \bar{C}_{CT_*} \quad (\text{Gl. 5.15})$$

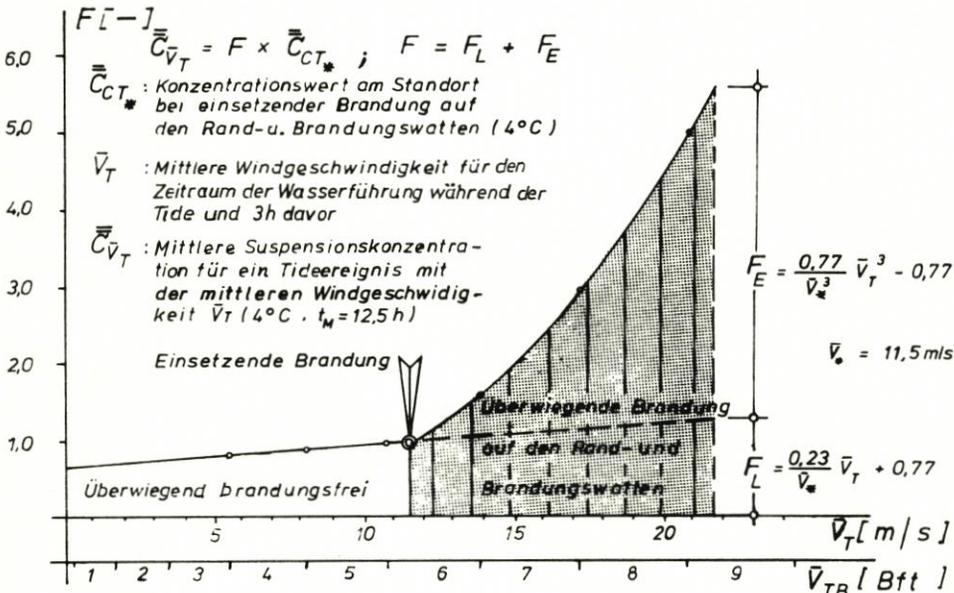
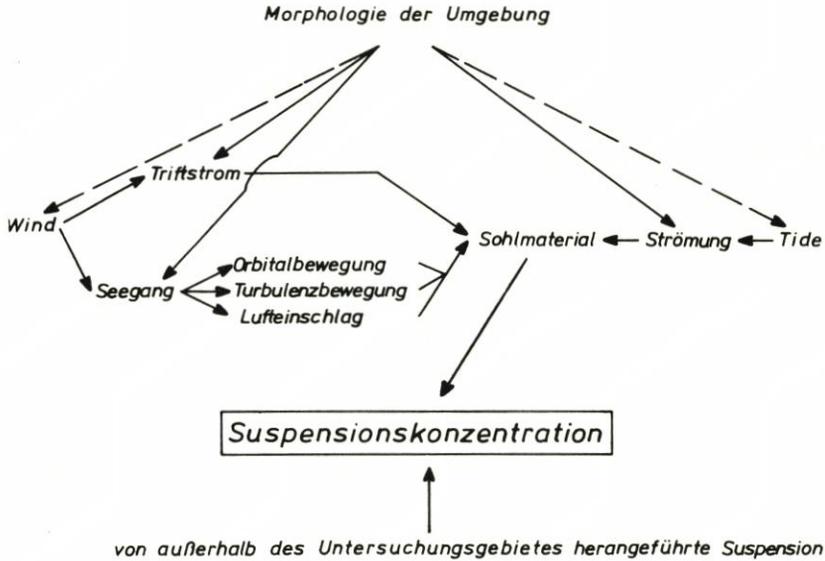


Abb. 5.24. Veränderung der Suspensionskonzentration mit der Windstärke, bezogen auf den Konzentrationswert beim Einsetzen der Brandung (Rand- u. Brandungswatt)

Die Verwendung eines so vereinfachten Ansatzes ist gerechtfertigt, da die physikalisch exakte Beschreibung der vielfältigen Zusammenhänge, insbesondere zwischen dem angreifenden Wind, den dadurch ausgelösten Orbital- und Triftstrombewegungen, der Tideströmung, den morphologischen Randbedingungen und dem Sohlmaterial, bisher nicht gelungen ist.

Die in den Abb. 5.16 bis 5.18 und 5.20 aufgetragenen Abhängigkeiten der Suspensionskonzentration von verschiedenen Parametern zeigen in jedem Fall eine erhebliche Streuung der Konzentrationen um die Mittellinie. Die Genauigkeit der näher untersuchten Beziehung zwischen den Orbital- und Triftströmungen (Abb. 5.20) und den Konzentrationswerten entspricht dabei der einfacheren Betrachtungsweise über die Windgeschwindigkeiten (Abb. 5.16). In ihr sind dann die Vielzahl der Einflußgrößen impliziert und durch die über die Tide integrierten Konzentrationen für steigende Windstärken auch die Parallelität von Wind- und Strömungsrichtung erfaßt.



### 5.2.3 Extremwertbetrachtungen zur Suspensionskonzentration

Suspensionsmeßergebnisse liegen für Windstärkenmittelwerte über eine Tide (ca. 15-Stundenmittel) von maximal 8 Bft vor mit zugehörigen Wellen- und Strömungskennwerten. Die integrierten Werte der Suspensionskonzentrationen sind in Abhängigkeit von den nachstehenden Parametern aufgetragen und werden im Hinblick auf ihre Extremwerte extrapoliert.

- |   |           |
|---|-----------|
| 1. Abweichung von der mittleren Tide        | Abb. 5.06 |
| 2. Windstärke (Mittelwerte aller Messungen) | Abb. 5.10 |
| 3. Wellenhöhe und Tidephase                 | Abb. 5.15 |
| 4. Windgeschwindigkeit                      | Abb. 5.16 |
| 5. Wellenhöhe                               | Abb. 5.17 |
| 6. Stromweg                                 | Abb. 5.18 |
| 7. Orbital- und Strömungsgeschwindigkeit    | Abb. 5.20 |

Die für die Extremwertextrapolation geltenden Grenzwerte der Parameter werden anhand von vorliegenden maximalen Meßwerten wie folgt bestimmt:

Zu 1: Sturmflut vom 3. 1. 1976; Abweichung von der mittleren Tide rd. 1,8

Zu 2 u. 4: Maximalwert der über eine Tide gemessenen Windgeschwindigkeit rd. 28 m/s, d. h. ca. 10 Bft (vgl. Abb. 4.02)

Zu 3 u. 5: Maximalwert der Wellenhöhen bei (S)  $\bar{H}_{\max} = 130$  cm, bei (SB)  $\bar{H}_{\max} = 95$  cm (vgl. Abb. 4.02)

Zu 6: Oberer Grenzwert des Stromweges ortsabhängig und nur näherungsweise aus den von GÖHREN (1968) angegebenen Meßwerten herzuleiten mit rd. 30 bis 35 km/Tide. Angabe gilt für das Neuwerker Watt (SB). Für Scharhörn liegen keine näheren Angaben vor. Aufgrund besonderer Strömungsbedingungen (richtungskonstante Strömung ab 7 Bft) kann vor Scharhörn von mindestens gleichgroßem Stromweg wie auf dem hohen Watt ausgegangen werden.

Zu 7: Maximalwerte der maßgebenden Orbitalgeschwindigkeit um Hochwasser ergeben sich aus den maximalen Wellenhöhen sowie dem zugehörigen größten Verhältnis  $\bar{H}/d$

von 0,22 für (S) und 0,16 für (SB) (Abb. 2.13). Nach Abb. 2.15 ist die maximale mittlere Orbitalgeschwindigkeit rd. 140 cm/s für (S) und rd. 110 cm/s für (SB) bei  $y/d < 0,1$ . Die Maximalwerte der mittleren richtungskonstanten Tideströmungsgeschwindigkeit ergeben sich aus maximalem Stromweg (vgl. vorstehend zu 6) zu rd. 80 cm/s für (S) und zu rd. 70 cm/s für (SB). Durch Überlagerung beider Geschwindigkeitsmaxima wird für (S)  $\max. \bar{u} = 220$  cm/s, für (SB)  $\max. \bar{u} = 180$  cm/s.

Die Ergebnisse der mit diesen Grenzwerten der Parameter durchgeführten Extrapolation sind in nachstehender Tabelle 5.02 zusammengestellt, wobei der aus den Meßergebnissen abzuleitende Anstiegstrend bis zum jeweiligen Grenzwert fortgesetzt worden ist.

Tab. 5.02

lfd. Nr.	Parameter	max. Suspensionskonz. max. $\bar{C}_{CT}$ [mg/l]	
		(S)	(SB)
1	Abweichg. v. d. mittl. Tide	500	1200
2	Windstärke (alle Sektoren)	(500)	(1000)
3	Wellenhöhe/Tidephasen	500	1150
4	Windgeschwindigkeit	550	1150
5	Wellenhöhen	550	1150
6	Stromweg	500	1250
7	Orbital- und Strömungsgeschwindigkeit	500	1200
8	Im Mittel max. $\bar{C}_{CT}$	rd. 500	rd. 1200
9	Verhältnis der max. Suspensionskonzentration der Standorte (S)/(SB):	1	2.4

Die angegebenen Extremwerte sind maximale Mittelwerte der Suspensionskonzentration über eine Tide ( $t_M = 12.5$  h) bei einer Bezugstemperatur des Wassers von 4 °C. Bei weiter absinkenden Temperaturen erhöhen sich diese Werte nach der von DILLO (1960) angegebenen Beziehung (Gl. 2.15, Abb. 2.17), wobei zu berücksichtigen ist, daß diese bei Temperaturen  $< 4$  °C stark exponentiell ansteigt. Sie ist im Salzwasser mit abgesenktem Gefrierpunkt bisher nicht überprüft worden. Da Messungen bei Temperaturen  $< 4$  °C nicht vorliegen, wird hier auf eine weitere Extrapolation anhand der o. a. Beziehung von DILLO verzichtet. Es sei angemerkt, daß sich nach DILLO die Konzentrationswerte bis zum Gefrierpunkt gut verdoppeln.

Das Verhältnis der Suspensions-Extremwerte beider Standorte ergibt sich zu 1:2,4 und entspricht damit in der Größenordnung dem unter Abschn. 5.2.2.3 angegebenen Verhältnis der Konzentrationswerte bei einsetzender Brandung auf den Rand- und Brandungswatten. Die Überlegungen bezüglich der Bedeutung der Größe der Einzugsgebiete werden insofern auch auf die Extremwerte zu übertragen sein, zumal die Einzugsverhältnisse auch bei extremem Windeinfluß keine wesentliche Veränderung mehr erfahren können. Die mit Brandung beaufschlagten Wattflächen sind durch tiefes Wasser ( $> 10$  m) zur offenen See bzw. zur Till hin abgegrenzt und können damit auch bei extremen Strömungsverhältnissen keine zusätzliche Suspensionszufuhr aus anderen Brandungsgebieten bringen. Die angegebene Beziehung des gleichen relativen Anstieges der Suspensionskonzentration mit der Windstärke (Abb. 5.24) kann unter dieser Voraussetzung für beide Standorte entsprechend bis zum Extremwert extrapoliert werden.

Die Häufigkeitsverteilung der tatsächlich gemessenen Konzentrationseinzelwerte (ohne Temperaturbereinigung, Abb. 5.25) zeigt, daß die Extremwerte bereits bei Windstärken von 7 bis 8 Bft als Einzelwerte erreicht werden. Die als Mittelwerte über die Tide angegebenen Extremwerte erscheinen demnach bei weiterem Anstieg der Windstärken auf maximale Tidemittelwerte von etwa 10 Bft erreichbar.

