

# 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-2012-00000035

# 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 35 – 1980

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

ISSN 0452-7739  
ISBN 3-8042-0250-0

Anschriften der Verfasser dieses Heftes:

BARTHEL, Volker, Dipl.-Ing., Birkenweg 6A, 2857 Langen; FAHSE, Helmut, Dipl.-Ing., Bauoberrat, Moorweidenstraße 14, 2000 Hamburg 13; FIGGE, Klaus, Dr., Oberregierungsrat, Bernhard-Nocht-Straße 78, 2000 Hamburg 4; HOLZ, Klaus-Peter, Prof. Dr.-Ing., Löwenstraße 13, 3000 Hannover 1; KÖSTER, Rolf, Prof. Dr., Fridtjof-Nansen-Weg 8, 2300 Kronshagen; LUCK, Günter, Dr.-Ing., An der Mühle 4a, 2982 Norderney; MIESSNER, Fritz, Ing. (grad.), Deichstraße 12, 2190 Cuxhaven; NIEMEYER, Hanz Dieter, Dipl.-Ing., Landstr. 63a, 2980 Lütetsburg; REINECK, Hans-Erich, Prof. Dr., Schleusenstraße 39a, 2940 Wilhelmshaven; RICHTER, Hans-Henning, Dipl.-Ing., Am Hafen 40, 2253 Tönning; SCHÄFER, Peter, Dipl.-Ozeanograph, Bartelsteiner Weg 11, 2000 Hamburg 70; SIEFERT, Winfried, Priv.-Doz. Dr.-Ing., Lentzkai, 2190 Cuxhaven; TAUBERT, Achim, Dipl.-Ing., Oberreg.Baurat, Herzog-Adolf-Straße 1, 2250 Husum; THIEL, Hjalmar, Dr., Zeiseweg 9, 2000 Hamburg 50; WIELAND, Peter, Dipl.-Ing., Hafenkoog, 2242 Büsum; WUNDES, Rolf-Dietrich, Dr.-Ing., Kaiserslauterner Str. 15, 2800 Bremen 44.

---

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: Ministerialdirigent W. BERGMEIER.

Geschäftsführer: Ltd. Baudirektor J. SINDERN, Feldstraße 251/253, 2300 Kiel.

Schriftleiter: Erster Baudirektor Dr.-Ing. H. GÖHREN, Dalmannstraße 1-3, 2000 Hamburg 11.

## Inhaltsverzeichnis

LUCK, Günter, Dr.-Ing. SCHÄFER, Peter, Dipl.-Ozeanograph Hydrodynamisch-numerische Modelle des Kuratoriums für Forschung im Küsten- ingenieurwesen (KFKI) . . . . .	1
REINECK, Hans-Erich, Prof. Dr. SIEFERT, Winfried, Dr.-Ing. Faktoren der Schlickbildung im Sahlenburger und Neuwerker Watt . . . . .	26
HOLZ, Klaus-Peter, Prof. Dr.-Ing. WUNDES, Rolf-D., Dr.-Ing. Hybride Modelle – Ein neuer Weg im wasserbaulichen Versuchswesen . . . . .	52
BARTHEL, Volker, Dipl.-Ing. Seegang in einem Ästuar am Beispiel der Außenweser . . . . .	57
SIEFERT, Winfried, Dr.-Ing. FAHSE, Helmut, Dipl.-Ing. MIESSNER, Fritz, Ing. (grad.) RICHTER, Hans-Henning, Dipl.-Ing. TAUBERT, Achim, Dipl.-Ing. WIELAND, Peter, Dipl.-Ing. Die Strömungsverhältnisse vor der Westküste Schleswig-Holsteins – Ergebnisse eines KFKI-Meßprogramms . . . . .	147
FIGGE, Klaus, Dr. KÖSTER, Rolf, Prof. Dr. THIEL, Hjalmar, Dr. WIELAND, Peter, Dipl.-Ing. Schlickuntersuchungen im Wattenmeer der Deutschen Bucht – Zwischenbericht über ein Forschungsprojekt des KFKI . . . . .	187
LUCK, Günter, Dr.-Ing. NIEMEYER, Hanz Dieter, Dipl.-Ing. Albert Brahms und die Orkanflut von 1717 . . . . .	205

# Hydrodynamisch-numerische Modelle des Kuratoriums für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI)

Von Günter Luck und Peter Schäfer

## Zusammenfassung

In den Jahren 1977 bis 1979 wurde für die Küsten der Deutschen Bucht ein System von HN-Modellen entwickelt. Nachdem zwei Modelle fertiggestellt und zwei weitere in Arbeit sind, wird hier über erste Resultate und daneben über die organisatorischen Voraussetzungen des Vorhabens berichtet. Für eine Normaltide können Wasserstände sowie Strömungsgeschwindigkeiten und -richtungen im Modell voll befriedigend wiedergegeben werden.

Es ist beabsichtigt, diese Modelle für zukünftige Aufgaben des See- und Küstenwasserbaues wie auch im Zusammenhang mit Untersuchungen natürlicher Prozesse zu nutzen. Das Modellsystem ist so angelegt, daß solche Aufgaben in feinstmöglichen Gittern behandelt werden können. Die Integration spezieller Modelle in das Gesamtsystem gewährleistet vor allem eine optimale Sicherheit bei der Randwertbeschickung.

## Summary

*In the years 1977 through 1979 for the coasts of the German Bay a system of HN-models has been elaborated. After two models being completed and two in preparation, besides organisatory conditions first results are reported. For normal tides the natural conditions concerning water levels and currents can be reproduced in the model with satisfactory to excellent results.*

*It is intended later to utilize these models for projects of the water management as well as for the judgement of natural phenomena. The model system will permit then to handle such problems in a very fine grid. The integration of special models into the system gives an optimal security of the boundary values.*

## Inhalt

1. Vorbemerkung . . . . .	2
2. Vorgeschichte und Beginn der Untersuchungen . . . . .	2
3. Organisatorische Abwicklung der Arbeiten . . . . .	3
4. Zielsetzung des Vorhabens . . . . .	3
5. HN-Modelle im Küsteningenieurwesen . . . . .	4
6. Theorie der HN-Modelle . . . . .	6
6.1 Einführung . . . . .	6
6.2 Numerische Verfahren . . . . .	7
7. Anwendung von HN-Modellen . . . . .	8
8. Die HN-Modelle des KFKI . . . . .	9
8.1 Beschreibung . . . . .	9
8.2 Ergebnisse . . . . .	12
9. Ausblick . . . . .	14
10. Schriftenverzeichnis . . . . .	25

## 1. Vorbemerkung

In den Jahren 1977, 1978 und 1979 wurden für die Küsten der Deutschen Bucht hydrodynamisch-numerische Modelle (HN-Modelle) entwickelt, von welchen zwei inzwischen fertiggestellt sind. Zwei weitere werden zur Zeit vorbereitet. Träger dieses Vorhabens, das durch den Bundesminister für Forschung und Technologie (BMFT) erheblich gefördert wird, ist das Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (ROHDE, 1979).

Nachdem die Arbeiten nunmehr so weit gediehen sind, daß auch erste Ergebnisse mitgeteilt werden können, erscheint es angebracht, über die mit der Herstellung der Modelle verbundenen Absichten des KFKI, die organisatorische Abwicklung der Untersuchungen und nicht zuletzt über die HN-Modelle selbst sowie die zu ihrer Entwicklung gewählten Verfahren zu berichten.

## 2. Vorgeschichte und Beginn der Untersuchungen

Bereits Ende 1973 wurde dem KFKI vorgeschlagen, die Erstellung eines Systems von HN-Modellen zur Berechnung von Bewegungsvorgängen in den Küstengewässern der Deutschen Bucht in Erwägung zu ziehen. Grundlage der hierzu entwickelten Vorstellungen war eine durch den Forschungsleiter Küste und den damaligen Ordinarius für Meereskunde an der Universität Hamburg ausgearbeitete Denkschrift, die für die später einsetzenden Arbeiten richtungweisend blieb. In der Sitzung des KFKI vom 23. März 1976 wurde dann beschlossen, im Sinne dieser Denkschrift tätig zu werden. Zur Vorbereitung des Vorhabens, dessen Beginn auf den 1. Januar 1977 festgelegt wurde, sollte eine Projektgruppe in folgender Zusammensetzung tätig zu sein:

Dr. LUCK, Land Niedersachsen (Obmann)  
Baudirektor Dr. VOLLMERS, Wasser- und Schifffahrtsverwaltung (WSV)  
Regierungsbaudirektor CAROW, Land Schleswig-Holstein  
Dr. SIEFERT, Freie und Hansestadt Hamburg  
Bauberrat WOHLLEBEN, Freie Hansestadt Bremen

Die „Projektgruppe HN-Modelle“ trat erstmals am 14. April 1976 zusammen, um insbesondere die Zielsetzung des Vorhabens zu beraten. Grundlage der Beratung war die bereits erwähnte Denkschrift. Folgende, für die Vornahme der Arbeiten unerläßliche Voraussetzungen waren damals durch das KFKI bereits geschaffen worden:

1. Die verwaltungsmäßige Abwicklung (Personal, Mittelbewirtschaftung u. ä.) der Arbeiten durch die Forschungsstelle für Insel- und Küstenschutz des Landes Niedersachsen, Norderney,
2. Bereitstellung von Räumen mit Inventar und Bürobedarf durch die Bundesanstalt für Wasserbau – Außenstelle Küste (BAW-AK),
3. Zusage des BMFT, das Vorhaben zunächst über drei Jahre zu fördern (1977 bis 1979).

Auf Wunsch des KFKI übernahm Prof. Dr. W. HANSEN, Hamburg, die wissenschaftliche Betreuung der Untersuchungen. – Auf der Grundlage der Besprechungsergebnisse vom 14. April 1976, die von den Mitgliedern der Projektgruppe anschließend nochmals schriftlich präzisiert worden waren, erarbeitete dann der Obmann ein Programm, das am 26. Mai 1976 beraten wurde und dann endgültig fertiggestellt werden konnte, so daß es zur Sitzung des KFKI am 8. September 1976 vorlag. Nachdem das KFKI dem Programm zugestimmt hatte, wurden die vorbereitenden Arbeiten wie Finanzierung, Personalanwerbung, Beschaffung

sowie Anmietung von Geräten usw. betrieben, so daß die Untersuchungen planmäßig am 1. Januar 1977 anlaufen konnten.

### 3. Organisatorische Abwicklung der Arbeiten

Da in den im KFKI zusammenarbeitenden Verwaltungen entsprechende Fachkräfte nicht vorhanden waren oder für die HN-Untersuchungen nicht freigemacht werden konnten, war vorgesehen worden, eine Arbeitsgruppe mit je zwei Wissenschaftlern und wissenschaftlichen Mitarbeitern ins Leben zu rufen. Die Gruppe nahm ihre Arbeit am 1. Januar 1977 auf. Auch aus fachlichen Gründen (Rechenzentrum Nähe DHI, wissenschaftliche Kontakte) wurde sie in Hamburg tätig.

Zur Vornahme der Rechnungen wurde eine Terminalstation mit den entsprechenden Peripheriegeräten beschafft und eine Postleitung zum Rechenzentrum der BAW in Karlsruhe angemietet, wo die Rechenarbeiten ausgeführt werden (KRÖGER und ZIERZ, 1980).

Für die Gesamtarbeiten war ursprünglich ein Zeitraum von fünf Jahren veranschlagt worden. Um das Vorhaben hinsichtlich des endgültigen Erfolges abschätzen zu können, wurden zunächst drei Jahre vorgesehen (1977 bis 1979). Nachdem sich schon Mitte 1979 übersehen ließ, daß die anfangs gesteckten Ziele bis Ende des Jahres nicht erreichbar sein würden, andererseits die vorliegenden Ergebnisse eine Weiterführung der Arbeiten gerechtfertigt erscheinen ließen, wurden dann zwei weitere Jahre (1980 bis 1981) für die Fortsetzung der Untersuchungen vorgesehen.

Die „Projektgruppe HN-Modelle“ des KFKI blieb auch nach Fertigstellung des Untersuchungsprogramms tätig. Ihr oblag es, den Fortschritt der Arbeiten laufend zu beurteilen und die Erfahrungen aus den Naturmessungen im Küstenvorfeld in die Modellentwicklung einfließen zu lassen. Sie traf sich seit Beginn des Vorhabens zweimal im Jahr, um mit der Arbeitsgruppe deren Ergebnisse zu erörtern. Zu diesen Sitzungen wurden auch interessierte Gäste und Fachleute aus dem numerischen Modellwesen eingeladen. Infolge anderer dienstlicher Verwendung mußten Baudirektor Dr. VOLLMERS und Regierungsbaudirektor CAROW die Projektgruppe verlassen. Sie wurden ersetzt durch Dr. WISMER (WSV) und Dr. RENGER (Schleswig-Holstein). Der Forschungsleiter Küste, Dr. ROHDE, war bei den meisten Sitzungen zugegen.

### 4. Zielsetzung des Vorhabens

In dem vom KFKI gebilligten Programm der „Projektgruppe HN-Modelle“ ist vorgesehen, aus einem vorhandenen Nordseemodell (Hansen, 1977) ein Basismodell „Deutsche Bucht“ zu entwickeln, dessen westlicher Rand etwa mit einem durch Schiermonnikoog verlaufenden Meridian identisch ist und dessen nördlicher südlich Blaavandshuk von Ost nach West verläuft. Aus diesem Basismodell waren dann folgende Regionalmodelle zu entwickeln (Abb. 1):

1. Nordfriesisches Wattenmeer,
2. Innere Deutsche Bucht von der Eider bis Wangerooge mit den Ästuaren von Elbe, Weser und Jade,
3. Ostfriesische Küste mit vorgelagerten Inseln und Emsästuar.

Die Regionalmodelle wiederum sollten die Grundlage engmaschiger Lokalmodelle sein, die für konkrete Fragestellungen oder Bauvorhaben des See- und Küstenwasser-

baues gesondert zu entwickeln sind. In diesen Fällen könnten auch kombinierte Studien von hydraulischen und mathematischen Modellen (Hybridmodelle) empfehlenswert sein.

Im Programm der „Projektgruppe HN-Modelle“ sind die Anwendungsmöglichkeiten der Modelle in allgemeiner Form wie folgt gefaßt worden:

1. Ablauf von Sturmtiden an den Küsten mit den Strömen Elbe, Weser und Ems,
2. Einfluß wasserbaulicher Eingriffe auf Sturmtiden und Normaltiden vor den Küsten und in den Ästuaren,
3. Einfluß und Entwicklung natürlicher sowie künstlicher morphologischer Änderungen auf das Tidegeschehen in den Strömen,
4. Einfluß von Tideänderungen in der Nordsee auf den Ablauf von Normaltiden in den Ästuaren und Unterläufen der Ströme,
5. Ausbreitungsvorgänge (Kühlwasser, Abwasser, Öl aus Havarien u. ä.).

Darüber hinaus können die Modelle im Rahmen von Untersuchungen zu Transportvorgängen der Feststoffe, für örtlich verbesserte Sturmflutvorhersagen, Verursacherfeststellungen bei unerlaubten Einleitungen von Öl oder Abwasser usw. eingesetzt werden.

Vorausschauend wurde – über die eigentliche Erstellung der Basis- und Regionalmodelle hinausgehend – gefordert:

1. Die ständige Weiterentwicklung der HN-Modelle muß – dem wissenschaftlichen Fortschritt im nationalen wie internationalen Bereich folgend – sichergestellt sein.
2. Die Naturähnlichkeit der Modelle ist im Rahmen der gestellten Untersuchungen laufend zu überprüfen.
3. Die Untersuchungen müssen in engem Kontakt mit den im Küsteningenieurwesen tätigen Fachleuten vorgenommen werden.

Diese Forderungen wurden in der Erkenntnis gestellt, daß die Entwicklung der HN-Modelle im Hinblick auf deren Nutzenanwendung eine über den Zeitraum der Modellerstellung verbleibende Aufgabe sein wird, da sowohl natürliche Vorgänge als auch künstliche Eingriffe örtlich Änderungen des Tidegeschehens oder des morphologischen Formeninventars bewirken können, die weit über deren unmittelbaren Wirkungsbereich hinausreichen. Insofern müssen die Modelle im Sinne fortdauernder Aktualität und unter Einbeziehung jeweils neuer wissenschaftlicher Erkenntnisse ständig unter Kontrolle gehalten werden. Auch in der Erwartung, daß insbesondere die Regionalmodelle Grundlage der in naher und weiterer Zukunft zu erstellenden Lokalmodelle sein werden, ist auf die so umrissenen Forderungen nicht zu verzichten.

## 5. HN - Modelle im Küsteningenieurwesen

Numerische Modelle haben sich bisher im Gegensatz zur Ozeanographie im Küsteningenieurwesen nicht voll durchsetzen können. Ursächlich scheinen folgende Gründe diese Entwicklung bewirkt zu haben:

1. Dem Ingenieur erscheint im Verhältnis zum hydraulischen das numerische Modell zunächst zu abstrakt, und er bevorzugt daher im Rahmen seiner Planungen das erstere. Weiterhin ist ihm die rein mathematische Behandlung von Strömungs- und Tidevorgängen erfahrungsgemäß wesensfremd. So werden z. B. für die örtlichen Sturmflutvorhersagen bei den Nordseeanrainern numerische Modelle nicht verwendet (SIEFERT, 1980).
2. Für die Herstellung numerischer Modelle – insbesondere im amphibischen Flachwasserbereich des Küstenvorfeldes – sind oftmals Voraussetzungen zu schaffen (Pegel- und Strömungsmessgeräte auf den Rändern), die die Leistungsfähigkeit der im Küstenwasserbau tätigen Dienststellen überschreiten.

3. Die Naturähnlichkeit vorhandener Modelle genügt nicht immer den zu stellenden Forderungen.
4. Das Modell befriedigt nur im Rahmen der gewählten Gitterabstände. Beispielsweise kann ein durch Gitterpunkte nicht erfaßter Priel modellmäßig auch nicht nachgebildet werden.

Insgesamt scheinen hier einige Mißverständnisse dessen, was ein numerisches Modell leisten kann und was nicht, zugrunde zu liegen. Zunächst ist festzustellen, daß das numerische Modell ebenso wie das hydraulische lediglich eine Planungs- oder Entscheidungshilfe ist und weiterführender Arbeiten nicht enthebt. Weiterhin ähneln sich hydraulische und numerische Modelle insbesondere in den nur schwer zu meisternden Reibungsproblemen, die im ersteren durch Einbauten (Stacheldraht, Betonwürfel u. ä.) und im letzteren durch entsprechende Wahl von Reibungskoeffizienten einer Lösung zugeführt werden. Der Nachteil beider Modelltechniken beruht auch darauf, daß sie mit unveränderlichen bzw. nicht vorausschaubaren Änderungen (z. B. Morphologie) der Randbedingungen zu arbeiten haben.

Unter Berücksichtigung dieser im hydraulischen wie im numerischen Modell gleichgerteten Ausgangssituation sind die Modellergebnisse gleichermaßen zu bewerten. Der Vorteil des numerischen Modells ist vor allem dadurch gegeben, daß es über Räume ausgeweitet werden kann, in denen der Einsatz eines hydraulischen Modells häufig nicht mehr sinnvoll erscheint.

Die gerätetmäßigen Ansprüche für die Herstellung numerischer Modelle scheinen in der Tat vielfach überhöht zu sein. Oftmals wird hier von der Modellseite her eine Genauigkeit angestrebt, die nicht mehr in gesundem Verhältnis zur Wirklichkeit steht, zumal das Modell in der Mehrzahl der Fälle der prognostischen Beurteilung unter dann geänderten Randbedingungen dient. In diesem Zusammenhang sollte auch bedacht werden, daß die Natur im amphibischen Bereich – insbesondere für die Reproduktion der Strömungsvorgänge – zahlreiche Hinweise (Formeninventar, Bodenverhältnisse, pflanzliche und tierische Besiedlung u. ä.) auf die Grenzen des Möglichen gibt, die bei der Erstellung von Modellen berücksichtigt werden können.

Eng verbunden hiermit ist die Herstellung des Naturzustandes im numerischen Modell. Im allgemeinen wird der Sonderfall (z. B. Sturmflutwasserstände oder Bauwerkseinflüsse) aus einer Normalflut entwickelt, für welche die Naturähnlichkeit unerläßliche Voraussetzung ist. Hierbei ist es nicht wesentlich, daß Wasserstände oder Strömungsgeschwindigkeiten und -richtungen in Natur und Modell völlig übereinstimmen. Wesentlich ist vielmehr, daß der allgemeine Verlauf des Geschehens richtig erfaßt ist. Auch hierfür gibt die Natur zahlreiche Hinweise. So wird die Strömungsgeschwindigkeit in Richtung auf die Wattwasserscheiden verzögert, in Wattbereichen mit stark schlickigem Sediment sind die Geschwindigkeiten geringer als in sandigem, in Wattgebieten mit z. B. Seegrassbeständen werden die geringsten Strömungsgeschwindigkeiten erreicht usw. Die richtige Wiedergabe dieser Vorgänge, die auch in zahlreichen Naturmeßdaten dokumentiert sind, die aber nur in den Gitterpunkten zum Ausdruck kommen können, macht das Modell bereits anwendungsfähig, auch wenn Natur- und Modellwerte voneinander abweichen. Das Maß der tolerierbaren Abweichungen ist dabei jeweils im einzelnen zu beurteilen.

Es liegt in der Natur der numerischen Verfahren, daß Rechenergebnisse nur in den Gitterpunkten gegeben werden können. Entsprechend müssen die Gitternetze der Aufgabe angepaßt werden. Eine derartige Anpassung erfordert eine eingehende Kenntnis des Geschehens im Küstenvorfeld und kann daher nur in gemeinsamer Arbeit von Numerikern und küstenerfahrenen Ingenieuren betrieben werden.

Mit der Bildung der „Projektgruppe HN-Modelle“ durch das KFKI ist im Rahmen der hier geschilderten Untersuchungen die Zusammenarbeit von Modellfachleuten und Küstenin-

genieuren gewährleistet. Entsprechend sind die vorstehend gegebenen Hinweise in die numerischen Modelle eingearbeitet worden. Die erzielten Ergebnisse sind für den Küstennahbereich – soweit es bei den bisher gewählten Gitterabständen möglich ist – vollbefriedigend.

Konkret hätten die numerischen Modelle des KFKI – wären sie anwendungsreif gewesen – in jüngerer Vergangenheit z. B. bei folgenden Planungen sinnvoll eingesetzt werden können:

1. Abschätzung der Änderungen der Strömungsverhältnisse auf dem Juister Watt in Zusammenhang mit der Verlegung der Gasrohrleitung aus dem Ekofisk-Feld,
2. Berechnung der Tidewasserstände in der Ems nach Eindeichung der Leybucht,
3. Ermittlung des Einflusses künstlicher Rinnen auf Strömung und Sedimentation im Rahmen der Hafenanlagen auf Juist und Spiekeroog,
4. Bearbeitung von hydrologisch/morphologischen Entwicklungen im Zusammenhang mit den Planungen zum Dollarthafen,
5. Beurteilung von Ausbreitungsvorgängen bei Abwassereinleitungen (z. B. veenkoloniale Abwässer im Emsästuar und neuerdings Kaliabwässer in der Außenweser),
6. Abschätzung hydrologisch/morphologischer Vorgänge im Rahmen größerer Planungen des Hafenaufbaus (z. B. Neuwerk/Scharhörn), der Binnenentwässerung (z. B. Eidersperrwerk) oder des Küstenschutzes (z. B. Abdeichung der Nordstrander Bucht),
7. Vertriftung von Öl bei Tankerunfällen.

Die angeführten Beispiele zeigen ein breites Anwendungsspektrum von HN-Modellen im Rahmen der Aufgaben des Küsteningenieurwesens, und es ist davon auszugehen, daß sie auch in Zukunft in vielfacher Hinsicht nutzbringend angewandt werden können. Es sei aber nochmals darauf hingewiesen, daß das HN-Modell ebenso wie das hydraulische lediglich eine Planungshilfe ist und die Eigenarbeit der Ingenieure in den Wasserbauverwaltungen nicht überflüssig werden läßt.

## 6. Theorie der HN-Modelle

### 6.1 Einführung

Schon seit NEWTON sind Physiker, Mathematiker und Ingenieure bemüht, Verfahren zu entwickeln, die es gestatten, die Gezeitenerscheinungen im Weltmeer, in den Rand- und Nebenmeeren und den Tideflüssen qualitativ und quantitativ zu erfassen. Trotz aller Fortschritte ist es bisher nicht gelungen, die Ergebnisse der Gezeitentheorie mit den an den Küsten der Ozeane und Inseln gemessenen Wasserständen in Einklang zu bringen.

Begründet ist diese unbefriedigende Entwicklung in dem Versuch, mathematische Lösungen von idealisierten Ozeanen herzuleiten. Letztere weichen vor allem in der Morphologie und der Küstengestalt entscheidend von den natürlichen Meeren ab. Es hat sich aber gezeigt, daß gerade Tiefenverteilung und Küstenkonfiguration eines Meeres die Bewegungsvorgänge wesentlich beeinflussen. Erst durch den Einsatz numerischer Methoden wurde dieses Problem einer, wenn auch nur näherungsweise Lösung zugänglich. Noch bevor Computer zur Verfügung standen, berechnete DEFANT (1925) so die Gezeiten in der Adria. Er behandelte das Gebiet als kanalartiges Meer (eindimensional), indem die Bewegungen in Querrichtung gegenüber denen in Längsrichtung vernachlässigt werden. In großem Ausmaß verwendete LORENTZ (1926) die numerische Mathematik im Planungsstadium für die Abdeichung der Zuiderzee. Später wurde dann das Randwertverfahren (HANSEN, 1948) entwickelt, das wegen seiner Linearität getrennt auf die Partialtiden angewendet werden muß.

Da aber in küstennahen Gezeitenregionen eine enge Wechselwirkung zwischen den

Bewegungen in den Prielen und auf den Watten besteht, wurde es erforderlich, ein Verfahren zu entwickeln, das in Flachwasser- und Wattgebieten anwendbar ist und somit auch nichtlineare Effekte berücksichtigt.

## 6.2 Numerische Verfahren

Alle mathematischen Tidemodelle basieren auf den hydrodynamischen Differentialgleichungen von NAVIER und STOKES sowie der Kontinuitätsgleichung. Es sind grundsätzlich ein-, zwei- und dreidimensionale Modelle möglich. In den meisten Anwendungsfällen wird dieses Gleichungssystem so umgeformt, daß es für den Wasserstand  $\zeta$  und die zwei Geschwindigkeitskomponenten  $u$  und  $v$  in einem karthesischen Koordinatensystem gilt (zweidimensional). Die Gleichungen lauten dann in der Form von EULER:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - A \Delta u - f v + \frac{r u}{H} \sqrt{u^2 + v^2} + g \frac{\partial \zeta}{\partial x} &= K_x \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} - A \Delta v = f u + \frac{r v}{H} \sqrt{u^2 + v^2} + g \frac{\partial \zeta}{\partial y} &= K_y \end{aligned} \right\} \text{(Bewegungsgleichungen)}$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} H u + \frac{\partial}{\partial y} H v = 0 \text{ (Kontinuitätsgleichung)}$$

- mit  $H = h + \zeta$   
 $h =$  Tiefe unter NN  
 $A =$  Austauschkoeffizient  
 $f =$  Coriolisparameter  
 $r =$  Reibungskoeffizient  
 $g =$  Erdbeschleunigung  
 $K_x, K_y =$  Komponenten der äußeren Beschleunigung

Der Reibungsterm entspricht einem Ansatz von TAYLOR. In den Termen für die äußere Beschleunigung sind die Druckgradienten und Schubspannungen an der Oberfläche des Wassers enthalten.

Der Übergang von den Differentialgleichungen zu den einer numerischen Behandlung zugänglichen Differenzgleichungen ist abhängig von dem verwendeten Gitternetz. Die Benutzung eines regelmäßigen, im allgemeinen viereckigen Netzes führt zu der „finiten Differenzen-Methode“. Die unregelmäßigen Netze, meist dreieckig gestaltet, werden durch die „finite Elemente-Methode“ repräsentiert.

In den Differenzgleichungen sind die gesuchten Größen  $\zeta$ ,  $u$  und  $v$  für aufeinanderfolgende Zeiten so miteinander verknüpft, daß aus bekannten die unbekanntenen Werte bestimmt werden können. Jede Lösung eines Differenzgleichungssystems, das sowohl räumliche als auch zeitliche Inkremente enthält, unterliegt einem Stabilitätskriterium. Dieses sagt aus, wie groß das Verhältnis zwischen Zeitschritt und Ortsschritt in Abhängigkeit von den Koeffizienten des Gleichungssystems sein darf, damit seine Lösung konvergiert. Je nach Formulierung der Differenzen kann dasselbe Gleichungssystem gar nicht oder immer stabil sein. Bei Verwendung von einfachen zeitlichen und zentralen räumlichen Differenzen ist das Gleichungssystem als explizites Verfahren instabil, als implizites Verfahren dagegen immer stabil. Durch zeitliche Trennung der Bewegungsgleichungen von der Kontinuitätsgleichung – bei der Berechnung des Wasserstandes werden schon die Geschwindigkeitskomponenten des näch-

sten Zeitschritts verwendet – ergibt sich die Stabilitätsbedingung von COURANT, FRIEDRICHS und LEWY (1928):

$$\Delta t \leq \frac{\Delta s}{\sqrt{2gh}}$$

mit  $\Delta t$  = Zeitschritt,  $\Delta s$  = Ortsschritt. Dieses Kriterium muß für alle Gitterpunkte gelten. Das Verfahren ist aber nach wie vor explizit.

Gelegentlich kann es von Nutzen sein, im- und explizites Verfahren zu verknüpfen. Das geschieht mit Vorteil, wenn die Ortsschritte in x- bzw. y-Richtung verschiedene Größenordnung haben, wie z. B. bei einem Fluß. Dann wird in Richtung des kleineren Gitterabstandes implizit, in der anderen Richtung explizit gerechnet.

Vervollständigt wird das Gleichungssystem durch die Bestimmung und Formulierung der Randbedingungen. Es werden zwei Arten von Rändern unterschieden. Offene Ränder sind Begrenzungen des Modells, die aber keine Grenzen des Bewegungssystems darstellen. Die Vorgabe des Wasserstandes und des Gradienten einer Geschwindigkeitskomponente als Funktion der Zeit ist hier eine vollständige Randbedingung. Wird der Rand so gelegt, daß der Gradient der Tangential- oder der Normalkomponente der Geschwindigkeit identisch Null gesetzt werden kann, ist die Bedingung numerisch besonders einfach. Geschlossene Ränder sind absolute Grenzen des Bewegungssystems, die durch die Forderung einer verschwindenden Normalkomponente der Geschwindigkeit an diesen Stellen realisiert werden.

## 7. Anwendung von HN-Modellen

In der Praxis des Küsteningenieurwesens und der Küstenforschung ist häufig zu beurteilen, welchen Einfluß Bauwerke nach ihrer Fertigstellung auf ihre Umgebung ausüben werden. Hier interessiert vor allem das Ausmaß des Eingriffes in die Bewegungsvorgänge – also auf Wasserstände und Strömungen – in deren Wirkungsbereich.

Wesentliche Grundlage für die Feststellung möglicher Änderungen des Geschehens sind in solchen Fällen Naturmessungen zur Erfassung ungestörter Vorgänge. Sie lassen sich auf der Grundlage von Messungen unter Einführung von Analogieschlüssen und Indizien zwar qualifizieren, aber nur in weiten Grenzen quantifizieren. Einen Ausweg bietet hier unter anderem die Befragung der Natur durch das Experiment, z. B. in hydraulischen Modellen. Grundsätzlich stößt die Anwendung dieser Modelle im Bereich großer Maßstäbe auf Schwierigkeiten, die etwa durch die ablenkende Kraft der Erdrotation oder die Gestaltung der Steuereinrichtungen auf dem Rand zu einem Gezeitenmeer bedingt sind. Auch ist die Einbeziehung des Windes in das Modell ähnlichkeitsmechanisch noch nicht befriedigend gelöst. Hier bieten sich mathematische Modelle an. Der Einfluß der Corioliskraft und eines natürlichen Windfeldes sind simulierbar. Können die äußeren Kräfte vernachlässigt werden, so hängt die Lösung nur von der in das Modell eingegebenen Tiefenverteilung und den Randbedingungen ab. Besondere Probleme treten allerdings auf, wenn der Rand zeitlich veränderlich ist, wie im Watt. Durch eine geeignete Rechentechnik können aber auch das Trockenfallen und Überfluten im Modell erfaßt werden. Das HN-Verfahren ist sowohl für Flüsse als auch für Meere und sogar für den Weltozean anwendbar. Untersuchungsobjekte sind Gezeitenwasserstände, Gezeitenströme, allgemeine Zirkulation und windbedingte Bewegungen. Bei Erweiterung des Modells auf drei Dimensionen lassen sich auch vertikale Strömungsgradienten berücksichtigen.

Auch für Untersuchungen, die sich auf den Einfluß äußerer Eingriffe in Teilbereichen des Anwendungsgebietes beziehen, ist ein numerisches Modell geeignet. So lassen sich etwa als

„Wirkungspunkte“ bezeichnete Bereiche bestimmen, in denen eine natürliche oder willkürliche Änderung der natürlichen Verhältnisse eine Wirkung auf weit entfernte Orte hat. In der Natur kommt das z. B. in Form einer Fernwelle vor.

Weniger naturnah, aber ebenso aufschlußreich ist der Ansatz eines örtlich begrenzten Windes, dessen Stau dann im gesamten Modellgebiet analysiert wird. Es ergeben sich hieraus die für jeden Bereich „stauwirksamsten Windfelder“. Durch Hinzunahme weiterer Ansätze – etwa Zustandsgleichungen für Dichte, Temperatur und Salzgehalt – lassen sich auch Vermischungs- und Transporterscheinungen darstellen. Die Unsicherheit bei der Parametrisierung von Ausbreitungs- und Diffusionsvorgängen ist aber noch erheblich.

## 8. Die HN-Modelle des KFKI

### 8.1 Beschreibung

Für die HN-Modelle des KFKI wurde die Verwendung eines regelmäßigen Gitternetzes (Abb. 2) in einem expliziten Differenzenverfahren vorgesehen. Die verfahrensmäßige Handhabung eines solchen Modells ist besonders einfach. Alle Rechnungen werden mit einem räumlich und zeitlich konstanten Reibungskoeffizienten  $r = 0,003$  vorgenommen, wodurch die Energiedissipation an einem Punkt allein von der augenblicklichen Wassertiefe und Geschwindigkeit abhängt. Auf die Berücksichtigung der konvektiven Terme und des Terms des horizontalen Impulsaustausches wird verzichtet.

Das Gitternetz des Basismodells „Deutsche Bucht“ ist parallel zur geographischen Breite angelegt. Der meridionale Abstand der Gitterpunkte beträgt 3' bzw. 3 Seemeilen (5556 m). Die Lage des Modells zwischen etwa 53° N und 55° N erlaubt noch einen konstanten zonalen Gitterabstand, der mit 5' (etwa 5382 m) wenig kleiner als 3 Seemeilen ist, so daß ein nahezu quadratisches Netz entsteht. Der West- und der Nordrand sind so gelegt, daß sie mit den Gitterpunkten eines bereits existierenden Nordseemodells zusammenfallen (Abb. 1).

In den so fixierten Gitterpunkten wurden dann aus den topographischen Karten des KFKI und der Forschungsstelle Norderney, die einheitlich auf NN bezogen sind, und den Seekarten des DHI die Tiefen und die Küstenkonfiguration bestimmt. Auf den Gitterlinien benötigt das Modell noch je eine Tiefe zwischen den Kreuzungspunkten. So ist eine möglichst genaue Erfassung der Topographie gewährleistet. Dabei muß sehr genau auf das Verhältnis zwischen Gitterabstand und Strömungsquerschnitt geachtet werden. Auch die Nord- und Ostfriesischen Inseln, jedoch keine ausgedehnten Wattflächen, werden so erfaßt. Für eine möglichst genaue Wiedergabe des Naturzustandes bzw. die Herstellung der Naturähnlichkeit wurde ein Zeitraum ausgewählt, in dem möglichst geringe meteorologische Störungen auftraten und in dem angenähert mittlere Gezeitenverhältnisse herrschten (Normaltide). Die zugehörigen Wasserstände der in der Nähe von Pegelorten gelegenen Gitterpunkte wurden ermittelt, um dort die Differenzen zwischen gemessenen und aus dem HN-Modell errechneten Wasserständen zu bilden. Das gewählte Zeitintervall reicht vom 8. Juli 1976, 15.00<sup>h</sup>, bis zum 9. Juli 1976, 3.25<sup>h</sup>. Wie es auch bei hydraulischen Modellversuchen üblich ist, wurde diese Tide periodisch weitergeführt.

Als Randwerte wurden für das Modell Wasserstände an den seeseitigen Öffnungen (Nordseeränder) und in den Flußmündungen benötigt. Die Ästuarie sind durch Pegelauzeichnungen hinreichend abgedeckt. An den Seerändern liegen aber keine Messungen für diesen Zeitraum vor. Aushilfsweise stehen zwei Wege offen:

1. Für ein HN-Modell der Nordsee werden auf den offenen Rändern z. B. Partialtiden

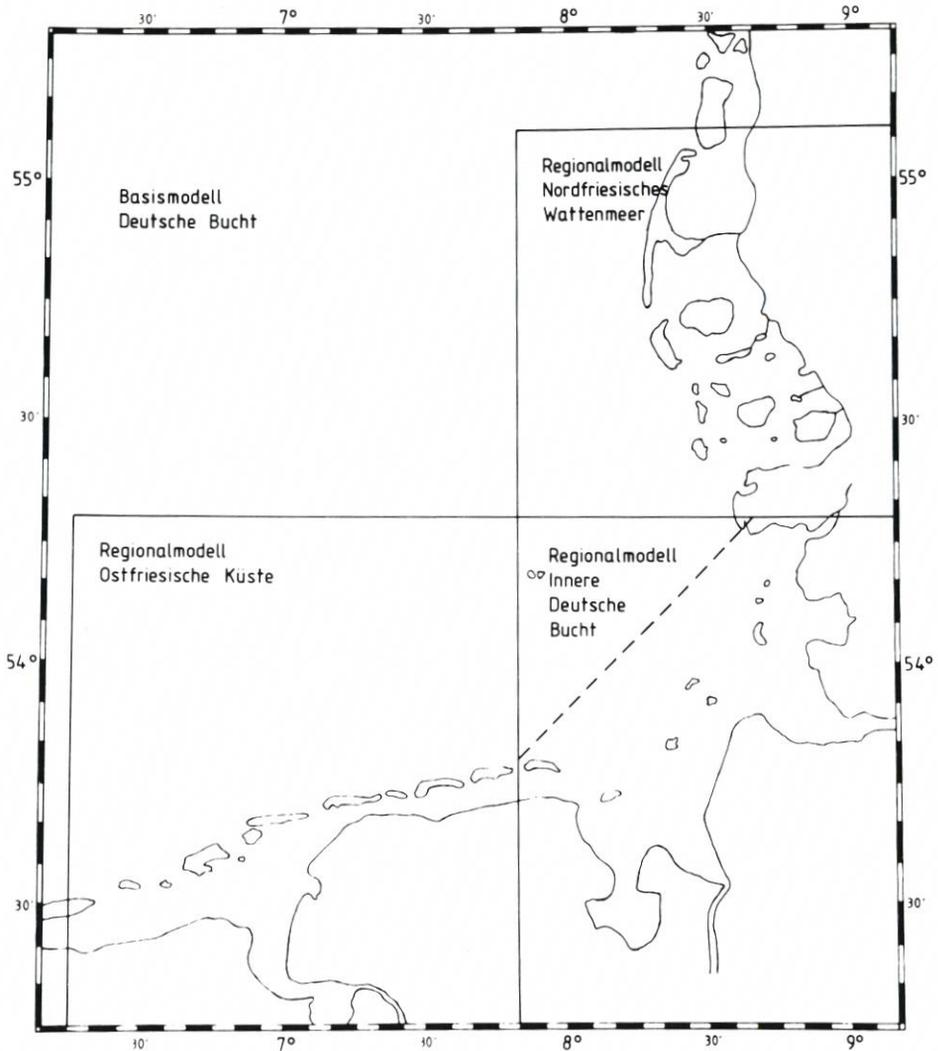


Abb. 1. Deutsche Bucht mit Grenzen der KFKI-Modelle

vorgegeben, die aus Messungen bekannt sind, und dann die Wasserstände an den Punkten bestimmt, die den Rändern des Basismodells entsprechen.

- Die harmonischen Konstanten derselben Partialtiden auf dem Basismodellrand werden den Karten der harmonischen Gezeitenkonstanten entnommen. Da die Karten aber fast 40 Jahre alt sind, müssen Korrekturen angebracht werden.

Dieser zweite Ansatz ist angewandt worden. Die Korrektur erfolgte durch den Vergleich gemessener und errechneter Wasserstände an den im Tiefwasser gelegenen Pegeln nach der Methode der Wirkungspunkte. Da der Wirkungsbereich für die Deutsche Bucht in der westlichen Nordsee liegt, sind die Korrekturwerte für den Westrand hinreichend genau. Der Nordrand läßt sich auf diese Weise nicht mit entsprechender Genauigkeit erfassen. Allerdings ist sein Einfluß auf die Vorgänge innerhalb des Basismodells verhältnismäßig gering.

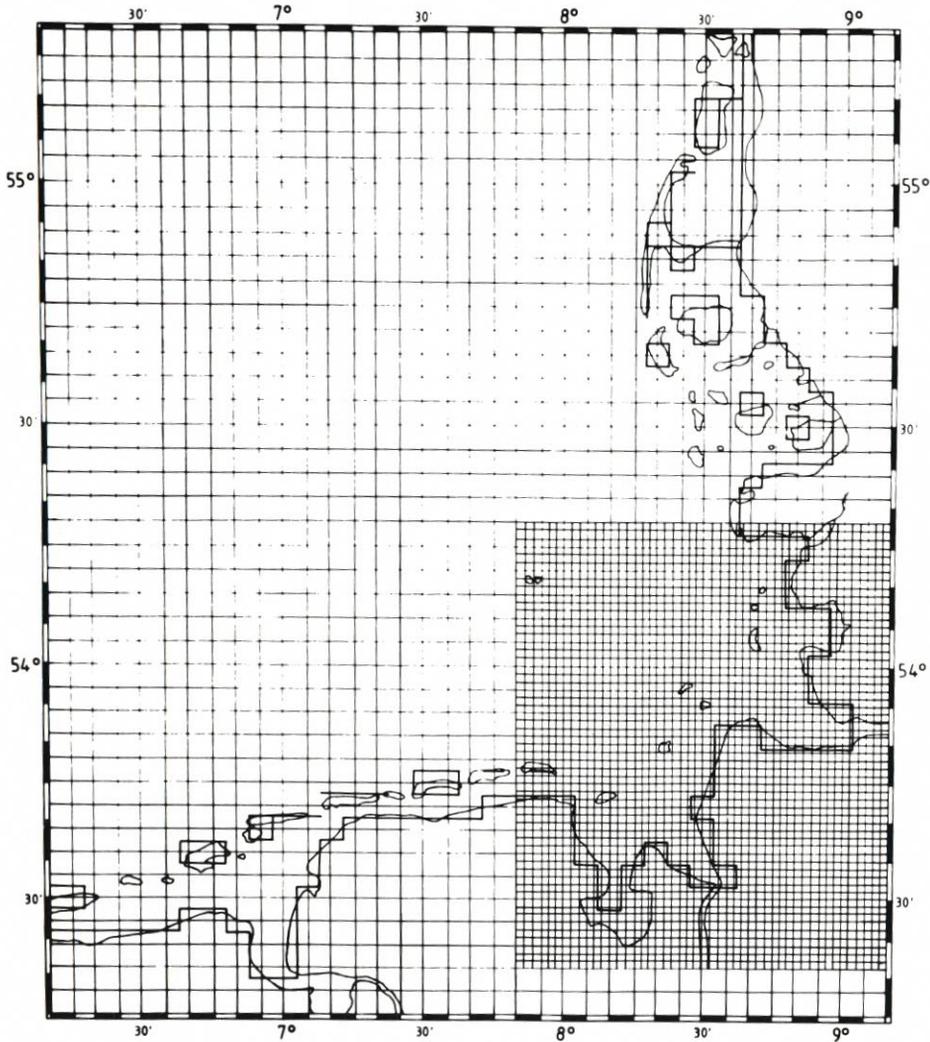


Abb. 2. Basismodell „Deutsche Bucht“ und Regionalmodell „Innere Deutsche Bucht“ mit Gitternetzen

Aus dem Basismodell war das HN-Regionalmodell „Innere Deutsche Bucht“ zu entwickeln. Es hat ein Gitternetz, dessen Abstände gegenüber denen des Basismodells auf ein Drittel verkleinert sind. Sie betragen somit etwa eine Seemeile. Dadurch ist die Topographie mit den ausgedehnten Wattflächen um Hohe Weg, den Knechtsand und Trischen wesentlich besser erfaßt worden als im Basismodell. Da die Arbeiten am Basismodell und an dem Regionalmodell etwa gleichzeitig anliefen und Randwerte aus dem Basismodell zunächst nicht übernommen werden konnten, wurde der Seerand auf eine Diagonale von Wangerooge nach Eiderstedt gelegt, um die Nähe der Pegel Wangerooge Nord, Alte Weser, Großer Vogelsand, Trischen West und Linnenplate für die Bestimmung der Randwerte ausnutzen zu können. Diese Werte wurden laufend mit den Ergebnissen des Basismodells verglichen und in Übereinstimmung zu bringen versucht, was in großen Teilen gelang. Später soll das Regionalmodell mit einem

rechteckigen Rand, dessen Nordwestecke etwa Nordnordwest von Helgoland liegt, betrieben werden und seine Randwerte endgültig aus dem Basismodell erhalten.

Da die Gezeiten aber bis weit in die Flußmündungen hineinwirken, ist mit Erfolg ein vorhandenes Flußmodell der Elbe an das Regionalmodell angekoppelt worden. So ist ein Randwert überflüssig geworden. Insofern wurde hier der Randwert des Elbeästuars durch das Elbmodell ersetzt. Da ein Modell für die Weser bisher nicht zur Verfügung stand, konnte dort nicht entsprechend verfahren werden.

Die in Arbeit befindlichen Regionalmodelle „Nordfriesland“ und „Ostfriesland“ sind hinsichtlich der Gitterabstände, Tiefenverteilung und Randwertermittlung gleichermaßen behandelt worden. Da die offenen Ränder hierbei aber verhältnismäßig lang sind und sich über drei Seiten erstrecken, sind die Randwerte von noch größerer Bedeutung als beim Basismodell oder Regionalmodell „Innere Deutsche Bucht“.

## 8.2 Ergebnisse

In den Abbildungen 3 bis 19 sind für ausgewählte Pegel die gemessenen und errechneten Wasserstände aus dem Basismodell und dem Regionalmodell „Innere Deutsche Bucht“ in Ganglinienformen dargestellt. Darüber hinaus sind die Differenzen zwischen Messung und Rechnung bei Hoch- und Niedrigwasser sowie die zugehörigen quadratischen Fehler in Tabelle 1 zusammengestellt worden. Die Abbildungen 20 und 21 zeigen beispielhaft die errechnete flächenmäßige Strömungsverteilung im Bereich des Regionalmodells „Innere Deutsche Bucht“.

Tabelle 1  
Differenzen aus Natur und Modell für Thw und Tnw  
sowie mittlerer quadratischer Fehler für die gesamte Tide (8./9. Juli 1976)

Abb.	Basismodell	Höhendifferenzen		mittl. quadr. Fehler (cm)
		Thw (cm)	Tnw (cm)	
3	Borkum Südstrand	- 1	- 1	7
4	Helgoland	8	0	9
5	Wangerooge Nord	- 1	- 1	2
6	Alte Weser	- 6	- 4	4
7	Scharhörn	- 8	0	12
8	Cuxhaven	- 1	7	9
9	Trischen West	0	- 7	10
10	List	- 1	-19	13
Regionalmodell „Innere Deutsche Bucht“				
11	Wangerooge Nord	3	0	4
12	Mellumplate	- 1	- 7	6
13	Alte Weser	- 1	- 5	5
14	Scharhörn	- 5	2	4
15	Cuxhaven	2	0	6
16	Trischen West	3	4	5
17	Hohe Weg	5	- 1	3
18	Spieka Neufeld	13	- 1	9
19	Friedrichskoog	2	- 2	11

Die in Tabelle 1 aufgeführten Hochwasserdifferenzen aus dem Basismodell sind sämtlich kleiner als 8 cm. Küstenwärts, vor allem im Watt, steigen die Differenzen dann an, bleiben aber unter 10 cm. Die Niedrigwasserdifferenzen sind von der Ems bis zur Alten Weser kleiner als 5 cm. Von der Elbe bis südlich Sylt ergeben sich Werte bis zu 7 cm, und in List wird eine Differenz von 19 cm erreicht. Insgesamt gesehen werden die Hochwasserstände durch das HN-Basismodell etwas besser als diejenigen des Niedrigwassers dargestellt.

Tabelle 1 enthält auch die entsprechenden Werte für das Regionalmodell „Innere Deutsche Bucht“. Von Wangerooge bis Trischen überschreiten die Differenzen der Hochwasserstände nicht 5 cm. Die Differenzen der Niedrigwasserstände werden nicht größer als 7 cm.

Weiterhin sind in Tabelle 1 die mittleren quadratischen Fehler für die Wasserstandsganglinien der Pegelorte angegeben. Dafür sind 298 Werte einer Periode benutzt worden. Dies entspricht mit einem zeitlichen Abstand von 2,5 min dem Zeitschritt des Basismodells.

Von Borkum bis List liegen die Fehler des Basismodells unter 13 cm. Die Fehler des Regionalmodells überschreiten 6 cm nicht. Insgesamt läßt sich daher feststellen: Das HN-Regionalmodell stellt mit seinem kleineren Gitterabstand die an den Küstenpegeln gemessenen Wasserstände durchweg besser dar. Dies gilt vor allem in Wattgebieten. Aus den Abbildungen 3 bis 19, die den Vergleich zwischen gemessenen und errechneten Wasserstandskurven zeigen, ist auch zu erkennen, welchen Einfluß die verbesserte Auflösung der Topographie durch das Regionalmodell hat.

Die Wasserstände, die das Basismodell liefert, entsprechen im tiefen Wasser (bis ungefähr 10 m unter NN) etwa den gemessenen. Gebietsweise, z. B. bei Wangerooge und Alte Weser, sind gute Übereinstimmungen festzustellen. Aber auch größere Abweichungen bis zu 19 cm (List) traten stellenweise auf. – Besondere Untersuchungen haben gezeigt, daß eine noch größere Naturnähe erzielt wird, wenn das Basismodell flächenmäßig – etwa durch einen diagonal verlaufenden offenen Rand – verkleinert wird. Hierdurch kann nämlich die Güte der Randwerte und damit diejenige der Modellergebnisse wesentlich verbessert werden.

Das Regionalmodell „Innere Deutsche Bucht“ zeigt eine vollbefriedigende Übereinstimmung zwischen gemessenen und errechneten Wasserstandskurven. An den Wattpegeln bleiben auch die Zeitpunkte des Trockenfallens und des Überflutens im Rahmen der allgemeinen Fehlergrenzen.

Die flächenmäßige Verteilung von Strömungsrichtungen und -geschwindigkeiten im Gebiet des Regionalmodells „Innere Deutsche Bucht“ ist für zwei Tidephasen in den Abbildungen 20 und 21 dargestellt. Diese Darstellungen enthalten die Ergebnisse der Rechnung, die durch einen Plotter in die graphische Form übertragen wurden. Soweit es in dem dem Regionalmodell zugrunde liegenden Maßstab überhaupt möglich ist, entsprechen die Ergebnisse dem aus Naturmessungen belegten Ablauf des Geschehens.

Mit den Regionalmodellen „Nordfriesisches Wattenmeer“ und „Ostfriesische Küste“

Tabelle 2  
Mittlerer quadratischer Fehler in cm für Pegelorte in Nord- und Ostfriesland

Pegel	mittl. quadr. Fehler (cm)
Hörnum	2
Wittdün	7
Langeness-Neuwarft	13
Pellworm	14
Südfall	11
Knock	7

sind Voruntersuchungen für flächenmäßig verkleinerte Gebiete aufgenommen worden. Tabelle 2 enthält die ermittelten Fehler für fünf Pegelorte im nordfriesischen und für einen Ort im ostfriesischen Modell.

## 9. Ausblick

Nachdem das Basismodell „Deutsche Bucht“ und das Regionalmodell „Innere Deutsche Bucht“ in den Jahren 1977 bis 1979 fertiggestellt werden konnten und die Entwicklung der Regionalmodelle „Nordfriesisches Wattenmeer“ und „Ostfriesische Küste“ angelaufen ist, lassen sich die bisher erzielten Ergebnisse dahingehend beurteilen, daß es gelungen ist, eine Normaltide mit hinreichender bis sehr guter Genauigkeit modellmäßig zu erfassen. Wenn Ende 1981 auch die derzeit in Arbeit befindlichen Regionalmodelle fertiggestellt sein werden, ist damit die Grundlage geschaffen, um Vorhaben der Wasserbauverwaltungen oder Naturvorgänge im Auftrage der jeweiligen Nutzer in Lokalmodellen behandeln zu können, wobei durch verfeinerte Gitterauflösung und Anbindung an die aus dem Basismodell entwickelten Regionalmodelle deren Randwerte optimal abgesichert sind. Hierdurch werden dann die Voraussetzungen, insbesondere für die Herstellung befriedigender Naturähnlichkeit, gegeben sein.

Neben der Fertigstellung der Regionalmodelle „Nordfriesland“ und „Ostfriesland“ in den Jahren 1980 bis 1981 ist beabsichtigt, Kopplungsmodelle herzustellen, in welchen die Wirkung unterschiedlicher Wetterlagen auf den Tideablauf zu untersuchen ist. Längerfristig sollen hierbei die Modelle des KFKI im Zusammenhang mit vorhandenen und weiterzuentwickelnden meteorologisch/numerischen Großmodellen (FISCHER, 1978) betrieben werden. Zielsetzung ist, aperiodische Ereignisse – z. B. Sturmtiden und extreme Niedrigwasserstände – in den Modellen verfeinert nachvollziehen zu können.

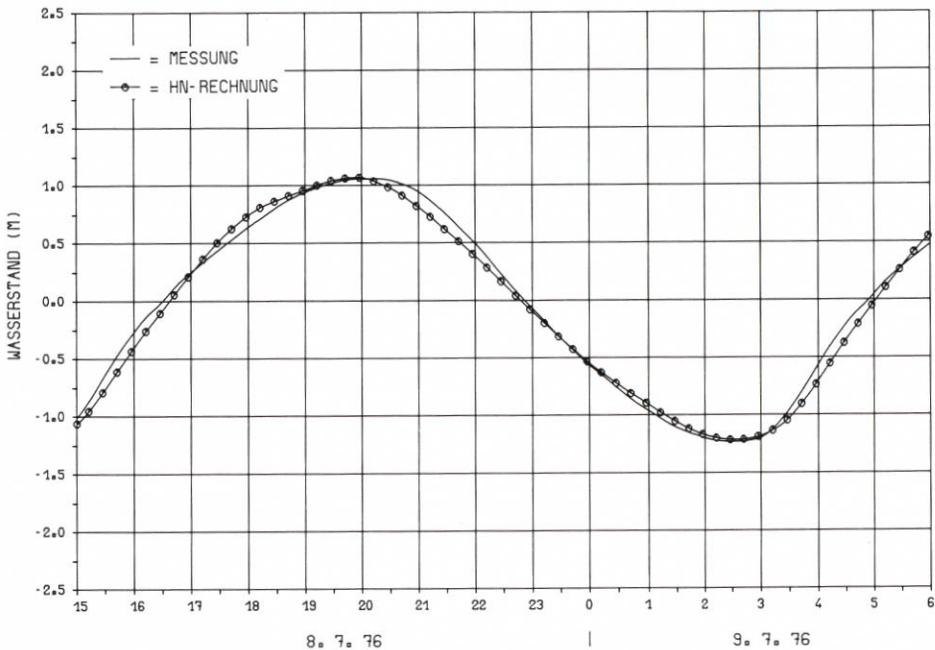


Abb. 3. Basismodell – Pegel Borkum Südstrand

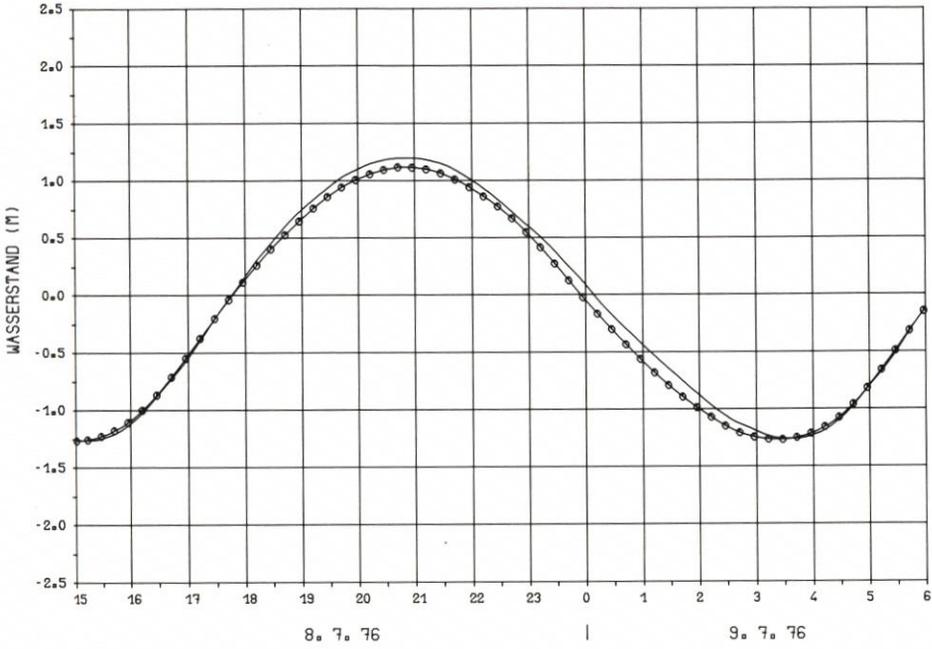


Abb. 4. Basismodell - Pegel Helgoland

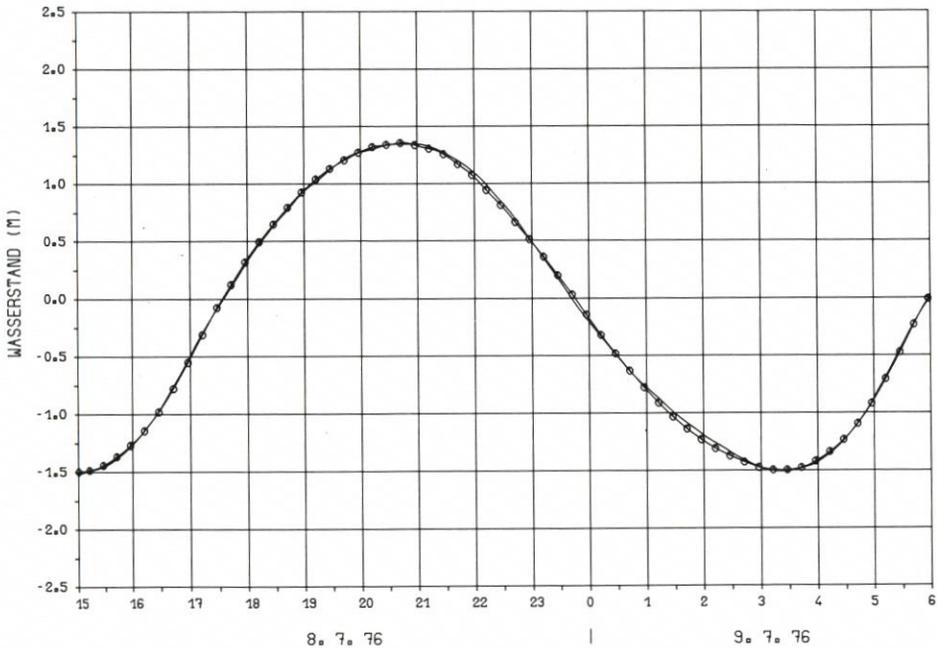


Abb. 5. Basismodell - Pegel Wangerooge Nord

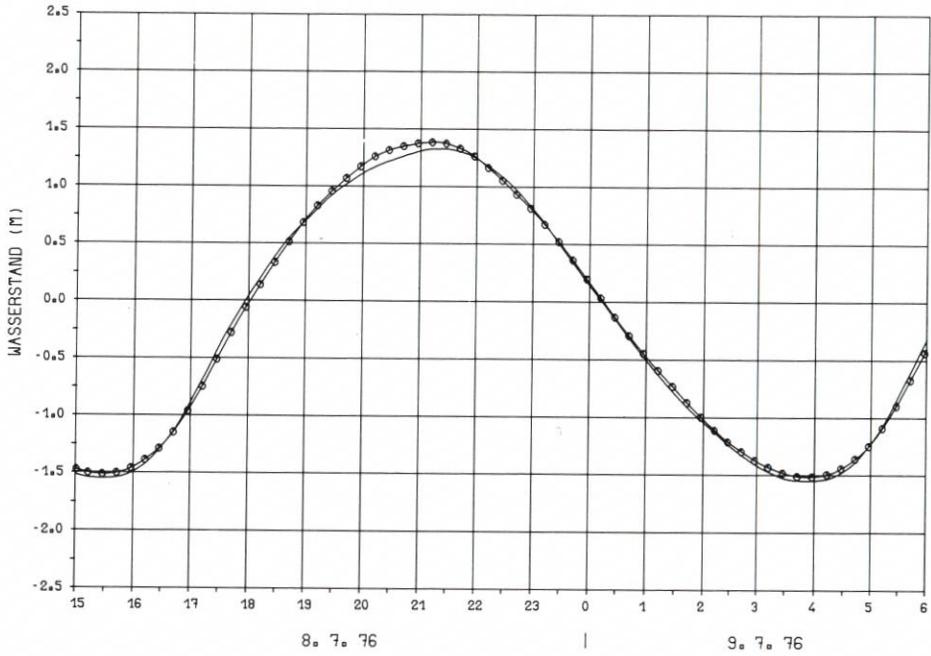


Abb. 6. Basismodell – Pegel Alte Weser

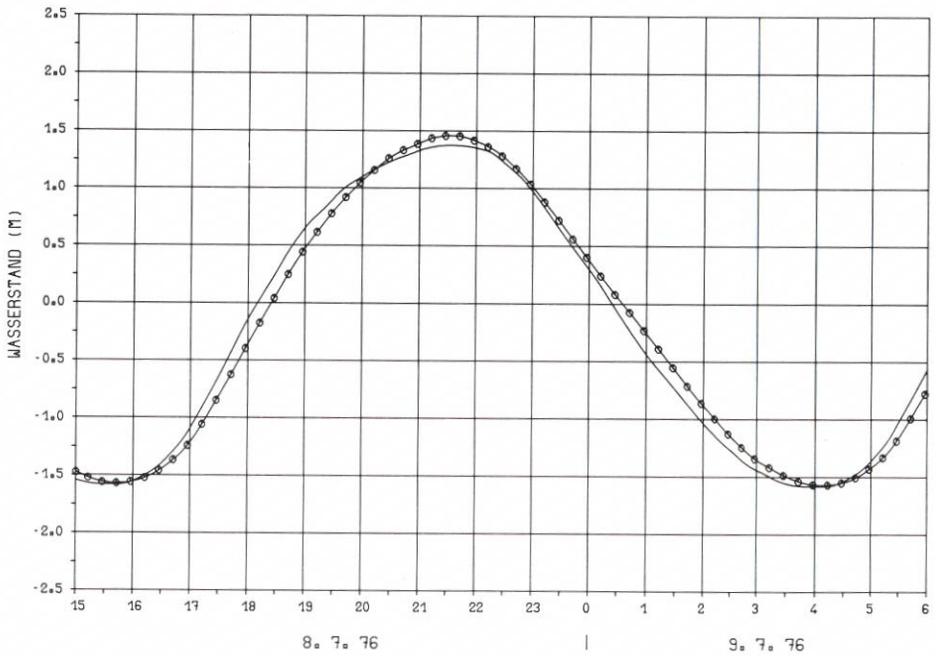


Abb. 7. Basismodell – Pegel Scharhörn

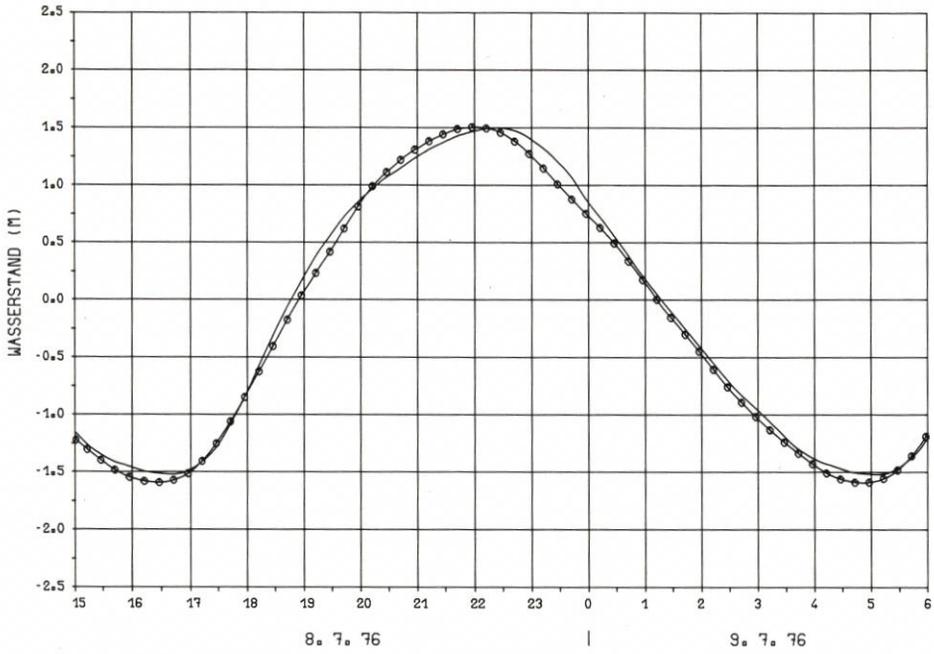


Abb. 8. Basismodell - Pegel Cuxhaven

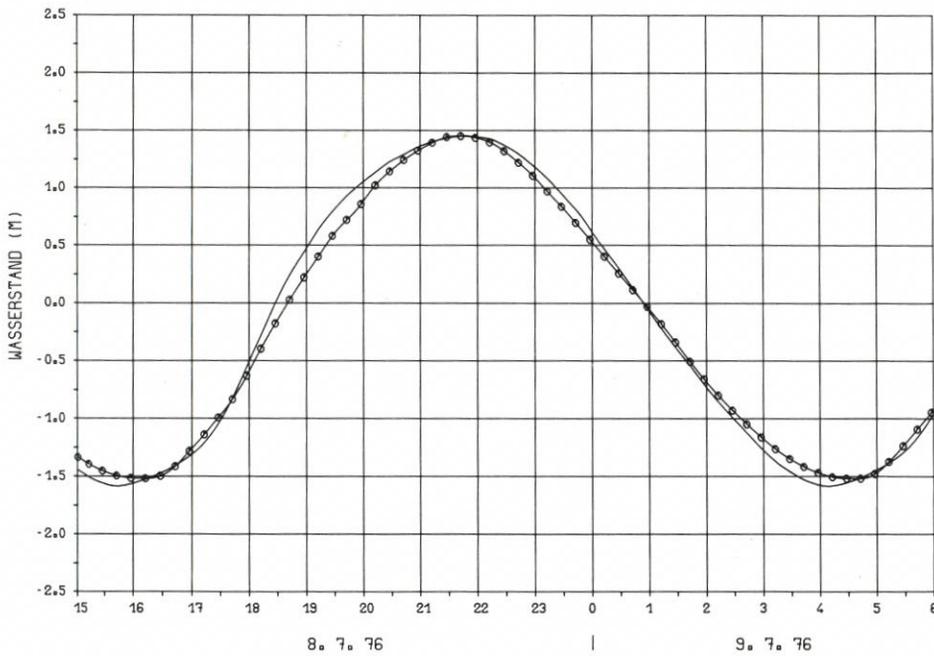


Abb. 9. Basismodell - Pegel Trischen West

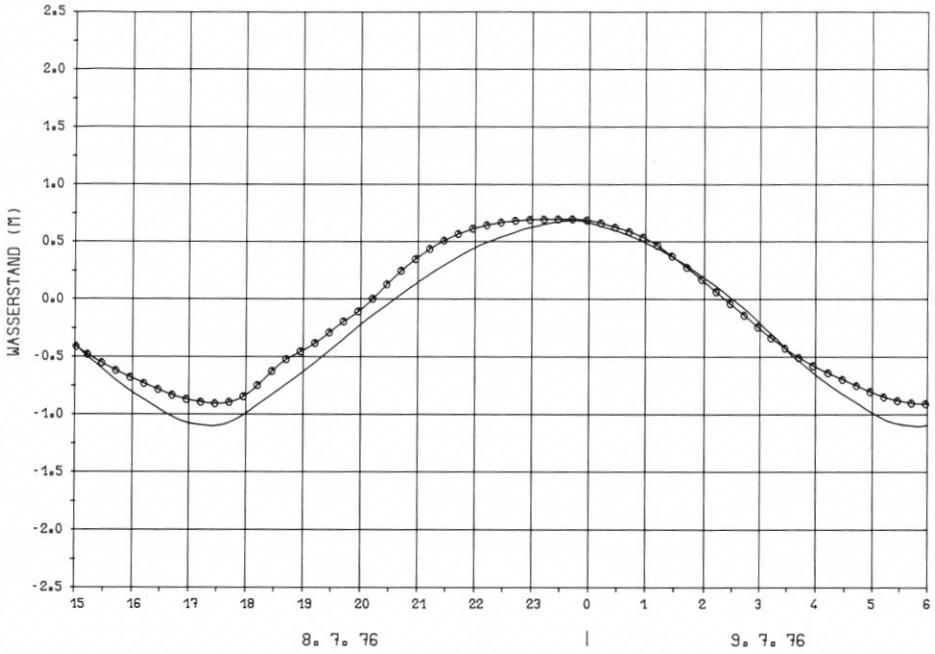


Abb. 10. Basismodell - Pegel List

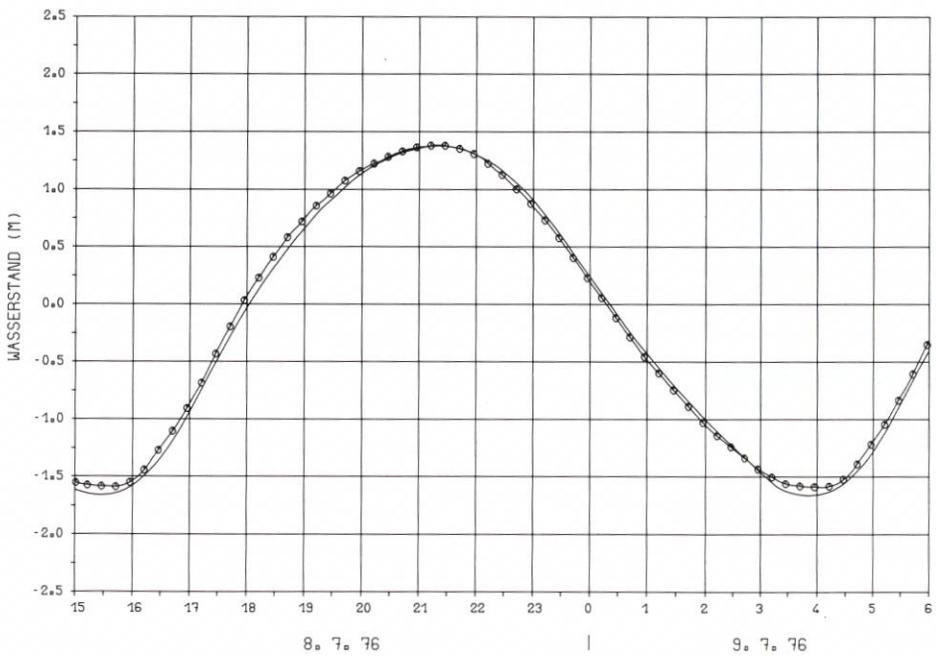


Abb. 11. Regionalmodell - Pegel Wangerooge Nord

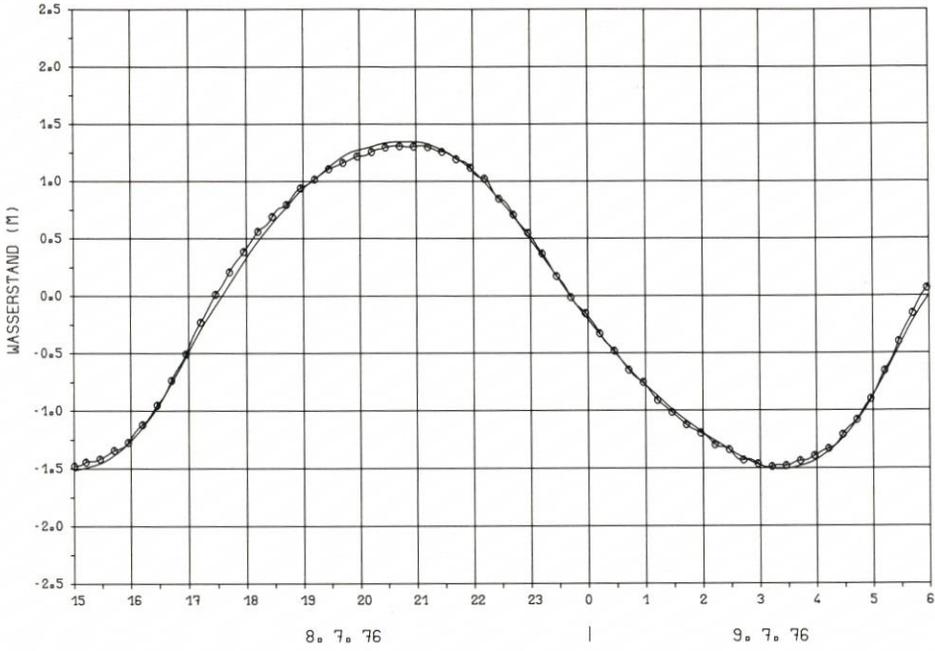


Abb. 12. Regionalmodell – Pegel Mellumplate

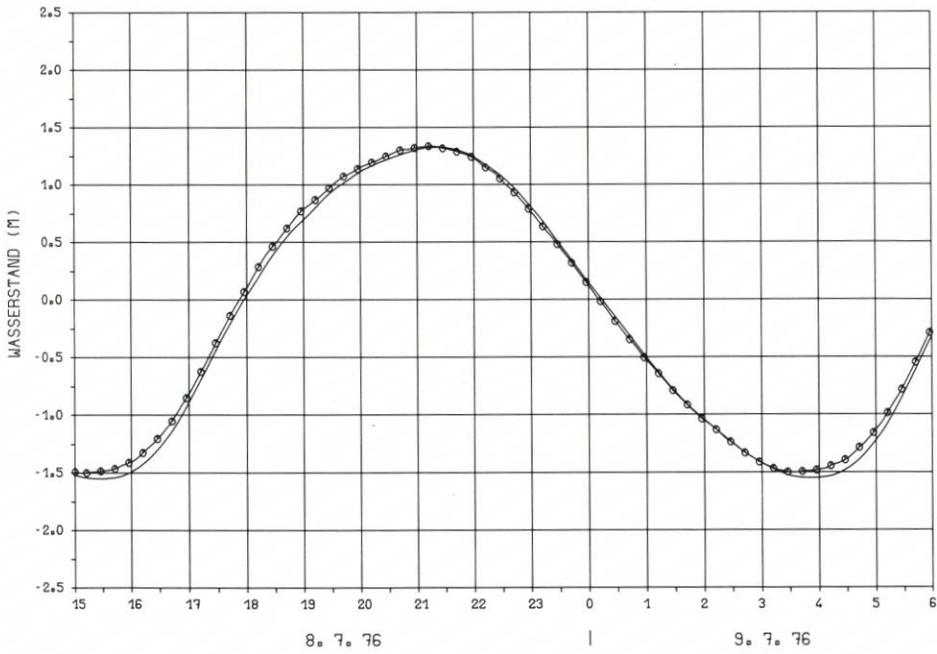


Abb. 13. Regionalmodell – Pegel Alte Weser

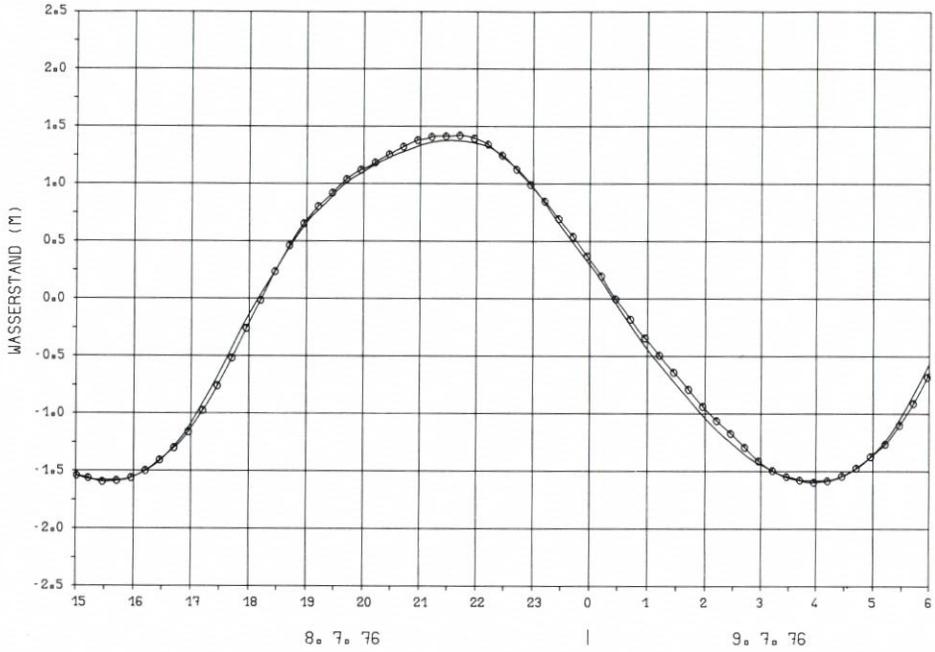


Abb. 14. Regionalmodell – Pegel Scharhörn

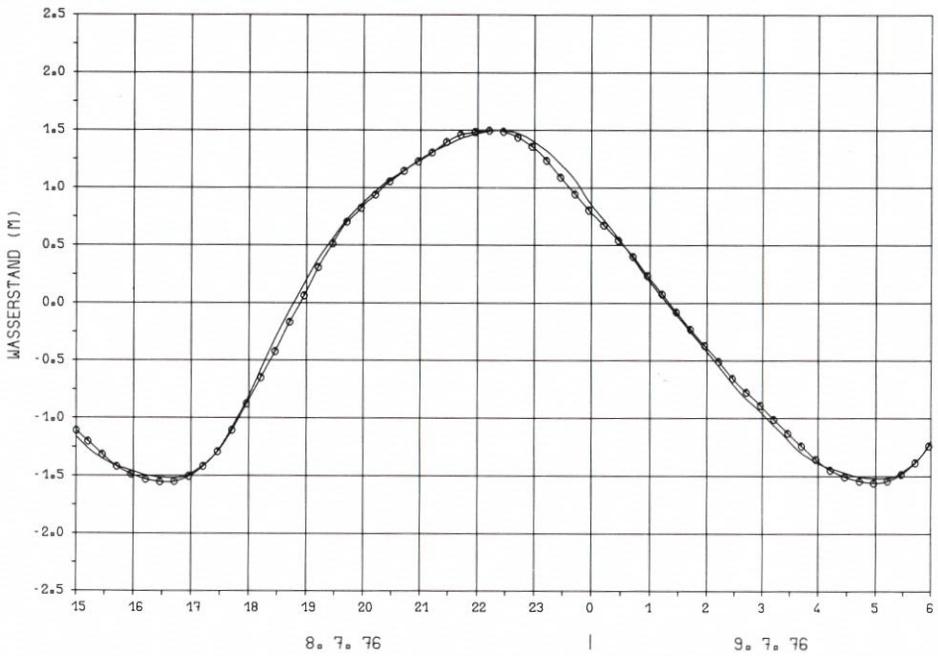


Abb. 15. Regionalmodell – Pegel Cuxhaven

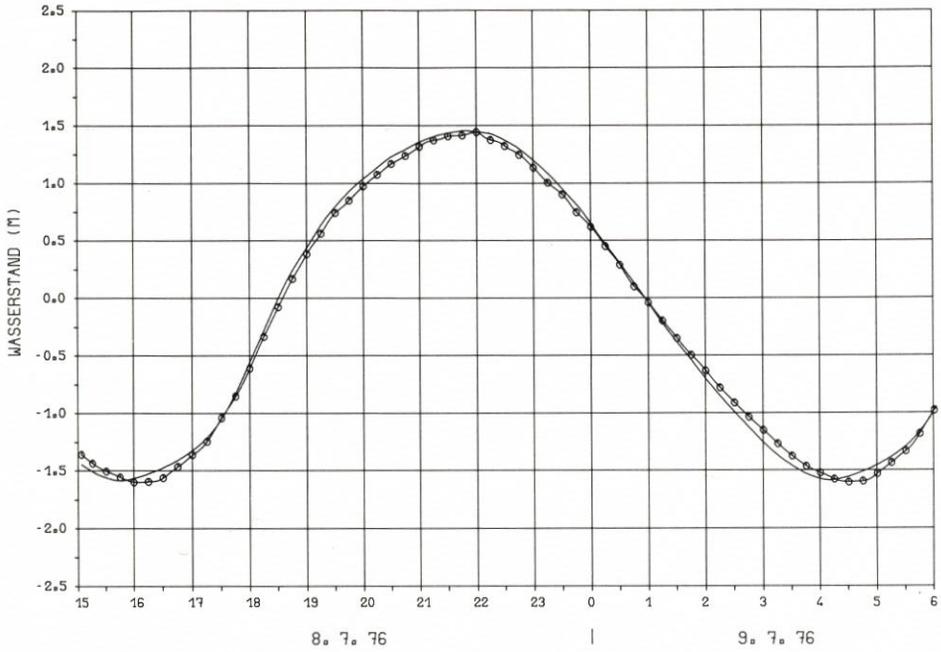


Abb. 16. Regionalmodell – Pegel Trischen West

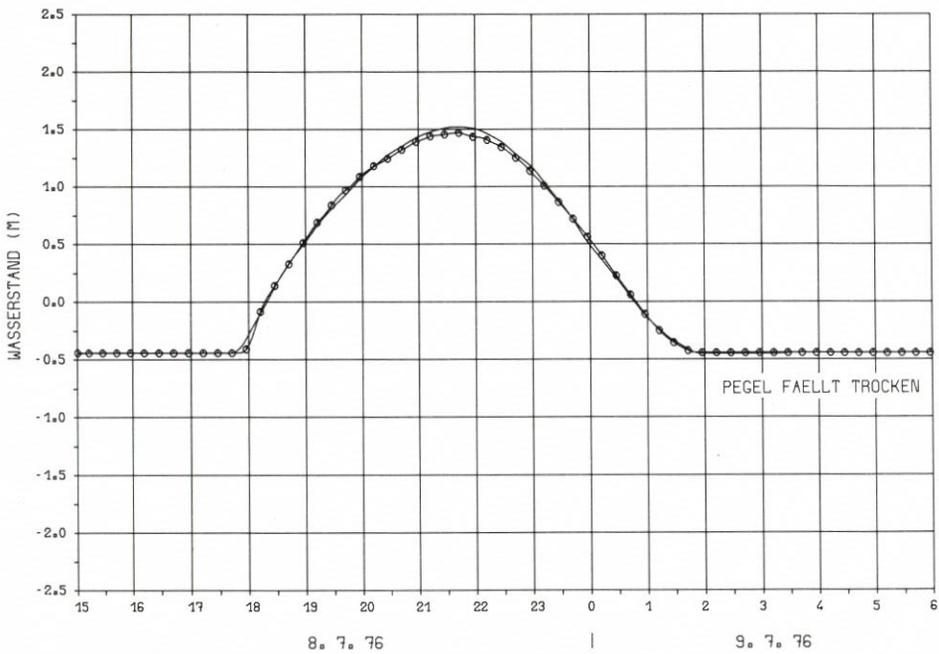


Abb. 17. Regionalmodell – Pegel Hohe Weg

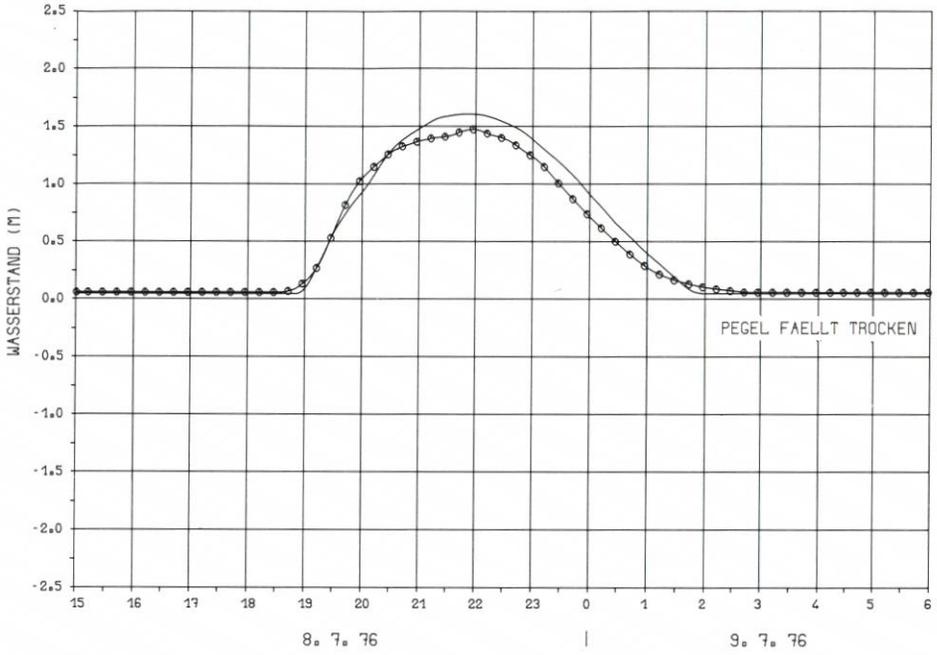


Abb. 18. Regionalmodell – Pegel Spieka Neufeld

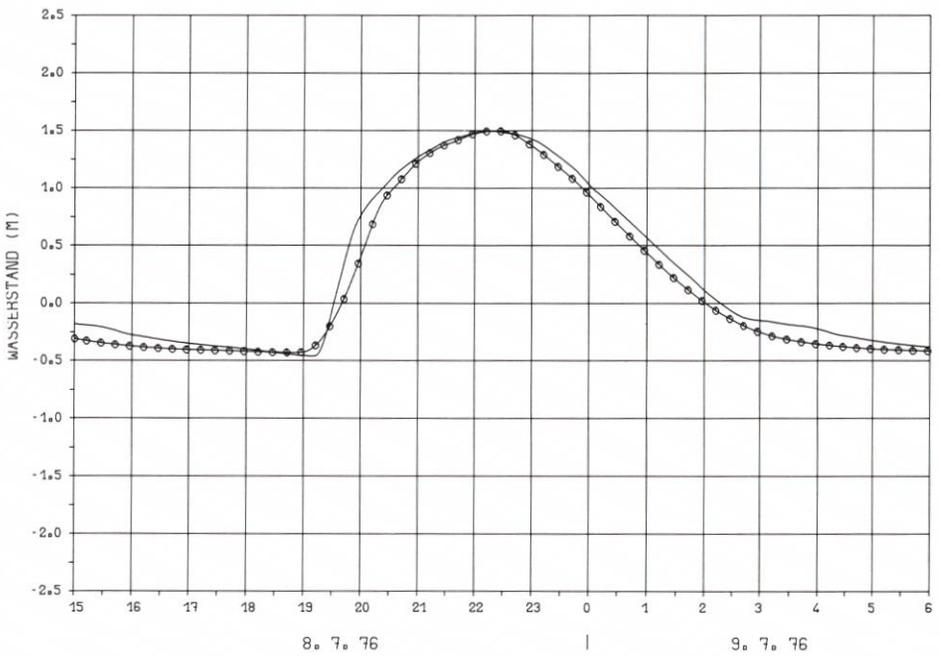


Abb. 19. Regionalmodell – Pegel Friedrichskoog-Hafen

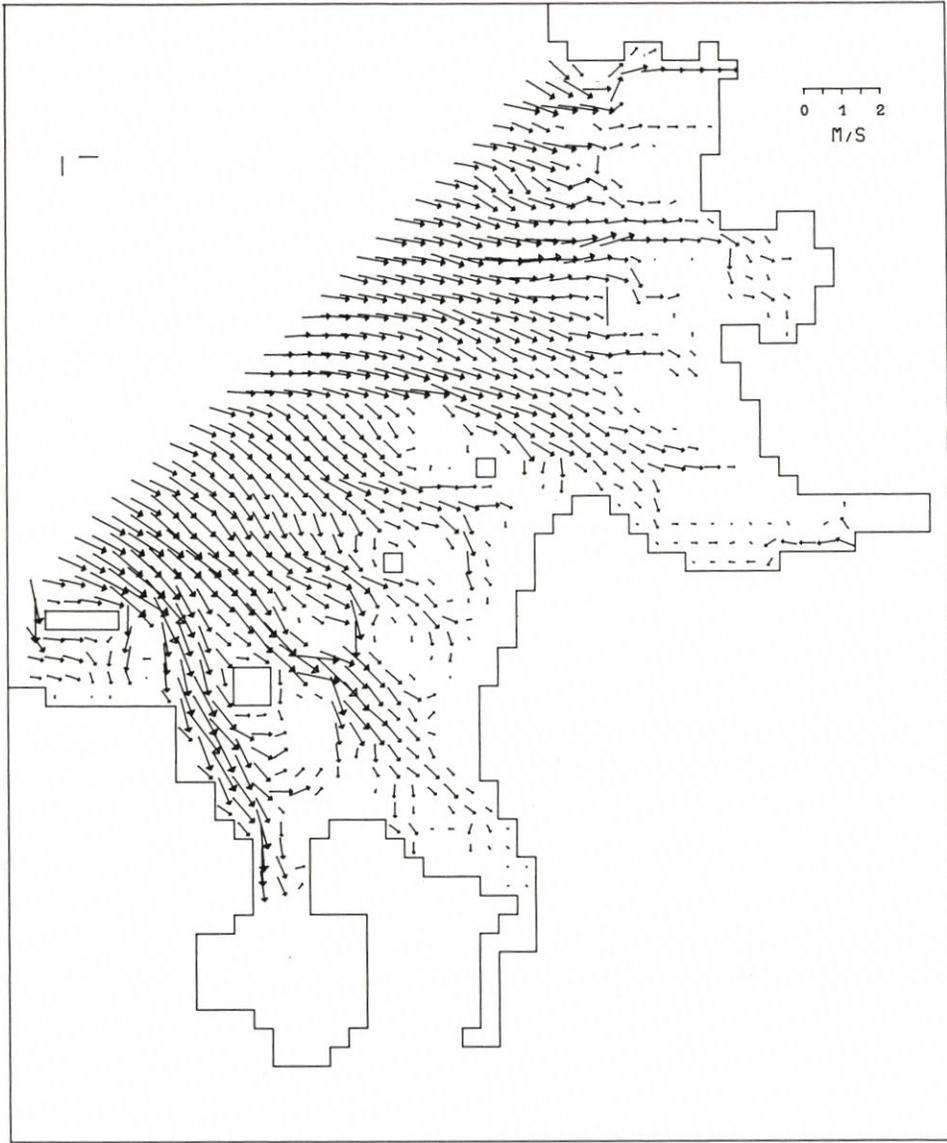


Abb. 20. Regionalmodell „Innere Deutsche Bucht“ – Strömungsverteilung bei auflaufendem Wasser (8. 7. 1976, 18.00<sup>h</sup>, etwa halbe Tide)

Zur Überprüfung der Naturähnlichkeit des Regionalmodells „Innere Deutsche Bucht“ ist geplant, im Herbst 1981 ein Naturmeßprogramm in dem durch das Modell erfaßten Gebiet auszuführen. In Wattgebieten wird es das erste Mal sein, daß HN-Modelle und Naturmessungen gleichzeitig betrieben werden. Über die Ergebnisse dieses Testprogramms wird zu gegebener Zeit berichtet werden.

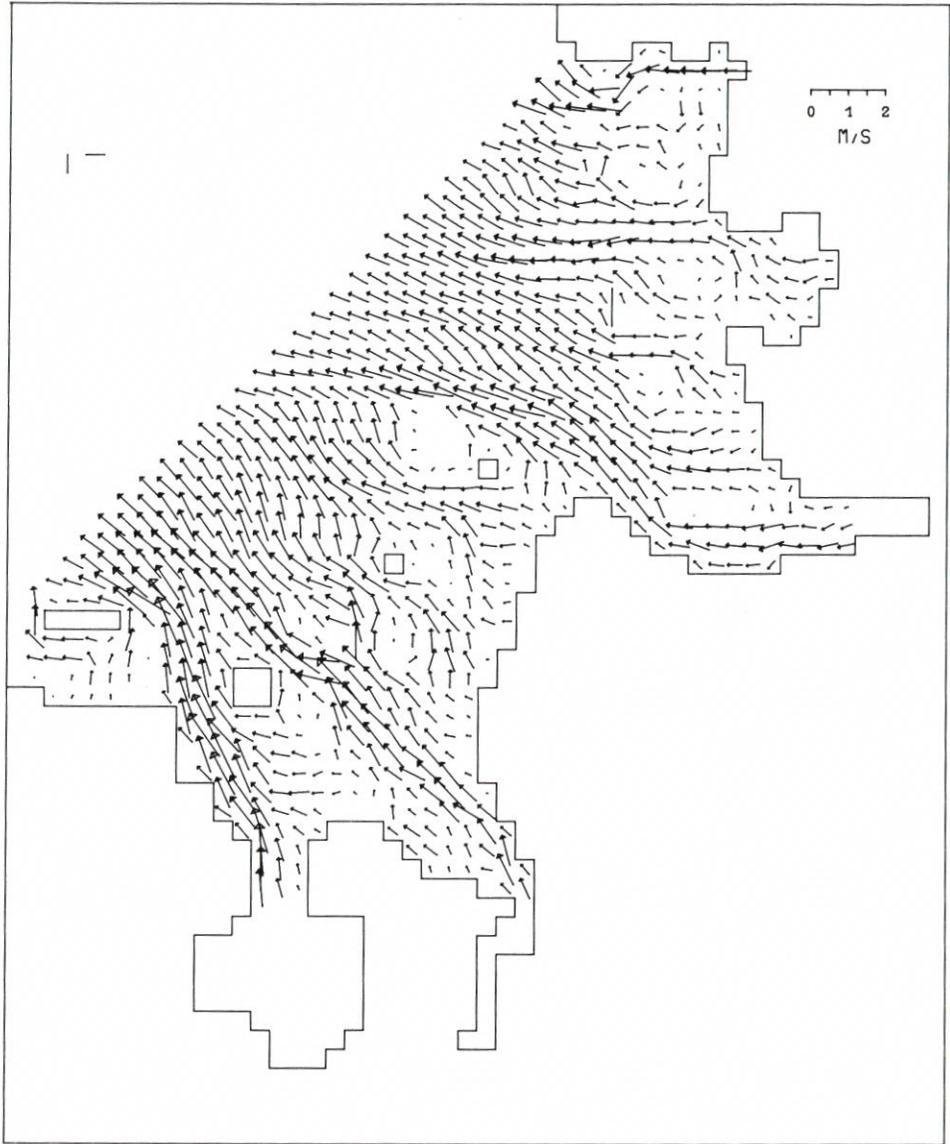


Abb. 21. Regionalmodell „Innere Deutsche Bucht“ – Strömungsverteilung bei ablaufend Wasser (9. 7. 1976, 1.00<sup>h</sup>, etwa halbe Tide)

## 10. Schriftenverzeichnis

- COURANT, R., FRIEDRICHS, K. u. LEWY, H.: Über die partiellen Differentialgleichungen der mathematischen Physik. Math. Ann., Bd. 100, 1928.
- DEFANT, A.: Gezeitenprobleme des Meeres in Landnähe. Probleme der kosmischen Physik, IV., Verlag Henri Grand, Hamburg, 1925.
- FISCHER, G.: Ergebnisse der Sturmflutvorhersage - Modellierung im SFB 94. Promet-Meteorologische Fortbildung. 8. Jg., Heft 4, 1979.
- HANSEN, W.: Die Ermittlung der Gezeiten in beliebig gestalteten Meeresgebieten mit Hilfe des Randwertverfahrens. DHZ, Bd. 1, 1948.
- HANSEN, W.: Anwendung von HN-Modellen für Probleme des Küsteningenieurwesens. Jb. HTG, Bd. 35, 1977.
- KRÖGER, A. u. ZIERZ, R.: Rechenanlage für HN-Modelle des Kuratoriums für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI). Jber. 1979 d. Forsch.-Stelle f. Insel- u. Küstenschutz, Bd. 31.
- LORENTZ, H. A. et al.: Verslag van de Staatscommissie Zuiderzee. 's-Gravenhage, Alg. Landsdrukkerij, 1926.
- ROHDE, H.: Die Forschungsvorhaben des KFKI. Die Küste, H. 34, 1979.
- SIEFERT, W.: Sturmflutvorhersage-Verfahren für Küsten und Flüsse im Tidegebiet. Jb. HTG, Bd. 37, 1980.

# Faktoren der Schlickbildung im Sahlenburger und Neuwerker Watt

Von Hans-Erich Reineck und Winfried Siefert

## Zusammenfassung

In den Jahren von 1976 bis 1978 wurde im Watt vor Cuxhaven an zwei ca. 2 km langen Meßprofilen mit insgesamt 39 Punkten im zeitlichen Abstand von meist 14 Tagen der Wechsel von Schluff- und Tongehalt von Oberflächensedimenten gemessen und mit folgenden Meßgrößen in Verbindung gebracht: Wasserstände, Strömungen, Seegang, Salzgehalt, O<sub>2</sub>-Gehalt, Temperatur von Luft und Wasser, Niederschläge, Windrichtung und -geschwindigkeit.

Schluff und Ton wird bei auflandigen Windlagen (> 10 m/s aus 190 bis 300°) resuspendiert. Eine Abnahme des Schluffgehalts erfolgt bei diesen Windlagen im Untersuchungsgebiet, solange die Triftstromwege in der Größenordnung von einigen 100 Metern je Tide bleiben. Wesentlich größere Triftstromwege aber führen trotz Erosion am Ort zu Schluffnachschub aus benachbarten Gebieten; somit bleibt der Schluffgehalt etwa gleich. Bei ruhigem Wetter und bei ablandigem Wind nimmt der Schluffgehalt zu.

## Summary

*During 1976 to 1978 sediment samples were taken along two transects of a length of 2 km each, including 39 fixed sampling stations in intervals of 14 days. Transects are located on a tidal flat near the town of Cuxhaven. The contents of silt and clay were measured and compared with similar former dates. The differences were related with the following parameters: Water levels of high and low tides, current velocities, wave climate, wind conditions, salt and oxygen contents, air and water temperatures, and amount of rainfall.*

*During wind conditions of > 10 m/sec from directions of 190° to 300° mud is resuspended. A decrease of mud content takes place as long as wind induced drift current tracks are only some hundred meters per tide long. When wind induced current tracks grow much longer the content of mud in the upper layers of sediments does not change due to transport of mud floccules from other areas. During calm weather or offshore wind the mud content is increasing.*

## Inhalt

1. Veranlassung	27
1.1 Klassifizierung der Wattsedimente und Definition von „Schlick“	28
1.2 Lage und Anreicherung von Schlickvorkommen	30
2. Messungen vor Cuxhaven	32
2.1 Zur Festlegung der Testgebiete	32
2.2 Meßprogramm	32
3. Sedimentpetrographische Übersicht	33
4. Meteorologische und hydrologische Daten	33
5. Meßdurchführung	34
5.1 Entnahme und Analyse der Proben	34
5.2 Aufbereitung und Analyse der meteorologischen Daten	35
5.3 Aufbereitung und Analyse der Tidedaten	35
5.4 Berechnung der Seegangsverhältnisse	36

6. Ergebnisse . . . . .	41
6.1 Veränderung des Schluffanteils . . . . .	41
6.2 Wirkung des Seegangs auf den Schluffanteil im Oberflächensediment . . . . .	44
6.3 Zusammenwirken von Orbital- und Tidedströmungen . . . . .	46
6.4 Veränderung der Watthöhen . . . . .	48
7. Ausblick . . . . .	50
8. Schriftenverzeichnis . . . . .	50

### 1. Veranlassung

Das Problem der Schlicksedimentation war für das Küsteningenieurwesen schon immer bedeutend. Es ist Thema vieler wissenschaftlicher Untersuchungen und Abhandlungen gewesen. Trotz dieser Aktivitäten ist es aber bisher nicht gelungen, allgemeingültige Kausalzusammenhänge zwischen den verschiedenen involvierten Naturerscheinungen herzuleiten.

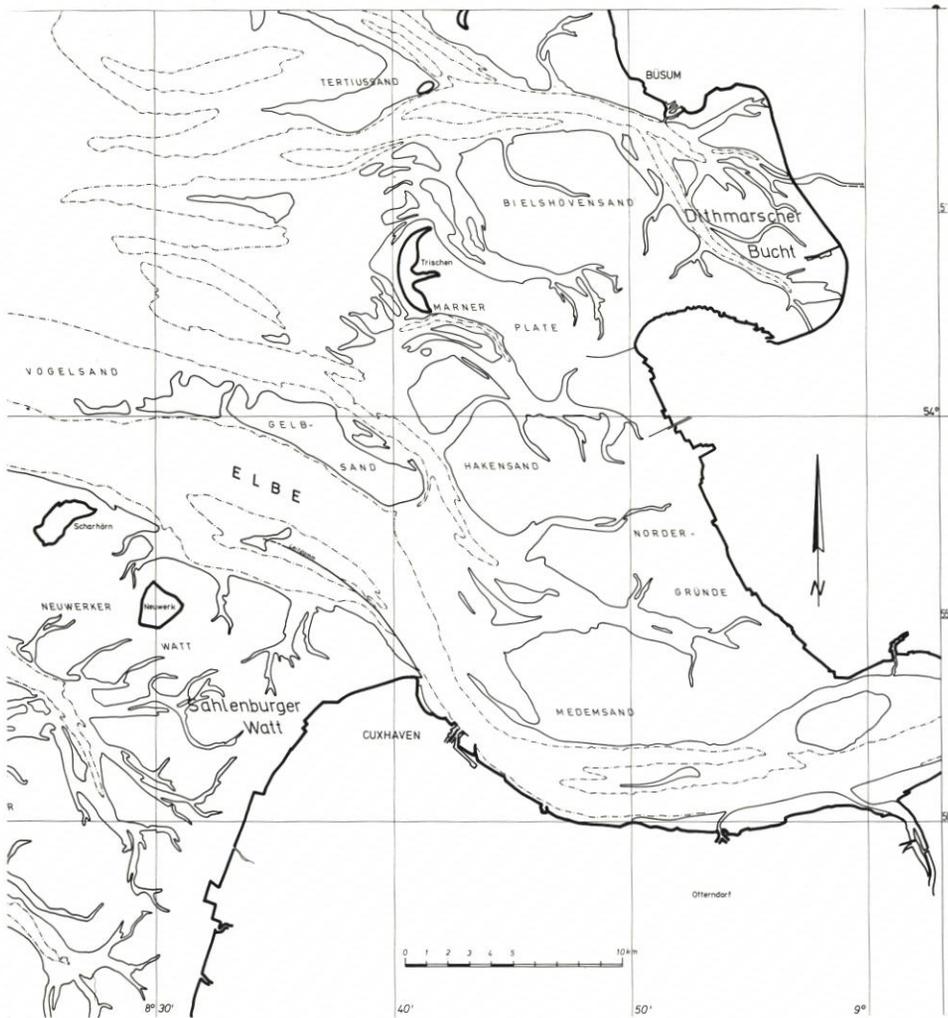


Abb. 1. Elbemündung mit den Untersuchungsgebieten Sahlener Watt und Dithmarscher Bucht

Wegen der komplexen Zusammenhänge zwischen hydrologischen, meteorologischen und sedimentologischen (einschl. chemisch/biologischen) Parametern ist eine umfassende Lösung dieses Problems, das besonders im Zusammenhang mit Bauvorhaben im Wattgebiet von größtem Interesse ist, nur schrittweise zu erreichen. Um auf dem angestrebten Wege voranzukommen, regte das Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI) 1975 den Entwurf eines Forschungsprogrammes an. 1976 wurden zunächst kleinere Projekte in der Meldorfer Bucht und im Sahlenburger Watt (Abb. 1) beschlossen, und zwar wegen der dort bereits geleisteten Vorarbeiten.

### 1.1 Klassifizierung der Wattsedimente und Definition von „Schlick“

Es gibt zahlreiche Einteilungen der Wattsedimente (GÖHREN, 1975), die im allgemeinen auf den Verhältnissen von Sand zu Schluff und zu Ton basieren. Das Analyseergebnis wird hierzu am günstigsten in ein Konzentrationsdreieck eingetragen. Dabei ergibt sich, daß die Einteilungen im wesentlichen auf dem Gehalt an Sand beruhen, wobei MÜLLER (1960) und PLATH (1943) noch Unterteilungen innerhalb des Korngrößenbereichs von Sand verwenden.

Tabelle 1  
Benennung der Sedimente in den Wattten der Deutschen Bucht

Wattart	Substrat	Sandgehalt in %*)
Sandwatt	Wattensand	fs > 90
Mischwatt	schlickiger Sand	si'-sifS 90-50
Schlickwatt	(sandiger) Schlick	fs-fsSi 50-15
fettes Schlickwatt	fetter Schlick	fs'tSi-SiT < 15

\*) Rest jeweils Schluff und Ton

Erst im fetten Schlick spielt auch der Tongehalt zur Einteilung eine Rolle. Nach den Untersuchungen von SINDOWSKI (1973) und nach eigenen Untersuchungen kann man etwas verallgemeinernd sagen, daß der Tongehalt erst in Sedimenten mit weniger als 15 % Sandgehalt gegenüber dem Schluffgehalt deutlich steigt. Bei einem Sandgehalt über 15 % liegt das Verhältnis Schluff zu Ton bei etwa 7:3. Bei einem Sandgehalt unter 15 % steigt der Tongehalt, so daß sich das Verhältnis Schluff zu Ton zu einem Überhang von Ton verschieben kann. So fette Schlicke sind in Wattten aber nur selten anzutreffen. Zudem sind die Eigenschaften des Substrats in diesen Korngrößenbereichen ganz wesentlich vom Wassergehalt und damit von dem Grad der Setzung und somit der Steife abhängig. Dies gilt vor allem im Hinblick auf die Siedlungswahl von Endobionten. Dagegen richtet sich die Siedlungswahl der Endomionten zu den sandreicheren Substraten stärker nach dem Verhältnis Sand zu Silt und Ton. In einem Benennungsvorschlag des Senckenberg-Instituts wird daher nach den Werten von Tab. 1 eingeteilt.

Nach sinnlicher Wahrnehmung handelt es sich bei Schlick um einen weichen, bindig-schmierigen, stark wasserhaltigen Boden, in den man knöcheltief bis knietief einsinkt. Stärker entwässerten Schlick nennt man Klei.



Abb. 2. Wurster und Cuxhavener Küste mit Gebieten, in denen nach sinnlicher Wahrnehmung Schlick und anschlückiger Sand zu finden sind

## 1.2 Lage und Anreicherung von Schlickvorkommen

Es gibt eine Reihe von Gebieten, welche für Schlickvorkommen prädestiniert sind:

- a) in einem mehr oder weniger schmalen Streifen längs der Küste,
- b) in Wattbuchten, gleichfalls landnah, vorwiegend an der Westseite,
- c) in Lahnungsfeldern,
- d) im Bereich der Sielaußentiefs,
- e) im Bereich verlandender Priele,
- f) auf hohen Wattflächen im Bereich der Wattwasserscheiden.

Auf Abb. 2 sind beispielhaft die nach sinnlicher Wahrnehmung feststellbaren Gebiete mit Schlick und anschlickigem Sand vor der Wurster und Cuxhavener Küste skizziert.

Der im Tiderhythmus hin und her bewegte Wasserkörper des Wattenmeeres enthält in den Stromspitzen und vor allem bei bewegter See einen hohen Feststoffgehalt. Die Suspensionswolke besteht aus ausgeflockten tonigen und schluffigen Partikeln sowie aus Seston. (Seston stellt die Gesamtheit der Schwebstoffe dar, die aus lebenden [Plankton] und toten [Detritus] Anteilen bestehen.) In den Strömungsspitzen kann auch noch Feinsand suspendiert werden. Die Anreicherung von Schlick findet in solchen Gebieten statt, wo die während des Stauwassers abgesunkenen Ton- und Schluffflocken nicht mehr oder nur selten wieder erodiert werden. Der ufernahe Schlickgürtel vieler Wattbereiche wird von VAN STRAATEN u. KUENEN (1957) durch eine Sedimentationsverzögerung (settling lag) und durch eine Erosionsverzögerung (scour lag) erklärt. Weiterhin führt POSTMA (1961) aus, daß die Stauwasserzeit bei Hochwasser länger anhält als die Stauwasserzeit bei Niedrigwasser. Auch hierdurch wird der landwärts gerichtete Transport von Schlick verursacht.

Bei dem starken Schlickfall im Bereich von Sielaußentiefs dürfte der Brackwassereffekt (Flockung durch Cl-Ionen) von Einfluß sein. Im übrigen ist der Faktor der „Wasserberuhigung“ in allen oben genannten Fällen a) bis f) von ausschlaggebender Bedeutung. Die aktive Landgewinnung durch Lahnungsbau nutzt den Effekt aus, indem durch Anlage kleiner, geschützter Buchten „Beruhigungszonen“ geschaffen werden.

Die meteorologischen Einflüsse auf die Strömungsverhältnisse spielen eine wichtige Rolle im Haushalt der Wattsedimente: Im allgemeinen sind die normalen Gezeitenströmungen im Watt (außerhalb der Priele) von geringer Intensität, die Fracht an suspendierten feinen Feststoffen ist gering. Durch Windeinfluß wachsen die Strömungsintensitäten, zugleich überlagert von oszillierenden Strömungen der Wellenbewegung. Durch Erosion fossiler Kleihorizonte in Prielen, rezenter Schlickablagerungen oder ungeschützter Vorländer der Küstenmarsch wächst der Suspensionsgehalt des Wattwassers unter Windeinfluß.

Starkwindige Wetterlagen können regional unterschiedliche Auswirkungen auf die Verschlickung haben:

- a) Auf freiliegenden Wattflächen können rezente Schlickablagerungen durch die verstärkten Strömungen erodiert werden. Es verbleibt Misch- bzw. Sandwatt.
- b) In Bereichen, in denen auch bei solchen Wetterlagen relativ (im Vergleich zu den freien, seegangs- und strömungsexponierten Watten) ruhiges Wasser vorhanden ist – z. B. im Lee des Landes –, kann sich der Schlickfall infolge der höheren Suspensionsfracht verstärken.



## 2. Messungen vor Cuxhaven

### 2.1 Zur Festlegung der Testgebiete

Die Schlicksedimentation im küstennahen Teil des Neuwerker Watts ist von GÖHREN (1975) untersucht worden. Seine Untersuchungen ergaben, daß der Schlickgehalt an der Oberfläche im Jahresverlauf starken Wechseln unterworfen ist. Die vierteljährlichen bis monatlichen Entnahmen erbrachten jedoch keine signifikante Abhängigkeit zu monatlichen Mittelwerten von Windintensität oder Monatsmitteln des Elbe-Oberwasserabflusses.

Aufgrund dieser Erfahrungen wurde ein neues Forschungsvorhaben in diesem Gebiet für sinnvoll gehalten, in dessen Rahmen die Schlicksedimentation auf dem landnahen Watt etwas südlich von Sahlenburg zu beobachten war.

Die Auswahl dieses Gebietes für eine intensive, interdisziplinäre Untersuchung bot sich noch aus weiteren Gründen an: 1974 hatte das KFKI drei Gutachter beauftragt, die voraussichtlichen sedimentologischen Veränderungen im Neuwerker Wattgebiet infolge der damals geplanten Dammbauten des Tiefwasserhafens bei Scharhörn zu untersuchen. So konnten die Ergebnisse dieser Arbeit (HUNDT, KÖNIG u. REINECK, 1977) ebenso wie andere, im Vorfeld dazu entstandene Arbeiten (REINECK, 1975; 1976; SIEFERT, 1974b) mit verwendet werden. Zudem lief seit April 1976 ein Untersuchungsprogramm zur Analyse der küstennahen Sedimente, das in das vom KFKI angeregte Gesamtkonzept paßte und ohne weiteres in das neue Projekt übernommen werden konnte.

Als Ergänzung zu den Messungen im Sahlenburger Watt standen Daten aus zwei Testfeldern bei Neuwerk (Abb. 1) aus den Jahren 1967 und 1969 zur Verfügung, über die GÖHREN (1970) schon kurz berichtet hat. Hier waren auf Flächen von 2,4 bis 3,5 km<sup>2</sup> mehrmals jährlich Feinnivellements mit einer Auflösegenauigkeit von 1 cm durchgeführt worden. So ließen sich geringfügige Veränderungen des Wattniveaus erfassen.

### 2.2 Meßprogramm

Es fällt immer wieder auf, daß sich die morphologischen und hydrographischen Gegebenheiten von Schlickgebieten scheinbar nicht von denjenigen benachbarter, aber schlickfreier Gebiete unterscheiden. Bei den Forschungsarbeiten sollten daher durch möglichst simultane Messungen aller Naturvorgänge in Schlickgebieten und z. T. in schlickfreien Vergleichsgebieten versucht werden, die Ursachen des Schlickfalls zu erfassen. Erst dann wird es möglich sein, Prognosen über Art und Umfang des Schlickfalls auch in anderen Gebieten erstellen zu können.

Im einzelnen wurden im Watt vor Sahlenburg in zwei fast senkrecht zur Küste stehenden Profilen in 100-m-Abständen möglichst alle 14 Tage 39 Oberflächenproben entnommen (Abb. 3). Diese Proben wurden auf den Gehalt von Korngrößenanteilen kleiner als 0,063 mm untersucht. An Stichproben wurden das Verhältnis von Schluff zu Ton und der Gehalt an Kotpillen bestimmt. Die Profile hatten eine Länge von 1600 bis 2000 m.

Gleichzeitig wurden in der Nähe der Profile

- kontinuierlich Wasserstände und Strömungen,
- einmal wöchentlich Salzgehalt, Sauerstoffgehalt und Temperatur des Wassers,
- kontinuierlich Windrichtung und -geschwindigkeit (auf Scharhörn),
- täglich Feuchtigkeit und Temperatur der Luft sowie Niederschlag (in Cuxhaven)

gemessen (Abb. 3). Weitere hydrologische Daten konnten über bekannte Beziehungen

berechnet werden (s. u.). Die Profile wurden im Untersuchungszeitraum fünfmal bzw. viermal nivelliert, um eventuelle Erosionen und Sedimentationen festzustellen.

Alle Messungen wurden von April 1976 bis Ende 1978 durchgeführt und ihre Ergebnisse in Beziehung zur Schlicksedimentation bzw. auch Schlickerosion gesetzt, um so den Versuch zu unternehmen, die Parameter des sedimentären Geschehens im pelittischen Bereich erfassen zu können.

### 3. Sedimentpetrographische Übersicht

Die Schluff- und Tonfraktion nimmt im küstennahen Wattgebiet zwischen Elbe und Weser von Süden nach Norden deutlich ab (GÖHREN, 1975). Im Norden ist das der Küste vorgelagerte Watt bereits reines Sandwatt, wenn man von einem nur schmalen, schlickigen Streifen absieht, der unmittelbar dem Ufer angelagert ist (Abb. 2). Vornehmlich in den Prielsenken dieses Gebietes (zwischen Arensch und Cuxhaven-Döse), aber gelegentlich auch auf den Sandwattflächen, kommt es zur Sedimentation von Schluff und tonreicheren Sedimenten, die nach der Einteilung von Tab. 1 zum schlickigen Sand zu zählen sind (der Gehalt an Korngrößen unter 0,063 liegt zwischen 10 und 50 %). Über solche Schwankungen berichtet schon GÖHREN (1975). Dort wurden die Analysen von 4 bzw. 3 Profilen 1971 und 1973 durchgeführt. Jedoch wegen des zeitlich großen Abstandes blieben die Faktoren, die zu diesem Wechsel führten, verschleiert. Andererseits konnte GÖHREN (1975) jedoch nachweisen, daß der Schlickfall nicht von der Oberwasserführung der Elbe und der durch Windverhältnisse beeinflussten Brackwasserzone in direkte Abhängigkeit gebracht werden konnte. Es wurde daher angenommen, daß u. U. gerade kurzzeitig einwirkende Primärfaktoren zu Schlickfall bzw. zu Erosion führen könnten. Aus diesen Gründen wurde die Sedimententnahme im vorliegend beschriebenen Programm – soweit wie möglich – alle 14 Tage durchgeführt.

### 4. Meteorologische und hydrologische Daten

Sedimentproben wurden von April 1976 bis Oktober 1978 genommen. Für diesen Zeitraum wurden die übrigen Daten analysiert. Die Winddaten von Scharhörn liegen ab 1965 in Form von Ganglinien für 3-h-Mittel und als statistische Auswertungen vor und wurden schon für frühere Zeiträume veröffentlicht (SIEFERT, 1976). Die übrigen meteorologischen Daten wurden als Tagesmittel freundlicherweise von der Wetterwarte Cuxhaven zur Verfügung gestellt. Um entsprechend Vorlauf zu den ersten Proben zu haben, sind die Daten ab März 1976 zusammengestellt. Zwar wurden sie 15 km nordwestlich bzw. 10 km östlich des Meßgebietes vor Sahlenburg gewonnen, ihre Repräsentanz kann dennoch als gesichert gelten. So haben andere Untersuchungen ergeben, daß die auf Scharhörn gemessenen Windverhältnisse repräsentativ für die innere Deutsche Bucht sind.

Da das Watt im Bereich der Profile recht hoch liegt (Abb. 4 zeigt die Profilschnitte), können die im Meßgebiet gewonnenen Wasserstandsmessungen nur den oberen Teil der Tidekurve erfassen, aber das ist eben auch die vollständige Überströmungsphase des Gebietes. Die Registrierungen am Tidepegel „Punkt X“ (Abb. 3) laufen durchgehend seit 1971.

Schon vor 1976 hatten in diesem Gebiet Strömungsmessungen stattgefunden. Zur synoptischen Messung wurden erneut ab August 1976 Geräte eingesetzt.

Die Messungen wurden in Prielsenken am seeseitigen Ende der Profile an den Standorten

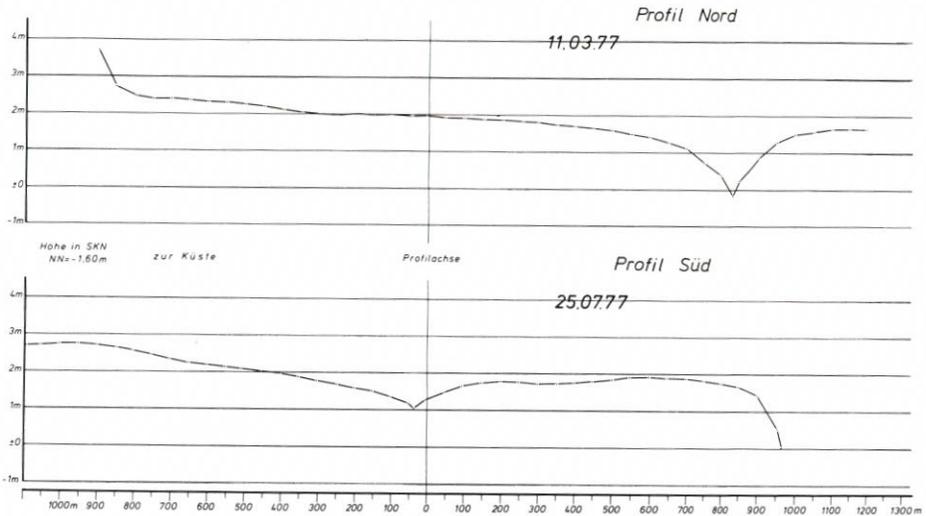


Abb. 4. Schnitte durch die Profile Nord (= Wernerwald) und Süd, 1977

Sahlenburg und Arensch durchgeführt (Abb. 3), um zu gewährleisten, daß bei der gerätetechnisch bedingten Meßhöhe von 30 cm über Grund die Tideströmungen jeweils über möglichst lange Zeiträume registriert werden konnten. Verwendet wurden dazu die seit langem bewährten Wattdauerstrommeßgeräte mit Registrierungen in Abständen von 5 Min.

Die chemisch-physikalischen Wasseranalysen wurden im Rahmen von wöchentlichen Wassergütemessungen am Strand von Sahlenburg vorgenommen, die von 1971 bis Ende 1979 liefen.

Während der Meßkampagne 1976/78 wurden auch Seegangsmessungen am Orte durchgeführt. Sie dienen im wesentlichen dem Nachweis der Kontinuität mit Messungen, die in den Jahren zuvor an drei Stellen in der näheren Umgebung (Abb. 3) vorgenommen und über die in einer ausführlichen Arbeit verwendbare Beziehungen zwischen Topographie, Meteorologie und Seegang hergeleitet worden waren (SIEFERT, 1974).

Die wichtigsten Meßdaten aus dem Untersuchungsgebiet liegen in einer Zusammenstellung vor (SIEFERT, 1979).

## 5. Meßdurchführung

### 5.1 Entnahme und Analyse der Proben

Die Proben wurden im Abstand von 14 Tagen an den beiden etwa senkrecht am Ufer stehenden Profilen im Sahlenburger Watt (Abb. 3) entnommen. Es wurden jeweils nur die obersten Zentimeter des Wattbodens einer Sedimentanalyse zugeführt. Die Proben wurden getrocknet, gewogen und auf dem 63- $\mu$ -Sieb gewaschen. Der Waschverlust entsprach dem Anteil an Korngröße < 63  $\mu$ , also Schluff und Ton. Die schlickigen Proben wurden naß verarbeitet. Nach dem Verfahren von FIGGE wurde an einer getrockneten Parallelprobe der Wassergehalt bestimmt. Damit konnte der Feststoffgehalt der analysierten nassen Probenmenge berechnet werden. Parallelanalysen, die getrocknet und dann zur Analyse wieder aufgeweicht wurden, ergaben identische Werte. Jedoch waren sie arbeitsaufwendiger und unsicherer, da sie entweder nicht vollständig aufgeweicht waren oder leicht Verluste bei der Behandlung mit  $H_2O_2$  eintreten konnten.

## 5.2 Aufbereitung und Analyse der meteorologischen Daten

GÖHREN (1968) hat die Strömungen im Wattenmeer um Neuwerk und Scharhörn analysiert und festgestellt, daß Windeinfluß sich auf die Strömungen erst ab Stärke 5 Bft (8 bis 11 m/s) bemerkbar macht. Da die Seegangsentwicklung unterhalb dieser Windstärke ebenfalls vernachlässigbar klein ist (s. u.), sind zur Abschätzung der meteorologischen Beeinflussung hydrologischer Vorgänge in den Untersuchungsgebieten nur Windstärken ab 5 Bft interessant. Da zudem das Watt in den Testfeldern bei stärkeren ablandigen Winden kaum oder gar nicht mehr von Wasser bedeckt wird, sind im Hinblick auf Strömungen und Seegang nur folgende Windlagen von Bedeutung:

- Windgeschwindigkeiten ab 10 m/s,
- Windrichtungen zwischen 150° und 360°.

Entsprechende Windlagen sind als Ganglinien auf Abb. 5 bis 10 dargestellt. Es zeigt sich dabei, daß in den Meßzeiträumen etwa gleichmäßig verteilt ein bis zwei Starkwindperioden je Monat aufgetreten sind, wobei die längsten Zeiträume im Nov./Dez. 1976, Okt./Nov. 1977 und Sept./Okt. 1978 lagen. Die höchsten Windgeschwindigkeiten (als Tagesmittel) wurden im Dez. 1978 und im März 1980 mit rd. 25 m/s (10 Bft) gemessen (Abb. 5 bis 7). Die stärkste auflandige Windperiode wurde jedoch zwischen Aufnahmen der Testfelder bei Neuwerk im Okt./Nov. 1967 über rd. 50 Tage mit Geschwindigkeiten bis zu 30 m/s (11 Bft) erfaßt.

Das Wattensediment ist bei Niedrigwasser der Austrocknung, dem Wind und Niederschlägen ausgesetzt. Die entsprechenden physikalischen Parameter wurden in Form von Ganglinien und Summen- bzw. Mittelwerten zwischen den Probenahmen aufbereitet. Sie sind im folgenden jedoch nicht dargestellt, da eine Analyse keine Verknüpfungen zwischen den Veränderungen des Schluff- und Tongehalts der Sedimente und diesen Parametern erkennen ließ. Sicherlich sind Einflüsse vorhanden, wie z. B. Oberflächenkleinmorphologie, die aber durch eine Sedimentanalyse nicht herausgefiltert werden können. Geochemische, gefügeanalytische und biologische/bakteriologische Untersuchungen mögen hier erfolgreicher sein.

## 5.3 Aufbereitung und Analyse der Tidedaten

Während der Trockenliegezeiten wirkt der Wind zwar direkt auf den Wattboden und seine Sedimente ein, der größere Einfluß erfolgt aber durch die Übertragung des Windes auf das Wasser. Hieraus resultieren Triftströmungs- und Seegangskräfte, die auf den Boden wirken.

Als integrierender Parameter zur Charakterisierung dieser Kräfte bietet sich zunächst die Höhe des örtlichen Thw an: Höhere Thw als bei Springtiden deuten auf größeren Energieeintrag von der Luft in das Wasser und vom Wasser in den Boden. Entsprechend wurden die Daten vom Pegel „Punkt X“ aufbereitet, und zwar jeweils zwischen verschiedenen Probenentnahmen als

- mittlere Thw-Höhen,
- mittlere Höhen der Thw über verschiedenen Horizonten (alle Thw > 1,1; 1,4; 1,5 m NN; MThw = 1,4 m NN),
- Anzahl der Tiden über verschiedenen Horizonten.

Die nachfolgenden Analysen zeigten, daß diese empirischen, integrierenden Ansätze keine Aussagekraft zur Erklärung der Veränderungen der Oberflächensedimente haben. Damit war gleichzeitig der Weg vorgezeichnet, daß Zusammenhänge nur über die unmittelbar wirkenden Naturvorgänge, nämlich Strömungen und Seegang, sichtbar werden könnten.

Die Strömungsmessungen wurden in Form von Ganglinien und Stromvektoren aufbereitet, wie sie schon GÖHREN (1968) verwendete. Abb. 11 zeigt dazu ein Beispiel, nämlich Ganglinien an der Station Sahlenburg (Abb. 3) bei ruhigen Tiden (26. 09. 77) und bei WSW-Wind 7 bis 8 Bft (29./30. 09.).

Im Neuwerker Wattgebiet liegen die max. Stromgeschwindigkeiten bei mittlerer Tide zu rd. 70 % unter 40 cm/s, und die Restströmungen liegen zu rd. 80 % unter 2 km/Tide (GÖHREN, 1968). Die 1976/78 im Sahlenburger Watt gemessenen Werte mit

$$V_{\max} = 35 \text{ bis } 40 \text{ cm/s und}$$

$$\text{Reststrom} = 0,4 \text{ bis } 1,1 \text{ km/Tide}$$

entsprechen den üblichen Wattverhältnissen; nur bei Starkwindlagen erreichten die  $V_{\max}$  im Meßzeitraum Werte bis rd. 90 cm bei veränderten Strömungsrichtungen (Abb. 11); in dieser Beziehung stellen die Testgebiete also repräsentative Flächen dar.

Um die Strömungsverhältnisse ausreichend genau für die weiteren Bearbeitungen zu definieren, wurde als weiterer Parameter bei Windlagen die Summe aus Rest- und Triftstrom, also die tatsächliche Wasserversetzung am Orte, herangezogen. Da das Untersuchungsgebiet bei Sahlenburg dicht unter der Küste lag, wurden nur die Beträge und nicht die (fast immer gleichen) Richtungen betrachtet.

#### 5.4 Berechnung der Seegangsverhältnisse

Bisherige umfangreiche Seegangsuntersuchungen haben gezeigt, daß sog. „ausgereifte Windsee“ auch im Watt nur selten auftritt und sicher nicht allein als dominierender Faktor für den Charakter der Oberflächensedimentation angesehen werden kann. Von entscheidender Bedeutung ist, ob der Seegang im Watt Grundberührung hat und somit in der Lage ist, durch die Orbitalbewegung auf die Oberflächensedimente einzuwirken. Nach der linearen Wellentheorie von AIRY-LAPLACE hat eine Welle Grundberührung, wenn

$$\frac{L}{2} > d$$

(mit  $L$  = Wellenlänge und  $d$  = Wassertiefe) ist. Für natürlichen Seegang mit seinem breiten Wellenspektrum gibt es einen gleichwertigen Ansatz nicht, man geht bei verschiedenen anderen Problemen (Wellendruck, -auflauf) jedoch vielfach davon aus, daß der Einzelwellenlänge  $L$  bzw. deren Höhe  $H$  im natürlichen Seegang die Werte der kennzeichnenden Wellen  $H_{1/3}$  bzw.  $L_{H1/3}$  entsprechen. Werden jedoch die Werte der mittleren Wellen  $\bar{H}$ ,  $\bar{L}$  im natürlichen Spektrum den Einzelwellen gleichgesetzt, so daß in jedem Falle gewährleistet ist, daß die kennzeichnenden Wellen (d. h. etwa jede 3. Welle im Spektrum) bereits deutlich Grundberührung haben, so muß

$$\bar{L} = \bar{T}^2 > 2 d$$

sein.

Der Umweg über die mittleren Perioden  $\bar{T}$  ist erforderlich, da nur sie und nicht die Längen als Meßwerte vorliegen. Um die auf das Watt einwirkende Seegangsintensität zu bestimmen, muß die zugehörige Wellenhöhe berechnet werden. Nach den von SIEFERT (1974a) angegebenen Merkmalen ist der Seegang zwischen Cuxhaven und Neuwerk als „brandungsfreier Wattseegang“ anzusprechen. Als Kriterium für grundberührenden Seegang ergeben sich danach mittlere Wellenperioden von mindestens 2 s. Dies ist nach den zitierten Untersuchungen auf jeden Fall gewährleistet bei Windstärken ab 4 Bft, also etwa ab 8 m/s. Der

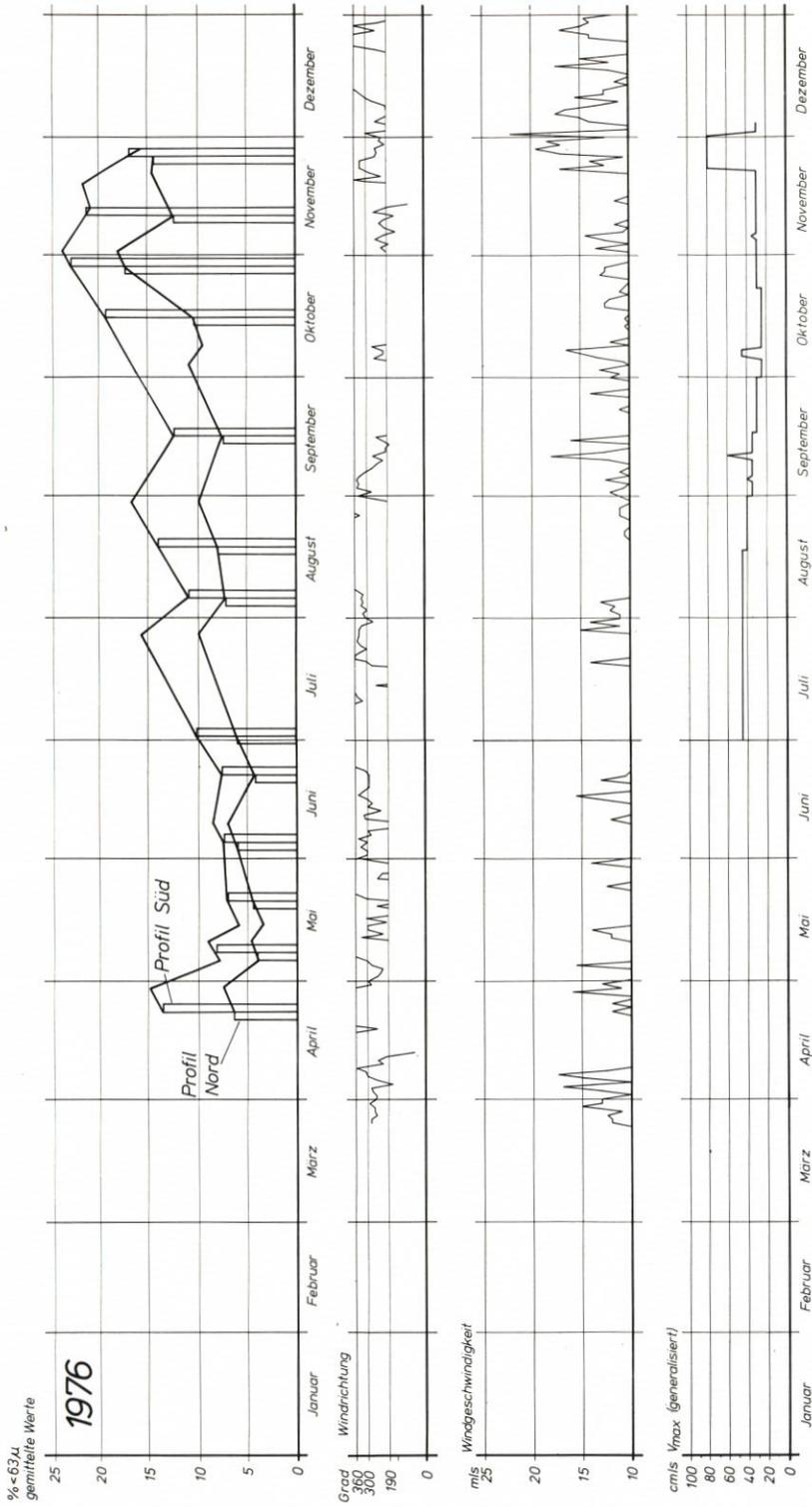


Abb. 5. Ganglinien der Sedimentanteile < 63 μ im Sahlburger Watt, der auflandigen Winde > 10 m/s und der max. Strömungsgeschwindigkeiten; Jahrgang 1976

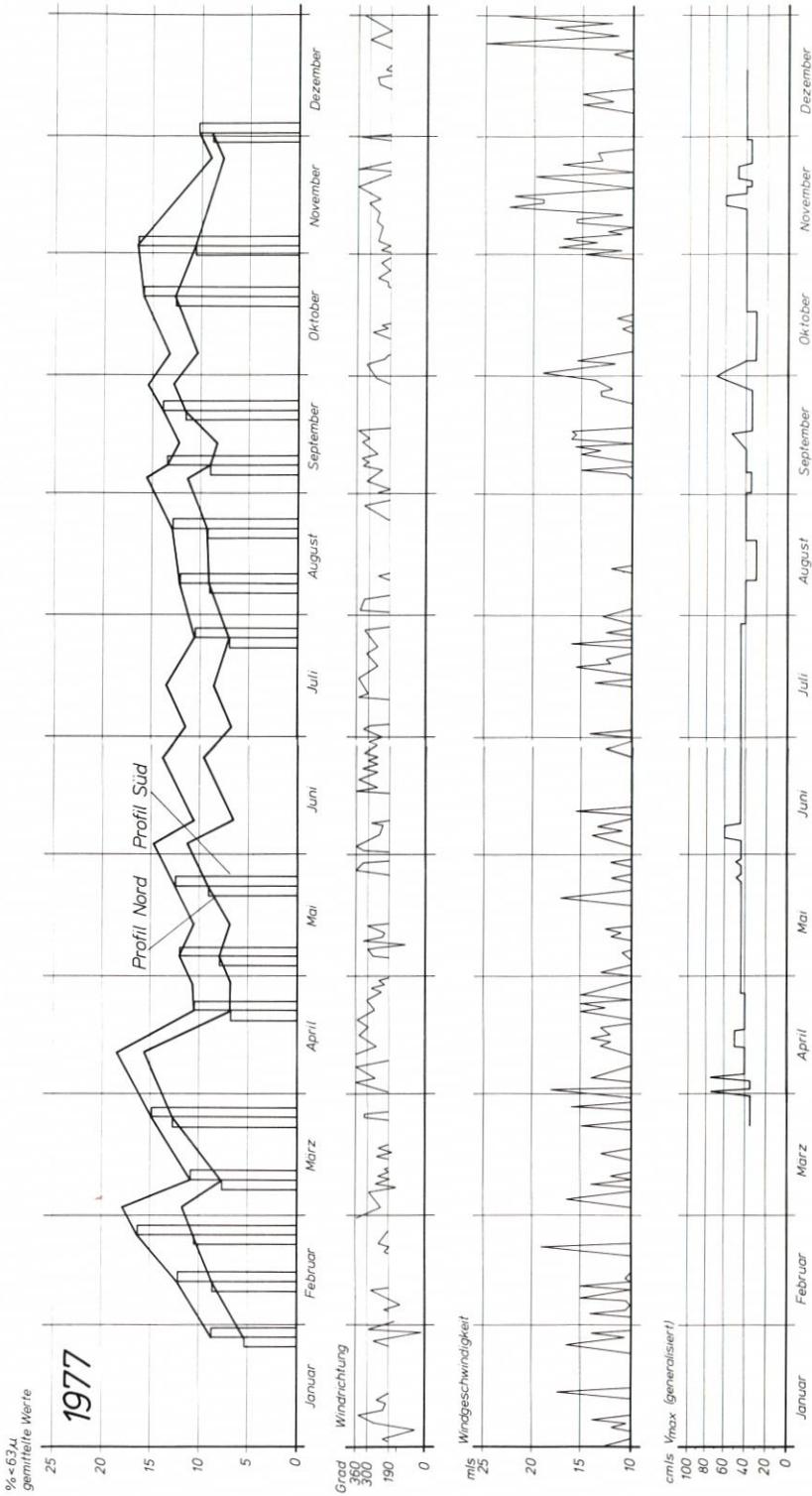


Abb. 6. Ganglinien der Sedimentanteile  $< 63 \mu$  im Sahlenburger Watt, der auflandigen Winde  $> 10 \text{ m/s}$  und der max. Strömungsgeschwindigkeiten; Jahrgang 1977

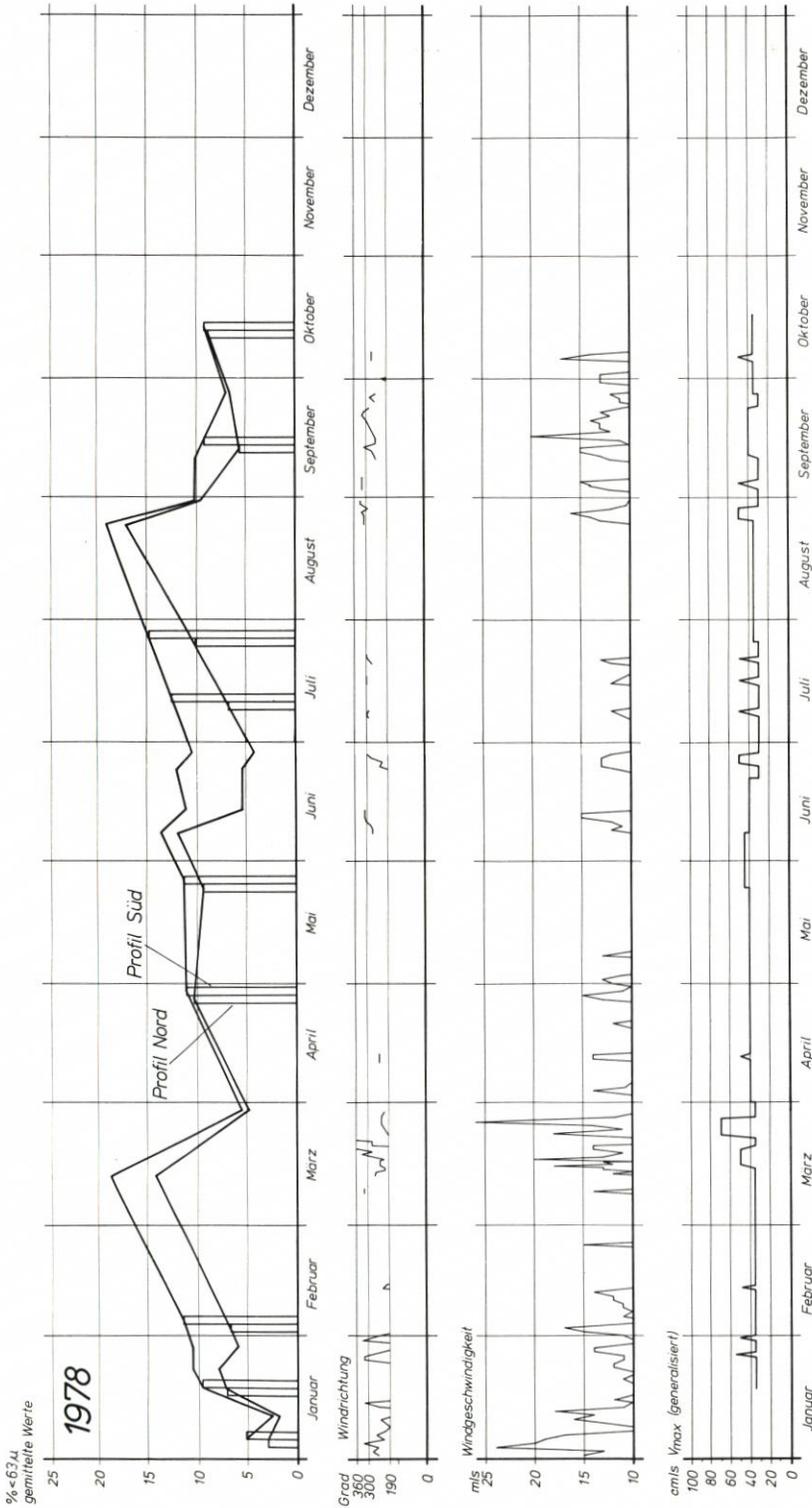


Abb. 7. Ganglinien der Sedimentanteile  $< 63 \mu$  im Sahlenburger Watt, der auflandigen Winde  $> 10 \text{ m/s}$  und der max. Strömungsgeschwindigkeiten; Jahrgang 1978

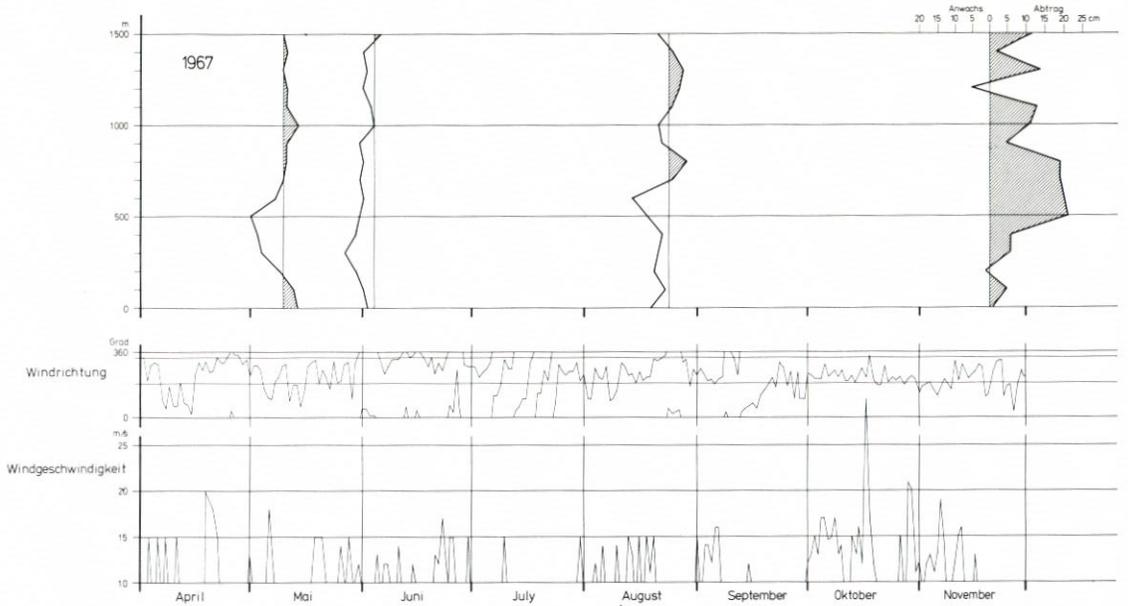


Abb. 8. Morphologische Veränderungen in einem Profil von Feld 1, südöstlich von Neuwerk, Jahrgang 1967 (vgl. auch Ab. 17)

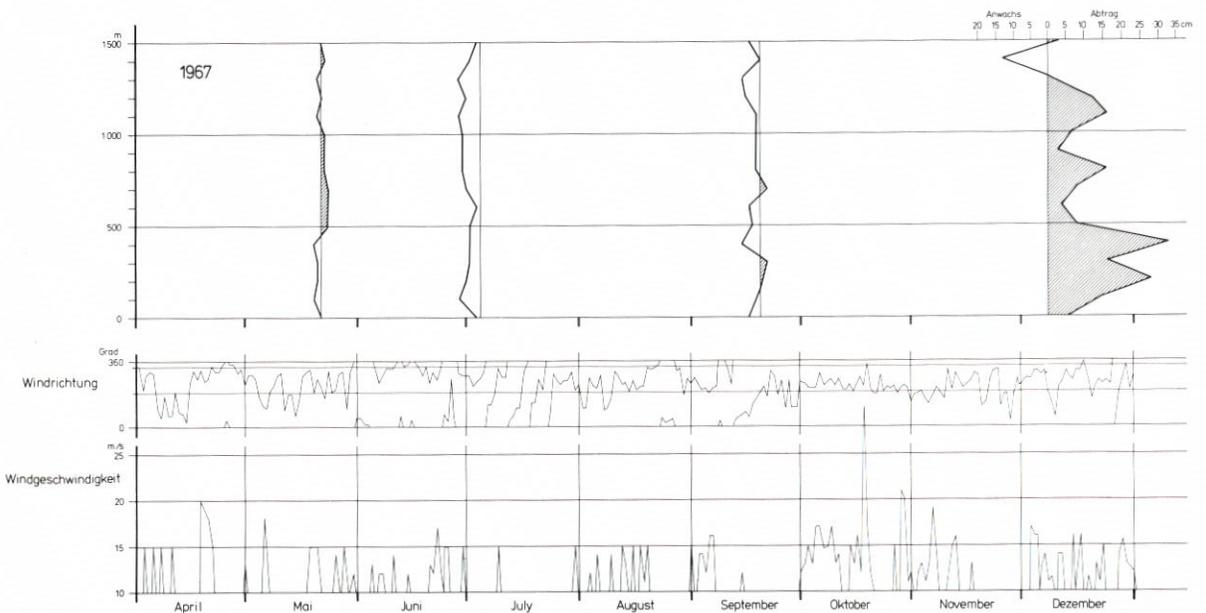


Abb. 9. Morphologische Veränderungen in einem Profil von Feld 2, zwischen Neuwerk und Scharhörn, Jahrgang 1967 (vgl. auch Abb. 17)

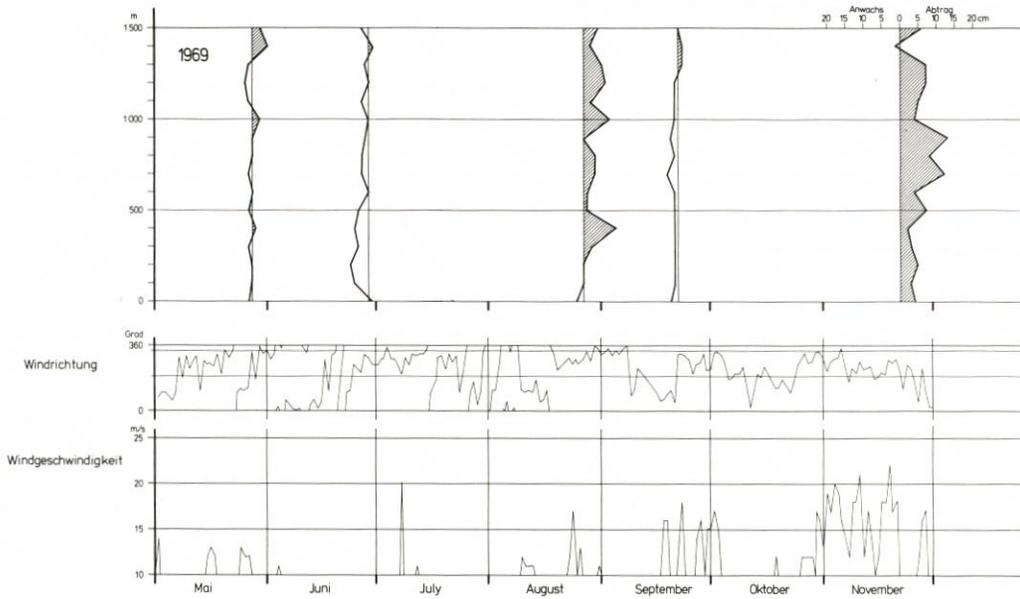


Abb. 10. Morphologische Veränderungen in einem Profil von Feld 2, zwischen Neuwerk und Scharhorn, Jahrgang 1969 (vgl. auch Abb. 17)

grundberührende Seegang erreicht dann kennzeichnende Wellenhöhen  $H_{1/3}$  mit horizontalen Orbitalgeschwindigkeiten an der Sohle um 0,5 m/s.

Nach den Erläuterungen unter 5.2 und 5.3 wurde die untere interessierende Windgeschwindigkeitsgrenze bei 10 m/s festgesetzt. Es ist also gewährleistet, daß bei den in Abb. 5 bis 10 skizzierten Windverhältnissen grundberührender Seegang herrschte. Über die für dieses Wattgebiet gefundenen Beziehungen zwischen Topographie, Wind und Seegang kann letzterer (zunächst als mittlere Höhen und Perioden  $\bar{H}$ ,  $\bar{T}$ ) berechnet werden. Zur Analyse der sedimentologischen Veränderungen sind diese Parameter jedoch nicht gut geeignet. Vielmehr lag es nahe, die zwischen den Entnahmen auf den Boden einwirkende Seegangintensität zu berechnen mit

$$\begin{aligned}
 E^* &= 2 m_0 = 2 \int E(f) df \\
 E^* &= \frac{1}{8} H_{1/3}^2 \\
 \bar{H} &= 0,36 \bar{T} - 0,64 \\
 \text{und } H_{1/3} &= 1,45 \bar{H} \\
 \text{mit } E(f) &= \text{Spektralfunktion}
 \end{aligned}$$

Über  $\Sigma E^*$  können die Veränderungen beurteilt werden.

## 6. Ergebnisse

### 6.1 Veränderung des Schluffanteils

Der Schluff- und Tonanteil innerhalb der beiden Profile zeigte je drei Maxima (Abb. 12). Ein Maximum lag unmittelbar am Ufer, die beiden weiteren Maxima in zwei Prielsenken, die

Pos. 02 - 21-08 - 77

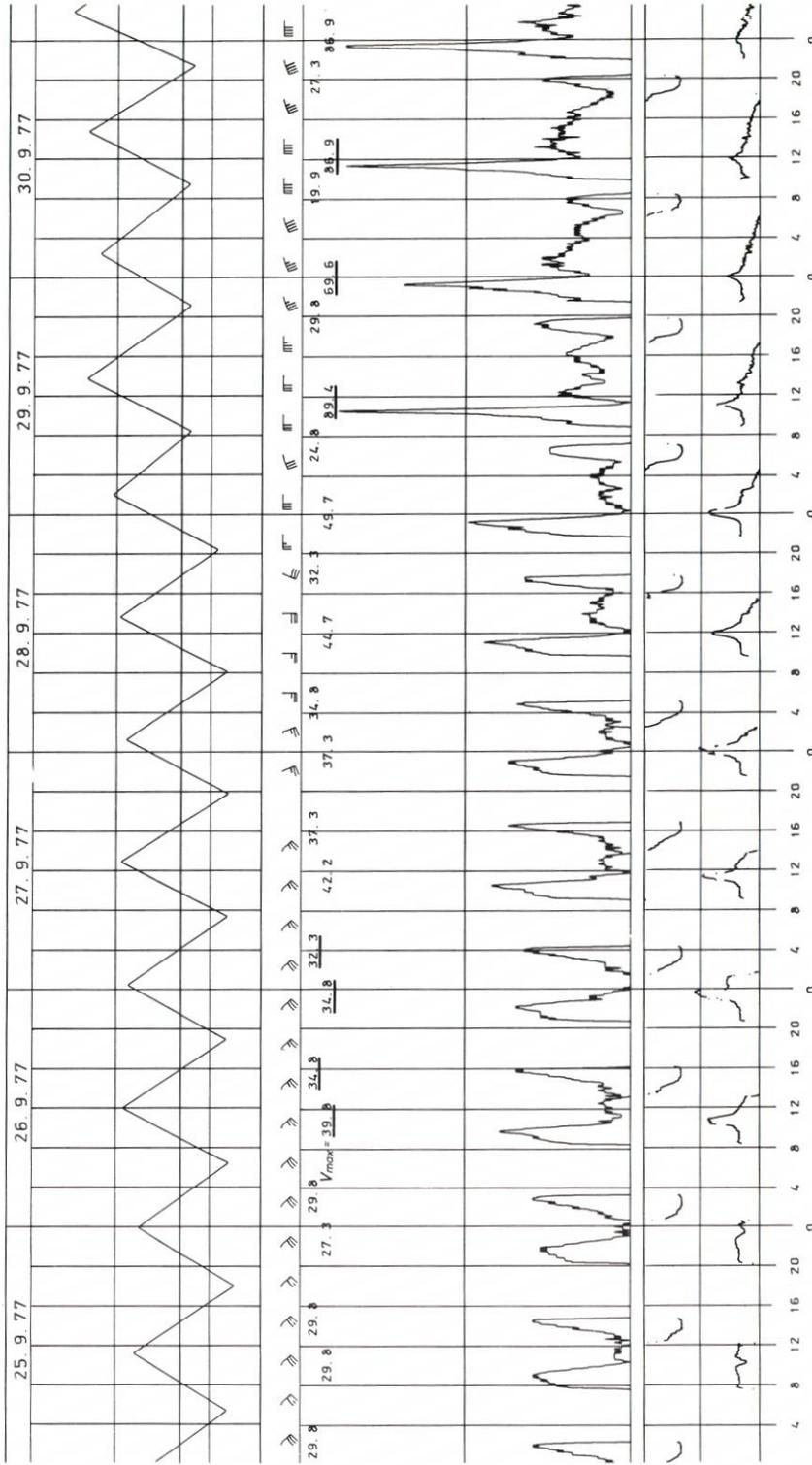


Abb. 11. Beispiel für die Auswertung einer Strömungsmessung (Standort Sahlburg): Schematische Tidekurve, Windfächchen, max. Strömungsgeschwindigkeiten, Geschwindigkeits- und Richtungsganglinien. Die Unterschiede bei ab- und auflandigem Wind werden deutlich.

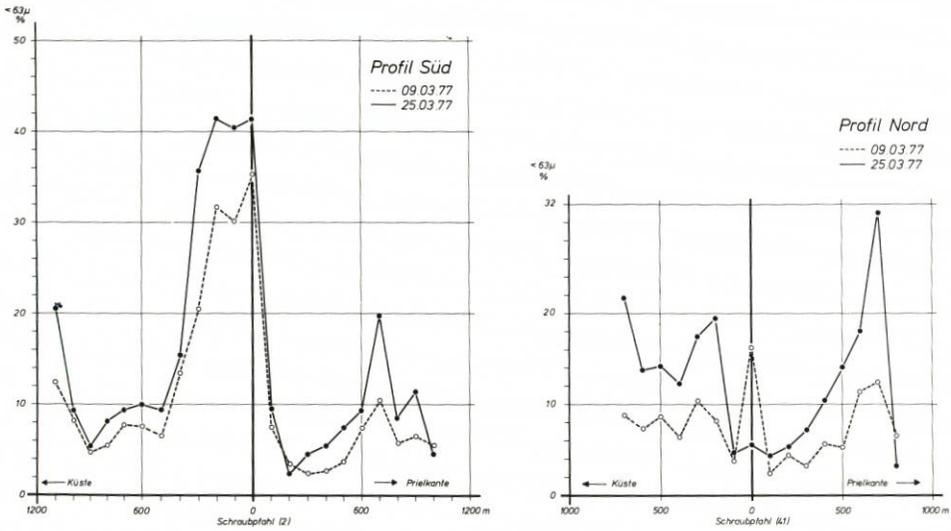


Abb. 12. Der Gehalt an Korngrößen  $< 63 \mu$  in beiden Meßprofilen im zeitlichen Abstand von 16 Tagen. Die Küste liegt jeweils links. Es zeichnen sich ab ein Maximum an der Küste und zwei weitere Maxima dort, wo die Profile Prielkenken überqueren. Ein Unterschied, d. h. in diesem Fall eine Zunahme an Verschlickung, ist erkennbar.



Abb. 13. Eine Deckschicht von schlickigem Sand wird abgetragen. Zunächst entstehen Erosionswannen, die laufend erweitert werden, bis die gesamte Deckschicht abgetragen und der darunter liegende Sand freigelegt ist. In der Sedimentation solch schlickiger Decklagen und deren Erosion besteht der gemessene Wechsel am Gehalt von Korngrößen  $< 63 \mu$ . Profil Süd, Scharhorn-Neuwerker Watt. Aufn. Reineck.

von den beiden Profilen überquert wurden. Dort erreichten die Gehalte an Ton und Schluff vielfach zwischen 20 und 30 %. Die Sedimente der höhergelegenen Wattfläche enthielten davon meist unter 10 %.

Mehrmals wurden die schlickigen Proben auf den Gehalt an Kotpillen untersucht, um sicher zu gehen, daß der Gehalt an Korngrößen  $> 63 \mu$  aus sedimentierter Suspension stammt; denn einzelne schlickige Vorkommen bestehen aus zusammengeschwemmten Kotpillen, und zwar vornehmlich aus solchen von der Muschel *Cerastoderma edule* und den Polychaeten *Heteromastus filiformis*. Diese Kotpillen sind so fest, daß sie transportiert werden können. Sie bleiben auch nach der Eindeckung erhalten, im Gegensatz zu dem Kot der Miesmuschel, der nur frisch abgelegt an der Sedimentoberfläche seine bandnudelartige Form behält.

Schon im Abstand der Probenentnahme von 14 Tagen zeigten sich häufig deutliche Unterschiede im Schluff- und Tongehalt. Dies war besonders markant in den Prielsenken (Abb. 12). In beiden Profilen verliefen Zunahme bzw. Abnahme an Schluff- und Tongehalt parallel.

Weiterhin erfolgten Zu- bzw. Abnahmen über längere Zeiträume anhaltend, das bedeutet, daß es Faktoren gibt, die über längere Zeit die Sedimentation feinkörniger Sedimente bewirken bzw. verhindern und diese sogar abtragen. Der Abtrag erfolgt wie bei allen anschlickigen und schlickigen Substraten primär nicht flächenhaft, wie es bei Sanden der Fall ist, sondern in Form von Erosionswannen (REINECK, 1974), deren weitere Entwicklung dann zu Schlickrücken führt (Abb. 13), bis auch diese abgetragen worden sind. Bei den Messungen wurden also die wiederholte Sedimentation einer schlickigen Deckschicht und deren wiederholte Abtragung verfolgt.

## 6.2 Wirkung des Seegangs auf den Schluffanteil im Oberflächensediment

Die Ganglinien des Schluffanteiles auf Abb. 5 bis 7 wurden zunächst im Hinblick auf eine Eingrenzung derjenigen Windrichtungen analysiert, bei denen eine Abnahme erkennbar wurde. Bisher lag hierzu lediglich die an der Küste allgemein bekannte Faustregel vor, daß nach den ersten kleinen Sturmfluten (also auflandigen Winden) im Herbst die bei ruhigen Wetterlagen im Sommer „angeschlickten“ Watten wieder „fester“ werden. Untersuchungen von GÖHREN (1970) in drei Testfeldern auf dem Neuwerker Watt bestätigten diese Abhängigkeiten von der Windaktivität auch quantitativ.

Es gelang bei der Analyse der Sahlenburger Daten, als maßgebende Windverhältnisse

- Wind aus dem Sektor  $190^\circ$  bis  $300^\circ$
  - mit Geschwindigkeiten von mindestens 10 m/s
  - und einer Dauer von mindestens 4 Tagen
- zu identifizieren.

Die unter diesen Bedingungen einwirkende Seegangintensität  $\Sigma E^*$  wurde jeweils zwischen zwei Aufnahmen ermittelt und mit der Veränderung des Schluffanteiles in Beziehung gesetzt. Daraus ergibt sich auf Abb. 14 ein deutlicher, etwa linearer Zusammenhang mit der (erwarteten) Tendenz, daß mit zunehmender Seegangintensität die feinen Anteile im Sediment abnehmen. Bezieht man in die Betrachtungen die bei den übrigen Windrichtungen aufgetretenen (ablandigen) Seegangsverhältnisse mit ein, die – wegen niedrigerer Wasserstände und kürzerer Streichlänge des Windes zur Ausbildung von Seegang – ungleich kleinere Seegangintensitäten je Zeiteinheit zeigen, so ergibt sich ein ganz ähnliches Bild, nämlich eine Zunahme der feinen Anteile auf Abb. 15. Es zeigt jedoch auch, daß bei einer Gesamtbetrach-

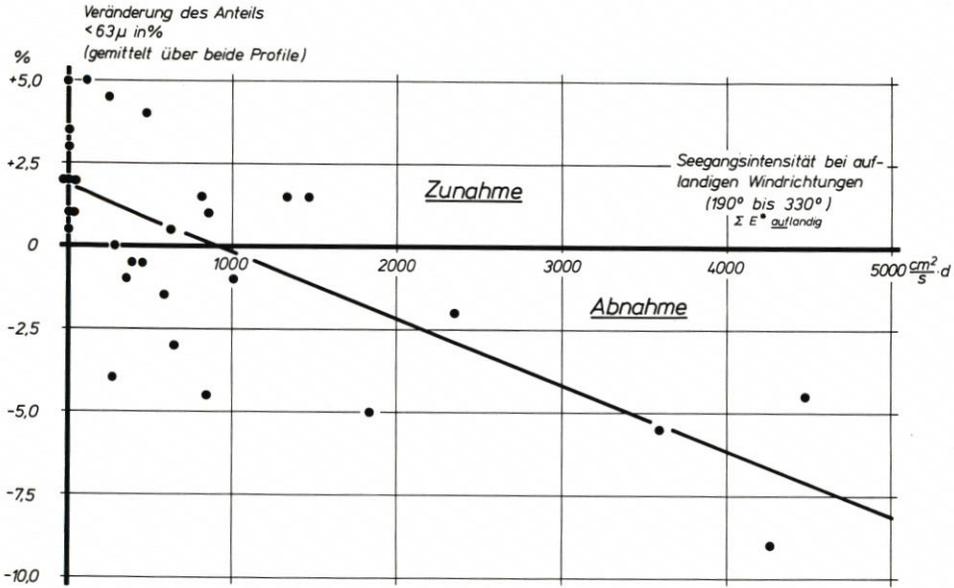


Abb. 14. Veränderungen des Anteils  $< 63 \mu$  im Sahlburger Watt als Funktion der Seegangintensität bei auflandigen Windrichtungen

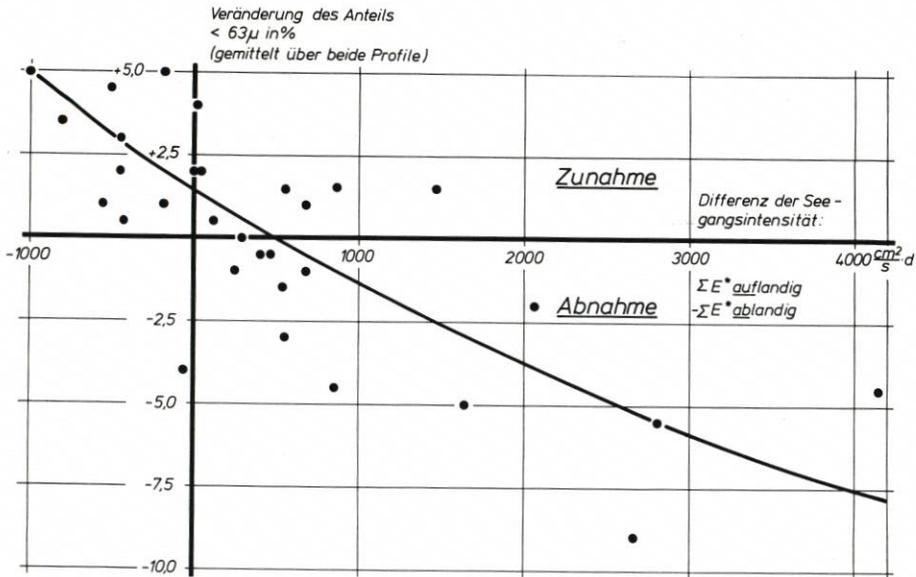


Abb. 15. Veränderungen des Anteils  $< 63 \mu$  im Sahlburger Watt als Funktion der Differenz der Seegangintensitäten bei auflandigen und ablandigen Windrichtungen

Tabelle 2  
Zunahme des %-Anteils <math> < 63 \mu </math> je Tag in %

	nördliches Profil	südliches Profil
Maximum	0,52	0,35
Minimum	0,01	0,03
Mittel	0,19	0,20

tung die Verhältnisse bei ablandigen Winden nicht außer Betracht gelassen werden können: Sobald die Summe der bei ablandigen Windverhältnissen wirkenden Seegangsintensität größer ist als diejenige bei Wind aus  $190^\circ$  bis  $300^\circ$ , ist mit einer Zunahme des Schluffanteiles im Sediment zu rechnen. Diese Situation ist aber praktisch nur dann gegeben, wenn zwischen zwei Entnahmen so gut wie kein aufländiger Wind auftrat. Daraus folgt, daß die auf das Sediment einwirkenden hydrologischen Kräfte bei ablandigen Windverhältnissen ganz ähnlich denen bei ruhigen Wetterlagen sind, daß jedoch der Suspensionsgehalt des Wassers ungleich größer ist.