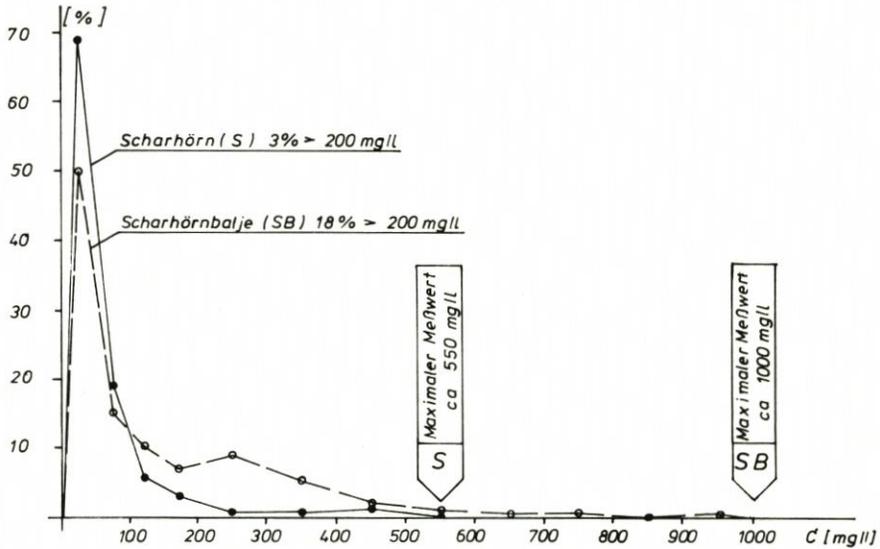


Abb. 5.25. Häufigkeitsverteilung der gemessenen Suspensionskonzentrationen für die Windsektoren  $240^{\circ}$ – $360^{\circ}$  (Scharhörn) und  $210^{\circ}$ – $360^{\circ}$  (Scharhörnbalje); Anzahl der Meßwerte: Scharhörn 650, Scharhörnbalje 680

Die Maximalwerte der von GÖHREN (1965, 1971, 1972; Abb. 5.02, 5.03 und 5.05) für das Neuwerker Watt angegebenen Konzentrationen liegen mit über  $800 \text{ mg/l}$  in der Größenordnung derjenigen des Standortes (SB) (vgl. Tab. 5.02). Mit Suspensionskonzentrationen von  $1000 \text{ mg/l}$  als maximalem Meßwert, ermittelt aus einem Probenvolumen von  $210 \text{ l}$  bei 2 bis 3 Minuten Pumpzeit, kommt WÜNSCHE (1976) zu ähnlichen Werten. Seine Angaben gehen auf Messungen mit vergleichsweise größerem Sohlmaterial ( $d_{50} = 0,2 \text{ mm}$ ) auf einem Riff vor Sylt (Brandungswatt) zurück. Die Meßergebnisse vor Scharhörn, Standort (S), weisen derart hohe Konzentrationen nicht auf (etwa nur 50%). Die Abweichung kann durch die unterschiedlichen Neigungen der Strandprofile (SIEFERT, 1973 und WÜNSCHE, 1976) erklärt werden. Die Strandneigung vor Scharhörn weist weniger als den halben Wert der Neigung von Sylt auf, so daß vor Sylt die Wellenenergie auf kürzerem Wege in örtlich stärkere Turbulenzen umgesetzt wird. Weiterhin ist der Meßstelle von Scharhörn kein Riff mit den daraus resultierenden erhöhten Turbulenzen und Suspensionsaufwirbelungen vorgelagert (vgl. Abschn. 5.2.1). Darüber hinaus ist der wesentliche Einfluß der aus der Brandung und der Tidebewegung kommenden küstenparallelen Transportströmung von WÜNSCHE nicht näher angegeben.

Es soll nachfolgend noch auf die von WOHLBERG (1954) am Hindenburgdamm bei WSW-Sturm, Stärke 8 Bft, gemessenen Suspensionskonzentrationen hingewiesen werden. Bei einer Entnahmetiefe von nur  $10 \text{ cm}$  unter der Oberfläche kommt WOHLBERG mit dem von ihm entwickelten Schöpfgerät (WOHLBERG, 1950) zu mittleren Suspensionskonzentrationen von über  $2500 \text{ mg/l}$  auf der Luvseite des Damms. Diese hohen Konzentrationswerte in

geringer Entnahmetiefe sind nach den morphologischen Randbedingungen plausibel. Das Sohlmaterial ist erheblich feinkörniger (Korngrößenanteil  $< 0,02$  mm zwischen rd. 10 und 70 %) als am Standort (S) mit weniger als 1 % Anteil  $< 0,02$  mm. Dieses führt in Verbindung mit den erhöhten Turbulenzen im Bereich des Dammes mit Energieumsetzung auf kürzestem Wege zu den großen Suspensionskonzentrationen nach WOHLBERG.

### 5.3 Schlußfolgerungen aus Abschn. 5.2

Für beide Standorte (S und SB) gilt:

- Der Gehalt an suspendierten Feststoffen ist abhängig von Richtung und Stärke des Windes und den dadurch beeinflussten Seegangs- und Strömungsverhältnissen.
- Die Konzentrationen der Suspensionen steigen in allen Windsektoren bei ähnlichen Randbedingungen (Morphologie und Tide) linear und unterschiedlich stark an mit den während einer Tide bewegten Wassermengen (Abweichung zur mittleren Tide).
- Die Suspensionskonzentrationen an einem Standort setzen sich, abhängig von der Seegangscharakteristik und der Windstärke, aus einem Anteil lokal aufgewirbelter Suspensionen und einem Anteil mit der Strömung aus luvseitig liegenden Einzugsgebieten herangeführter Suspensionen zusammen.
- Die Suspensionskonzentrationen sind in Wattgebieten mit ausgedehnter Brandung überwiegend von der Wellenhöhe und in brandungsfreien Watten mehr vom Stromweg abhängig. Im brandungsfreien Watt werden mit zunehmenden Windstärken und zunehmendem Triftstrom die Suspensionskonzentrationen wesentlich durch in Luv vorgelagerte Turbulenzonen bestimmt, während in Watten mit ausgedehnter Brandung mehr das lokale Ereignis die Konzentrationen bestimmt.
- In den Wattgebieten mit ausgedehnter Brandung beginnt ab etwa 6 Bft mit einsetzendem Brechen des Seegangs ein überproportionaler Anstieg der Suspensionskonzentrationen. Zur gleichen Zeit kommt es auf dem brandungsfreien Watt mit in Luv vorgelagerten Brandungswatten durch den bei 6 Bft stark ansteigenden Triftstrom ebenfalls zum überproportionalen Anstieg.
- Mit wachsender Windstärke und größerem Triftstrom nimmt der Anteil der aus angrenzenden Watten herangeführten Suspension zu.
- Ein wesentlicher Einfluß des grundberührenden und nicht brechenden Seegangs auf die Suspensionskonzentration ist nicht festgestellt worden.
- Auf den Rand- und Brandungswatten ist der überproportionale Suspensionsanstieg an die erhöhten Turbulenzen insbesondere aus dem Luftserschlag des brechenden Seegangs mit überlagerten Tide- und Orbitalströmungen  $> 110$  cm/s geknüpft.
- Die ursprüngliche Aufwirbelung der Suspension erfolgt überwiegend in den brandungsbefschlagten Wattgebieten.
- Der Triftstrom ist das hauptsächliche Transportmittel des in den Brandungswatten suspendierten Materials.
- Die auf einen Standort gerichteten Strömungen (Einzugsgebiet) bestimmen die Höhe des Suspensionswertes. Der Konzentrationswert steht dabei in einer direkten Beziehung zur Größe und zum morphologischen Charakter des Einzugsgebietes.
- Die relative Konzentrationszunahme mit der überlagerten Orbital- und mittleren Tideströmungsgeschwindigkeit ist, bezogen auf den Konzentrationswert bei einsetzender Brandung ( $\sim 6$  Bft) auf den Rand- und Brandungswatten, an beiden Standorten gleich (Gl. 5.11 u. 5.12). Sie kann auch in Abhängigkeit von der Windstärke (Geschwindigkeit) mit einheitlichen Beziehungen beschrieben werden (Gl. 5.13 und 5.14).

- Für den auflandigen Windsektor steigen die mittleren Suspensionskonzentrationen über eine Tide (bezogen auf 4 °C) bei mittleren Windstärken für den Referenzzeitraum (Abb. 5.24) zwischen 0 und 6 Bft am Standort
  - Scharhörn (S) von rd. 40 auf 50 mg/l (Brandungs-/Randwatt)
  - Scharhörnbalje (SB) von rd. 85 auf 115 mg/l (brandungsfreies Watt)
- und bei maximal gemessenen Windstärken von 8 Bft am Standort
  - Scharhörn (S) auf rd. 200 mg/l
  - Scharhörnbalje (SB) auf rd. 400 mg/l
- Die Extremwertextrapolation ergibt für maximal im Referenzzeitraum mögliche mittlere Windstärken (10 Bft) Suspensionskonzentrationen, bezogen auf 4 °C, für
  - Scharhörn (S) von rd. 500 mg/l
  - Scharhörnbalje (SB) von rd. 1200 mg/l
- Die Suspensionsganglinie über die Tide ist der der Strömung ähnlich, wobei die Konzentrationshöhe wesentlich durch die in Strömungsrichtung vorgelagerten Ereignisse und die morphologischen Randbedingungen bestimmt ist.
- Die Asymmetrie der Wellen bei Gegenläufigkeit von Wellen (Wind) und Strömung führt zu frühzeitigem Brechen der Wellen und damit zu erhöhten Turbulenzen und Suspensionskonzentrationen.
- Die über das Jahr aufgenommenen Bodenproben im Umfeld des Standorts weisen in den Sommermonaten eine Zunahme, in den Wintermonaten eine Abnahme der Feinstteile aus und korrelieren eng mit höheren Suspensionskonzentrationen im Winter und entsprechend niedrigeren im Sommer.

## 6. Anwendungsmöglichkeiten

### 6.1 Mathematische Modellierung des Sedimenttransportes

#### 6.1.1 Allgemeines

Für den im Küsteningenieurwesen tätigen Ingenieur ist der Sedimenttransport, bestehend aus dem Geschiebetrieb und der hier zu betrachtenden Suspension, von besonderer Bedeutung, da mit ihm die Fragen der ausreichenden Tiefen der Schifffahrtswege im Ausbau und in der Unterhaltung, des Bestandes der Küstenschutzbauwerke sowie der Randbedingungen für Planungsaufgaben eng verbunden sind. Vornehmlich bei der Planung von Großbauvorhaben sind die Auswirkungen auf den bestehenden Sedimenthaushalt aufzuzeigen und zu beurteilen. Da das vorhandene natürliche Gleichgewicht entweder so wenig wie möglich oder aber nach bestimmten Zielsetzungen verändert werden soll, ist eine möglichst umfassende Beschreibung des „Ist-Zustandes“ und der dann aus den Bauwerken zu erwartenden Veränderungen von Interesse.

Dem Ingenieur stehen bisher außer einigen empirisch ermittelten Zusammenhängen und Erfahrungen über die Sedimentbewegung nur wenige geeignete Hilfsmittel zur Verfügung. Mathematische Modelle können ein derartiges Hilfsmittel sein, wenn sie mit ausreichender Genauigkeit die tatsächlichen Ereignisse beschreiben.

Die Modelle müssen sowohl auf den als gesichert geltenden physikalischen Beziehungen als auch auf Ergebnissen aus Natur- und Modellmessungen aufbauen. SÜNDERMANN (1978) führt hierzu aus, daß für die Modelle im Sinne der praktischen Nutzenanwendung Vereinfachungen und Arbeitshypothesen formuliert werden müssen, die die Konzipierung eines

großräumigen Modells erlauben. Die so vereinfachten Modelle können dann schrittweise verbessert und an den neuesten Kenntnisstand angepaßt werden, wobei als oberstes Ziel eine in der Praxis verwendbare Abschätzung des Transportes gilt. Nach SÜNDERMANN führt diese Betrachtung weg vom mikroskopischen Einzelkorn (mikroscale) hin zu vereinfachenden, größeren Formulierungen der physikalischen Zusammenhänge.

### 6.1.2 Modelle zur Untersuchung des Sedimenttransportes

Der Aufbau eines Modells wird wesentlich durch die Art des Transportes bestimmt. Es ist zu beachten, daß z. B. für überwiegenden Transport in Suspension nicht Ansätze verwendet werden, die auf Überlegungen und Messungen mit vorherrschendem Geschiebetrieb („bed-load“) zurückgehen. DILLO (1960) gibt unter Anwendung der von EINSTEIN (VANONI, 1977) ermittelten „bed-load-funktion“ einen Anhalt, welche Transportart für das Untersuchungsgebiet maßgebend ist. Hiernach erfolgt der überwiegende Transport in Suspension für einheitliches Sohlmaterial der Korngröße 0,2 mm ab einer Strömungsgeschwindigkeit von rd. 80 cm/s. Übertragen auf das Untersuchungsgebiet mit  $d_{50}$  zwischen 0,13 und 0,15 mm überwiegt der Transport in Suspension bereits bei geringeren Strömungsgeschwindigkeiten, die etwa zwischen 50 und 80 cm/s liegen. Vergleicht man diese Geschwindigkeiten mit den überlagerten Orbital- und Tidedrömungsgeschwindigkeiten der Standorte (S) und (SB) (vgl. Abschn. 5.2.2.3), so ergibt sich, daß bei (SB) etwa ab 3 bis 4 Bft, bei (S) etwa ab 5 Bft der Transport überwiegend in Suspension erfolgt. Hieraus folgt die Notwendigkeit eines zumindest für größere Windstärken ausreichenden Ansatzes des Suspensionstransports für das Untersuchungsgebiet Neuwerk/Scharhörn.

Zunächst werden nachfolgend Voraussetzungen benannt, die bei der Modellierung des tideabhängigen Sedimenttransportes zu berücksichtigen sind:

- instationäre und turbulente Strömungsverhältnisse, bedingt durch Tide, Wind und daraus resultierende Wellen- und Triftströmungen sowie Dichteströmungen,
- nicht homogenes Sohlmaterial mit bereichsweise unterschiedlicher Kornverteilung.

Diese Voraussetzungen beinhalten jede für sich sehr komplexe Einzelvorgänge, die in einem ersten Modell aus den unter Abschn. 2. angegebenen Gründen nur vereinfacht formuliert werden können. Wie dort ausgeführt, sind bei Transportbetrachtungen grundsätzlich die Bereiche „bed- und suspension-load“ wegen ihrer abweichenden physikalischen Gesetzmäßigkeiten zu unterscheiden. Eine wesentliche Vereinfachung besteht darin, diese Bereiche dennoch zusammenzufassen und mit einer Näherungsbeziehung, wie auch von DILLO (1960) für die Ermittlung der überwiegenden Transportart verwendet, zu beschreiben. Beispiele für solche als „total-load“ bezeichneten Ansätze sind bei VANONI (1977) nachzulesen und z. B. von EINSTEIN-BROWN (BROWN, 1950) und ENGELUND-HANSEN (1967) angegeben.

Unter Verwendung derartiger Ansätze hat SÜNDERMANN (1978) ein Modell vorgestellt, das nachstehend skizziert wird. Es geht von folgenden vereinfachenden Arbeitshypothesen aus:

- schrittweise Homogenität des Sediments
- Sedimenttransport, verursacht durch das dreidimensionale Schubspannungsfeld des sich bewegendes Wassers
- Transportmechanismus aus Wechselwirkung von Strömung, Sediment und Sohle
- Ansätze für richtungskonstante Strömungen auch unter Tideverhältnissen gültig
- Sedimenttransport je nach Genauigkeit des Untersuchungszieles in sog. „scales“ unterteilbar und durch unterschiedliche Modelle beschreibbar

Nach diesen Hypothesen wird der Transport in diesem Modell in Abhängigkeit von der Schubspannung auf das Korn beschrieben, wobei das Einsetzen des Transportes z. B. mit Hilfe des SHIELDS- oder HYULSTRÖM-Diagramms (VANONI, 1977, s. Abb. 2.15) bestimmt wird. Die Anwendbarkeit der Diagramme, die unter stationären und richtungskonstanten Strömungsvoraussetzungen ermittelt worden sind, auf instationäre Tidebewegungen geht auf die von MADSON und GRANT (1976) durchgeführten Betrachtungen zurück. Der eigentliche Transportmechanismus wird dann, wie oben erwähnt, z. B. mit der von EINSTEIN-BROWN angegebenen „total-load-funktion“ beschrieben.

Für die Modellierung im „mesoscale“, d. h. in Bereichen der Sohlveränderungen von Dezimetern bis Metern, wird neben der reinen Schubspannungsbeziehung noch die Vertikal-komponente der Turbulenzströmung mit einem orts- und zeitabhängigen Austauschkoef-fizienten als Näherungsbeziehung erfaßt (SÜNDERMANN, 1978), so daß auch dieser für den Transport wichtige Einfluß berücksichtigt ist. Die mathematische Beschreibung erfolgt dann durch Lösung von dreidimensionalen Gleichgewichtsbeziehungen, wobei das betrachtete Gebiet mit Hilfe eines orthogonalen Rechengitternetzes vertikal und horizontal gegliedert ist. Innerhalb der durch das Rechengitternetz gebildeten Einheiten wird der Gleichgewichtszu-stand formuliert und mittels eines hier nicht näher zu beschreibenden Differenzenverfahrens gelöst.

Die über dieses Modell ermittelten Ergebnisse hat SÜNDERMANN mit denen von hydraulischen Modellen mit beweglicher Sohle verglichen und hierfür ausreichende Übereinstimmung festgestellt. Befriedigende Naturmessungen, die einen direkten Vergleich ermöglichen, liegen aber nur unzureichend vor. Dieses gilt insbesondere für höhere Strömungs- und Orbitalge-schwindigkeiten von Windtiden. Die in dieser Arbeit angegebenen Konzentrationswerte der Suspensionen können deshalb einen Anhalt bieten. Es ist allerdings zu berücksichtigen, daß sie nur den Suspensionsanteil erfassen, nicht aber Aussagen über den sohnahen Transport machen.

Eine Weiterentwicklung des SÜNDERMANN-Modells unter Einbeziehung des winderzeugten Seegangs ist vorgesehen, wobei analog zu dieser Arbeit die Grundströmung (Tide und Trift) durch eine Orbitalströmung überlagert werden soll. Die oszillierende Orbitalströmung trägt zwar direkt nicht zum Transport bei (MADSON und GRANT, 1976), löst aber periodisch das Sediment von der Sohle und macht es für den Transport verfügbar. Nach den Ergebnissen der vorliegenden Arbeit wird im Bereich der Brandungs- und Randwatten mit Einsetzen der Brandung auch der Einfluß des Lufteinschlags auf das Sohlmaterial und dessen Verfügbarkeit für den Transport bei der Weiterentwicklung zu berücksichtigen sein sowie die von FÜHR-BÖTER et al. (1981) angegebene biogene Stabilisierung des Wattbodens, um ausreichende Übereinstimmung mit den Naturvorgängen zu erzielen.

Mit diesem von SÜNDERMANN angegebenen Modell kann der Suspensionstransport entsprechend der zugrundeliegenden Beziehung für „total-load“ nur näherungsweise erfaßt werden. Es sei deshalb hier noch auf ein von KERSSSENS et al. (1979) angegebenes Modell des suspendierten Feststofftransports verwiesen, das in Verbindung mit dem oben angegebenen zu einer Verfeinerung der Aussage des Transports führen kann.

Dieses Modell beschreibt den Transport im „small-scale“-Bereich, der etwa dem des „meso-scale“ von SÜNDERMANN vergleichbar ist. Entsprechend den Ansätzen für den Suspensionstransport greift dieses Modell auf die Lösung der Diffusionsgleichung (vgl. Gl. 2.02) zurück, wobei im wesentlichen von folgenden Vereinfachungen und Voraussetzungen ausgegangen wird:

- schrittweise homogenes und kohäsionsloses Sediment,
- schrittweise eindimensionale Strömungsverhältnisse,

- Beschreibung des Transportes mit einem zweidimensionalen Diffusionsansatz,
- Verteilung des Diffusionskoeffizienten in der Vertikalen entsprechend dem von KERSENS mit Hilfe der Versuche von COLEMAN (1970) ermittelten vereinfachten Verlauf (Abb. 6.01).
- Die Tidebewegung wird mit einer Vielzahl von quasistationären Einzelschritten beschrieben unter der Voraussetzung einer guten Durchmischung und einem nicht signifikanten Schlupf zwischen den Feststoffteilchen und dem Wasser.
- Als Eingangswert wird ein Konzentrationswert nahe der Sohle gewählt, der mit Hilfe einer für das Untersuchungsgebiet geeigneten „total-load“-Beziehung ermittelt wird.

Unter diesen Voraussetzungen kann ein überwiegend in Suspension erfolgender Sedimenttransport mit dem von KERSENS et al. angegebenen Modell beschrieben werden, wie von ihm selbst durchgeführte Vergleiche mit Naturmessungen gezeigt haben. Er weist aber darauf hin, daß die Ergebnisse sehr wesentlich durch eine exakte Vorgabe der repräsentativen Strömungsgeschwindigkeiten und der durchmesser- und formabhängigen repräsentativen Absinkgeschwindigkeit (vgl. Abb. 2.05-2.07) des suspendierten Sediments bestimmt werden. Entsprechende Sorgfalt muß auf die Festlegung dieser Werte verwandt werden.

Bezüglich der in dieser Arbeit u. a. in Abhängigkeit von den Windverhältnissen in 35 cm über der Sohle am Standort ermittelten Suspensionskonzentration bietet das KERSENS-Modell den Vorteil einer direkten Verwendbarkeit dieser Daten als Eingangswerte, so daß mit einem Gewinn an Genauigkeit auf die Ermittlungen der Eingangswerte aus einer „total-load“-Beziehung verzichtet werden kann.

Bei einer Anwendung des KERSENS-Modells auf Sturmtiden erscheint die zugrundeliegende Diffusionsverteilung (vgl. Abb. 6.01) allerdings zu starr, so daß hier bei dann sowohl zeitlich und räumlich stark variierenden Turbulenzen eine Beschreibung der Turbulenz mit Hilfe eines stochastischen Modells, wie z. B. BECHTLER (1980) vorschlägt, Verbesserungsmöglichkeiten bietet. Bezüglich einer näheren Erläuterung wird auf die Ausführungen von BECHTLER verwiesen.

### 6.1.3 Folgerungen

Die aufgeführten Modelle mit den vereinfachten Eingangswerten sind grundsätzlich für eine Beschreibung des Sedimenttransports geeignet; bezüglich der Genauigkeit sind allerdings gewisse Einschränkungen zu machen. Wünschenswert ist eine Verfeinerung des von SÜNDERMANN angegebenen Modells mit Hilfe der von KERSENS aufgezeigten genaueren Beschreibung des Suspensionsanteils unter Verwendung eines stochastischen Modells zur besseren Erfassung der Turbulenz- und Diffusionsschwankungen insbesondere für Sturmtiden.

Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit können ohne weiteres nur auf das Suspensionsmodell von KERSENS angewendet werden. Für das von SÜNDERMANN entwickelte Modell bieten sie einen Anhalt, da die Meßergebnisse über den Geschiebetrieb („bed-load“) keine Aussage treffen und auch an anderer Stelle wenig ergänzende quantitative Angaben hierzu vorliegen (GÖHREN, 1971). Ein wesentlicher Anhalt für dieses Modell kann die mit einsetzen der Brandung (bei ca. 6 Bft) überproportional ansteigende Suspensionskonzentration sein, die möglicherweise mittels einer zusätzlichen Vertikalkomponente aus dem Lufteinschlag (FÜHRBÖTER, 1971) berücksichtigt werden kann. Weiterhin erscheint das Ergebnis des, bezogen auf das Einsetzen der Brandung auf den Rand- und Brandungswatten, gleichen Konzentrationsanstieges mit der Windstärke an beiden Standorten wichtig, da hierdurch zumindest für den entscheidenden auflandigen Windbereich eine einheitliche Beschreibung möglich wird. Für

die anderen Windsektoren können die mitgeteilten Ergebnisse als Anhalt verwendet werden (Abb. 5.11).

Die insbesondere für den Suspensionstransport wichtigen Strömungsverhältnisse im Watt von Neuwerk und Scharhörn sind von GÖHREN (1965, 1969) ausführlich beschrieben, wobei allerdings Einschränkungen bezüglich der vertikalen Verteilungen der Suspension (Abb. 6.02) zu machen sind, die von GÖHREN nur für Stromrinnen ermittelt wurden. Auch über das Sohlmaterial bzw. den repräsentativen Korndurchmesser der Suspension liegen von LINKE (1970) und CHRISTIANSEN (1974) entsprechende Angaben vor. Die erforderlichen Eingangsdaten für ein erweitertes Modell, basierend auf dem z. B. von SÜNDERMANN vorgeschlagenen, liegen damit weitgehend vor. Die vertikale Geschwindigkeitsverteilung ist vereinfacht in Anlehnung an die der Stromrinnen anzunehmen. Hierbei sind allerdings wesentliche Einflüsse aus den Dichteströmungen auf dem hohen Watt nicht zu erwarten. Dieses Modell kann in einer ersten Näherung die Transportvorgänge in den Watten um Neuwerk und Scharhörn beschreiben und wertvolle Planungsgrundlagen liefern.

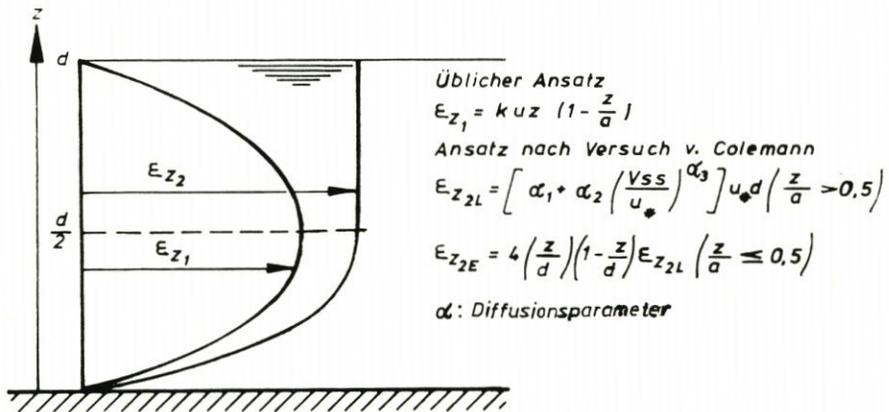


Abb. 6.01. Veränderung des Sediment-Diffusionskoeffizienten über die Wassertiefe (KERSENS et al., 1979)

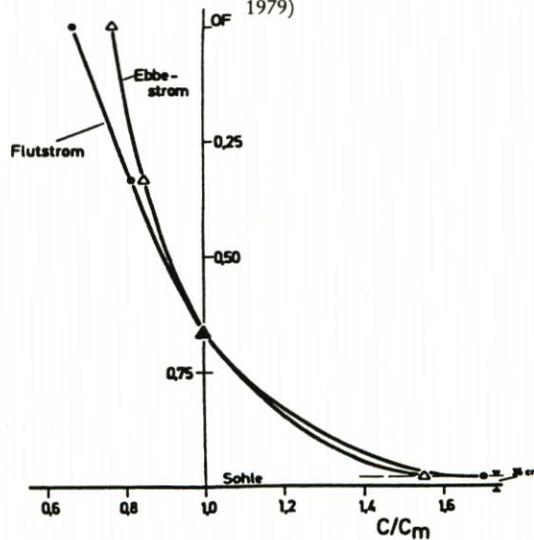


Abb. 6.02. Vertikale Verteilung der Schwebstoffkonzentration (C) (Mittel aus 21 Messungen) (GÖHREN, 1972)

## 6.2 Abschätzung der Suspensionstransportmengen im Untersuchungsgebiet

Nachfolgend werden die Transportmengen über das Watt als Trockenmasse in ihrer Größenordnung für die Bereiche zwischen Neuwerk und Scharhörn sowie über das Scharhörnriff elbwärts abgeschätzt. Hierbei werden nur, wie oben ausgeführt, die in Suspension transportierten Feststoffteile erfaßt. Die Ergebnisse sollen mit denen von GÖHREN (1971) verglichen und mögliche Folgerungen gezogen werden.