Für 10 Zeiträume von je 10 bis 18 Tagen mit Windgeschwindigkeiten nur unter 10 m/s zwischen den Probennahmen ergaben sich die Werte von Tab. 2. In Perioden ohne aufländigen Wind über 10 m/s nimmt der Schluffanteil im Sediment des Sahlenburger Wattes um rd.  $2^\circ/00/\text{Tag}$  zu. Entsprechend wurden die Ganglinien auf Abb. 5 bis 7, die nur als Anhalt anzusehen sind, auch für größere Zeiträume zwischen den Probennahmen konstruiert.

### 6.3 Zusammenwirken von Orbital- und Tideströmungen

Während der Meßkampagne vor Sahlenburg wurden die Tideströmungen gemessen, und auf Abb. 5 bis 7 sind die max. Strömungsgeschwindigkeiten als Ganglinien generalisiert dargestellt. Dabei zeigt sich, daß deutliche Geschwindigkeitserhöhungen und damit auch längere Stromwege des Wassers je Flut oder Ebbe nur während gewisser aufländiger Windlagen eintreten, aber eben nicht bei jeder dieser doch sehr ähnlichen Gegebenheiten. Da man aber durchaus in allen Fällen grundberührenden Seegang – also Orbitalströmungen unmittelbar über der Sohle – voraussetzen kann, ist demnach zu unterscheiden zwischen

- ruhigen Wetterlagen ohne Orbitalströmungen und mit kurzen Flut- und Ebbestromwegen,
- ablandigen Windrichtungen mit geringen Orbitalströmungen und kurzen Stromwegen,
- aufländigen Windrichtungen mit ausgeprägten Orbitalströmungen, mittleren Tideströmungen und daher kurzen Stromwegen,
- aufländigen Windrichtungen mit ausgeprägten Orbitalströmungen, erhöhten Tideströmungen und langen (Trift-)Stromwegen.

Es sind hauptsächlich zwei Vorgänge, die gleichzeitig während der Überdeckungsphase des Wattes mit Wasser wirken, wenn entsprechend starker aufländiger Wind weht:

- Der Seegang erzeugt mit der stark turbulenten Orbitalströmung und den nach oben gerichteten Strömungskomponenten eine starke Zunahme der Suspension, etwa proportional der Seegangsintensität. Der Schluffanteil im Sediment nimmt dann kurzfristig ab, der Nettotransport an feinen Bestandteilen bleibt aber solange klein, wie auch der Reststrom (als Differenz von Flut- und Ebbestromvektoren) klein ist: Es wird zwar viel Material suspendiert und über gewisse Strecken transportiert, aber die Strecken sind so kurz, daß kein feines Material aus benachbarten Schlickgebieten herangeführt werden kann (z. B. Ende Okt. bis Ende Nov. 1976 auf Abb. 5).

- Bei langen Triftstromwegen, die zusätzlich zum Reststrom auftreten, werden größere Mengen suspendierten Materials über größere Strecken über das Watt transportiert, der Nettotransport wird also erheblich. Zugleich wird in das Untersuchungsgebiet Material aus Nachbargebieten eingebracht (z. B. Anfang Sept. bis Ende Okt. 1977 auf Abb. 6).

Hinzu kommt der Einfluß der Wassertemperatur auf den Suspensionstransport. CHRISTIANSEN (1974) hat nachgewiesen, daß die niedrigen Wassertemperaturen im Winter dazu führen, daß bei sonst gleichen äußeren Bedingungen etwa fünfmal soviel Material in Suspension geht wie bei den höheren Temperaturen im Sommer. Diese Tatsache ist an den Ganglinien der Abb. 5 bis 7 mit besonders markanten Abfällen im Nov./Dez. 76 und im Nov. 77/Jan. 78 erkennbar.

Bei der Beurteilung der Wirkung dieser Einflüsse muß die Umgebung des Meßgebietes mit berücksichtigt werden: Die lokalen und regionalen Vorgänge im Meßbereich vor Sahlenburg sind auf Abb. 16 noch einmal erläutert. Die für 10 küstennahe Orte in maßstabgerechten Längen angegebenen Rest- und Triftstromvektoren deuten die geschilderten unterschiedlichen Verhältnisse an. Es wird deutlich, daß nach einer Starkwindperiode die Feianteile aus dem Meßgebiet verfrachten, trotzdem aber der Schluffanteil ähnlich hoch bleibt, weil er aus südlich

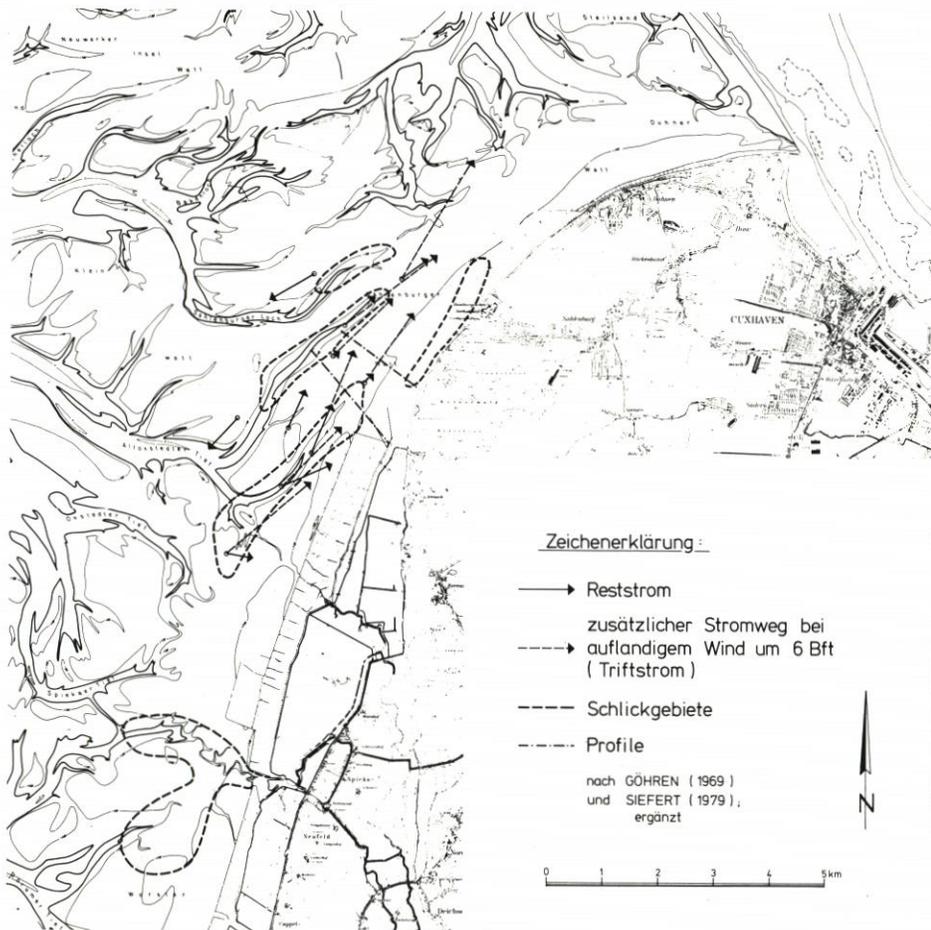


Abb. 16. Reststrom- und Triftstromverhältnisse in der weiteren Umgebung des Meßgebietes

gelegenen Schlickgebieten durch eben diesen Triftstrom neu herangeführt wurde. Man kann also die Entwicklung noch weiter spezifizieren: Da mehr Seegangenergie zum Suspendieren des Feststoffes als zu dessen Abtransport erforderlich ist, muß – ohne Berücksichtigung der küstenparallelen Triftstromeffekte – ein Materialtransport in Ebbestromrichtung, also etwa küstennormal, vorhanden sein. Trotz nur kleiner Reststromvektoren wird dann Material um einige 100 m verlagert werden können. So wird es kurzfristig zu Abnahmen im Schluffgehalt des Untersuchungsgebietes kommen. Dies wird nur dann nicht deutlich, wenn Triftströmungen aus anderen Gebieten neues Material heranzuführen.

Zu demselben Ergebnis kommen noch nicht abgeschlossene Untersuchungen von DÜCKER (1981) über den Suspensionsgehalt an Meßstellen südlich und östlich von Scharhörn: Der Seegangseinfluß ist maßgebend für den Start der Suspension; die an einem festen Ort gemessenen Mengen werden wesentlich durch die Verhältnisse in der näheren und weiteren Umgebung mitbestimmt.

#### 6.4 Veränderung der Watt Höhen

Die Höhenveränderungen in drei Testfeldern im Neuwerker Watt, die im 100-m-Raster in kurzen Zeitfolgen durch Feinnivellement aufgenommen wurden, hat GÖHREN (1970) in einer ersten Analyse der Windaktivität gegenübergestellt (Abb. 17). Es war sein Ziel, seine aus der Analyse zahlreicher Strömungsmessungen und unter Einbeziehung weiterer allgemeiner Wattbeobachtungen entwickelte Hypothese zu belegen, daß die mittlere Höhenlage freier Wattflächen durch das ständige Wechselspiel wattaufbauender Gezeitenströmungen und erodierender Triftströmungen bestimmt und stabilisiert wird. Er kommentiert dazu:

„Zur Erhärtung dieser Hypothese wurden im Jahre 1967 drei Testfelder im Neuwerker Watt abgesteckt, im 100-m-Raster durch dünne Drahtnadeln vermarktet und in kurzen Zeitfolgen durch Feinnivellement aufgenommen. Die Aufnahmegebiete sind in Abb. 17 zusammen mit den Ergebnissen und Angaben über die Windaktivität dargestellt.“

Für die Felder 1 und 2, auf dem hohen Watt westlich und östlich von Neuwerk, findet sich eine eindeutige Bestätigung des angegebenen Zusammenhangs. Ausgehend von der mittleren Feldhöhe nach Aufnahmen im Sommer 1966 ist das Watt nach den windreichen Herbst- und Wintermonaten im Mittel aller Aufnahmepunkte um einige Zentimeter abgetragen; in den sehr ruhigen Sommermonaten 1967 höht es sich merklich auf, um dann nach den ersten Herbststürmen erneut in Erosion zu geraten. Anders liegen die Verhältnisse im Feld 3, westlich von Scharhörn. Hier bringen offensichtlich Starkwindwetterlagen Materialablagerungen, während das Watt in der ruhigen Jahreszeit stabil bleibt.

Die Umsatzwerte, die durch die mittleren absoluten Höhenänderungen ausgedrückt werden, lassen für alle drei Felder eindeutig eine Zunahme des Materialumsatzes mit der Windintensität erkennen.“

Die Veränderungen in denselben Feldern wurden erneut über das Jahr 1969 gemessen. Um die Resultate sinnvoll als Ergänzung zu den Meßergebnissen vor Sahlenburg verwenden zu können, wurden aus den Testfeldern 1 und 2 je ein repräsentatives Profil im Bereich der Wattwasserscheiden ausgewählt und die Höhenveränderungen von 1967 und 1969 in Abb. 8 bis 10 dargestellt. Entsprechend den bei Sahlenburg gewonnenen Erkenntnissen wurden hier wiederum die auflandigen Winde ab 10 m/s als Primärparameter verwendet. Für dieses – gegenüber Sahlenburg freier liegende – Wattgebiet wurde als entsprechend wirksamer Windvektor derjenige zwischen 190° und 330° gefunden. Dieser stimmt weitgehend mit dem Sektor überein, der als aufländig aus umfangreichen Seegangsmessungen in diesem Watt ermittelt worden war, nämlich 210° bis 350° (SIEFERT, 1971).

Für die Meßzeiträume wurden dann entspr. dem Ansatz für das Watt vor Sahlenburg die Seegangintensität gemessen und schließlich auf Abb. 18 die mittlere Höhenveränderung über

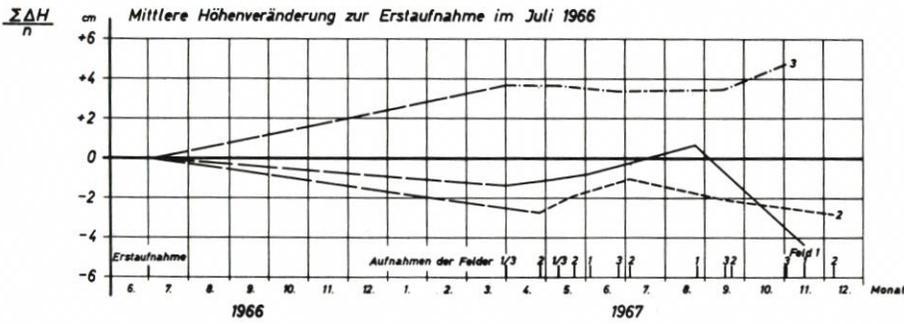
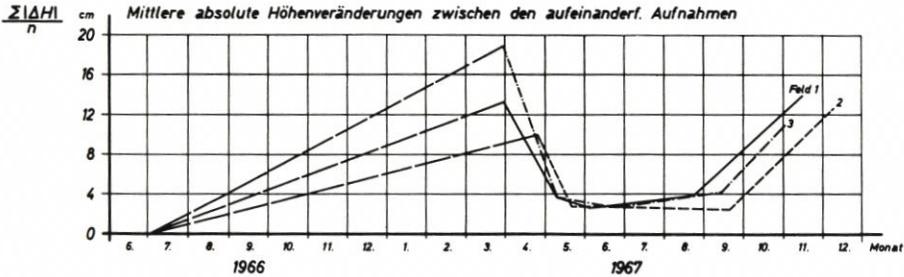
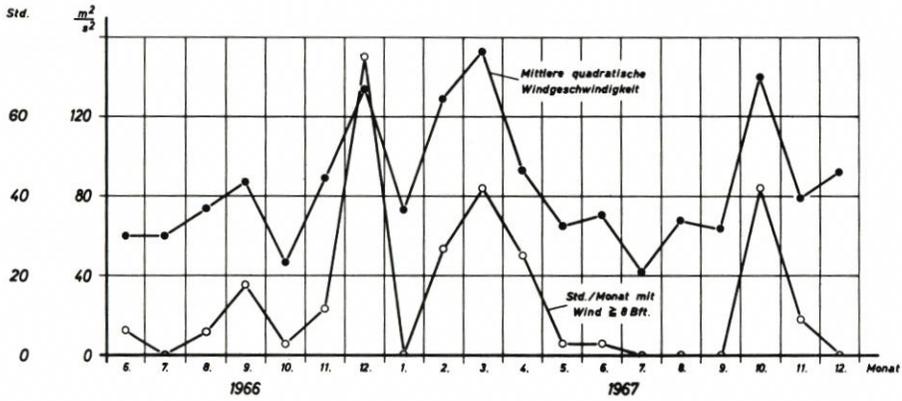
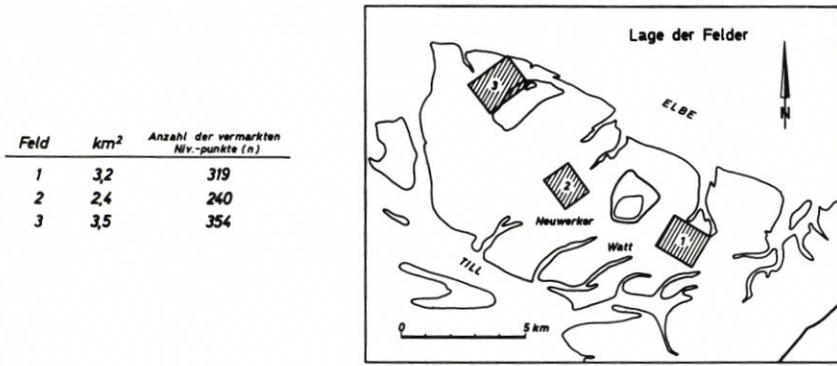


Abb. 17. Höhenveränderungen in 3 Testfeldern im Neuwerker Watt (aus GÖHREN, 1970)

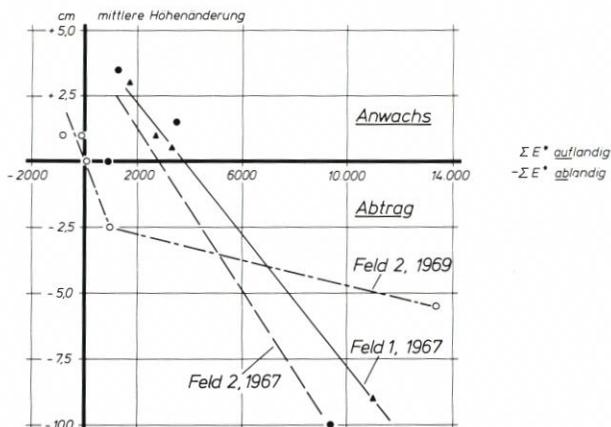


Abb. 18. Mittlere Höhenveränderungen im Neuwerker Watt als Funktion der Differenz der Seegangsintensitäten bei aufländigen und abländigen Windrichtungen

der Differenz von aufländiger und abländiger Intensität aufgetragen. In Übereinstimmung mit den Erkenntnissen von GÖHREN (1970) und vor Sahlenburg ist mit zunehmender aufländiger Seegangsintensität mit deutlich auszumachender Erosion zu rechnen. Hiermit ist sogar ein erster Ansatz möglich, der es bei bekanntem Seegangsklima erlaubt, Höhenveränderungen im Watt oder zumindest ihre Variationsbreite vorherzusagen.

## 7. Ausblick

Die Untersuchungen haben gezeigt, daß zur Analyse der Schlicksedimentation in begrenzten Gebieten umfangreiches Datenmaterial über die meteorologischen und hydrologischen Gegebenheiten herangezogen werden muß. Darüber hinaus ist stets zu berücksichtigen, daß es sich hierbei wegen des – in gewissem Umfang immer vorhandenen – Sediment- und Wasseraustausches nicht um lokale, sondern um regionale Vorgänge handelt. Daraus folgt, daß Zustand und Veränderungen der näheren und fernerer Umgebung Bedeutung haben.

In der vorliegenden Arbeit ist es gelungen, Faktoren der Schlicksedimentation qualitativ und quantitativ nachzuweisen, allerdings nur exemplarisch für zwei Wattbereiche. Letzten Endes liegt es im vitalen Interesse der Küstenforschung, solche Zusammenhänge in allgemeiner Form und für Vorhersagen brauchbar zu erarbeiten. Das ist sicher möglich, aber der Weg dorthin führt nur über weitere umfangreiche Messungen in der Natur.

## 8. Schriftenverzeichnis

- CHRISTIANSEN, H.: Über den Transport suspendierter Feststoffe in Ästuarrien am Beispiel der Elbmündung bei Neuwerk. Hamb. Küstenf., H. 28, 1974.  
 DÜCKER, H. P.: Über den Suspensionsgehalt in Flachwassergebieten. Hamb. Küstenf., in Vorbereitung für 1981.  
 GÖHREN, H.: Triftströmungen im Wattenmeer. Mitt. des Franzius-Inst. der TU Hannover, H. 30, 1968.  
 GÖHREN, H.: Die Strömungsverhältnisse im Elbmündungsgebiet. Hamb. Küstenf., H. 6, 1969.

- GÖHREN, H.: Studien zur morphologischen Entwicklung des Elbmündungsgebietes. Hamb. Küstenf., H. 14, 1970.
- GÖHREN, H.: Die Sedimente im küstennahen Watt zwischen Elbe und Weser. Hamb. Küstenf., H. 33, 1975.
- HUNDT, C., KÖNIG, D. u. REINECK, H.-E.: Die voraussichtlichen sedimentologischen Veränderungen im Neuerker Watt infolge der geplanten Dammbauten für das Hafenprojekt Scharhörn. Die Küste, H. 30, 1977.
- MÜLLER, C. D.: Fauna und Sediment in der Leybucht. Jb. 1959 der Fst. Norderney, 1960.
- PLATH, M.: Die biologische Bestandsaufnahme als Verfahren zur Kennzeichnung der Wattsedimente und die Kartierung der nordfriesischen Watten. Westküste, Kriegsheft, 1943.
- POSTMA, H.: Transport and accumulation of suspended matter in the Dutch Wadden Sea. Neth. J. Sea Res., Vol. 1, 1961.
- REINECK, H.-E.: Schlickrücken auf Sandwattflächen. Senckenbergiana marit., Nr. 6, 1974.
- REINECK, H.-E.: Die Größe der Umlagerungen im Neuerker/Scharhörner Watt. Hamb. Küstenf., H. 33, 1975.
- REINECK, H.-E.: Einwirkungen der vier Sturmfluten im Januar 1976 auf die Wattensedimente zwischen dem Festland und der Insel Neuerker. Hamb. Küstenf., H. 35, 1976.
- SIEFERT, W.: Die Seegangsverhältnisse im Elbmündungsgebiet. Hamb. Küstenf., H. 18, 1971.
- SIEFERT, W.: Über den Seegang in Flachwassergebieten. Mitt. des Leichtweiß-Inst. der TU Braunschweig, H. 40, 1974a.
- SIEFERT, W.: Über die Seegangsintensität im Bereich der geplanten Dämme zwischen der Küste und Neuerker. Forsch. und Vorarb. Stelle Neuerker, Planungsst. Nr. 27, 1974b (unveröff.).
- SIEFERT, W.: Windstatistik Scharnhörn 1965 bis 1975. Hamb. Küstenf., H. 36, 1976.
- SIEFERT, W.: Zusammenstellung der wichtigsten Meßdaten und Untersuchungsergebnisse 1964/77 aus dem Sahlenburger Watt. Forsch. und Vorarb. Stelle Neuerker, Studie Nr. 41, 1979 (unveröff.).
- SINDOWSKI, K.-H.: Das ostfriesische Küstengebiet, Inseln, Watten und Marschen. Samml. geol. Führer, Bd. 57, 1973.
- VAN STRAATEN, L. M. J. U. u. KUENEN, P. H.: Tidal action as a cause of clay accumulation. J. Sedim. Petrol., No. 28, 1957.

# Hybride Modelle – Ein neuer Weg im wasserbaulichen Versuchswesen

Von K.-Peter Holz und Rolf-D. Wundes

## Zusammenfassung

Ergebnisse aus hydraulischen Modellversuchen sollten nur dann in die Natur übertragen werden, wenn Einflüsse aus untersuchten baulichen Maßnahmen an den Modellgrenzen, wo Randbedingungen geregelt werden, vernachlässigbar klein sind. Aus diesem Grund sind insbesondere Tidemodelle bei üblichen Modellmaßstäben oft sehr groß. Um die Ausdehnung solcher Modelle und somit Zeit- und Kostenaufwand zu reduzieren, wurde ein *hybrides Modell* entwickelt. Dieses ist eine Kombination aus hydraulischem und hydrodynamisch-numerischem Modell, die miteinander unter Echtzeitbedingungen gekoppelt werden. Hierbei werden dreidimensionale Nahfelduntersuchungen im hydraulischen Teil durchgeführt, wobei das Fernfeld mathematisch simuliert wird und diese Ergebnisse auf das hydraulische Modell rückübertragen werden.

## Summary

*Results from hydraulic model investigations may be transferred to prototype only, if it has been made sure that hydraulic effects due to structural measures under investigation have decreased to negligibly small quantities where boundary conditions are controlled. According to this requirement, tidal models in particular are very often quite extended in area. In order to reduce the size of such hydraulic models, and thus to save time and costs, a "hybrid model" has been developed. This is a combination of a hydraulic and a hydrodynamic-numerical model which both are coupled under real-time conditions. Applying this new technique, three-dimensional investigations are carried out in a hydraulic model of the near-field region, whereas the far-field simulation is done numerically and fed back to the partial hydraulic model.*

## Inhalt

1. Einleitung . . . . .	52
2. Grundgedanke des hybriden Modells . . . . .	53
3. Anwendung und Güte . . . . .	54
4. Anmerkung . . . . .	56
5. Schriftenverzeichnis . . . . .	56

## 1. Einleitung

Das wasserbauliche Versuchswesen, dessen Anfänge in das letzte Jahrhundert zurückreichen, wurde in dem vergangenen Jahrzehnt durchgreifend modernisiert. Der Einsatz elektronischer Bauelemente führte zu einer wesentlichen Verbesserung der Meßtechnik und zur Verwendung digitaler Kleinrechner zur Steuerung hydraulischer Modellversuche. Die Meßwerterfassung und -aufbereitung über einen zentralen Rechner ermöglichen heute erweiterte und verfeinerte Untersuchungen; die Daten können in höherer Dichte aufgenommen und nach wesentlich mehr Kriterien untersucht werden. Die physikalische Aussage eines Modell-

versuches wird damit besser beurteilbar. Dieses ist unbedingt erforderlich, da der Spielraum für menschliche Eingriffe in natürliche Systeme im Hinblick auf die Erhaltung unserer Umwelt immer geringer wird. Das sich immer stärker durchsetzende Umweltbewußtsein führt zu einer Neuorientierung vieler Fragestellungen auch im wasserbaulichen Bereich, wodurch die Anforderungen im Hinblick auf Umfang und Genauigkeit an die Modellversuche ständig steigen. Die Verbesserung der Gerätetechnik allein ist jedoch bei vielen großflächigen Modellen dazu nicht ausreichend: Die Wahl größerer Modellmaßstäbe wird erforderlich, wobei jedoch schnell technische und räumliche Größenordnungen erreicht werden, bei denen die Durchführung der Versuche, insbesondere bei Tidemodellen, problematisch wird. Es müssen also Ausschnittmodelle hergestellt werden, da der für den Modellbetrieb zur Verfügung stehende Raum begrenzt oder aber ein umfassendes Großmodell wirtschaftlich nicht zu vertreten ist. Die Versuchsergebnisse aus einem Ausschnittmodell sind jedoch nur dann in die Natur übertragbar, wenn sich die hydraulischen Einflüsse der untersuchten Maßnahmen nicht auf die vorgegebenen Werte von Zwangssteuerungen an den Modellrändern auswirken. Dieses ist aber bei einer Zwangssteuerung nicht feststellbar, da auftretende Änderungen dort „wegeregelt“ werden. Dieses „Übertragbarkeitskriterium“ führt bei der Festlegung der unter- und oberstromigen Modellgrenzen von Tidemodellen bei wissenschaftlich wünschenswerten Maßstäben wiederum zu unwirtschaftlichen Ausdehnungen. Die Folge daraus ist die Wahl kleinerer Horizontalmaßstäbe und – aus hydraulischen Gründen damit verbunden – oft eine Überhöhung der Modelle. Mit zunehmender Verzerrung eines hydraulischen Tidemodells beschränkt sich durch die zwangsweise Verwendung von „Überhöhungsrauigkeit“, dessen dynamische Naturähnlichkeit jedoch immer mehr auf die „Eichtide“, so daß Untersuchungen mit anderen hydrologischen oder morphologischen Randbedingungen zu fehlerhaften Ergebnissen führen und die Prognosesicherheit wesentlich mindern. Die letztendlich gewählten Maßstäbe für das zu erstellende Modell stellen oft einen Kompromißzustand dar zwischen Genauigkeitsanforderung und Wirtschaftlichkeit, der in wissenschaftlicher Hinsicht wenig befriedigt.

## 2. Grundgedanke des hybriden Modells

In den vergangenen Jahren ist nun eine völlig neue Modelltechnik entwickelt worden, bei der die Wahl der Modellgrenzen nicht mehr an die oben erwähnte „Übertragbarkeitsbedingung“ gebunden ist: Es werden hydrodynamisch-numerische (HN-) und hydraulische Modelle miteinander so kombiniert, daß beider Vorteile optimal genutzt und ihre Nachteile vermieden werden. Hierbei werden Randbereiche eines in klassischer Weise betriebenen hydraulischen Modells, in denen selbst keine detaillierten Untersuchungen durchgeführt werden müssen, durch HN-Modelle ersetzt. Die mathematischen Modelle können heute für Fernfelduntersuchungen als ausgereift angesehen werden. Die Verlagerung nur modelltech-

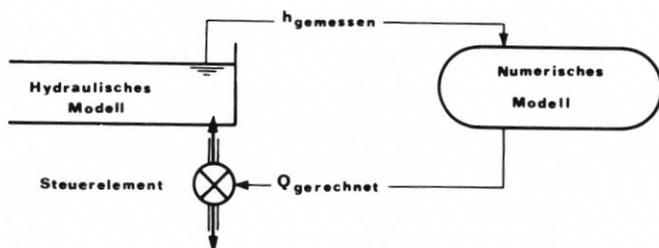


Abb. 1. Datenaustausch an der Koppelstelle

nisch erforderlicher Modellrandbereiche auf einen Rechner führt zu einem neuen Modelltyp – dem *h y b r i d e n M o d e l l*: Das physikalische und das mathematische Modell werden, miteinander gekoppelt, gleichzeitig betrieben, so daß ein kontinuierlicher Übergang für Wasserstand  $h$  und Durchfluß  $\varnothing$  an der Nahtstelle beider Modelle von der einen in die andere Form der Simulation gewährleistet ist. Ein solches, unter Echtzeitbedingungen betriebenes Modell vereinigt die Vorteile beider Modellarten derart in sich, daß Detailstudien örtlicher und komplexer Vorgänge in einem sich auf das eigentliche Untersuchungsgebiet beschränkten hydraulischen Modell dreidimensional und unverzerrt durchgeführt und die Fernfeldauswirkungen von den dynamisch mitrechnenden HN-Modellen ermittelt und auf das hydraulische Modell rückübertragen werden (Abb. 1).

Durch die zeitliche Übertragung der „Koppelgrößen“  $h(t)$  und  $Q(t)$  von einem Teilmodell in das andere wird sichergestellt, daß Auswirkungen irgendwelcher flußbaulicher oder hydrologischer Veränderungen im hydraulischen Teilmodell an den Koppelstellen nicht wie im Fall der Zwangsregelung unterdrückt werden. Durch die Rückführung der Fernfeldauswirkungen in das hydraulische Teilmodell wird erreicht, daß die erforderliche Größe (Länge) eines hydraulischen Modells nicht mehr an die zuvor erwähnte „Übertragbarkeitsbedingung“ gebunden ist. Dieses gilt für ein- und zweidimensionale Fernfeldmodelle, wobei im letzteren Fall der technische Aufwand für die Koppelstelle (Steuerung von  $Q(t)$  über den Rand nach Größe und Richtung) bei Flächenmodellen naturgemäß größer ist als bei der Realisierung einer eindimensionalen Koppelstelle (Steuerung von  $Q(t)$ ), z. B. in einem Tidefluß.

### 3. Anwendung und Güte

Über die Grundsatzuntersuchungen zur Realisierung eines hybriden Prinzipmodells in Testrinnen ist bereits berichtet worden (HOLZ, 1976 u. 1977). Untersuchungen zur Übertragbarkeit auf praktische Fragestellungen im üblichen technischen Maßstab konnten an einem im Franzius-Institut der Universität Hannover vorhandenen, rd. 200 m langen hydraulischen Modell der Unterelbe von Altenbruch (Elbe-km 720.0) bis Grauerort (Elbe-km 660,6) in den Maßstäben 1:300 (horizontal) und 1:100 (vertikal) durchgeführt werden. Die Verzerrung des Modells spielte im Hinblick auf die Untersuchungen zur Frage der allgemeinen Anwendbarkeit der hybriden Modelltechnik keine Rolle. Seeseitig, bei Altenbruch, war das Modell mit

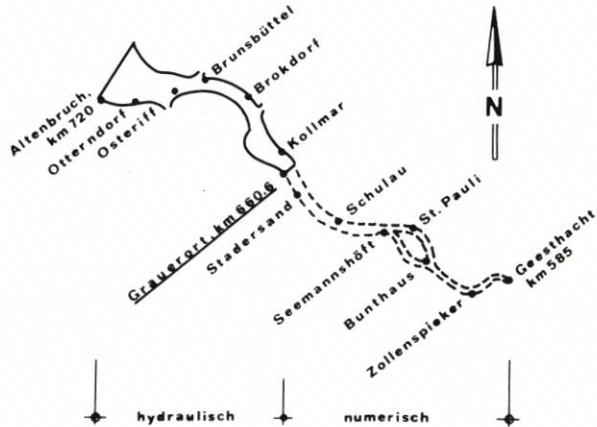


Abb. 2. Übersichtsplan des hybriden Modells der Unterelbe

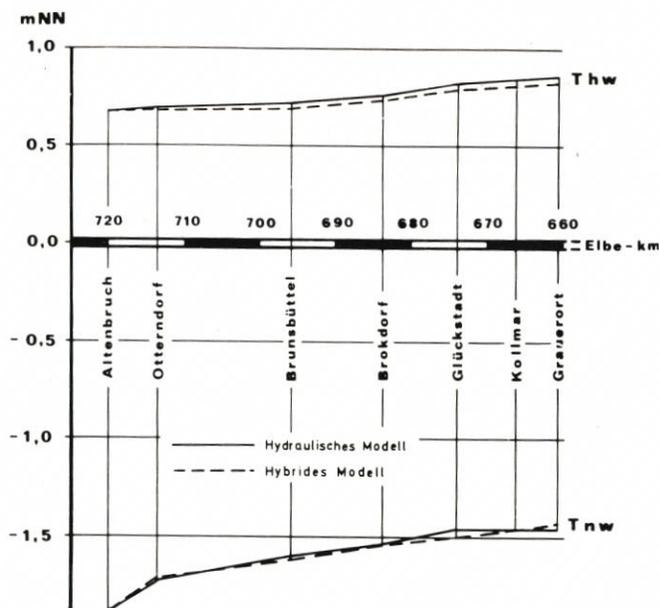


Abb. 3. Vergleich hybrides/hydraulisches Modell

einer h-Steuerung (rd. 40 m lange Klappe) versehen. An der oberstromigen Grenze, bei Grauerort, war eine Q-Steuerung installiert, mit welcher die dortige Randbedingung als Differenz zwischen einer konstanten Zulaufwassermenge und einer veränderlichen Abpump-leistung geregelt wurde. Dieses Modell wurde durch ein mathematisches Modell der Unterelbe von Grauerort bis Geesthacht zu einem hybriden Gesamtmodell der Unterelbe erweitert (Abb. 2).

Für den „hybriden“ Betrieb des Modells war kein besonderer technischer Aufwand erforderlich (WUNDES, 1980). In dem eindimensional, im Naturmaßstab rechnenden HN-Modell DØG (SCHULZE, 1973) wurde die Elbe von Grauerort bis Geesthacht, alle Stromverzweigungen berücksichtigend, in Intervallen von etwa 1 km diskretisiert. Geeicht wurde das Modell an der Tide vom 22. 8. 1975 für Zeitschritte von 10 Minuten. Für das Durchrechnen eines Zeitschrittes benötigte der Rechner (TR 86, Telefunken) 5 sec, so daß unter Berücksichtigung der Meßwerterfassung und Steuerung der Pumpe an der Koppelstelle, die ebenfalls von dem Rechner durchgeführt wurden, ein Zeitschritt von 6 sec für das hybride Modell gewählt wurde. Somit konnte, entsprechend den Maßstäben des hydraulischen Modells, die zeitdiskrete Kopplung der beiden Modelle in rd. 240 Intervallen je Tide erfolgen. Dieses liegt – verglichen mit einer Zwangssteuerung – weit über der Mindestzahl von 150 Sollwerten je Tide für eine hinreichend exakte Regelung einer Tidekurve in einem Tidemodell (REHLING, 1972).

Die Güte der hybriden Versuchstechnik wird dargestellt an einem Vergleich der Tidehoch- und -niedrigwasserstände aus hybridem und rein hydraulischem Versuch (Abb. 3).

Die Übereinstimmung beider Versuchsergebnisse ist überzeugend. Phasenfehler treten nicht auf. Die Restfehler resultieren aus der Verwendung einer extrem niedrig liegenden Tide, für die das hydraulische Modell nicht extra nachgeeicht wurde.

Damit ist der Nachweis der Anwendungsreife dieser neuen Modelltechnik erbracht. Bei gutgeeichten Teilmodellen sind Versuchsergebnisse aus hydraulischem und hybridem Versuch nahezu identisch (WUNDES, 1980). Für die Durchführung eines hybriden Modellversuches ist

ein Programmpaket „HYS“ (Hybrides System) entwickelt worden, das die praktische Handhabung hybrider Modelle auch für einen wenig erfahrenen Benutzer wesentlich vereinfacht. Innerhalb eines integrierten Systems übernimmt die Software die Steuerungsfunktionen am hydraulischen Modell, die Meßwerterfassung und das Durchrechnen des mathematischen Modells. Durch die Verwendung einer problemorientierten Sprache, deren Vokabeln aus dem wasserbaulichen Sprachgebrauch entnommen sind, wird das „HYS“ sehr transparent und seine Handhabung von Programmierkenntnissen weitgehend unabhängig. Seine Vielseitigkeit in technischer Hinsicht läßt dem Versuchsingenieur freie Hand bei der Auswahl der Instrumentierung (HOLZ, 1979).

#### 4. Anmerkung

Die Entwicklung dieser neuen Modelltechnik im wasserbaulichen Versuchswesen, ihre Realisierung im Prinzip und Weiterentwicklung bis zur Anwendungsreife wurden von der Deutschen Forschungsgemeinschaft im Rahmen des Sonderforschungsbereiches 79 „Wasserforschung im Küstenbereich“ an der Universität Hannover von 1974 bis 1979 gefördert und vom Franzius-Institut für Wasserbau und Küsteningenieurwesen sowie vom Lehrstuhl für Strömungsmechanik und der Abteilung Elektronisches Rechnen im Bauwesen unterstützt.

#### 5. Schriftenverzeichnis

- HOLZ, K.-P.: Analysis of time conditions for hybrid tidal models. Proc. Int. Conf. on Coastal Eng., Honolulu, 1976.
- HOLZ, K.-P.: Grundsatzuntersuchungen für ein hybrides Tidemodell. Die Küste, H. 31, 1977.
- WUNDES, R.: Entwicklung eines hybriden Tidemodells. Mitt. des Franzius-Inst. H. 49, 1980.
- SCHULZE, K.-W.: Eine problemorientierte Sprache für die Dynamik offener Gerinne (DØG). Mitt. des SFB 79, H. 1, 1973.
- REHLING, U.: Meß- und Regeltechnik für ein hydraulisches Tidemodell. Mitt. des SFB 79, H. 2, 1972.
- HOLZ, K.-P.: Computer Language for Hybrid River Models. Advances in Engineering Software, Vol. 1, Nr. 4, 1979.

# Seegang in einem Ästuar am Beispiel der Außenweser

Von Volker Barthel

## Zusammenfassung

Bisher wurden an der Deutschen Nordseeküste eine Reihe von Seegangmeßprogrammen durchgeführt, die entweder den Bereich des tiefen Wassers, ansteigende Unterwasserböschungen an sandigen Stränden oder Wattengebiete abdeckten. Die hier beschriebenen Ergebnisse stammen von Messungen im Weser-Ästuar, einem Bereich stark wechselnder Topografie, in dem ein komplexes Seegangsklima herrscht: Tiefe Rinnen mit starker Tideströmung wechseln mit Flachwassergebieten, steile Unterwasserböschungen mit flach ansteigenden Platen ab und lassen alle Erscheinungsformen der Beeinflussung von Wellen vorkommen.

Die Beschreibung des Meßprogramms in der Außenweser zeigt die Schwierigkeiten der Naturmessungen in diesem Bereich und die Auswahl der insgesamt fünf Stationen nach bestimmten Kriterien. Die Auswertung nach kennzeichnenden Werten ergibt:

- die Abhängigkeit der Wellenhöhen und -perioden von Wind und Wassertiefe. Dabei stellt sich heraus, daß die Vorhersageverfahren, wie sie z. B. in der amerikanischen Literatur angegeben werden, für den hiesigen Bereich kaum anwendbar sind.
- daß ausgereifter Seegang im Ästuar schon nach kurzer Einwirkdauer des Windes entsteht und ebenso schnell wieder abgebaut werden kann.
- für bestimmte Gebiete des Ästuars zuverlässige Angaben über Wellenhöhen und -perioden aufgrund der herrschenden Windverhältnisse.
- den Einfluß alternierender Tideströmungen auf Höhen und Perioden in Übereinstimmung mit Literaturangaben. Eine Beeinträchtigung der Höhen ist jedoch begrenzt auf den Bereich  $H_{1/3} < 1,0$  m.
- daß die Wellenparameter sich beim Einlaufen in das Ästuar erheblich ändern. Bei Sturmweertlagen ist mit langperiodischem Seegang auch im Platenbereich zu rechnen, so daß eine Gefährdung von Tiefgangschiffen nicht auszuschließen ist.
- daß bei Sturmweertlagen im äußeren Ästuar maximale Wellenhöhen  $H_{max} = 15,0$  m vorkommen können. Diese Werte reichen an die Ergebnisse von Modellrechnungen für die südliche Nordsee heran.

Die Spektralanalyse eröffnet neue Möglichkeiten der Beurteilung des Ästuarseegangs. Es zeigt sich, daß abweichend von den üblichen Energiespektren-Formen im Ästuar typische Mehrfach-Peak-Spektren auftreten, die den Bereich charakterisieren. Die Untersuchung der Spektren mit besonderer Berücksichtigung der Gesamtenergie zeigt,

- daß Energie- und damit Höhenverluste im Riffbereich mit rd. 15 bis 20 % kleiner sind als erwartet; z. T. ergeben sich durch Beugung und Überlagerung größere Wellenhöhen als draußen.
- daß die hauptsächliche Energieumwandlung vor dem bei  $T_{nw}$  freifallenden Platenbereich erfolgt. Nur noch 16 bis 20 % der ursprünglichen Wellenenergie erreichen das Innere des Ästuars. An einem Zahlenbeispiel wird dieser Energieumsatz deutlich gemacht.

Schließlich wird ein Weg aufgezeigt, auch den Ästuarseeegang in spektraler Form mit Hilfe von Parametern zu beschreiben. Ein 10- bzw. 8-parametriges JONSWAP-Spektrum kann in angenäherter Form die Vorgänge während einer Registrierung und charakteristisch für die Meßregion wiedergeben. Damit ist ein Weg für die systematische Behandlung von Ästuar-Energiespektren mit mehreren „Peaks“ aufgezeigt.

Die Anwendungsmöglichkeiten für die hier präsentierten Ergebnisse sind vielfältig. Es soll abschließend an dieser Stelle nur noch einmal auf die Möglichkeiten für eine Vorhersage bei Übertragung von Meßwerten einer Referenzstation, z. B. im Außenbereich auf andere Gebiete des Ästuars, die Bestimmung kennzeichnender Seegangsgößen für Bemessungszwecke mit Hilfe einer Windstatistik und die Bedeutung für die Handelsschifffahrt und den Einsatz von Fahrzeugen aller Art im Ästuar hingewiesen werden.

Trotz der inzwischen vorliegenden zahlreichen Informationen aus dem hier behandelten Untersuchungsgebiet sollen die Messungen fortgesetzt werden unter dem Aspekt der Sicherung der bisher gemachten Aussagen und der Verdichtung des Meßnetzes.

### S u m m a r y

*On the German North Sea Coast field investigation programs on waves have been carried out in deep water areas, over sloping sea bottoms and on beaches up to now. The results presented in this investigation derive from measurements in the Weser estuary, which is a region with a strongly changing topography and a very complex wave climate: deep channels with strong tidal currents follow after shallows, steep sloping banks and tidal flats and cause every type of influence factors. The description of the investigation program points out the difficulties of field investigations in this area and the criteria for the choice of the locations of measurement. The statistical evaluation of significant wave parameters shows:*

- *the interdependence of wave height, period, wind and water depth. Prediction methods like those given in American publications can hardly be applied to the region in question.*
- *that fully arisen sea can already be found in an estuary after a short wind duration and decreases just as fast.*
- *reliable data of wave height and period dependent on wind velocity and direction for certain regions of the estuary.*
- *the influence of oscillating tidal currents upon wave heights and periods in correspondence with publications. The influence however is restricted to  $H_s \leq 1.0$  m.*
- *that parameters of waves penetrating an estuary change a great deal. During storm surges one can find long - period waves in the interior estuary endangering deep-drawing ships in a narrow channel*
- *that waves with  $H_{max} = 15$  m can occur in the exterior estuary during storm surges. This value corresponds with results of wave model computations for the southern North Sea.*

*Spectral analysis opens up new methods of estimation of waves in an estuary. It is shown that apart from the form of an usual energy spectrum typical multi-peak-spectra occur in an estuary, which characterize the concerning site. The analysis of these spectra with a special regard to the spectral energy shows:*

- *that the loss of height resp. energy in the reef region is smaller (15 to 20%) than could be expected. Single waves with a height larger than in the exterior estuary occur.*
- *the main transformation of energy could be detected in front of the wadden area. About 16 to 20 % of the incoming energy reach the interior estuary. This transformation of energy is explained by a numerical example.*

*Finally a method is presented to describe waves especially in an estuary by spectral analysis resp. by parameters. A 10-resp. 8-parameter-spectrum (JONSWAP) can characterize the wave climate in the concerning area. This is a way to handle multi-peak-spectra in an estuary systematically.*

*The range of application of these results is manifold. It should be pointed to the possibilities of wave prediction with reference to a permanent measuring station in the exterior estuary, the evaluation of significant wave parameters by wind statistics for design purposes and the importance for merchant shipping and the assignment of any ships (dredgers, tugs, research vessels etc.) in the estuary.*

*In spite of a lot of data which could be gathered in this area in the meantime the investigation will continue in order to get information of different sites and to confirm the results given in this paper.*

### I n h a l t

1. Einführung und Problemstellung . . . . .	59
2. Wellenverformung im Ästuarbereich . . . . .	60
2.1 Shoaling-Effekt . . . . .	60
2.2 Wellenbeugung (Refraktion) . . . . .	61
2.3 Diffraktion . . . . .	61

2.4 Bodenreibung und Perkolation	61
2.5 Brechende Wellen	63
2.6 Beeinflussung durch Strömungen	64
3. Seegangsmessungen im Weserästuar	65
3.1 Problematik von Seegangsmessungen in einem Ästuar	65
3.2 Erläuterung des Meßprogramms	65
3.3 Meß- und Auswerteverfahren, Rechenprogramm	68
4. Seegang in einem Ästuar nach kennzeichnenden Größen	72
4.1 Windeinfluß	72
4.2 Wassertiefeneinfluß	83
4.3 Abhängigkeit von der Tideströmung	91
4.4 Veränderung der Seegangparameter beim Einlaufen in das Ästuar	97
4.5 Maximale Meßwerte	102
5. Energiebetrachtungen beim Ästuarseegang	106
5.1 Berechnung der Spektren mit der FAST-FOURIER-Transformation	106
5.2 Spektren in einem Ästuar – Diskussion einiger Meßreihen	107
5.3 Gesamtenergie und kennzeichnende Werte im Spektrum	117
5.3.1 Signifikante Wellenhöhe $H_s$	118
5.3.2 Kennzeichnende Perioden und Peak-Periode	120
5.4 Energieverluste beim Einlaufen des Seegangs in das Ästuar	123
5.4.1 Abnahme der kennzeichnenden Höhe und Gesamtenergie	123
5.4.2 Energietransformation	130
5.4.3 „Greifbare“ Energie – ein Beispiel	132
5.5 Parametrisierung von Spektren des Ästuarseegangs	133
5.5.1 Versuche mit dem einfachen JONSWAP-Spektrum	133
5.5.2 Erhöhung der Anzahl der Parameter	134
6. Schriftenverzeichnis	142
7. Häufig verwendete Symbole	145

## 1. Einführung und Problemstellung

Die Seegangsforschung hat in den letzten drei Jahrzehnten in zunehmendem Maß an Bedeutung gewonnen. Ursächlich dafür ist die wirtschaftliche und industrielle Entwicklung des Küstenraumes und Küstenvorfeldes und die wachsende Bedeutung dieser Region für die Gewinnung von Bodenschätzen und den Bau von Energiegewinnungsanlagen. Die Stabilität jeglicher Seebauwerke und der Küstenschutzanlagen (Deiche, Wellenbrecher etc.) ist in hohem Maße abhängig von der statischen und dynamischen Belastung durch Wellendruck und Wellenfolgen. Aber auch die Lagestabilität der z. T. unter Wasser liegenden, z. T. im Verlauf der Tide freifallenden Riffe und Platen und damit auch die Stabilität der Schifffahrtsrinnen dazwischen wird neben der Beanspruchung durch Tideströmungen merkbar beeinflusst durch das Seegangsgeschehen. Die seegangserzeugten Orbitalströmungen bewirken eine Sedimentbewegung, die – abhängig von den Windverhältnissen – die durch Tideströmungen verursachten Verlagerungen verstärkt.

Im Bereich der deutschen Nordseeküste gab es eine Reihe von Seegangsuntersuchungen, die sich mit den Verhältnissen an sandigen Inselstränden, im tieferen Wasser und im Wattengebiet befaßten (BÜSCHING (1978), DETTE (1974), FÜHRBÖTER (1974), HASSELMANN et al. (1973), SIEFERT (1974)).

Es gibt jedoch auch in der ausländischen Literatur kaum Angaben über Untersuchungen in Ästuarien mit einer stark wechselnden Morphologie, einer Folge von Rinnen, Riffen und Platen, die eine Vorhersage nach bekannten Verfahren sehr schwierig gestalten, wenn nicht unmöglich machen. „Bei unregelmäßiger Topografie des Meeresgrundes, z. B. bei einer Reihe von Bänken, und in Buchten oder trichterförmigen Küsteneinschnitten stehen einer Bestim-

mung der Wellen bei verschiedenen meteorologischen Gegebenheiten ohne Spezialmessungen am Ort größte Schwierigkeiten entgegen“ (WALDEN und SCHÄFER, 1969).

Außerdem hat sich gezeigt, daß in den letzten Jahren merkbare Veränderungen in den meteorologischen Verhältnissen an der deutschen Küste eingetreten sind und eine generelle Änderung der Tideverhältnisse nicht auszuschließen ist (SIEFERT, 1978). Auswirkungen auch auf die Seegangsverhältnisse in diesem Gebiet sind dann wahrscheinlich.

Auch im Laboratorium ist die Untersuchung von Seegang unter Heranziehung der theoretischen Ansätze möglich. Die Entwicklung ist hier soweit vorangeschritten, daß selbst die Simulierung von Spektren mit Hilfe komplizierter, rechnergesteuerter Wellengeneratoren durchgeführt werden kann. Die in diesen Modellen nachempfundenen Bedingungen, insbesondere auf den Untergrund bezogen, können jedoch nicht die wahren Verhältnisse reproduzieren. So ist es sinnvoll, daß in zunehmendem Maß Naturuntersuchungen herangezogen werden, um zu einem vertieften Verständnis der Küstengestaltung durch den Wellenangriff zu kommen (FÜHRBÖTER, 1979).

Die vorliegende Arbeit befaßt sich mit den Seegangsverhältnissen im Weserästuar. Die Schwierigkeiten von Naturmessungen, insbesondere auf dem Gebiet des Seegangs, sind allgemein bekannt. Die Vielzahl der Einflußfaktoren in einem morphologisch stark gegliederten Gebiet erzeugt jedoch ein derartig komplexes Seegangsklima, daß eine erschöpfende Beschreibung der Verhältnisse mit Hilfe weniger Naturmessungen kaum möglich ist.

Die gewonnenen Erkenntnisse sollen zunächst einen Anhalt für bzw. einen Überblick über die Seegangsverhältnisse in einem Ästuar liefern. Darüber hinaus können Bemessungsdaten für Seebauwerke abgeleitet und es kann auf die Beanspruchung der Strom- und Küstenschutzbauwerke und die Beeinflussung der Schifffahrt geschlossen werden. Messungen bei Sturmwehlerlagen zeigen, daß erheblich höhere Einzelwellen zu erwarten sind, als bisher angenommen wurde.

Es sollen hier auch die Schwierigkeiten beschrieben werden, die bei derartigen Arbeiten und Untersuchungen sowohl in der Durchführung als auch in der Auswertung auftreten können. Da die Messungen fortgeführt werden, ist damit zu rechnen, daß die fortlaufenden Ergebnisse Verbesserungen bzw. auch Berichtigungen der hier vorgestellten nach sich ziehen.

## 2. Wellenverformung im Ästuarbereich

Laufen Wellen aus dem tiefen Wasser in ein Ästuar ein, so sind sie den unterschiedlichsten Form- und Laufrichtungsänderungen ausgesetzt. Insbesondere in Gebieten mit schnell wechselnder Wassertiefe und einem vielfältigen morphologischen Formeninventar, wie es in einem Ästuar mit Wechsel von tiefen Rinnen, Unterwassersänden und unregelmäßig geformten Platen vorkommt, überlagern sich verschiedene Faktoren und machen es schwierig, Einzeleinflüsse voneinander zu trennen.

### 2.1 Shoaling-Effekt

Bei der Annäherung von Wellen, die in tiefem Wasser entstanden sind, an Bereiche geringerer Wassertiefe wird die Wellenform der theoretischen Sinusschwingung immer unähnlicher. Abhängig von der Bodenneigung wird mit abnehmender Fortschrittsgeschwindigkeit die Wellenhöhe zunächst um einen geringen Betrag kleiner, um dann ständig zuzunehmen. Die Maximalhöhe wird durch die gültigen Brecherkriterien bestimmt, wenn der See-

grund ständig weiter ansteigt. Sonderfälle, in denen Wellen einen Unterwassersand überlaufen, dabei aber nicht brechen, kommen besonders im Außenbereich des Ästuars vor.

Der Flachwasser-(Shoaling-)Effekt wird gekennzeichnet durch einen Faktor  $K_s$ , der aus der Wellen- und Wellengruppengeschwindigkeit ermittelt wird. Tabellenwerte für die Ermittlung von  $K_s$  sind u. a. bei MAGENS (1958), CERC (1966) und WIEGEL (1964) zu finden.

## 2.2 Wellenbeugung (Refraktion)

Die Phänomene der Refraktion sind auf das SNELL'sche Brechungsgesetz der Optik zurückzuführen. Läuft eine Wellenfront schräg zur Böschungslinie auf einen Strand auf, so werden die Wellenkämme, die zuerst die flacheren Bereiche berühren, in Richtung auf die Uferlinie einschwenken. Durch die unterschiedliche Veränderung der Fortschrittsgeschwindigkeiten ergeben sich gekrümmte Bahnen der Wellenorthogonalen, die allmählich parallel zur Böschungslinie bzw. senkrecht zum Strand verlaufen. Das Maß der Refraktion wird durch den Faktor  $K_R$  bestimmt, der u. a. aus dem Abstand der Wellenorthogonalen ermittelt wird und Werte  $>1$  und  $<1$  annehmen kann. Darin zeigt sich, daß Energiezu- und -abnahme vorkommt. Gebräuchliche Verfahren sind wiederum bei WIEGEL (1964) und CERC (1966) angegeben.

MAGENS (1958) hat ein vereinfachtes grafisches Verfahren zur Ermittlung der Wellenbeugung entwickelt. Die Fehler bei der zeichnerischen Ermittlung der Refraktion werden jedoch um so größer, je unregelmäßiger die Bodengestalt des Strandes bzw. Unterwasserhindernisses ist. Während an Stränden mit parallelen Höhenlinien und gleichmäßigem Gefälle bei schräg anlaufenden Wellenfronten die Bestimmung der gestörten Laufrichtung und der Änderung von Wellenhöhen und -längen sowohl grafisch als auch analytisch kein Problem ist, ist z. B. die Wirkung eines unter Wasser liegenden großflächigen Sandriffs, auf das eine Wellenfront schräg auftrifft, kaum durch entsprechende Ansätze zu beschreiben. Refraktionserscheinungen durch die Einwirkung von Strömungen sind ebenfalls möglich.

## 2.3 Diffraktion

Treffen Wellen auf ein Hindernis, so breiten sie sich hinter diesem in Analogie zur Optik (HUYGENS'sches Prinzip) aus. Im Riffbereich der Außenweser können hohe und lange Wellen durch die tiefen Rinnen der Alten und Neuen Weser einlaufen. In der Vereinigungszone beider Rinnen hinter dem Roten Sand kommt es zu Ausbreitungserscheinungen und deren Überlagerung, so daß hier ggfs. größere als die Ausgangswellen entstehen können. Da gleichzeitig ein Wellensystem über das Flachwassergebiet des Roten Sandes in dieses Gebiet gelangt, kommt es zu kaum zu trennenden Erscheinungen. Das Verhältnis der beeinflussten zur ungestörten Eingangswellenhöhe wird meistens durch den Diffraktionsfaktor  $K'$  angegeben. Verfahren für bestimmte Fälle sind bei WIEGEL (1964), CERC (1966) und DAEMRICH (1977) zu finden.

Die Überlagerung von Diffraktion, Refraktion und anderen Einflüssen ist besonders gut auf dem Luftbild der Abb. 2.1 zu sehen, das einen Ästuarbereich mit Unterwasserplatten und Tiderinnen zeigt.

## 2.4 Bodenreibung und Perkolation

Energieverluste und damit Höhenabnahme von Wellen werden in flachem Wasser auch durch Bodenreibung und Sickerströmungen (Perkolation) hervorgerufen. Dabei ist im Bereich

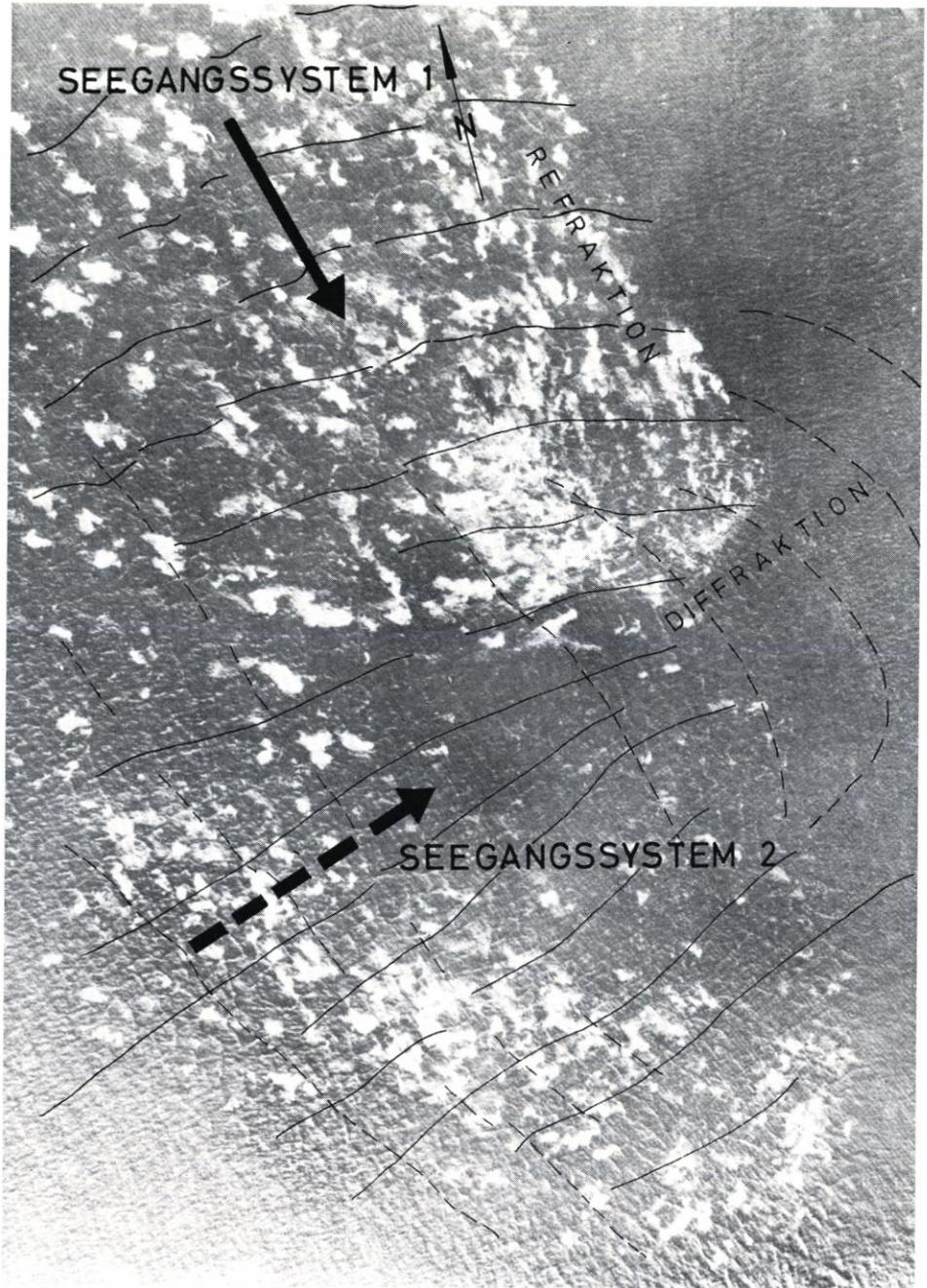


Abb. 2.1 Ästuarbereich mit Refraktions- und Diffraktionserscheinungen (Luftbild)

der Nordseeküste die Perkolation vernachlässigbar klein, da der Boden vorwiegend aus feinen, dicht gelagerten Sedimenten besteht. BRETSCHNEIDER (1954) hat bei Naturmessungen des Energieverlustes zwischen zwei Stationen unerwartet hohe Reibungsfaktoren festgestellt. Er schreibt deshalb der durch Seegang erzeugten Sedimentbewegung einen erheblichen Anteil des Energieverlustes zu und entwickelt entsprechende Ausdrücke zur Berechnung.

## 2.5 Brechende Wellen

Haben Wellen beim Einlaufen in ein Flachwassergebiet eine bestimmte Wassertiefe bzw. eine Grenzsteilheit erreicht, so brechen sie. Physikalisch kann dieser Augenblick definiert werden, wenn die Orbitalgeschwindigkeit im Wellenkamm gerade die Wellenfortschrittsgeschwindigkeit erreicht bzw. überschreitet. In der Literatur findet man eine Anzahl von Beziehungen, von denen das o. a. klassische Verhältnis von Mc COWAN

$$H_b = 0,78 d_b$$

das aus der Theorie von STOKES entwickelt wurde, wohl am bekanntesten ist. Neuere Naturuntersuchungen von FÜHRBÖTER (1974) und SIEFERT (1974) haben jedoch übereinstimmend ergeben, daß als Brecherkriterium für den Flachwasserbereich besser ein Verhältnis von

$$\frac{H_b}{d_b} = 1$$

anzusetzen ist.

Die Grenzsteilheit wurde bereits von MICHELL (1893) zu

$$H/L = \frac{1}{7}$$

angegeben. Eine Übersicht ist bei SCHÜTTRUMPF (1973) zu finden.

Dazu hat STOKES einen Grenzwert des Winkels am Wellenkamm von

$$\alpha = 120^\circ$$

ermittelt, der schon früh durch verschiedene Untersuchungen im Tief- und Flachwasser bestätigt wurde, z. B. von MICHELL (1893) und WILTON (1913). In Küstennähe wird jedoch immer das Wassertiefenkriterium maßgebend sein.

IVERSEN (1952), FÜHRBÖTER (1966), IPPEN und KULIN (1954) und AYYAR (1969) haben den Einfluß von Böschung und Wellensteilheit auf das Verhältnis

$$\frac{H_{\max}}{d}$$

untersucht und dabei z. T. starke, von der o. a. Beziehung abweichende Ergebnisse festgestellt. SIEFERT (1974) hat bei Messungen vor und auf dem Neuwerker Watt herausgefunden, daß für die dortigen Verhältnisse am ehesten das Ergebnis von KISHI (1959) zutrifft. Die untere Grenze der noch brechenden Wellen im Höhenspektrum liegt demnach bei

$$H_{b \min} = 0,5 d \text{ für } d < 0,1 T^2$$

BATTJES (1974) leitet die Laboruntersuchungen von IRIBARREN und NOGALES (s. WIEGEL, 1964), ausgehend von der trochoidalen Wellentheorie, auf ein Ergebnis von

$$H_b = 0,5 d_b$$

bei bestimmten Böschungsneigungen und unter Berücksichtigung des Abzuges von Reflexionsanteilen ab.

Die genauen Vorgänge beim Brechen der Wellen sind weder theoretisch noch experimentell endgültig erforscht. Insbesondere Energieverlust und -austausch in der Brandung, Luftaufnahme und -abgabe beim Brechvorgang (FÜHRBÖTER, 1974) bereiten noch vielfach Schwierigkeiten. Die bisherigen Erkenntnisse reichen daher noch nicht aus, um den vielschichtigen bzw. komplexen Seegang in einem Ästuar ausreichend beschreiben oder erklären zu können.

## 2.6 Beeinflussung durch Strömungen

Ein weiterer nicht vernachlässigbarer Faktor bei der Beurteilung eines Wellenklimas, insbesondere in einem Ästuar, sind die unterschiedlich konzentrierten und alternierenden Tideströmungen. Aus allgemeinen Beobachtungen schien bisher bekannt zu sein, daß bei einer Strömung, die der Wellenfortschrittsrichtung entgegen läuft, die Wellen kürzer und steiler werden. Bei gleichlaufender Strömung nehmen die Wellenlängen zu. Komplizierter werden die Verhältnisse, wenn die Wellen schräg zur Strömungsrichtung verlaufen.

UNNA (1942) und YI-YUAN YU (1952) haben bei vereinfachenden Annahmen die Veränderung der Wellenhöhen und -steilheiten für die beiden erstgenannten Fälle mathematisch behandelt und kommen zu den bereits bekannten Schlüssen. HALES und HERBICH (1972) haben bei Modelluntersuchungen die Veränderung der Wellenhöhen und Steilheiten für den Fall von Wellen, die in eine Mündung mit alternierender Strömung (tidal inlet) eindringen, untersucht. Dabei wurde ein funktioneller Zusammenhang zwischen fünf verschiedenen Parametern bestimmt: Ebbströmungen außerhalb der Mündung erhöhen die Steilheit der Wellen dort derart, daß Energieverluste durch „crest-spilling“ auftreten. Im Inneren eines „tidal inlets“ können jedoch Strömungen allein den Brechpunkt nicht herbeiführen. Auf der Grundlage der STOKES'schen Theorie 2. Ordnung haben JONSSON, SKOUGAARD und WANG (1974) theoretische Untersuchungen über die Wechselwirkung zwischen Seegang und Strömung angestellt. Grafiken ermöglichen es, Änderungen der Wellenlängen in einem Strömungsfeld über einem langsam ansteigenden Grund zu ermitteln. Dabei wird der Begriff des „mittleren Energiehorizonts“ für eine periodische Wellenbewegung in gleichbleibender Strömung eingeführt.

In Gebieten starker und schnell wechselnder Veränderungen, einer Aufeinanderfolge von tiefen Rinnen, Unterwasserbänken und halb aufgetauchten Platen und bei wechselnden Wasserständen, wie z. B. in einem Tideästuar, ergeben sich sehr komplizierte Überlagerungen der bisher geschilderten Erscheinungen.

Der Vollständigkeit halber seien noch die Erscheinungen der Wellenreflexion und -transmission z. B. an Bauwerken erwähnt. Der Reflexionskoeffizient  $\alpha_R$  beschreibt die Wellenhöhenveränderung und wird durch Wellensteilheit, Angriffswinkel und die Art eines Bauwerkes bestimmt. An undurchlässigen, senkrechten Wänden kann sich die Höhe der resultierenden Welle gegenüber der Ursprungswelle verdoppeln (Clapotis). Mit Änderung der Bauwerksneigung (oder auch Strandneigung) ändert sich auch der Wert  $\alpha_R$ . Der Transmissionskoeffizient  $\alpha_T$  gibt in ähnlicher Weise wie  $\alpha_R$  die Veränderung der Wellenparameter bei Durchdringung eines durchlässigen Bauwerkes an. Angaben über die Wahl der Koeffizienten sind bei SILVESTER (1974) und WIEGEL (1964) zu finden.

Für den speziellen Fall eines Steinschüttdamms mit Formsteindeckwerk und schmaler Krone haben BADE und KALDENHOFF (1979) Modellversuche über die Seegangstransmission durchgeführt.

### 3. Seegangsmessungen im Weserästuar

#### 3.1 Problematik von Seegangsmessungen in einem Ästuar

Die Messung der Auslenkung des Wasserspiegels in der Höhe in Abhängigkeit von der Zeit erscheint physikalisch und meßtechnisch einfach. So zeigt sich die ozeanografische Wellenbetrachtung im tiefen Wasser bei Vorliegen entsprechender Meß- und Auswertesysteme als vorwiegend physikalisch-mathematisches Problem, das man mit entsprechender Computerlogik ausleuchten kann. Alle idealisierten Einflüsse des flacher werdenden Seegrundes lassen sich ebenfalls in mathematischen oder auch hydraulischen Modellen nachempfinden und durch entsprechende Behandlung der Bewegungsgleichungen lösen. Messungen an Stränden behandeln meist den Übergang vom quasitiefen Wasser bis zur Wassertiefe  $d = 0$ .

In einem stark gegliederten Ästuar ergeben sich jedoch ähnliche, wenn auch anders gelagerte Schwierigkeiten, wie sie z. B. SIEFERT (1974) für Messungen in den Wattengebieten der Elbe geschildert hat. Einflußfaktoren der unterschiedlichsten Art müssen bereits bei der Konzeption des Programms berücksichtigt werden. Häufig zeigt sich jedoch erst bei der Durchführung des Programms bzw. bei den ersten Auswertungen, welche Schwierigkeiten auftreten, bzw. welche Einflußfaktoren vernachlässigt wurden. Hinzu kommt, daß erst eine große Anzahl von auswertbaren Messungen eine Auswertung zuläßt, die alle Gegebenheiten, z. B. die verschiedenen möglichen Windrichtungen bei möglichst allen Windstärken und unterschiedlichen Wasserständen, umfaßt. PIANC (1973) empfiehlt, daß der Standort einer Meßstation für mindestens ein Jahr beibehalten werden sollte; vorzuziehen ist eine fünfjährige Messung an derselben Station. Nach Erfahrungen im Neuwerker Watt (SIEFERT, 1974) sollten jedoch auch drei Jahre einen ausreichenden Überblick gewähren.

Dabei sind jedoch die Kosten mit dem zu erzielenden Ergebnis zu vergleichen. Häufig genügt schon die Erfassung einzelner Faktoren zur Bestimmung bzw. Hochrechnung und Abschätzung von Extremwerten.

#### 3.2 Erläuterung des Meßprogramms

Wie bereits eingangs erwähnt, sind in den letzten Jahren einige Meßprogramme an der deutschen Nordseeküste durchgeführt worden. Für den Bereich eines Tideästuars mit einer oder mehreren tiefen Schifffahrtsrinnen sucht man jedoch vergebens nach Ergebnissen in der Literatur. Hinzu kommt, daß für den Bereich der Außenweser die Angaben für die höchste Bemessungswelle sehr zweifelhaft waren. Drei Beispiele mögen dies bestätigen:

Der Leuchtturm „Alte Weser“, der 1964 auf einer Wassertiefe von SKN - 6,0 m erbaut wurde, ist auf eine maximale Wellenhöhe  $H_{\max} = 7,5$  m bemessen. Der Leuchtturm „Tegeler Plate“, vor der Tegeler Plate bei einer Wassertiefe von SKN - 3,0 m gegründet, wurde auf  $H_{\max} = 5,0$  m bemessen. Beobachtungen beim Bau des Leuchtturms „Alte Weser“ zeigten, daß schon die für die Bauarbeiten eingesetzte Hubinsel nicht für dortige Verhältnisse eingerichtet war. Die Einstellung der Plattform auf 8 m über dem zu erwartenden Wasserspiegel war nicht ausreichend, als bei einer kurzfristigen Schlechtwetterperiode mit Windstärken um 10 bis 11 Bft. Einrichtungen der Hubinsel durch schwere See, die unter die Plattform schlug, beschädigt wurden. Einzelwellenhöhen müssen demzufolge  $> 8$  m betragen haben. Als weiteres Beispiel sei die erhebliche Beschädigung eines Pegels erwähnt, der während der Sturmfluten vom November 1973 im Schutz der Tegeler Plate die Wasserstände registrieren sollte. Aus dem Maß der Beschädigung und den registrierten Wasserständen läßt sich eine

Einzelwellenhöhe von  $H_{\max} > 5$  m rekonstruieren. Als letztes Beispiel sei der Leuchtturm „Hoheweg“ genannt, der auf bei  $T_{nw}$  freifallendem Watt liegt und gegenüber der Hauptwellenrichtung etwa 3 bis 4 km Wattflächen als Vorland hat. Während der Sturmflut am 2./3. Januar 1976 wurde das leewärts gelegene schwere stählerne Eingangsschott des Turmes durch Seegang derartig stark beschädigt und z. T. aus den Angeln gerissen, daß der Keller vollief und elektrische Anlagen versagten. Die Rekonstruktion einer maximalen Wellenhöhe erscheint in diesem Fall schwierig, da durch die Form des Turmes besondere Effekte der Wellenaufteilung bzw. -überlagerung entstehen können. Diffraktion und Refraktion scheinen in diesem Fall ebenfalls eine große Rolle gespielt zu haben.

Die Aufzählung der Ereignisse, bei denen Seegang eine größere Rolle spielt, als man den Erfahrungen entsprechend annehmen konnte, läßt sich fortsetzen. Es sollte an dieser Stelle jedoch der Hinweis gegeben werden, daß die möglichen Auswirkungen des Seegangs, seine Erscheinungsform und Größe, die vielfach nur aus Beobachtungen annähernd bekannt sind, häufig unterschätzt werden.

1974 wurde vom Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI) eine „Projektgruppe Seegangsmessungen“ gegründet, die sich mit der Planung und Durchführung eines Seegangsmessprogramms an der deutschen Nordseeküste befassen sollte. Nach den ersten Sitzungen der Gruppe zeigte sich, daß wegen der unterschiedlichen topografischen Verhältnisse im Untersuchungsgebiet eine Aufteilung in drei Teilprojekte zweckmäßig war. Es ergaben sich dabei von Osten nach Westen gegliedert:

- a) Ästuarmessprogramm in der Außenweser (BARTHEL, 1979),
- b) Messprogramm in der Außenjade (YSKER, 1979),
- c) Seegangsmessprogramm „Ostfriesische Inseln“ (LUCK, NIEMEYER, 1974).

Das Ästuarmessprogramm in der Außenweser, das vom Wasser- und Schiffsamt Bremerhaven betreut und vom Bundesminister für Forschung und Technologie (BMFT) über das KFKI gefördert wird, wurde aus einem bereits konzipierten Messprogramm weiterentwickelt und in Teilen im Winter 1975/76 begonnen. Im Programm sollten an zunächst fünf Stationen Untersuchungen mit folgendem Ziel durchgeführt werden (BARTHEL, 1979):

- a) Veränderungen der Seegangparameter beim Einlaufen des Seegangs in das Ästuar,
- b) Verteilung der Seegangenergie hinter Riffen und Platen,
- c) Einfluß des Seegangs auf die Topografie und – umgekehrt – Beeinflussung des Seegangs durch die Topografie,
- d) Bestimmung von Bemessungsdaten für Bauwerke aller Art,
- e) Einfluß des Seegangs auf den Einsatz von Schiffen und insbesondere des langperiodischen Seegangs auf die oft nur mit geringer underkeel-clearance fahrenden Tiefgangsschiffe.

An der Station ST wird der aus der Nordsee einlaufende, weitgehend unbeeinflusste Seegang erfaßt. Die Station liegt auf etwa SKN – 18,5 m Wassertiefe. Die Messung erfolgt durch eine wave-rider-Boje.

Die Station RSW liegt an der Ostseite der tiefen Rinne der Neuen Weser dicht unter der Kante des Roten Sandes. Die Wassertiefe beträgt dort SKN – 10,5 m. In der tiefen Rinne der Neuen Weser kann der Seegang verhältnismäßig frei einlaufen. Erste Veränderungen des Seegangs gegenüber ST sind jedoch zu erwarten.

Die Station RSO liegt unmittelbar auf dem Roten Sand bei SKN – 3,5 m Wassertiefe. Bei vorherrschenden Windrichtungen SW bis NW wird der Seegang auf der Untiefe stark deformiert und abgeschwächt. Man kann jedoch annehmen, daß langperiodische Seegangsan-teile durch die Alte Weser eindringen und nach Refraktion an den Böschungen des Roten Grundes das Seegangsklima bei RSO beeinflussen.



Abb. 3.1 Lageplan der Stationen in der Außenweser

Nach Verlust der Pfahlstation wurde eine wave-rider-Boje in Lee des Sandes bei etwa SKN - 7 m Wassertiefe ausgelegt (RSO').

Die Station TPW liegt an der Ostseite der Hohewegrinne dicht unter der Tegeler Plate auf etwa 4 m Wassertiefe. Bis hierhin könnten ebenfalls größere Wellen durch die tiefe Schifffahrtsrinne gelangen. Es sind jedoch starke Refraktions- bzw. ggfs. Reflexionserscheinungen durch die steile Unterwasserböschung der Tegeler Plate zu erwarten. Nach Verlust einer Pfahlstation wurde eine wave-rider-Boje auf gleicher Höhe bei 10 m Wassertiefe ausgelegt (TPW').

Die Station TPO liegt bei ca. 3,5 m Wassertiefe auf gleicher Höhe wie TPW, jedoch auf dem flachen Vorhang der Tegeler Plate. Hier ist eine wesentliche Umwandlung des von draußen eindringenden Seegangs zu erwarten.

Windstärke und -richtung wurden nach bekannten Verfahren auf der Station TPO und am LT „Alte Weser“ gemessen (s. BARTHEL, 1980).

Ursprünglich war geplant, auch Stationen im Inneren des Ästuars bis an die Deiche bzw. zum Hafbereich anzuordnen. Dies konnte aus verschiedenen Gründen nicht verwirklicht werden. Aus den hier vorliegenden Messungen und aus Beobachtungen läßt sich jedoch

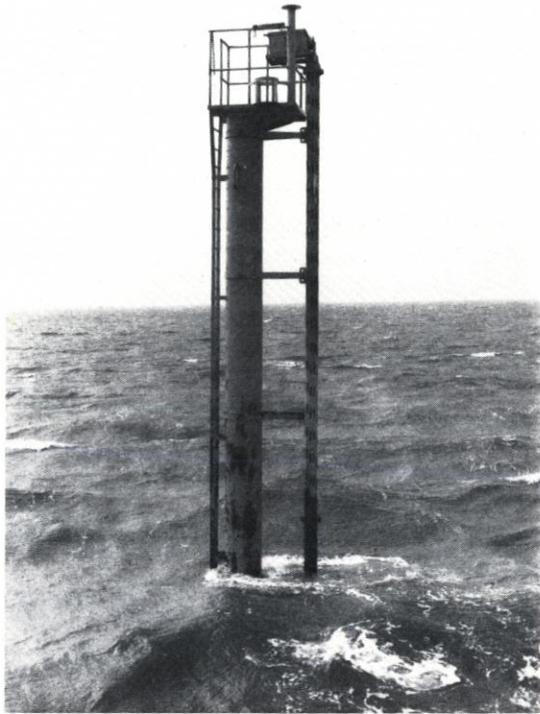


Abb. 3.2 Wellenmeßstation (Pfehlstation)

unschwer erkennen, daß selbst bei Sturmfluten und erhöhten Wasserständen von draußen einlaufender Seegang die Deiche oder den Hafbereich nicht erreicht. Dort tritt in jedem Fall örtlich entstandene Windsee mit relativ kurzen Perioden auf.

### 3.3 Meß- und Auswerteverfahren, Rechenprogramm

Die Wahl der Meßverfahren hängt im wesentlichen von der Auswahl der Stationen, ihrer Lage und von den zu messenden Faktoren ab. Dazu kommen örtliche Gegebenheiten, Möglichkeiten der Stromversorgung und die zur Verfügung stehende Auswertekapazität. Das Ästuar-meßprogramm wurde begonnen mit einer Gerätekonzeption, die sich vorwiegend auf schon vorhandene Geräte einfacher Bauart stützen mußte. So wurden die vier Stationen RSW, RSO, TPW und TPO mit Wellenmeßpegeln „SYSTEM WEMELSFELDER“ besetzt, die

vom Deutschen Hydrographischen Institut (DHI) ausgeliehen und teilweise auch gerätetechnisch betreut wurden. Das Registriergerät wird auf einem Pfahl montiert (Abb. 3.2). Die Bewegungen eines Schwimmers mit vertikaler Führung in einem geschlitzten Rohr werden mechanisch übertragen und auf Wachspapier registriert.

Neben einer Blockregistrierung von 3000 m integrierter Wellenhöhe wird ein 2'- bzw. 4'-Schnellschrieb aufgezeichnet, der einen Wellenzug wiedergibt und statistisch ausgewertet werden kann (Abb. 3.3). Die Blockschriebe können nur eine mittlere Wellenhöhe liefern. Einzelheiten können bei SCHRADER (1960) nachgelesen werden.

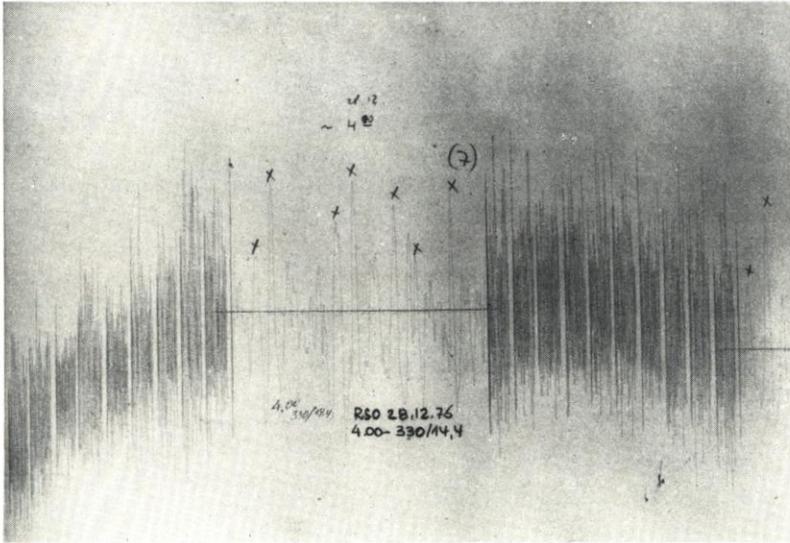


Abb. 3.3 Blockregistrierung mit Schnellschrieb

Die Erfahrung mit dem Meßsystem zeigt, daß für Wassertiefen über 8 m wegen der Abmessungen des Trägerbauwerkes ein wirtschaftlicher Einsatz fragwürdig wird, falls nicht Trägerbauwerke ohnehin zur Verfügung stehen (Bohrinseln, Leuchttürme). Hierzu sei jedoch auf die Verfälschung des gemessenen Seegangs durch das Bauwerk selbst hingewiesen. Eisgang und Bewuchs sowie starke Tidenströmungen können die Beweglichkeit des Schwimmers beeinträchtigen; Seegang selbst, Kollision mit Schiffen und Eisgang gefährden den Bestand des Trägerbauwerkes.

Für die Lage der Station ist weiterhin entscheidend, ob dort starke Tidenströmungen und stabile oder wechselnde morphologische Verhältnisse herrschen. Auskolkungen können die Standfestigkeit eines Pfahles herabsetzen, wandernde Großriffel die Zuordnung der Meßwerte erschweren.