Die Bestimmung der Größenordnung des Transports setzt die Kenntnis

- der maßgebenden Suspensionskonzentration,
- der mittleren Verteilungsfunktion der Konzentrationen in der Vertikalen und
- des maßgebenden Wassertransportvolumens pro Zeiteinheit voraus.

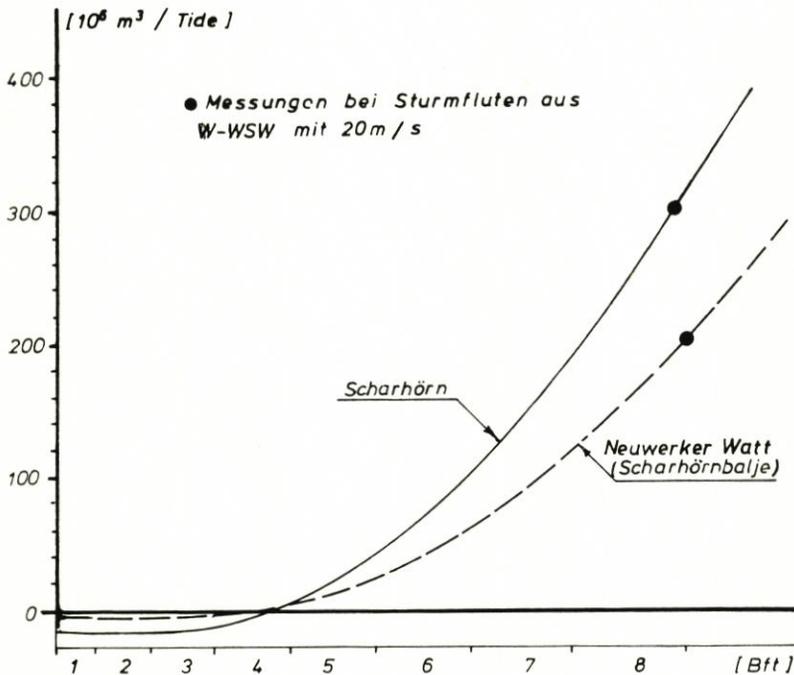


Abb. 6.03. Resultierender Wasserversatz bei auflandigen Winden vor Scharhörn und über dem Neuwerker Watt (Näherung nach Durchfluß- und Reststrommessungen von GÖHREN, 1969 und 1971)

Die vertikale Konzentrationsverteilung ergibt sich aus den von ROUSE (Abb. 2.08) angegebenen Beziehungen, wobei für die weiteren Ermittlungen die von GÖHREN (1971) für Rinnen angegebene Verteilungsfunktion zugrundegelegt wird (Abb. 6.02). Die resultierenden Wasserbewegungen über das Watt vor Scharhörn und über den Wattrücken zwischen Neuwerk und Scharhörn sind ebenfalls von GÖHREN (1969) angegeben bzw. aus dem von ihm angegebenen Reststrom abzuschätzen (vgl. Abb. 6.03). Man erhält pro Tide:

für mittlere Tiden	(S)	$15 \times 10^6 \text{ m}^3$ Richtung SW
(0 bis 4 Bft)	(SB)	$2 \times 10^6 \text{ m}^3$ Richtung SW
für Sturmzeiten	(S)	$300 \times 10^6 \text{ m}^3$ Richtung O

mit auflandigem Wind (8 bis 9 Bft)	(SB)	200 × 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> Richtung O
Die Suspensionskonzentrationen ergeben sich aus Abb. 5.24		
für mittlere Tiden (2 bis 3 Bft)	(S)	ca. 40 mg/l
für Sturmzeiten mit auflandigem Wind (8 bis 9 Bft)	(SB)	ca. 95 mg/l
	(S)	ca. 235 mg/l
	(SB)	ca. 535 mg/l

Unter Berücksichtigung der in Abb. 6.02 dargestellten vertikalen Verteilung sind die Mittelwerte der Konzentrationen

für mittlere Tiden (2 bis 3 Bft)	(S)	ca. 25 mg/l
für Sturmzeiten mit auflandigem Wind (8 bis 9 Bft)	(SB)	ca. 60 mg/l
	(S)	ca. 145 mg/l
	(SB)	ca. 335 mg/l

Diese Werte stimmen in der Größenordnung mit denen von GÖHREN (1971) überein, der anhand von eigenen Messungen (Abb. 5.01 bis 5.03) und Abschätzungen nach GRY (1942) und POSTMA (1961) Mittelwerte für

mittlere Tiden von	30 mg/l
und Sturmzeiten von	300 mg/l

genannt hat, ohne diese Werte lokal zu spezifizieren. GÖHREN nennt für die Konzentrationswerte keine Bezugstemperatur, während die in dieser Arbeit angegebenen Werte auf 4 °C bezogen sind. Diese Temperatur entspricht der mittleren Wassertemperatur von Mitte Oktober bis Mitte April (KÜHL, 1973), d. h. dem Zeitraum, in dem vornehmlich mit Sturmzeiten zu rechnen ist. Die Konzentrationswerte für Sturmzeiten stellen somit einen repräsentativen Mittelwert dar. Die Konzentrationswerte der mittleren Tiden sind allerdings auf die Jahresmitteltemperatur des Wassers von 10 °C umzurechnen und ergeben sich gemäß Gl. 2.15 zu

(S)	ca. 15 mg/l
(SB)	ca. 38 mg/l

Diese Werte entsprechen dann im Mittel knapp dem von GÖHREN angegebenen Wert von 30 mg/l.

Mit den angegebenen resultierenden Wasserbewegungen ergeben sich somit für die Temperaturmittelwerte folgende Feststofffrachten:

mittlere Tideverhältnisse (10 °C)	(S)	ca. 225 t/Tide nach SW
	(SB)	ca. 75 t/Tide nach SW
Sturmzeiten (20 m/s, 4 °C)	(S)	ca. 42 000 t/Tide nach O
	(SB)	ca. 63 000 t/Tide nach O

Für den Standort (SB) entsprechen diese Suspensionsfrachten den Angaben von GÖHREN (1971), der für mittlere Tideverhältnisse 100 t/Tide bzw. für Sturmzeiten 60 000 t/Tide angegeben hat. Am Standort (S) kommt GÖHREN wegen des Ansatzes desselben Konzentrationsmittelwertes wie auf dem Wattrücken zu etwa doppelt so großen Frachten wie hier ermittelt. Nach den hier durchgeführten Messungen bleibt der Ansatz bei GÖHREN entsprechend zu korrigieren.

Mit Hilfe der von SIEFERT (1972) vorgelegten Windstatistik kann für den auflandigen Windsektor (nach GÖHREN etwa 220° bis 320°), der zu einer West-Ost-Überströmung des Wattrückens bei Windfluten führt, eine erste grobe Bilanzierung des Transports in den Gebieten einmal zwischen Neuwerk und Scharhörn (SB) und zum anderen vor Scharhörn über das Scharhörnriff (S) (Tab. 6.01) durchgeführt werden, wenn man den resultierenden

Tabelle 6.01  
Abschätzung des Transportes in Suspension p. a. für den auflandigen Windsektor (Trockenmasse)

Windstärke (Bft.)	(./.)	Anzahl der Tiden p. a. (%)	Result. Wasser- transport (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	Mäßgebende mittlere Konzentration bei 4 °C (mg/l)	bei 10 °C (mg/l)	Feststofftransport pro Tide (t/Tide)	P. a. (t/a)	Feststofftransport (4 °C) pro Tide (t/Tide)	P. a. (t/a)
<b>Scharhörörn:</b>									
0-3	48	7	- 15	25	15	- 225	- 10 800	- 375	- 18 000
4	63	9	- 5	28	18	- 90	- 5 670	- 140	- 8 820
5	71	10	+ 25	30	19	475	33 725	750	53 250
6	39	6	+ 70	37	23	1 610	62 790	2 590	101 010
7	26	4	+ 150	66	42	6 300	163 800	9 900	257 400
8	6	1	+ 260	121	77	20 020	120 120	31 460	188 760
9	1	1	+ 380	181	115	43 700	43 700	68 780	68 780
							407 665		642 380
Transport über Watt Richtung O: 10 °C/4 °C									
Starkwindphasen bei 4 °C bis 10 °C									
							gerundet: 410 000		640 000
							gerundeter Mittelwert: 525 000 t		
<b>Scharhörnbälje:</b>									
0-3	48	7	- 2	60	38	- 76	- 3 648	- 120	- 5 760
4	63	9	+ 1	66	41	41	2 583	66	4 158
5	71	10	+ 15	70	44	660	46 860	1 050	74 550
6	39	6	+ 40	83	52	2 080	81 120	3 320	129 480
7	26	4	+ 90	148	94	8 460	219 960	13 320	346 320
8	6	1	+ 160	274	173	27 680	166 080	43 840	263 040
9	1	1	+ 260	410	260	67 600	67 600	106 600	106 600
							577 972		918 388
Transport über Watt Richtung O: 10 °C/4 °C									
Starkwindphasen bei 4 °C bis 10 °C									
							gerundet: 580 000		920 000
							gerundeter Mittelwert: 750 000 t		

Wassertransport vereinfacht in Anlehnung an die Veränderung des Reststromes mit der Windstärke zwischen den von GÖHREN (1971) angegebenen Werten interpoliert (Abb. 6.03). Die bei mittleren Tideverhältnissen unterschiedlichen Konzentrationswerte in den Flut- und Ebbephasen (vgl. Abb. 5.15) und die am Standort (S) für die Windrichtung 210° bis 240° ermittelten höheren Konzentrationswerte bleiben hierbei unberücksichtigt. Die anderen Windrichtungen verändern dieses Bild nur unwesentlich, da bei ihnen eher reduzierte Wassermengen und meist auch geringere Konzentrationswerte maßgebend sind (vgl. Abb. 5.11). So ergibt sich im auflandigen Windsektor die jährliche Gesamt-Suspensionsfracht in Richtung O für 10 °C Wassertemperatur additiv aus den Werten (Tab. 6.01) für (SB) und (S) zu

$$4,1 \times 10^5 \text{ t} + 5,8 \times 10^5 \text{ t} \approx 1,0 \times 10^6 \text{ t}$$

Da der vorstehenden Abschätzung die Jahresmitteltemperatur des Wassers von 10 °C zugrundeliegt, werden die Transportmengen eher noch höher liegen, weil 80 % und mehr des Gesamttransportes bei Windstärken > 6 Bft, d. h. bei Sturmfluten, auftreten, die vornehmlich im Winterhalbjahr mit reduzierten Wassertemperaturen zu verzeichnen sind. Die Mitteltemperatur im Winterhalbjahr liegt, wie oben angegeben, bei 4 °C. In Tab. 6.01 ist deshalb die Gesamtsuspensionsfracht auch für diese Temperatur mit jährlich

$$6,4 \times 10^5 \text{ t} + 9,2 \times 10^5 \text{ t} \approx 1,5 \times 10^6 \text{ t}$$

angegeben. Eine Zuordnung der Sturmzeiten zu bestimmten Wassertemperaturen ist anhand der vorliegenden Statistik nicht möglich. Die tatsächliche jährliche Gesamt-Suspensionsfracht kann deshalb nur angenähert als Mittelwert aus den Frachten bei 4 °C und 10 °C angegeben werden. Sie ergibt sich zu

$$\text{rd. } 5,3 \times 10^5 \text{ t} + 7,5 \times 10^5 \approx 1,3 \times 10^6 \text{ t}$$