Die Brauchbarkeit des zu Beginn vorhandenen Meßsystems ist auf bestimmte Fragestellungen beschränkt. Die Lage des Schriebes (2' oder 4') gestattet nur eine statistische Auswertung nach kennzeichnenden Größen. Eine nachträgliche Digitalisierung des Schriebes ist aufwendig und führt meist nicht zum gewünschten Erfolg. Eine Vielzahl von Messungen an einer Station ersetzt jedoch mit entsprechender Wertung die Länge des Einzelschriebes und führt zu einer gesicherten Aussage über kennzeichnende Werte. So wurden im Verlauf des Programms folgende analoge Meßschriebe auf Registrierpapier gewonnen:

Station	2 Min.	4 Min.	5. Min.
TPO	507	251	–
TPW	464	20	–
RSO	292	–	–
RSW	127	–	–
ST	–	–	540

An der Station ST wurde bei der vorhandenen Wassertiefe von rd. 20 m u. SKN ein Meßsystem gewählt, das sich bereits bei verschiedenen Programmen im In- und Ausland bewährt hat. Die Wellenmeßboje der Firma DATAWELL Typ „wave-rider“ wird auf der Meßstation weich (mittels Gummiseil) verankert und folgt den Auslenkungen der Wasseroberfläche. Es werden die Beschleunigungen der Boje gemessen und durch zweifache geräteinterne Integration in Wellenhöhen umgewandelt. Eine kardanische Aufhängung der Meßelemente verhindert eine Verfälschung der Meßwerte durch horizontale Komponenten. Die Daten werden durch Funk an eine Landstation übertragen.

Das Empfangssystem wird dort mit einem Multiplexer gesteuert, so daß die dauernd gesendeten Meßdaten nur zu bestimmten Zeiten empfangen, über AD-Wandler in digitale Werte umgewandelt und auf Magnetband aufgezeichnet werden (Abb. 3.4).

Die Empfangsstation wurde auf den landfernen LT „Hoheweg“ verlegt und von Bremerhaven aus ferngeschaltet (Abb. 3.5).

Vor jedem Einsatz wurde jedes Gerät einer Kontrolleichung unterzogen. Dazu wurde die Meßboje an Land an einem Gummiseil aufgehängt und in meßbare Vertikalschwingungen mit Perioden von 2 sec versetzt. Die dabei registrierten Meßfehler haben die Größenordnung von 2 bis 3 % nicht überschritten. Dabei wurden Wellenhöhen bis zu 3 m simuliert.

Bei einer Länge des Einzelschriebes von 20' und einer Meßwert-Aufnahmefolge von 4 Hz können die Daten sowohl statistisch als auch spektral ausgewertet werden. Das Programm hierfür wurde in Zusammenarbeit mit dem Rechenzentrum der Fa. VFW-Fokker in Bremen erstellt.

Das in Fortran II geschriebene EDV-Programm sieht zunächst eine Plausibilitätskontrolle aller aufgezeichneten Daten vor, um Fehlmessungen, z. B. durch Funkstörungen, auszuschließen. Ein vorher durchgeführter ausgedehnter Vergleich der zur Verfügung stehenden Auswerteverfahren (BARTHEL, 1980) führte zur Wahl des zero-up-crossing-(Nulldurchgangs-)Verfahrens für die weitere Auswertung. Es wurden zunächst in einer statistischen Untersuchung

- die prozentualen Wahrscheinlichkeiten für das Vorliegen einer Normalverteilung, einer log-Normalverteilung und einer Rayleigh-Verteilung für Höhen und Perioden nach dem CHI-Quadrat-Test (DTV-ATLAS zur MATHEMATIK, 1977),
- die kennzeichnenden Wellenhöhen  $\bar{H}$ ,  $H_{1/3}$ ,  $H_{1/10}$ ,  $H_{1/100}$  und  $H_{\max}$  sowie die entsprechenden RMS-Werte,
- die kennzeichnenden Wellenperioden  $\bar{T}$ ,  $T_{1/3}$ ,  $T_{1/10}$ ,  $T_{1/100}$  und  $T_{\max}$ ,
- die den kennzeichnenden Werten zugeordneten Höhen bzw. Perioden  $H_T$  bzw.  $T_H$  und
- Korrelationen der verschiedenen Parameter untereinander berechnet.

Im zweiten Teil des Hauptprogramms wird das Energiespektrum nach der Methode der FAST-FOURIER-Transformation ermittelt und nach bestimmten Verfahren parametrisiert (s. hierzu Abschnitt 5.5). In einem angeschlossenen Plotterprogramm werden Höhen- und Periodenverteilungen, Korrelationsergebnisse und geglättete (Hamming-) Spektren sowie die

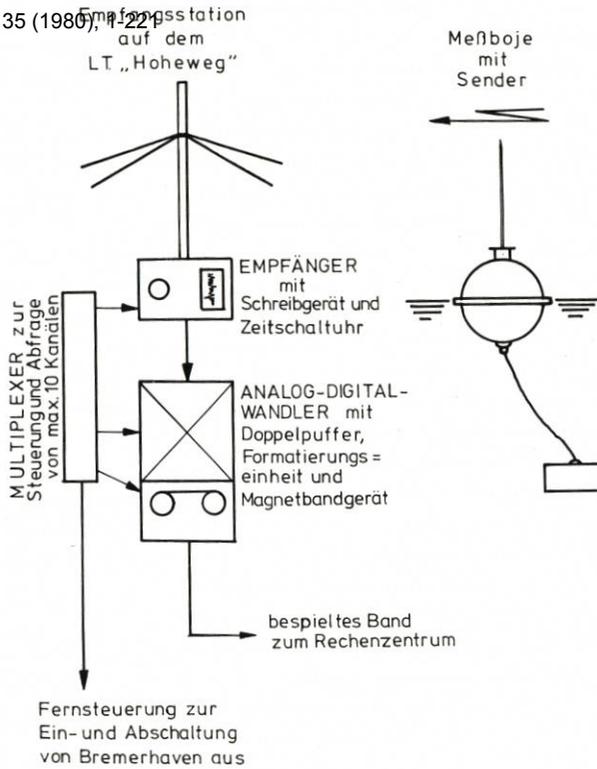


Abb. 3.4 Systemskizze der wave-rider-Messung



Abb. 3.5 Empfangsstation mit AD-Wandler und Magnetbandgerät

parametrisierten Spektren dargestellt. Auswertbeispiele sind in den Abb. 3.6 bis 3.10 zu finden.

#### 4. Seegang in einem Ästuar nach kennzeichnenden Größen

##### 4.1 Windeinfluß

Seegang in einem Gebiet wechselnder Wassertiefen und Tideströmungen wird von vielen Faktoren beeinflusst. Da es kaum möglich ist, die Wirkung aller Einflußfaktoren gemeinsam zu ermitteln, wird man versuchen, zunächst einzelne Einflüsse zu bestimmen. Abgesehen von den langperiodischen Wellen (Tide etc.), Schiffswellen und anderen Sonderfällen wird Seegang vom Wind angefacht, verstärkt und in bestimmte Richtungen gelenkt. Die naheliegende Frage behandelt daher den Zusammenhang zwischen Windstärke, -richtung, -dauer und Streichlänge (Fetch) und den kennzeichnenden Wellengrößen. Hierzu liegen in der Literatur eine ganze Reihe von Untersuchungen mit unterschiedlichen Ergebnissen vor. WIEGEL (1964) hat eine Übersicht über eine Reihe von Messungen gegeben, bei denen die Abhängigkeit der Wellenhöhen und -perioden von Windgeschwindigkeit und Fetch ermittelt wurde. Diese Ergebnisse sind z. T. dimensionsecht, z. T. jedoch als rein empirische Abhängigkeiten dargestellt. Die dimensionslose Beziehung wird durch

$$\frac{gT}{U} = f_1 \left( \frac{gF}{U^2}; \frac{gt}{U}; \frac{T_a}{T_s} \right)$$

$$\frac{gH}{U^2} = f_2 \left( \frac{gF}{U^2}; \frac{gt}{U}; \frac{T_a}{T_s} \right)$$

gegeben. Die der Vollständigkeit halber mitaufgeführte Abhängigkeit von Wasser- und Lufttemperatur ( $T_a$ ,  $T_s$ ) wird im allgemeinen vernachlässigt. Die Winddauer wird durch die Auswahl der Schriebe eliminiert. Die im folgenden betrachteten Messungen sind durch die Beziehung

$$gT = f_1(U) [s]$$

$$H = f_2 \left( \frac{U^2}{g} \right) [m]$$

dimensionsecht dargestellt.

Die gewonnenen Registrierungen wurden zunächst nach den bisherigen Kenntnissen in Hauptwindsektoren eingeteilt, wie auch im Lageplan der Abb. 4.1 ersichtlich ist. Dabei wurden die vorherrschenden Hauptwindrichtungen, die Topografie und mögliche Diffraktions- und Refraktionserscheinungen berücksichtigt. Eine gute Ortskenntnis und die Möglichkeit häufiger Naturbeobachtungen spielten bei der Festlegung ebenfalls eine Rolle. Alle 2- und 4-Minuten-Schriebe wurden nach den Windsektoren geordnet.

Die Korrelation aller Meßdaten aus den einzelnen Windsektoren mit den zugehörigen Winddaten ergab zunächst mangelhafte bis schlechte Abhängigkeiten, die für eine weitere Bearbeitung nicht in Frage kamen. Die Ergebnisse der Korrelationsrechnungen, bei denen die Wellengrößen nach Windsektoren und unterschiedlichen Wasserständen geordnet wurden, sind bei BARTHEL (1980) zu finden.

Die Ergebnisse zeigten sehr bald, daß eine Aufteilung in die vorgegebenen Windsektoren keine befriedigende Lösung lieferte. Vielmehr mußten einzelne Meßserien mit möglichst

SEEGANGSANALYSE  
=====

DATUM : 23.11.78  
UHRZEIT : 4.38.41  
POSITION : RSW  
WINDRICHTUNG :

ZERO UP-CROSSING-METHODE  
MITTELWERT DER GEMESSENEN WERTE = 463,75 (CM)

(VON DEN FOLGENDEN WERTEN IST DAS  
AM ALLER WERTE ABZUGEN)

1. WELLENHÖHEN H (CM) UND PERIODEN T (SEC)

1	91.000	4.041	2	130.000	6.328	3	105.000	4	71.000	4.620	5	83.000	3.889
6	151.000	4.157	7	24.000	1.796	8	44.000	9	66.000	2.966	10	115.000	3.829
11	180.000	8.167	12	149.000	4.550	13	112.000	14	147.000	5.198	15	16.000	1.404
16	111.000	3.878	17	136.000	5.189	18	164.000	19	161.000	6.945	20	141.000	4.266
21	99.000	3.012	22	74.000	5.545	23	65.000	24	68.000	3.263	25	175.000	7.793
26	32.000	1.156	27	174.000	7.851	28	183.000	29	179.000	7.450	30	117.000	3.278
31	81.000	4.180	32	25.000	1.259	33	168.000	34	27.000	1.959	35	99.000	7.011
36	107.000	3.109	37	58.000	2.782	38	20.000	39	154.000	4.273	40	46.000	1.922
41	26.000	2.124	42	38.000	1.912	43	27.000	44	134.000	4.762	45	154.000	6.983
46	116.000	7.578	47	7.000	0.694	48	194.000	49	76.000	4.125	50	156.000	4.091
51	24.000	2.633	52	141.000	4.978	53	109.000	54	40.000	3.069	55	28.000	1.423
56	70.000	5.117	57	76.000	3.348	58	174.000	59	86.000	3.360	60	81.000	7.985
61	130.000	6.268	62	57.000	4.277	63	18.000	64	41.000	1.485	65	86.000	3.118
66	75.000	3.237	67	209.000	5.035	68	285.000	69	220.000	7.595	70	127.000	7.996
71	73.000	3.348	72	113.000	5.836	73	239.000	74	285.000	8.321	75	142.000	3.459
76	139.000	4.332	77	128.000	6.414	78	131.000	79	130.000	8.416	80	211.000	7.205
81	81.000	2.563	82	147.000	5.398	83	91.000	84	242.000	6.759	85	291.000	8.510
86	247.000	5.295	87	68.000	2.630	88	39.000	89	261.000	6.652	90	179.000	8.299
91	156.000	6.868	92	126.000	7.404	93	92.000	94	84.000	5.266	95	9.000	1.186
96	116.000	4.732	97	31.000	1.689	98	242.000	99	76.000	2.515	100	163.000	6.934
101	74.000	4.335	102	119.000	4.178	103	198.000	104	233.000	7.692	105	22.000	0.822
106	68.000	3.667	107	73.000	5.165	108	295.000	109	132.000	9.273	110	14.000	1.459
111	89.000	9.267	112	152.000	7.903	113	75.000	114	200.000	3.797	115	51.000	2.304
116	240.000	5.258	117	117.000	5.692	118	37.000	119	195.000	6.452	120	185.000	5.501
121	85.000	2.931	122	76.000	2.982	123	70.000	124	111.000	4.519	125	110.000	4.365
126	29.000	2.670	127	108.000	4.391	128	70.000	129	43.000	2.403	130	67.000	3.277
131	102.000	4.706	132	153.000	6.330	133	39.000	134	164.000	6.919	135	173.000	7.789
136	86.000	4.398	137	166.000	4.076	138	198.000	139	130.000	9.316	140	125.000	5.713
141	146.000	3.764	142	146.000	4.006	143	202.000	144	152.000	6.929	145	55.000	3.412
146	78.000	2.564	147	59.000	1.808	148	129.000	149	83.000	2.531	150	97.000	3.202
151	84.000	2.912	152	105.000	6.900	153	58.000	154	42.000	1.333	155	110.000	4.580
156	160.000	4.094	157	124.000	6.921	158	151.000	159	126.000	7.118	160	71.000	1.620
161	204.000	3.793	162	119.000	5.020	163	154.000	164	130.000	3.960	165	100.000	3.688
166	68.000	5.093	167	91.000	5.696	168	34.000	169	106.000	3.999	170	170.000	4.709
171	117.000	4.603	172	23.000	1.843	173	64.000	174	47.000	1.898	175	116.000	4.681
176	29.000	1.237	177	108.000	5.364	178	29.000	179	146.000	7.026	180	129.000	6.623

181	68.000	1.914	182	10.000	0.805	183	172.000	6.770	184	64.000	6.898	185	69.000	2.595
186	140.000	5.790	187	30.000	1.050	188	11.000	1.404	189	75.000	5.459	190	68.000	4.079
191	71.000	3.393	192	25.000	1.291	193	62.000	2.558	194	43.000	2.452	195	87.000	1.899
196	59.000	2.126	197	61.000	3.048	198	70.000	5.352	199	30.000	1.564	200	157.000	8.007
201	221.000	6.405	202	173.000	7.894	203	151.000	9.640	204	125.000	9.459	205	111.000	3.374
206	34.000	1.180	207	68.000	2.983	208	60.000	2.657	209	92.000	3.233	210	60.000	4.890
211	35.000	4.463	212	45.000	2.552	213	231.000	5.247	214	100.000	7.561	215	155.000	7.763
216	41.000	4.545	217	20.000	1.183	218	14.000	1.138	219	104.000	4.956	220	42.000	2.247
221	149.000	6.998	222	61.000	3.662	223	31.000	1.508	224	53.000	4.902	225	68.000	2.375
226	60.000	3.900	227	89.000	5.462	228	142.000	4.626	229	252.000	8.237	230	195.000	8.366
231	141.000	6.206	232	131.000	3.675	233	100.000	3.719	234	29.000	1.790	235	61.000	3.194
236	170.000	6.470	237	188.000	6.618	238	156.000	8.266	239	63.000	3.905	240	72.000	3.601
241	51.000	1.804	242	99.000	3.139	243	136.000	3.117	244	99.000	2.592	245	101.000	4.229
246	69.000	3.774	247	57.000	1.498	248	102.000	3.432	249	102.000	2.178	250	83.000	2.842
251	120.000	3.044	252	129.000	2.929	253	63.000	3.187	254	12.000	1.062	255	136.000	3.993
256	72.000	4.033	257	48.000	2.109	258	132.000	7.000	259	224.000	7.118	260	138.000	4.432
261	64.000	2.922	262	7.000	0.757	263	66.000	3.557	264	115.000	2.833	265	140.000	6.369
266	52.000	3.061	267	28.000	1.877	268	56.000	3.213	269	189.000	5.649	270	113.000	6.832

HOEHEN

0.0 WAHRSCHEINLICHKEIT FUER DAS VORLIEGEN EINER NORMALVERTEILUNG = 0.0 %  
 35.00 WAHRSCHEINLICHKEIT FUER DAS VORLIEGEN EINER NORMALVERTEILUNG = 0.0 %  
 58.00 WAHRSCHEINLICHKEIT FUER DAS VORLIEGEN EINER NORMALVERTEILUNG = 0.0 %  
 39.00 WAHRSCHEINLICHKEIT FUER DAS VORLIEGEN EINER NORMALVERTEILUNG = 0.0 %  
 30.00 WAHRSCHEINLICHKEIT FUER DAS VORLIEGEN EINER NORMALVERTEILUNG = 0.0 %  
 14.00 WAHRSCHEINLICHKEIT FUER DAS VORLIEGEN EINER NORMALVERTEILUNG = 0.0 %  
 7.00 WAHRSCHEINLICHKEIT FUER DAS VORLIEGEN EINER NORMALVERTEILUNG = 0.0 %  
 4.00 WAHRSCHEINLICHKEIT FUER DAS VORLIEGEN EINER NORMALVERTEILUNG = 0.0 %

PERIODEN

0.0 WAHRSCHEINLICHKEIT FUER DAS VORLIEGEN EINER NORMALVERTEILUNG = 0.0 %  
 27.00 WAHRSCHEINLICHKEIT FUER DAS VORLIEGEN EINER NORMALVERTEILUNG = 0.0 %  
 30.00 WAHRSCHEINLICHKEIT FUER DAS VORLIEGEN EINER NORMALVERTEILUNG = 0.0 %  
 32.00 WAHRSCHEINLICHKEIT FUER DAS VORLIEGEN EINER NORMALVERTEILUNG = 0.0 %  
 18.00 WAHRSCHEINLICHKEIT FUER DAS VORLIEGEN EINER NORMALVERTEILUNG = 0.0 %  
 30.00 WAHRSCHEINLICHKEIT FUER DAS VORLIEGEN EINER NORMALVERTEILUNG = 0.0 %  
 24.00 WAHRSCHEINLICHKEIT FUER DAS VORLIEGEN EINER NORMALVERTEILUNG = 0.0 %  
 12.00 WAHRSCHEINLICHKEIT FUER DAS VORLIEGEN EINER NORMALVERTEILUNG = 0.0 %  
 5.00 WAHRSCHEINLICHKEIT FUER DAS VORLIEGEN EINER NORMALVERTEILUNG = 0.0 %

2.

WELLENHOEHEN  
 ARITHMETISCHES MITTEL (AM) ALLER WERTE = 105.69 (CM)  
 MAXIMALER WERT = 291.00 (CM)  
 AM DER 33 % HOECHSTEN WERTE = 175.64 (CM)  
 AM DER 10 % HOECHSTEN WERTE = 228.63 (CM)  
 AM DER 1 % HOECHSTEN WERTE = 288.00 (CM)  
 ROOT MEAN SQUARE VALUE (RMS) = 47.54 (CM)  
 AM AUS RMS = 116.97 (CM)  
 H 1/3 AUS RMS = 190.14 (CM)  
 H 1/10 AUS RMS = 241.71 (CM)  
 H 1/100 AUS RMS = 317.58 (CM)  
 HMAX AUS RMS = 355.85 (CM)  
 VERHAELTNISZAHLEN AUS DER AUSZAHLUNG  
 H QUER / H 1/3 / H 1/10 / H 1/100 = 1 / 1.667 2.167 2.72

UEBERSCHREITUNG = 4.81 (%)

2.1 WELLENPERIODEN

TH % = WERTE  
 AM ALLER PERIODEN = 4.39 (SEC)  
 MAXIMALE PERIODE = 8.51 (SEC)  
 T 1/3 = 7.32 (SEC)  
 T 1/10 = 6.69 (SEC)  
 T 1/100 = 7.96 (SEC)  
 , UEBERSCHREITUNG = 21.85 (%)

TH = WERTE

AM ALLER PERIODEN = 4.42 (SEC)  
 MAXIMALE PERIODE = 8.51 (SEC)  
 T 1/3 = 6.40 (SEC)  
 T 1/10 = 6.82 (SEC)  
 T 1/100 = 7.96 (SEC)  
 , UEBERSCHREITUNG = 20.37 (%)

3. WELLENPERIODEN

ARITHMETISCHES MITTEL (AM) ALLER WERTE = 4.42 (SEC)  
 MAXIMALER WERT = 9.84 (SEC)  
 AN DER 33 % HOECHSTEN WERTE = 7.08 (SEC)  
 AN DER 10 % HOECHSTEN WERTE = 6.38 (SEC)  
 AN DER 1 % HOECHSTEN WERTE = 9.65 (SEC)  
 VERHAELTNISZAHLEN AUS DER AUSZAHLUNG  
 T QUER / T 1/3 / T 1/10 / T 1/100 = 1 / 1.60 / 1.90 / 2.18  
 , UEBERSCHREITUNG = 3.33 (%)

3.1 WELLENHOEHEN

HT % = WERTE  
 AM ALLER HOEHEN = 107.20 (CM)  
 MAXIMALE HOEHE = 151.00 (CM)  
 H 1/3 = 161.87 (CM)  
 H 1/10 = 183.50 (CM)  
 H 1/100 = 138.00 (CM)  
 , UEBERSCHREITUNG = 10.74 (%)

HT = WERTE

AM ALLER HOEHEN = 105.69 (CM)  
 MAXIMALE HOEHE = 151.00 (CM)  
 H 1/3 = 159.50 (CM)  
 H 1/10 = 169.22 (CM)  
 H 1/100 = 138.00 (CM)  
 , UEBERSCHREITUNG = 14.81 (%)

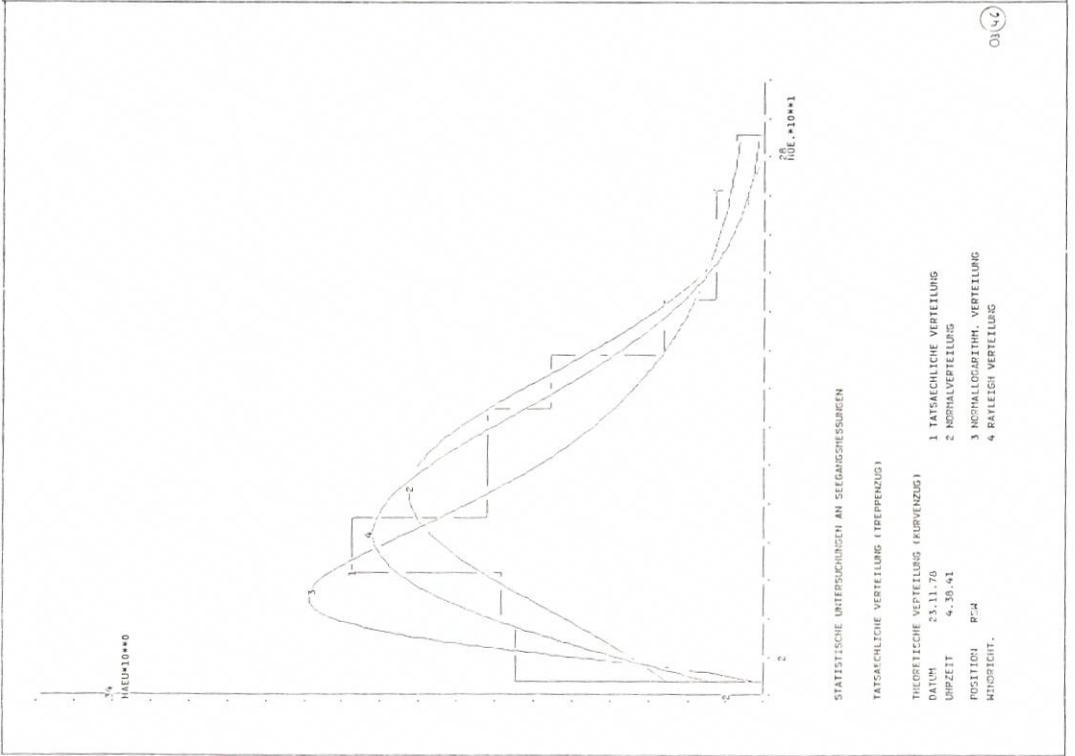
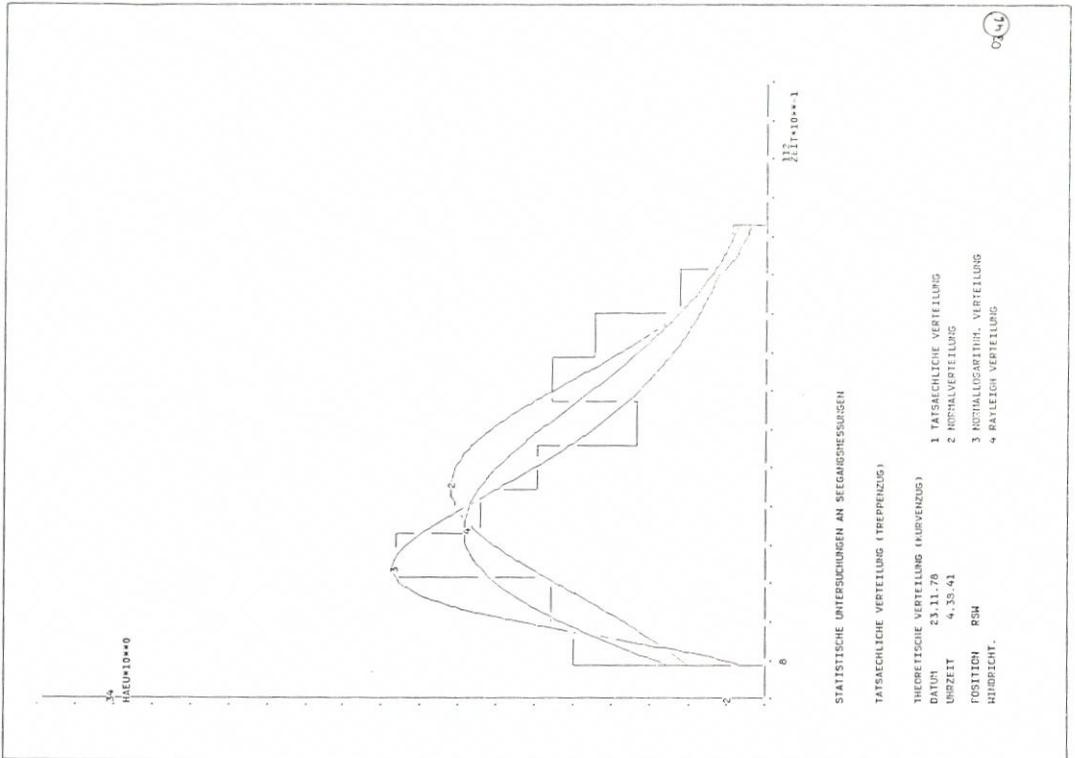
45. ZEICHNUNG (HISTOGRAMM)  
 46. ZEICHNUNG (HISTOGRAMM)

FF = 0.39062500D+02  
 GESAMTENERGIE = 0.10941842D+04

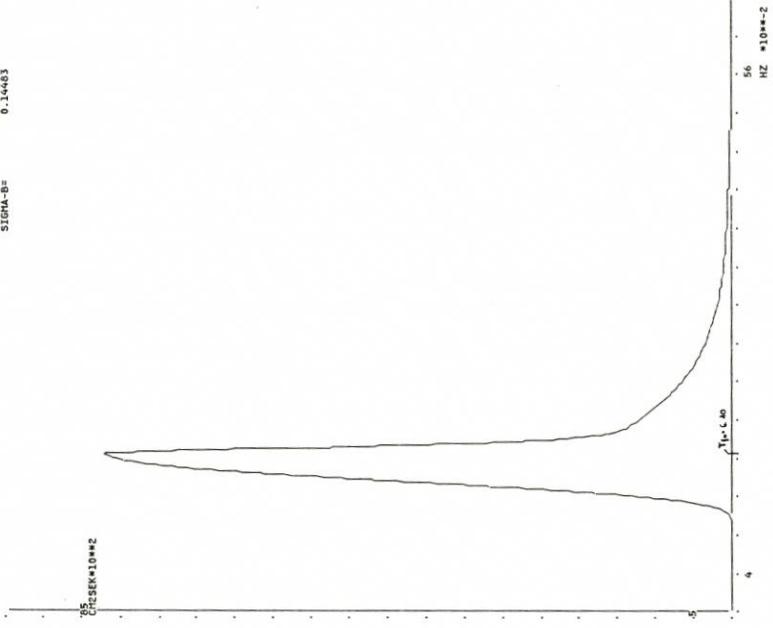
130

RSM = 11.70  
 47. ZEICHNUNG (POWERSPEKTRUM)  
 48. ZEICHNUNG (POWERSPEKTRUM)

Abb. 3.6-3.10 Auswertbeispiele VFW-Programm



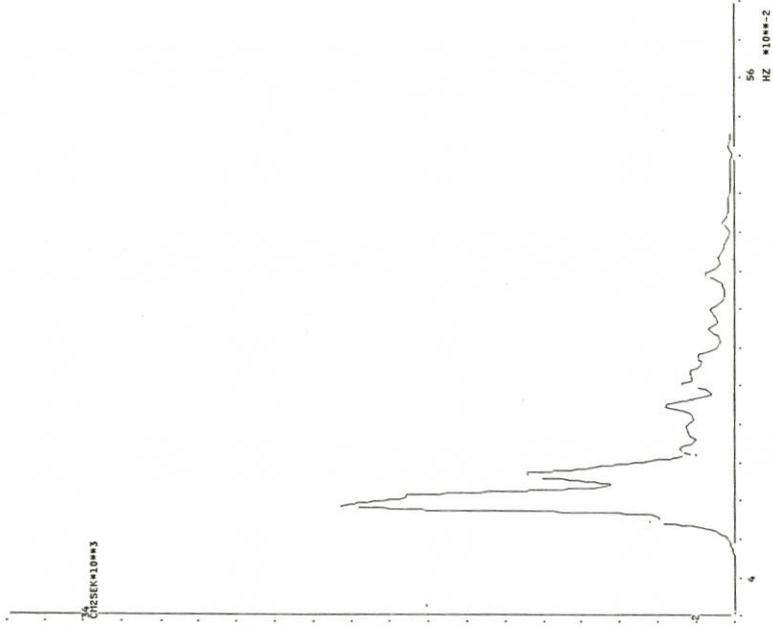
FN = 0.16596  
ALPHA = 0.13797  
GAMMA = 0.15372  
SIGMA-A = 0.14286  
SIGMA-B = 0.14663



DATUM 23.11.78  
URZEIT 4.38.41  
POSITION RSM  
MINORLICHT.  
GESAMTENERGIE : 870.40 CH/CH\*SEK  
= 0.00003127 KW/CH/CH  
MAXIMUM : 0.16406 HZ  
8509.89 CH/CH\*SEK

0314

74 CH/CH\*SEK\*10\*\*3



DATUM 23.11.78  
URZEIT 4.38.41  
POSITION RSM  
MINORLICHT.  
GESAMTENERGIE : 1094.18 CH/CH\*SEK  
= 0.00003931 KW/CH/CH  
MAXIMUM : 0.1128 HZ  
20649.78 CH/CH\*SEK

0314

konstanten Windrichtungen untersucht werden, da offensichtlich eine starke Abhängigkeit von der Windrichtung und damit unterschiedlichen Refraktions- und Diffraktionserscheinungen, aber auch von Wassertiefen und besonders Tideströmungen bestand.

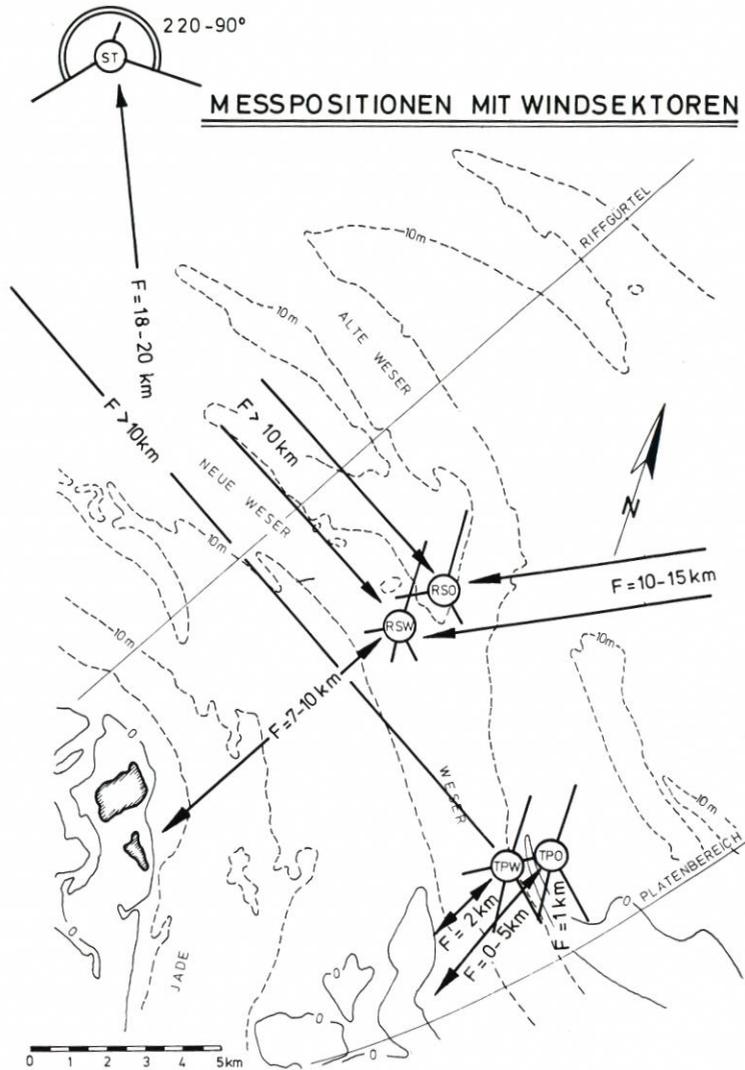
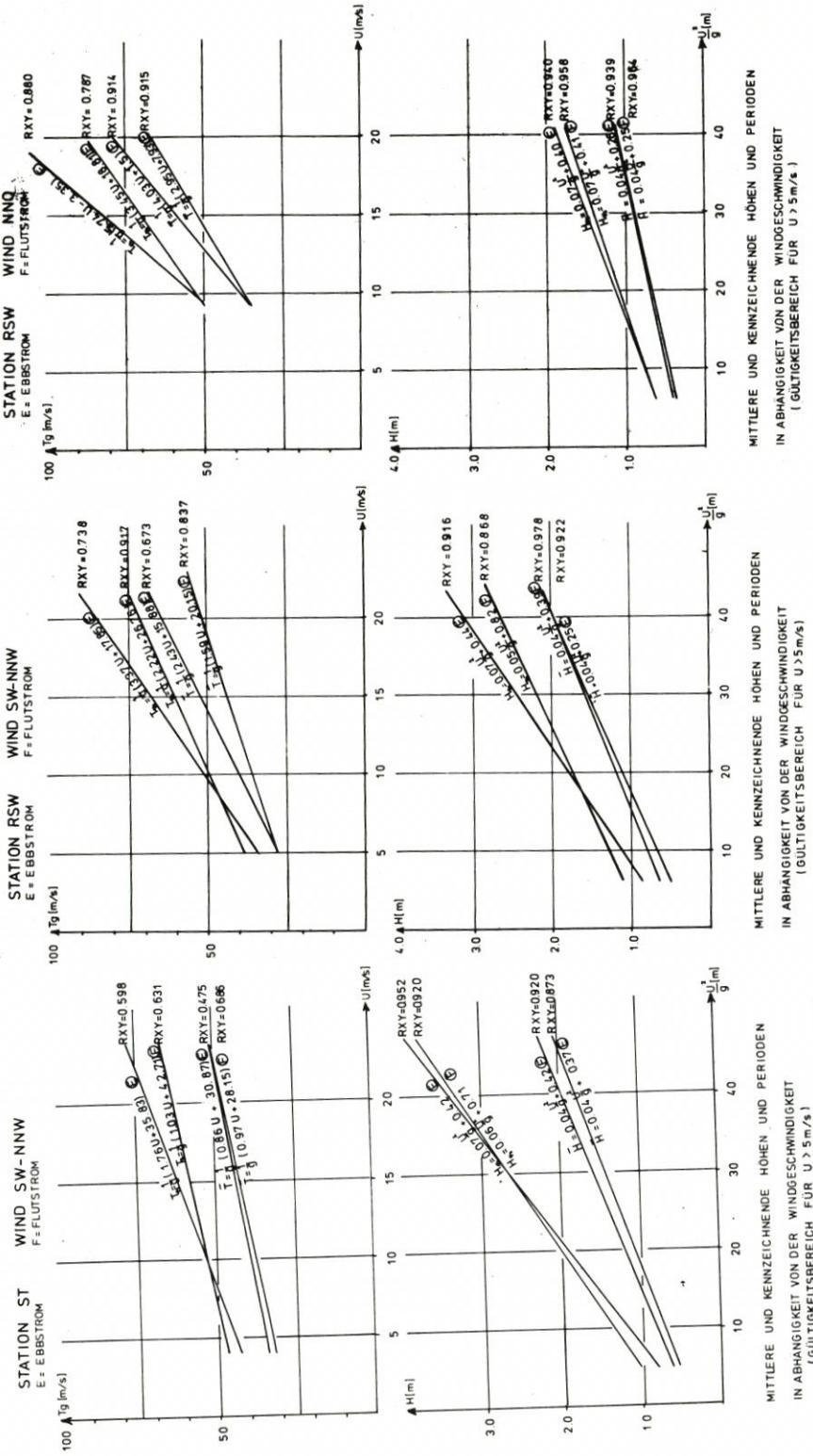


Abb. 4.1 Lageplan mit Windsektoren

Daher wurden aus den später mit wave-rider-Bojen gewonnenen Messungen längere Serien von 20-Minuten-Schrieben mit bestimmten Windrichtungen ausgewählt und untersucht, bei denen wahrscheinlich war, daß möglichst viele Einflußfaktoren – abgesehen vom Wind – während der Meßserie unverändert blieben.

Die Abb. 4.2 und 4.3 zeigen für die vorherrschenden Windrichtungen SW bis N (für RSW auch WNO) die Funktionen

# SEEGANGSVERHÄLTNISSE - AUSSENWESER -



MITTLERE UND KENNZEICHENDE HÖHEN UND PERIODEN  
IN ABHÄNGIGKEIT VON DER WINDGESCHWINDIGKEIT  
(GÜLTIGKEITSBEREICH FÜR  $U > 5 \text{ m/s}$ )

MITTLERE UND KENNZEICHENDE HÖHEN UND PERIODEN  
IN ABHÄNGIGKEIT VON DER WINDGESCHWINDIGKEIT  
(GÜLTIGKEITSBEREICH FÜR  $U > 5 \text{ m/s}$ )

MITTLERE UND KENNZEICHENDE HÖHEN UND PERIODEN  
IN ABHÄNGIGKEIT VON DER WINDGESCHWINDIGKEIT  
(GÜLTIGKEITSBEREICH FÜR  $U > 5 \text{ m/s}$ )

Abb. 4.2 Abhängigkeit der Höhen und Perioden von der Windgeschwindigkeit an den Stationen ST, RSW, RSO, TPW und TPO



$$H = f \left( \frac{U^2}{g} \right)$$

$$\text{und } g \cdot T = f(U)$$

Auf die Unterteilung in Ebb- und Flutstrom wird in einem späteren Kapitel eingegangen. Für ausgereiften Seegang im tiefen Wasser gilt nach BRETSCHNEIDER (1958)

$$H_{1/3} = 0,282 \frac{U^2}{g}$$

Dazu wurden entsprechende Diagramme für verschiedene Streichlängen entwickelt. Eine ähnliche Größenordnung zeigen die Beziehungen von SVERDRUP und MUNK (1947)

$$H_{1/3} = 0,26 \frac{U^2}{g}$$

und von WALDEN (1958)

$$H_{1/3} = 0,22 \frac{U^2}{g}$$

wobei über die Dimensionen nichts ausgesagt wird.

Die bei den Messungen im Weserästuar gefundenen Abhängigkeiten wurden als lineare Beziehungen aufgestellt und erstrecken sich von

$$H_{1/3} = 0,05 \frac{U^2}{g} + 0,82 \text{ [m]}$$

$$\text{bis } H_{1/3} = 0,08 \frac{U^2}{g} + 0,17 \text{ [m]}$$

$$\text{bzw. } \bar{H} = 0,01 \frac{U^2}{g} + 0,84 \text{ [m]}$$

$$\text{bis } \bar{H} = 0,05 \frac{U^2}{g} + 0,13 \text{ [m]}$$

Bei der Auswertung stellte sich heraus, daß eine lineare Korrelation bessere Zusammenhänge ergab, als z. B. die 2. Grades. Daher ist der Gültigkeitsbereich auf Windstärken  $> 5 \text{ m/s}$  beschränkt. Die dabei resultierenden Wellenhöhen  $H_{1/3}$  liegen im Bereich von 50 bis 60 cm, bei dem fast schon der untere Meßbereich der wave-rider-Boje erreicht ist. Eine Übersicht über die gesamten Ergebnisse und die Zuverlässigkeit der Zusammenhänge zeigt BARTHEL (1980).

Geht man mit diesen Werten in eine Grafik für Wellenvorhersagen im Flachwasser, wie sie bei CERC (1966) aufgeführt wird, so erhält man z. B. für die Station RSW

$$\text{a) } d = 12 \text{ m (= 40 ft) bei}$$

$$H = 1,95 \text{ m (= 6,4 ft)}$$

$$U = 19,8 \text{ m/s (= 44,3 mph)}$$

eine zugehörige Fetchlänge von mehr als 30 km. Diese ist bei entsprechender Windrichtung möglich. Benutzt man in Abb. 29 jedoch die Funktion für eine Windrichtung NNO bis O, so ergibt sich in gleicher Weise bei

$$\text{b) } d = 12 \text{ m (= 40 ft)}$$

$$H = 1,10 \text{ m (= 3,6 ft)}$$

$$U = 14 \text{ m/s (= 31 mph)}$$

eine wirksame Fetchlänge von rd. 16 km. Bei den herrschenden topografischen Verhältnissen ist eine solche Annahme jedoch nicht gerechtfertigt. Setzt man noch dazu nicht die mittlere Wellenhöhe  $\bar{H}$ , sondern die in den Diagrammen benutzte signifikante Wellenhöhe  $H_{1/3}$  an, so erhält man für a) und b) weitaus größere Fetchlängen. Es zeigt sich damit, daß die Vorhersagediagramme für den untersuchten Bereich kaum zu gebrauchen sind. Bei weitaus geringeren Streichlängen sind erheblich größere Wellenhöhen zu erwarten.

Auch weitere Vergleiche, z. B. mit den Diagrammen aus dem Handbuch des NAVAL WEATHER SERVICE (1954), zeigen, daß eine kennzeichnende Wellenhöhe von 3,15 m bei einer Windgeschwindigkeit von rd. 19 m/s erst nach 36 Stunden Einwirkdauer erreicht wird. Die hier gemessene Wellenhöhe wurde jedoch bei anwachsendem Wind von 15 bis 19 m/s nach ca. 8 Stunden Einwirkdauer registriert. Entsprechend braucht ein starker Wind nur kürzere Zeit, einen ausgereiften Seegang zu erzeugen, als in den o. a. Vorhersagegrafiken angegeben. Zu ähnlichen Schlüssen kommt SIEFERT (1974) bei den Messungen vor und im Neuwerker Watt.

Die Abhängigkeit der signifikanten Perioden von der Windgeschwindigkeit wird durch die Messungen in der Weser in der folgenden Form wiedergegeben:

$$T_{H_{1/3}} = \frac{1}{g} (1,03 U + 42,71) \text{ [s]}$$

$$\text{bis } T_{H_{1/3}} = \frac{1}{g} (5,74 U - 3,35) \text{ [s]}$$

$$\text{bzw. } \bar{T} = \frac{1}{g} (0,69 U + 19,13) \text{ [s]}$$

$$\text{bis } \bar{T} = \frac{1}{g} (4,03 U - 1,5) \text{ [s]}$$

Dabei ist der funktionale Zusammenhang, wie auch in der Elbe (SIEFERT, 1974), nicht so eng wie bei den Höhen. Außerdem muß der Bereich von

$$0 < T \cdot g < 19$$

aus gerätetechnischen Gründen offen bleiben.

Eine Übersicht über alle Einzelergebnisse mit den dazugehörigen Korrelationskoeffizienten zeigt BARTHEL (1980).

Für einen konstruierten Fall

$$U = 10 \text{ m/s}$$

$$\text{Dauer} = 2 \text{ Stunden}$$

ergeben sich nach verschiedenen Autoren folgende kennzeichnenden Perioden  $T_{H_{1/3}}$ :

NAVAL WEATHER SERVICE (Tiefwasser) (1954):	$T_{H_{1/3}} = 3,8 \text{ s}$
ARTHUR (Tiefwasser) (1951):	$T_{H_{1/3}} = 2,4 \text{ s}$
BRETSCHNEIDER (1958):	$T_{H_{1/3}} = 4,2 \text{ s}$
CERC (1966):	$T_{H_{1/3}} = 7,2 \text{ s}$
Weser-Ästuar (ST):	$T_{H_{1/3}} = 5,4 \text{ s}$
(RSW):	$T_{H_{1/3}} = 5,0 \text{ bis } 5,2 \text{ s}$
(RSO):	$T_{H_{1/3}} = 5,0 \text{ bis } 8,3 \text{ s}$
(TPW):	$T_{H_{1/3}} = 3,8 \text{ bis } 3,9 \text{ s}$
(TPO):	$T_{H_{1/3}} = 5,3 \text{ bis } 6,8 \text{ s}$

Die Übersicht zeigt, daß die angegebenen Werte stark schwanken. Die Perioden im „Flachwassergebiet“ des Weserästuars liegen innerhalb dieses Bereichs.

Die von ROLL (1951) ermittelten Perioden für die Deutsche Bucht (Feuerschiffsbeobachtungen) liegen bei 4,8 bis 5,1 s und damit unter den Ästuarergebnissen. Es scheint, als ob in Richtung auf das innere Ästuar längere Perioden auftreten. Hierauf wird jedoch näher einzugehen sein. Die vorstehenden Ergebnisse sowohl bei den Höhen als auch bei den Perioden zeigen, daß insbesondere in einem stark gegliederten Ästuar Vorhersageverfahren nur bedingt bzw. gar nicht anwendbar sind. Hier werden einmal mehr die Notwendigkeit und der Wert langfristiger und umfassender Naturmessungen nachgewiesen.

#### 4.2 Wassertiefeneinfluß

Höhen, Perioden und Steilheit des Seegangs im flachen Wasser werden im wesentlichen von der Wassertiefe bestimmt. Nach der linearen Wellentheorie wird eine Welle von der Wassertiefe beeinflusst, wenn

$$d < \frac{L}{2}$$

wird.

Bei der Annahme  $\bar{L} = \bar{T}^2$ , die sich vereinfacht als Mittelwert aus der von EWING (1969) und aus Beobachtungen von SIEFERT (1972) gewonnenen Beziehung  $0,5 \leq \frac{\bar{L}}{\bar{T}^2} \leq 1,2$  ablesen läßt (Windgeschwindigkeit und Perioden für Flachwasser:  $0,8 \leq \frac{\bar{L}}{\bar{T}^2} < 1,2$ ), ergibt sich eine Beeinflussung bei

$$d < \frac{\bar{T}^2}{2}$$

Da in Abhängigkeit von der Windstärke bei jeder Wassertiefe kleinere und größere Wellen auftreten können, erscheint es allgemein nicht sinnvoll, eine allgemeine Abhängigkeit

$$T = f(d) \text{ oder } H = f(d)$$

aufzustellen. Vielmehr ist es für den planenden Ingenieur wichtig, zu wissen, welche oberen Grenzen der Wellenhöhen bei bestimmter Wassertiefe möglich sind.

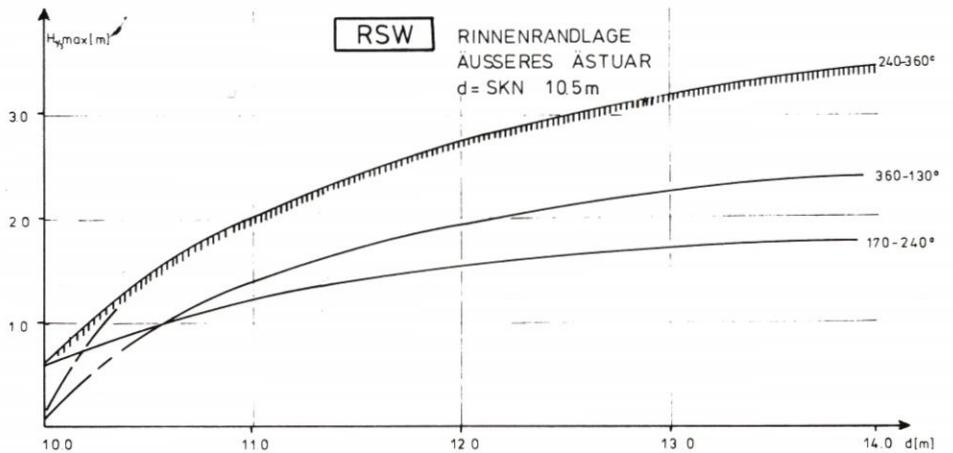
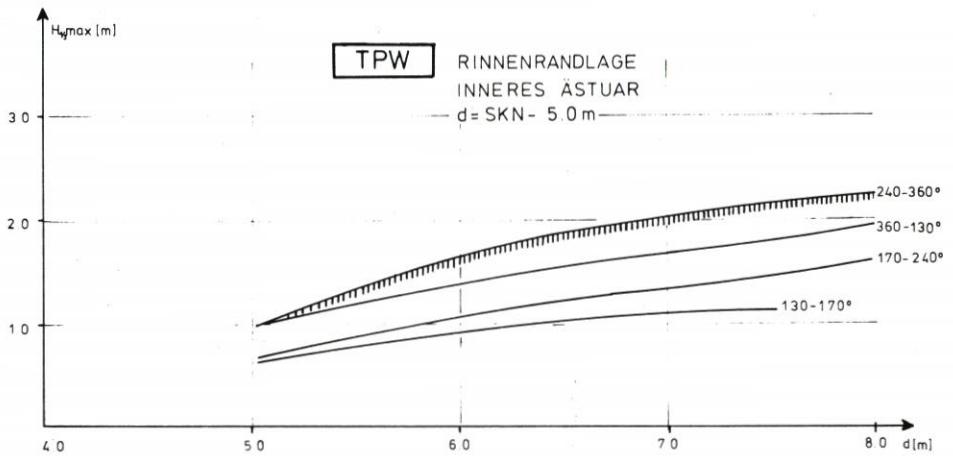
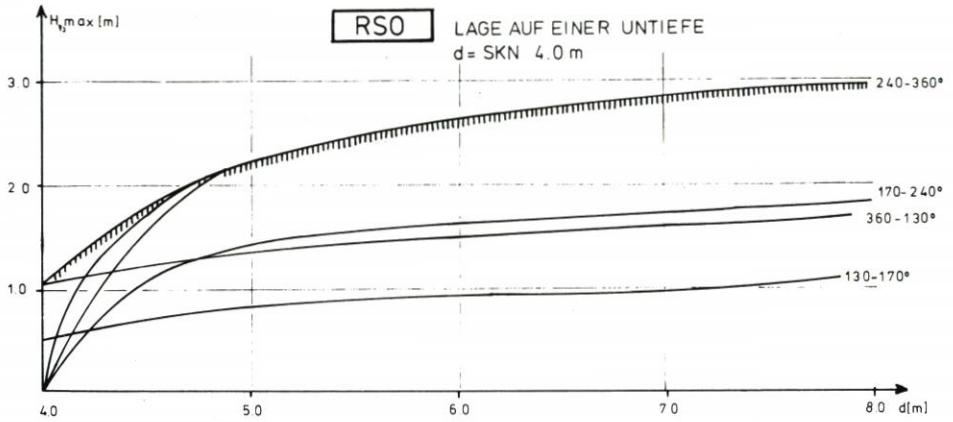
Die o. a. Bedingung trifft bei den vorliegenden Meßergebnissen bei normalen Tideverhältnissen an den Stationen RSW, RSO, TPW und TPO zu. Bei ST werden erst bei außergewöhnlichen Wetterlagen die Wellenlängen, -höhen und -perioden so groß, daß eine wesentliche Beeinflussung durch die Wassertiefe eintritt.

Zunächst wurden wieder die Ergebnisse aller Messungen, getrennt nach den verschiedenen Windsektoren, aufgetragen und die signifikanten Wellenhöhen mit der zugehörigen Wassertiefe korreliert. Nach Durchsicht der Ergebnisse, die hier nicht im einzelnen dargestellt werden, wurde wiederum ein wenig befriedigender Zusammenhang festgestellt. Es scheint daher sinnvoll, nur die obere Grenze des Streubereichs und somit die empirische Funktion

$$H_{1/3\max} = f(d)$$

darzustellen (Abb. 4.4 und 4.5).

Für die Ermittlung der oberen Begrenzung wurden alle bisher gewonnenen Daten der 2-Minuten-Schriebe verwendet, so auch z. T. Daten aus der Sturmflut 1976. Es wird damit zwar nicht ausgeschlossen, daß extreme Einzelwerte unter besonderen Bedingungen noch über den Begrenzungslinien liegen. Diese Darstellung stellt jedoch eine erste gute Abschätzung des

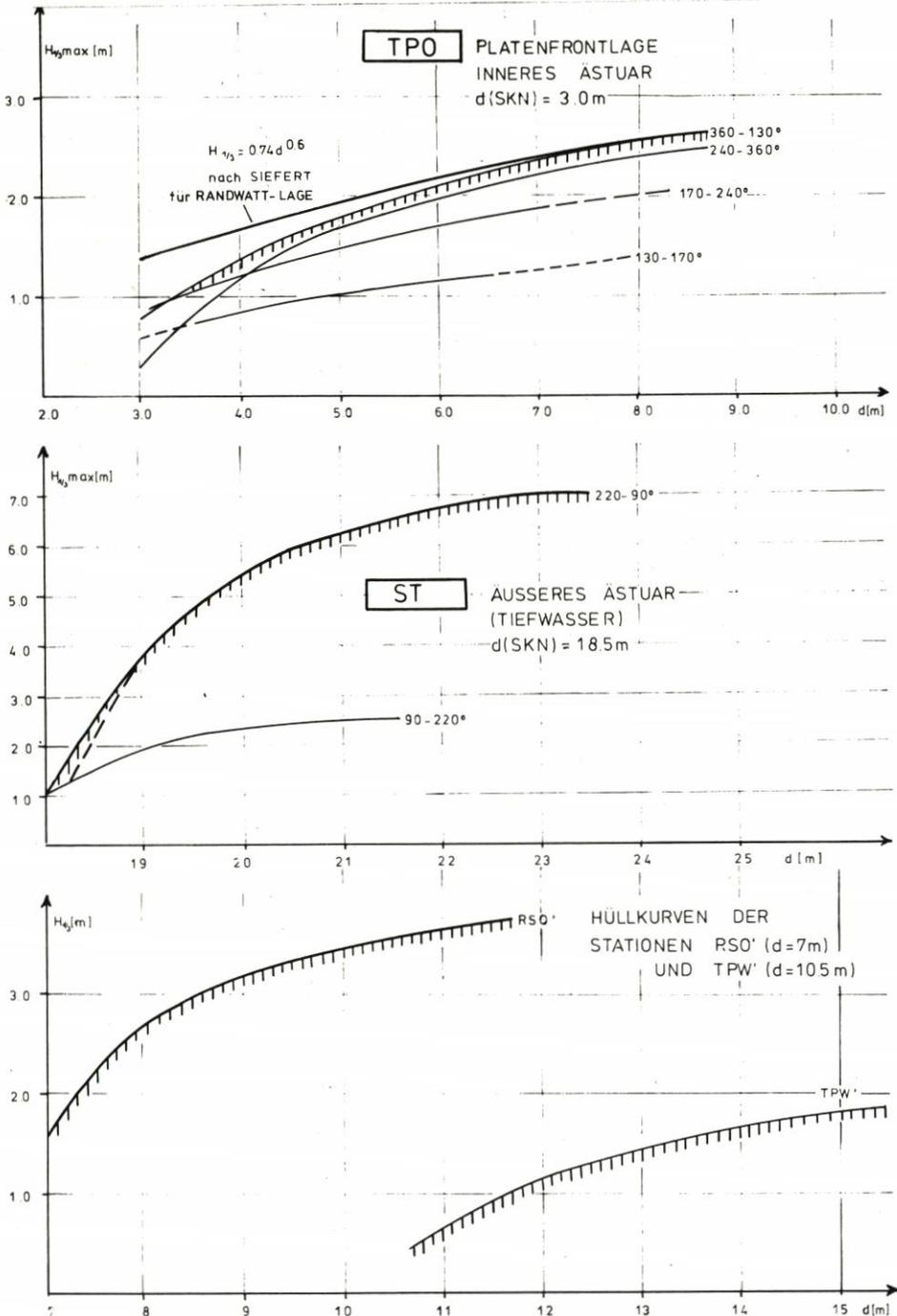


MAXIMA DER SIGNIFIKANTEN WELLENHÖHEN  $H_{1/3}$   
IN ABHÄNGIGKEIT VON DER WASSERTIEFE

(FÜR VERSCHIEDENE WINDRICHTUNGEN)

ABB. 4.4

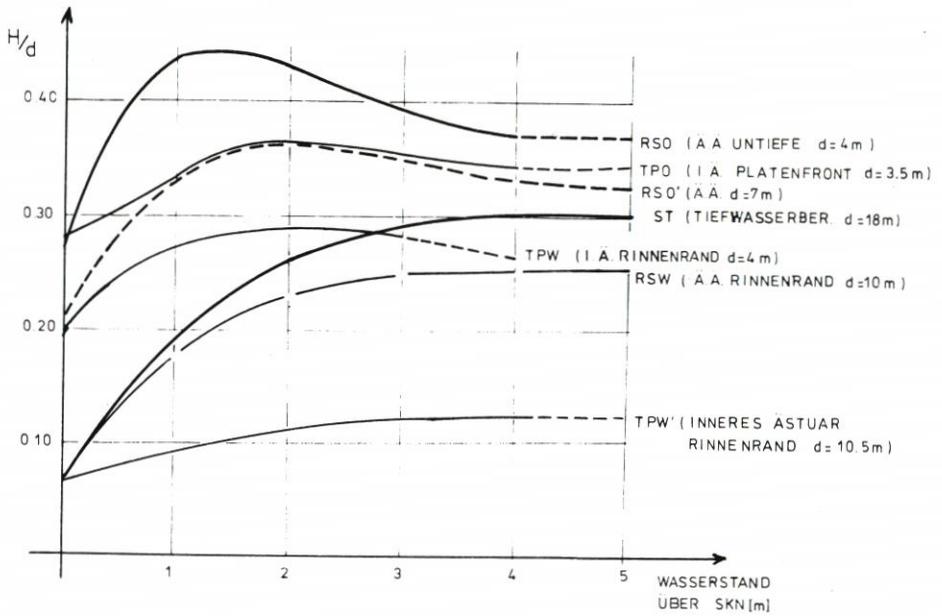
Abb. 4.4 Obere Grenze der maximalen kennzeichnenden Wellenhöhen  $H_{1/3}$  für 5 Stationen



MAXIMA DER SIGNIFIKANTEN WELLENHÖHEN  $H_{1/3}$   
 IN ABHÄNGIGKEIT VON DER WASSERTIEFE  
 (FÜR VERSCHIEDENE WINDRICHTUNGEN)

ABB. 4.5

Abb. 4.5 Obere Grenze der maximalen kennzeichnenden Wellenhöhen  $H_{1/3}$  für 5 Stationen



ÄNDERUNG DES VERHÄLTNISSSES  $H_{1/3}/d$   
MIT DER Wassertiefe  $d$

STATION	SKN	+1m	+2m	+3m	+4m	+5m
ST	0.06	0.19	0.26	0.29	0.3	0.3
RSW	0.06	0.18	0.23	0.25	0.25	—
RSO	0.25	0.44	0.43	0.39	0.37	—
RSO'	0.21	0.33	0.36	0.35	0.33	—
TPW	0.19	0.27	0.29	0.28	—	—
TPW'	0.06	0.09	0.11	0.12	0.12	—
TPO	0.28	0.33	0.36	0.35	0.34	0.32

Abb. 4.6 Änderung des Verhältnisses  $H_{1/3}/d$

Seegang bei bestimmten Wasserständen dar. Dabei ergibt sich je nach Lage der Meßstelle ein charakteristisches Bild bei unterschiedlichen Windrichtungen. Es ist jedoch zu berücksichtigen, daß nach der Windstatistik die größten Windstärken aus der Richtung 240 bis 360 auftreten, so daß auch bei dieser Windrichtung die größten Wellen zu verzeichnen sind. Maximale signifikante Wellenhöhen sind danach bei fast allen untersuchten Stationen, unabhängig von ihrer Lage auf Untiefen, in tiefen oder am Rand tiefer Rinnen, aus derselben Richtung zu erwarten, da entsprechende Beugungserscheinungen eintreten.

Nur die Station TPO zeigt ein abweichendes Verhalten. Bedingt durch ihre Lage hinter dem Ausläufer der Tegeler Plate, der in hohem Maße vor Seegang aus WNW abschirmt, und in einer Platenrandlage haben hier – abgesehen von extremen Sturmflutbedingungen – Windwellen bei Wind aus N bis NO einen größeren Einfluß. In Abb. 4.5 ist die von SIEFERT (1974) ermittelte Abhängigkeit für Randwattlagen (Brandungszone)

$$\bar{H}_{\max} = 0,5 \cdot d^{0,6}$$

$$\text{bzw. } H_{1/3 \max} = 0,74 \cdot d^{0,6}$$

mit aufgetragen und paßt sich dem TPO-Verlauf gut an.

Die Stationen RSO und TPW mußten nach Verlust der Meßpfahlstationen mit wave-riider-Bojen besetzt werden. Die Verankerung dieser Geräte macht jedoch eine größere Wassertiefe erforderlich, so daß RSO und TPW nicht unmittelbar mit RSO' und TPW' verglichen werden können. Der untere Teil der Abb. 4.5 zeigt die Hüllkurven der auf größerer Wassertiefe liegenden Stationen RSO' und TPW'. Damit ergeben sich nach den bisherigen Meßergebnissen für die einzelnen Bereiche folgende maximale signifikante Wellenhöhen:

1. ST (offenes Wasser):  $H_{1/3 \max} = 7,0 \text{ m}$
2. RSW (Rinnenrandlage im Riffgebiet):  $H_{1/3 \max} = 3,5 \text{ bis } 4,0 \text{ m}$
3. RSO (Lage auf einer Untiefe im Riffgebiet):  $H_{1/3 \max} = 3,0 \text{ m}$
4. RSO' (Leelage hinter einer Untiefe im Riffgebiet):  $H_{1/3 \max} = 3,5 \text{ bis } 4,0 \text{ m}$
5. TPW (Rinnenrandlage im Platenbereich):  $H_{1/3 \max} = 2,5 \text{ bis } 3,0 \text{ m}$
6. TPW' (w. o., im tieferen Wasser):  $H_{1/3 \max} = 2,0 \text{ m}$   
(Offensichtlich treten hier an der steilen Unterwasserkante im flachen Wasser Reflexionseffekte auf, die zur Vergrößerung der Wellenhöhe führen.)
7. TPO (Platenfrontlage):  $H_{1/3 \max} = 2,5 \text{ m}$

Abb. 4.6 faßt die o. a. Ergebnisse zusammen. Die Änderung des Verhältnisses  $H_{1/3}/d$  mit zunehmender Wassertiefe charakterisiert die unterschiedliche Lage der Stationen. ST zeigt normales Tiefwasserverhalten; RSW dokumentiert mit gleichem Verlauf, aber geringeren Werten die Schutzwirkung des Roten Sandes. In gleicher Wassertiefe, aber mit noch stärkerem Schutz durch Sände und Platen zeigt sich TPW', während bei den Flachwasserstationen RSO, TPO und TPW der Verhältniswert zunächst stark ansteigt, dann wieder absinkt, um in einen konstanten Wert überzugehen. Mit zunehmender Wassertiefe nimmt die Wirkung des Shoaling-Effekts ab. Dabei ist wiederum die vom äußeren zum inneren Ästuar abnehmende Tendenz des Verhältniswertes zu erkennen. Mögliche Wellenhöhen in Abhängigkeit von Wassertiefe und Morphologie

$$H/d = f(\text{Topografie})$$

lassen sich daher, wie folgt, beschreiben:

- a) Auf dem Weg vom offenen Wasser (ST) in der tiefen Rinne am Riffbereich vorbei

(RSW) bis ins innere Ästuar (Rinnenbereich, TPW') nimmt der Faktor  $H_{1/3}/d$  zunächst um 17 % ab, beim weiteren Vordringen des Seegangs in das innere Ästuar um weitere 43 %.

$$t = \frac{H_{1/3}}{d}$$

$t_o$  = Tiefwasserbereich

$t_i$  = inneres Ästuar

$t_a$  = äußeres Ästuar

$t_i = 0,4 t_o$ $t_a = 0,83 t_o$ $t_i = 0,48 t_a$
---

für Wassertiefen  $d \geq 10$  m

b) Für den Weg vom offenen Wasser über die Untiefen bzw. Riffe (RSO), dahinter (RSO') bis zum Platenrandbereich (TPO) ergibt sich folgende Änderung: Der Faktor  $t$  nimmt zunächst auf den Untiefen (RSO) um 23 % zu, hinter dem Roten Sand (RSO') erfolgt eine Abminderung (10 % Zunahme gegenüber ST), und schließlich nimmt das Verhältnis vor den Platen wieder um 13 % gegenüber ST zu.

$t_a = 1,23 t_o$ $t'_a = 1,10 t_o$ $t_i = 1,13 t_o$
---

Flachwasserbereich  $d = 4-7$  m

Im gesamten Ästuarbereich wird die von SIBUL (1955) gefundene Beziehung

$$H_{1/3} \leq 0,59 d$$

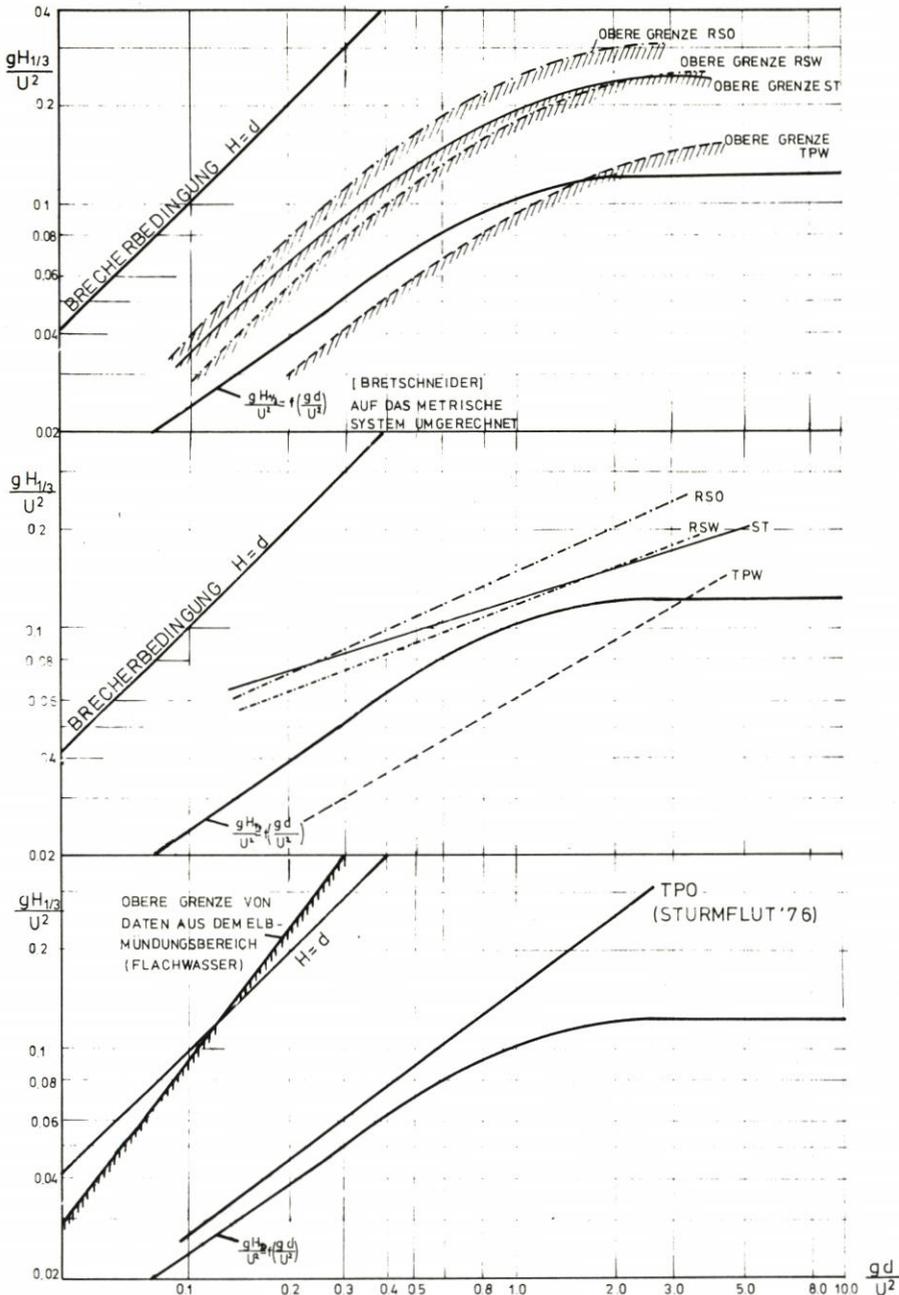
erfüllt. Lediglich bei außergewöhnlichen Sturmweatherlagen kann dieses Verhältnis überschritten werden. Bei der Sturmflut 1976 wurde der Grenzwert zweimal überschritten. Der Maximalwert lag bei

$$\frac{H_{1/3}}{d} = 0,72$$

In einer dimensionslosen Darstellung gibt BRETSCHNEIDER (1954) einen analytischen Zusammenhang zwischen Wellenhöhe ( $H_{1/3}$ ), Wassertiefe und Windgeschwindigkeit an. Dabei wird ein Reibungsfaktor  $f = 0,01$  angesetzt, der aus Naturmessungen ermittelt wurde und für fein- bis mittelsandigen Untergrund geeignet scheint.

In Abb. 4.7 ist die theoretische Abhängigkeit nach BRETSCHNEIDER im Vergleich zu ausgewählten Meßreihen (20'-Scribe) aus der Außenweser dargestellt. Die dabei feststellbaren Abweichungen – der Übersicht halber sind nur die Ausgleichsgeraden und Grenzen der Streubereiche der Datenkollektive dargestellt – zeigen, daß die in den Kurvenscharen von BRETSCHNEIDER dargestellten Verhältnisse nicht ohne weiteres auf Verhältnisse an der Nordseeküste, insbesondere in Ästuaren, übertragbar sind.

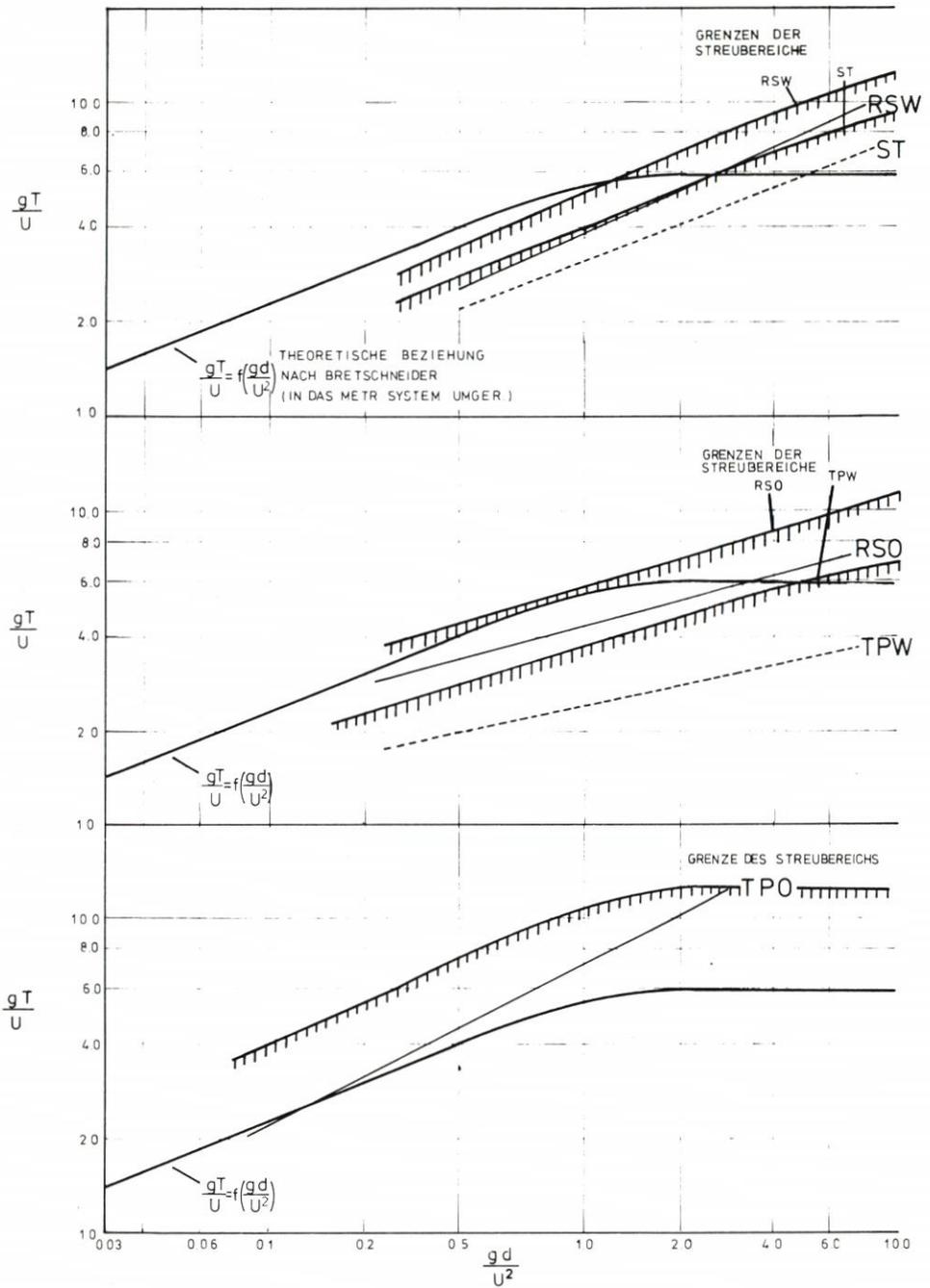
Die besonders aus dem Gesamtfeld herausfallende Station TPW zeigt den Einfluß der geschützten Lage im inneren Ästuar, der sich bereits in Abb. 4.6 bemerkbar machte. Die Ergebnisse der anderen Stationen liegen im allgemeinen höher, als nach dem theoretischen



**SIGNIFIKANTE WELLENHÖHE  $H_{1/3}$  IN ABHÄNGIGKEIT VON DER Wassertiefe (nach BRETSCHNEIDER)**

OBERE GRENZEN UND AUSGLEICHGERADEN DER DATEN  
 IM WESERÄSTUAR - WINDRICHTUNG SW-WNW  
 FETCHLÄNGE  $F_M = 6000m$

Abb. 4.7 Vergleich mit den Beziehungen nach BRETSCHNEIDER (Höhen)



## SIGNIFIKANTE WELLENPERIODE $T_{H1/3}$ IN ABHÄNGIGKEIT VON DER WASSERTIEFE

Abb. 4.8 Vergleich mit den Beziehungen nach BRETSCHNEIDER (Perioden)

Verfahren zu erwarten ist, erreichen aber nicht die steile Grenze, die SIEFERT (1974) aus den Messungen im Watt vor der Elbmündung ermittelt hat (Abb. 4.7, unterer Teil). Auch bei Annahme größerer Fetchlängen wird zwar die Form der von BRETSCHNEIDER (1954) ermittelten Kurvenschar reproduziert, die Steigungen sind jedoch allgemein größer, und die Ausgleichsgeraden der Einzelwerte deuten auf höhere Wellenwerte.

Abb. 4.8 zeigt die ebenfalls von BRETSCHNEIDER ermittelten theoretischen Zusammenhänge zwischen kennzeichnender Periode und Wassertiefe. Auch hier wurden die Ausgleichsgeraden der Datenkollektive errechnet. Ein anschaulicheres Bild ergeben jedoch wiederum die oberen Grenzen der Streubereiche. Die Unterschiede zwischen der theoretischen Linie und den gemessenen Werten sollen hier nicht im einzelnen diskutiert werden. Die Station TPO ergibt die beste Übereinstimmung bezüglich des Anstiegs der Geraden, die Werte liegen jedoch erheblich über den theoretischen.

### 4.3 Abhängigkeit von der Tideströmung

Der Seegang in einem Ästuar ist in besonderem Maße den Einflüssen der Tideströmung ausgesetzt. Durch den Wechsel von stark durchströmten Rinnen und weniger stark überströmten Platen und Untiefen und durch die alternierende Strömungsrichtung entsteht ein wenig überschaubares Bild unterschiedlicher Einflußzonen. Es ist besonders schwierig, außer im Modellversuch, den Einfluß der Tideströmung zu messen. Hierzu wechseln bei den Naturmessungen die äußeren Bedingungen wie Wind, Wassertiefe, Einfluß von Refraktion und Diffraktion etc. zu schnell, als daß man eine aussagekräftige Meßserie gewinnen könnte.

Die Geraden der Abb. 4.2 und 4.3 sind bereits nach Ebb- und Flutstrom getrennt aufgetragen. Abhängig von der Lage der jeweiligen Station ergeben sich mehr oder weniger starke Unterschiede zwischen den beiden Tideströmungsphasen. Erwartungsgemäß sind bei den Stationen im inneren Ästuar, wo stärkere Tideströmungen herrschen, auch die Wellenhöhen und -perioden stärker von der Strömungsrichtung abhängig. Abb. 4.9 zeigt eine Übersicht über die mittleren Strömungsverhältnisse im Ästuar.

Gleiche Verhältnisse, d. h. Schnitt der Geraden für E und F (Abb. 4.2 und 4.3), treten für die Perioden im Bereich von Windstärken um 10 m/s auf. Danach wird der Unterschied zwischen den Perioden der gegen den Strom (Ebb) und mit dem Strom laufenden Wellen (Flut) sehr schnell größer. Bei auflandigem Wind mit Stärken um 20 m/s ergeben sich bei den einzelnen Stationen folgende Unterschiede in den kennzeichnenden Perioden  $T_{H1/3}$  zwischen Ebb- ( $T_E$ ) und Flutstrom ( $T_F$ ):

ST:	$T_E = 1,11 T_F$
RSW':	$T_E = 1,20 T_F$
RSO:	$T_E = 1,18 T_F$
TPW:	$T_E = 1,33 T_F$ (starke Strömung)
TPO:	$T_E = 1,09 T_F$ (geringe Strömung)
RSW:	$T_F = 1,26 T_E$ (Windrichtung NNO)

Damit ist generell nachgewiesen, daß sich die Perioden ändern, wenn ein Wellenfeld durch einen Bereich mit Tideströmung läuft, wie bereits BARBER und URSELL (1948) feststellten. Auch die Annahme von WILSON (1961), daß bei Ebbstrom, d. h. dem Wellenfortschritt entgegengesetztem Strom, die Perioden größer werden, ist damit bestätigt. HALES und HERBICH (1972), die das Modell eines sogenannten „tidal inlets“ untersucht und dabei funktionelle Abhängigkeiten zwischen fünf dimensionslosen Größen festgestellt haben, fan-

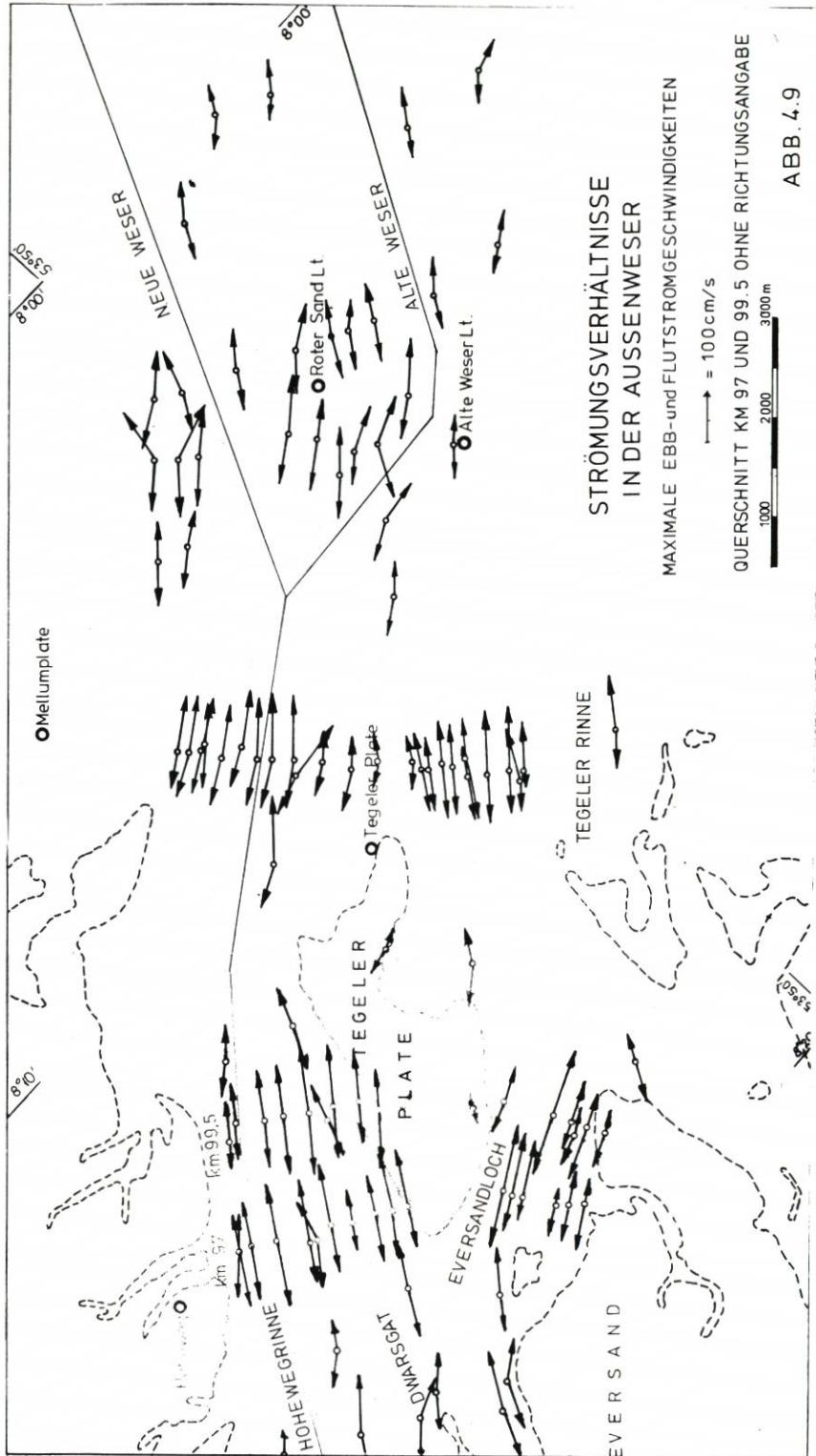


Abb. 4.9 Strömungsgeschwindigkeiten in der Aussenweser

den heraus, daß bei größeren Strömungsgeschwindigkeiten Energie- und damit Höhenverluste durch „crest-spilling“ auftraten. In einer theoretischen Studie über die Wechselwirkung von Oberflächenwellen (STOKE'sche Theorie 2. Ordnung) und einer gleichmäßigen Strömung geben JONSSON, SKOUGARD und WANG (1974) eine Reihe von Grafiken und Tabellen für die Ermittlung von Wellenhöhen und -längen über einem langsam ansteigenden Grund.