## 7. Meßdatenzusammenstellung

Tabelle 1  
Zusammenstellung der Meßergebnisse

Standort: Scharhörn		Suspension		Wind			Tide		Welle		Wasserr.		Strömung		Temp.					
Lfd. Nr.	$\bar{C}$	$\bar{C}_C$	$\bar{C}_{CT}$	$C_{HW}$	$C_{HWC}$	$\bar{R}_T$	$\bar{V}_T$	$\bar{V}_{TB}$	$K_T$	$\tau_T$	$\bar{H}$	Grund-berühr.	Bran-dung	$d_p$	$d$	$S_{VT}$	$\bar{u}_H$	$\bar{u}_s$	$\bar{u}$	$T_C$
			[mg/l]			[Grad]	[m/s]	[Bft]	[-]	[h]	[cm]			[mPN]	[m]	[km/T]	[cm/s]	[cm/s]	[cm/s]	[°C]
Sektor: 240°-360°																				
1	47	71	76	25	37	255	9,3	5	1,11	13,74	45	g	-	6,26	2,46	5,8	75	20	95	9
2	59	80	81	28	42	255	6,7	4	1,09	12,60	31	g	-	6,68	2,88	4,7	50	15	65	8
3	48	72	73	25	38	255	10,8	6	0,96	12,60	54	g	-	6,55	2,75	6,4	85	25	110	9
4	39	62	60	24	38	295	5,7	4	1,01	12,13	26	g	-	6,50	2,70	4,4	45	20	65	10
5	27	43	42	18	28	260	4,9	3	1,03	12,15	28	g	-	6,60	2,80	3,1	45	15	60	10
6	59	93	91	50	79	250	14,4	7	1,12	12,33	58	g	-	6,95	3,15	7,1	85	20	105	10
7	58	87	89	52	78	250	13,4	6	1,24	12,73	68	g	-	7,43	3,63	11,2	90	25	115	9
8	47	71	70	38	57	255	14,1	7	1,15	12,40	68	g	b	7,08	3,28	8,4	90	25	115	9
9	45	68	67	18	27	250	12,3	6	1,11	12,10	64	g	b	6,80	3,00	6,6	90	20	110	9
10	110	145	182	151	213	265	16,0	7	1,41	15,60	91	g	b	7,35	3,55	14,4	115	25	140	8
11	40	56	55	16	23	305	10,4	5	1,09	12,12	54	g	-	6,74	2,94	6,1	80	20	100	8
12	44	62	61	54	76	305	7,1	4	1,02	12,38	35	g	-	6,19	2,39	4,0	60	15	75	8
13	29	37	35	3	4	290	9,0	5	1,07	12,33	45	g	-	6,61	2,81	6,1	65	25	90	6
14	49	60	63	18	22	280	11,0	6	1,13	12,98	66	g	b	6,51	2,71	8,5	95	25	120	6
15	25	33	34	25	33	265	10,2	5	1,12	12,77	64	g	b	6,68	2,88	6,5	90	20	110	7
16	18	24	23	20	26	250	13,4	6	1,01	12,15	60	g	b	6,29	2,49	6,0	90	20	110	7
17	24	30	31	21	26	250	12,0	6	1,13	13,02	63	g	b	6,70	2,90	5,9	90	20	110	6
18	20	25	25	19	23	250	8,7	5	1,04	12,53	57	g	b	6,36	2,56	4,1	65	15	100	6
19	35	39	39	28	31	250	13,5	6	1,16	12,52	70	g	b	7,23	3,43	8,5	95	30	125	5
20	36	40	40	20	22	290	11,8	6	1,12	12,37	61	g	-	7,14	3,34	7,0	85	20	105	5
21	32	36	36	16	18	260	8,3	5	1,11	12,63	42	g	-	6,94	3,14	5,3	65	20	85	5
22	45	50	50	16	18	260	9,1	5	1,08	12,32	46	g	-	6,95	3,15	5,6	70	20	90	5
23	28	31	31	9	10	280	7,2	4	0,97	12,28	35	g	-	6,31	2,51	4,8	55	20	75	5
24	23	26	26	3	3	250	7,4	4	1,05	12,57	37	g	-	6,64	2,84	4,9	55	15	70	5
25	14	16	15	18	20	250	9,8	5	0,96	12,10	50	g	-	6,33	2,53	5,9	80	25	105	5
26	36	43	44	25	28	250	11,8	6	1,06	12,68	61	g	b	6,54	2,24	7,0	90	25	115	5
27	41	46	44	43	48	250	13,4	6	1,00	12,00	64	g	b	6,37	2,57	8,4	95	35	130	5
28	104	214	225	132	251	260	19,0	8	1,31	13,33	93	g	b	7,65	3,85	18,0	115	40	155	17
29	40	80	81	71	142	310	15,7	7	1,18	12,73	82	g	b	7,24	3,44	12,0	105	30	135	16
30	82	159	160	165	320	330	16,2	7	1,21	12,58	84	g	b	7,57	3,77	13,2	105	35	140	15
31	16	25	25	3	5	260	8,0	5	1,07	12,42	40	g	-	6,82	3,02	5,1	55	20	35	10
32	21	32	29	9	14	305	12,0	6	1,05	11,70	53	g	-	6,94	3,14	7,7	75	25	100	9
33	81	122	129	38	57	340	15,7	7	1,32	13,28	82	g	b	7,75	3,95	12,0	110	30	140	9
34	27	30	32	8	9	245	12,4	6	1,15	13,33	46	g	-	6,54	2,74	7,5	70	20	90	5
35	41	54	55	21	28	290	9,7	5	1,17	12,68	59	g	-	7,25	3,45	5,9	80	20	100	7
36	26	34	33	18	24	325	9,8	5	1,05	11,92	61	g	-	6,97	3,17	5,9	85	15	100	7
37	24	32	32	18	24	265	13,4	6	1,06	12,58	58	g	b	6,71	2,91	8,4	85	35	120	7
38	30	40	40	20	26	310	14,0	7	1,16	12,75	66	g	b	7,15	3,95	9,0	85	30	115	7
39	24	32	30	25	33	270	12,6	6	0,95	11,53	47	g	-	6,44	2,64	7,6	75	30	105	7
40	77	102	106	92	121	330	14,9	7	1,28	13,02	84	g	b	7,64	3,84	10,5	105	25	130	7
41	26	34	33	3	4	335	10,2	5	1,04	12,17	53	g	-	6,56	2,76	6,0	80	20	100	7
42	89	134	148	115	172	265	15,8	7	1,35	13,85	83	g	b	7,60	3,80	12,3	105	20	125	9
43	26	32	32	19	23	255	11,2	6	1,03	12,45	58	g	b	6,39	2,59	6,6	85	15	100	6
44	26	57	57	10	22	285	8,7	5	1,00	12,52	44	g	-	6,52	2,72	4,7	65	15	80	19
45	24	49	50	6	12	330	6,8	4	1,03	12,63	32	g	-	6,56	2,76	5,0	55	15	70	17
46	19	39	38	3	6	320	5,2	3	0,94	12,15	24	g	-	6,20	2,40	4,8	40	20	60	17
47	26	54	52	6	12	310	7,2	4	0,97	12,17	36	g	-	6,26	2,46	4,8	60	15	75	17
48	45	90	93	38	66	315	12,4	6	1,06	12,98	54	g	b	5,94	2,14	7,5	85	20	105	16
49	20	41	43	15	31	280	9,8	5	1,11	12,98	51	g	-	6,65	2,85	5,9	80	20	100	17
50	26	52	49	24	48	255	12,4	6	0,96	11,73	63	g	b	6,29	2,49	7,5	90	25	115	16
51	70	136	142	120	232	310	15,1	7	1,16	13,10	80	g	b	6,90	3,10	10,5	110	25	135	15
52	45	87	88	21	41	280	14,9	7	1,09	12,55	56	g	-	6,95	3,15	10,5	65	30	115	15
53	19	37	36	9	18	315	14,0	7	1,06	12,35	56	g	-	6,75	2,95	9,0	80	25	105	15
54	35	68	67	0	0	325	15,8	7	1,08	12,28	64	g	b	6,99	3,19	14,7	85	40	125	15
55	64	111	112	12	21	260	13,2	6	1,17	12,62	71	g	b	7,20	3,40	8,2	95	20	115	12
56	49	88	88	3	5	250	16,3	7	1,11	12,45	86	g	b	7,55	3,75	13,3	105	30	135	13
57	57	103	100	30	54	260	16,6	7	1,11	12,17	80	g	b	7,15	3,35	14,0	110	35	145	13
58	73	131	123	91	164	280	17,3	8	1,14	11,72	88	g	b	7,55	3,75	16,0	110	40	150	13
59	28	50	49	20	35	300	13,2	6	1,16	12,10	70	g	b	7,32	3,52	8,2	95	20	115	12
60	27	45	44	0	0	320	9,8	5	1,06	12,20	50	g	-	6,78	2,98	5,9	75	15	90	11
61	21	35	34	0	0	300	10,2	5	1,03	12,32	52	g	-	6,56	2,76	6,0	80	20	100	11
62	73	121	122	34	56	260	14,0	7	1,17	12,60	73	g	b	6,95	3,15	9,0	95	25	120	11
63	60	95	90	50	79	270	16,4	7	1,08	11,93	72	g	b	6,70	2,90	13,6	100	35	135	10
64	28	44	46	6	10	255	13,6	6	1,14	13,02	68	g	b	6,52	2,72	8,6	95	20	115	10
65	52	82	86	9	14	255	13,5	6	1,16	13,02	70	g	b	6,84	3,04	8,5	95	20	115	10
66	18	28	29	3	5	260	12,1	6	1,10	12,53	62	g	b	6,59	2,79	7,2	90	15	105	10
67	33	52	52	6	10	270	13,4	6	1,11	12,50	69	g	b	6,78	2,98	8,4	95	20	115	10
68	19	30	29	3	5	265	9,9	5	1,05	12,12	50	g	-	6,72	2,92	5,9	75	20	95	10
69	44	73	72	3	5	255	9,4	5	1,04	12,38	47	g	-	6,59	2,79	5,7	70	20	90	11
70	49	69	66	15	21	360	11,0	6	1,09	11,92	68	g	b	7,14	3,34	6,4	90	20	110	8

Tabelle 2  
Zusammenstellung der Meßergebnisse

Standort: Scharhörn									
Lfd. Nr.	Suspension			$\bar{R}_T$	Wind		Tide		Temperatur
	$\bar{C}$	$\bar{C}_C$	$\bar{C}_{CT}$		$\bar{V}_T$	$\bar{V}_{TB}$	$K_T$	$t_T$	$T_C$
[-]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[Grad]	[m/s]	[Bft]	[-]	[h]	[°C]
Sektor: 210°-250°									
1	73	115	115	245	8,8	5	1,03	12,45	10
2	63	100	97	225	8,9	5	1,02	12,10	10
3	74	117	115	245	8,3	5	1,04	12,28	10
4	84	133	130	230	16,6	7	1,04	12,22	10
5	69	114	110	245	15,8	7	1,10	12,05	9
6	88	146	142	245	13,4	6	1,05	12,15	9
7	68	113	110	225	11,6	6	0,98	12,17	9
8	53	88	88	225	10,3	5	1,01	12,47	9
9	62	135	135	230	11,9	6	1,04	12,47	19
10	46	103	102	240	7,8	4	1,05	12,40	20
11	60	124	124	230	15,4	7	1,09	12,52	17
12	54	94	94	230	9,3	5	1,04	12,48	12
13	59	66	65	230	13,3	6	1,07	12,23	5
14	59	114	112	245	11,0	6	0,99	12,27	15
15	56	93	91	230	12,3	6	1,00	12,27	11
16	69	120	121	245	7,7	4	1,06	12,57	12
17	72	119	119	240	9,2	5	1,05	12,52	11
18	105	174	175	245	11,4	6	1,10	12,57	11
19	107	170	168	245	9,8	5	1,09	12,33	11
20	105	174	182	230	9,8	5	1,11	13,07	11
21	81	134	138	245	12,2	6	1,13	12,88	11
22	57	90	89	245	10,9	6	1,00	12,30	10
23	94	149	152	245	10,6	5	1,07	12,75	10
24	55	91	90	240	9,6	5	0,98	12,38	11
25	59	93	93	245	12,1	6	1,09	12,50	10
26	75	119	96	245	16,4	7	1,04	10,13	10
27	67	111	108	250	8,1	5	0,97	12,18	9
28	61	101	99	250	8,9	5	1,01	12,28	9
Sektor: 350°-120°									
1	14	31	30	90	6,7	4	0,94	12,23	20
2	10	22	22	20	6,2	4	0,99	12,35	20
3	11	25	25	30	6,5	4	0,99	12,37	20
4	11	25	25	15	8,4	5	0,98	12,42	20
5	16	36	36	5	8,4	5	0,99	12,38	20
6	13	29	29	0	7,9	4	0,98	12,50	20
7	14	27	27	90	6,8	4	0,98	12,45	15
8	17	33	33	115	10,4	5	0,94	12,40	15
9	18	35	35	115	11,5	6	0,90	12,43	15
10	16	27	27	105	11,6	6	0,94	12,28	11
11	11	18	18	105	10,9	6	0,97	12,45	11