Für die Annahme einer sinusförmigen Wellenbewegung, konstanter Wellenperiode und konstanten Energieflusses und Ausnutzung der Tatsache, daß im tiefen Wasser die Energiegeschwindigkeit halb so groß ist wie die Wellengeschwindigkeit, hat YI YUAN YU (1952) die Änderung der Wellenhöhe wie folgt abgeleitet:

$$\frac{H}{H_0} = \sqrt{\frac{2}{1 + \frac{4v}{c_0} + \sqrt{1 + \frac{4v}{c_0}}}}$$

$$c_0 = \frac{gT}{2\pi} \quad (\text{tiefes Wasser})$$

$$c_0 = \sqrt{g \cdot d} \quad (\text{Flachwasser})$$

Bei Versuchen dazu wurden Vergrößerungen der Wellenhöhe bis zum 1,8fachen der Ausgangshöhe beobachtet. Für den Fall, daß die den Wellen entgegenlaufende Strömung einen Grenzwert

$$v \geq \frac{c_0}{4}$$

erreicht, brechen die Wellen. Dieser Fall wird im Ästuar dann erreicht, wenn

$$v \geq 0,39 \frac{T}{2\pi} \quad (\text{tiefes Wasser}) \text{ bzw.}$$

$$v \geq 0,78 \sqrt{d} \quad (\text{Flachwasser}) \text{ ist.}$$

Sieht man die Stationen ST und RSW als zum Tiefwasser gehörig an, so sind dort bei mittleren Perioden von 4 bis 8 s maximale Geschwindigkeiten von rd.

$$v = 1,6 \text{ bis } 3,0 \text{ m/s}$$

erforderlich, um ein Brechen der Wellen zu bewirken. Im Flachwasserbereich der anderen Positionen liegt die Grenzgeschwindigkeit ebenfalls bei

$$v = 1,6 \text{ bis } 2,4 \text{ m/s}$$

legt man Wassertiefen von 4 bis 9 m zugrunde. Diese Geschwindigkeiten werden im äußeren Ästuar nur bei außergewöhnlich erhöhten Tiden erreicht, die meistens mit erhöhten Wasserständen und Wellen höherer Perioden verbunden sind. Im inneren Ästuar sind Geschwindigkeiten  $> 1,5 \text{ m/s}$  nur in den tieferen Rinnen zu finden ( $d > 10 \text{ m}$ ).

Aus den vorliegenden Meßserien wurden solche herausgesucht, bei denen sich die Windstärke über einen längeren Zeitraum nicht wesentlich änderte. Abb. 4.10 zeigt das Ergebnis einer Messung an der Station RSW vom 24./25. 10. 1978. Die Windstärken lagen zwischen 5,7 und 8,9 m/s, die Richtungen lagen zwischen SO bis SSW und somit zeitweise in Richtung der Ebbströmung. Die Wellenhöhen zeigen einen Verlauf, der sich vorwiegend am Wind orientiert. Selbst bei weitergehender Analyse der Höhen ist keine unmittelbare Beziehung zwischen ihnen und der alternierenden Tideströmung zu erkennen. Die über die

# STATION RSW

MESSUNG VOM 24.+25.10.1978

WIND SO-S IN RINNENLÄNGSRICHTUNG MIT DEM EBBSTROM

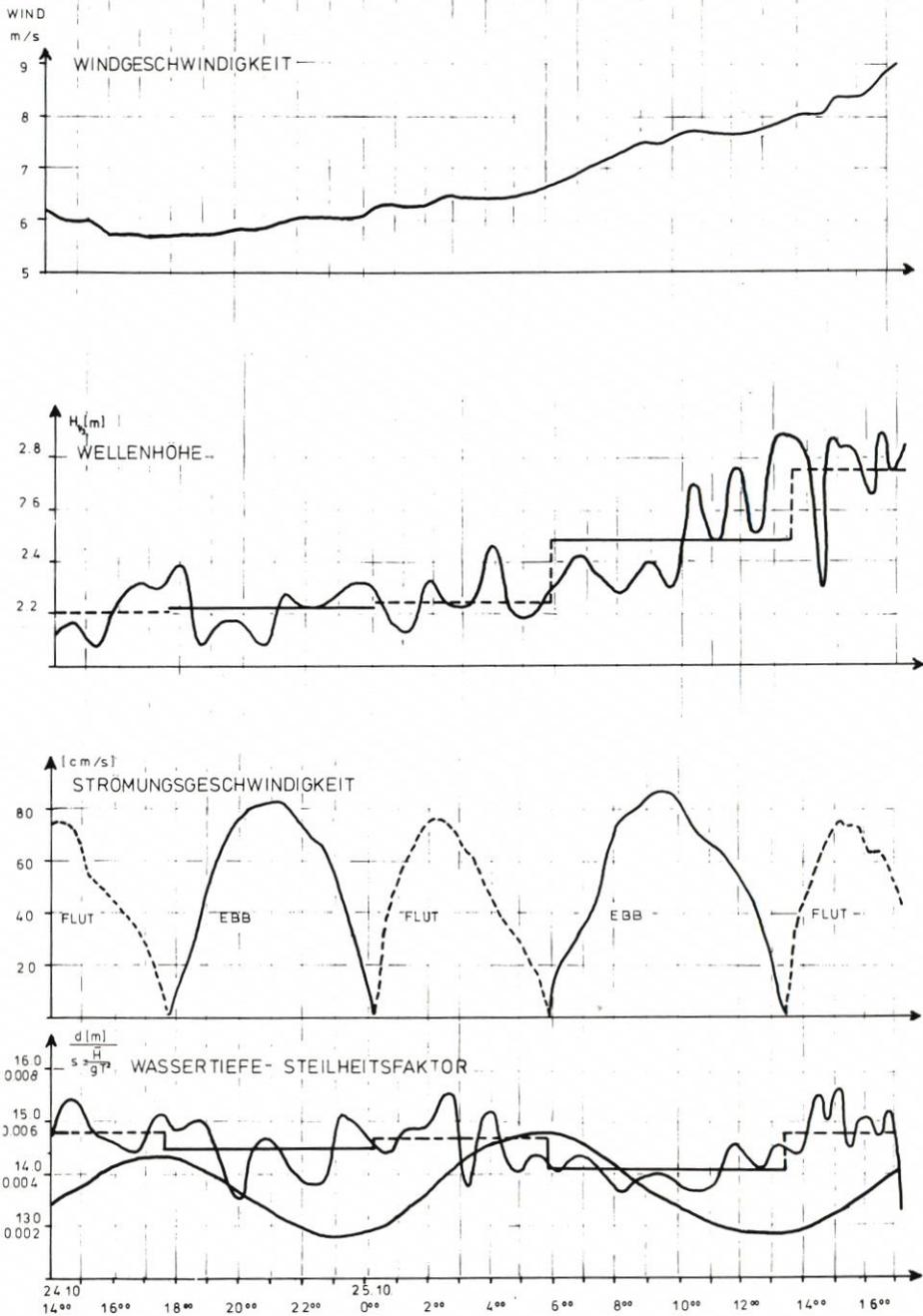


Abb. 4.10 Station RSW – Messung vom 24./25. 10. 78

**STATION TPW**  
 MESSUNG VOM 27. + 30.4.1979  
 WIND WNW - NW

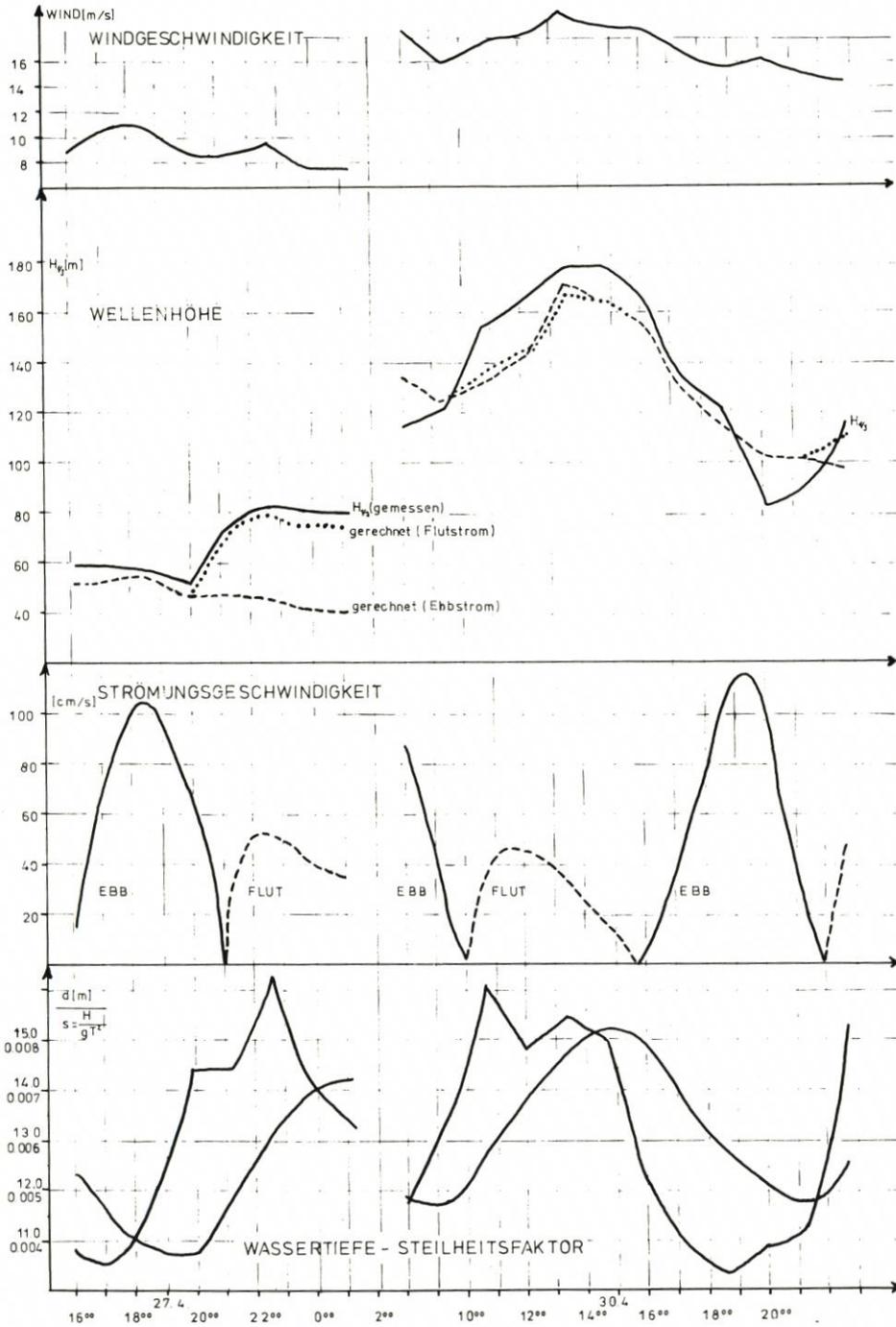


Abb. 4.11 Station TPW - Messung vom 27./30. 4. 79

jeweilige Strömungsphase gemittelten Höhen  $H_{1/3}$  scheinen ebenfalls unmittelbar vom Wind abzuhängen. Unter den Ganglinien der Strömungsgeschwindigkeit sind die des Steilheitsfaktors

$$s = \frac{\bar{H}}{g\bar{T}^2}$$

und der Wassertiefe aufgetragen. Hierbei ist ein unmittelbarer Zusammenhang zwischen den über die Strömungsphase gemittelten Steilheitsfaktoren  $s$  und der Strömungsrichtung zu erkennen. Abhängig von der mittleren Periode  $\bar{T}$  liegt der Steilheitsfaktor bei mit der Wellenfortschrittsrichtung verlaufender Strömung niedriger als bei entgegengesetzt laufender Strömung.

Da eine wesentliche Beeinflussung von  $s$  durch  $\bar{H}$  nicht gegeben zu sein scheint, steht diese Aussage im Gegensatz zu der weiter vorn gemachten, daß bei Seegang und Strömung gegeneinander die Perioden größer sind, als umgekehrt. Eine genaue Analyse der Messung ergab jedoch, daß bei RSW besondere Verhältnisse bei Windrichtungen herrschen, die nicht genau in der Hauptstromrichtung liegen. Schon bei Wind aus NNW (s. Abb. 4.2) liegen die Perioden bei Flutstrom höher als bei Ebbstrom. Diese Erscheinung ist offensichtlich auf die Lage der Station am Rand des Roten Sandes und Refraktionserscheinungen bzw. Überlagerung von Wellenfeldern bei diesen Windrichtungen zurückzuführen. Damit ist hier der überwiegende Einfluß der Topografie gegeben.

In gleicher Weise wurde eine Messung vom 27./30. 4. 1979 an der Station TPW analysiert. TPW liegt am Rand einer engeren Tiderinne und ist damit stärkeren Tideströmungen ausgesetzt. Die Ebbströmungen erreichen i. M. Werte bis 1,15 m/s (s. Abb. 4.11).

Nach den in Abschnitt 4.1 gefundenen Beziehungen (s. auch Abb. 4.6) wurden die kennzeichnenden Höhen  $H_{1/3}$  über den gesamten Verlauf der Messung jeweils für Ebb- und Flutstrom berechnet und im Vergleich zu den tatsächlich gemessenen Höhen aufgetragen. Man erkennt, daß bei vergleichsweise geringen Wellenhöhen der Einfluß der Tideströmung sich stark bemerkbar macht (27. 4. 20.00 Uhr bis 28. 4. 1.00 Uhr; 30. 4. 21.00 bis 23.00 Uhr), während bei größeren Wellenhöhen eine Beeinflussung kaum gegeben ist (wie auch bereits in der Messung RSW vom 24./25. 10. 78 festzustellen). Der Verlauf der Steilheitsfaktoren entspricht dem erwarteten Verhalten. Größere Perioden bei Ebbstrom senken den Faktor  $s$ ; bei Flut steigt  $s$  mit sinkenden  $\bar{T}$  wieder an.

Zusammenfassend kann hierzu gesagt werden, daß aus den vorliegenden Messungen zwar eine Beeinflussung der Wellenperioden  $T$  abzuleiten ist, eine Abhängigkeit der mittleren oder signifikanten Höhen scheint jedoch ab einer bestimmten Wellenhöhe nicht mehr gegeben zu sein. Der Gültigkeitsbereich für die o. a. Gleichung

$$\frac{H}{H_0} = \sqrt{\frac{2}{1 + \frac{4v}{c_0} + \sqrt{1 + \frac{4v}{c_0}}}}$$

muß im Ästuarbereich vorläufig auf den Bereich

$$H_{1/3} \leq 1,0 \text{ m}$$

beschränkt werden. Hierzu sind jedoch noch eingehende Untersuchungen erforderlich.

#### 4.4 Veränderung der Seegangparameter beim Einlaufen in das Ästuar

Winderzeugte Wellen, die im freien Seebereich entstehen und in ein Gebiet stark wechselnder Tiefen einlaufen, sind den unterschiedlichsten Einflußfaktoren ausgesetzt. Da es aus wirtschaftlichen Erwägungen kaum machbar ist, alle möglichen interessanten Standorte eines Ästuars mit Geräten zu besetzen und dort noch möglichst synchron zu messen, können Änderungen der Seegangparameter zunächst nur an den bereits o. a. Stationen erfaßt und stellvertretend für ein größeres Gebiet angesetzt werden. Je nach Erfordernis bzw. aufgrund der ersten Ergebnisse muß das Meßnetz in den kommenden Jahren verdichtet werden.

Die Beziehung zwischen mittleren Perioden  $\bar{T}$  und den mittleren Höhen  $\bar{H}$  wird bisher in der Literatur als wenig befriedigend dargestellt. Falls ein Zusammenhang zwischen beiden hergestellt werden kann, so könnte man leicht aus bereits vorhandenen Höhenverteilungen auch auf Periodenverteilungen schließen. Beziehungen zwischen  $\bar{H}$  und  $\bar{T}$  wurden für Messungen in der Deutschen Bucht bei TOMCZAK (1969) dargestellt. SIEFERT (1974) faßt diese Messungen zusammen und vergleicht sie mit eigenen Untersuchungen vor und in der Elbemündung. Die dabei gefundene mittlere lineare Beziehung

$$\bar{T} = 2 \bar{H} + 2,3$$

gilt gleichermaßen für Stationen vor dem Watt der südlichen Deutschen Bucht, während nach den Messungen von TOMCZAK (1969) für den Bereich Schleswig-Holstein in ähnlicher Lage eine Beziehung

$$\bar{T} = 3,6 \bar{H} + 1,3$$

anzusetzen ist.

Für Stationen in der Außenelbe wurde jedoch eine nichtlineare Abhängigkeit z. B. der Form

$$\bar{H} \sim \bar{T}^2$$

ermittelt (SCHRADER, 1968). Auswertungen aller 2'- bzw. 4'- Schriebe aus der Wesermündung ergaben, daß – abhängig von der jeweiligen Windrichtung – die Zusammenhänge zwischen  $\bar{H}$  und  $\bar{T}$  starken Schwankungen unterworfen sind. Dabei ist besonders herauszustellen, daß im inneren Ästuar (TPO) in Wattrandlagen bei extremen Windlagen (Sturmflut) lange Wellen auftreten, während im äußeren Ästuar (ST) mit zunehmendem Wind die Wellen steiler und kürzer werden (Abb. 4.12 und folgende Tabelle).

#### Wellenhöhen

	$\bar{H}$	$H_{1/3}$	$H_{1/10}$	$H_{\max}$
Inneres Ästuar (TPO)				
a)	1	1,47	1,75	1,98
b)	1	1,55	1,85	1,89
Äußeres Ästuar (ST)				
a)	1	1,50	1,86	2,14
b)	1	1,55	1,95	2,30

Wellenperioden

	$\bar{T}$	$T_{H1/3}$	$T_{H1/10}$	$T_{max}$
Inneres Ästuar (TPO)				
a)	1	1,27	1,30	1,29
b)	1	1,46	2,21	1,34
Äußeres Ästuar (ST)				
a)	1	1,12	1,12	1,57
b)	1	1,11	1,09	1,08

- a) = Mittelwert aus 100 Registrierungen bei Normaltide (Wind: WNW bis N)
- b) = Sturmflutwerte (44 Registrierungen)

**Inneres Ästuar (TPO):** Das Verhältnis der mittleren Perioden zu den signifikanten Werten nimmt bei der Sturmflut stark zu – Umwandlung in Dünung. Die Höhenverhältnisse ändern sich weniger; maximale Höhen werden geringer.

**Äußeres Ästuar (ST):** Die Perioden werden kleiner, die Wellen demnach steiler. Das Verhältnis der mittleren zu den signifikanten und max. Wellenhöhen nimmt zu. Diese Ergebnisse passen in den Rahmen des vorher Gesagten.

Die Beziehung umfaßt demnach den Bereich von

$$\bar{T} = 1,4 \bar{H} + 3,2$$

bis

$$\bar{T} = 3,5 \bar{H} + 2,0$$

(tiefes Wasser)  
(Flachwasser)

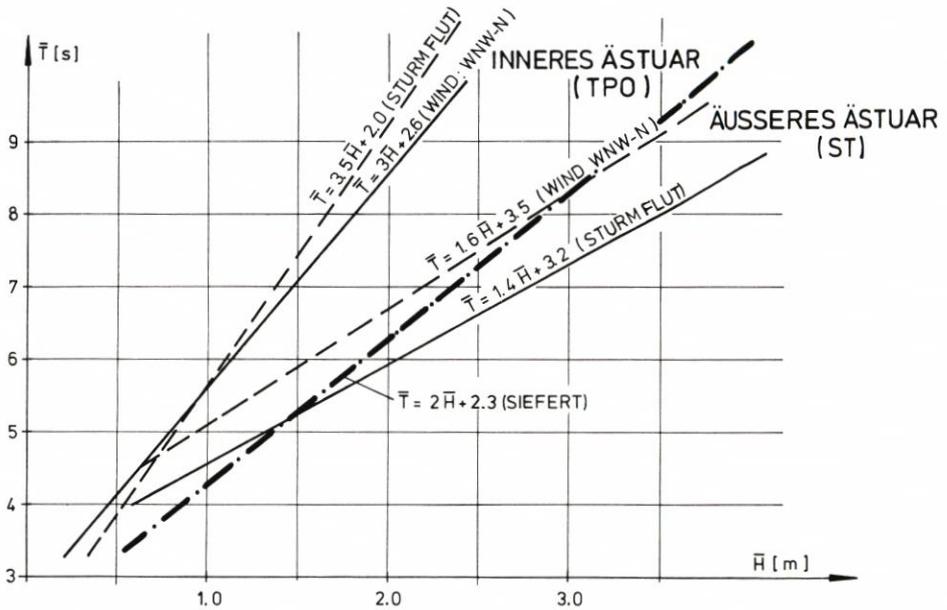


Abb. 4.12 Zusammenhang zwischen mittlerer Wellenperiode und -höhe

WIEGEL (1964) fand für eine repräsentative Reihe von Untersuchungen die Beziehung

$$H_{1/3} = 0,137 \bar{T}^2$$

die, nach den Angaben zu schließen, ebenfalls für Tiefwasserbedingungen gilt.

Eingehende Untersuchungen über das Verhältnis  $\bar{H}$  zu  $\bar{T}$  bei verschiedenen Windrichtungen sind bei BARTHEL (1980) zu finden.

GALVIN, TENNEY und SEELIG (1970) haben bei vergleichenden Untersuchungen zwischen küstennahem und küstenfernem Seegang das Verhältnis

$$\begin{aligned} H &= 0,086 T \\ T &= 11,628 H \end{aligned}$$

(Strand)

$$\begin{aligned} H &= 0,179 T - 0,214 \\ T &= 5,586 H + 1,196 \end{aligned}$$

und  
(tiefes Wasser)

ermittelt.

Die Ergebnisse stammen aus einem Vergleich von 218 000 Beobachtungen vor der amerikanischen Ostküste. Leider geht aus den Angaben nicht hervor, welche Registrierdauer verwendet wurde und ob es sich um Mittelwertbildungen einzelner Schriebe handelt. Offensichtlich sind jedoch die dort herrschenden Verhältnisse auch diesmal nicht ohne weiteres auf den hiesigen Bereich zu übertragen, wie auch bereits von SIEFERT (1974) bei einer Interpretation der Messungen von BRETSCHNEIDER (1954) im Golf von Mexiko festgestellt wurde.

Bei der Auswertung einer Reihe von 20'-Schrieben der Stationen ST, RSW, RSO und TPW stellte sich heraus, daß ein genereller Zusammenhang in diesem Gebiet komplexen Seegangsklimas sehr schwierig ist. Vielmehr muß auch hier wieder stark zwischen Windrichtungen und Ebb- und Flutströmungen unterschieden werden. Die Datenkollektive, die nach Aufteilung in die verschiedenen Zustände zur Verfügung stehen, sind jedoch noch zu gering, um bei der starken Streuung allgemeingültige Aussagen über Beziehungen an den einzelnen Stationen machen zu können. Deshalb ist eine Fortführung der Messungen zur Gewinnung größerer Datenkollektive unbedingt erforderlich. Die bisherigen Ergebnisse weisen jedoch darauf hin, daß alle mittleren Abhängigkeiten innerhalb der Grenzen

$$\begin{aligned} \bar{T} &= 1,4 \bar{H} + 3,2 \\ \text{und } \bar{T} &= 3,5 \bar{H} + 2,0 \end{aligned}$$

liegen.

In gleicher Weise können auch Angaben über die Steilheitsfaktoren

$$s = \frac{\bar{H}}{g\bar{T}^2}$$

im untersuchten Gebiet gemacht werden. Bei allen bisherigen Untersuchungen über die Änderung des Steilheitsfaktors bei Einlaufen des Seegangs in Flachwassergebiet wurde festgestellt, daß sich die Wellensteilheit im äußeren Ästuar wesentlich anders verhält, als im flacheren Wasser des inneren Ästuars. Da die Werte entsprechend der lockeren Beziehung

$$\bar{T} = f(\bar{H})$$

stark streuen, konnten nur die Begrenzungslinien der Streubereiche als Kriterien verglichen

werden. Dabei ist an zwei Stationen stellvertretend für das äußere (ST) und das innere Ästuar (TPO) folgendes festzustellen:

Abhängig von der Windrichtung und der Wassertiefe nimmt im äußeren Ästuar die Wellensteilheit bei anwachsender Wellenhöhe zunächst bis zu einem Wert von

$$s = 0,57 \text{ bis } 0,66$$

zu und bleibt dann konstant. Dabei liegen die Steilheiten bei außergewöhnlichen Wetterlagen, wie bereits oben erwähnt, höher (Abb. 4.13).

Mit abnehmender Wassertiefe, d. h. bei Annäherung an das innere Ästuar, wächst der Steilheitsfaktor mit zunehmender Wellenhöhe schneller an, erreicht in Abhängigkeit von der Wassertiefe einen Maximalwert und fällt dann wieder ab. Die gleiche Erscheinung konnte

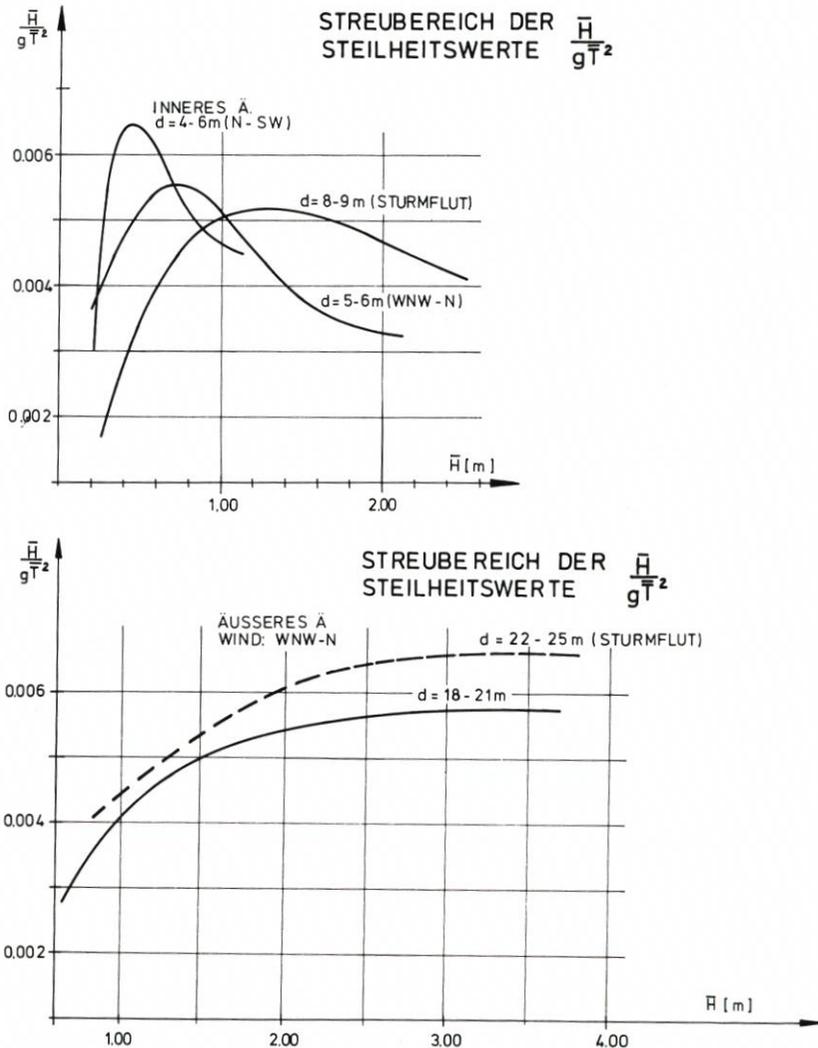


Abb. 4.13 Abhängigkeit des Steilheitsmaßes  $s$  von der mittleren Wellenhöhe  $\bar{H}$

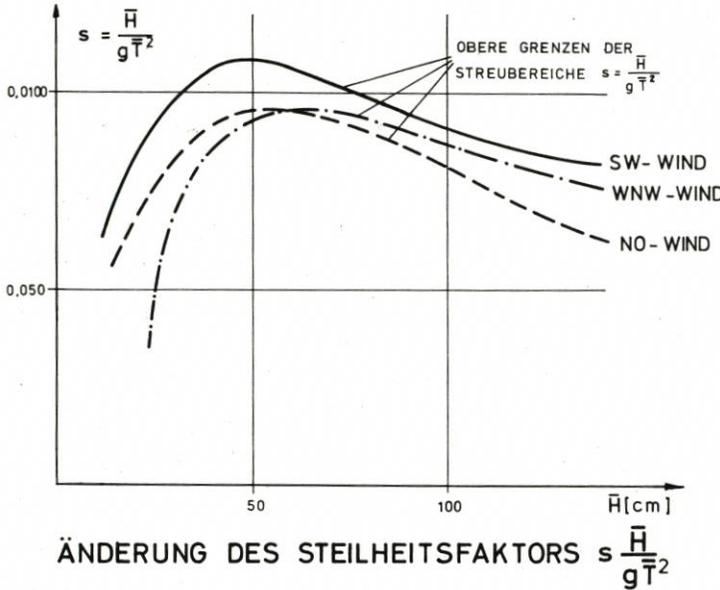


Abb. 4.14 Steilheitsfaktoren bei TPW bei verschiedenen Windrichtungen

nicht nur auf der dem Wattgebiet vorgelagerten Station TPO, sondern auch in der tiefen Rinne bei TPW beobachtet werden (Abb. 4.14).

Abb. 4.15 zeigt schematisiert die Veränderung der Wellensteilheit in den verschiedenen Bereichen des Ästuars. Bei höheren Wellen nehmen die Perioden kontinuierlich von draußen nach drinnen zu, die Steilheit nimmt mit zunehmendem Energie- und damit Höhenverlust ab. Bei kleineren Wellen ( $H_{1/3} = 1,0$  bis  $2,0$  m) nimmt die Steilheit im Riffbereich zunächst zu, um dann nach drinnen ebenfalls abzunehmen.

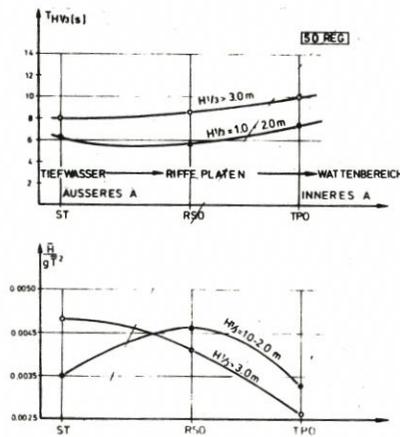


Abb. 4.15 Veränderung der Wellenperioden  $T_{H_{1/3}}$  und des Steilheitsmaßes  $S = \frac{\bar{H}}{g\bar{T}^2}$

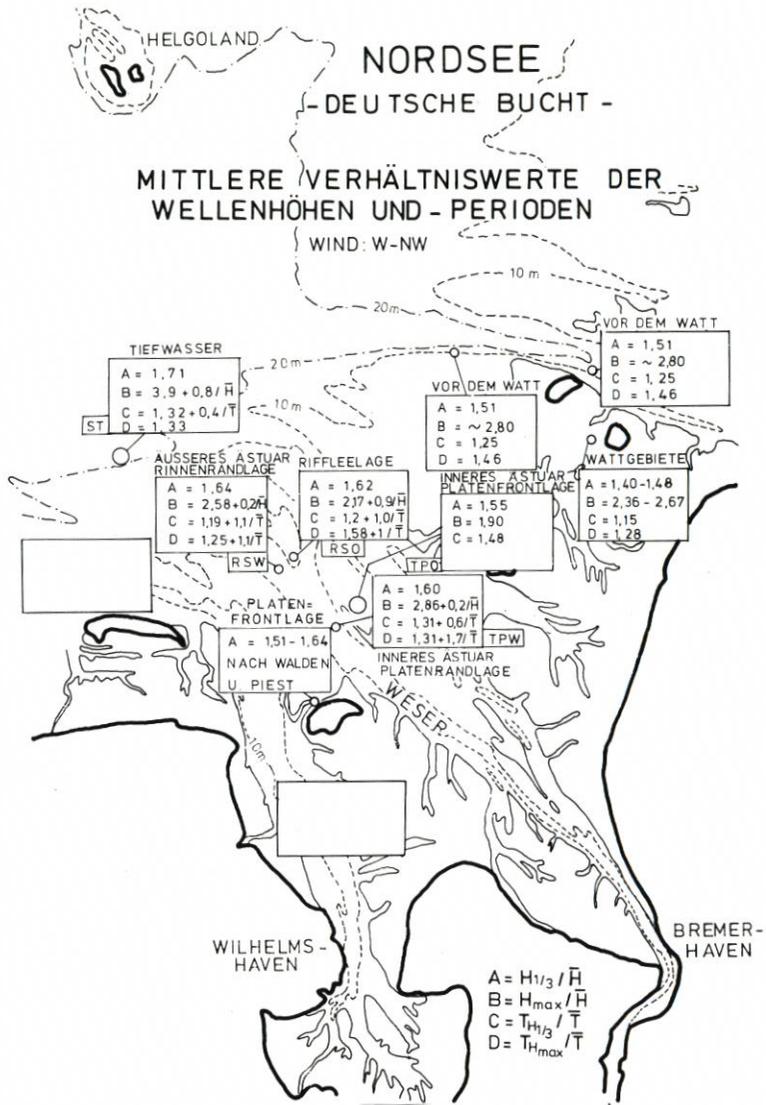


Abb. 4.16 Verhältnis kennzeichnender Höhen und Perioden im Küstenbereich der Jade-Weser-Elbe-Mündung

Im Rahmen dieses Meßprogramms wurden umfangreiche Untersuchungen über Höhen- und Periodenverteilungen durchgeführt, die bei BARTHEL (1980) eingehend beschrieben werden. Abb. 4.16 zeigt eine Übersicht über Verhältniswerte, die im Weser-Elbe-Raum bei langjährigen Messungen ermittelt wurden.

#### 4.5 Maximale Meßwerte

Wie bereits anfangs erwähnt, lagen bis zu Beginn des Meßprogramms nur wenige Einzelmesswerte und Schätzungen über Wellenhöhen und -perioden im Weserästuar vor.

Deswegen waren die ersten Ergebnisse erstaunlich und – nachdem es gelungen war, auch bei einer Sturmflut zu messen – erschreckend zugleich.

Am 3. Januar 1976 wuchs der Wind in der Deutschen Bucht von 16 m/s bis auf fast 30 m/s (Beaufort 11) an. Die Richtung änderte sich von 175° (S) auf 295° (WNW), ein Bereich, der

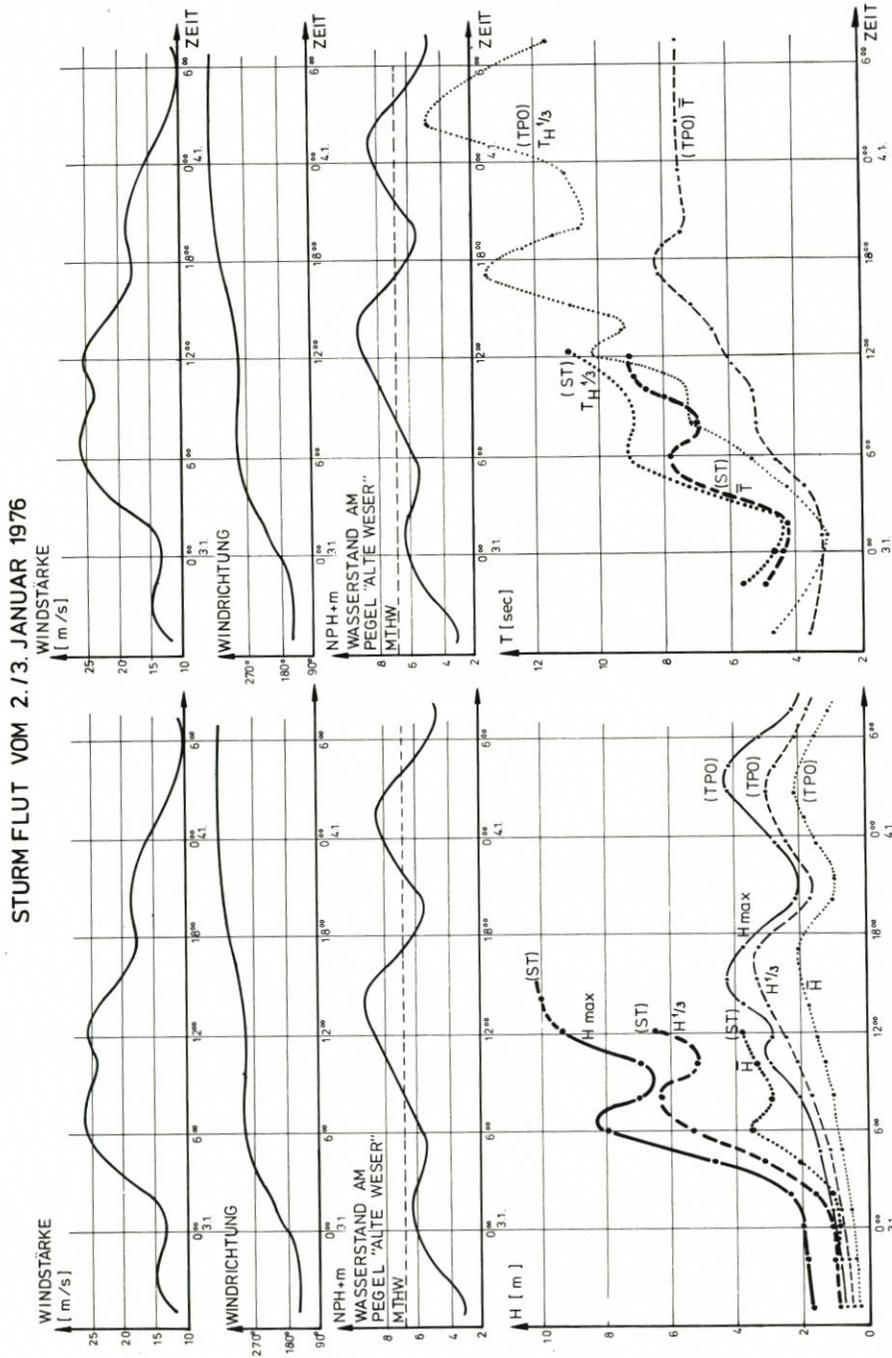


Abb. 4.18 Ganglinien der Messreihe vom 2./3. Januar 1976

oft sehr sturmflutwirksam ist. Der Wasserstand am Pegel „Alte Weser“ lag um 4.59 Uhr auf  $NPH + 539$  cm ( $MTnw = NPH + 351$  cm) und um 13.39 Uhr auf  $NPH + 910$  cm ( $MThw = NPH + 632$  cm). Leider waren zu diesem Zeitpunkt noch nicht alle Meßpositionen besetzt, so daß nur an den Stationen „Schlüsseltonne“ (ST) und „Tegeler Plate-Ost“ (TPO) Meßdaten aufgenommen werden konnten. Eine dritte Station – ein Wellenpegel vom Typ „Wemelsfelder“ – fiel durch Kollision mit einem treibenden Schiff aus.

Abb. 4.18 zeigt die Ganglinien von Wind, Wasserstand und den gemessenen Seegangsgößen.

Wie man sieht, wachsen die Wellenhöhen  $\bar{H}$  und  $H_{1/3}$  im äußeren Ästuar mit zunehmender Windgeschwindigkeit sehr schnell an, nehmen mit nachlassendem Wind wieder ab, um dann wiederum noch höhere Werte zu erreichen. Leider fiel die Station ST gegen 14.00 Uhr aus, da der Rekorder auf eine derartige Wellenhöhe nicht eingestellt war. Die Wellenperioden  $\bar{T}$  und  $T_{H1/3}$  zeigen etwa das gleiche Verhalten in Abhängigkeit vom Windgeschehen. Erst mit etwa zwei Stunden Verzögerung erreichen im „inneren Ästuar“ die Wellenhöhen  $\bar{H}$ ,  $H_{1/3}$  und  $H_{max}$  ihre Maximalwerte. Ein zweiter Peak wird am 4. 1. gegen 3.00 Uhr erreicht. Es ist offensichtlich, daß hier die Wellenhöhen in unmittelbarem Zusammenhang mit der Wassertiefe bei abnehmender Windgeschwindigkeit stehen. Erstaunlich ist dabei die starke Zunahme der Perioden  $T_{H1/3}$  bis auf Werte von 16 sec.

Nach der klassischen Formel von MC COWAN ist für Tiefwasser an der Station ST zwar ein theoretisches

$$H_{max} = 0,78 d = (\text{für } d = 24,5) = \text{rd. } 19 \text{ m}$$

möglich. Da der Seegang in der Deutschen Bucht wegen der dort herrschenden Wassertiefen bei größeren Windstärken allgemein als Flachwasserseegang anzusehen ist, wird zusätzlich zur turbulenten Reibung (free turbulence friction) eine Sohlreibung (wall turbulence friction) wirksam. Wellenenergie und -höhe werden dadurch vermindert.

Die maximale Wellenhöhe bei ST, die bei der letzten Registrierung zu erkennen war, betrug 10,0 m. Dieses war jedoch gleichzeitig die Begrenzung der Registrierbreite des Papierschriebs. Vorsichtige Abschätzung dieser abgebrochenen Registrierung nach Anstieg und Periode dieser Welle läßt auf eine Höhe von 12,0 bis 13,0 m schließen.

Damit sind maximale Wellenhöhen, die z. B. nach Vorhersageverfahren von BRETSCHEIDER (1956) unter Ansatz eines Bemessungssturmes für diesen Bereich zu

$$H_{max} = 10,0 \text{ m}$$

(BARTHEL, 1979) ermittelt wurden, zu niedrig angesetzt. Ebenso ist die Annahme von ROLL (1956), der aus Beobachtungen an Bord deutscher Feuerschiffe auf ein

$$H_{max} = 8,0 \text{ m}$$

schließt, sicherlich nach den heutigen Erkenntnissen überholt. Wahrscheinlicher sind die Berechnungen von DRAPER (1973), der für einen 50-Jahre-Bemessungssturm von 12 Stunden Dauer für den Bereich der Deutschen Bucht ein

$$H_{max} = 17,0 \text{ m}$$

errechnet.

Für den inneren Teil des Ästuars kann man die theoretischen Ansätze von KISHI (1959) verwenden und erhält eine maximale Höhe von

$$H_{max} = 8,4 \text{ m}$$

(BARTHEL, 1979). Wegen der teilweise starken Energieverluste beim Einlaufen des Seegangs in das Ästuar scheint jedoch dieser Wert zu hoch angesetzt zu sein. Die weiter oben angegebenen Grenzen für die signifikante Wellenhöhe wurden auch bei späteren Sturmweatherlagen nicht überschritten.

Erstaunlich war auch der Anstieg der Wellenperioden im inneren Ästuar während der Sturmflut 1976. Die signifikante Wellenperiode  $T_{H1/3}$  erreichte Werte von mehr als 15 s. Maximalwerte lagen bei

$$T_{Hmax} = 18,2 \text{ s}$$

Die daraus resultierenden Wellenlängen, die ohne weiteres auch Beträge  $> 100 \text{ m}$  erreichen, können für Schiffe mit geringer underceel-clearance bereits ein Gefahrenmoment bilden.

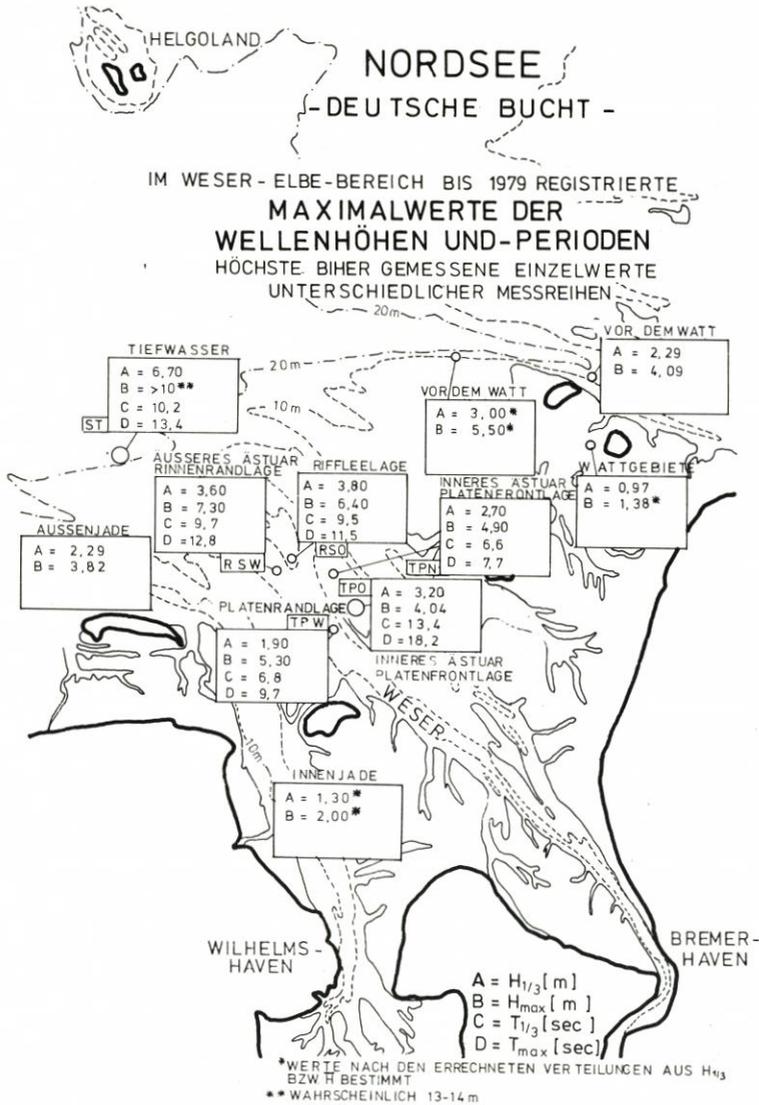


Abb. 4.17 Maximale Meßwerte im Bereich der Jade-Weser-Elbe-Mündung

Systematische Untersuchungen des Anteils langperiodischen Seegangs im Spektrum wurden in der Jade durchgeführt (YSKER, 1979).

Die im Bereich der Weser-Elbe-Mündung bisher höchsten registrierten Werte sind in Abb. 4.17 zusammengefaßt.

## 5. Energiebetrachtungen beim Ästuarseeang

### 5.1 Berechnung der Spektren mit der FAST-FOURIER-Transformation

Die Möglichkeit, neben kennzeichnenden Werten und Häufigkeitsverteilungen den Seegang auch durch eine Spektralanalyse darzustellen, wurde bereits weiter oben erwähnt. Das Energiespektrum gibt Aufschluß über die potentielle Energie innerhalb eines engen Frequenzbandes als Funktion der zugehörigen Frequenz bzw. auch Periode jeweils für eine begrenzte Zeitserie.

Für die Berechnung von Spektren müssen in erster Linie ausreichend lange Meßschriebe zur Verfügung stehen. Dazu reichen mit Sicherheit keine 2-Minuten-Schriebe der o. a. Wemelsfelder-Schwimmermeßgeräte aus. Ebenso sind zu lange Meßschriebe nicht zu empfehlen, da sich äußere Einflußfaktoren, wie z. B. Wind und Wasserstand, besonders im Flachwassergebiet laufend ändern. FÜHRBÖTER (1974) und DETTE (1974) geben für Messungen in der Brandungszone eine erforderliche Meßdauer von ca. 13 bis 15 Minuten ( $\sim 100$  Wellen) an. SILVESTER (1974) schlägt vor, eine Serie von 150 Wellen zu untersuchen.

Um die Bedingungen der Ergodizität zu erfüllen, muß nach REHLING (1975) eine Meßserie mindestens 600 Wellen enthalten. Diese Forderung erscheint jedoch bei der Abschätzung der Genauigkeit der Messung und den möglichen Einflußvariablen als nicht gerechtfertigt. Außerdem weist HARRIS (1970) nach, daß beim Vergleich von  $2 \times 17$  und  $1 \times 34$  Minuten die Ergebnisse streuen. Es muß vielmehr Wert gelegt werden auf eine ausreichend hohe Abtastrate, um zu verhindern, daß eine Verfälschung einer Zeitserie eintritt (KAMPHUIS, 1969). Unter den o. a. Aspekten und nach den in der Literatur angegebenen Methoden wurde eine Meßdauer von jeweils 20 Minuten gewählt. Die Abtastrate wurde mit 4 Hz festgelegt.

FOURIER zeigte, daß periodische Zeitreihen durch eine unendliche Reihe von sin- und cos-Funktionen dargestellt werden können. Der mathematische Ausdruck der modifizierten (mit einer unendlich langen Grundschwingung versehenen) FOURIER-Reihe wird als FOURIER-Transformation bzw. Spektrum bezeichnet.

$$y(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{\omega=-\infty}^{\infty} c(\omega) e^{i\omega t} d\omega$$

$$c(\omega) = \int_{t=-\infty}^{\infty} y(t) e^{-i\omega t} dt$$

Da dieser Ausdruck für unendliche Zeitreihen gilt, stellte das errechnete Frequenzspektrum nur eine Abschätzung des tatsächlichen dar.

Für die Berechnung des Spektrums wurde die FAST-FOURIER-Transformation nach COOLEY und TUKEY (1965) verwendet. Sie bringt eine wesentliche Rechenzeiterparnis gegenüber den herkömmlichen FOURIER-Transformationen (Abb. 5.1).

Anzahl der Meßwerte	64	128	256	512	1 024
Normale Berechnung	4 000	16 000	64 000	256 000	1 024 000
FFT	750	1 800	4 100	9 200	20 400

Abb. 5.1: Anzahl der Rechenoperationen der normalen FT mit der FFT (nach KAMPHUIS, 1969).

Auf eine eingehende Erläuterung der Methode (FFT) wird hier verzichtet und auf KAMPHUIS (1969) bzw. auf COOLEY und TUKEY (1965) verwiesen.

Das Ergebnis der FOURIER-Transformation ist zunächst eine wenig überschaubare Darstellung mit einem kaum erkennbaren Kurvenverlauf. Daher stand zur Glättung des Spektrums ein sogenanntes „Hamming-Fenster“ im Rechenprogramm zur Verfügung, dessen Wirkungsweise bei REHLING (1975) geschildert wird. Abb. 5.2 zeigt die Darstellung eines Energiespektrums ohne und mit Glättung. Für die Beurteilung und weitere Bearbeitung der Energiespektren wurden alle Spektralfunktionen grundsätzlich dieser Glättung unterzogen. Damit werden auch weitgehend Störimpulse, die z. B. aus der Funkfernübertragung zu erwarten waren und auch festgestellt wurden, herausgefiltert.

Ein gewisses Problem stellte bei der Berechnung der Spektren die Tatsache dar, daß die verwendeten Meßgeräte (wave-rider-Bojen) nur bis zu einer Minimalperiode von 1,9 s verlässlich arbeiten. Gemessene mittlere Perioden  $< 1,9$  s konnten demnach nicht mehr in die Auswertung einbezogen werden. Da jedoch für die Betrachtung ohnehin nur Meßreihen untersucht wurden, die bei höheren Windstärken gewonnen wurden, ist der entstehende Fehler im Frequenzbereich von  $> 0,5$  Hz vernachlässigbar klein. Bei der Ermittlung der Gesamtenergie des Spektrums wurde dieser Teil nicht berücksichtigt.

## 5.2 Spektren in einem Ästuar – Diskussion einiger Meßreihen

In der Literatur findet man eine Vielzahl von Hinweisen auf gemessene bzw. errechnete Seegangsspektren, die entweder in tiefem Wasser oder aber an flach ansteigenden Küsten bzw. Stränden gewonnen wurden (z. B. HASSELMANN et al., 1973, BÜSCHING, 1978). Es gibt außerdem inzwischen eine Reihe von Verfahren, Spektren in verschiedenster Hinsicht zu behandeln (z. B. RAMAN, 1975) oder ein Energiespektrum in mathematischer Form angenähert darzustellen (z. B. BRETSCHNEIDER, 1959, PIERSON-MOSKOWITZ, 1964, HASSELMANN et al., 1973).

Die äußerst komplizierten und verwickelten Vorgänge beim Einlaufen des Seegangs in ein Ästuar ließen jedoch erwarten, daß sich Formen von Spektren entwickeln, die nicht nach den bisher gültigen Methoden erfaßt bzw. beschrieben werden konnten. Änderungen der Windstärke und -richtung, der Wassertiefe und die damit verbundenen Effekte wie Überlagerung von Seegangsfeldern, Diffraktion, Refraktion und Reflexion lassen die Form des Spektrums sich so schnell und häufig ändern, daß kaum die Möglichkeit der Zuordnung von in einer Meßserie an verschiedenen Stationen gewonnenen Energiespektren gegeben schien. Die Auswertung beschränkte sich daher zunächst auf die Diskussion der Spektren an verschiedenen Stationen, die bei Voraussetzung gleichbleibender Einflußfaktoren einander zeitlich ungefähr zugeordnet werden konnten.

Bei der Untersuchung der Spektren wurde insbesondere auf die folgenden Fragen eingegangen:

1. Wie ändern sich die Frequenzen bzw. Perioden hoher Energieanteile?

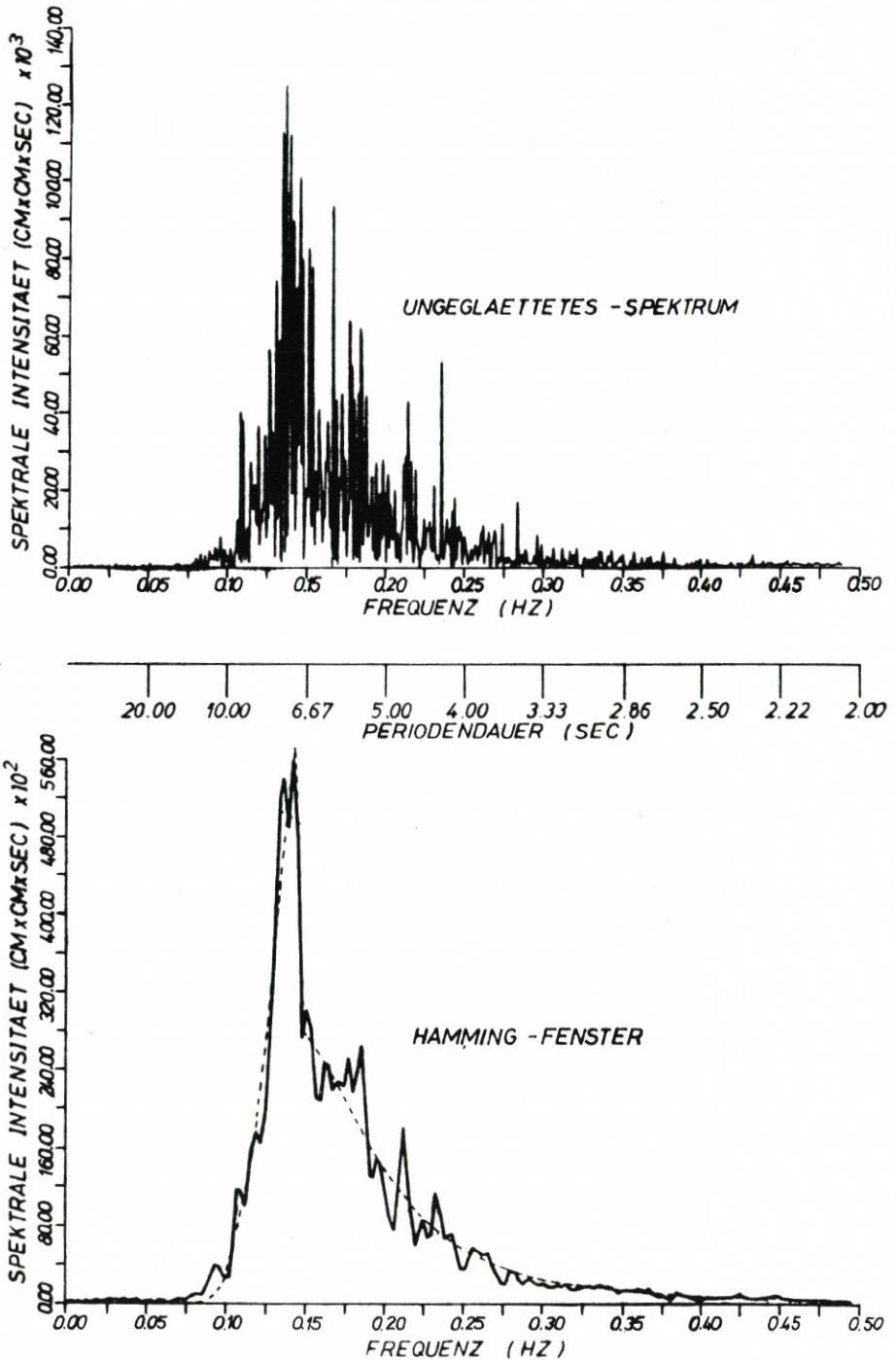


Abb. 5.2 Ungeglättetes und Hamming-geglättetes Energiespektrum

2. Bleiben beim Einlaufen in das Ästuar hohe Perioden erhalten oder zerfallen sie?
3. Baut sich nach Passieren von Untiefen ein neues Wellenfeld auf oder wird das alte modifiziert?
4. Wie wirken sich unterschiedliche Windverhältnisse aus?
5. Wie ändert sich die Gesamtenergie bzw. der Energieinhalt?

Die folgende Untersuchung schließt die Stationen ST, RSW, RSO' und TPW' ein. Versuche, die bei TPO zu anderer Zeit gewonnenen 2-Minuten-Schriebe auch spektral auszuwerten, scheiterten. Alternative Meßgeräte für diesen Flachwasserbereich standen nicht zur Verfügung.

Meßreihe 27. 4. 79 - 19.00 Uhr

Wind: 11 m/s - WNW (gleichbleibend)

	$H_{1/3}$ [m]	$H_{max}$ [m]	$\bar{T}$ [s]	$T_{fo}$ [s]	$m_o$ [cm <sup>2</sup> ]	$E_{f\ max}$ [cm <sup>2</sup> · s]
ST	1,64	2,46	3,9	7,3	696	7943
RSW	1,56	2,42	4,1	4,6	559	4194
RSO'	1,65	2,66	3,5	4,5	541	3982
TPW'	0,52	0,93	2,1	5,1	85	714

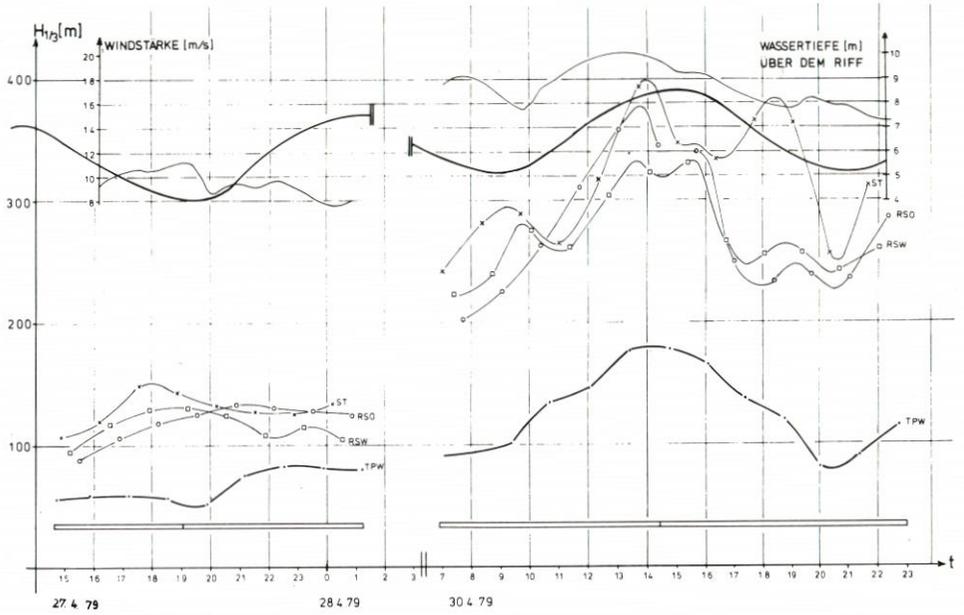
Abb. 5.3 zeigt die Ganglinien der gemessenen Seegangparameter mit Wind und Tide vom 27./30. 4. 79.

Das Spektrum bei ST (Abb. 5.4) zeigt einen normalen Verlauf mit einem Hauptpeak bei  $T_{fo} = 7,3$  s. Bei verhältnismäßig geringen Windstärken kommen Maximalhöhen von etwa 2,50 m vor. Die Wellen längerer Perioden laufen weiter nach RSW mit geringer Zunahme von  $T_{fo}$ , aber starker Abnahme der Energiedichte. Es bildet sich ein zweites Maximum im Bereich von 4,6 s, in dem der Hauptteil der Gesamtenergie enthalten ist. In der Leelage bei RSO ist bei noch geringem Wasserstand über dem Riff eine weitere Änderung eingetreten. Der durch die Alte Weser einlaufende Seegang ist bereits verändert worden (kleinere Perioden) und wird stärker von der örtlichen Windsee mit kleineren Perioden überlagert. Zwischen RSW und TPW' treten bei zunehmender Wassertiefenverringern und enger werdenden Rinnen die größten Energieverluste auf. Eindringender, langperiodischer Seegang mit leicht zunehmender Tendenz bei  $T_{fo}$  ist nach wie vor zu erkennen; Hauptenergieanteile liegen jedoch bei rd. 5 s und im kurzwelligen Bereich. Die max. Energiedichte ist bis auf  $E_{f\ max} = 714$  cm<sup>2</sup> s gefallen.

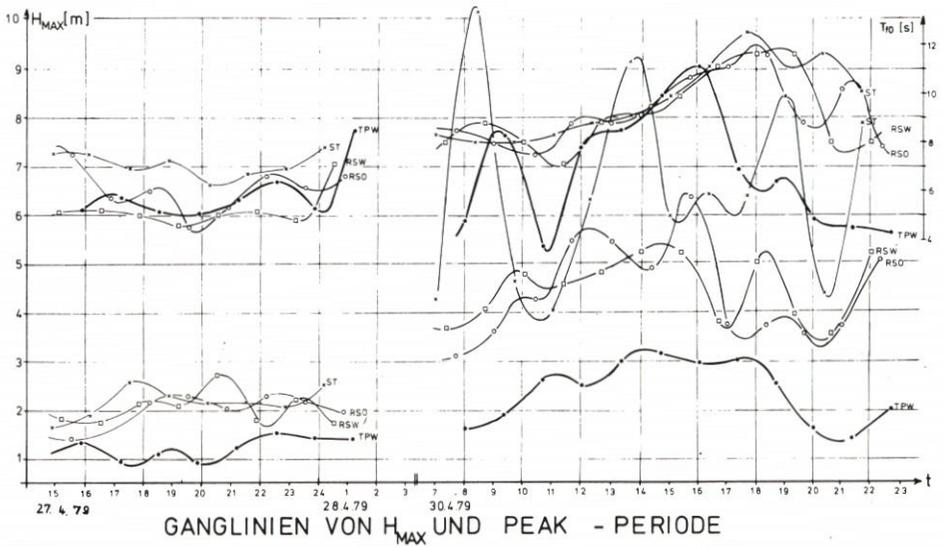
Meßreihe von 30. 4. 79 - 7.00 Uhr

Wind: 17,5 m/s WNW (etwas zunehmend)

	$H_{1/3}$ [m]	$H_{max}$ [m]	$\bar{T}$ [s]	$T_{fo}$ [s]	$m_o$ [cm <sup>2</sup> ]	$E_{f\ max}$ [cm <sup>2</sup> · s]
ST	2,40	4,28	4,7	8,3	2 009	42 434
RSW	2,23	3,67	5,5	8,0	1 690	30 380
RSO'	2,02	3,13	4,9	8,5	1 439	31 125
TPW'	0,94	1,65	3,3	8,3	333	3 765

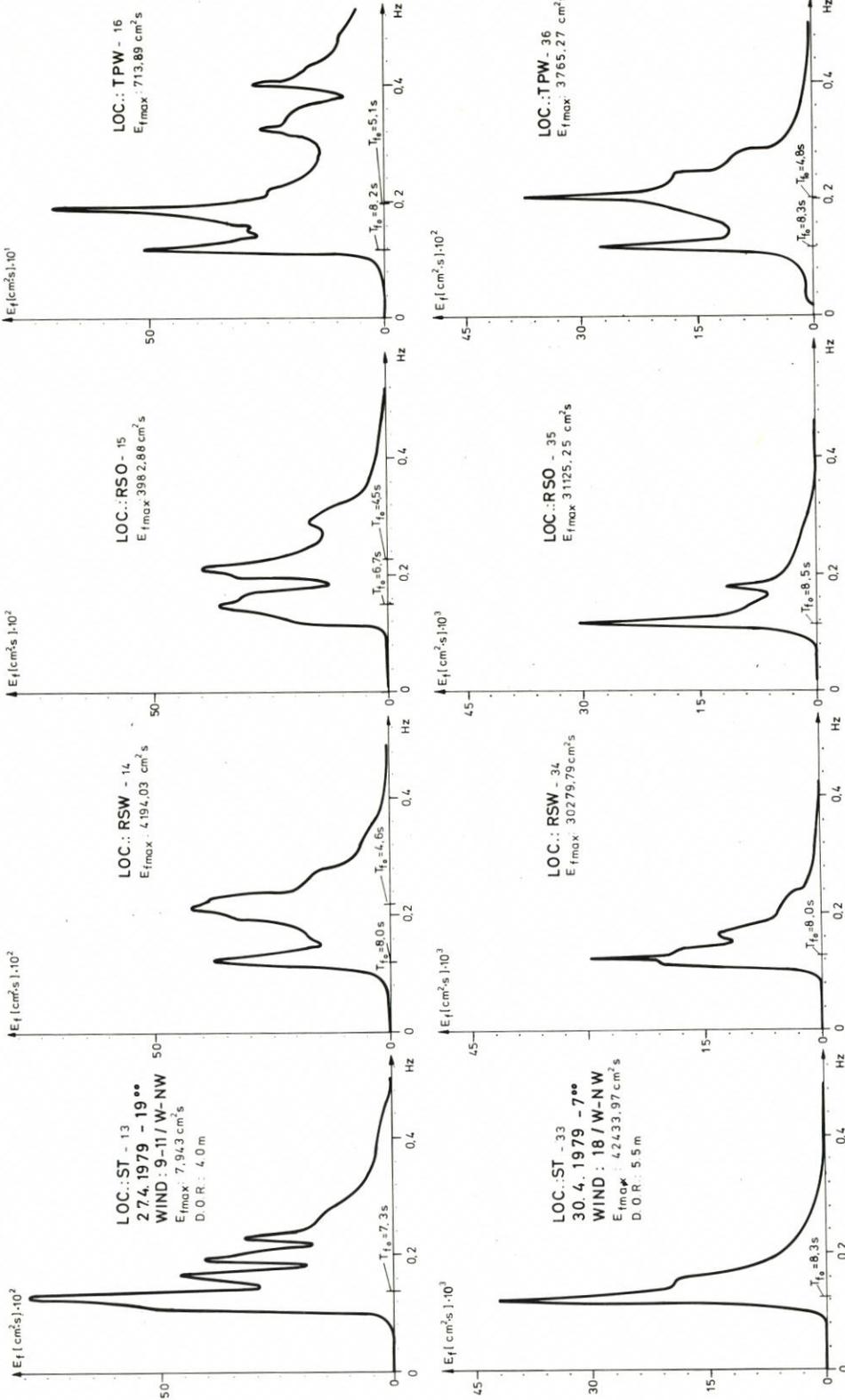


GANGLINIEN VON WIND, WASSERTIEFE UND  $H_{1/3}$



GANGLINIEN VON  $H_{MAX}$  UND PEAK - PERIODE

Abb. 5.3 Ganglinien der Messung vom 27./30. 4. 79



## ENERGIESPEKTREN IM WESERÄSTUAR

Abb. 5.4 Spektren Nr. 13-16 und 33-36

Bei relativ jungem Seegang bei Windstärken um 18 m/s ist zwar bei ST schon ein klar ausgebildetes Spektrum zu erkennen (Abb. 5.4). Bei RSO' und RSW sind Anteile der örtlichen Windsee noch im Ansatz zu sehen. Langperiodische See läuft auch bis TPW, wird aber dort wegen der geringen Höhe und des relativ starken Windes von der örtlichen Windsee überlagert, in der auch der größere Energieanteil steckt.

BÜSCHING (1978) stellte bei der Diskussion von Spektren bei Sylt fest, daß die Wellenkomponenten im max. Energiebereich sehr stabil sind. Hier nimmt zwar die Energiedichte von ST nach TPW' erheblich ab, und das Dichtemaximum verschiebt sich auf einen anderen Frequenzbereich. Die Frequenz des langwelligen Teils bleibt jedoch ohne große Änderung erhalten.

Meßreihe vom 30. 4. 79 - 10.00 Uhr

Wind: 16 m/s W (zunehmend)

	$H_{1/3}$ [m]	$H_{max}$ [m]	$\bar{T}$ [s]	$T_{fo}$ [s]	$m_o$ [cm <sup>2</sup> ]	$E_{f\ max}$ [cm <sup>2</sup> · s]
ST	2,89	4,64	5,2	8,0	2 747	58 993
RSW	2,74	4,76	5,1	8,0	2 425	56 761
RSO'	2,64	4,30	4,8	7,5	2 405	46 936
TPW'	1,35	2,61	3,1	3,7	623	4 273

Die Spektren bei ST, RSW und RSO' zeigen fast gleiche Form (Abb. 5.5). Bei höheren Windgeschwindigkeiten und entsprechend höher überstautem Riff ergeben sich bei Wellenhöhen von  $H_{1/3} = 2,64$  bis 2,89 m im Bereich des Riffes (Roter Grund) kaum Energie- bzw. Höhenverluste.

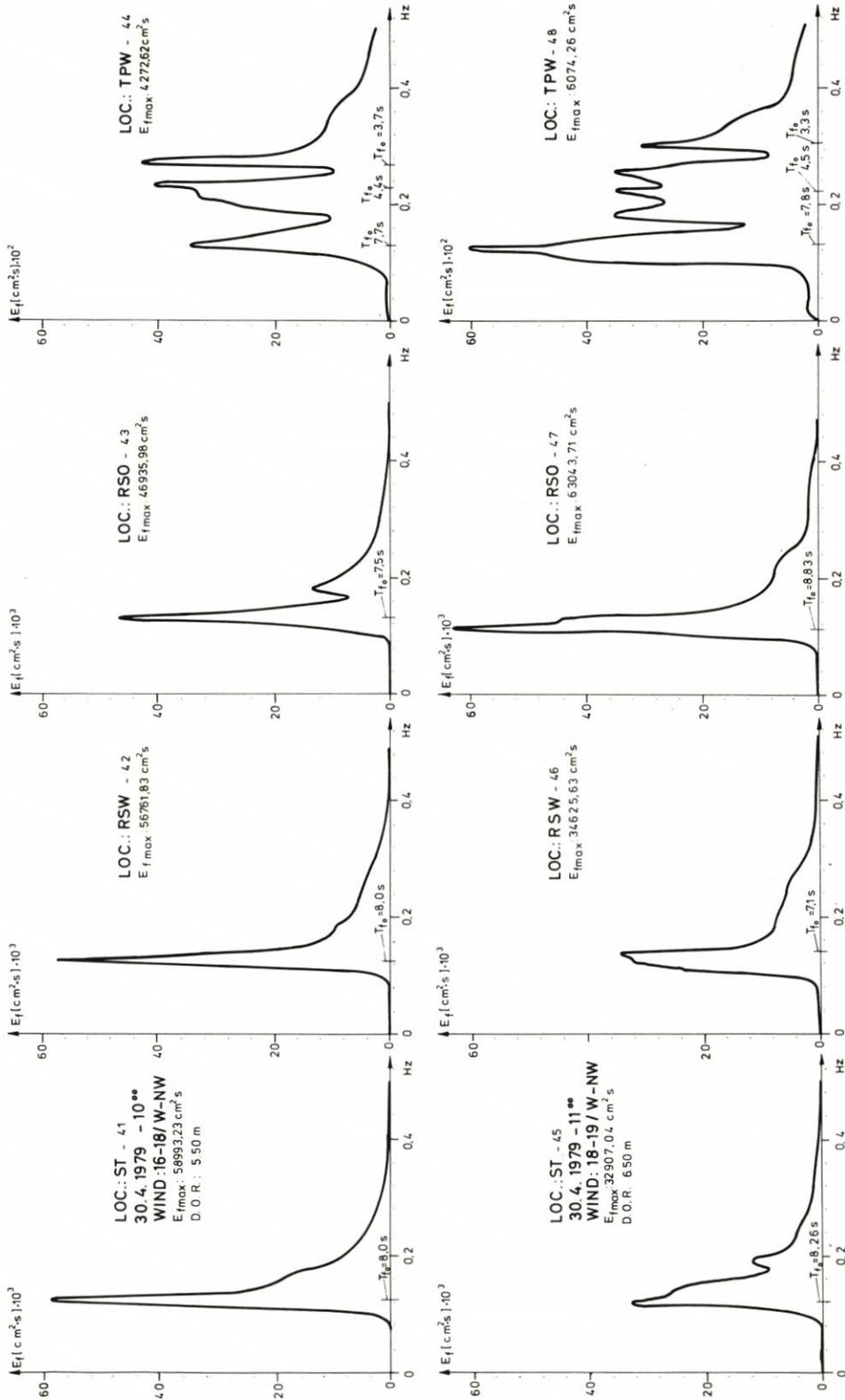
Bei RSO' ist wiederum eine geringe Abminderung der Peak-Periode festzustellen.

Abweichende Form zeigt jedoch TPW'. Fast gleichgroße Energieanteile ergeben sich bei den Peak-Perioden 7,7, 4,3 und 3,7 s. Der von draußen einlaufende Anteil ist hier klar zu erkennen. Schwieriger ist die Definition der beiden Wellenfelder mit geringeren Perioden. Hier könnte es sich um örtliche Windsee und ihre Reflexion an der steilen Unterwasserböschung der Tegeler Plate handeln. Möglich sind aber auch zusätzliche Refraktion und Diffraction, die zu sich kreuzenden Systemen führen. Die dreiteilige Form dieses Spektrums tritt während der untersuchten Meßreihe wiederholt auf.

Die Meßreihe vom 30. 4. 79 - 11.00 Uhr

Wind: 18,5 m/s - W (zunehmend)

	$H_{1/3}$ [m]	$H_{max}$ [m]	$\bar{T}$ [s]	$T_{fo}$ [s]	$m_o$ [cm <sup>2</sup> ]	$E_{f\ max}$ [cm <sup>2</sup> · s]
ST	2,65	4,05	5,0	8,3	2 358	32 907
RSW	2,62	4,59	5,0	7,1	2 282	35 625
RSO'	3,12	5,48	5,3	8,8	3 259	63 044
TPW'	1,46	2,52	3,4	7,8	755	6 074



ENERGIESPEKTREN IM WESERÄSTUAR

Abb. 5.5 Spektren Nr. 41-48

ist unmittelbar damit vergleichbar (Abb. 5.5). Die größeren Wellenhöhen bei RSW und RSO' sind auf den zeitlichen Vorsatz gegenüber ST um 20 bzw. 40' bei zunehmendem Wind zurückzuführen. Der Einfluß der örtlichen Windsee ist auch nach kurzer Einwirkdauer (Böen) schon größer als die Energieverluste, die auf dem Riff auftreten. Die spektrale Form wird jedoch kaum beeinflusst.

Auffällig ist wiederum die dreiteilige Form des Spektrums. Es ist nicht auszuschließen, daß es sich hier auch um zwei von draußen einlaufende Seegangssysteme handelt, die jeweils aus der Neuen Weser (RSW) und der Alten Weser stammen, wobei das aus der Alten Weser sicher stärker am Vorhang der Tegeler Plate verändert wird, als das in der tiefen Rinne. Der dritte Anteil ist örtlich entstandene Windsee, die mit geringeren Wellenhöhen und -perioden auftritt.

Meßreihe vom 30.4.79 - 19.00 Uhr

Wind: 15,5 m/s - WNW (abnehmend)

	$H_{1/3}$ [m]	$H_{max}$ [m]	$\bar{T}$ [s]	$T_{fo}$ [s]	$m_o$ [cm <sup>2</sup> ]	$E_{f\ max}$ [cm <sup>2</sup> · s]
ST	3,64	8,42	3,2	11,1	3 940	75 371
RSW	2,58	3,98	5,4	11,6	2 244	51 304
RSO'	2,39	3,57	5,9	8,8	1 966	30 213
TPW'	0,82	1,62	3,4	4,8	267	2 229

Bei abnehmendem Wind wird die klare Form des Spektrums selbst bei ST sofort gestört (Abb. 5.6). Offensichtlich ergeben sich bei großen Wellenhöhen im Bereich ST Beugungerscheinungen, die sich bei RSW noch nicht bemerkbar machen.

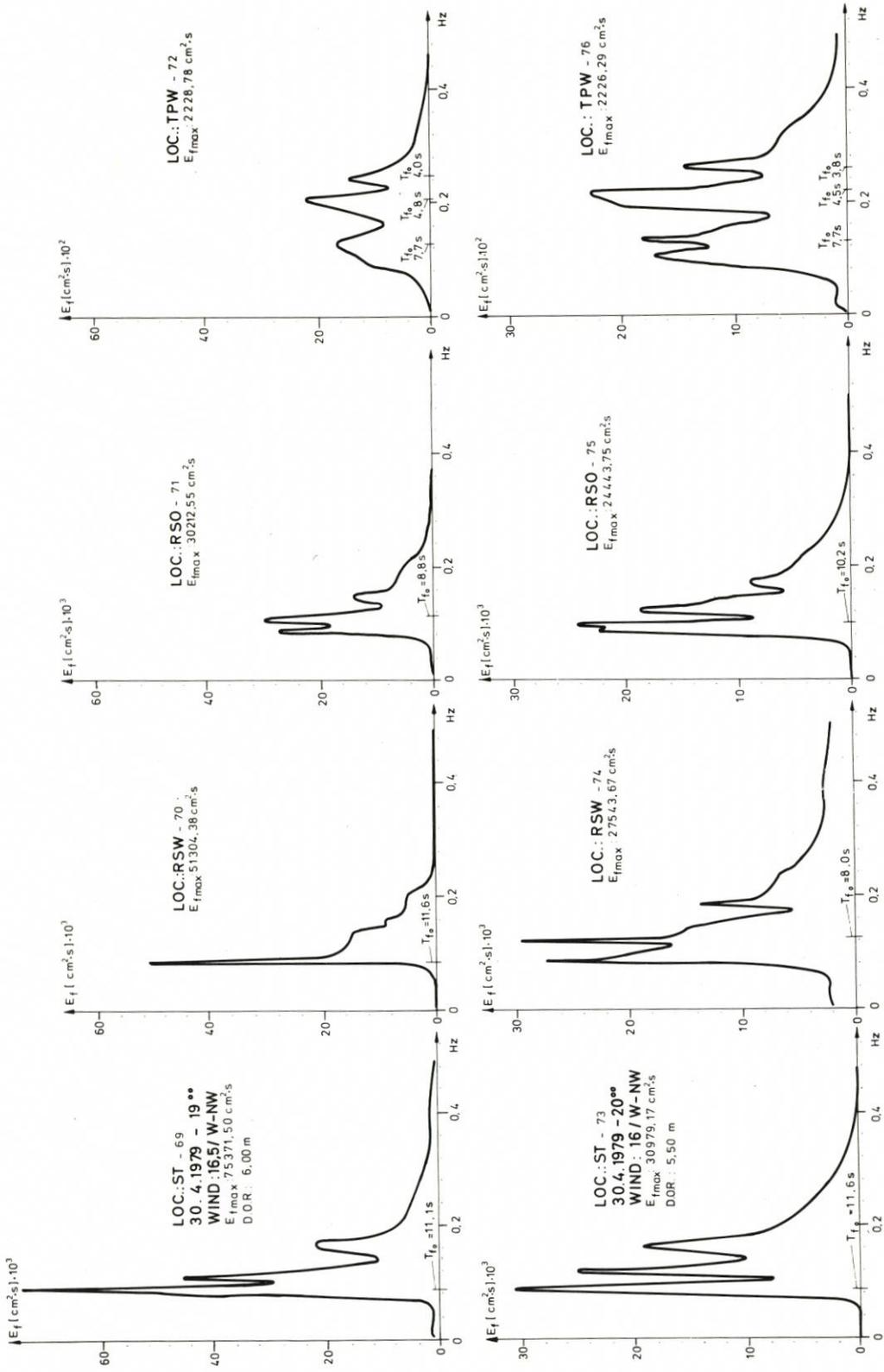
Die Dreiteilung des Spektrums bei TPW' besteht weiterhin. Wellenkomponenten hoher Periode setzen sich, jedoch unter Abschwächung, bis ins Innere des Ästuars fort.

Ähnlich sieht es bei der Meßreihe aus, die sich bei weiter nachlassendem Wind unmittelbar anschließt (Abb. 5.6).

Meßreihe vom 30.4.79 - 20.20 Uhr

	$H_{1/3}$ [m]	$H_{max}$ [m]	$\bar{T}$ [s]	$T_{fo}$ [s]	$m_o$ [cm <sup>2</sup> ]	$E_{f\ max}$ [cm <sup>2</sup> · s]
ST	2,56	4,40	5,2	11,6	2 412	30 979
RSW	2,43	3,57	5,4	8,0	2 060	27 643
RSO	2,37	3,75	5,4	10,2	1 949	24 443
TPW	0,91	1,43	2,8	4,5	322	2 226

Die nachlassende Energiezufuhr des schwächer werdenden Windes führt offensichtlich zum Zerfall des Spektrums im tiefen Wasser, wobei jedoch keine eindeutig voneinander trennbaren Systeme gesehen werden können. Die dreigeteilte Form bei TPW' bleibt nach ihrer Entstehung mit geringen Variationen während der gesamten Meßserie bestehen.