Tabelle 2 (Fortsetzung)  
Zusammenstellung der Meßergebnisse

Standort: Scharhörn									
Lfd. Nr.	Suspension			$\bar{R}_T$	Wind		Tide		Temperatur $T_C$
	$\bar{C}$	$\bar{C}_C$	$\bar{C}_{CT}$		$\bar{V}_T$	$\bar{V}_{TB}$	$K_T$	$t_T$	
[-]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[Grad]	[m/s]	[Bft]	[-]	[h]	[°C]
12	16	27	27	105	11,9	6	0,93	12,38	11
13	19	28	27	60	8,3	5	0,92	12,07	9
14	23	34	33	45	10,4	5	0,92	12,27	9
15	21	32	32	65	10,6	5	0,90	12,55	9
16	15	32	31	20	7,7	4	0,97	12,12	18
17	13	27	27	40	5,8	4	0,97	12,42	18
18	16	33	33	120	8,0	5	0,93	12,38	17
19	13	28	29	60	4,2	3	1,00	12,90	18
20	13	29	30	50	11,1	6	1,03	12,97	20
21	16	35	35	100	7,1	4	0,96	12,43	19
22	17	36	36	90	9,6	5	0,94	12,33	18
23	17	35	34	100	9,8	5	0,93	12,08	17
24	22	35	35	105	11,2	6	0,92	12,37	10
25	17	27	27	75	9,2	5	0,93	12,45	10
Sektor: 110°-220°									
1	31	46	46	110	2,9	2	1,02	12,43	9
2	33	52	50	220	11,6	6	1,01	12,05	10
3	88	98	95	140	14,2	7	0,87	12,08	5
4	30	30	30	140	12,5	6	0,92	12,50	4
5	41	41	41	220	9,8	5	1,06	12,50	4
6	39	44	44	215	10,5	5	1,04	12,45	5
7	20	20	21	220	9,2	5	1,10	12,83	4
8	30	34	34	220	12,0	6	1,10	12,58	5
9	41	46	43	215	8,6	5	1,00	11,67	5
10	34	38	37	215	9,8	5	1,02	12,12	5
11	27	30	30	220	9,2	5	1,05	12,45	5
12	35	39	38	220	15,2	7	1,07	12,25	5
13	30	34	33	220	11,8	6	1,05	12,03	5
14	38	42	41	220	9,2	5	1,00	12,08	5
15	32	39	39	210	10,5	5	1,06	12,52	6
16	34	38	37	200	10,0	5	1,09	12,23	5
17	27	33	32	220	6,7	4	1,08	12,30	6
18	45	55	53	190	16,8	7	0,93	12,10	6
19	30	37	38	220	10,0	5	1,13	12,67	6
20	34	70	70	120	7,5	4	0,94	12,57	17
21	35	70	69	130	12,3	6	0,92	12,27	16
22	36	70	70	120	10,6	5	0,92	12,40	15
23	30	50	49	140	9,6	5	0,97	12,23	11
24	43	71	71	120	12,4	6	0,96	12,42	11
25	38	57	57	210	11,1	6	1,02	12,50	9
26	27	43	42	140	7,9	4	0,96	12,13	10
27	37	56	55	220	8,0	5	1,02	12,30	9
28	37	41	41	220	12,2	6	1,10	12,58	5
29	36	40	40	220	11,2	6	1,07	12,48	5
30	26	47	46	180	11,2	6	0,96	12,28	13
31	53	88	85	120	8,6	5	0,94	12,05	11
32	24	38	38	220	8,6	5	1,02	12,40	10
33	34	70	70	220	9,1	5	1,07	12,57	17
34	30	58	58	110	13,0	6	0,94	12,40	15
35	33	70	70	220	16,9	7	1,00	12,45	18

Tabelle 3  
Zusammenstellung der Meßergebnisse

Standort: Scharhörnbalje																											
Lfd. Nr.	Suspension					Wind			Tide		Welle		Wassert.		Strömung			Temp. T <sub>C</sub> [°C]									
	$\bar{C}$	$\bar{C}_C$	$\bar{C}_{CT}$	C <sub>HW</sub>	C <sub>HWC</sub>	$\bar{R}_T$	$\bar{V}_T$	$\bar{V}_{TB}$	K <sub>T</sub>	t <sub>T</sub>	$\bar{H}$	Grund-berühr.	Brandung	d <sub>p</sub>	d	S <sub>VT</sub>	$\bar{u}_H$		$\bar{u}_v$	$\bar{u}$							
	[mg/l]					[Grad]			[m/s]		[Bft]		[-]		[h]		[cm]		[mPN]		[m]		[Km/T]		[cm/s]		
Sektor: 240°-360°																											
1	44	73	71	6	10	220	10,0	5	0,99	12,15	23	g	-	6,32	2,52	6,6	35	25	60	11							
2	59	102	101	12	21	220	15,0	7	1,03	12,38	35	g	-	6,34	2,54	8,5	55	25	80	12							
3	71	123	121	0	0	220	6,7	4	0,99	12,30	10	-	-	6,36	2,56	7,2	0	25	25	12							
4	64	111	109	6	10	220	7,2	4	1,00	12,27	11	-	-	6,44	2,64	6,0	0	20	20	12							
5	46	61	62	0	0	220	8,2	5	1,08	12,68	15	-	-	6,62	2,82	6,3	5	20	25	7							
6	172	212	213	74	91	225	16,0	7	1,11	12,58	38	g	-	6,85	3,05	10,7	55	25	80	6							
7	63	134	131	6	13	230	6,2	4	1,00	12,25	8	-	-	6,51	2,71	7,1	0	25	25	18							
8	32	68	66	6	13	230	5,6	4	1,01	12,22	5	-	-	6,52	2,72	5,5	0	20	20	18							
9	50	87	85	6	10	230	12,3	6	1,00	12,27	30	g	-	6,35	2,55	7,1	50	20	70	12							
10	67	116	114	6	10	230	7,4	4	1,06	12,28	21	-	-	6,80	3,00	6,1	20	20	40	12							
11	34	54	54	3	5	230	13,5	6	1,01	12,47	24	g	-	6,06	2,26	7,4	45	20	65	10							
12	84	139	140	70	116	235	11,2	6	1,10	12,57	30	g	-	6,76	2,96	7,0	45	20	65	10							
13	91	193	202	0	0	240	13,7	6	1,08	13,10	37	g	-	6,21	2,41	7,1	60	15	75	18							
14	38	66	66	3	5	240	12,0	6	1,08	12,48	28	g	-	6,56	2,76	6,8	45	15	60	12							
15	42	73	69	9	16	240	7,2	4	0,98	12,92	11	-	-	6,20	2,40	5,0	5	15	20	12							
16	75	125	125	12	20	240	9,4	5	1,05	12,52	21	-	-	6,61	2,81	6,5	20	20	40	11							
17	84	139	135	27	45	240	6,9	4	1,00	12,12	10	-	-	6,54	2,74	5,9	20	20	20	11							
18	50	79	83	34	54	240	13,4	6	1,16	13,02	30	g	-	6,84	3,04	8,2	45	20	65	10							
19	76	120	117	6	10	240	10,2	5	0,98	12,22	23	g	-	6,30	2,50	6,7	35	25	60	10							
20	149	224	224	40	63	240	12,1	6	1,09	12,50	32	g	-	6,98	3,18	7,8	50	25	75	9							
21	280	492	355	15	24	240	17,2	8	1,14	10,13	49	g	-	6,88	3,08	12,1	70	45	115	10							
22	30	64	62	0	0	245	9,4	5	1,02	12,20	22	g	-	6,39	2,59	7,1	35	25	60	18							
23	36	74	73	6	12	250	2,0	3	0,97	12,33	2	-	-	6,14	2,34	5,8	0	20	20	17							
24	178	308	306	27	47	250	16,3	7	1,11	12,45	42	g	-	6,84	3,04	9,5	65	25	90	12							
25	205	354	345	160	277	250	16,8	7	1,13	12,17	52	g	-	7,15	3,35	10,5	75	30	105	12							
26	84	145	146	21	36	250	7,6	4	1,06	12,57	18	-	-	6,64	2,84	8,6	15	25	40	12							
27	62	103	102	6	10	250	9,8	5	1,07	12,33	25	g	-	6,68	2,88	6,6	40	20	60	11							
28	65	103	103	9	14	250	12,2	6	1,10	12,53	33	g	-	6,59	2,79	7,4	55	15	70	10							
29	73	110	106	58	87	250	15,2	7	1,08	12,07	36	g	-	6,85	3,05	8,5	55	20	75	9							
30	175	247	252	136	192	250	18,0	8	1,11	12,78	50	g	-	6,66	2,86	12,0	75	30	105	8							
31	89	183	180	15	31	255	11,7	6	1,02	12,25	31	g	-	6,39	2,59	7,2	55	30	85	17							
32	113	127	125	12	13	255	8,0	5	1,00	12,37	15	-	-	6,48	2,68	6,3	15	25	40	5							
33	56	101	96	18	32	260	10,7	5	0,99	11,95	29	g	-	6,44	2,64	7,4	50	25	75	13							
34	138	248	251	18	32	260	13,4	6	1,17	12,62	36	g	-	7,20	3,40	9,8	55	30	85	13							
35	90	153	154	82	136	260	14,1	7	1,16	12,55	44	g	-	6,95	3,15	8,7	65	20	85	11							
36	90	142	141	6	10	260	9,4	5	1,04	12,38	20	-	-	6,59	2,79	6,5	20	20	40	10							
37	97	161	154	100	158	260	15,9	7	1,09	11,98	42	g	-	6,70	2,90	10,0	65	25	90	11							
38	93	142	147	50	79	265	13,3	6	1,11	12,50	34	g	-	6,78	2,98	8,1	50	25	75	10							
39	85	105	102	10	12	265	9,0	5	1,03	12,17	27	g	-	6,73	2,93	6,4	40	20	60	6							
40	35	61	61	3	5	270	6,7	4	1,04	12,63	10	-	-	6,41	2,61	6,1	0	20	20	12							
41	185	292	346	280	440	270	19,5	8	1,30	14,77	62	g	-	7,88	4,08	14,0	80	20	100	10							
42	82	130	126	6	10	275	9,2	5	1,05	12,12	19	-	-	6,72	2,92	6,5	20	20	60	10							
43	281	422	428	171	257	275	17,4	8	1,23	12,68	56	g	-	7,58	3,78	12,6	80	30	110	9							
44	94	133	123	8	11	275	11,3	6	1,08	11,59	25	-	-	7,24	3,44	7,1	25	30	55	8							
45	70	78	76	3	4	280	6,5	4	0,96	12,12	10	-	-	6,30	2,50	5,9	20	25	25	5							
46	167	264	262	145	229	285	17,4	8	1,30	12,42	56	g	-	8,04	4,24	12,5	70	25	95	10							
47	247	370	375	280	420	285	18,6	8	1,36	12,68	60	g	-	8,30	4,50	14,5	75	35	105	9							
48	144	264	274	113	203	290	17,4	8	1,30	12,98	56	g	-	7,80	4,00	11,2	70	25	95	13							
49	156	234	236	113	170	290	16,9	7	1,29	12,60	52	g	-	7,99	4,19	10,7	65	25	90	9							
50	91	187	184	6	12	300	9,9	5	1,02	12,30	22	-	-	6,61	2,81	7,2	30	30	60	17							
51	70	126	122	27	49	300	13,2	6	1,16	12,10	35	g	-	7,37	3,57	8,8	50	20	70	13							
52	59	102	101	15	26	300	5,9	4	1,03	12,35	6	-	-	6,46	2,66	5,7	0	20	20	12							
53	158	223	229	70	99	300	14,9	7	1,16	12,83	49	g	-	7,14	3,34	9,4	70	25	95	8							
54	130	205	196	150	237	305	16,5	7	1,23	11,88	50	g	-	7,93	4,13	10,6	65	25	90	10							
55	107	151	152	3	4	305	10,1	5	1,10	12,60	23	-	-	6,87	3,07	6,7	20	20	45	8							
56	49	83	82	9	16	310	10,4	5	1,03	12,32	24	g	-	6,56	2,76	7,0	40	25	65	12							
57	116	164	163	6	9	310	8,2	5	1,06	12,47	15	-	-	6,82	3,02	7,2	25	30	35	8							
58	17	35	34	6	12	315	6,7	4	0,97	12,13	10	-	-	5,94	2,14	5,7	25	20	25	17							
59	51	92	88	12	22	315	10,8	6	1,06	11,98	25	-	-	6,80	3,00	6,3	35	20	55	13							
60	63	134	134	6	13	320	7,2	4	1,06	12,50	11	-	-	6,68	2,88	7,2	20	30	30	18							
61	26	55	54	6	13	320	5,4	3	0,97	12,17	7	-	-	6,26	2,46	5,4	10	20	20	18							
62	52	107	106	14	30	320	8,7	5	1,02	12,32	17	-	-	6,10	2,30	5,9	20	15	35	17							
63	87	169	166	38	74	320	14,9	7	1,08	12,28	46	g	-	6,99	3,19	8,2	65	25	90	15							
64	34	70	68	3	6	330	5,4	3	0,94	12,15	6	-	-	6,20	2,40	6,3	10	30	30	17							
65	65	117	114	30	54	330	10,0	5	1,06	12,20	23	-	-	6,78	2,98	7,5	35	20	55	13							
66	49	65	66	38	50	330	10,2	5	1,11	12,78	27	g	-	6,71	2,91	6,7	40	20	60	7							
67	112	230	230	30	61	340	12,1	6	1,05	12,53	33	g	-	6,63	2,83	7,5	50	25	75	17							
68	123	239	237	38	74	340	15,2	7	1,08	12,40	45	g	-	6,92	3,12	9,0	65	25	90	15							
69	59	110	108	6	11	340	4,8	3	0,96	12,23	3	-	-	6,20	2,40	5,8	0	25	25	14							
70	75	154	155	6	12	345	6,9	4	1,03	12,63	13	-	-	6,56	2,76	6,9	5	25	30	17							
71	119	226	222	122	230	345	11,6	6	1,05	12,33	47	g	-	6,90	3,10	8,6	70	25	95	15							
72	56	74	76	10	14	345	9,2	5	1,05	12,10	19	-	-	6,34	2,54	6,5	20	25	45	8							
73	250	450	420	143	257	270	18,1	8	1,24	1																	