# ENERGIESPEKTREN IM WESERÄSTUAR

Abb. 5.6 Spektren Nr. 69-76

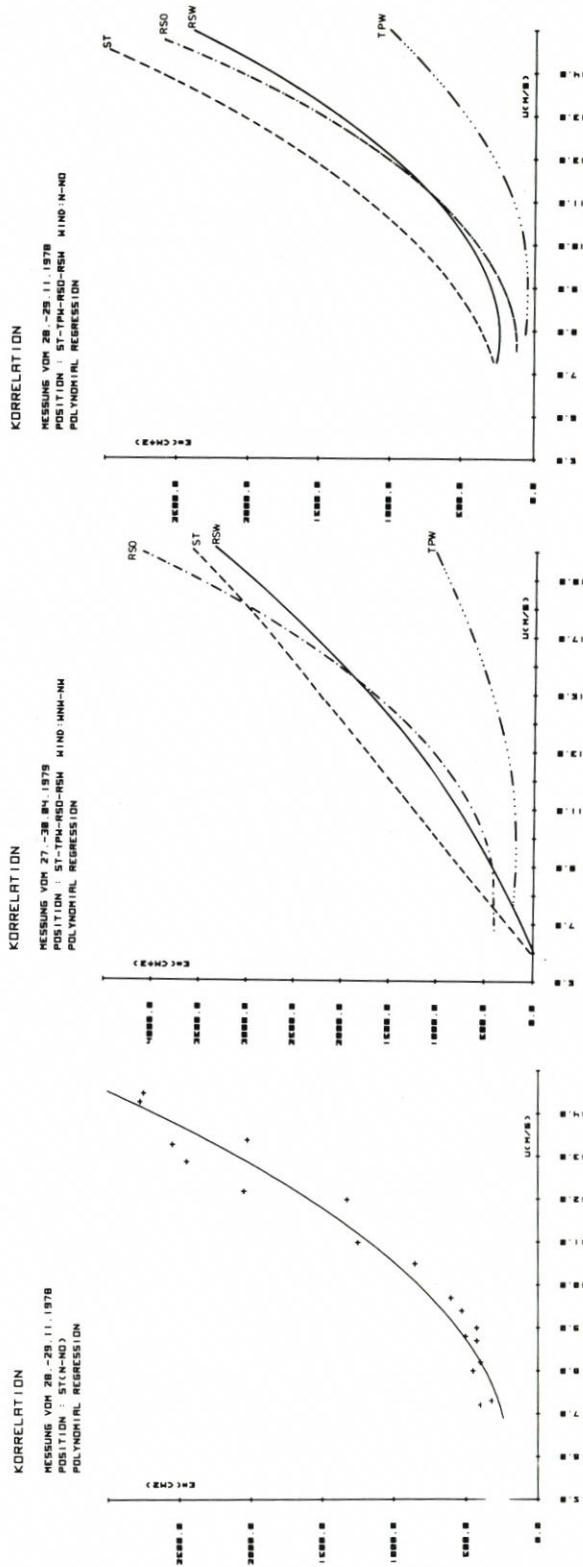


Abb. 5.7 Abhängigkeit der Gesamtenergie von der Windstärke

Mit Nachlassen des Windes erreichen auch die niederfrequenten Anteile nicht mehr das Innere des Ästuars. Schließlich macht sich schon bei RSW eine Abnahme der Peak-Periode bemerkbar. Ein unmittelbarer Zusammenhang zwischen der Größe der Energieabnahme von ST über RSW/RSO' nach TPW' und der Wassertiefe über dem „Roten Grund“ konnte nicht erkannt werden.

Entsprechend den Zusammenhängen zwischen der Gesamtenergie im Spektrum und der signifikanten Wellenhöhe  $H_{1/3}$  zeigt die Abb. 5.7 eine enge Abhängigkeit der Gesamtenergie von der Windgeschwindigkeit mit Korrelationskoeffizienten von  $R_{xy} = 0,92$  ./ 0,98. Dabei zeigt sich unter anderem, daß zwischen RSW und RSO' kaum Unterschiede im Anstieg der Gesamtenergie bestehen. Bei beiden Windrichtungen liegt die Energieaufnahme bei RSO' etwas höher. Für Planungen von Seebauwerken und für die Schifffahrt bedeutet das, daß großflächige Sandriffe bei Sturmweverlagen kaum Schutz für Bauwerke oder Anlagen irgendwelcher Art geben. Vielmehr können sich durch kreuzende und gegenseitig aufsteilende Wellensysteme zeitweise höhere Maximalwellen ausbilden als im Außengebiet.

### 5.3 Gesamtenergie und kennzeichnende Werte im Spektrum

In der Literatur findet man vielfach Angaben über die Energie, die im Seegang enthalten ist. Dabei wird häufig die Wellenenergie pro Wellenlänge und Einheitsbreite des Wellenkammes mit

$$E = \frac{1}{8} \gamma \cdot H^2 \cdot L$$

$$L = 1,56 T^2$$

$$\gamma = 1,025 \text{ Mp/m}^3 \text{ (NEU, 1970)}$$

oder die „gesamte Energie“ aus dem Energiespektrum mit

$$E = \frac{\rho \cdot g}{2} E^*$$

$$E = \int_0^{\infty} E(f) df = \text{Gesamtintensität}$$

angegeben. SVASEK (1965) gibt für die Wellenenergie pro Oberflächeneinheit

$$E^* = \frac{1}{8} \rho \cdot g \cdot H^2$$

an.

Hier scheint jedoch bezüglich der Definition der Gesamtenergie bzw. der Gesamtintensität im Zusammenhang mit dem Energiespektrum und der Anwendbarkeit auf praktische Verhältnisse noch gewisse Unklarheit zu herrschen. Das Energie- oder Powerspektrum als beschreibendes Element für die tatsächliche Wellenbewegung aus der Autokorrelation der Wasserspiegelauslenkungen wird, um in physikalischen Termen zu sprechen, als die Verteilung der Energiedichte über verschiedenen Frequenzen definiert, d. h., es gibt Auskunft über die potentielle Energie innerhalb eines engen Wellenfrequenzbereiches als Funktion der zugehörigen Frequenz  $f$ . Dabei ist die spektrale Energiedichte

$$S(\omega) = \frac{1}{2} \sum \frac{\Delta \omega}{\Delta \omega} a_i^2 / \Delta \omega$$

$$\omega = 2\pi f \text{ (Phasenwinkel)}$$

wenn man eine Zeitserie

$$\eta(t) = \sum_{i=1}^n \eta_i = \sum_{i=1}^n a_i \cos(\omega_i t + \varphi_i)$$

betrachtet.

Entsprechend ist die Energie für den gesamten Frequenzbereich proportional zu  $\bar{\eta}^2$  und wird auch als 0-tes Moment  $m_0$  der Energiedichtefunktion bezeichnet. SVASEK (1965) hat dazu einige für die Praxis anwendbare, übersichtliche Formeln zusammengestellt, die sich unmittelbar auf das Frequenzspektrum beziehen.

$$S(f) = 2 \int_0^{\infty} R(\tau) \cdot \cos 2\pi f \tau d\tau \quad (\text{FOURIER-Transformation})$$

Daraus kann die potentielle Energie einer Zeitserie abgeleitet werden mit

$$E_p = \rho \cdot g \cdot m_0 = \rho \cdot g \int_0^{\infty} S(f) df$$

wobei

$$m_0 = \int_0^{\infty} S(f) df$$

ist.

Die Gesamtenergie eines Wellenzuges ist dann

$$E_T = 2 E_p = 2 \rho \cdot g \cdot m_0$$

oder

$$E_T = 2 E_p = \frac{1}{8} \rho \cdot g \cdot H_s^2$$

was wiederum das H der Gleichung (S. 117) erläutert. Bei den hier vorliegenden Rechnungen wurde bei der Integration der Funktion  $S(f)$  jeweils der Teil des Spektrums abgeschnitten, der aus gerätetechnischen Gründen nicht eindeutig war. Wesentliche Verfälschungen der Gesamtenergie sind dabei nicht zu erwarten.

### 5.3.1 Signifikante Wellenhöhe $H_s$

Die signifikante Wellenhöhe  $H_s$  ergibt sich aus dem Spektrum zu

$$H_s = 4 \sqrt{m_0}$$

Diese Beziehung ist allgemein anerkannt. Dabei muß jedoch darauf geachtet werden, daß das  $m_0$ , das als 0-tes Moment des Energiespektrums oder Fläche unter der Energiedichtefunktion definiert ist, für eine irreguläre Wellenfolge gilt. Für den Ansatz

$$H_s = 4 \sqrt{m_0}$$

muß das aus dem Energiespektrum gewonnene  $m_0$  mit dem Faktor 2 versehen werden. Damit ist auch der z. B. bei SIEFERT (1974) erwähnte Begriff der „Gesamtintensität“

$$E^* = \int_0^{\infty} E(f) df$$

zu erklären, aus dem sich für ein enges Tiefwasserspektrum

$$H_{1/3} = 2,832 \cdot \sqrt{E^*}$$

ergibt.

$$E^* = 2 m_0 = 2 \int_0^{\infty} E(f) df$$

oder

$$H_{RMS} = \frac{H_{1/3}}{4} = \sqrt{m_0}$$

Die Gleichung  $H_{1/3} = 2,832 \cdot \sqrt{E^*}$  gilt nach LONGUET-HIGGINS (1952) für ein schmales Tiefwasserspektrum. Bei den im Weserästuar ermittelten Spektren konnte jedoch nicht vorausgesetzt werden, daß diese Beziehungen so eng sind, daß sie für jeden untersuchten Bereich gelten. Abhängig von der Breite des Spektrums, von der Anzahl der gleichwertigen „Peaks“ und der Lage der Hauptenergieanteile war eine Veränderung des Verhältnisses  $H_{1/3}/H_s$  zu erwarten.

Außerdem weichen alle geglätteten oder „parametrisierten“ Spektren mehr oder weniger stark von den tatsächlichen ab. Zur Erläuterung muß hier hinzugefügt werden, daß die Integration der Funktion

$$S(f) df$$

an dem mit dem „Hamming-Fenster“ geglätteten Spektrum durchgeführt wurde.

Abhängig von der Form der Spektren ergibt sich aus einer Serie von 150 20'-Messungen dann auch das Verhältnis der aus den Spektren berechneten

$$H_s = 4 \sqrt{m_0}$$

und der statistisch gewonnenen  $H_{1/3}$  zu  $\frac{H_{1/3}}{\sqrt{m_0}} = b$  (Beurteilungsfaktor für die Spektralform)

zu

$$b = 3,95$$

Außenästuar (ST)

$$b = 3,76$$

Riffbereich (RSW/RSO')

$$b = 3,56$$

Inneres Ästuar (TPW'/TPO/TPN)

Für die Hauptwindrichtung W bis NW wurden für eine Meßreihe die statistisch ermittelten signifikanten Wellenhöhen  $H_{1/3}$  mit den aus den Spektren errechneten verglichen.

Es ergaben sich für diese Windrichtung zunächst geringe Abweichungen beider Werte voneinander, die mit zunehmender Wellenhöhe größer werden, wie Abb. 5.8 zeigt. Dabei scheint bei dieser Meßreihe rein optisch eine quadratische Abhängigkeit beider Werte gegeben, obwohl die Korrelationskoeffizienten sich kaum unterscheiden.

Die Zusammenhänge sind selbst bei TPW' sehr eng, abhängig jedoch auch von den verhältnismäßig geringen Wellenhöhen  $H_{1/3}$ , die dort gemessen werden konnten. WILSON und

BAIRD (1972) haben bei Messungen mit einer wave-rider-Boje vor Nova Scotia im Atlantik bei ca. 37 m Wassertiefe Zusammenhänge zwischen  $H_s$  und  $H_{1/3}$  mit  $R_{xy} = 1,00$  bei Anwendung der z-u-c-Auswertemethode erzielt. Wenn auch der hier ermittelte Zusammenhang  $R_{xy} =$

	Gleichung ( $H_{1/3} = X$ [cm])	$R_{xy}$
ST	(1) $H_s = 0,942 X + 14$	0,994
	(2) $H_s = -0,0014 X^2 + 1,55 X - 44$	0,997
RSW	(1) $H_s = 1,047 X - 2$	0,999
	(2) $H_s = -0,00004 X^2 + 1,07 X - 4$	0,999
RSO'	(1) $H_s = 1,015 X + 7$	0,999
	(2) $H_s = -0,00029 X^2 + 1,15 X - 5$	0,992
TPW'	(1) $H_s = 1,088 X - 1$	0,998
	(2) $H_s = -0,000089 X^2 + 1,11 X - 2$	0,998

(Angaben in cm)

0,992 ./ 0,999 relativ gut ist, muß man mit Abweichungen von einzelnen Werten bis zu  $\pm 0,15$  m rechnen, die sich jedoch in der Korrelation relativ gut verteilen.

Entsprechend der Lage der Station kann der o. a. Beurteilungsfaktor

$$b = \frac{H_{1/3}}{\sqrt{m_0}}$$

bei Ermittlung von signifikanten Höhen aus dem Spektrum angesetzt werden.

Die aus dem Spektrum ermittelten Höhen bei ST werden mit zunehmendem Betrag kleiner als die statistischen  $H_{1/3}$ -Werte. Leider liegen keine spektral auswertbaren Messungen mit höheren Wellen vor, um diesen Trend weiter zu verfolgen. In den anderen Fällen kann eine lineare Abhängigkeit gewählt werden. Für kleinere Wellenhöhen bis  $H_{1/3} \leq 2$  m kann  $H_s = H_{1/3}$  gesetzt werden.

Die Ergebnisse für die anderen Bereiche, auch für andere Windrichtungen, sind bei BARTHEL (1980) zu finden. Zusammenfassend kann dazu gesagt werden, daß bei Windrichtungen, die Seegang quer zur Hauptrinnenrichtung erzeugen, ein kaum überschaubares Wellendurcheinander entsteht. Dementsprechend sind die statistischen Verhältnisse im Seegang im Vergleich zu den spektral ermittelten Werten starken Schwankungen unterworfen.

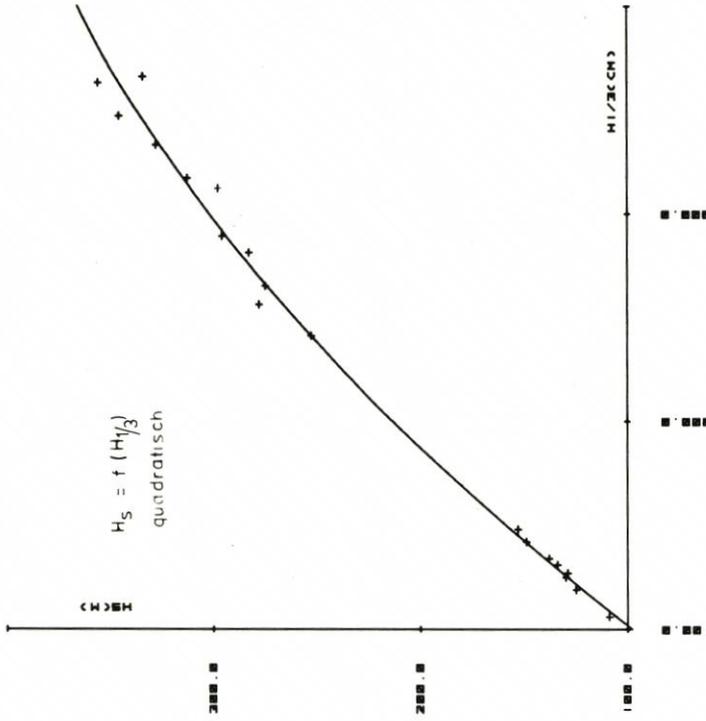
### 5.3.2 Kennzeichnende Perioden und Peak-Periode

Bei idealen Spektrformen, die z. B. nach der PIERSON-MOSKOWITZ- oder der JONSWAP-Form parametrisiert werden können, gibt es im allgemeinen auch eine gute Zuordnung der statistisch ermittelten Perioden zu der des Spektrums, um die der Hauptteil der Energie konzentriert ist. Eine Zuordnung ist jedoch dann schwierig, wenn, wie es weiter oben gezeigt wurde, mehrere einander überlagerte Wellensysteme auftreten. Nach KAMPHUIS (1969) beträgt das Verhältnis

$$\frac{T_{fo}}{T} = 1,4$$

KORRELATION

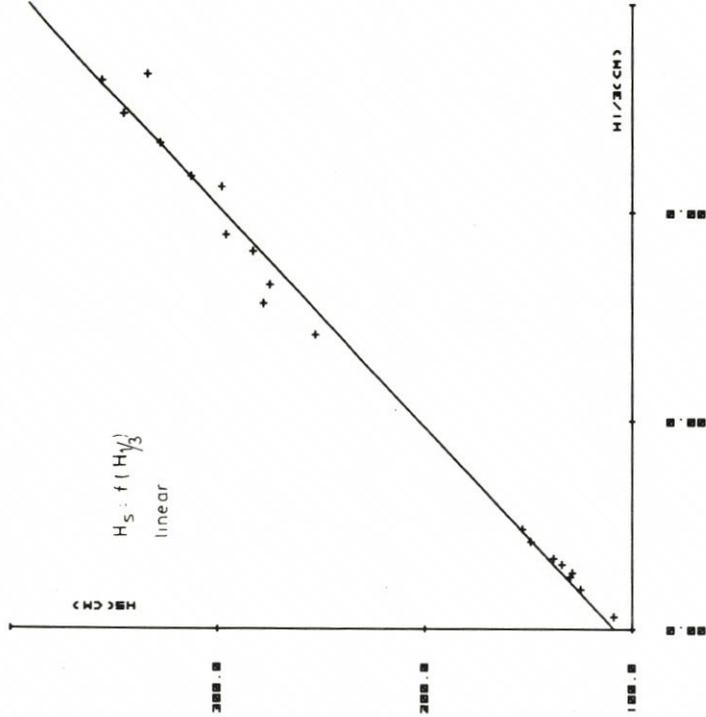
MESSUNG VOM 27.-30.04.1979  
 POSITION : ST/NM-WIND  
 POLYNOMIAL REGRESSION



DEGREE REGRESSION = 2  
 RXY = 0.997452697  
 Y = -1.31879E-03 X^2 + 1.550802365 X -44.13326625

KORRELATION

MESSUNG VOM 27.-30.04.1979  
 POSITION : ST/NM-WIND  
 POLYNOMIAL REGRESSION



DEGREE REGRESSION = 1  
 RXY = 0.994273511  
 Y = 0.942803050 X + 14.6475030

Abb. 5.8  $H_s = f(H_{1/3})$  (lineare und quadratische Korrelation)

NEUMANN (1953) gibt eine Beziehung

$$\frac{T_{fo}}{\bar{T}} = 1,15$$

an.

Mehr als bei den Wellenhöhen war bei den hier berechneten Spektren fraglich, ob zwischen Peak-Periode und den kennzeichnenden Perioden ein allgemein gültiges Verhältnis zu erkennen war und ob bereichsspezifische Eigenheiten in dieser Beziehung zum Ausdruck kommen.

Die Ergebnisse sind beispielhaft für die Station ST in der folgenden Tabelle aufgeführt. Dabei sind nur Messungen aus einer Meßreihe mit Wind aus W bis NW verglichen:

Station		Gleichung	R <sub>xy</sub>
ST	$\bar{T}$	(2) = - 0,057 T <sub>fo</sub> <sup>2</sup> + 1,38 T <sub>fo</sub> - 2,9	0,85
		(1) = 0,33 T <sub>fo</sub> + 1,8	0,81
	T <sub>H1/3</sub>	(2) = - 0,05 T <sub>fo</sub> <sup>2</sup> + 1,3 T <sub>fo</sub> - 1,2	0,82
		(1) = 0,45 T <sub>fo</sub> + 2,6	0,80

Die Einzelergebnisse für alle anderen Stationen sind bei BARTHEL (1980) aufgeführt.

Erwartungsgemäß sind die Zusammenhänge bei der Station TPW' im inneren Ästuar am schlechtesten. Auch ein Versuch, die Peak-Periode des Spektrumanteils mit dem höchsten Energieinhalt zu korrelieren, ergab eher schlechtere Ergebnisse. Jedoch sind die Zusammenhänge zwischen

$$T_{H1/3} \text{ und } T_{fo}$$

besser als die zwischen

$$\bar{T} \text{ und } T_{fo}$$

Für die Bestimmung einer mittleren und kennzeichnenden Periode aus einem Spektrum mit einem häufig auftretenden T<sub>fo</sub> = 8 s ergeben sich für die einzelnen Bereiche die folgenden Werte:

Bereich	$\frac{T_{fo}}{\bar{T}}$	$\frac{T_{fo}}{T_{H1/3}}$
Tiefwasser	1,8	1,31
Riffbereich	1,67	1,18
Platenbereich/Rinnenrandlage	2,71	1,75

Das hohe Verhältnis  $\frac{T_{fo}}{\bar{T}} = 2,71$  bei TPW' charakterisiert den weiten Frequenzbereich von häufig mehreren Seegangssystemen. Die o. a. Werte aus der Literatur scheinen in jedem Fall für einen Ästuarbereich zu niedrig angesetzt. Auch die von RYE (1977) angegebene Beziehung

$$\bar{T} = \frac{m_0}{m_1} \quad (m_0, m_1 = \text{Momente des Spektrums})$$

wurde für 12 Meßreihen überprüft. Die Abweichungen des aus dem Spektrum errechneten

$$\bar{T} = \frac{m_0}{m_1}$$

gegenüber dem aus der Messung ermittelten Periodenmittelwert betragen bis zu 100%.

Die o. a. Werte wurden nachträglich für weitere Meßreihen bei Wind aus verschiedenen Richtungen untersucht. Eine Verbesserung der angegebenen Mittelwerte scheint danach nicht notwendig zu sein, wenngleich auch hier das bei den Höhen Gesagte zutrifft.

Die Ergebnisse der Korrelationsrechnungen sind bei BARTHEL (1980) aufgeführt.

#### 5.4 Energieverluste beim Einlaufen des Seegangs in das Ästuar

##### 5.4.1 Abnahme der kennzeichnenden Höhe und Gesamtenergie

Beim Einlaufen eines oder mehrerer Seegangssysteme in ein Ästuar entsteht ein je nach Windstärke und -richtung mehr oder weniger komplexes Bild von Wellen verschiedener Richtung und Größe, die sich nur schwer nach Herkunft und weiterem Verhalten ordnen lassen. Durch häufige Refraktion an den oft sehr steilen Unterwasserböschungen der großen Barren im Riffgebiet, z. T. durch Diffraktionserscheinungen nach Passieren von Rinnen und vor allen Dingen durch Energieverluste beim Überlaufen von Flachwassergebieten (Brandung), nehmen die Höhen mehr oder weniger stark ab. Einflüsse, wie kurzfristiger Starkwind und alternierende Tidedrömungen, komplizieren das Geschehen. So kann man zunächst nur versuchen, an Hand der auf den einzelnen Stationen gewonnenen Meßwerte Bezüge zwischen untersuchten Bereichen des Ästuars herzustellen. Dabei wurden hauptsächlich die Meßreihen vom 27./30. 4. 79 (Abb. 5.3) und vom 10./11. 12. und 14., 17. und 18. 12. 79 (Abb. 5.9 und 5.10) auf einen Bezug der kennzeichnenden Wellenhöhen untereinander untersucht. Es ergibt sich folgendes Bild:

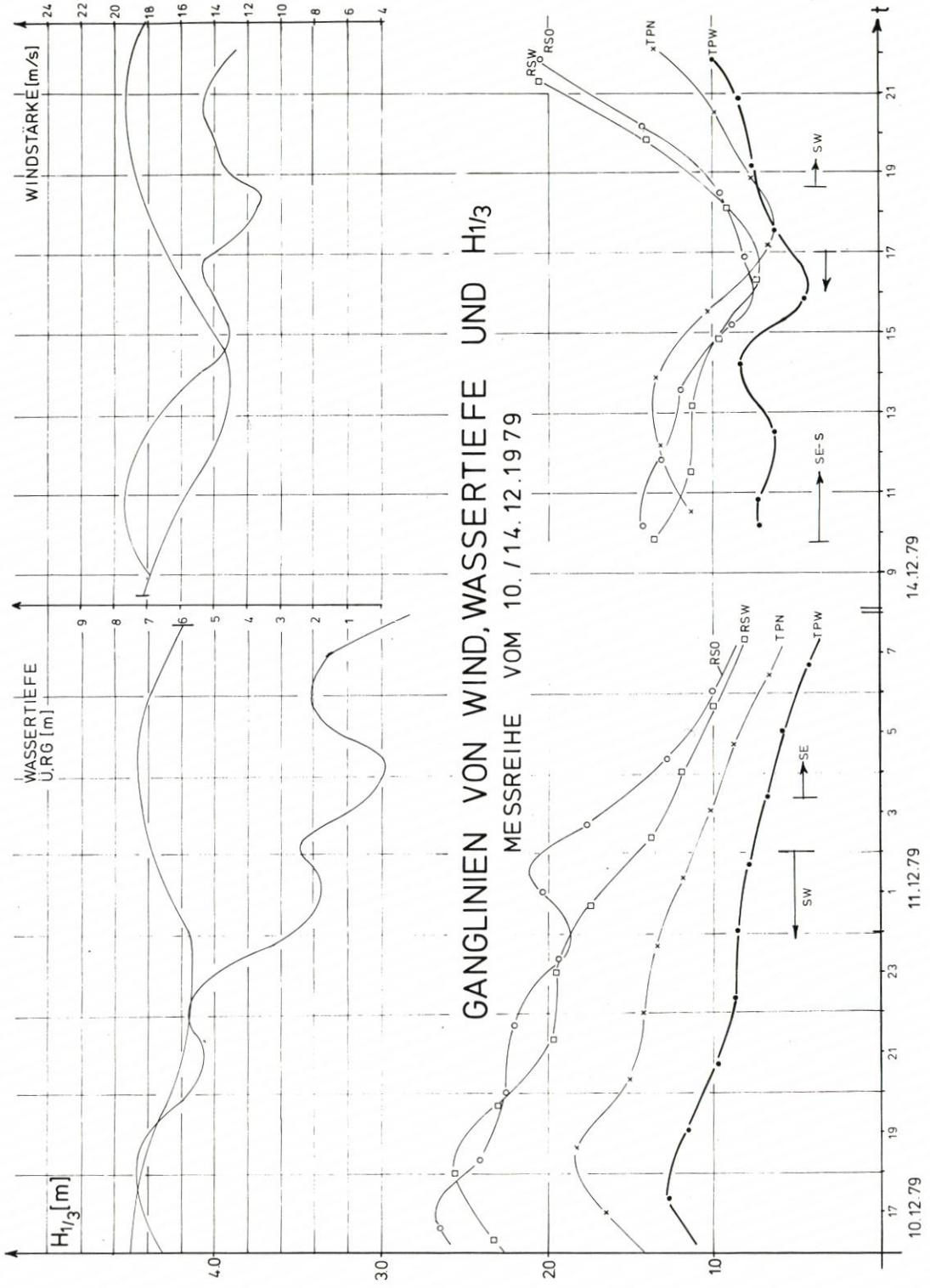
Der aus der Nordsee frei einlaufende Seegang erreicht die Station ST, sofern nicht ungewöhnliche Höhen > 15 m bei Sturm vorkommen, ohne Grundberührung und andere Einflüsse. Erste Veränderungen sind auf dem ausgedehnten Riff des Roten Sandes/Roten Grundes zu erwarten, hinter dem, praktisch in Leelage, die Station RSO und an dessen westlicher Flanke, aber in tiefem Wasser, RSW liegt. Bei beiden Stationen ist veränderter Seegang zu erwarten. Abb. 5.11 zeigt die Abhängigkeiten

$$\Delta H_{1/3 \text{ ST-RSW}} = f(H_{1/3 \text{ ST}})$$

und  $\Delta H_{1/3 \text{ ST-RSO}} = f(H_{1/3 \text{ ST}})$

Unabhängig von der Wassertiefe über dem Riff entsteht hier ein Punkthaufen, der jedoch durch eine eindeutige Linie nach oben begrenzt werden kann. Offensichtlich lassen sich überschneidende Einflüsse hier keine klare Abhängigkeit zu. Dabei wurden alle Werte beider Meßreihen berücksichtigt. Der Übersichtlichkeit halber sind nur die Werte vom 27./30. 4. 79 aufgetragen.

Beim weiteren Verlauf in das enger werdende Ästuar konnten gute Abhängigkeiten zwischen RSO bzw. RSW und TPW festgestellt werden (Abb. 5.12). Dabei nimmt die



GANGLINIEN VON WIND, WASSERTIEFE UND  $H_{1/3}$   
MESSREIHE VOM 10./14.12.1979

Abb. 5.9 Ganglinien der Messung 10./11.12.79

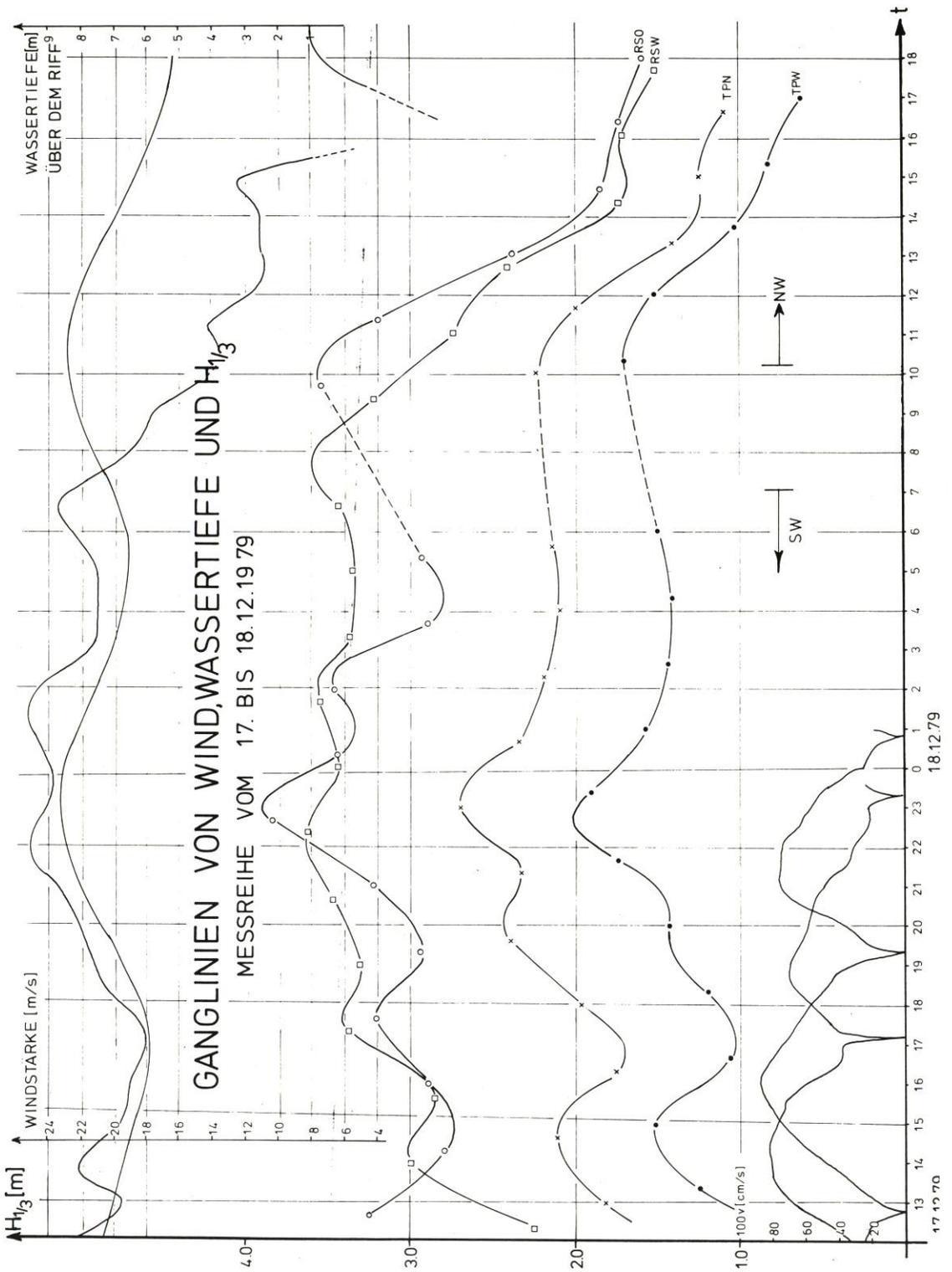


Abb. 5.10 Ganglinien der Messung 14./18. 12. 79

Wellendämpfung zwischen RSW und TPW mit zunehmender Höhe ab, ein Zeichen für die direkte Laufverbindung in der tiefen Rinne. Eine Abhängigkeit der Form

$$\frac{H_{1/3\ ST}}{H_{1/3\ RSW}} = f \left( \frac{H_{1/3\ ST}}{d} \right)$$

wobei  $d$  die Wassertiefe über dem Flachwasserbereich ist, besteht nur zwischen ST und TPW, jedoch in linearer Form (BARTHEL, 1980). Eine exponentielle Funktion, wie sie z. B. NIE-MEYER (1979) bei Messungen vor und hinter dem Norderneyer Riff gefunden hat, konnte hier nicht bestätigt werden. Die gemittelten Ergebnisse der o. a. Meßreihe enthält Abb. 5.13; sie zeigt die prozentuale Höhenabnahme im Untersuchungsgebiet.

Während der Meßreihe vom 10. bis 18. 12. 79 fiel die Station ST aus. Dafür war zufällig an der seewärtigen UW-Böschung der Tegeler Plate die Station TPN zu Versuchszwecken in Betrieb und konnte während der gesamten Meßreihe zur Verdichtung des Netzes mit abgefragt werden. Die Ergebnisse der Höhenvergleiche sind bei BARTHEL (1980) dargestellt.

Für insgesamt drei verschiedene Windrichtungen wurden die unmittelbar mit den signifi-

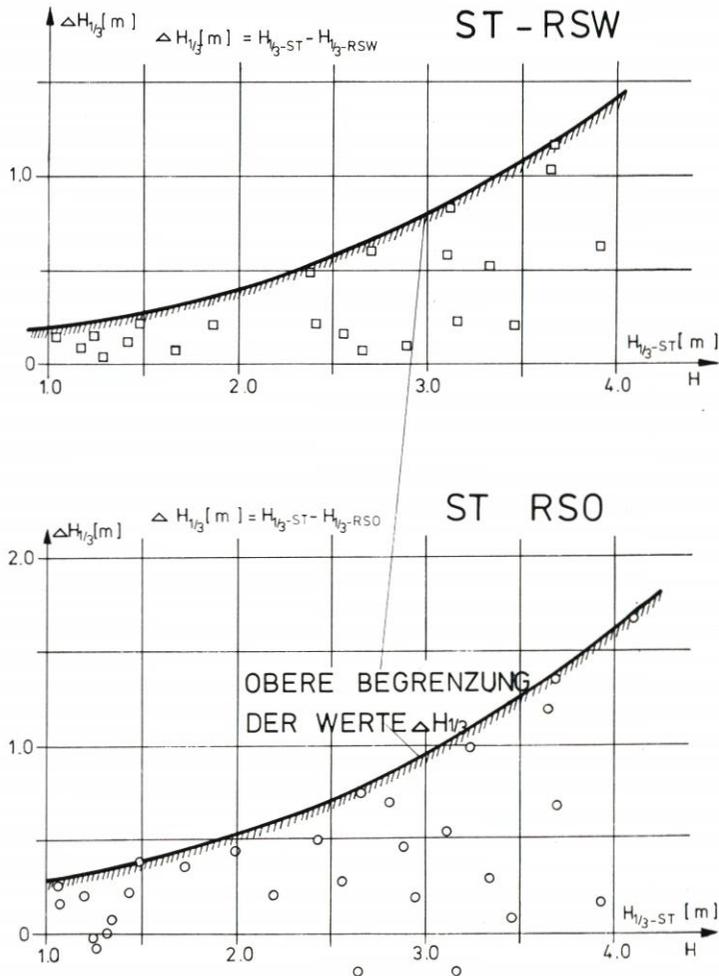
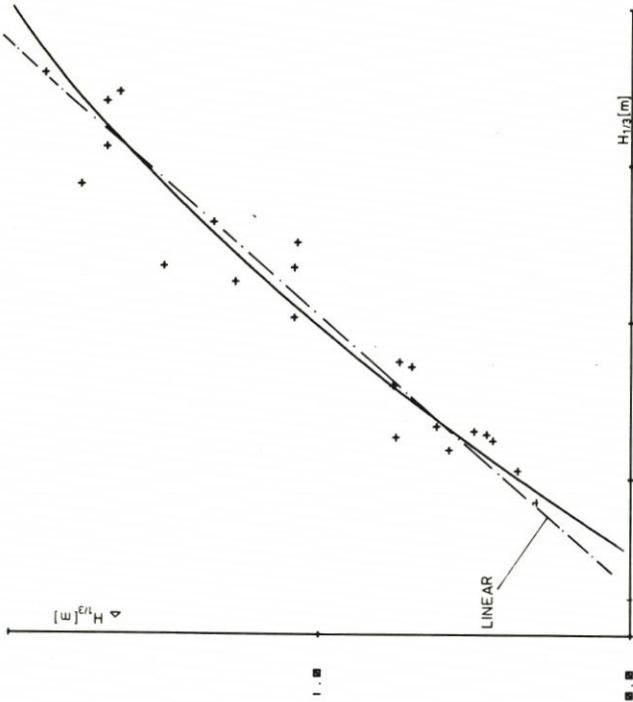


Abb. 5.11 Obere Grenzen der Abhängigkeit  $\Delta H_{1/3} = f(H_{1/3})$  (ST-RSW und ST-RSO)

KORRELATION RSO → TPW

POLYNOMIAL REGRESSION



$$\Delta H_{1/3}(3-4) = -0.06 H_{1/3}^2 + 0.84 H_{1/3} - 0.42$$

Rxy = 0.965  
Rxy' = 0.963

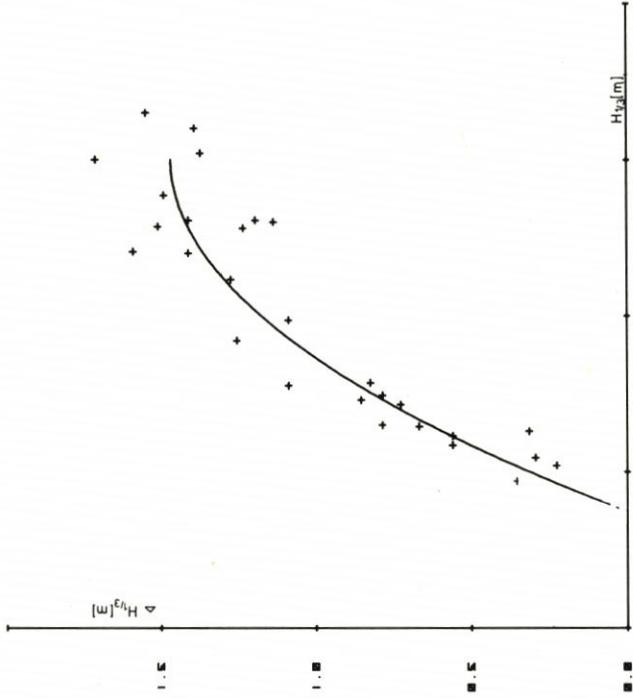
LINEARE ABHÄNGIGKEIT

DEGREE REGRESSION = 2  
RXY = 0.96522219  
Y = -0.0659579935 X + 0.841661744 X - 0.423387249

(3) = RSO  
(4) = TPW

KORRELATION RSW → TPW

POLYNOMIAL REGRESSION



$$\Delta H_{1/3}(2-4) = 0.29 H_{1/3}^2 + 1.76 H_{1/3} - 1.15$$

Rxy = 0.95

DEGREE REGRESSION = 2  
RXY = 0.945513178  
Y = -0.292364193 X + 1.75878859 X - 1.147174489

(2) = RSW  
(4) = TPW

Abb. 5.12  $\Delta H_{1/3}$  (RSO-TPW; ST-TPW)

kanten Höhen zusammenhängenden spektralen Energieinhalte nach verschiedenen Kriterien untersucht und über der Längsachse des Untersuchungsgebietes aufgetragen (Abb. 5.14). Die Aufteilung in verschiedene Wasserstände wirkt sich besonders für die Station RSO' aus, was

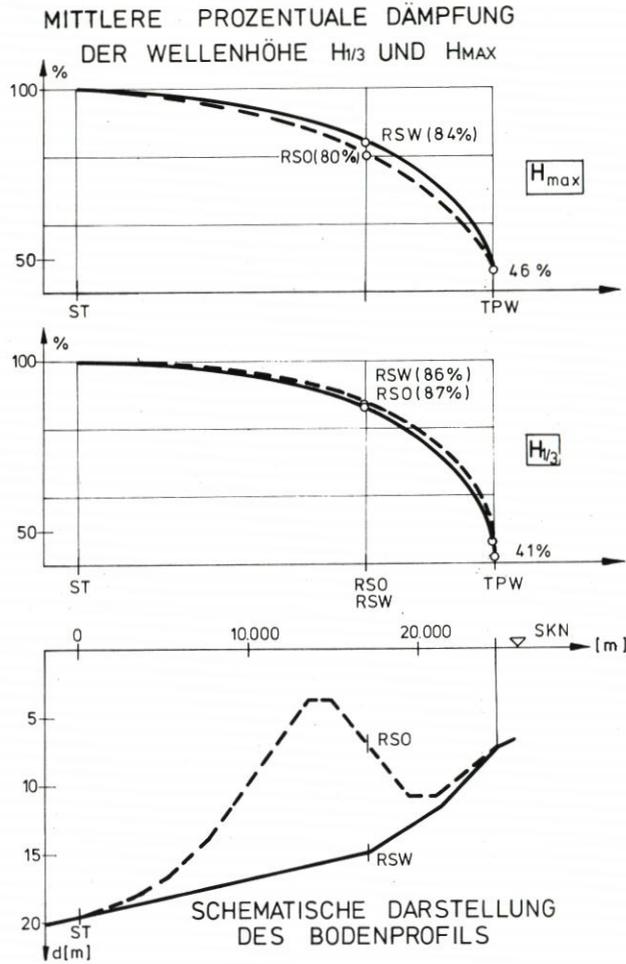


Abb. 5.13 Mittlere prozentuale Dämpfung der Wellenhöhen  $H_{1/3}$  und  $H_{max}$

bei der Mittelung der prozentualen Höhenabnahme nicht zum Ausdruck kam. Offensichtlich bietet bei größeren Wellenhöhen (und damit größerem Energieaufkommen) das Riff keinen Schutz mehr. Bei bestimmten Wasserständen kommen in der „Leelage“ bei RSO' höhere Energiebeträge vor als in der „Ausgangsposition“ bei ST. Hier spielen wahrscheinlich starke Refraktionserscheinungen eine Rolle. Für niedrige Wasserstände bis SKN + 1 m nimmt die im Meßbereich durchlaufende Wellenenergie (hier als spektrale Energie  $m_o = \int S(f) df$  aufgefaßt) von ST bis RSW/RSO um rd. 23 % ab.

$$E_{RSW/RSO} = 0,77 E_{ST}$$

# PROZENTUALE ABNAHME DER SPEKTRALEN ENERGIE

Bei verschiedenen Windrichtungen und Wasserständen im Weserästuar

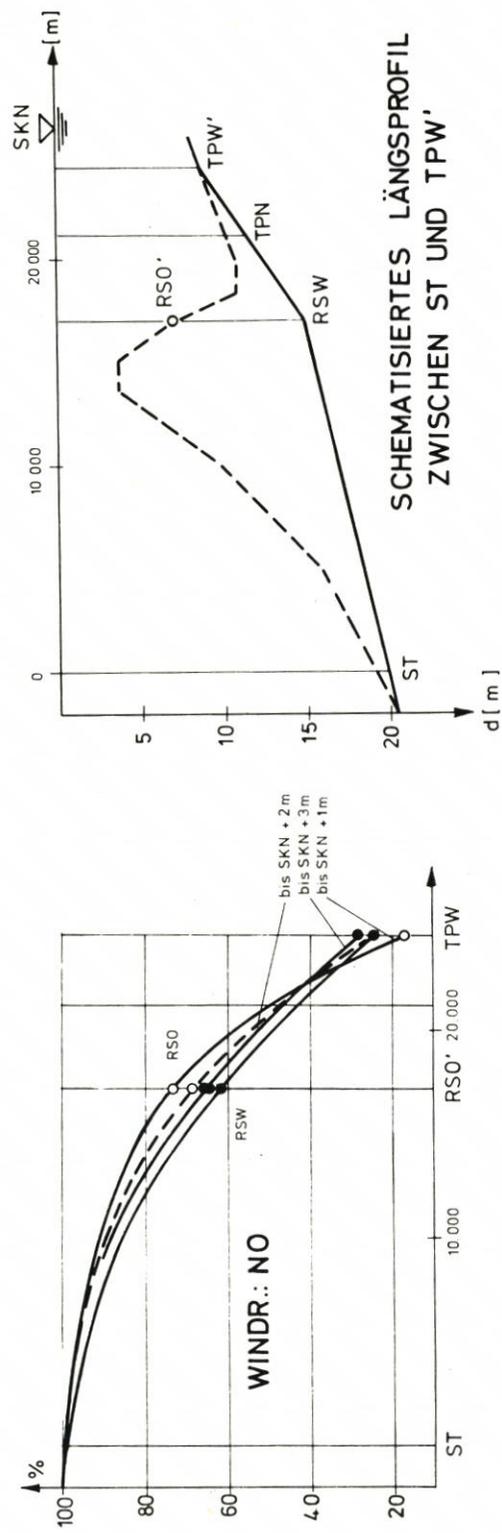
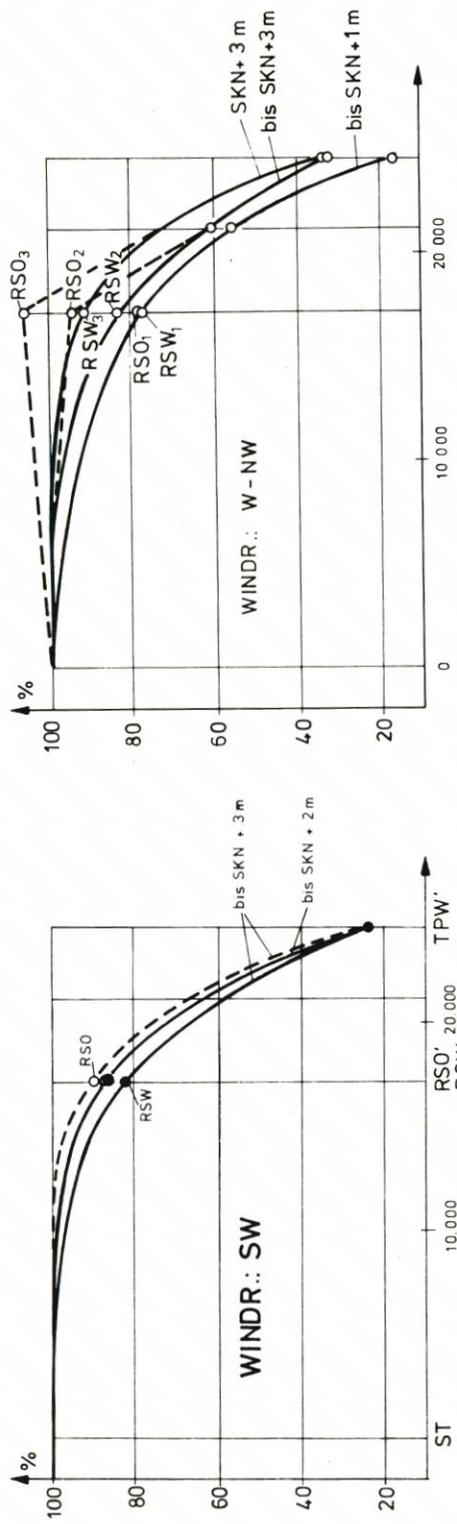


Abb. 5.14 Prozentuale Abnahme der Wellenenergie

Im Bereich der Platen erst erfolgt die hauptsächliche Energieumwandlung um weitere 21 % bis zum seewärtigen Rand der Platen. Durch Beugung, Reibung und Reflexion schließlich ist

bzw.

$$\begin{aligned} E_{TPW} &= 0,17 E_{ST} \\ E_{TPW} &= 0,22 E_{RSW/RSO} \end{aligned}$$

Bei größerer Überstauung des Ästuars ( $> SKN + 3 \text{ m}$ ) ist

$$\begin{aligned} E_{RSW} &= 0,91 E_{ST} \\ E_{RSO} &= 1,06 E_{ST} \\ E_{TPW} &= 0,24 E_{ST} \\ E_{TPW} &= 0,26 E_{RSW} \end{aligned}$$

Entsprechend verhalten sich die kennzeichnenden Wellenhöhen.

Bei Änderung der Windrichtung ergeben sich bei RSW bis RSO etwa gleiche prozentuale Energieverluste. Bei SW-Wind laufen längere Wellen küstenparallel in das Ästuar ein und werden dort von örtlich entstandenem Seegang überlagert. Geringere Windstärken lassen nur örtlichen Seegang entstehen, so daß von einer Energieumwandlung bzw. Energieverlusten kaum gesprochen werden kann. Bei nordöstlichen Winden liegt RSW im Schatten der Riffe und erhält dementsprechend geringere Energieanteile. In beiden Fällen liegt der Anteil bei TPW zwischen 17 bis maximal 28 %.

NO-Wind:

$$\begin{aligned} E_{RSW} &= 0,61 \cdot 0,66 E_{ST} \\ E_{RSO} &= 0,66 \cdot 0,73 E_{ST} \\ E_{TPW} &= 0,17 \cdot 0,28 E_{ST} \end{aligned}$$

Bei den bei Starkwindlagen im Weserästuar vorkommenden Wellenhöhen (es wurden bei diesen Meßreihen bis zu 10,20 m Maximalhöhe bei ST gemessen) wirkt sich der Riffgürtel vor der Wesermündung als schützende Barriere kaum noch aus. Erst in den sich verengenden Rinnen und am seewärtigen Hang der Platen findet eine starke Energieumwandlung und damit Höhenreduzierung bis zu 84 % statt.

#### 5.4.2 Energietransformation

Bei der Diskussion der Anlagen 5.4 bis 5.6 wurde bereits festgestellt, daß sich zwar die Peak-Frequenzen bei der Annäherung an Flachwassergebiete nur wenig ändern (s. auch BÜSCHING, 1978), daß aber die zu gewissen Frequenzbereichen gehörenden Energieanteile sich verschieben können. Daher wurden Energiespektren der Meßreihe vom 27./30. 4. 79 bei W bis NW-Wind in dieser Hinsicht noch einmal systematisch untersucht. Es erfolgte eine generelle Einteilung in Frequenzbereiche  $< 0,1 \text{ Hz} \hat{=} > 10 \text{ s}$ , von  $0,1 \text{ bis } 0,25 \text{ Hz} \hat{=} 10 \text{ bis } 4 \text{ s}$  und  $> 0,25 \text{ Hz} \hat{=} < 4 \text{ s}$ . Da eine der ursprünglichen Fragen auf das Eindringen von

ENERGIEANTEILE DER FREQUENZBEREICHE  $< 0,1 \text{ Hz}$  ( $\approx 10 \text{ s}$ );  $0,1 - 0,25 \text{ Hz}$  ( $\approx 10 - 4 \text{ s}$ ), UND  $> 0,25 \text{ Hz}$

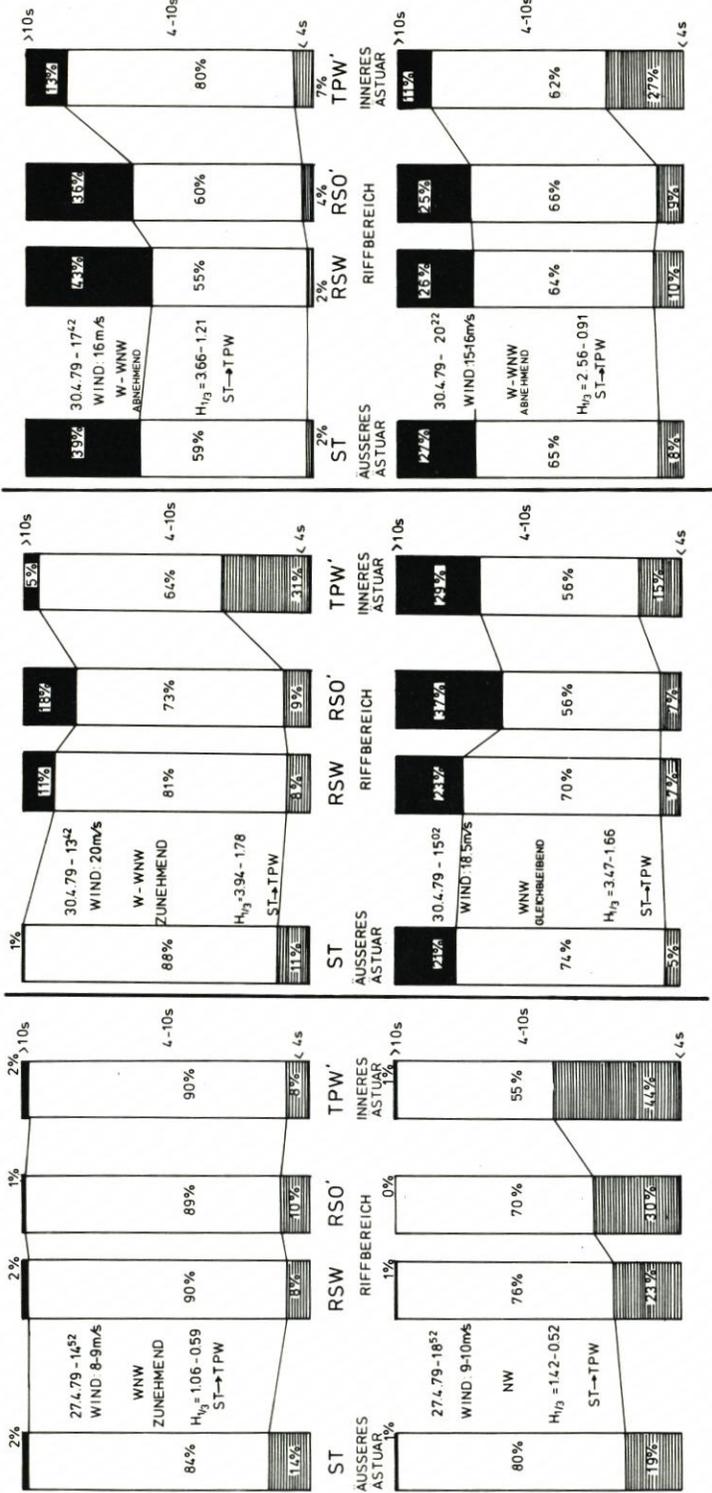


Abb. 5.15 Energieanteile der einzelnen Frequenzbereiche

langperiodischen Wellen in das Innere des Ästuars zielte, wurde die Grenze bei 10 s festgelegt (s. auch Kap. 4.5).

Für jeweils typische Phasen der Meßreihe sind in Abb. 5.15 die einzelnen Energieanteile für die o. a. Frequenzbereiche für vier Stationen der Meßkette aufgetragen.

Bei verhältnismäßig geringen Windstärken kommen bei ST nur geringe langwellige Anteile vor, die bis ins innere Ästuar eindringen (Abb. 5.15). Mit etwas zunehmendem Wind vergrößert sich von ST nach TPW der kurzperiodische Anteil bis auf 44 %; die Verteilung charakterisiert die jeweilige Lage der Station.

Bei größeren Windstärken zunehmender Tendenz entstehen beim Einlaufen ins Ästuar erste langwellige Anteile (Abb. 5.15), bei denen der Energieanteil bei RSO bereits 18 % beträgt. Bei relativ großen Wellenhöhen verlagert sich der Anteil des Bereichs 4 bis 10 s auf lang- und kurzwellige Bereiche. Durch Überlagerung mehrerer Seegangssysteme (s. auch Abb. 5.4 bis 5.6) entsteht bei TPW kurze, kabbelige See mit Höhen  $H_{1/3} = \sim 1,8$  m. Bei anhaltender hoher Windstärke verschiebt sich diese Gesamtverteilung zum langwelligen Teil. Hohe Dünungsanteile dringen bis ins innere Ästuar vor. Offensichtlich erhält TPW hier Seegangsanteile aus der Neuen (RSW) und Alten Weser (RSO).

Auf dem rechten Teil der Abb. 5.15 schließlich sind bei abnehmendem Wind die niederfrequenten Energieanteile von außen nach innen rückläufig. Es erreichen jedoch immer noch 13 bzw. 11 % langwellige Anteile das innere Ästuar. Entsprechend nimmt der vom örtlichen Wind aufgefachte kurzwellige Teil wieder zu. Eine Analyse der vorstehenden Art kann – in programmierter Form – von jeder Messung angefertigt werden, da sie Aufschluß über die Energieverteilung und daraus folgend über die Beanspruchung von Bauwerken und Fahrzeugen gibt.

#### 5.4.3 „Greifbare“ Energie – ein Beispiel

Über die im Seegang enthaltenen gewaltigen Energiemengen ist bereits von FÜHRBÖTER (1974) und DETTE (1977) berichtet worden. Setzt man die in vorstehenden Messungen gewonnenen Erkenntnisse in eine entsprechende überschlägliche Berechnung für die Wesermündung um, so ergibt sich folgendes:

Nach der Windstatistik des Deutschen Wetterdienstes, Seewetteramt (1977), ist für die Wesermündung nach dem Mittelwert von 1949 bis 1972 mit 138 Tagen Wind einer mittleren Stärke von 7,6 m/s aus W über NW bis N zu rechnen. Nach Kap. 4.1 entstehen dabei bei Station ST Wellenhöhen von

$$H_{1/3} = 0,94 \text{ m (Mittel aus E- und F-Wert)}$$

Nach dem Ansatz von FÜHRBÖTER (1974) für den mittleren Leistungsdurchgang  $N$  pro lfd. m Wellenfront je Wellenperiode

$$\bar{N} = \frac{1}{8} \rho \cdot g \cdot H^2 \cdot \frac{L}{T} \text{ [Mp} \frac{\text{m}}{\text{s}}/\text{m}]$$

und bezogen auf die elektrische Leistungseinheit KW (DETTE, 1977)

$$\bar{N} = \frac{1}{0,102} \cdot \frac{1}{8} \cdot \rho \cdot g \cdot H^2 \cdot \frac{L}{T} \text{ [KW/m]}$$

wird bei

$$\frac{L}{T} = c = \sqrt{g \cdot h} \quad \text{(tiefes Wasser)}$$

für eine Wassertiefe von i. M. 22 m bei ST die Wellenenergieabgabe nur für den betrachteten Zeitraum wellenwirksamer Windrichtungen pro lfd. m Wellenfront:

$$\bar{W} = 554,4 \cdot 138 \cdot 0,94^2 \text{ KWh/m}$$

$$\bar{W}_{138} = 67,6 \cdot 10^3 \text{ KWh/m}$$

Rechnet man für die Wesermündung eine Einlaufbreite von 10 km, die sich bis in die Platenregion (TPW) fortsetzen kann, so ergeben sich

$$\bar{W} = 67,6 \cdot 10^7 \text{ KWh/138 Tage}$$

die auf das Jahr zu verteilen sind. (Die anderen Windrichtungen haben entsprechend geringere Energieanteile.) Davon bleiben bei RSW bis RSO noch

$$78 \text{ bis } 87 \% = 52,7 \text{ bis } 58,8 \cdot 10^7 \text{ KWh}$$

und bei TPW immerhin noch rd.

$$13 \cdot 10^7 \text{ KWh}$$

übrig.

Zusammen mit der Tidedrömung erzeugen diese gewaltigen Energien Umlagerungen, die bei entsprechend detaillierter statistischer Betrachtung von Einzelbereichen anteilig zugeordnet werden können. Hierzu kann über die Windstatistik eine den jeweiligen Windrichtungen entsprechende mittlere oder signifikante Wellenhöhe aus den im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Beziehungen ermittelt werden. Die daraus errechnete Energie wird ins Verhältnis zu den durch Tiefenvergleiche errechneten Umlagerungen gesetzt. Zusammen mit der Kenntnis der Strömungsverhältnisse kann hieraus auf Verlagerungstendenzen bestimmter Problembereiche des Ästuars, besonders am Rand der Schiffahrtsrinnen, geschlossen werden.

Als Beispiel für die Größenordnung der anfallenden Umlagerungen sei folgendes Beispiel genannt: Im Flachwassergebiet vor der Tegeler Plate (TPO), einem Bereich, wo Tidedrömungen keine hohen Werte erreichen und somit an der morphologischen Gestaltung geringeren Anteil haben, wurde im Vergleichszeitraum 1977/78 (1 Jahr) pro Quadratkilometer eine Bodenmenge von rd. 260 000 m<sup>3</sup> umgelagert (Vertiefung). In der Tiderinne bei TPW mit verhältnismäßig starker Tidedrömung betrug die umlagerte Menge nur 130 000 m<sup>3</sup> (Vertiefung). Obwohl diese Zahlen nicht unbedingt vergleichbar sind, geben sie doch einen Anhalt für die am Umlagerungsprozeß beteiligte Seegangsenergie.

## 5.5 Parametrisierung von Spektren des Ästuarseegangs

### 5.5.1 Versuche mit dem einfachen JONSWAP-Spektrum

Die Diskussion der verschiedenen Spektren, ihrer Formen, des Energieinhalts und der Energieverteilung läßt den Bearbeiter sehr schnell an die Grenzen des ohne EDV-Hilfe Machbaren kommen. Bei der Vielzahl von Registrierungen und daraus errechneten Spektren,

die für die Bearbeitung eines Problems bzw. die Beurteilung von Seegang, insbesondere in einem Ästuar, notwendig sind, bietet nur die Datenverarbeitung eine wirtschaftliche Lösung.

Um die Änderung der Spektren in Form und Größe zu erfassen, bietet sich die Möglichkeit einer Parametrisierung. Eine überschaubare Anzahl von Parametern gestattet die Beschreibung des Spektrums. Diese Parameter können in ihrer Abhängigkeit von verschiedenen Faktoren wie Wind, Streichlänge und z. B. Wassertiefe systematisch untersucht werden. Nachdem eine Reihe von Autoren Spektralfunktionen entwickelt haben (z. B. BRETSCHNEIDER, 1959, PIERSON und MOSKOWITZ, 1964), ist wohl das bekannteste das sogenannte JONSWAP-Spektrum (HASSELMANN et al., 1973) mit der Form

$$E(f) = \alpha \cdot g^2 (2\pi)^{-4} f^{-5} \exp\left(-\frac{5}{4} \left(\frac{f}{f_0}\right)^{-4}\right) \gamma^{\exp\left(-\frac{(f-f_0)^2}{2\sigma^2 f_0^2}\right)}$$

In dieser erweiterten Form des PM-Spektrums nach HASSELMANN et al. (1973) beschreiben insgesamt fünf Parameter das Spektrum, und zwar:

$f_0$  = Frequenz des Peaks

$\alpha$  = Phillips-Konstante (entsprechend PM-Spektrum)

$\gamma$  = Verhältnis  $\frac{E_{f \max \text{ JONSWAP}}}{E_{f \max \text{ P-M}}}$

$\sigma_a$  = linke und rechte Breite des „Peaks“ (gemessen von  $f_0$  an den Kurvenwendepunkten)

Beim Einsetzen von  $\gamma = 1$  erhält man wieder die ursprüngliche Form des PM-Spektrums.

Zunächst war bei den Messungen im Weser-Ästuar daran gedacht worden, die errechneten Spektren nach der JONSWAP-Formel zu parametrisieren. Es zeigte sich jedoch sehr schnell, daß insbesondere für Energiebetrachtungen dieses Verfahren, wie es z. B. auch YSKER (1979) für Messungen in der Jade angewendet hat, im Weser-Ästuar nur in wenigen Fällen eine hinreichende Übereinstimmung des parametrisierten mit dem „Hamming“-geglätteten Spektrum ergab. In Abb. 5.16 sind solche Beispiele eingetragen, bei denen beide Formen voneinander abweichen. In kaum einem Fall wurde im inneren Ästuar eine Übereinstimmung erzielt, wie auch bereits die Spektren der Abb. 5.4 bis 5.6 erwarten lassen. MÜLLER (1976) und auch HASSELMANN et al. (1973) weisen ebenfalls darauf hin, daß das Verfahren nicht für stark schwankende Windfelder und für Spektren mit mehr als einem Peak gilt, da diese Spektren im allgemeinen durch Windrichtungsänderung und Kreuzseen bzw. durch Windauffrischung über einer Dünung gebildet werden.

### 5.5.2 Erhöhung der Anzahl der Parameter

Zur Beschreibung des Spektrums, das von der üblichen Form abweicht, haben OCHI und HUBBLE (1976) einen Vorschlag gemacht. Sie benutzen die zweiparametrische Darstellung des BRETSCHNEIDER (1959)-Spektrums

$$S_2 \xi(\omega) = S_2 \xi(\omega; \xi_{W1/3}; \omega_M)$$

und fügen einen Formparameter hinzu:

$$S_3 \xi(\omega) = S_3 \xi(\omega; \xi_{W1/3}; \omega_M; \lambda)$$

$$\omega_M = 0,772 \frac{2\pi}{T_1} = \text{Modalfrequenz} \hat{=} \text{Peakfrequenz}$$

$$\xi_{W1/3} = \text{kennzeichnende Wellenhöhe}$$

Vergleich des geglätteten Spektrums mit dem JONSWAP - Spektrum

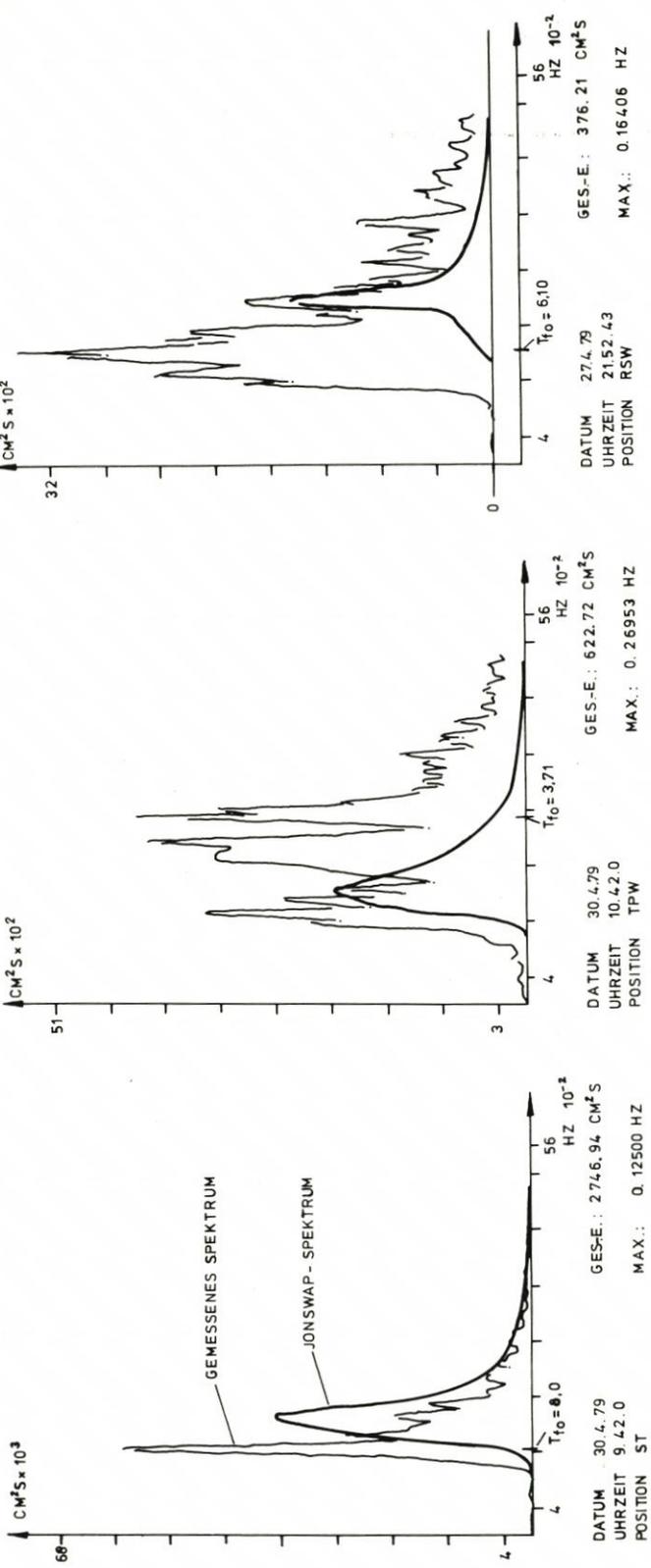


Abb. 5.16 Vergleich Hamming-geglättetes-Spektrum - JONSWAP-Spektrum

Für die Konstante  $\xi_{W1/3}$  und die Modalfrequenz  $\omega_M$  erhöht sich damit das Energiedichtemaximum des zweiparametrischen Spektrums um den Betrag

$$\frac{S_3 \xi(\omega_M)}{S_2 \xi(\omega_M)} \cong \lambda^{0.6} \quad \text{für } |\lambda - 1| \ll 1$$

Die Überlagerung zweier solcher dreiparametrischen Spektren führt schließlich zu einem sechsparametrischen Spektrum, von dem je ein Anteil für den Bereich niedriger Frequenzen (Dünung) und für höherfrequente Wellen gilt (Abb. 5.17).

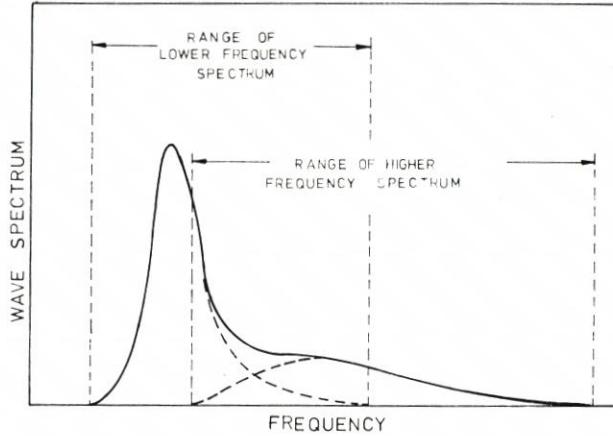


Abb. 5.17: Sechsparametrisches Spektrum (n. OCHI und HUBBLE, 1976)

Aus einer Sammlung von 800 im Nordatlantik gewonnenen Spektren werden zu kennzeichnenden Wellenhöhen  $\xi_{W1/3}$  die typischen Spektren ausgewählt und die zugehörigen Parameter ermittelt. Da bei den Ästuarmessungen noch kein ausreichendes Datenmaterial für die nachherige Bestimmung von Parametern zur Verfügung stand, wurde das folgende Verfahren angewendet:

Da die JONSWAP-Form für ein eindeutiges Spektrum eine gute Annäherung gab, wurden Spektren, deren Form auf zwei Seegangssysteme schließen ließ, in zwei Anteile aufgeteilt und nach Berechnung der Einzelspektren wieder kombiniert bzw. überlagert. Mit der ersten Peak-Frequenz  $f_{o1}$  wird ein 5parametrisches Spektrum berechnet, das von dem Gesamtspektrum abgezogen wird. Mit  $f_{o2}$  wird das Restspektrum errechnet. Die Addition beider Teilspektren als 10parametrisches Spektrum wird an das „Hamming“-geglättete Spektrum approximiert. Es entsteht ein 10parametrisches Spektrum der Form

$$S(f) = S_1(f_{o1}; \alpha_1; \gamma_1; \sigma_1) + S_2(f_{o2}; \alpha_2; \gamma_2; \sigma_2)$$

Der Rechenaufwand, auch auf einem Großrechner, ist verhältnismäßig hoch. Die Annäherung der JONSWAP-Form an das berechnete Hamming-Spektrum ist jedoch abhängig von der Anzahl der Iterationen bei der Näherungs- bzw. Minimierungsrechnung (constraint minimum search). Es gilt, bei näherungsweise Vorgabe der Parameter eine enge Annäherung zu erzielen.

Die Auswertung einer Reihe von Spektren nach dieser Methode ergab jedoch noch gewisse Schwierigkeiten, da teilweise durch ungenügende Annäherung nicht der zweitgrößte

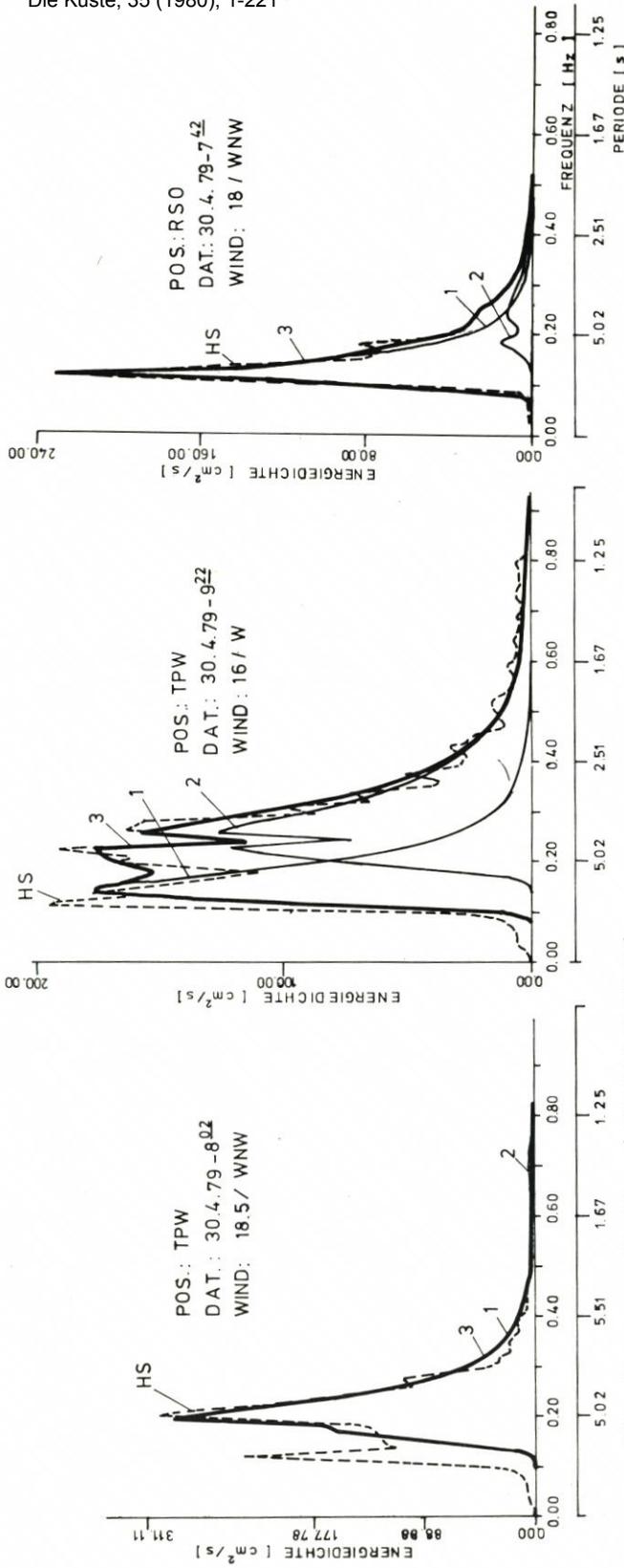
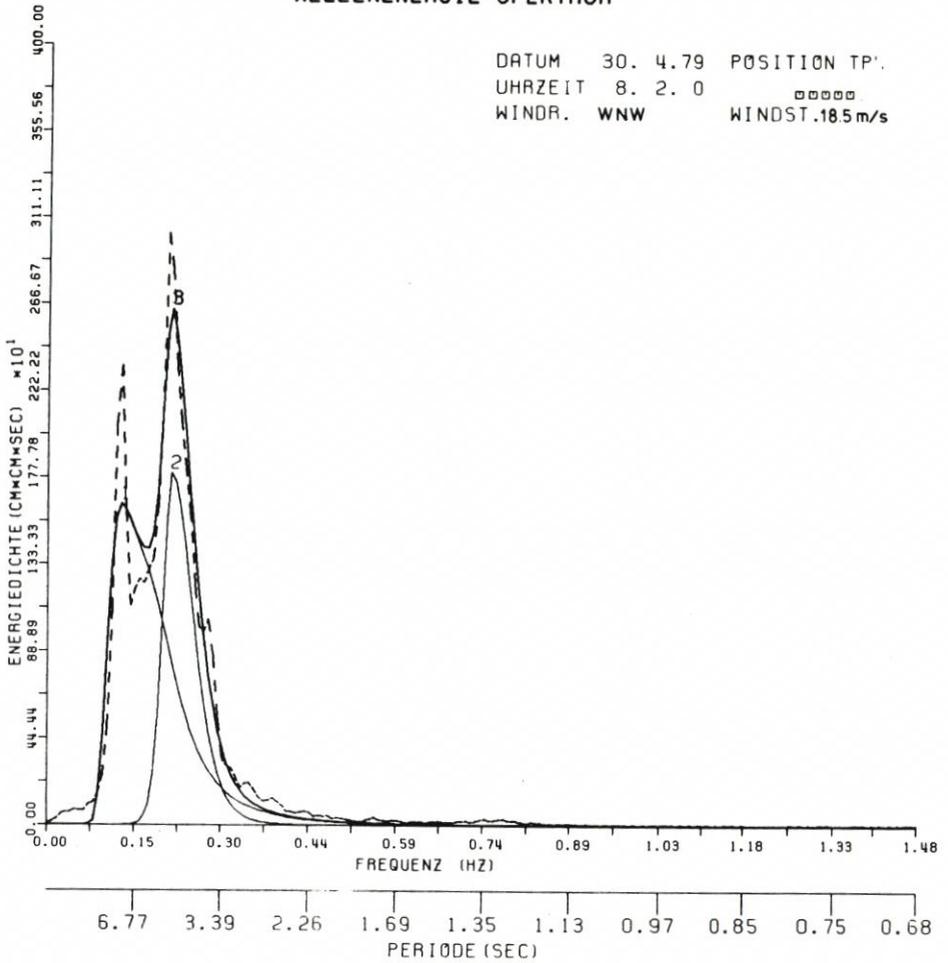


Abb. 5.18 3 Beispiele 10-parametrischer Spektren

### AUSWERTUNG VON SEEGANGSMESSUNGEN WELLENENERGIE-SPEKTRUM



DATUM 30. 4.79 POSITION TP.  
 UHRZEIT 8. 2. 0  
 WINDR. WNW WINDST.18.5 m/s

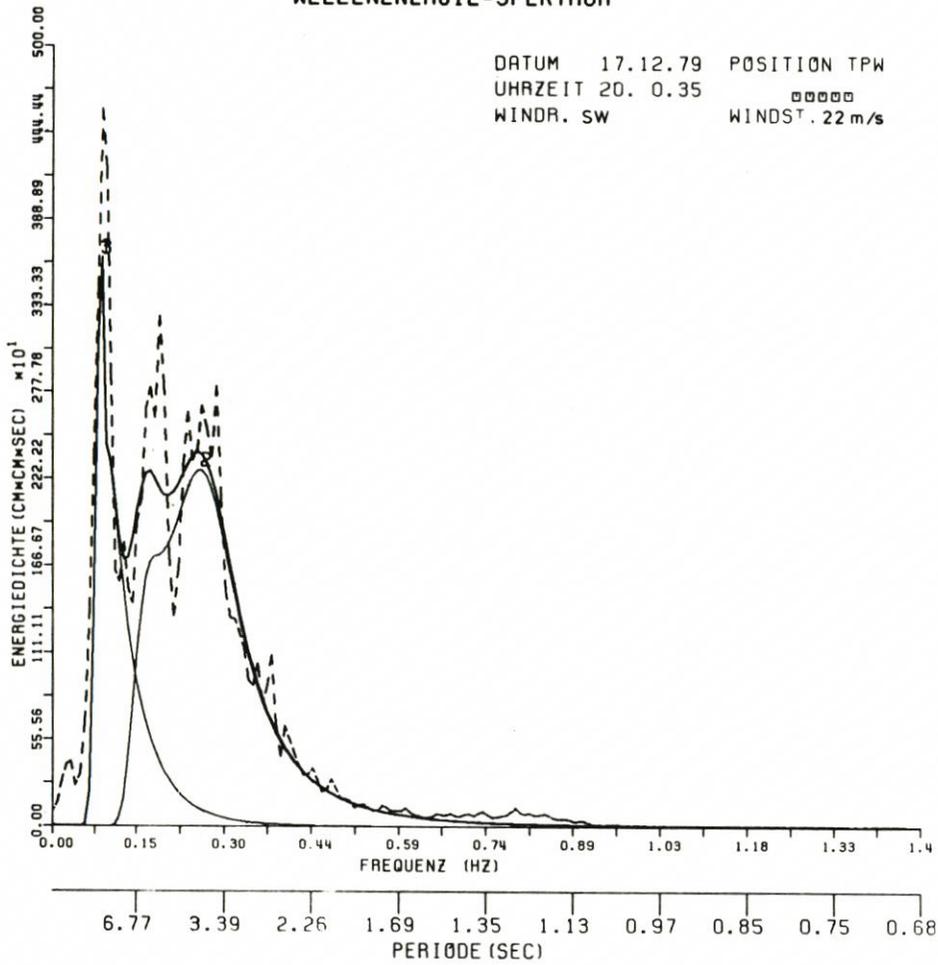
				DURCHGEZOGENE LINIEN - PARAMETERISIERTE SPEKTREN MIT		
				1.	2.	
E*	=	690.341	(CM*CM)	ALPHA	=	0.00073 / 0.00005
H QUER	=	52.0	(CM)	FM	=	0.12500 / 0.21094
H 1/3	=	94.0	(CM)	GAMMA	=	0.38518 / 82.06431
H 1/10	=	122.0	(CM)	SIGMA-A	=	1.00000 / 0.15432
QP	=	0.000018	(CM)	SIGMA-B	=	0.32506 / 0.46113

UNTERBROCHENE LINIE DURCH DAS HAMMING FENSTER  
 GEGLAETTETES SPEKTRUM

Abb. 5.19 8-parametriges Spektrum

### AUSWERTUNG VON SEEGANGSMESSUNGEN WELLENENERGIE-SPEKTRUM

DATUM 17.12.79 POSITION TPW  
 UHRZEIT 20. 0.35  
 WINDR. SW WINDST. 22 m/s



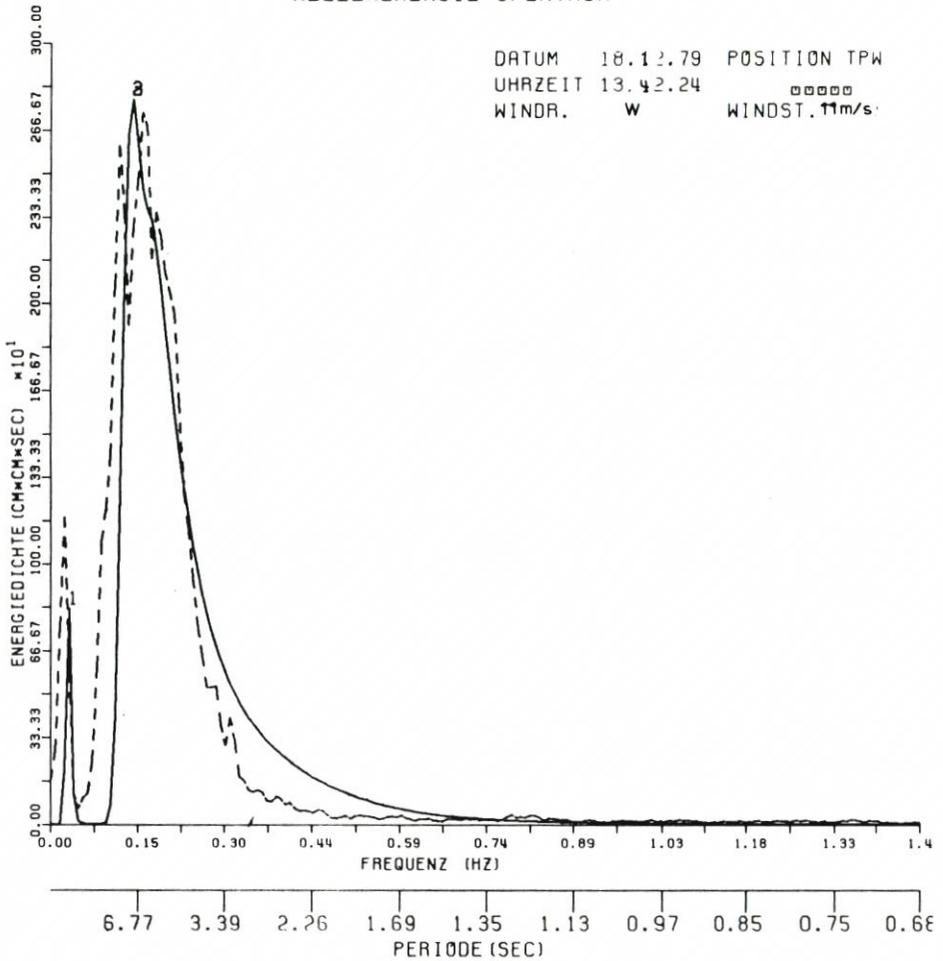
DURCHGEZOGENE LINIEN -  
PARAMETERISIERTE SPEKTREN MIT

			1.	2.
E <sub>M</sub>	= 1522.278	(CM*CM)	ALPHA = 0.00019 /	0.00846
H QUER	= 88.0	(CM)	FM = 0.09375 /	0.18000
H 1/3	= 142.0	(CM)	GAMMA = 0.51293 /	0.21838
H 1/10	= 179.0	(CM)	SIGMA-A = 0.05187 /	0.99996
QP	= 0.000042	(CM)	SIGMA-B = 0.55601 /	0.26541

UNTERBROCHENE LINIE - DURCH DAS HAMMING FENSTER  
GEGLAETTETES SPEKTRUM

Abb. 5.20 8-parametriges Spektrum

### AUSWERTUNG VON SEEGANGSMESSUNGEN WELLENENERGIE-SPEKTRUM



DATUM 18.12.79 POSITION TPW  
 UHRZEIT 13.42.24  
 WINDR. W WINDST. 11m/s

DURCHGEZOGENE LINIEN -  
 PARAMETERISIERTE SPEKTREN MIT

				1.	2.
EX	= 842	849	(CM*CM)	ALPHA	= 0.00000 / 0.00750
H QU		59		FM	= 0.03125 / 0.16406
H 1/3		101		GAMMA	= 33.81508 / 0.21206
H 1/10		133		SIGMA-A	= 0.99999 / 0.17098
QP	= 0.000101		(M)	SIGMA-B	= 0.23281 / 1.00000

UNTERBROCHENE LINIEN - DURCH DAS HAMMING FENSTER  
 GEGLÄTTETES SPEKTRUM

Abb. 5.21 8-parametrisches Spektrum

ERGEBNISSE EINIGER MESSREIHEN  
(JONSWAP-DOPPELSPEKTRUM)  
MIT  $E(f) = E_1(f) + E_2(f)$

DAT.	Pos.	H 1/3 [m]	T <sub>fo1</sub> [s]	T <sub>fo2</sub> [s]	E (Hamming)		E (JONSWAP)(ges) [cm <sup>2</sup> ]	Hs (Hamming)		Hs (JONSWAP) [m]	mo ml	T	T H 1/3 [s]
					E [cm <sup>2</sup> ]	Hs [m]		Hs [m]	T [s]				
27. 4.79 - 18,12	RSO	1,17	8,0	5,8	1034	1092	1,29	1,32	4,7	3,7	5,3		
27. 4.79 - 19,32	RSO	1,25	6,7	4,4	1144	1133	1,35	1,34	4,2	3,5	4,9		
27. 4.79 - 19,12	RSW	1,30	8,0	4,6	1063	1093	1,30	1,32	4,8	4,1	5,1		
30.4. 79 - 8,02	TPW	0,94	8,0	4,7	690	659	1,05	1,02	4,9	3,3	5,0		
30.4. 79 - 22,42	TPW	1,15	6,7	4,3	1037	881	1,29	1,18	4,5	2,8	4,3		
30. 4.79 - 21,42	ST	3,12	8,5	6,1	6084	5682	3,12	3,02	6,2	4,7	6,3		
11.12.79 - 7,22	RSW	0,81	8,0	5,6	554	400	0,94	0,80	6,3	3,2	5,5		
14.12.79 - 12,31	TPW	0,63	3,1	1,5	312	373	0,70	0,77	1,6	1,6	1,9		
17.12.79 - 14,40	TPN	2,09	9,1	4,9	3397	3547	2,33	2,38	5,7	2,7	4,1		
17.12.79 - 20,00	TPW	1,42	10,7	5,6	1522	1405	1,56	1,50	4,4	3,7	5,2		
18.12.79 - 13,42	TPW	1,01	32,0	6,7	843	769	1,16	1,11	4,3	3,7	5,7		
18.12.79 - 0,40	TPN	2,33	10,7	4,3	4080	3896	2,55	2,50	5,5	4,7	6,6		

Abb. 5.22 Tabelle der Energieanteile (Meßreihe vom 27./30. 4. 79)

$$\begin{aligned}
 f_{K(p)} &= S_{(f) \text{ param.}} - S_{(f) \text{ Hamming}} \\
 \min \sum (f_{K(p)})^2 \\
 \downarrow \\
 \min \sum (f_{K(p+\Delta p)})^2 \\
 f_{K(p)} &= \text{Spektralfunktion} \\
 S_{(f) \text{ param.}} &= \text{nach JONSWAP param. Spektrum} \\
 S_{(f) \text{ Hamming}} &= \text{gemessenes Spektrum (geglättet)}
 \end{aligned}$$

Peak, sondern weitere Extremwerte der Energiedichte im kurzwelligen Teil berücksichtigt wurden. In Abb. 5.18 sind Rechenläufe mit diesen 10parametrischen Spektren dargestellt. Es zeigt sich jedoch z. T. schon eine gute Annäherung an das tatsächliche Spektrum.