Tabelle 4  
Zusammenstellung der Meßergebnisse

Standort: Scharhörnbalje									
Lfd. Nr.	Suspension			Wind			Tide		Temperatur
	$\bar{C}$ [-]	$\bar{C}_C$ [mg/l]	$\bar{C}_{CT}$ [mg/l]	$\bar{R}_T$ [Grad]	$\bar{V}_T$ [m/s]	$\bar{V}_{TB}$ [Bft]	$K_T$ [-]	$\tau_T$ [h]	$T_C$ [°C]
Sektor: 350°-70°									
1	89	192	166	30	8,6	5	0,96	12,03	15
2	94	170	168	25	9,0	5	0,99	12,33	14
3	74	98	98	10	9,4	5	1,09	12,52	7
4	98	120	119	20	11,3	6	1,02	12,37	6
5	102	125	121	20	11,4	6	0,96	12,10	6
6	122	149	147	20	12,6	6	0,98	12,32	6
7	78	96	94	25	10,6	5	0,95	12,28	6
8	74	92	91	35	8,9	5	0,96	12,33	6
9	111	176	173	70	12,5	6	0,91	12,27	10
Sektor: 60°-120°									
1	54	85	83	80	10,0	5	0,92	12,15	10
2	42	66	66	90	10,6	5	0,94	12,40	10
3	111	176	173	70	12,5	6	0,91	12,27	10
4	45	71	70	70	13,7	6	0,91	12,28	10
5	53	112	111	95	9,7	5	0,94	12,33	18
6	32	68	67	90	11,2	6	0,92	12,22	18
7	64	136	135	100	12,6	6	0,93	12,37	18
8	45	93	92	100	11,5	6	0,96	12,38	17
9	18	37	37	75	8,4	5	0,98	12,50	17
10	15	31	31	70	4,2	3	0,99	12,60	17
11	29	38	36	110	6,9	4	0,93	11,78	7
12	32	51	50	70	4,9	3	0,93	12,33	10
Sektor: 110°-220°									
1	18	34	35	130	9,5	5	0,97	12,73	14
2	23	43	42	130	11,6	6	0,87	12,18	14
3	25	47	48	130	12,4	6	0,92	12,68	14
4	23	43	43	135	12,0	6	0,88	12,45	14
5	25	45	45	130	10,5	5	0,96	12,53	13
6	13	23	23	135	10,7	5	0,93	12,37	13
7	22	40	40	140	9,2	5	0,95	12,42	13
8	23	42	41	150	8,8	5	0,92	12,23	13
9	19	33	33	130	5,1	3	0,99	12,53	12
10	16	28	28	205	6,7	4	1,01	12,45	12
11	19	33	33	210	6,1	4	1,03	12,50	12
12	23	38	38	205	8,2	5	0,99	12,50	11
13	29	38	36	110	6,9	4	0,93	11,78	7
14	23	23	23	130	11,6	6	0,91	12,50	4
15	44	44	44	130	12,5	6	0,85	12,40	4
16	43	43	41	130	13,1	6	0,82	11,95	4
17	42	42	43	140	14,8	7	0,88	12,87	4

## 8. Verzeichnis der Symbole

	Dimension	
a	m	Mit $C_a$ korrespondierende Wassertiefe
a	-	Konstante
b	-	Konstante nach DILLO (1960)
b	-	Konstante
C	mg/l	Suspensionskonzentration (35 cm über Sohle)
$C_a$	mg/l	C in einer Wassertiefe $y = a$
$C_C$	mg/l	C bezogen auf 4 °C nach DILLO (1960)
$C_{HW}$	mg/l	C um Hochwasser
$C_{HWC}$	mg/l	$C_{HW}$ bezogen auf 4 °C Wassertemperatur nach DILLO (1960)
$\bar{C}$	mg/l	Mittelwert der Suspensionskonzentration einer Tide (35 cm über Sohle)
$\bar{C}_o$	mg/l	$\bar{C}$ bei Windstille
$\bar{C}_C$	mg/l	$\bar{C}$ bezogen auf 4 °C nach DILLO (1960)
$\bar{C}_{CT}$	mg/l	$\bar{C}_C$ bezogen auf mittlere Tidedauer (12,5 h)
$\bar{C}_{CT}$	mg/l	Aus $\bar{C}_{CT}$ gebildeter, auf $\bar{u}$ bezogener Mittelwert der Suspensionskonzentration
$\bar{C}_{CT_s}$	mg/l	Aus $\bar{C}_{CT}$ gebildeter Mittelwert der Suspensionskonzentration bei einsetzender Brandung auf den Rand- und Brandungswatten ( $\bar{V}_T = 11,5 \text{ m/s} = \bar{V}_s$ )
$\bar{C}_{\bar{V}_T}$	mg/l	Mittelwert der Suspensionskonzentration für ein Tideereignis mit mittlerer Windgeschwindigkeit $\bar{V}_T$ , bezogen auf 4 °C und mittlere Tideverhältnisse (12,5 h), 35 cm über Sohle
$\bar{C}_{CT\bar{V}_T}$		
$\bar{C}_{CH}$	mg/l	Auf 4 °C bezogener Mittelwert der Suspensionskonzentration zum Tidezeitpunkt, bezogen auf $\bar{H}$ um Hochwasser (35 cm über Sohle)
$\bar{C}_{CH}$	mg/l	Aus $\bar{C}_{CH}$ für Tidephasen (vor, um und nach Thw) gebildeter Mittelwert der Suspensionskonzentration, bezogen auf $\bar{H}$ um Hochwasser
$C_m$	mg/l	Mittelwert der Suspensionskonzentration in der Vertikalen
$C_w$	mg/l	Von außerhalb des Untersuchungsgebietes herangeführte Suspensionskonzentration („wash-load“)
$\bar{c}$	cm/s	Mittlere Wellenfortschrittsgeschwindigkeit
D	-	Relativer Anstiegswert der Suspensionskonzentration, bezogen auf $\bar{u}_s$ (einsetzende Brandung auf den Rand- und Brandungswatten: $D = 1,0$ )
$D_H$	N	Wellenerzeugte Turbulenzkräfte
d	m	Absolute Wassertiefe
$d_p$	m PN	Wassertiefe auf PN bezogen
d	mm	Korndurchmesser
$d_{50}$	mm	Korndurchmesser bei 50 % Siebdurchgang
F	-	Relativer Anstiegswert der Suspensionskonzentration, bezogen auf $\bar{V}_T$ (einsetzende Brandung auf den Rand- und Brandungswatten bei $\bar{V}_T = \bar{V}_s = 11,5 \text{ m/s}$ , $F = 1,0$ )
$F_{us+uH}$	N	Strömungserzeugte Schubkräfte
g	cm/s <sup>2</sup>	Erdbeschleunigung
H	cm	Wellenhöhe

$H_{1/3}$	cm	Kennzeichnende Wellenhöhe
$\bar{H}$	cm	Mittlere Wellenhöhe
$\bar{H}_{gmin}$	cm	Minimalwert $\bar{H}$ für grundberührenden Seegang
$\bar{H}_{bmin}$	cm	Minimalwert $\bar{H}$ für brechenden Seegang
$K_T$	-	Wert der Abweichung gegenüber einer Mittel tide (Mittel tide: $K_T = 1,0$ )
$K$	-	v. KARMAN-Konstante (0,4)
$L$	m	Wellenlänge
$\bar{R}_T$	°	Mittlere Windrichtung während des Meßzeitraumes und im Zeitraum 3 Stunden davor
$S_V$	km	Ideeller Stromweg
$S_{VT}$	km/Tide	Stromweg einer Tide, bezogen auf mittlere Tidedauer (12,5 h)
$T$	s	Wellenperiode
$T_C$	°C	Wassertemperatur der Probe
$t$	h	Tidezeitpunkt
$t_E$	h	Ebbdauer
$t_F$	h	Flutdauer
$t_M$	h	Dauer einer mittleren Tide von $T_{nw}$ bis $T_{nw}$
$t_T$	h	Tidedauer von $T_{nw}$ bis $T_{nw}$
$u$	cm/s	Strömungsgeschwindigkeit
$u_H$	cm/s	Horizontale Orbitalgeschwindigkeit
$u_S$	cm/s	$u$ aus Tide- und Triftströmung
$\bar{u}_H$	cm/s	Max. Mittelwert $u_H$ für $\bar{H}$ um Hochwasser
$\bar{u}_S$	cm/s	Mittelwert $u_S$ während einer Tide
$\bar{u}$	cm/s	Mittelwert der Strömungsgeschwindigkeit aus Überlagerung von $\bar{u}_H$ und $\bar{u}_S$
$\bar{u}_e$	cm/s	Mittelwert der überlagerten Strömungsgeschwindigkeit bei einsetzender Brandung auf den Rand- und Brandungswatten
$u_c$	cm/s	Kritische Schergeschwindigkeit
$\bar{V}_T$	m/s	{ Mittelwert der Windgeschwindigkeit während des Meßzeitraumes (Wasserführung) und im Zeitraum 3 Stunden davor
$\bar{V}_{TB}$	Bft	
$v$	cm/s	Vertikalgeschwindigkeit eines Sedimentkorns
$v_{ss}$	cm/s	Absinkgeschwindigkeit eines Sedimentkorns
$y$	m	Bezugswassertiefe
$z$	-	Exponent der Suspensionsverteilung nach ROUSE (1937)
$z$	m	Wassertiefe bei KERRSENS (1979)
$\epsilon$	cm <sup>2</sup> /s	Diffusionskoeffizient für Flüssigkeitsteilchen
$\epsilon_s$	cm <sup>2</sup> /s	Diffusionskoeffizient für suspendierte Feststoffteilchen
$\epsilon_{Z2L/Z2E}$	cm <sup>2</sup> /s	Sediment Diffusionskoeffizient
$\chi_{1-3}$	-	Diffusionsparameter
$\gamma$	g/cm <sup>3</sup>	Spezifisches Gewicht

## 9. Schriftenverzeichnis

- ANTFANG, H.: Wind- und Nebelverhältnisse im Elbemündungsgebiet. Hamb. Küstenf., H. 9, 1969.
- BECHTLER, W.: Stochastische Modelle des Transportes suspendierter Feststoffe. Wasserwirtschaft, H. 5, 1980.

- BIJKER, E. W. u. VELLINGA, F.: Sand Transport by Waves and Currents. Proc. of 15th Conf. on Coast. Eng., Honolulu, 1976.
- BROWN, C. B.: Sediment Transportation. John Wiley and Sons, Inc., New York, 1950.
- BÜSCHING, F.: Über Orbitalgeschwindigkeiten irregulärer Brandungswellen. Mitt. des Leichtweiß-Inst. der TU Braunschweig, H. 42, 1974.
- CHRISTIANSEN, H.: Über den Transport suspendierter Feststoffe in Ästuarien am Beispiel der Elbemündung bei Neuwerk. Hamb. Küstenf., H. 28, 1974.
- COLEMANN, N. L.: Flume Studies of the Sediment Transfer Coefficient. Water Resources Research, vol. 6, no. 3, June 1970.
- DETTE, H. H.: Wellenmessungen und Brandungsuntersuchungen vor Westerland/Sylt. Mitt. des Leichtweiß-Inst. der TU Braunschweig, H. 40, 1974.
- DETTE, H. H.: Ein Vorschlag zur Analyse eines Wellenklimas. Die Küste, H. 31, 1977.
- DILLO, H. G.: Sandwanderungen in Tideflüssen. Mitt. des Franzius-Inst. der TU Hannover, H. 17, 1960.
- EINSTEIN, H. A. and CHIEN, N.: Second Approximation to the Solution of the Suspended-Load Theory. Univ. Calif. Inst. Eng. Res., no. 3, 1954.
- EINSTEIN, H. A. and CHIEN, N.: Effects of Heavy Sediment Concentration Near the Bed on Velocity and Sediment Distribution. Univ. Calif. Inst. Eng. Res., no. 8, 1955.
- ENGELUND, F. and HANSEN, E.: A Monograph on Sediment Transport in Alluvial Streams. Teknisk Forlag, Copenhagen, Denmark, 1967.
- FÜHRBÖTER, A.: Über die Bedeutung des Lufteinschlags für die Energieumwandlung in Brandungszonen. Die Küste, H. 21, 1971.
- FÜHRBÖTER, A.: Einige Ergebnisse aus Naturuntersuchungen in Brandungszonen. Mitt. des Leichtweiß-Inst. der TU Braunschweig, H. 40, 1974.
- FÜHRBÖTER, A.: Sandbewegung im Küstenraum - Rückschau, Ergebnisse und Ausblick. DFG Forschungsbericht: Sandbewegung im Küstenraum, 1979.
- FÜHRBÖTER, A., DETTE, H. H. u. MANZENRIEDER, H.: In-situ-Untersuchungen der Erosionsstabilität und der Durchlässigkeit von Wattböden. Ber. Nr. 506 des Leichtweiß-Inst. der TU Braunschweig, 1981.
- GÖHREN, H.: Ein neues Dauerstrommeßgerät für den Einsatz im Flachwasserbereich. Wasserwirtschaft, H. 8, 1964.
- GÖHREN, H.: Ein neues Schöpfergerät für Schwebstoffuntersuchungen im Watt. Die Küste, Jg. 13, 1965.
- GÖHREN, H.: Beobachtungen über Schwebstoffkonzentrationen im Watt. Dt. Gewässerkundl. Mitt., Jg. 11, H. 1, 1967.
- GÖHREN, H.: Triftströmungen im Wattenmeer. Mitt. des Franzius-Inst. der TU Hannover, H. 30, 1968.
- GÖHREN, H.: Strömungsverhältnisse im Elbemündungsgebiet. Hamb. Küstenf., H. 6, 1969.
- GÖHREN, H.: Entwicklung eines integrierenden Wellenmeßgerätes. Hamb. Küstenf., H. 13, 1970.
- GÖHREN, H.: Studien zur morphologischen Entwicklung des Elbemündungsgebietes. Hamb. Küstenf., H. 14, 1970.
- GÖHREN, H.: Untersuchungen über die Sandbewegungen im Elbemündungsgebiet. Hamb. Küstenf., H. 19, 1971.
- GÖHREN, H. u. LAUCHT, H.: Entwicklung eines Gerätes zur Dauermessung suspendierter Feststoffe. Dt. Gewässerkundl. Mitt., H. 3, 1972.
- GÖHREN, H.: Hydrodynamische und küstenmorphologische Probleme bei der Planung des Tiefwasserhafens Neuwerk/Scharhörn. Jahrb. der HTG, Bd. 33, 1972/73.
- GÖHREN, H. u. LAUCHT, H.: Geräteentwicklung und Naturmessungen zur Erforschung des Materialtransportes im Wattenmeer. DFG Forschungsbericht: Sandbewegung im Küstenraum, 1979.
- GRAF, W. H.: Hydraulics of Sediment Transport. Verl. Mc-Graw-Hill, New York, 1971.
- GRY, H.: Das Wattenmeer bei Skallingen. No. 1: Quantitative Untersuchungen über den Sinkstofftransport durch Gezeitenströmungen. Folia Geographica Danica. Tom II, Kopenhagen, 1942.
- HALLIWELL, A. R. u. O'CONNOR, B. A.: Suspended Sediment in a Tidal Estuary. 10th Conf. on Coast. Eng., Tokyo, Proc., Vol. 1, 1966.
- HOM-MA, M., HORIKAWA, K. u. KOMORI, S.: Response Characteristics of an Under-Water Wave Gauge. 10th Conf. on Coast. Eng., Tokyo, Proc., Vol. 1, 1976.

- HORIKAWA, K.: Present State of Coastal Sediment Studies. Mitt. des Leichtweiß-Inst. der TU Braunschweig, H. 56, 1977.
- HUNDT, C., KÖNIG, D. u. REINECK, H.-E.: Die voraussichtlichen sedimentologischen Veränderungen im Neuwerker Watt infolge der geplanten Dammbauten für das Hafenprojekt Scharhörn. Die Küste, H. 30, 1977.
- HYDROWERKSTÄTTEN GmbH, Kiel: Baubeschreibung und Bedienungsanweisung des Schwebstoffmeßgerätes Nr. 419/A. Unterlagen Strom- und Hafengebäude, Hamburg, 1974.
- HYULSTRÖM, F.: Studies of the Morphological Activity of Rivers as illustrated by the River Fyris. Bull. of the Geol. Institution of the Univ. of Upsala, 1935.
- INTERAGENCY COMMITTEE: Some Fundamentals of Particle Size Analysis. A Study of Methods Used in Measurement and Analysis of Sediment Loads in Streams. Rep. No. 12, St. Anthony Falls Hydraulic Laboratory, Minneapolis, 1957.
- JACKSON, W. H.: An Investigation into Silt in Suspension in the River Humber. The Dock and Harbour Authority, 1964.
- JAKUSCHOFF, P.: Schwebstoffbewegung in Flüssen in Theorie und Praxis. Wasserwirtschaft, Jg. 25, 1932.
- KERSENS, P. J. M., PRINS, A. u. RIJN, L. C. VAN: Model of Suspended Sediment Transport. Waterloopkundig Lab. Pub., No. 221, 1979.
- KÜHL, H.: Wassertemperatur, Salzgehalt u. a. chemische Faktoren an der Alten Liebe in Cuxhaven im Jahr 1972. Veröffentl. des Inst. für Küsten- und Binnenfischerei, 1973.
- LANE, E. W., CARLSON, E. J. u. MANSON, O. S.: Low Temperature increases sediment Transportation in Colorado River. Civil Eng., Sept. 1949.
- LAUCHT, H.: Neuwerk/Scharhörn, Industriehafen am tiefen Wasser. Schriftenr. der Behörde für Wirtschaft, Verkehr u. Landwirtschaft der Freien u. Hansestadt Hamburg, 1970.
- LAUCHT, H.: Entwicklung eines automatischen Schwebstoffmeßgerätes für den Brandungsbeereich. DFG Forschungsbericht: Sandbewegung im Küstenraum, 1971.
- LEIGHLY, J. B.: Toward a Theory of the Morphology Significance of Turbulence in the Flow of Water in Streams. Univ. Calif., Pub. Geogr., Vol. 6, No. 1, 1932.
- LINKE, G.: Über die geologischen Verhältnisse im Gebiet Neuwerk/Scharhörn. Hamb. Küstenf., H. 17, 1970.
- LUCHT, F.: Hydrographische Untersuchungen in der Brackwasserzone der Elbe. Dt. Hydrogr. Zeitung, Bd. 6, 1953.
- LUCHT, F.: Hydrographie des Elbe-Ästuas. Arch. für Hydrobiologie, Supl. Bd. XXIX, 1964.
- MADSON, O. S. u. GRANT, W. D.: Sediment Transport in the Coastal Environment. Parsons Lab. Wat. Res. and Hydrodyn. MIT., Cambridge/Mass., Rep. No. 209, 1976.
- McNOWN, J. S. and LIN, P. N.: Sediment Concentration and Fall Velocity. Proc. 2nd Midwestern Conf. on Fluid Mech., Ohio State Univ., Columbus, Ohio, 1952.
- NELSON, M. E. u. BENEDICT, P. C.: Measurement and Analysis of Suspended Sediment Loads in Streams. Proc. A.S.C.E., Vol. 76, 1931.
- NIEBUHR, W.: Beobachtungen über den Sandtransport in der unteren Ems. Die Küste, Jg. 4, 1955.
- O'CONNOR, B. A.: Mathematical Model of Sediment Distribution. Proc. 14th Congr. of the IAHR, Vol. 4, 1971.
- PLATH, M.: Ein im Gezeitenbereich des Wattenmeeres selbsttätig arbeitendes Sinkstoff-Schöpfgerät und die Bedeutung der Wattfauna für die Bildung von Sinkstoffen. Die Küste, Jg. 13, 1965.
- POSTMA, H.: Transport and Accumulation of Suspended Matter in the Dutch Wadden Sea. Netherlands Journ. of Sea Res., Vol. 1, 1961.
- RAUDKIVI, A. J.: Loose Boundry Hydraulics. Verl. Pergamon Press, 2. Aufl., London, 1976.
- RAUDKIVI, A. J.: On Sediment Transport in Coastal Region. Mitt. des Leichtweiß-Inst. der TU Braunschweig, H. 56, 1977.
- REINECK, H.-E.: Die Größe der Umlagerungen im Neuwerk/Scharhörner Watt. Hamb. Küstenf., H. 33, 1975.
- ROUSE, H.: Modern Conception of the Mechanics of Fluid Turbulence. Trans. A.S.C.E., Vol. 102, 1937.
- ROY, S. C.: Hydraulische Untersuchungen im Hooghly-Ästuar. Mitt. des Franzius-Inst. der TU Hannover, H. 32, 1969.
- SCHMIDT, W.: Der Massenaustausch in freier Luft und verwandte Erscheinungen. Probl. der Kosmischen Physik, Bd. 7, 1925.

- SCHRADER, J. P.: Kennzeichnende Seegangsrößen für drei Meßpunkte in der Elbemündung. Hamb. Küstenf., H. 8, 1968.
- SIEFERT, W.: Sturmflutvorhersage für den Tidebereich der Elbe aus dem Verlauf der Windstaukurve in Cuxhaven. Mitt. des Franzius-Inst. der TU Hannover, H. 30, 1968.
- SIEFERT, W.: Seegangsbestimmungen mit Radar und nach Luftbildern. Hamb. Küstenf., H. 7, 1969.
- SIEFERT, W.: Salzgehaltsverhältnisse im Elbemündungsgebiet. Hamb. Küstenf., H. 15, 1970.
- SIEFERT, W.: Die Seegangsverhältnisse im Elbemündungsgebiet. Hamb. Küstenf., H. 18, 1971.
- SIEFERT, W.: Windmessungen auf Scharhörn 1966-1970. Hamb. Küstenf., H. 24, 1972.
- SIEFERT, W.: Über den Seegang in Flachwassergebieten. Mitt. des Leichtweiß-Inst. der TU Braunschweig, H. 40, 1973.
- SIEFERT, W.: Über die Seegangsintensität im Bereich der geplanten Dämme zwischen der Küste und Neuwerk (unveröff.). Forsch.- u. Vorarb.-St. Neuwerk, Planungsstudie Nr. 27, 1974.
- SIEFERT, W.: Anwendungsanleitung Sturmflutvorhersage für Hamburg. Unterlagen Strom- und Hafenaufbau, Hamburg, 1979.
- SÜNDERMANN, J.: Mathematische Modellierung des Sedimenttransportes. Vortragsveranstaltung des KFKI, SFB 79, 1978.
- VANONI, V. A. et al.: Resistance Properties of Sediment - Loaden Streams. Trans. A.S.C.E., Vol. 125/I, 1960.
- VANONI, V. A.: Sedimentation Engineering. A.S.C.E.-Manuals and Rep. of Eng., Pract.-No. 54, 1977.
- VICK, F.: Über die Erfassung des Sinkstofftransports in Tideflüssen. Wasserwirtschaft, Jg. 43, 1952.
- VOLLBRECHT, K. u. WÜNSCHE, B.: Dynamik der Sandbewegung vor Sylt - Suspensionstransport in der Brandungszone. DFG Forschungsbericht: Sandbewegung im Küstenraum, 1979.
- WIEGEL, R. L.: Oceanographical Engineering. Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1964.
- WOHLENBERG, E.: Der horizontale Wasserschöpfer. Dt. Hydrogr. Zt. III, H. 5/6, 1950.
- WOHLENBERG, E.: Sinkstoff, Sediment und Anwachs am Hindenburgdamm. Die Küste, Jg. 2, H. 2, 1953.
- WÜNSCHE, B.: Suspensionstransport in der Brandungszone. VDI-Zt., R. 4, Nr. 26, 1976.
- ZANKE, U.: Neuer Ansatz zur Berechnung des Transportbeginns von Sedimenten unter Strömungseinfluß. Mitt. des Franzius-Inst. der TU Hannover, H. 46, 1977.
- ZENKOVICH, V. P.: Processes of Coastal Development. Oliver and Boyd, Edinburgh and London, 1967.