Wegen dieser Abweichungen und damit mangelnder Übereinstimmung des parametrisierten mit dem gerechneten „Hamming“-geglätteten Spektrum wurden die beiden Peak-Frequenzen  $f_{o1}$  und  $f_{o2}$  festgelegt und damit der o. a. Rechengang durchgeführt. Dazu ist allerdings z. Z. noch eine „Handauswertung“ und Beurteilung der geplotteten „Hamming“-Spektren erforderlich. Mit der Festlegung beider (oder mehrerer) Peak-Frequenzen  $f_{oi}$  ergibt sich ein *a c h t p a r a m e t r i g e s S p e k t r u m*, das in den meisten Fällen eine befriedigende Übereinstimmung mit dem tatsächlichen aufweist. Der Rechenaufwand für das Annäherungs- bzw. Minimierungsprogramm beträgt nach Festlegung der Peak-Frequenzen auf einer Großrechenanlage für einen 20-Minuten-Schrieb zusammen mit der statistischen Auswertung bei einer mittleren Anzahl von 100 Iterationen 25 Sekunden.

Hier lassen sich jedoch durch Straffung des Programms und geeignete Vorgabe der Parameter bei entsprechender Erfahrung auch für Spektren mit mehreren „Peaks“ noch kürzere Rechenzeiten erzielen.

In Abb. 5.19 bis 5.21 sind für Meßreihen bei NW-Windlagen die gemessenen und gerechneten Spektren aufgetragen. Die Tabelle der Abb. 5.22 zeigt eine Übersicht über die bisher gerechneten Fälle und einen Vergleich mit den statistisch ermittelten Werten.

Nach den bisherigen Erfahrungen scheint das Verfahren gut geeignet, Spektren in einem Ästuar, die von der Normalform abweichen, durch Parameter zu beschreiben. Bei entsprechender Ausweitung des Programms ist eine Anwendung sogar auf das bei TPW häufig gemessene 3-Peak-Spektrum möglich.

Bei Vorliegen ausreichender Datenkollektive kann somit auch Ästuarseeegang in spektraler Form durch Parameter in Abhängigkeit von Windgeschwindigkeit und -richtung, Wassertiefe und anderen Einflußfaktoren beschrieben werden. Eine Kombination des P-M- und JONSWAP-Spektrums ist denkbar für solche Fälle, wo der Parameter  $\gamma$  Werte  $< 1$  annimmt.

## 6. S c h r i f t e n v e r z e i c h n i s

- AYYAR, H. R.: On the Hydromechanics of Breakers on Steep Slopes. Mitt. Franzius-Inst., H. 33, 1969.
- BADE, P. u. KALDENHOFF, H.: Seegangstransmission über und durch einen Steinschüttdamm-Wellenbrecher mit Formsteindeckwerk und schmaler Krone. Hamburger Küstenforschung, H. 40, 1979.
- BARBER, N. F. u. URSELL, F.: Philosophical Transactions. Royal Society of London, Bd. 240, 1948.
- BARTHEL, V.: Analysis of Waves During a Storm Tide. Proc. 16th Conf. on Coast. Eng., Hamburg, 1978.
- BARTHEL, V.: Sturmflutseeegang in einem Ästuar. Die Küste, H. 34, 1979.

- BARTHEL, V.: Seegangsmessungen in der Außenweser. Unveröff. Unters.-Bericht, WSA Bremerhaven, 1980.
- BATTJES, J. A.: Computation of Set-up, Longshore-Currents, Run-up and Overtopping Due to Wind-Generated Waves. Communications of Hydr. Deptm. of Civ. Eng., Delft Univers., Techn. Rep. No. 74-2, 1974.
- BLACKMAN, R. B. u. TUKEY, J. W.: The Measurement of Power Spectra. Dover, New York, 1958.
- BOUWS, E.: Wind and Wave Climate in the Netherlands Sector of the North Sea Between 53° and 54° North Latitude. Scient. Rep., De Bilt, 1978.
- BÜSCHING, F.: Wave Deformation Due to Decreasing Water Depth. Mitt. Leichtweiß Inst., H. 63, 1978.
- BRETSCHNEIDER, C. L.: Field Investigation of Wave Energy Loss in Shallow Water Ocean Waves. Beach Er. Board, Techn. Mem. 46, 1954.
- BRETSCHNEIDER, C. L.: Revisions in Wave Forecasting: Deep and Shallow Water. Proc. 6th Conf. on Coast. Eng., Berkeley, 1958.
- BRETSCHNEIDER, C. L.: Wave Variability and Wave Spectra for Wind-generated Gravity Waves. Beach Er. Board, Techn. Mem. 118, 1959.
- COOLEY, J. W. u. TUKEY, J. W.: An Algorithm for the Machine Calculation of Complex Fourier Series. Mathematics of Computation, Vol. 19, 1965.
- CZEPA, O., HARTKE, H. u. HOEG, S.: Bericht über Messungen von Seegang und Seegangswirkungen an der Ostseeküste. Acta Hydrophysica, Bd. 14, Berlin, 1969.
- DAEMRICH, K.-F.: Diffraktion gebeugter Wellen – ein Beitrag zur Berechnung der Wellenruhe in Häfen. Mitt. Franzius-Inst., H. 47, 1978.
- DARBYSHIRE, J.: The Generation of Waves by Wind. Proc. Royal Soc., Vol. 215, London, 1952.
- DARBYSHIRE, J.: A Further Investigation of Wind Generated Waves. DHZ, Jg. 12, H. 1, 1959.
- DARBYSHIRE, J.: The One-Dimensional Wave Spectrum in the Atlantic Ocean and in Coastal Waters. Proceedings, Conf. on Ocean Wave Spectra. Easton, Maryland, Englewood Cliffs, N. J., 1963.
- DARLINGTON, C. R.: The Distribution of Wave Heights and Periods in Ocean Waves. Royal Met. Society, Vol. 80, London, 1954.
- DETTE, H. H.: Wellenmessungen und Brandungsuntersuchungen vor Westerland/Sylt. Mitt. Leichtweiß-Inst., H. 40, 1974.
- DETTE, H. H.: Ein Vorschlag zur Analyse eines Wellenklimas. Die Küste, H. 31, 1977.
- DRAPER, L.: Extreme Wave Conditions in British and Adjacent Waters. Proc. 13th Int. Conf. on Coast. Eng., Vancouver, 1972.
- o. V.: DTV – Atlas zur Mathematik. Bd. 2, 1977.
- o. V.: Deutscher Wetterdienst, Seewetteramt, Windstatistik 1949 – 73. Hamburg, 1977.
- EWING, J. A.: A Note on Wavelength and Period in Confused Seas. Journ. of Geoph. Research, Vol. 74, Nr. 6, 1969.
- FÜHRBÖTER, A.: Einige Ergebnisse aus Naturuntersuchungen in Brandungszonen. Mitt. Leichtweiß-Inst., H. 40, 1974.
- FÜHRBÖTER, A.: Sandbewegung im Küstenraum – Rückschau, Ergebnisse, Ausblick. Deutsche Forschungsgemeinschaft, Boppard, 1979.
- FÜHRBÖTER, A.: Zufallsprozesse bei der Belastung durch brechende Wellen. Jahresbericht 1970, Sonderforschungsber. 79 der DFG, H. 1, Hannover, 1971.
- FUNKE, E. R.: Correlation Funktion and Power Spectral Density Analysis. Boston Meeting of ASCE, 1960.
- GALVIN, C. J. jr.: Braker Travel and Choice of Design Wave Height. Journal of the Waterw. and Harb. Div., ASCE, Vol. 95, 1969.
- GALVIN, C. J. jr., TENNEY, L. W. u. SEELIG, W. N.: Differences Between Littoral and Offshore Wave Climates. US Army Coast. Eng. Center, 1970.
- HALES, L. Z. u. HERBICH, J. B.: Tidal Inlet Current-Ocean Wave Interaction. 13th Int. Conf. on Coast. Eng., Vancouver, 1972.
- HARRIS, D. L.: The Analysis of Wave Records. Proc. 12th Int. Conf. on Coast. Eng., Washington D. C., 1970.
- HASSELMANN, K., et al.: Measurements of Wind-Wave Growth and Swell Decay During the Joint North Sea Wave Project. DHZ, Reihe A, Nr. 12, Hamburg, 1973.
- o. V.: IBM – Scientific Library, SL Math., 1979.

- IPPEN, A. T. u. KULIN, G.: The Shoaling and Breaking of the Solitary Wave. Proc. of the 5th Int. Conf. on Coast. Eng., Grenoble, 1954.
- IRIBARREN, R. C. u. NOGALES, C. y. O.: Talud limite entre la roturo y la reflexion de las holas. Revista de obras Publicas, 1950.
- IVERSEN, H. W.: Laboratory Study of Breakers. Gravity Waves, Nat. Bureau of Standards, Circ. 521, Washington D. C., 1952.
- JOHNSON, I. G., SKOUGAARD, C. u. WANG, J. D.: Interactions Between Waves and Currents. Proc. 12th Int. Conf. on Coast. Eng., Washington D. C., 1970.
- KAMPHUIS, W.: Wave Spectrum Analysis Revisited. Civ. Eng. Report No. 64a, Queens University at Kingston, Ontario, 1969.
- KINSMAN, B.: Wind Waves. Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1965.
- KISHI, T.: The Possible Highest Gravity Waves in Shallow Water. Coast. Eng. in Japan, Jap. Soc. of Civ. Eng., Tokio, 1959.
- KOELE, L. A. u. DE BRUYN, P. A.: Statistical Distribution of Wave Heights in Correlation with Energy Spectrum and Water Depth. Proc. 9th Int. Conf. on Coast. Eng., 1965.
- LONGUET-HIGGINS, M. S.: On the Statistical Distribution of the Heights of Sea Waves., Journ. of Marine Research. Vol. XI, Nr. 3, 1952.
- LUCK, G. u. NIEMEYER, H. D.: Seegangsmessungen im Bereich der Ostfriesischen Inseln und Watten. Meerestechnik, Nr. 4, Bd. 7, 1976.
- MAGENS, C.: Seegang und Brandung als Grundlage für Planung und Entwurf im Seebau und Küstenschutz. Mitt. Franzius-Inst., H. 14, Hannover, 1958.
- MICHELL, J. H.: The Highest Waves in Water. (s. Lit. SCHÜTTRUMPF, 1973.)
- MOSKOWITZ, L.: Estimates of the Power Spectrum for Fully Developed Seas for Wind Speeds of 20 to 40 Knots. Journal of Geoph. Res., Vol. 59, No. 24, 1964.
- MÜLLER, P.: Parametrization of One-Dimensional Wind Wave Spectra and their Dependence on the State of Development. Hamburger Geoph. Einzelschriften d. Univ. Hamburg, 1976.
- NEU, H. J. A.: Wave Climate of the North Atlantic - 1970. Bedford Inst. of Oceanogr., Report Ser./B1-R-76-10/1976.
- NEUMANN, G.: On Ocean Wave-Spectrum and a New Method of Forecasting Wind-Generated Sea. Beach Er. Board, Techn. Mem. No. 43, 1953.
- NIEMEYER, H. D.: Untersuchungen zum Seegangsklima im Bereich der Ostfriesischen Inseln und Küste. Die Küste, H. 34, 1979.
- o. V.: Bulletin of the Permanent International Association of Navigation Congresses. Bull. No. 15, 1973.
- PIERSON, W. J. jr.: An Interpretation of the Observation Properties of Sea Waves in Terms of the Energy Spectrum of the Gaussian Record. Trans. Am. Geoph. Union, No. 35, 1954.
- PIERSON, W. J. jr. u. MOSKOWITZ, L. A.: A Proposed Spectral Form for Fully Developed Wind Seas Based on the Similarity Theory of S. A. KITAGORODSKII. Journ. of Geoph. Res. V. 69, 1964.
- PIEST, J.: Vergleich der BRETSCHNEIDER'schen Beziehungen über die Verteilung der sichtbaren Wellen und des Seegangsspektrums mit den Ergebnissen der Auswertung von Seegangsmessungen in der Deutschen Bucht. DHZ, H. 1, 1963.
- PUTZ, R. R.: Statistical Distribution for Ocean Waves. Transact. Am. Geoph. Union, Vol. 33, No. 5, 1952.
- REHLING, U.: Datenerfassung und -auswertung mit Digitalrechnern bei Wasserstands- und Wellenmessungen. Mitt. Franzius-Inst., Heft 42, Hannover, 1975.
- RICHTER, K., ROSENTHAL, W. u. GÜNTHER, H.: Physik und Vorhersage des Seegangs. Meerestechnik 8, H. 4, 1977.
- ROLL, H.-U.: Die Meereswellen in der südlichen Nordsee (aufgrund von Wellenbeobachtungen deutscher Feuerschiffe). Deutscher Wetterdienst, Seewetteramt, Einzelveröff. Nr. 8, 1956.
- ROLL, H.-U.: Zufälliges und Gesetzmäßiges im Seegang. Der Seewart, Bd. 17, H. 5, 1956.
- ROLL, H.-U. u. FISCHER, G.: Eine kritische Bemerkung zum NEUMANN-Spektrum des Seegangs. DHZ, Bd. 9, H. 1, 1956.
- RYE, H.: The Stability of Some Currently Used Wave Parameters. Coast. Eng., Amsterdam, 1977.
- SAVILLE, T. jr.: Experimental Determination of Wave Setup. Proc. 2nd Techn. Conf. on Hurricanes, Nat. Hurricane Research Rep. No. 50, 1962.
- SCHRADER, J. P.: Kennzeichnende Seegangsrößen für drei Meßpunkte in der Elbemündung. Hamb. Küstenforschg. H. 4, 1968.

- SCHÜTTRUMPF, R.: Über die Bestimmung von Bemessungswellen für den Seebau am Beispiel der südlichen Nordsee. Mitt. Franzius-Inst., H. 39, 1973.
- SIEFERT, W.: Die Seegangsverhältnisse im Elbemündungsgebiet. Hamb. Küstenforschg. H. 18, 1971.
- SIEFERT, W.: Über Formen, Längen und Fortschrittsrichtungen von Wellen in küstennahen Flachwassergebieten. Hamb. Küstenforschg., H. 24, 1972.
- SIEFERT, W.: Über den Seegang in Flachwassergebieten. Mitt. Leichtweiß-Inst., H. 40, 1974.
- SIEFERT, W.: Über das Sturmflutgeschehen in Tideflüssen. Mitt. Leichtweiß-Inst., H. 63, 1978.
- SIBUL, O.: Laboratory Study of Generation of Wind Waves in Shallow Water. Beach Er. Board, Tech. Mem. No. 72, 1955.
- SILVESTER, R.: Coastal Engineering. Bd. 1, Amsterdam, London, New York, 1974.
- STEVENSON, Th.: The Design and Construction of Harbours. (s. Lit. SCHÜTTRUMPF, 1973.)
- SVASEK, J. N.: Statistical Evaluation of Wave Conditions in a Deltaic Area. Proc. of Symp. Res. on Wave Action, Vol. 1, 1969.
- SVERDRUP, H. U. u. MUNK, W. H.: Wind, Sea and Swell: Theory of Relations for Forecasting. Unit. St. Navy Dep., Hydr. Off. Publ. No. 601, 1947.
- TOMCZAK, G.: Die Verschiedenheit des Seegangs in der Deutschen Bucht. Dtsch. Ber. z. 22. Int. Schifffahrtskongr., Paris, 1969.
- UNNA, P. J. H.: Waves and Tidal Streams. Nature, Vol. 98, No. 3, London, 1942.
- US. ARMY COASTAL ENGINEERING RESEARCH CENTER: Shore Protection, Planning and Design. Techn. Rep. No. 4, 1966.
- WALDEN, H.: Die Wellenhöhe neu angefachter Windsee nach Beobachtungen atlantischer Wetzschiffe und des Fischereischutzbootes „Meerkatze“. Ann. der Meteorologie, Jg. 16, H. 9/10, 1953/54.
- WALDEN, H.: Die winderzeugten Meereswellen, Teil I: Beobachtungen des Seegangs und Ermittlung der Windsee aus den Windverhältnissen. Deutscher Wetterdienst, Seewetteramt, Einzelveröff. Nr. 18, Hamburg, 1958.
- WALDEN, H. u. PIEST, J.: Vergleichsmessungen des Seegangs. Deutscher Wetterdienst, Seewetteramt, Einzelveröff. Nr. 30, Hamburg, 1961.
- WALDEN, H. u. SCHÄFER, P. J.: Die winderzeugten Meereswellen, Teil II: Flachwasserwellen. Deutscher Wetterdienst, Seewetteramt, Einzelveröff. Nr. 67, Hamburg, 1969.
- WIEGEL, R. L.: OCEANOGRAPHICAL ENGINEERING. Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, N. J., 1964.
- WILTON, J. R.: On the Highest Wave in Deep Water. (s. Lit. SCHÜTTRUMPF, 1973.)
- WILSON, J. R. u. BAIRD, W. F.: A Discussion of Some Measured Wave Data. Proc. of the 13th Int. Conf. on Coast. Eng., Vancouver, 1972.
- WILSON, B. W.: Deficiencies in Research on Gravity Surface Waves. Council on Wave Research, Berkeley Cal., 1961.
- YI-YUAN-YU: Breaking of Waves by an Opposing Current. Transact. Am. Geoph. Union, Vol. 33, No. 1, 1952.
- YSKER, J. S.: Seegangsmessungen in der Jade. Die Küste, H. 34, 1979.

## 7. Häufig verwendete Symbole

- b =  $\frac{H_{1/3}}{H_s}$  Beurteilungsfaktor für die Spektrumsform
- c = Wellenfortschrittsgeschwindigkeit
- $c_g$  = Wellengruppengeschwindigkeit
- d = Wassertiefe
- E = Gesamtenergie einer Spektralfunktion
- E(f) = Spektralfunktion
- $E_f$  = Energiedichte des Spektrums
- F = Streichlänge (Fetch)
- f = Frequenz =  $\frac{1}{T}$
- $f_0$  = Frequenz der max. Energiedichte

$H$	= Wellenhöhe (allgemein)
$\bar{H}$	= mittlere Wellenhöhe
$H_{1/3}$	= mittlere Höhe der 33 % höchsten Wellen
$H_{1/10}$	= mittlere Höhe der 10 % höchsten Wellen
$H_{\max}$	= höchste gemessene Einzelwelle
$H_s$	= signifikante Wellenhöhe (aus dem Spektrum ermittelt)
Index $\sigma$	= Tiefwasserbedingungen (z. B. $H_o$ , $L_o$ , $c_o$ )
$L$	= Wellenlänge
$m_o$	= Energieinhalt des Spektrums = $\int_0^{\infty} E(f) df$
MThw	= mittleres Tidehochwasser
MTnw	= mittleres Tideniedrigwasser
MTmw	= Tidemittelwasser
$n$	= Anzahl der Einzelwellen einer Registrierung
$p$	= Eintrittswahrscheinlichkeit
$s$	= Wellensteilheit = $\frac{\bar{H}}{g\bar{T}^2}$
$T$	= Wellenperiode (allgemein)
$\bar{T}$	= mittlere Wellenperiode
$T_{1/3}$	= Mittel der 33 % längsten Perioden
$T_{1/10}$	= Mittel der 10 % längsten Perioden
$T_{H1/3}$	= Mittel der zu den 33 % höchsten Wellen gehörigen Perioden
$T_{H1/10}$	= Mittel der zu den 10 % höchsten Wellen gehörigen Perioden
$T_{fo}$	= Peak-Periode im Spektrum = $\frac{1}{f_o}$
$t$	= Zeit
$U$	= Windgeschwindigkeit
$v$	= Strömungsgeschwindigkeit
$x$	= Wellenbewegung in x-Richtung
$y$	= Wellenbewegung in y-Richtung
$\kappa_R$	= Reflexionskoeffizient
$\kappa_T$	= Transmissionskoeffizient
$\rho$	= Dichte
$\eta$	= normierte Wellenhöhe $\frac{H}{\bar{H}}$
$\tau$	= normierte Wellenperiode $\frac{T}{\bar{T}}$
$\omega$	= Phasenwinkel

# Die Strömungsverhältnisse vor der Westküste Schleswig-Holsteins – Ergebnisse eines KFKI-Meßprogramms

Von Winfried Siefert, Helmut Fahse, Fritz Mießner, Hans-Henning Richter,  
Achim Taubert und Peter Wieland

## Zusammenfassung

Die Ergebnisse eines mehrjährigen Meßprogramms werden mitgeteilt. Auf Karten sind maximale und mittlere Strömungsgeschwindigkeiten, Rest- und Triftstromvektoren flächenhaft dargestellt. Damit liegt erstmals eine umfassende Arbeit über die Strömungsverhältnisse vor der schleswig-holsteinischen Westküste auf der Basis von quasi-synoptischen Messungen vor.

Der Bericht wird ergänzt durch eine detaillierte Schilderung der Erfahrungen bezüglich des Meßsystems, der ADV-Verarbeitung und der Organisation der Meßkampagne.

## Summary

*The results of a programme lasting several years are presented. Maps show maximum and mean current velocities, residual and drift current vectors. This is the first ever evaluated survey of the tidal current conditions off the Schleswig-Holstein North Sea coast, based on quasi-synoptic measurements.*

*A detailed report about experiences with the measuring device, data handling and programming, and the organisation of the campagne is added.*

## Inhalt

1. Zweck, Ziel, Umfang des Gesamtprogramms . . . . .	148
1.1 Das Phänomen und seine Erfassung . . . . .	148
1.2 Das Meßprogramm . . . . .	152
2. Durchführung der Messungen . . . . .	154
3. Aufbereitung und ADV-Verarbeitung . . . . .	157
3.1 Aufbereitung der Meßfilme . . . . .	157
3.2 Elektronische Auswertung . . . . .	160
4. Meßergebnisse . . . . .	161
4.1 Vorbemerkungen . . . . .	161
4.2 Nordfriesisches Wattenmeer . . . . .	167
4.3 Wattenmeer zwischen Eiderstedt und Marner Plate . . . . .	170
4.4 Marner Plate bis Unterelbe . . . . .	180
4.5 Zusammenfassung . . . . .	181
5. Erfahrungen und Hinweise . . . . .	181
5.1 Verfahren und Meßtechnik . . . . .	181
5.2 Erfahrungen mit der Meßdurchführung . . . . .	182
5.3 Erfahrungen mit der Datenaufbereitung . . . . .	184
5.4 Hinweise für künftige Messungen . . . . .	185
6. Schriftenverzeichnis . . . . .	185

## 1. Zweck, Ziel, Umfang des Gesamtprogramms

### 1.1 Das Phänomen und seine Erfassung

In einer Denkschrift des damaligen Küstenausschusses Nord- und Ostsee ist 1968 zu lesen:

*„Die Wassermassenverlagerungen im Küstenvorfeld weichen wesentlich von denjenigen in der freien See ab. Richtung und Stärke der Wasserbewegung einerseits und die Boden- und Küstenform andererseits stehen in ständiger gegenseitiger Wechselwirkung, ohne daß über längere Zeit eine eindeutige Beziehung zwischen Bewegung (Strömung) und Boden- bzw. Wattform erkennbar ist. Dies ist besonders der Fall beim Zusammentreffen der Wasserbewegung von See her mit derjenigen in den Flüssen und den großen Wattströmen. Weitere Ungleichmäßigkeiten verursacht der zeitlich unterschiedliche Eintritt der Gezeitenwellen vom Atlantik her in das Küstenvorfeld.*

*Die im ständigen Richtungswechsel vor sich gehende Wasserbewegung kann erhebliche Änderungen der Bett- und Bodenform mit gefährlichen Auswirkungen für den Bestand des Küstenvorfeldes selbst zur Folge haben. Ihre ständige, großräumige Beobachtung und Registrierung ist deshalb eine gleich wichtige Aufgabe wie die Beobachtung der Wasserstandsschwankungen.*

*Eine wichtige Rolle spielen die astronomisch bedingten Ungleichheiten der Gezeiten, der Wind sowie Dichteunterschiede infolge Salzgehalts- und Temperaturschwankungen. Einzelmessungen sind daher allgemein wertlos. Es müssen Dauermessungen über längere Zeiträume und unter verschiedenen astronomischen und meteorologischen Bedingungen ausgeführt werden.“*

Schon damals wurden also eine Erweiterung des Untersuchungsbereichs und eine Verbesserung der Meßmethode und -auswertung gefordert. Über die Konzeption bestanden bereits konkrete Vorstellungen:

*„Zur Beurteilung der Strömungsverhältnisse im Vorfeld der deutschen Nordseeküste ist es notwendig, auf den Gebieten, in denen nur wenig Strömungsmessungen vorliegen, zahlreiche neue Messungen auszuführen. Diese Gebiete müssen mit einem Netz von Meßstationen überzogen werden, wobei die Meßpunkte profilartig angeordnet werden müssen. Überwiegend kommen dafür Dauerstrommeßgeräte in Betracht. Die Messungen sollten gleichzeitig in einem möglichst großen Gebiet ausgeführt werden, um ein synoptisches Bild der Strömungsverhältnisse zu erhalten. Da nicht so viele Meßgeräte zur Verfügung stehen, um den gesamten Küstensaum zwischen der niederländischen und dänischen Grenze gleichzeitig zu erfassen, muß das Gesamtgebiet in mehrere möglichst große Meßbereiche aufgeteilt werden, in denen nacheinander gemessen wird.“*

In dem 1971 vom Ausschuß für Küstenforschung verfaßten und vom damaligen Bundesministerium für Bildung und Wissenschaft herausgegebenen Untersuchungsprogramm zur Küstenforschung heißt es zum Thema Tideströmungen u. a., daß sich

*„ein Meßprogramm im wesentlichen beschränkt auf die niederfrequenten Anteile im gesamten Bewegungsspektrum, also auf Gezeitenströmungen, Triftströmungen und Dichteströmungen. Orbital- und Brandungsströmungen gehören zum Themenkreis ‚Seegang und Brandung‘ und werden hier nicht erfaßt. Turbulenzuntersuchungen dürften generell in diesem regional orientierten Programm wenig erfolgversprechend sein. Im Zusammenhang sowohl mit der Seegangsforschung als auch mit der Untersuchung des Materialtransportes wird sich jedoch die Notwendigkeit und Möglichkeit ergeben, bei der Einrichtung von Meßstationen auch die hochfrequenten Orbital- und Turbulenzströmungen in integrierten Meßsystemen mit zu erfassen. Besonderes Augenmerk ist wegen der Ausbreitung von Abwässern auch den Diffusionserscheinungen zuzuwenden.“*

In dem Untersuchungsprogramm wurden folgende allgemeine Ziele zur Erfassung des Phänomens genannt:

- a) Erarbeitung einer großräumigen und zusammenhängenden Gezeitenstromdarstellung auf der Basis eines ausreichend dichten Meßnetzes.
- b) Erweiterung der Kenntnisse über Schichtungseffekte durch Modellrechnungen und systematische Profilmessungen.



Abb. 1. Lageplan mit Meßpositionen vor Beginn des KFKI-Programms (aus GÖHREN, 1974)

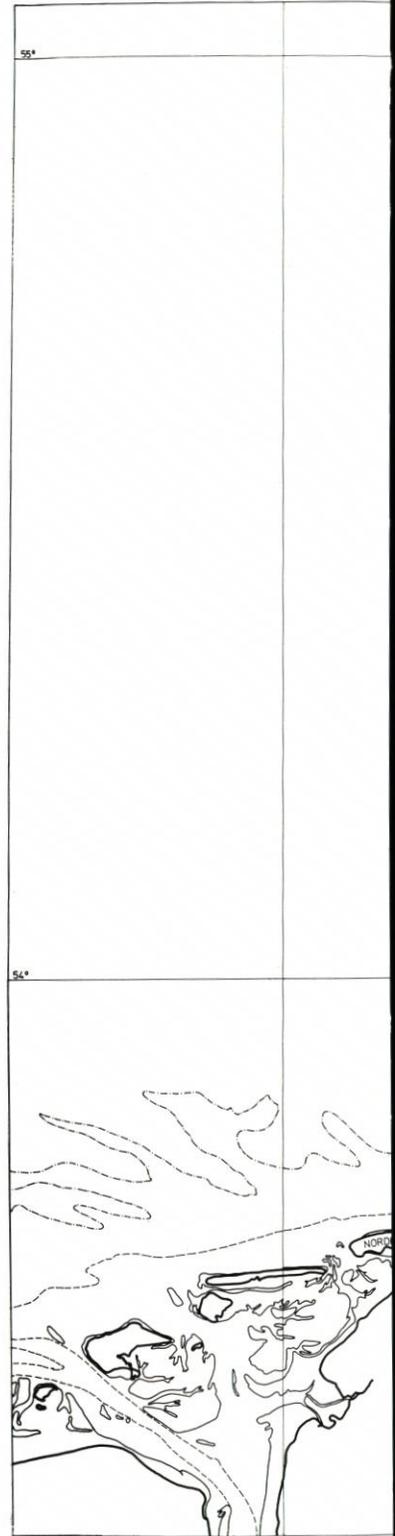
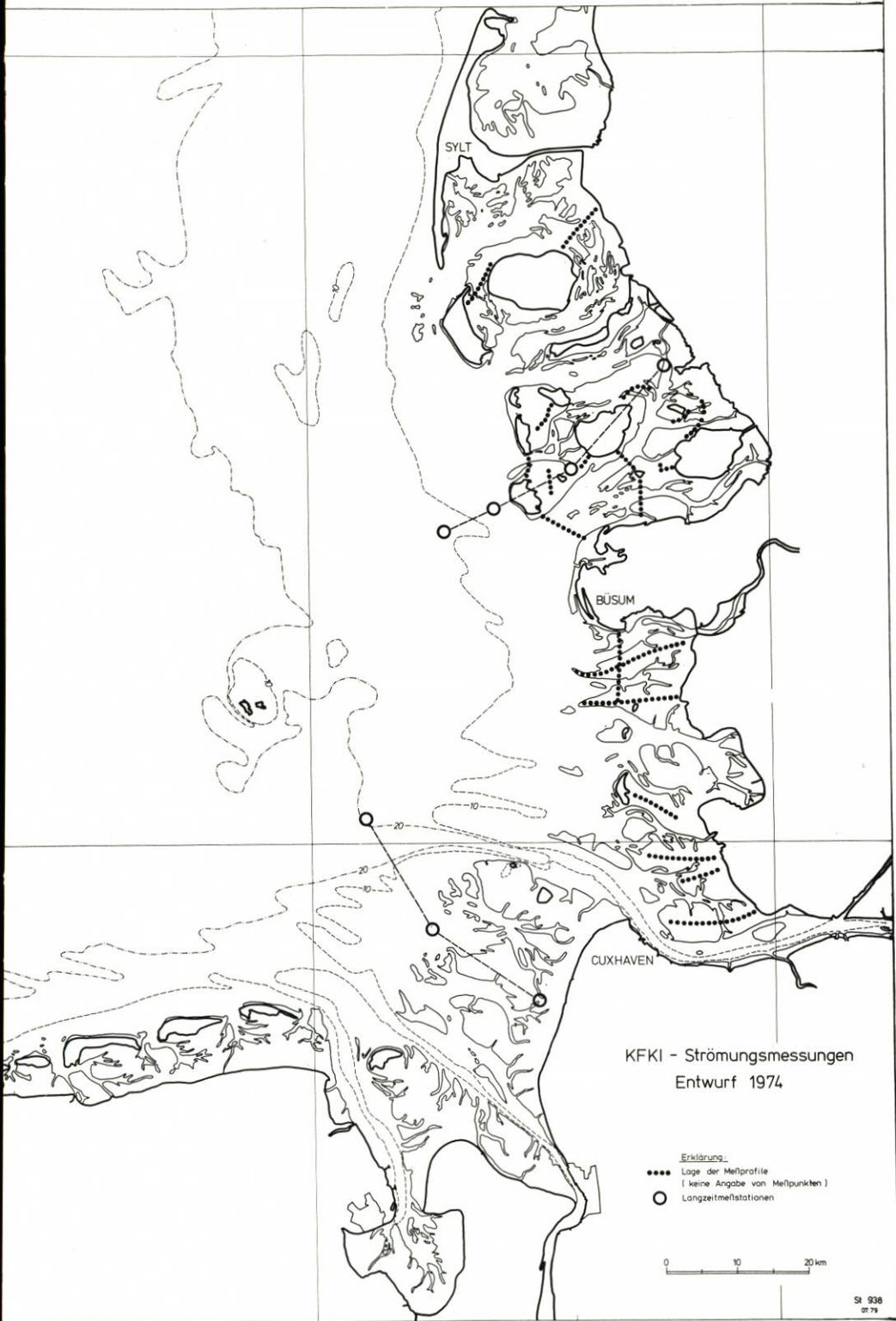


Abb. 2. Meßprofile und Langzeit-Meßstationen im Rahmen des KFKI-Programms (Planung 1974)



- c) Erweiterung der Kenntnisse über die bei Starkwind- und Sturmweatherlagen entstehenden und maßgebend durch die topographische Struktur der Küste beeinflussten Triftstromsysteme.
- d) Vollständige Erfassung der vorhandenen aperiodischen Zirkulationen und küstenparallelen Wasserversetzungen und Analyse der dynamischen Ursachen.
- e) Entwicklung von HN-Modellen zur speziellen Anwendung auf das Küstengebiet.

## 1.2 Das Meßprogramm

Mit der Aufstellung eines detaillierten Strömungsmeßprogramms befaßte sich ab 1974 eine besondere KFKI-Projektgruppe. Ihr gehörten an:

Dipl.-Ing. FAHSE, Bundesanstalt für Wasserbau, Außenstelle Küste, Hamburg  
Dr. Ing. GÖHREN, Forschungs- und Vorarbeitenstelle Neuwerk, Cuxhaven (als Obmann)  
Dr. Ing. LUCK, Forschungsstelle für Insel- und Küstenschutz, Norderney  
Dipl.-Ing. RICHTER, Wasser- und Schiffsamt Tönning  
Dipl.-Ing. TAUBERT, Amt für Land- und Wasserwirtschaft Husum  
Dipl.-Ing. WIELAND, Amt für Land- und Wasserwirtschaft Heide, Dezernat Gewässerkunde, Büsum

Dieses erste Teilprogramm mit Schwerpunkt vor der Westküste Schleswig-Holsteins wurde noch in 1974 vom KFKI verabschiedet und dann vom Bundesministerium für Forschung und Technologie (BMFT) ab 1975 finanziell gefördert. Die Zielsetzung wurde folgendermaßen definiert:

- a) Erarbeitung einer großräumigen und zusammenhängenden Gezeitenstromdarstellung (Gezeitenstromatlas) auf der Basis eines ausreichend dichten Meßnetzes für den Küstenraum zwischen der Insel Sylt und der Außenelbe, seewärts begrenzt etwa durch die 15-m-Tiefenlinie. Sie soll u. a. Darstellungen des synoptischen Strömungsverlaufs bei mittlerer Tide (stündliche Stromkarten), der maximalen Flut- und Ebbestromgeschwindigkeiten und der zugehörigen Richtungen, der Geschwindigkeitsintegrale (Stromwege) sowie der Kenterpunktsverspätungen enthalten.
- b) Erweiterung der Kenntnisse über die unter Windeinfluß entstehenden und maßgebend durch die topographische Struktur der Küste beeinflussten Triftstromsysteme.
- c) Erfassung der vorhandenen aperiodischen Zirkulationen und küstenparallelen Wasserversetzungen (soweit sie nicht meteorologisch bedingt sind) und Analyse der dynamischen Ursachen. Hierbei handelt es sich im wesentlichen um die Berechnung des Reststromes nach Elimination meteorologisch bedingter Strömungskomponenten.
- d) Parallel zu den hier vorgesehenen Strömungsmessungen sollen entsprechend einem gesondert vorgelegten Programm hydrodynamisch-numerische Rechenmodelle für das deutsche Nordseeküstengebiet entwickelt werden. Ein Ziel des Strömungsmeßprogramms ist in diesem Zusammenhang die Bereitstellung von Daten als Randwerte und zur Kalibrierung der HN-Modelle.

Unter Berücksichtigung des bereits vorhandenen jüngeren Datenmaterials (Abb. 1) umfaßte diese ursprüngliche Konzeption Messungen an insgesamt 250 Stationen (jeweils über 2 bis 3 Wochen) sowie 10 Langzeitstationen (Abb.2). Die Messungen und Auswertungen wurden von den o.g. Mitgliedern der Projektgruppe und ihren Dienststellen betreut und durchgeführt. Aufgrund personeller Veränderungen und der Notwendigkeit, weitere Ämter zu beteiligen, setzte sich die Projektgruppe ab 1976 wie folgt zusammen:

Dipl.-Ing. FAHSE  
Ing. grad. MIESSNER, Wasser- und Schiffsamt Cuxhaven  
Dipl.-Ing. NIEMEYER, Forschungsstelle für Insel- und Küstenschutz, Norderney  
Dipl.-Ing. RICHTER  
Priv.-Doz. Dr. Ing. SIEFERT, Forschungs- und Vorarbeitenstelle Neuwerk, Cuxhaven (als Obmann)

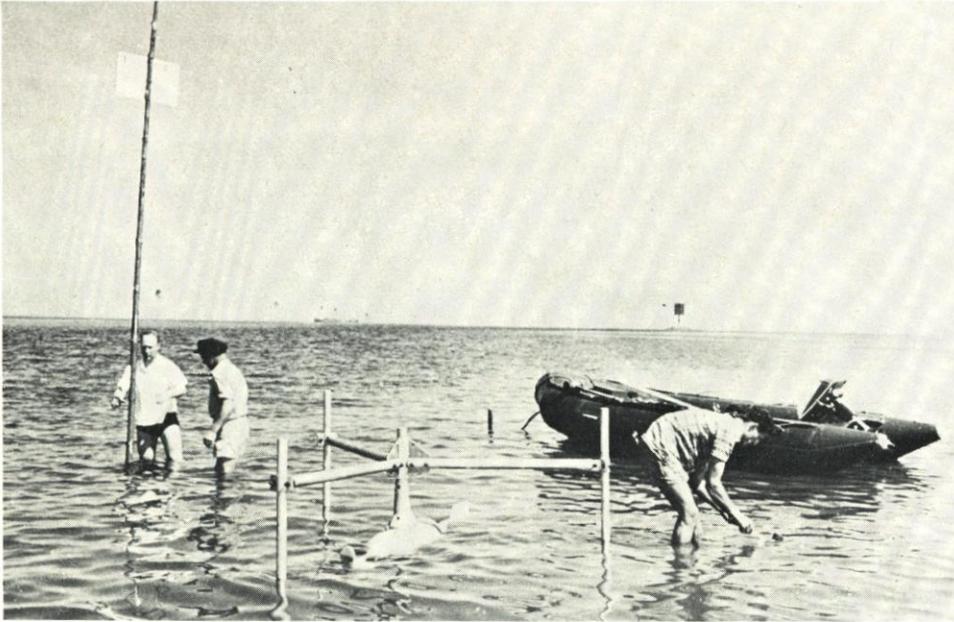


Abb. 3. Wattdauerstrommesser; Aufbau bei Tnw an demontierbarem, dreipfähligem Leichtmetallträger. Meßhöhe über Grund 0,3 bis 0,4 m (aus GÖHREN, 1974)

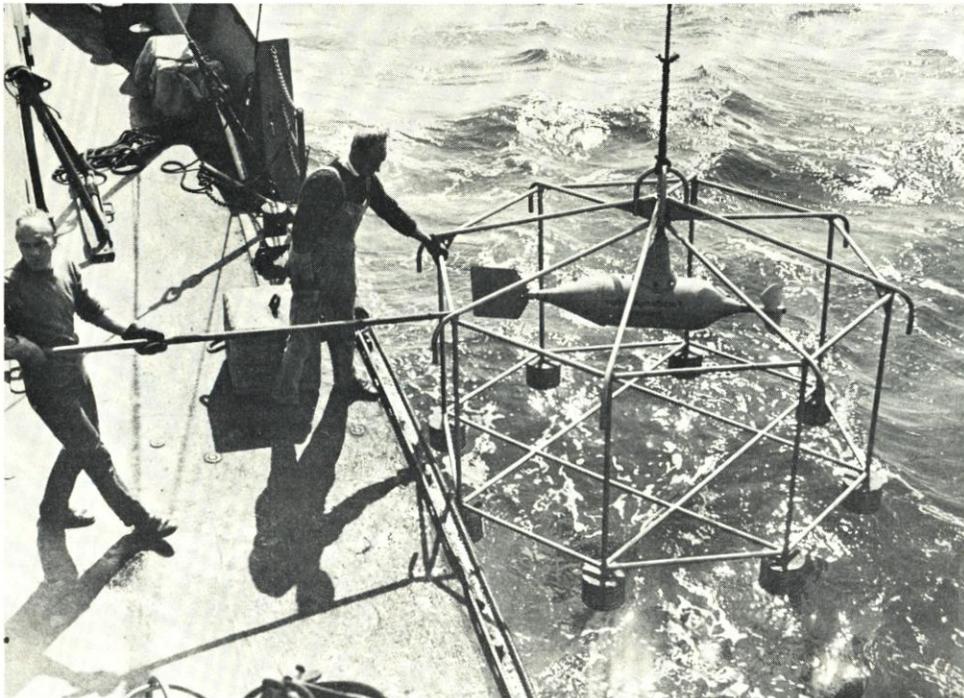


Abb. 4. Wattdauerstrommesser; Einsatz im Flachwassergebiet mit korb förmigem Geräteträger. Meßhöhe über Grund 1 m (aus GÖHREN, 1974)

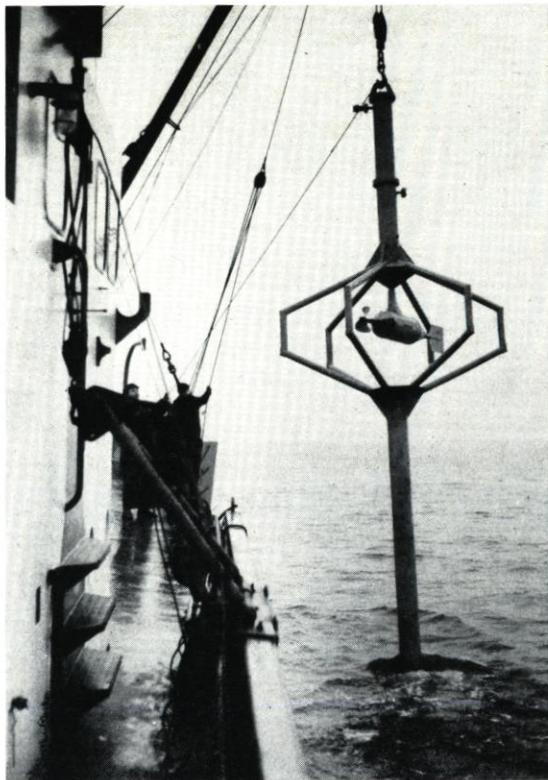


Abb. 5. Wattdauerstrommesser mit Trägergerüst zum Einspülen (aus GÖHREN, 1969)

Dipl.-Ing. TAUBERT

Dipl.-Ing. WIELAND

Nicht alle der oben gesteckten Ziele sind bisher erreicht. Dennoch ist das Untersuchungsmaterial so umfangreich geworden, daß eine Veröffentlichung der wichtigsten Daten möglich und sinnvoll ist.

## 2. Durchführung der Messungen

Man ging bei der Auslegung des Programms davon aus, die Messungen mit dem damals vorhandenen, aus dem Flachseestrommesser (DIETRICH und SIEDLER, 1963) entwickelten und von der Fa. Hydrowerkstätten gebauten „Wattdauerstrommeßgerät“ – kurz: Wattstrommesser – durchzuführen. Dieses Gerät hatte sich sehr gut bewährt und kann in verschiedenen Geräteträgern in flachem Watt und in Prielen eingesetzt werden (Abb. 3 bis 5). Neben etwa 10 von den beteiligten Dienststellen bereitgestellten Geräten wurden 16 über das KFKI beschaffte und vom BMFT finanzierte Geräte verwendet.

Das Meßgerät beschreibt GÖHREN (1968), der die Anregung zu seiner Entwicklung gegeben hatte:

*„Es besteht aus einer zylindrischen Gerätekapself, die um eine vertikale Achse drehbar gelagert und an einem dreibeinigen Meßgerüst aufgehängt ist. Durch eine Leitflosse wird die Längsachse*

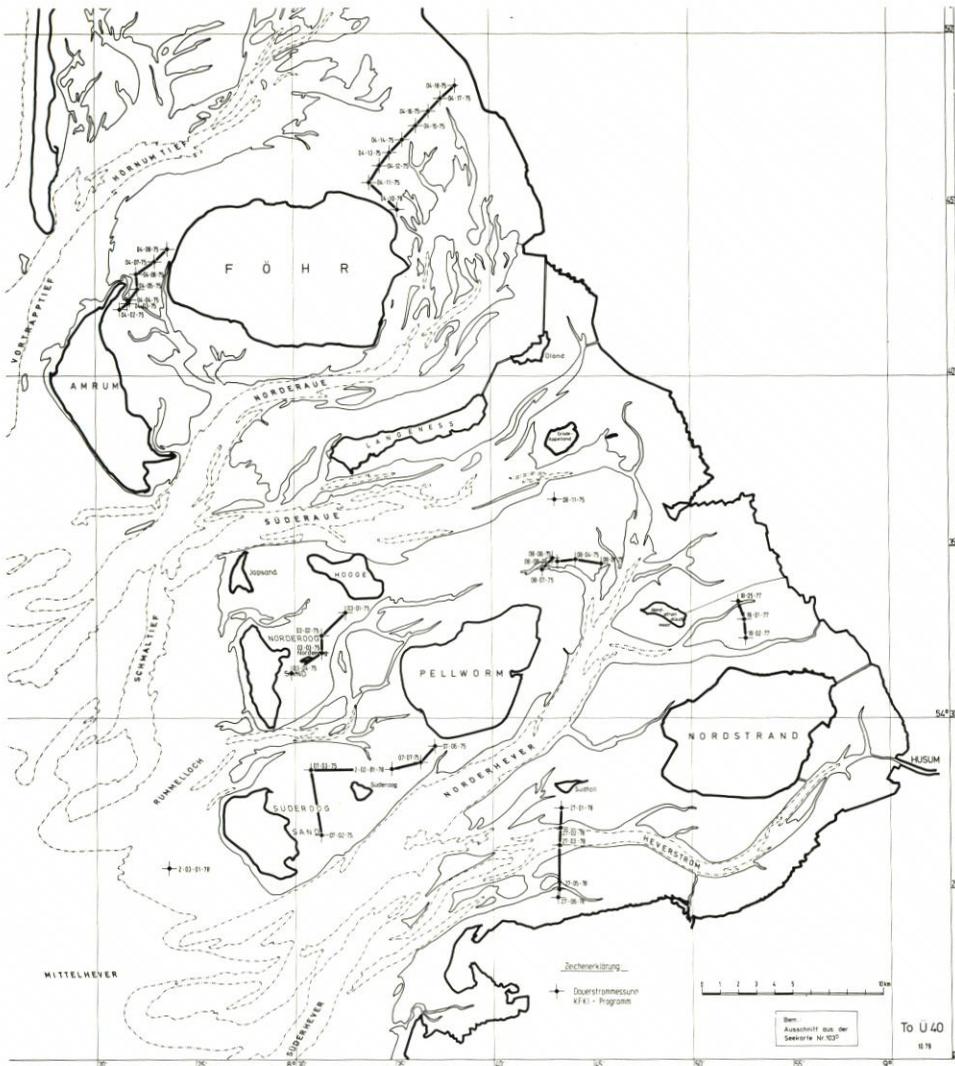


Abb. 6. Lageplan mit Meßpositionen, nördlicher Teil

parallel zur Stromrichtung gehalten. Eine leichtgängige Kunststoffschaufel, deren Umdrehungen über eine Magnetkupplung zur Registriereinheit in der Geräte kapsel übertragen werden, dient als Meßwertgeber für die Stromgeschwindigkeit. Die Anlaufgeschwindigkeit der Schaufel liegt bei 3 cm/s. Ihre Umdrehungen werden durch einen Schwimmerhebel gestoppt, wenn der Wasserspiegel bis zur Geräteoberkante absinkt.

Ein Kompaß für die Stromrichtungsanzeige und die Registriereinheit – Uhrwerk, Zählwerk und Registrierfilmgerät – befinden sich in der Kapsel. Registriert wird in konstanten Zeitabständen von 300 bzw. 600 Sekunden über einen Zeitraum von zwei bis drei Wochen.“

In Einzelfällen wurden auch noch Schaufelräder in größeren Wassertiefen eingesetzt. Die Funktionsweise dieser von RAUSCHELBACH entwickelten ozeanographischen Meßgeräte beschreiben JOSEPH (1948) und SCHULTZ (1952).

Es war vorgesehen, mit den genannten Geräten Messungen auf den in Abb. 2 dargestellten Profilen durchzuführen, wobei an jeder Station über mindestens 14 Tage Daten registriert

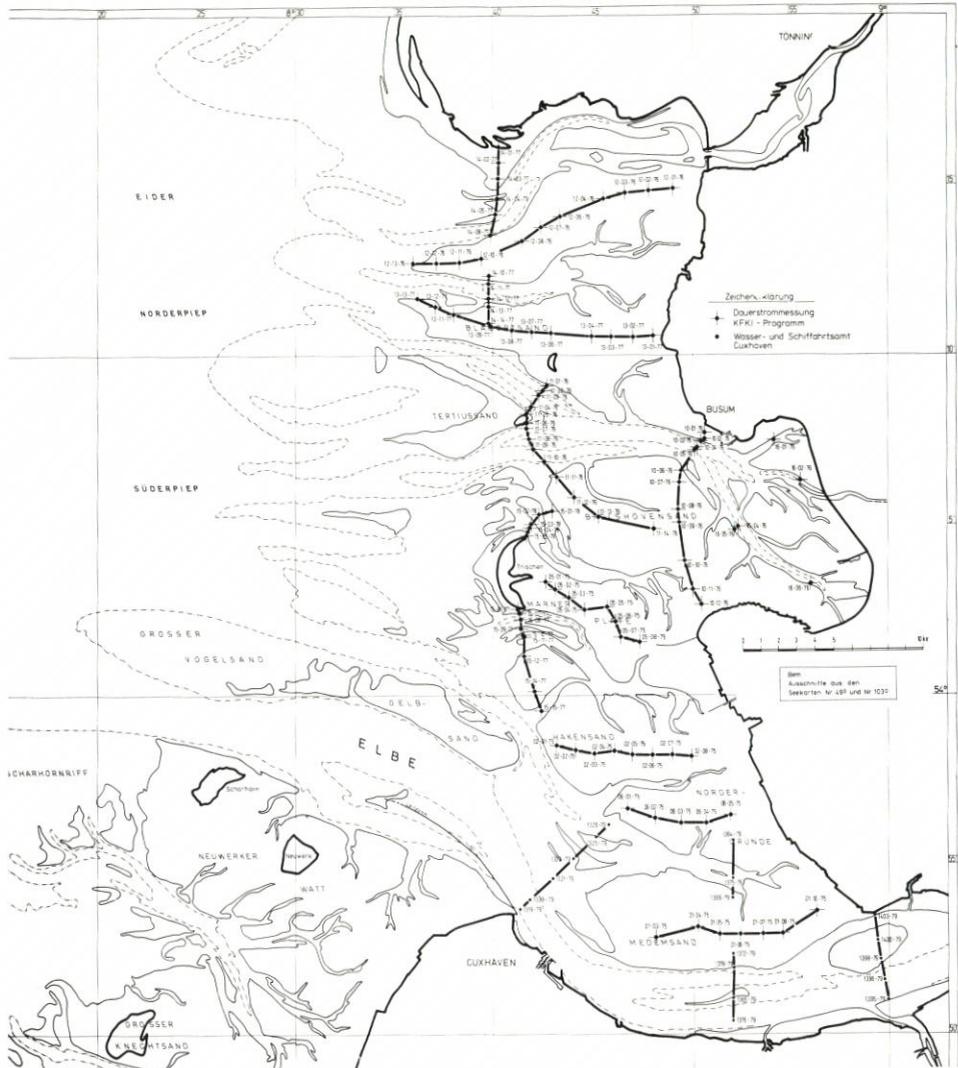


Abb. 7. Lageplan mit Meßpositionen, südlicher Teil

werden sollten. Das Programm sollte etwa drei Jahre dauern und hätte damit Ende 1977 abgeschlossen sein sollen. Wegen verschiedener Geräteausfälle und wegen lange anhaltender ungünstiger Wetterlagen mußte der Meßzeitraum dann aber bis 1979 ausgedehnt werden. Die Langzeitprofile werden sogar bis in das Jahr 1980 hinein betrieben, so daß deren Ergebnisse in der vorgelegten Arbeit noch nicht enthalten sind. Ebenso fehlt die Auswertung einiger Messungen, die mit konventionellen und daher zeitraubenden Registrärsätzen aufgezeichnet wurden. Dies beeinträchtigt jedoch nicht die hier vorgesehene Übersicht.

Die Lage der Meßpositionen mit ihren Bezeichnungen geht aus Abb. 6 und 7 hervor.

Die Wattstrommesser wurden an den Flachwasserstationen und in den Prieln vom Schiff aus in korbformigen Geräteträgern mit einer Meßhöhe von 1,0m über Grund abgesetzt (Abb. 4). An den Wattstationen wurden neben diesen hauptsächlich dreipfählige, leicht an Ort und Stelle zusammensetzbare Träger verwendet (Abb. 3). Um längere Fußwege in dem teils

sehr schlickigen Gelände zu vermeiden, wurden Geräte und -träger bei Thw mit Schlauchbooten an die Positionen transportiert und deponiert und dann später im trockenen Watt aufgebaut. Die Standortbestimmung erfolgte über Hi-Fix.

1971 bis 1973 hatte GÖHREN (1974) bereits im Rahmen des Schwerpunktprogramms „Sandbewegung im deutschen Küstenraum“ der Deutschen Forschungsgemeinschaft umfangreiche Messungen vor dem Wattgebiet zwischen Amrum und Trischen durchgeführt (Abb. 1). 1975 begannen die Untersuchungen des hier behandelten Programms, und zwar mit gemeinsamen Einsätzen des Amtes für Land- und Wasserwirtschaft Heide/Büsum, des Wasser- und Schiffsamtes Cuxhaven und der Forschungs- und Vorarbeitenstelle Neuwerk im südlichen Teil, d. h. im Bereich Medemsand – Nordergründe – Marner Plate – Hakensand (Abb. 7). Im folgenden Jahr verlagerte sich der Schwerpunkt der Untersuchungen weiter nach Norden in das Gebiet Dithmarscher Bucht, Tertius, Blauort und, als auch das Wasser- und Schiffsamt Tönning verstärkt teilnahm, weiter bis in die Außeneider (Abb. 7). Etwa ab 1977 lag das Hauptmeßgebiet nördlich von Eiderstedt im Bereich des Amtes für Land- und Wasserwirtschaft Husum (Abb. 6), wo bis einschl. 1979 gemessen wurde.

Da die Messungen im südlichen Teil des Untersuchungsgebietes nur zwei bis vier Jahre nach denen vor dem dortigen Watt stattfanden, ist noch eine gemeinsame Wertung all dieser Daten zulässig, denn sie können quasi-synoptisch gewertet werden.

### 3. Aufbereitung und ADV-Verarbeitung

#### 3.1 Aufbereitung der Meßfilme

Die im Rahmen des KFKI-Strömungsmeßprogramms vor der schleswig-holsteinischen Westküste und im Mündungsgebiet der Elbe gewonnenen Meßwerte wurden bei der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) aufbereitet und verarbeitet.

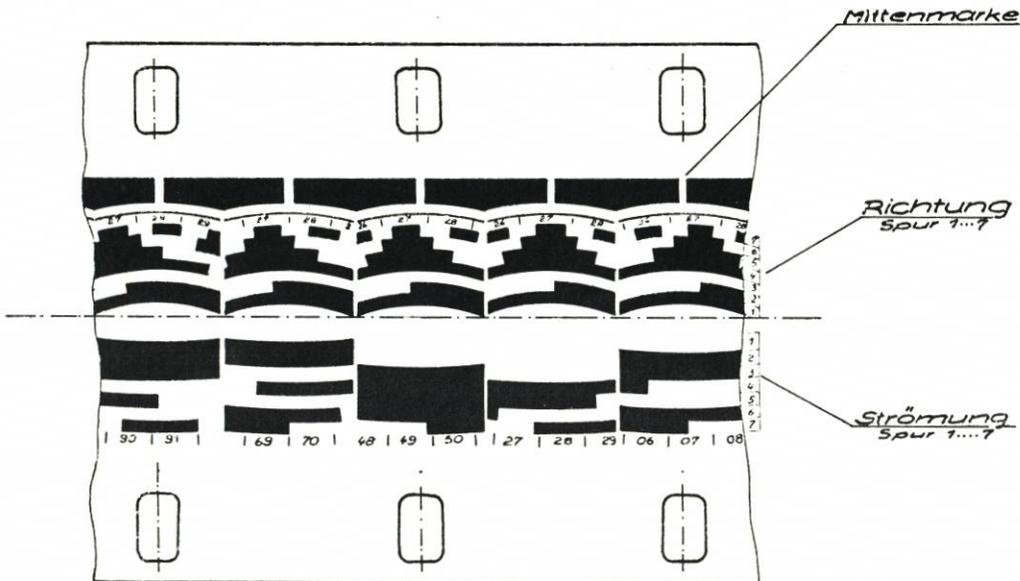


Abb. 8. 16-mm-Film mit codierter Aufzeichnung (Fa. Hydrowerkstätten, Kiel)

Für die automatische Ablesung werden die Meßwerte (Stromrichtung und Umdrehungen des Propellers) auf dem Film durch einen Hell-Dunkel-Code dargestellt. Sowohl für die Zählung der Umdrehungen als auch für die Richtungen stehen je sieben Spuren zur Verfügung, die eine Zählung von 000 bis 127 ermöglichen. Für die Richtung ergibt sich daraus eine Unterteilung der 360°-Teilung des Kompasses in 128 Teile zu jeweils 2,8°. Bei der Geschwindigkeit entspricht ein Teil der 128er-Teilung 3,18 cm/s.

Ein Filmausschnitt ist in Abb. 8 dargestellt. Die Steuerung der Bildablesung erfolgt durch die am oberen Bildrand angeordnete Mittenmarke.

Bei der BAW-Außenstelle Küste in Hamburg wurden die Meßwerte vom Film durch ein speziell von den Hydrowerkstätten für diese Zwecke entwickeltes Gerät abgelesen und mit Hilfe eines Facit-Lochers auf einen Lochstreifen übertragen. Dabei zeigte sich, daß die automatische Umsetzung der Meßwerte vom Film auf den Lochstreifen sehr von der Qualität der Filme abhängt und diese wiederum von der sorgfältigen Wartung der Meßgeräte und dem präzisen Einlegen der Filmkassetten. Einige Filme waren insgesamt so hell oder so dunkel, daß eine automatische Auswertung nicht möglich war. Andere hatten große Helligkeitsunterschiede in den einzelnen Spuren, die zu fehlerhaften Ablesungen bei einer mehr oder weniger großen Anzahl von Bildern führte. Hier zeigte sich auch eine Schwäche des Auswertegerätes, das sich nur auf einen hellen oder dunklen Film einstellen ließ, aber nicht die Justierung der Fotozellen für die einzelnen Spuren erlaubte.

Für die zeitliche Einordnung der Meßwerte wurden durch Überbelichtung einzelner Bilder Markierungen auf dem Film angebracht sowie Datum und Uhrzeit dieser Prüfkontakte auf einem Begleitblatt festgehalten. Aus dem zeitlichen Abstand zwischen zwei Prüfkontakten und der Anzahl der Bilder konnte der Zeitabstand von Bild zu Bild ermittelt werden.

Zur Identifizierung der einzelnen Meßpunkte und zur weiteren Bearbeitung der Meßwerte war eine Anzahl von Kenndaten erforderlich, die in dem eigens dafür entwickelten Begleitblatt festgehalten und vor der Auswertung abgelocht und in den Rechner eingegeben wurden, und zwar über die Dienststelle, Hersteller-Nr. und die Eichkonstante bzw. Eichgleichung des Meßgerätes, die Meßstelle sowie den zugeordneten Pegel und die nächstgelegene Windmeßstation.

Für die Aufbereitung der Meßwerte mußte zunächst ein Erstdruck zur Erkennung der Fehler angefertigt und dieser dann von Hand korrigiert werden. Dazu wurden die Zählerstands-differenzen zwischen den einzelnen Bildern errechnet. Der Differenz zwischen zwei Bildern wurden die Strömungsrichtung und die Nummer des zweiten Bildes zugeordnet und diese Werte dann in der in Abb. 9 dargestellten Form ausgedruckt sowie als Plattendatei im Rechner gespeichert. Danach war es möglich, die im Ausdruck erkennbaren fehlerhaften Werte über ein Datensichtgerät in der Plattendatei von Hand zu korrigieren. Ferner konnten anhand des Ausdruckes für jede einzelne Tide Beginn und Ende von Flut und Ebbe festgelegt werden. Die jeweiligen Nummern der Meßwerte wurden abgelocht und für die weitere Auswertung im Elektronenrechner gespeichert. Damit war die Gesamtheit der Meßwerte in einzelne Berechnungsabschnitte einteilbar.

Um Zusammenhänge zwischen den Strömungswerten und den Wasserstands- sowie Windwerten bei der späteren Auswertung erkennen zu können, wurden Thw- und Tnw-Höhen und -Zeiten sowie Windangaben, soweit sie über 4 Bft lagen, ebenfalls abgelocht und im Rechner gespeichert.



### 3.2 Elektronische Auswertung

Bei der Auswertung der hier angesprochenen Strömungsmessungen ist im wesentlichen auf die von GÖHREN (1965) beschriebenen Grundsätze und Computerprogramme zurückgegriffen worden. So wurde auch hier die graphische Darstellung der Meßergebnisse in Form von Ganglinien für Stromrichtungen und Stromgeschwindigkeiten gewählt, um einen Einblick in die Charakteristik der Strömungsvorgänge zu erhalten.

Auf die elektronische Berechnung der mittleren Stromgeschwindigkeiten für die einzelnen Stromintervalle wurde verzichtet, weil sie für Drehströmungen keine repräsentativen Kennwerte liefern. Der Reststromvektor für jedes einzelne Stromintervall wurde dagegen berechnet und die Aneinanderreihung der einzelnen Reststromvektoren als Vektorenzug graphisch dargestellt.

Für die ADV-Auswertung der Messungen wurden

- die auf den Lochstreifen vom Film übertragenen Meßwerte eingelesen und in die Datei SRD.LS. (Kartei-Nr.) abgelegt,
- die zur Beschreibung der Meßperiode erforderlichen Angaben des Datenblattes BAW 086.01 (Tab.2) und die Grenzen der Berechnungsabschnitte über ein Sichtgerät in der Datei SRD.HD. (Kartei-Nr.) abgelegt,
- die aus den Wasserstandslisten des zugeordneten Pegels entnommenen Thw- und Tnw-Höhen und -Zeiten in der Datei SRD.TIDE. (Pegelname) abgelegt,
- die Windwerte der zugeordneten Windmeßstation, soweit die Richtungsangaben in Grad der 360°-Teilung erfolgen, in der Datei SRD.WDGD 82. (Name der Windmeßstation) abgelegt. Die Ablage geht dagegen in die Datei SRD.WDCD 83. (Name der Windmeßstation) bei Richtungsangaben in Code-Zahlen.

Aus den Werten der Datei SRD.LS. werden, wie oben beschrieben, die Zählerstandsdifferenzen des Umdrehungszählers errechnet und diese mit den Meßwertnummern und den Richtungsangaben in der Datei SRD.PL. (Kartei-Nr.) abgelegt sowie gleichzeitig ein Erstdruck für die Korrektur gefertigt.

Nach der Fehlerkorrektur erfolgt unter Zuhilfenahme der Werte aus der Datei SRD.HD. die Umrechnung der Code-Werte aus der Datei SRD.PL. in Grad der 360°-Teilung für die Strömungsrichtung und in cm/s für die Strömungsgeschwindigkeit. Gleichzeitig werden die Meßwertnummern ersetzt durch die Angabe des zeitlichen Abstandes der Einzelmessung von 00<sup>00</sup> Uhr des ersten Meßtages in Minuten.

Alle Meßwerte außerhalb der vorgegebenen Berechnungsabschnitte werden überlesen. Im gleichen Rechengang werden für jeden Berechnungsabschnitt die Anzahl der in ihm enthaltenen Meßwerte und die Maximalgeschwindigkeit ermittelt.

Die gewonnenen Werte werden in der Datei SRD.FT. (Kartei-Nr.) abgelegt.

Es werden als Liste ausgegeben:

- Angaben über Meßort und Meßzeit,
- Wasserstandshöhen und -zeiten aus SRD.TIDE,
- Windangaben aus SRD.WDGD 82. oder SRD.WDCD 83.,
- für jeden Meßwert innerhalb der Berechnungsabschnitte der zeitliche Abstand in Minuten von 00<sup>00</sup> Uhr des ersten Meßtages, die Strömungsrichtung in Grad der 360°-Teilung und die Geschwindigkeit in cm/s sowie
- für jeden Berechnungsabschnitt die Anzahl der in ihm enthaltenen Meßwerte und die Größe der Maximalgeschwindigkeit.

Über ein Zeichenprogramm werden folgende Darstellungen gegeben:

- Datum,

FS Neuwerk Kartei Nr. 420  
 Pos: 06-05-75 Lage: GK 34 91220 59 78820  
 Pegel: Klotzenloch Wind: Scharhoern Bemerkungen: keine

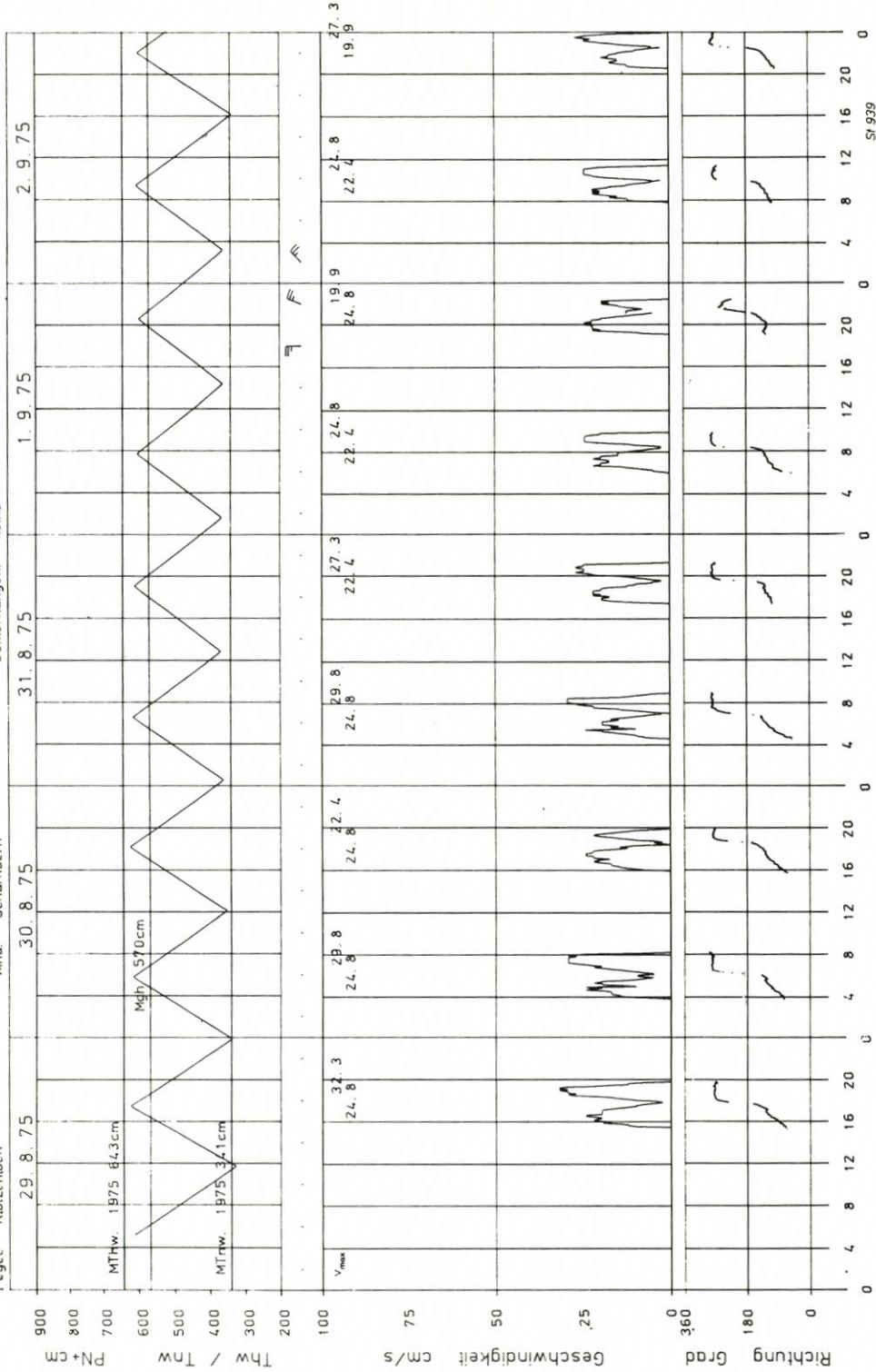


Abb. 10. Beispiel für eine Strömung mit ausgeprägter Flut- und Ebberichtung

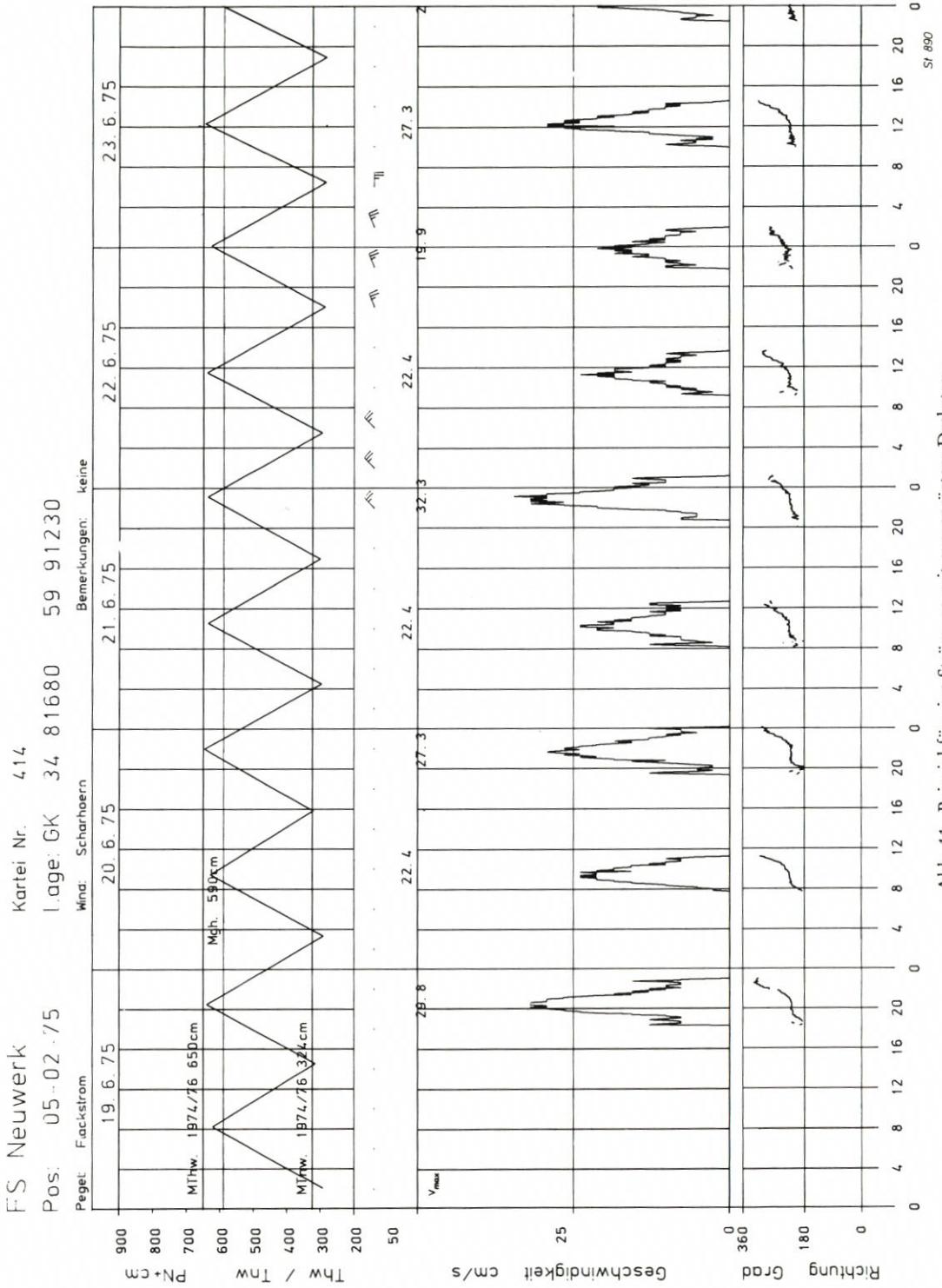


Abb. 11. Beispiel für eine Strömung mit ausgeprägtem Drehstrom

FS Neuwerk Kartei Nr. 405  
 Pos: 05-02-75 Lage: GK 34 81680 59 91230

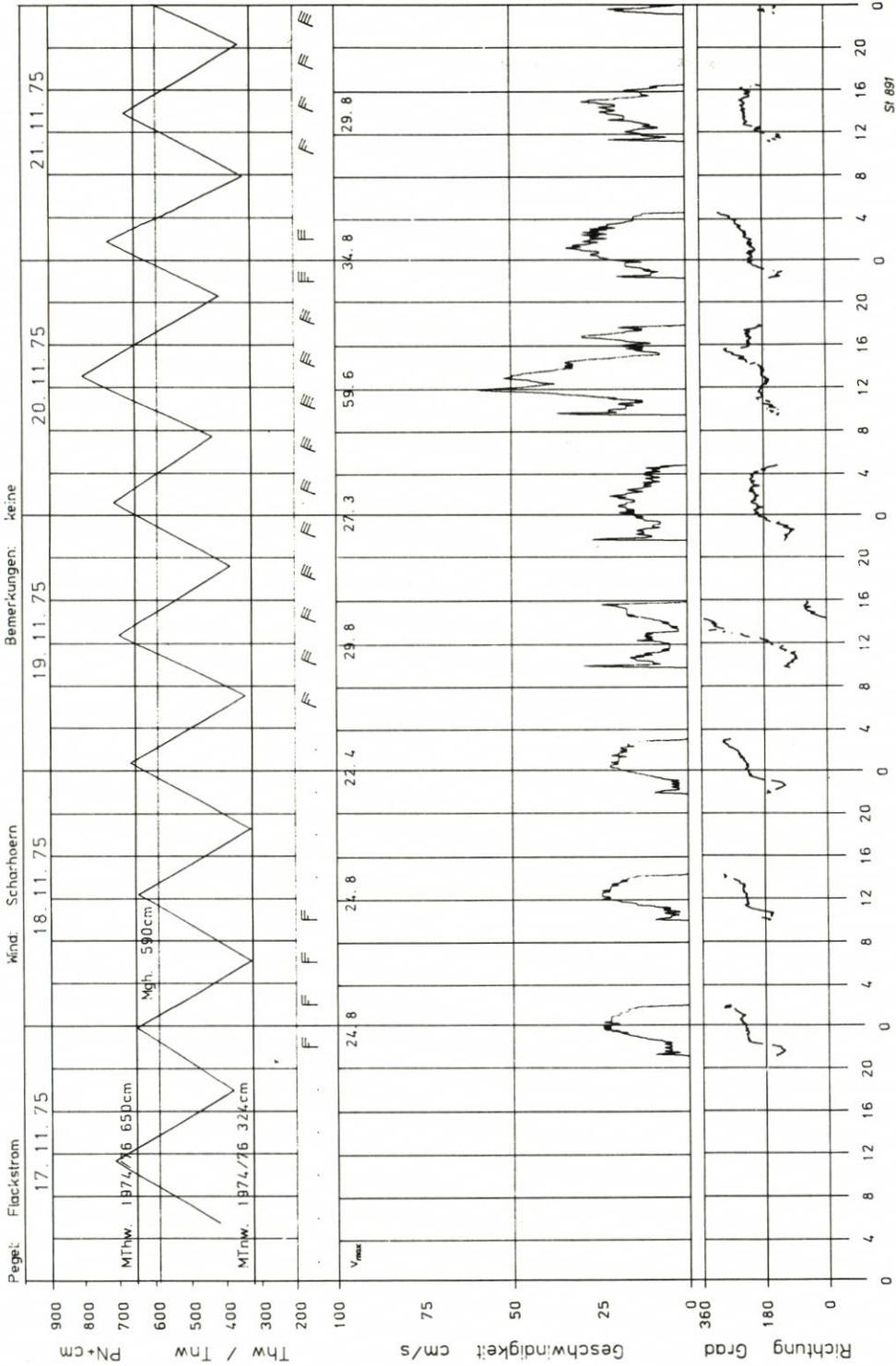


Abb. 12. Beispiel für eine Strömung mit Windeinfluß (Triftstrom)

- Verlauf von Thw und Tnw des Bezugspegels,
  - MThw und MTnw des Bezugspegels,
  - Verlauf der Windverhältnisse über 4 Bft,
  - Ganglinien der Strömungsrichtungen und -geschwindigkeiten und
  - Darstellung des Reststromvektorenzuges mit Nordrichtung und Maßstab.
- Die bei den Messungen gewonnenen Meßdaten sind mehrfach gesichert:
- Die Meßfilme verbleiben bei den messenden Dienststellen.
  - Die bei der Umsetzung der Meßwerte von den Filmen auf Lochstreifen gewonnenen Lochstreifen werden bei der BAW aufbewahrt.
  - Die Lochstreifen mit dem Inhalt der Datei SRD.FT. werden ebenfalls bei der BAW aufbewahrt.
  - Die Inhalte der Dateien SRD.LS., SRD.PL. und SRD.FT. werden auf den Sicherungsmagnetbändern des Rechenzentrums der BAW aufbewahrt.
  - Die graphischen Darstellungen der Messungen werden von der BAW auf Mikrofilm bzw. Mikro-fiches gesichert.

#### 4. Meßergebnisse

##### 4.1 Vorbemerkungen

Die Registrierungen der Dauerstrommessungen aus dem Meßprogramm wurden nach dem von GÖHREN (1969) beschriebenen Verfahren aufbereitet. Die Stromgeschwindigkeits- und Stromrichtungsganglinien sind zusammen mit den Tidewasserständen und Windangaben in Abb. 10 bis 12 als Beispiele in Form von Ganglinien dargestellt. Sie bilden die wichtigste Grundlage für die Beurteilung der lokalen Strömungsverhältnisse.

Nach den Vorschlägen von GÖHREN (1969) wurden weiterhin folgende charakteristische Stromkennwerte errechnet:

1. Maximale Flut- und Ebbestromgeschwindigkeiten ( $V_{f \max}$  und  $V_{e \max}$ ) und zugehörige Richtungen.
2. Reststromvektoren. Der Reststrom wird definiert als vektoriellcs Integral über die Strömung einer vollen Tidephase.

$$\bar{V} = \int_{K_e}^{K_f} \bar{v} dt$$

$\bar{V}$  ergibt sich auch aus der vektoriellen Addition des Flut- und Ebbestromvektors:

$$\bar{V} = \bar{V}_f + \bar{V}_e$$

Die Dimension ist km/Tide.

3. Der Triftstrom wird nach GÖHREN (1968) als vektorielle Differenz zwischen dem Reststrom der mittleren Tide und dem Reststrom der windbeeinflussten Tide ermittelt. Nach

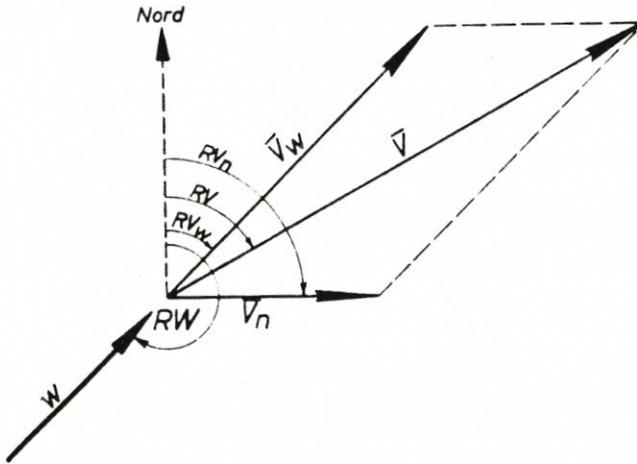
der folgenden Definitionsskizze gilt:

$$\bar{V}_w = \bar{V} - \bar{V}_n$$

$\bar{V}_w$  = Triftstromvektor

$\bar{V}$  = Resultierender Stromvektor der windbeeinflussten Meßstide

$\bar{V}_n$  = Resultierender Stromvektor der mittleren Tide



Die für jede Messung errechneten Stromvektoren sind in gesonderten graphischen Darstellungen aufgetragen, von denen Abb. 13 und 14 Beispiele zeigen.

Pos. 05 - 02 - 75

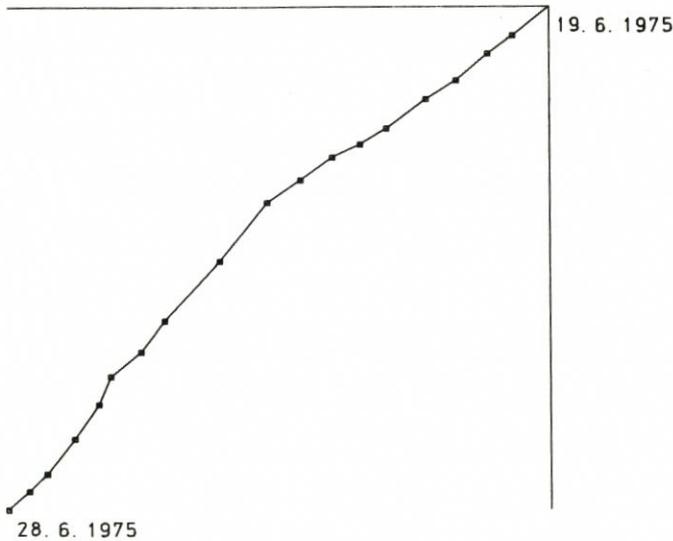
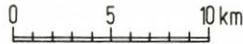


Abb. 13. Beispiel für einen Vektorzug

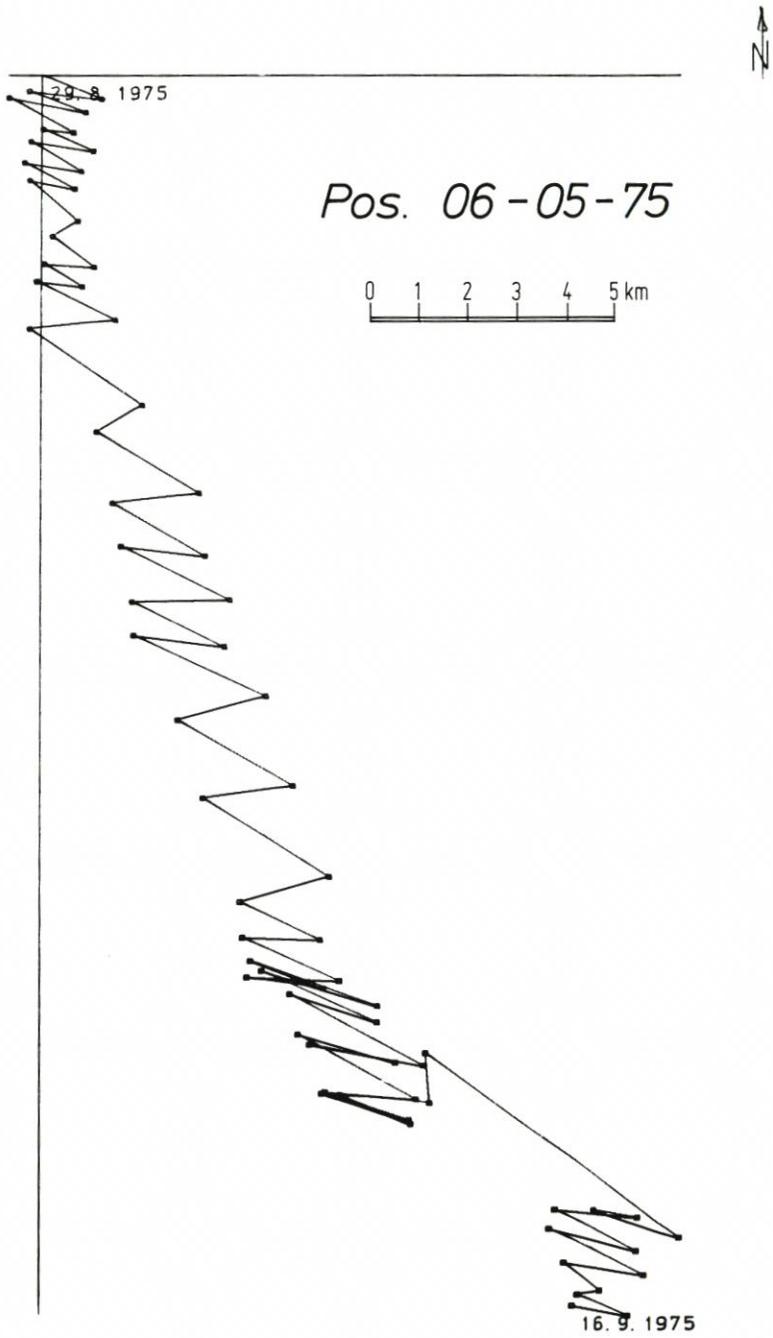


Abb. 14. Beispiel für einen Vektorzug mit Windeinfluß

## 4.2 Nordfriesisches Wattenmeer

Das Wattgebiet zwischen den beiden Inseln Amrum und Föhr ist durch mehrere Priele stark zergliedert. Das uneinheitliche Bild der Strömungsrichtungen sowohl bei Flut als auch bei Ebbe spiegelt die komplizierten topographischen Gegebenheiten wieder (Abb. 15 bis 18), wie sie auch schon KNOP (1961) für die 1950er Jahre darstellt. Die Größe der Strömungsgeschwindigkeiten erreicht im Mittel 30 cm/s nicht, einzelne Maximalwerte dagegen 65 cm/s bei Flut und bei Ebbe. An vier Meßpositionen zwischen Amrum und Föhr überwiegt der Flut-, an vier anderen der Ebbestrom. Aus dem Ergebnis der Reststromberechnung (Abb. 19) geht jedoch hervor, daß bei allen Meßpositionen ein kräftiger Wasserdurchsatz von Süden nach Norden stattfindet, allerdings mit unterschiedlicher Geschwindigkeit zwischen rd. 0,4 und 5,5 km/Tide.

Der Teil des Meßprofils von der Insel Föhr bis zum Festland ist topographisch klarer als der vorgenannte erste Abschnitt. Die gemessenen Strömungen entsprechen diesem optischen Eindruck durch gleichgerichtete Flut- und Ebberichtungen (Abb. 15 bis 19). Die mittleren Geschwindigkeiten bei Flut sind etwa doppelt so groß wie die bei Ebbe. Dieses Übergewicht der Flut in nordwestliche Richtung führt zu einem Reststrom, der bei allen Stationen nach Richtung und Größe ziemlich einheitlich 3 km/Tide beträgt (Abb. 19). Er schwankt zwischen 280° und 325° in der Richtung und bestätigt damit das qualitative Ergebnis von KNOP (1961). Bei westlichen Winden setzt der Triftstrom zwischen Amrum und Föhr in südöstliche Richtung, also gegen die Reststromrichtung. Zwischen Föhr und dem Festland sind dagegen der Triftstrom bei westlichen Winden wie der Reststrom von der Norderaue nach Nordwesten in das Hörnumtief gerichtet.

Südlich der Süderau und nördlich des Rummellochs, zwischen Hooge und Norderoog Sand, liegen die mittleren Strömungsgeschwindigkeiten ebenfalls unter 30 cm/s (Abb. 15 und 16). Die max. Ebbeströmungen sind deutlich stärker (bis 70 cm/s) als die max. Flutströmungen (Abb. 17 und 18). Östlich von Norderoog Sand wird das Watt bei Flut und Ebbe in entgegengesetzter Richtung zu dem Watt südlich von Hooge überströmt. Der schwache Reststrom (mit rd. 1 km/Tide) zeigt dennoch einheitlich nach Westen (Abb. 19), vom Rummelloch in das Hoogerloch.

Bei West- bis Südwestwinden wird diese Richtung umgekehrt, so daß ein Triftstrom vom Hoogerloch über das Rummelloch in die Norderhever entsteht, was durch Messungen im Profil Süderoog Sand – Pellworm bestätigt wird.

Die Messungen in letzterem Profil, einschl. an einer (Langzeit-)Station seawärts von Süderoog Sand, brachten etwas höhere mittlere Ebbe- als Flutstromgeschwindigkeiten (Abb. 15 und 16). Auch die Maximalwerte liegen bei Ebbe höher als bei Flut (bis 72 cm/s; Abb. 17 und 18). Aus meßtechnischen Gründen konnten hier die Strömungsverhältnisse nur in den auf die Wattwasserscheide zuführenden Watrinnen erfaßt werden. Vom Rummelloch-West gespeist wird das Engelsley, von der Norderhever gespeist werden Blaubargley, Hundje und Steinloch.

Zwischen Süderoog und Pellworm herrscht ein Reststrom von 1 bis 2 km/Tide von der Norderhever nach NW in das Rummelloch. Dagegen überwiegt östlich von Süderoog Sand ein deutlicher Reststrom nach SO (Abb. 19). Das Ergebnis der Messung westlich dieses Sandes bestätigt den von GÖHREN (1974) festgestellten gegenläufigen Reststrom.

Im Wattgebiet nordöstlich von Pellworm werden während des Tideablaufs Wassermassen zwischen den drei Tidebecken Norderhever, Süderau und Rummelloch ausgetauscht: Bei Flut strömt aus Norderhever und Rummelloch einheitlich mit rd. 20 cm/s Wasser in die Süderau. Der Rückstrom bei Ebbe erfolgt mit rd. 30 cm/s über das Beensley, eine sich über

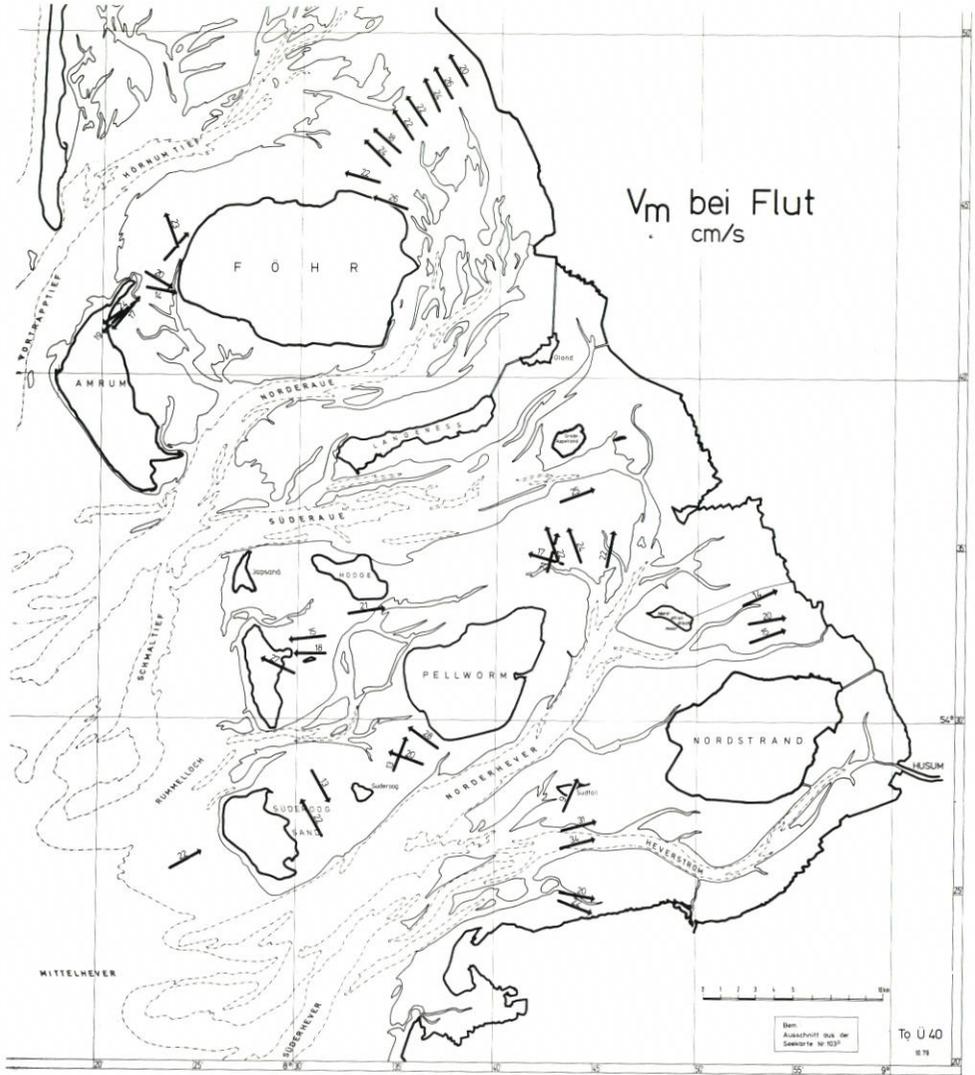


Abb. 15. Mittlere Strömungsverhältnisse bei Flut, nördl. Teil

die Wattwasserscheide hinweg bildende Watttrinne, in die Norderhever und z. T. weiter in das Rummelloch (Abb. 15 bis 18). Hierbei scheint sich eine Ringströmung einzustellen, weil auch bei Ebbe Wasser vom Rummelloch in Richtung Süderauae fließt.

Wie bei den mittleren überwiegt auch bei den maximalen Geschwindigkeiten der Ebbstrom. Er erreicht Werte über 90 cm/s, während es bei Flut nur rd. 60 cm/s sind.

Die Dominanz des Ebbstroms bestimmt die Reststromverhältnisse: Von der Norderhever setzt ein Strom mit rd. 6 km/Tide über das Watt nach Norden in die Süderauae, gleichzeitig bildet sich ein Reststrom von rd. 3 km/Tide vom Beensley nach Westen in das Rummelloch. Die Norderhever ist in diesem Bereich also eine ausgesprochene Flutstromrinne (Abb. 19). Diese ausgeprägten Verhältnisse haben sich in den letzten 20 Jahren nicht geändert, wie ein Vergleich mit den Ergebnissen bei KNOP (1961) zeigt.

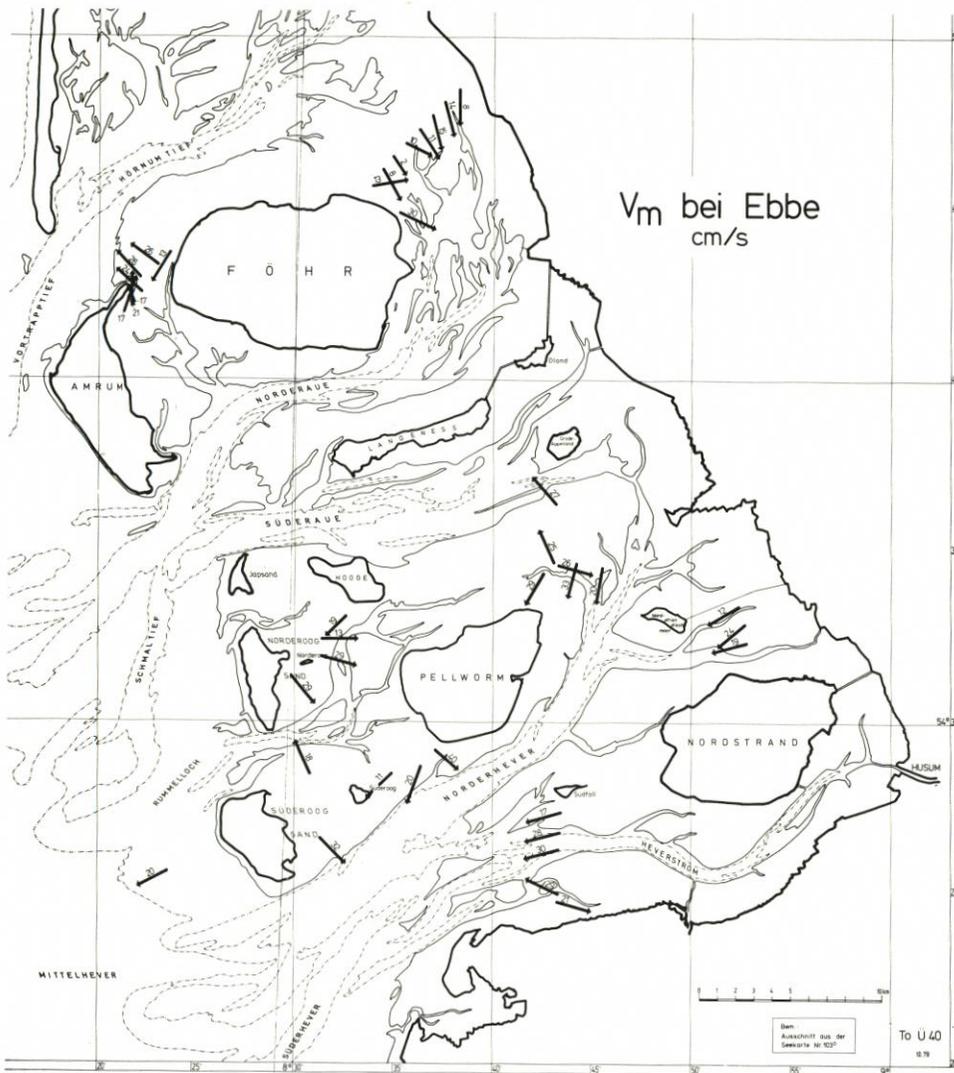


Abb. 16. Mittlere Strömungsverhältnisse bei Ebbe, nördl. Teil

Bei Winden zwischen West bis Südost wird ein Versatz von der Norderhever in die Süderauhe deutlich, also ebenfalls nach Norden, dagegen aus dem Rummelloch in die Süderauhe nach Nordosten.

Strömungen und Reststrom im Watt zwischen Nordstrandischmoor und der nahen Küste sind nur schwach ausgeprägt (Maximalwerte um 30 cm/s, Reststrom bei 1 km/Tide, Abb. 15 bis 19).

Das Heverstrom-Profil südlich von Südfall zeigt mittlere Strömungsgeschwindigkeiten bei 30 cm/s in der Rinne und um 20 cm/s auf dem Watt (Abb. 15 und 16), bei einer Richtungsdivergenz unmittelbar unter der Küste Eiderstedts. Die Höchstwerte erreichen über 90 cm/s im tieferen Wasser und etwa 40 cm/s im Watt (Abb. 17 und 18). Die Werte sind sämtlich erheblich niedriger als die von KNOP (1961) in diesem Gebiet gemessenen.

Der Reststrom ist in der Rinne mit etwa 2 km/Tide nach Osten (also stromauf) und in den nördlich bzw. südlich angrenzenden Watten mit 2 bzw. rd. 4 km/Tide nach NW (also stromab) gerichtet (Abb. 19).

#### 4.3 Wattenmeer zwischen Eiderstedt und Marnener Plate

Das Wattgebiet zwischen den Mündungen der Elbe und Eider wird gegliedert durch den dominanten Wattstrom Piep mit seinen landnahen Prielzweigen Wöhrdener Loch, Kronenloch und Sommerkoog-Steertloch, die bis in die Dithmarscher Bucht hineinreichen. Das nördlich anschließende Wesselburener Watt wird geteilt durch das Wesselburener Loch.

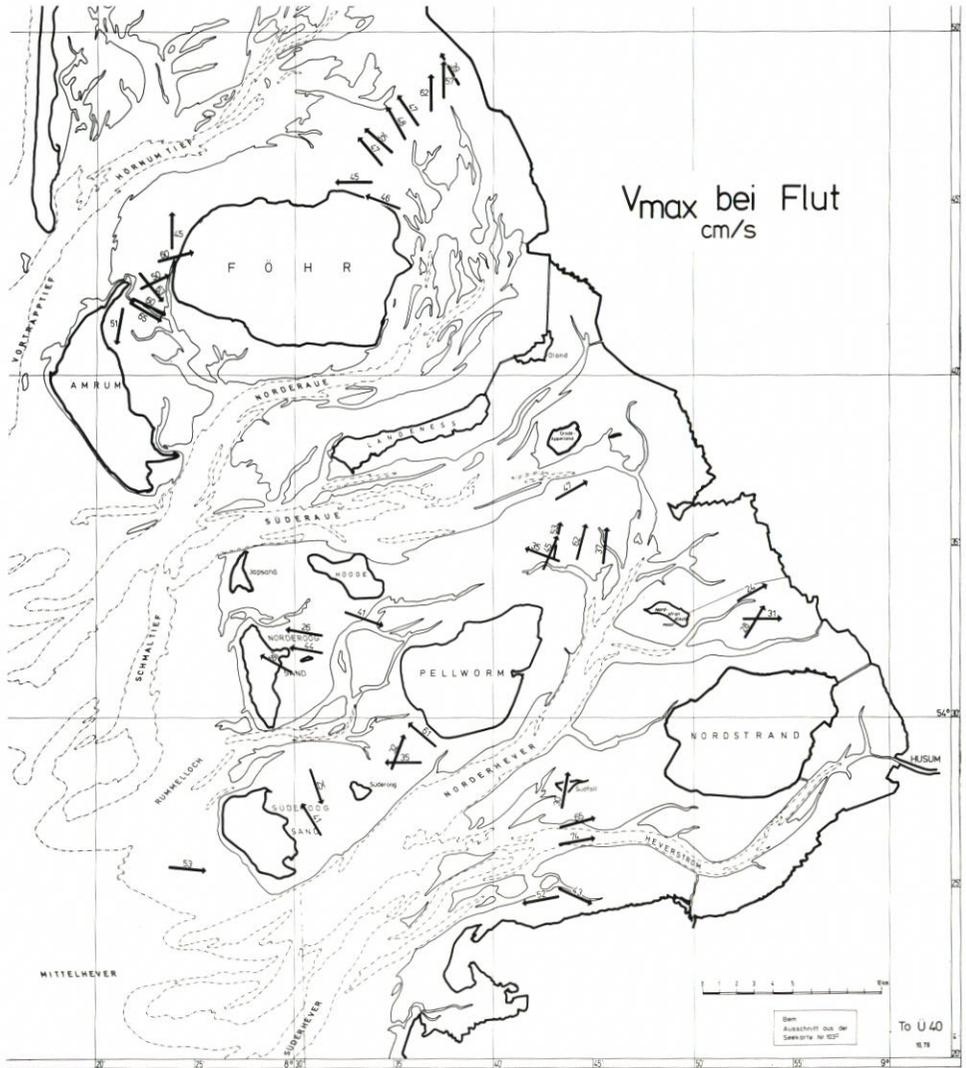


Abb. 17. Maximale Strömungswerte bei Flut, nördl. Teil

Südlich der Piep folgen nach dem Bielshövensand der Flakstrom, die Insel Trischen mit der Marner Plate, das Neufahrwasser, dann Mittelplate und Hakensand.

Die Meßstandorte wurden so gewählt, daß möglichst die Wattrücken erfaßt und von diesen Verbindungen durch die Wattströme zwischen den Außensänden hergestellt wurden. Darüber hinaus wurde ein Profil zur seawärtigen Begrenzung der Dithmarscher Bucht zwischen Büsum und Friedrichskoog-Spitze gelegt, und es wurden die Prielenden im Innern der Dithmarscher Bucht erfaßt (Abb. 7).

Südlich von Eiderstedt sollten die Strömungsverhältnisse in einem gemeinsamen Querprofil durch Außeneider und Wesselburener Loch mit anschließenden Wattten gemessen werden. Die Außeneider ist als stark veränderlich bekannt; das Wesselburener Loch gilt dagegen als ziemlich stabil.

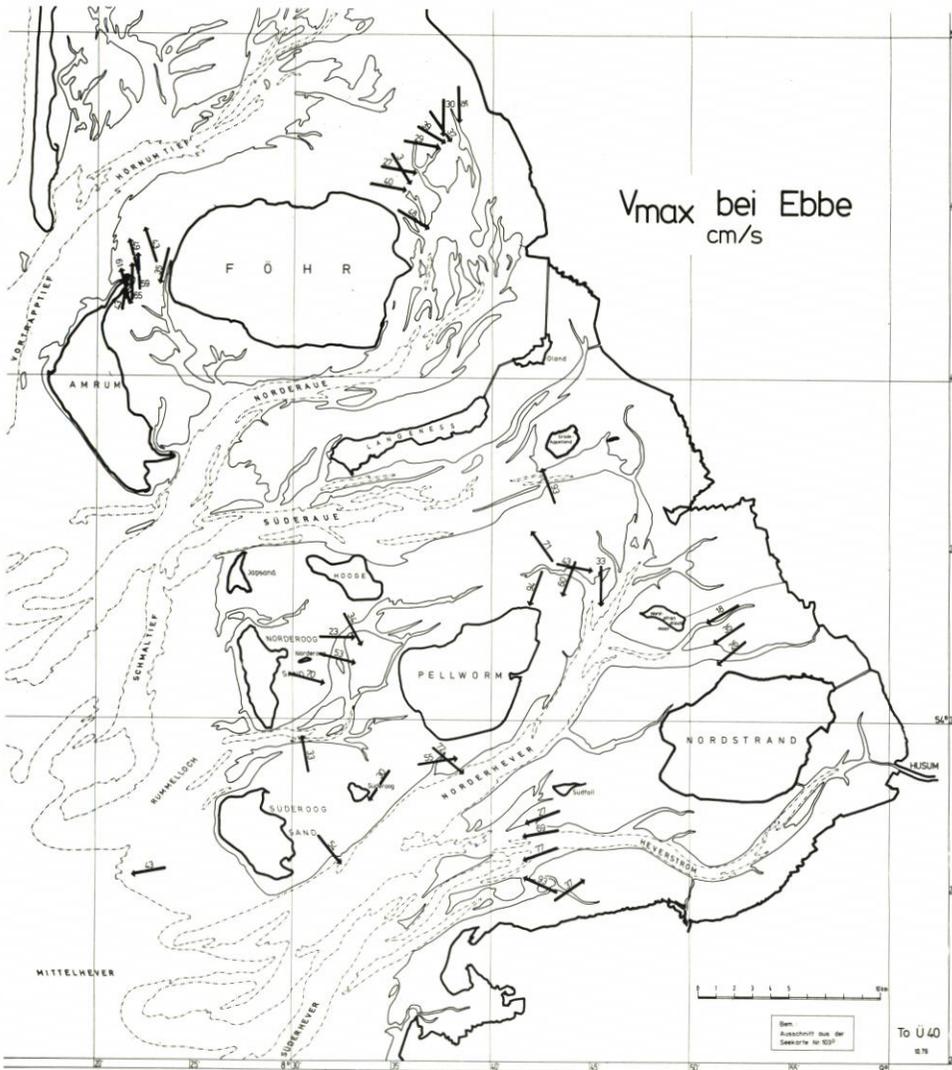


Abb. 18. Maximale Strömungswerte bei Ebbe, nördl. Teil





Abb. 19. Reststromkarte, nördl. Teil, ergänzt

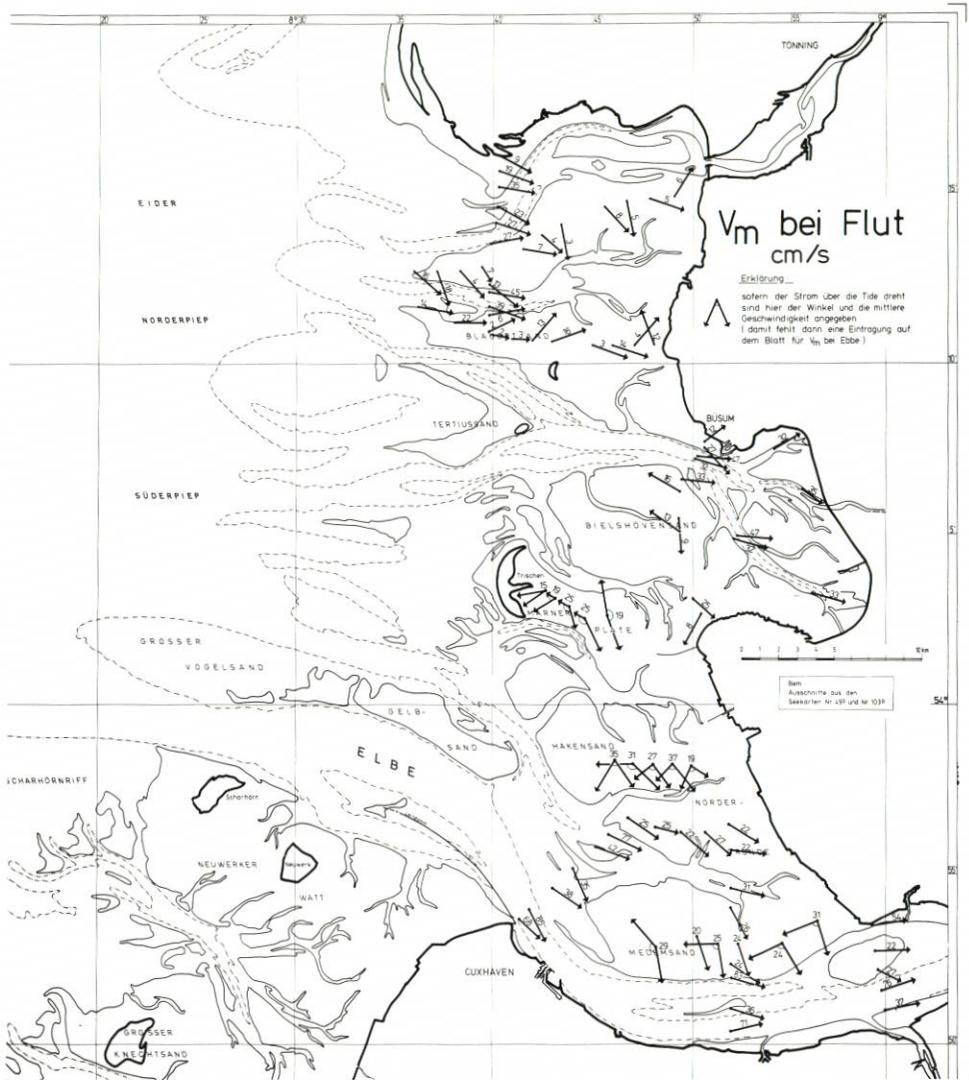


Abb. 20. Mittlere Strömungsverhältnisse bei Flut, südl. Teil

Die Strömungen sind, wie zu erwarten, bei Flut ostwärts und bei Ebbe westwärts gerichtet, mit topographisch bedingten Ablenkungen (Abb. 20 bis 23). Nördlich der Eiderrinne treten allgemein größere Ebbe- als Flutstromgeschwindigkeiten auf. Südlich davon, einschließlich Wesselburener Loch, überwiegt der Flutstrom, und auf dem Blauortsand ist der Ebbestrom wieder stärker als der Flutstrom. Auf den Wattflächen liegen die mittleren Geschwindigkeiten bei Werten nur bis 20 cm/s, während die Maxima bis 30 cm/s erreichen. In Außeneider und Wesselburener Loch dagegen erreichen die mittleren Geschwindigkeiten zwischen 20 und 40 cm/s und die maximalen knapp unter 60 cm/s (Eider) bzw. um 80 cm/s (Wesselburener Loch).

Aus den Restströmen erkennt man die unterschiedliche Topographie von Eidermündung und Wesselburener Loch: Nördlich der Eiderrinne prägen einige flache Nebenrinnen das Strömungsbild, und die Restströme sind hier ausgeprägt und weisen zur Hauptrinne hin. Im

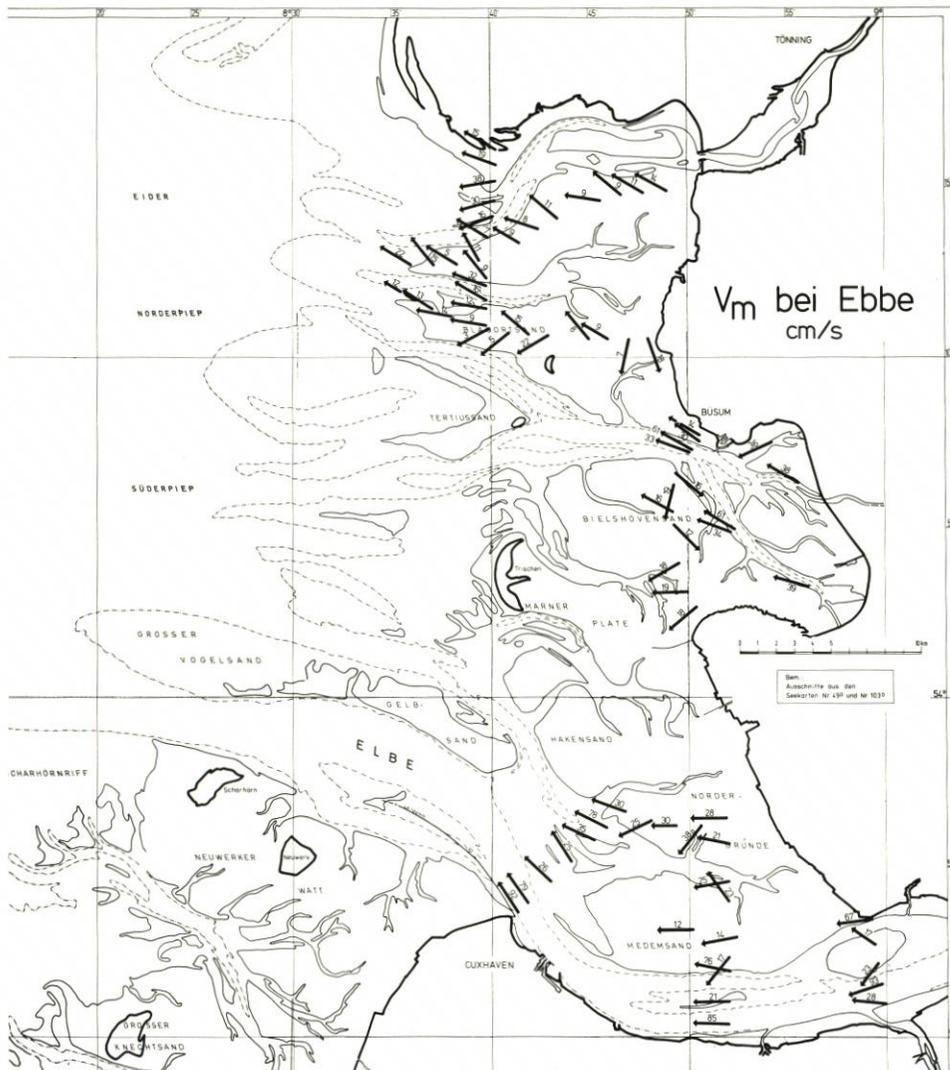


Abb. 21. Mittlere Strömungsverhältnisse bei Ebbe, südl. Teil

Wesselburener Loch sind die Restströme mit 2 km/Tide stromauf, auf den angrenzenden Watten mit 1 bis 2 km/Tide seewärts gerichtet; sie verlaufen parallel zur Rinne (Abb. 24).

Das Meßprofil auf dem Wesselburener Watt, dem Watrück zwischen Außeneider und dem Wattenstrom Wesselburener Loch, zeigt, daß das Watt von der Eider her beflutet wird und daß bei Ebbe das Wasser wieder in die Eider abfließt (Abb. 20 bis 23). Die einzige Ausnahme bildet die östlichste Station in Landnähe südwestlich des Eider-Sperrwerks. Hier sind beide Strömungsvektoren zur Eider hin gerichtet. Die Flutrichtung entspricht dort dem Verlauf eines kleinen Wattenfahrwassers zwischen Außeneider und Wesselburener Loch. Mit einer Ausnahme sind die mittleren Strömungsgeschwindigkeiten bei Ebbe größer als bei Flut, beide erreichen jedoch nur Werte um 10 cm/s, während die Maxima nicht über 20 cm/s steigen.

Daraus folgt auf Abb. 24, daß die Reststromvektoren auf einen sehr geringen Wasserver-

satz in die Außeneider hinein hindeuten, der praktisch vernachlässigt werden kann.

Südlich des Wesselburener Lochs liegt das Meßprofil 13 auf dem Wattrücken des Blauortsandes. Hier ist das Strömungsbild sehr uneinheitlich. Bei Flut herrscht die Strömung in östliche Richtung vor (Abb. 20 und 22), bei Ebbe streut die Strömung zwischen  $190^\circ$  und  $320^\circ$  stark, das Wasser fließt teils in das Wesselburener Loch, teils in die Norderpiep ab (Abb. 21 und 23). An den meisten Meßstationen ist die Ebbestromgeschwindigkeit größer als die Flutstromgeschwindigkeit, sowohl bei den mittleren als auch bei den Maximalgeschwindigkeiten. Erstere erreichen Werte bis 15 cm/s, letztere bis 30 cm/s, also nur unwesentlich mehr als auf dem nördlich benachbarten Wattrücken (s.o.).

Entsprechend schwach ist der Reststrom ausgebildet (Abb. 24). Er erreicht nur im Blauort-Priel (nordwestlich von Blauort) mit 2,5 km/Tide nach Norden einen nennenswerten Betrag und ist sonst vernachlässigbar klein.

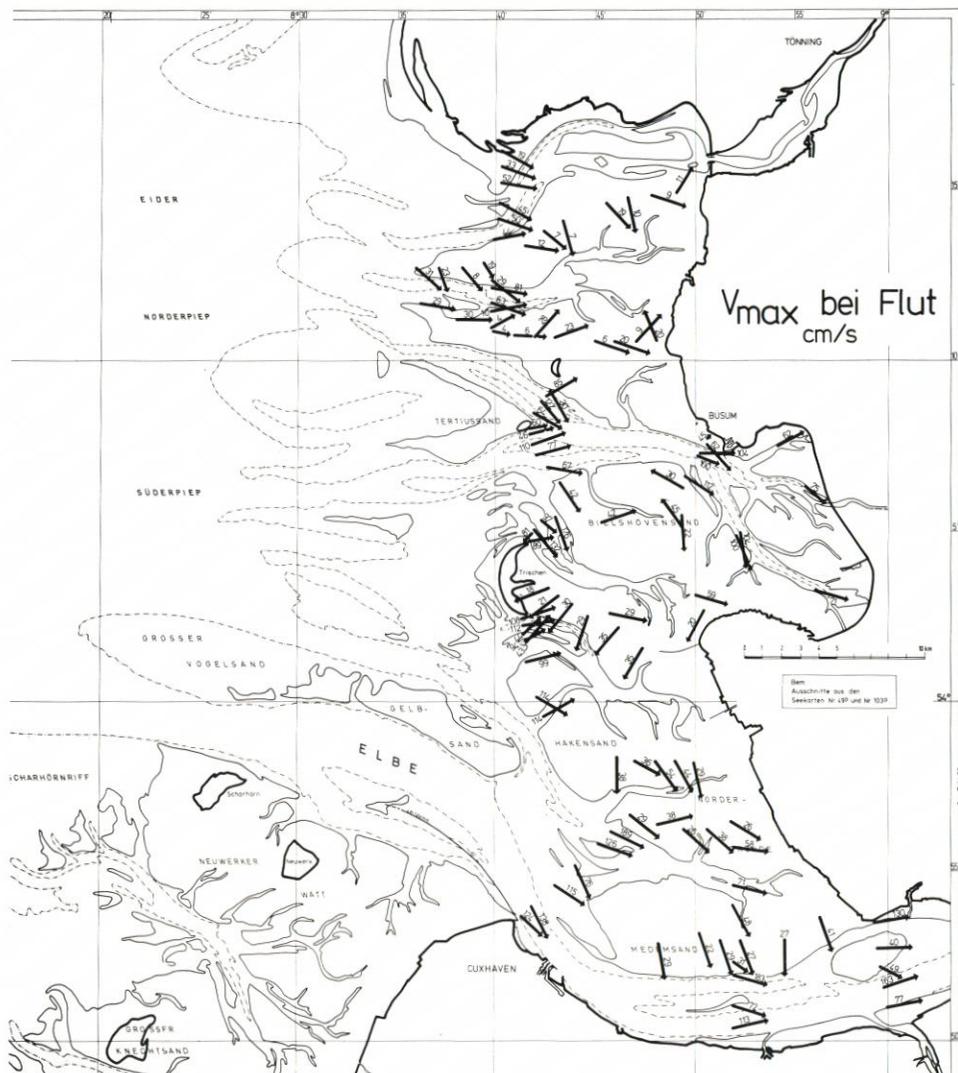


Abb. 22. Maximale Strömungswerte bei Flut, südl. Teil

In der Piep östlich des Tertiusandes liegen – ebenso wie aus dem Flakstrom nordöstlich und dem Neufahrwasser südlich von Trischen – nur die maximalen Tidestromgeschwindigkeiten ausgewertet vor (zwischen 46 und 124 cm/s, Abb. 22 und 23).

Der Reststrom ist hier im südlichen Querschnittsteil mit rd. 2 km/Tide landwärts gerichtet. Der seewärtige Reststrom im nördlichen Querschnittsteil wird durch den Tertiusand geteilt in die Norderpiep hinein und in den nördlichen Teil der Süderpiep (Abb. 24). Dies entspricht genau den Verhältnissen, wie sie GÖHREN (1971) für die Kleinen Knechtsände und die Robbenplatten als V-förmige Sandbänke nachwies. Analog dazu ist auf Abb. 24 auch ein landwärts, auf Tertius hin gerichteter Reststrompfeil angedeutet.

In der Piep südlich von Büsum liegen die mittleren Strömungsgeschwindigkeiten bei 30 bis 60 cm/s, die maximalen bei 100 bis 150 cm/s (Abb. 20 bis 23).

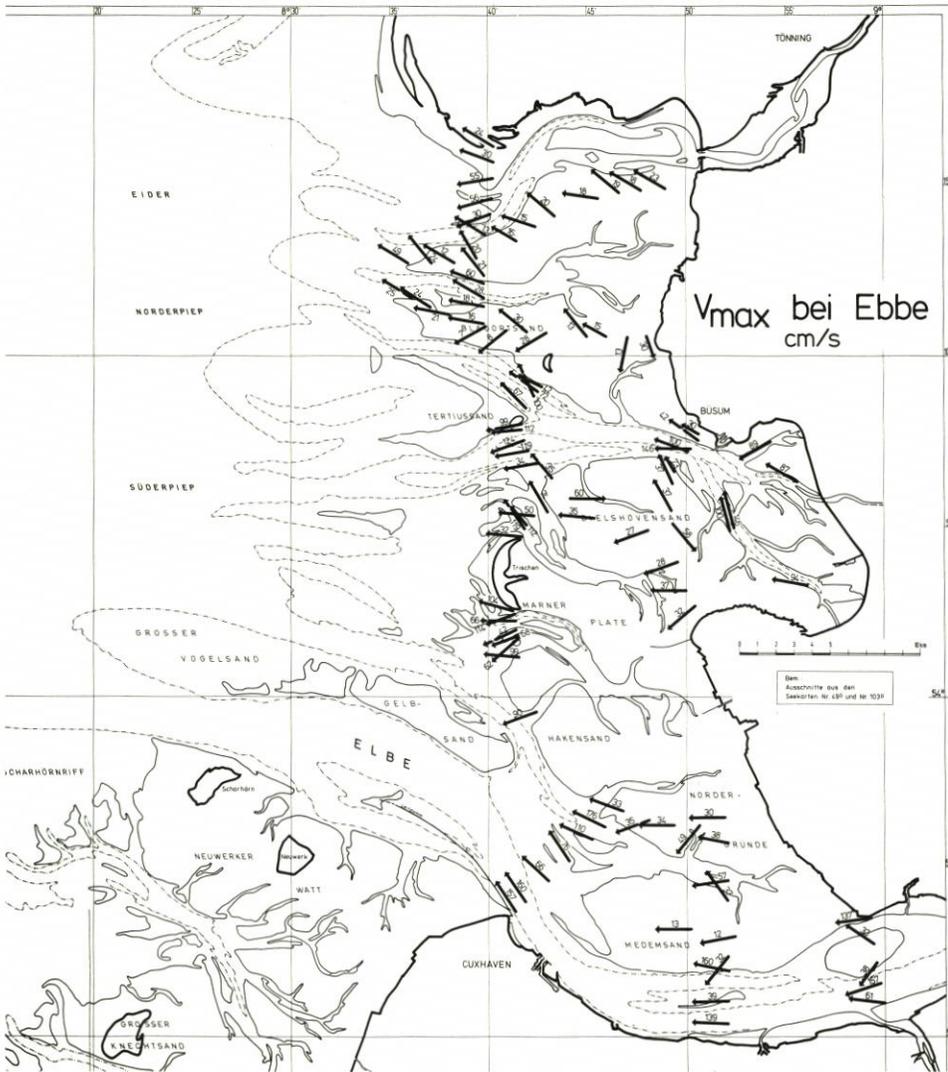


Abb. 23. Maximale Strömungswerte bei Ebbe, südl. Teil

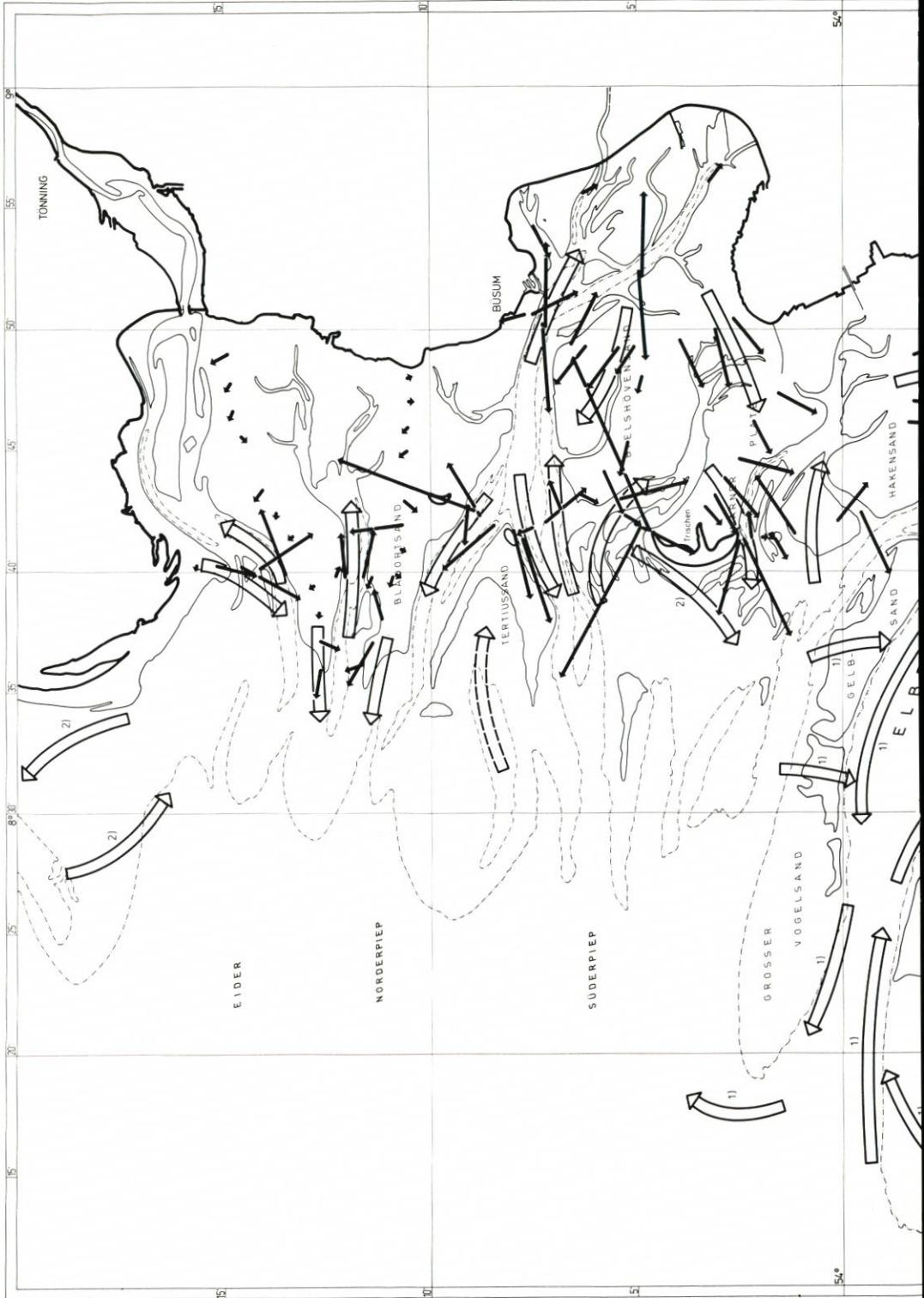




Abb. 24. Reststromkarte, südl. Teil, ergänzt

Der Reststrom ist im nördlichen Querschnittsteil in die Dithmarscher Bucht hinein gerichtet, im südlichen Querschnittsteil uneinheitlich (Abb. 24).

In den Prielen der Dithmarscher Bucht wurden mittlere Geschwindigkeiten zwischen 30 und 60 cm/s gemessen; die Maxima erreichten Werte zwischen 60 und 150 cm/s (Abb. 20 bis 23).

Die Strömungen im Flakstrom erreichen bei starker Umlenkung am Westhang des Bielshövensandes zwischen 70 und 180 cm/s (Abb. 22 und 23). Im nördlichen Querschnittsteil ist der Reststrom stromauf, im südlichen stromab gerichtet (Abb. 24).

Auf dem Bielshövensand sind die mittleren Strömungsgeschwindigkeiten (unter 20 cm/s) ebenso niedrig wie auf den nördlich anschließenden Wattrücken (Abb. 20 und 21). Die maximalen Geschwindigkeiten dagegen erreichen Werte bis 60 cm/s und sind damit erheblich stärker (Abb. 22 und 23).

Der Reststrom weist im nördlichen Wattgebiet aus dem Sommerkoog-Steertloch über den Sand mit rd. 2 km/Tide in die Piep, vor Friedrichskoog dagegen mit rd. 2,5 km/Tide nach Südwesten über den Oberlauf des Flakstromes und über die Marner Plate hinweg in das Neufahrwasser.

#### 4.4 Marner Plate bis Unterelbe

Auf der Marner Plate, dem Hakensand, den Nordergründen und dem Medemsand wurden die Strömungsverhältnisse jeweils auf den Wattwasserscheiden gemessen (Abb. 7). Ergänzend dazu sind Ergebnisse aus drei Profilen in der Unterelbe aufgenommen worden, die freundlicherweise vom Wasser- und Schiffahrtsamt Cuxhaven zur Verfügung gestellt wurden.

In den Watten des weiteren Elbmündungsgebietes sind Drehströmungen ohne ausgeprägte Flut- und Ebbephase sehr häufig (Abb. 20). Die Geschwindigkeiten liegen dabei im Mittel zwischen 15 und 40 cm/s, im Maximum zwischen 20 und 60 cm/s (Abb. 20 bis 23). Die vorherrschende Strömungsrichtung ist Südwest bis Südost.

Entsprechend ist der Reststrom in diesen Wattgebieten ausgebildet (Abb. 24): Er setzt mit rd. 2 km/Tide vom Flakstrom über die Marner Plate nach Südwest in das Neufahrwasser und aus dem Oberlauf dieses Wattstromes etwa gleich stark über Hakensand und Nordergründe nach Süden in das Klotzenloch. Auf dem Medemsand weist der Reststrom mit 2 bis 3 km/Tide nach Südost in die Unterelbe.

Die maximalen Strömungsgeschwindigkeiten im Neufahrwasser südlich von Trischen liegen zwischen 40 und 120 cm/s (Abb. 22 und 23). Der Reststrom ist unmittelbar unter Trischen mit rd. 4 km/Tide seewärts gerichtet, in den weiter südlich anschließenden Nebenarmen dagegen landwärts (Abb. 24).

In der tiefen Rinne der Unterelbe liegen die mittleren Geschwindigkeiten bei Werten um 80 bis 90 cm/s, reichen aber im Maximum bis an 160 cm/s (Abb. 20 bis 23).

Der Reststrom weist im nördlichen Querschnittsteil – trotz des hier zu erwartenden verstärkten Oberwasserabflusses – als Folge der Überströmung des Medemsandes stromauf. Im südlichen Querschnittsteil ist ein sehr starker seewärts gerichteter Reststrom vorhanden (Abb. 24). Zur Beurteilung der weiträumigen Verhältnisse sind im übrigen auch die aus früheren Messungen gewonnenen Reststromsysteme des Außenelbegebietes einschließlich der Watten bis zum Knechtsand nach GÖHREN (1969, 1974) sowie KOCH und LUCK (1973) aufgenommen.

#### 4.5 Zusammenfassung

Die beste großräumige Übersicht über die mittleren Tideverhältnisse geben die Reststromkarten auf Abb. 19 und 24.

Da aus dem nordfriesischen Wattenmeer nur erst ein Teil der Messungen analysiert werden konnte, kann nur für einzelne Gebiete etwas ausgesagt werden, so etwa über den gegenläufigen Reststrom vor Amrum (GÖHREN, 1974) sowie den zwischen Amrum und der Küste stark nordwärts versetzenden Strom. Ähnliche Verhältnisse finden sich vor Süderoog Sand bzw. zwischen diesem, Pellworm und der Küste mit ausgeprägtem Reststrom nach Nordost. Über die Strömungen in Norder- und Süderau ebenfalls wie in Norder- und Süderhever wird zu einem späteren Zeitpunkt ausführlich zu berichten sein.

Wesselburener Watt und Blauortsand trennen die Eider, das Wesselburener Loch und die Piep fast vollständig voneinander. Dagegen tritt aus der Piep – teilweise auch über den Flakstrom – Wasser über die Marner Plate nach Südosten über. Aus dem Neufahrwasser bildet sich ein durchgehender Reststrom über die südlich angrenzenden Watten bis in die Unterelbe, so daß deutlich wird, daß von hier ein gewisser Teil der Flutwassermenge die Elbe erreicht. Die Nordwest-Südost-Lage der beiden großen Priele zwischen diesen Watten unterstreicht diese Tatsache. Man kann somit den gesamten Watt- und Prielkomplex südöstlich von Trischen als zur Unterelbe gehörig ansprechen, wie man ja geographisch den Mündungstrichter der Elbe mit der Verbindung Kugelbakedamm-Trischendamm begrenzen kann.

Der südlich setzende Reststrom ist auch auf dem Großen Vogelsand und dem Gelbsand vorhanden. Selbst im Neuwerker Watt herrscht er vor, während im Knechtsand-Watt der Reststrom nach Norden weist. Vor diesen Wattkomplexen wurden rechtsdrehende, vor Eiderstedt dagegen linksdrehende Reststromsysteme festgestellt (GÖHREN, 1974); vor Trischen deuten die Messungen ebenfalls auf ein rechtsdrehendes System (Abb. 24).

### 5. Erfahrungen und Hinweise

#### 5.1 Verfahren und Meßtechnik

Bei diesem Meßprogramm konnte der Personalaufwand bei der Auswertung gegenüber früheren Messungen erheblich reduziert werden: Die bisherige manuelle Übertragung der Meßdaten von den Registrierfilmen auf maschinenlesbare Datenträger wurde durch ein inzwischen entwickeltes Code-Auswertegerät für die direkte automatische Umsetzung der Daten ersetzt (KOCH u. NIEMEYER, 1977), was auch zu einer Beschleunigung der Auswertung beitrug.

Für die Analyse der Messungen sollte ein bewährtes, von GÖHREN (1965) entwickeltes Programm zur ADV-Auswertung benutzt werden, das allerdings nicht in einer maschinenkompatiblen Programmiersprache vorlag. Daher wurde nach den gleichen Grundsätzen in der BAW ein Auswerteprogramm in der Programmiersprache ALGOL 60 erstellt.

Messung und Auswertung liefen folgendermaßen ab:

- Meßdurchführung durch die betreuende Dienststelle,
- Filmentwicklung bei der FSIK Norderney,
- Filmlesung bei der BAW-AK, Hamburg, und Übertragung auf Lochstreifen,
- Erstdrucke der Daten durch die BAW, Karlsruhe,
- Eingabe zusätzlicher hydrologischer und meteorologischer Randbedingungen,
- Kontrollen durch die betreuende Dienststelle,



Abb. 25. Stark verkrautetes Meßgerät

- Fehlerkorrektur durch die BAW-AK,
- Endausdrucke durch die BAW.

Üblicherweise standen die Geräte zwei bis drei Wochen auf einer Position. Die zur Ergänzung angelegten Langzeitprofile über ein bis zwei Jahre sind auf Abb.2 besonders gekennzeichnet.

## 5.2 Erfahrungen mit der Meßdurchführung

Zu Beginn des KFKI-Meßprogramms lagen bereits 10jährige gute Erfahrungen mit dem Wattstrommesser vor, und auf dem Gerätemarkt war keine Verbesserung erkennbar. Vor- und Nachteile des Geräts schildert wiederum GÖHREN (1969):

*„Wattstrommesser erfordern keine personalmäßig aufwendigen Meßeinsätze, ermöglichen synoptische Messungen an mehreren Stationen und liefern lange Meßreihen, aus denen die periodischen (astronomischen) und aperiodischen (meteorologischen) Einflüsse auf die Strömungsverhältnisse abgeleitet werden können. Besonders wertvoll sind in diesem Zusammenhang Registrierungen bei Sturmwetterlagen, da jede unmittelbare Beobachtung in solchen Situationen ausfällt. Mit Recht wird der Aussagewert sogenannter ‚Schönwettermessungen‘ von vielen Forschern angezweifelt.*

*Ein Nachteil der Dauerstrommeßgeräte besteht darin, daß man sie nur auf eine bestimmte Meßhöhe über Grund einstellen kann und somit nicht in der Lage ist, die Stromverteilung in der Vertikalen zu erfassen (wie zum Beispiel bei Profilmessungen mit Meßflügeln).“*

Generell wurden diese Erfahrungen bestätigt. Im einzelnen läßt sich noch folgendes ergänzen:



Abb. 26. Muschelbewuchs und Verkrautung

Die Dauerstrommeßgeräte können nicht völlig wartungsfrei über mehr als zwei bis drei Wochen auf der Meßposition belassen werden. Seegrass und Algen können sich festsetzen und die beweglichen Teile blockieren (Abb. 25 und 26), so daß die Meßergebnisse verfälscht oder gar keine Ergebnisse mehr erzielt werden. Auch die Reinigung von Seepockenbewuchs ist bei längerem Einsatz erforderlich. Gelegentlich sind die Geräte mechanischen Belastungen ausgesetzt, denen sie nicht gewachsen sind. Bei Windwetterlagen lösten sich bei einigen Geräten die Leitbleche vom Gehäuse, oder die Arretierung für den Propeller brach. Bei den 16 neu beschafften Geräten waren die Drehachsen, mit denen sie am Meßgerüst befestigt waren, zunächst zu schwach und mußten von der Herstellerfirma gegen neue ausgewechselt werden. Die Kunststoffpropeller sind durch feine Risse gefährdet, die gelegentlich auftreten.

Die Registriereinheiten im Gehäuse wurden bei einigen Geräten wahrscheinlich durch Erschütterungen bei Wellenbelastungen gestört. So lösten sich Befestigungsschrauben für die Optik oder den Kompaß, so daß der Registrierfilm nicht gleichmäßig ausgeleuchtet wurde oder die registrierten Werte unvollständig und nur zum Teil verwertbar waren. Außerdem traten gelegentlich Fehlbelichtungen (Doppelbelichtungen oder Mehrfachbelichtungen) auf. Der Filmtransport in den Kassetten war nicht immer störungsfrei. Das erfordert für die Betreuung der Geräte sachverständiges und erfahrenes Personal, da die Einstellung der optischen Registrierung sehr schwierig ist.

Neben gerätetechnischen Erfahrungen wurden solche organisatorischen Charakters in starkem Maße gesammelt, da

- mehrere Profile von mehreren Dienststellen gleichzeitig betreut wurden,
- man sich gegenseitig mit Schiffen, Geräteträgern und Bojen aushelfen mußte und
- die KFKI-eigenen Geräte von verschiedenen Dienststellen eingesetzt wurden.

Die Erfahrungen zeigen, daß schon auf dem „kurzen Dienstwege“ und insbesondere unter den Mitgliedern der Projektgruppe stets zufriedenstellend kurzfristige Absprachen möglich waren.

Die Zusammenarbeit der messenden Dienststellen und die Durchführung gemeinsamer Meßprogramme wird in den letzten Jahren allerdings dadurch erschwert, daß die Dienststellen aus personellen und finanziellen Gründen gezwungen sind, sich weitgehend auf die notwendigsten hydrologischen Arbeiten ihres Aufgabengebietes zu beschränken. Dies betrifft insbesondere auch die Aufbereitung und Auswertung der gewonnenen Daten sowie deren ingenieurwissenschaftliche Bearbeitung. Es bleibt ihnen somit wenig Spielraum für Koordinierung und Ergänzungen.

### 5.3 Erfahrungen mit der Datenaufbereitung

Das Ziel der Aufbereitung, nämlich Ganglinien- und Reststromdarstellung (Abb. 11), ist längst als sinnvoll und aussagekräftig erprobt. Der Weg dahin ist jedoch immer noch schwierig und lang (siehe unter Pkt. 2). Er kann nach dem heutigen Stand der Technik dadurch verkürzt werden, daß die Daten unmittelbar im Meßgerät auf Kassette gespeichert werden (s. u.). Da sich außerdem in der Anlaufphase fehlende Kapazitäten im Rechenzentrum der Bundesanstalt für Wasserbau in Karlsruhe negativ auswirkten, sind erst recht spät die notwendigen Voraussetzungen für eine zügige Bearbeitung vorhanden gewesen. Inzwischen wurde bei der BAW ein schnellerer Rechner mit größerer Speicherkapazität installiert, wodurch diese Schwierigkeiten behoben sind. Zu lang war auch in den ersten Jahren der Zeitraum von der Messung bis zum Endausdruck. Dieser wird ab 1980 dadurch erheblich abgekürzt, daß die entwickelten Registrierfilme an einem Ort (in Hamburg) geprüft und auf Lochstreifen abgelesen werden. Der Erstausdruck erfolgt ebenfalls am gleichen Ort, nämlich am Terminal in Hamburg-Rissen. Dieses aus KFKI-Mitteln für ein anderes Projekt beschaffte Terminal kann die zusätzliche Arbeit durchaus bewältigen.

Die Kontrolle der Erstausdrucke müßte von der BAW-AK ausgeführt und die messenden Dienststellen nur bei solchen Messungen eingeschaltet werden, für deren Kontrolle und Einordnung spezielle örtliche Erfahrungen notwendig sind. Diese Verfahrensweise hätte den Vorteil, daß der Transport der Erstausdrucke von der BAW-AK zu den messenden Dienststellen und zurück entfällt und die Fehlerkorrektur für alle Messungen nach den gleichen Prinzipien erfolgt. Außerdem hat die Erfahrung gezeigt, daß auch die messenden Dienststellen aus Personalmangel in den seltensten Fällen in der Lage sind, die Korrekturen sofort auszuführen, so daß dadurch weitere erhebliche Zeitverzögerungen auftreten.

Die Fehlerkorrekturen in den Dateien werden weiter wie bisher von der BAW-AK ausgeführt.

Ob das Plotten der endgültigen Darstellung besser auch am Terminal in Rissen oder wie bisher in Karlsruhe erfolgen sollte, bleibt noch zu prüfen. Beide Möglichkeiten sind jedoch nach der Beschaffung eines Plotters für das Terminal in Rissen gegeben.

Die je nach der Fehleranzahl mehr oder weniger zeit- und personalaufwendige Fehlerkorrektur zu automatisieren, ist nicht empfehlenswert und teilweise auch nicht möglich. Wenn sich auch nicht alle Datenfehler vermeiden lassen, so ist doch die Auswahl möglichst fehlerfrei arbeitender Meß- und Aufzeichnungsgeräte ein wesentlicher Faktor für die Länge der Bearbeitungszeit.

In Zukunft wird die Datenaufbereitung an der Tatsache zu messen sein, daß bereits heute eine Dauermessung von etwa 30 Tiden mit Hilfe eines Tischrechners innerhalb von wenigen

Stunden auswertbar ist, wenn die fehlerfreien Daten auf Magnetband (Kassette) gespeichert sind (MIESSNER, 1979). Diese Bearbeitungszeit ist an einem Großrechner nicht länger, wenn der Datentransfer vom Meßgerät zum Rechner und zurück direkt über ein Terminal betrieben und von diesem Terminal aus auch die Bearbeitung der Meßwerte gesteuert wird. Die Bearbeitung größerer Datenmengen wird wegen der Speicherkapazität auch zukünftig Großrechenanlagen allein vorbehalten bleiben, wie auch eine solche Anlage mehr Speicherplatz für umfangreiche Programme bietet. In dieser Hinsicht werden in nächster Zeit weitere Überlegungen angestellt, um durch mehr Informationen leichter eine umfassende Analyse der Meßergebnisse zu gestatten.

#### 5.4 Hinweise für künftige Messungen

Die WSÄ Cuxhaven, Bremerhaven und Wilhelmshaven verwenden seit einigen Jahren in großer Stückzahl Meßgeräte einer norwegischen Firma in Wassertiefen ab 20 cm mit gutem Erfolg. Die Daten werden auf 6-mm-Magnetband auf 8-cm-Rollen gespeichert. Es ist möglich, Ganglinien und statistische Analysen mit einem Tischrechner einschl. Peripherie innerhalb kurzer Zeit auszuwerten (MIESSNER, 1979).

Inzwischen hat eine deutsche Firma ein neues Gerät auf der Grundlage des induktiven Strommessers entwickelt (LAMMERS u. RÖBEN, 1978), der sich besonders beim Einsatz in Brandungszonen bewährt hat (NIEMEYER, 1979).

Allerdings können damit aufgrund des relativ hohen Strombedarfs bei normaler Batteriekapazität keine integrierenden Messungen vorgenommen werden, sondern nur Augenblicksmessungen in fünfminütigen Abständen. Inwieweit hierdurch eine verfälschte Wiedergabe des Strömungsgeschehens bewirkt wird, muß überprüft werden.

Die Konstruktion des Gerätes erlaubt die unmittelbare Strommessung über dem Wattboden, wodurch eingehendere Informationen über die Strömungsvorgänge aufgenommen werden können als bei solchen Geräten, die von ihrer Bauart her nur die Strömung bei Wassertiefen von etwa 30 cm und mehr registrieren können. Ebenso ist eine genaue Erfassung der Vorgänge um Stromkenterung zu erwarten, da dieses Meßgerät nicht durch mechanische Trägheit beeinträchtigt ist. Die Registrierung erfolgt in einer Magnetbandkassette, von der die Werte direkt in den Rechner eingelesen werden können.

Für die Forschungsvorhaben des KFKI können Geräte dieser Art in der Tat nur dann interessant sein, wenn die Möglichkeit besteht, die registrierten Daten nach dem seinerzeit entwickelten, umfassenden und inzwischen vom KFKI weitgehend übernommenen ADV-Programm zu analysieren. Das scheint auf folgendem Weg möglich zu sein:

Magnetband im Spezialcode → Lesegerät →  
 (Lochstreifen →) Rechner, Einleseprogramm →  
 16-mm-Band, IBM-kompatibel.

Inzwischen existiert ein DIN-Vorschlag, sich auf zwei der etwa 50 Kassettencodes zu beschränken. Falls vom KFKI die Beschaffung neuer Geräte empfohlen wird, sollte darauf geachtet werden, daß es inzwischen Programme gibt, mit deren Hilfe diese beiden Kassettencodes unmittelbar auf rechnerkompatible Datenträger umsetzbar sind.

#### 6. Schriftenverzeichnis

- DIETRICH, G. u. SIEDLER, G.: Ein neuer Dauerstrommesser. Kieler Meeresforschung, H. 1, 1963.  
 GÖHREN, H.: Meßwertaufbereitung von Dauerstrommessungen mit Hilfe der elektronischen Datenverarbeitung. DGM, H. 2, 1965.

- GÖHREN, H.: Triftströmungen im Wattenmeer. Mitt. Franzius-Inst. der TU Hannover, H. 30, 1968.
- GÖHREN, H.: Die Strömungsverhältnisse im Elbmündungsgebiet. Hamb. Küstenf., H. 6, 1969.
- GÖHREN, H.: Untersuchungen über die Sandbewegung im Elbmündungsgebiet. Hamb. Küstenf., H. 19, 1971.
- GÖHREN, H.: Über Strömungsverhältnisse und Sandtransport in den Flachwassergebieten vor der südöstlichen Nordseeküste. Hamb. Küstenf., H. 29, 1974.
- JOSEPH, J.: Meereskundliche Meßgeräte. Naturforsch. und Medizin in Deutschland, Bd. 18, 1948.
- Knop, F.: Untersuchungen über Gezeitenbewegung und morphologische Veränderungen im nordfriesischen Wattgebiet als Vorarbeiten für Dammbauten. Mitt. Leichtweiß-Inst. der TH Braunschweig, H. 61/1, 1961.
- KOCH, M. u. LUCK, G.: Untersuchungen zur Erfassung der Strömungsverhältnisse auf den östlichen Weserwatten. Jber. 1972 der Forschungsst. Norderney, Bd. 24, 1973.
- KOCH, M. u. NIEMEYER, H. D.: Untersuchungen zu den Strömungsverhältnissen zwischen Borkum und der Leybucht. Jber. 1977 der Forschungsst. Norderney, Bd. 29, 1978.
- LAMMERS, B. u. RÖBEN, D.: Sichere Strömungsmessung ohne bewegte Teile. Hansa, 115. Jg., Nr. 15/16, 1978.
- MIESSNER, F.: Fortschritte beim Messen und Auswerten gewässerkundlicher Daten (Kurzbericht). DGM, H. 1, 1979.
- NIEMEYER, H. D.: Naturmessungen der Seegangs- und Brandungsbeanspruchungen von Insel-schutzwerken und Inselstränden. Jber. 1978 der Forschungsst. Norderney, Bd. 30, 1979.
- SCHULTZ, H.: Probleme der gewässerkundlichen Meßtechnik. Mitt. Franzius-Inst. der TH Hannover, H. 7 1952.

# Schlickuntersuchungen im Wattenmeer der Deutschen Bucht – Zwischenbericht über ein Forschungsprojekt des KFKI

Von Klaus Figge, Rolf Köster, Hjalmar Thiel und Peter Wieland

## Zusammenfassung

Das Bundesministerium für Forschung und Technologie (BMFT) fördert gegenwärtig durch das Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI) ein interdisziplinäres Forschungsvorhaben, das sich mit dem Schlick der Watten in der Deutschen Bucht befaßt. Schlick als marines Ablagerungsmaterial ist zwar im großen und ganzen bekannt, jedoch gibt es bisher keine allgemeingültige wissenschaftliche Definition, die diesen Sedimenttypus charakteristisch beschreibt. In dem Forschungsvorhaben versuchen Hydrologen, Geologen und Biologen gemeinsam, die Schlickverteilung in zwei Testfeldern der Nordseewatten zu erfassen, die Bedingungen der Schlicksedimentation und der Schlickbildung zu erkennen und Merkmale für eine Definition zu erarbeiten. Dieser Bericht gibt eine kurze Einführung in das Forschungsvorhaben, definiert die Probleme und faßt einige erste Ergebnisse zusammen.

## Summary

*At present, the Ministry of Research and Technology of the Federal Republic of Germany funds a research project on muds in the wadden sea of the German Bight via the Board for Research in Coastal Engineering (KFKI). Mud as a marine sedimentation material is well known, however, no generally accepted scientific definition exists for the characterization of this sediment type. Within the project hydrologists, geologists, and biologists try together to map the distribution of muds in two test-areas in the German wadden sea, to elucidate the conditions for mud sedimentation and mud development, and to find characteristics for a mud definition. This report introduces the project, defines problems and gives some first results.*

## Inhalt

1. Einleitung . . . . .	187
2. Das Sahlenburger Watt . . . . .	189
3. Morphologische Veränderungen der Watten in der Dithmarscher Bucht . . . . .	189
4. Geologische Untersuchungen . . . . .	190
4.1 Begriffsbestimmung „Schlick“ . . . . .	190
4.2 Die Sedimente der Dithmarscher Bucht . . . . .	192
5. Biologische Untersuchungen . . . . .	198
5.1 Die Auswirkungen der Organismen auf das Sediment . . . . .	198
5.2 Organismenbestände im Büsumer Watt . . . . .	200
6. Ausblick . . . . .	203
7. Schriftenverzeichnis . . . . .	204

## 1. Einleitung

Im Küsteningenieurwesen stellte die Frage nach den Gesetzmäßigkeiten der Schlicksedimentation schon immer ein Problem dar, das früher häufig primär unter dem Aspekt der

Baggerkosten für die Entfernung unerwünschter Schlickanhäufungen gesehen wurde. Auch heute spielen finanzielle Erwägungen im Zusammenhang mit Schlickfragen eine wichtige Rolle. Mit steigendem Umweltbewußtsein rückt jedoch in immer stärkerem Maße die ökologische Bedeutung des Schlicks und auch seine Fähigkeit, Schadstoffe zu adsorbieren, in den Vordergrund. Es erschien dem Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI) daher angebracht, dieses Problem wieder aufzugreifen und eine Arbeitsgruppe mit der Untersuchung der Schlicksedimentation an der deutschen Nordseeküste zu beauftragen.

Zum Thema Schlick existiert bereits eine umfangreiche Literatur, zu der auch viele hervorragende Arbeiten aus dem deutschen Raum gehören. Dennoch sind die Kausalitäten der Schlicksedimentation bis heute weitgehend ungeklärt. Das mag zum Teil auf fehlende Messungen oder auf technische Meßprobleme zurückzuführen sein, im wesentlichen aber auf die Schwierigkeit, die komplexen und komplizierten Wechselwirkungen geologischer, biologischer, chemischer und hydrographischer Parameter zu erkennen und zu verstehen. Es gibt noch nicht einmal eine verbindliche und allgemein anerkannte Definition für dieses Sediment. Einigkeit besteht weitgehend darin, daß zu seiner Beschreibung die folgenden Größen herangezogen werden müssen:

- Korngröße (d. h. Feinkörnigkeit),
- Wassergehalt,
- bodenmechanische Eigenschaften (die ihrerseits wieder stark vom Wassergehalt abhängig sind),
- Gehalt an organischer Substanz,
- biologischer Inhalt,
- chemische Eigenschaften (wobei das Schwergewicht auf der organischen Chemie liegt).

Für den Ablagerungsmechanismus sind außerdem zu berücksichtigen:

- Zufuhr von geeignetem Material,
- hydrographische Eigenschaften des Wassers (Bewegung, Salzgehalt, Temperatur),
- chemische und biologische Einflußgrößen bei der Fixierung der Partikel.

Damit wird deutlich, daß die Untersuchung eines solchen Sediments, und zwar seiner Eigenschaften und seiner Entstehungsbedingungen, nicht von Einzelforschern durchgeführt werden kann und sollte, sondern vielmehr durch eine Gruppe, der Vertreter der verschiedenen betroffenen Disziplinen angehören. Dieser Erkenntnis wurde auch beim Schlickprojekt des KFKI Rechnung getragen, in dem Küsteningenieure, Geologen, Biologen und Chemiker aus Behörden, Universitäten und anderen Forschungseinrichtungen eng zusammenarbeiten.

Schon bei oberflächlicher Betrachtung der Wattgebiete an der deutschen Nordseeküste fällt die ungleichmäßige Verteilung der mit feinkörnigem Material bedeckten Flächen auf. Oftmals finden sich in morphologisch und hydrographisch scheinbar völlig gleichartigen Gebieten sandige und „schlickige“ Sedimente dicht nebeneinander. Zu dieser räumlichen Variabilität tritt häufig noch eine zeitliche, ortsgebundene. Um bei einer Erforschung des Sedimentationsmechanismus solche lokalen und zeitlichen Effekte auszugleichen, wäre es zweckmäßig und wünschenswert, die Untersuchungen auf ein größeres Areal und über einen längeren Zeitraum auszudehnen. Das ist bei den vorhandenen personellen und finanziellen Mitteln nicht möglich. Aus diesem Grunde wurden die Arbeiten des KFKI auf die Dauer von drei Jahren beschränkt und auf zwei Gebiete konzentriert, von denen angenommen werden kann, daß sie für einen größeren Küstenstreifen repräsentativ sind. Ein weiteres Kriterium für die Gebietsauswahl war das Vorhandensein detaillierter Kenntnisse aus früheren oder noch laufenden Untersuchungen. Diese Vorbedingungen schienen am besten erfüllt in der Dithmarscher Bucht südlich von Büsum als Beispiel für ein typisches „rechts-elbisches“ Wattgebiet

und im Sahlenburger Watt zwischen Cuxhaven und Neuwerk, in dem der Einfluß der großen Ästuarie Elbe und Weser sicher eine andere Bedeutung als bei Büsum hat. Die Ästuarie selbst sollen in einem gesonderten Programm untersucht werden.

Die Arbeiten wurden finanziell durch den Bundesminister für Forschung und Technologie unterstützt. Sie begannen im Spätherbst 1977. Erschwernisse traten im untypischen, eisreichen Winter 1977/78 auf, der auch auf dem Watt seine Spuren hinterlassen hatte.

## 2. Das Sahlenburger Watt

Die Untersuchungen im Sahlenburger Watt konnten sich auf langjährige Messungen der Forschungs- und Vorarbeitenstelle Neuwerk (SIEFERT, 1979) stützen und diese zum Teil fortsetzen. Das Schwergewicht lag auf der Fragestellung nach einer Abhängigkeit der Sedimentart und des Sedimentationsgeschehens (Sedimentation/Erosion) von Seegangenergie und Seegangrichtung. Hierzu wurden auf zwei Profilen im Abstand von 14 Tagen Proben genommen, während gleichzeitig Windstärke und -richtung, Wasserstand und Strömung registriert wurden.

Die Ergebnisse ließen eindeutig erkennen, daß enge Beziehungen zwischen Windrichtung und -energie auf der einen Seite und dem Feinkorngehalt der Sedimente auf der anderen Seite bestehen. Die Zusammenhänge gehen so weit, daß aufgrund bestimmter Wetterlagen Aussagen über den Sedimenttyp eines Gebietes möglich sind. Die Ergebnisse korrespondieren sehr gut mit denen, die GÖHREN (1970) bei feinnivellitischen Messungen von Höhendifferenzen gewann. Über die neuen Untersuchungen im Sahlenburger Watt berichten in diesem Heft REINECK u. SIEFERT.

## 3. Morphologische Veränderungen der Watten in der Dithmarscher Bucht

Aus dem Gebiet der Dithmarscher Bucht lag umfangreiches Material über längerfristige morphologische Entwicklungen vor, das es erlaubt, die derzeitigen Vorgänge in das Gesamtse dimentationsgeschehen einzubinden und auf ihre Signifikanz hin zu beurteilen. Dazu wurden zunächst auf der Grundlage von Watthöhenkarten im Maßstab 1 : 10000 mit Höhenstufungen von 10 cm (bzw. 50 cm unter NN - 1,5 m) Bilanzierungen vorgenommen. Den Bezugshorizont bildete die Prieluferlinie (NN - 0,5 m). Für den darüberliegenden Bereich wurden Wattflächen und Wattvolumina, für den darunterliegenden Teil Wasserflächen und Wasservo-

Tabelle 1

Entwicklung der Wattflächen (F) und der Wattvolumina (V) in der Dithmarscher Bucht zwischen 1942 und 1976, bezogen auf die NN - 0,5-m-Linie

Aufnahme- jahr	Watt	F (1000 ha)		V (1000 m <sup>3</sup> )	
		Wasser	Gesamt	Watt	Wasser
1942	6,09	3,68	9,77	45,25	92,97
1956	5,61	3,51	9,12	42,94	94,91
1969	5,87	3,73	9,60	47,48	83,83
1973	5,19	3,68	8,86	41,54	86,29
1976	5,07	3,39	8,46	42,31	77,48

lumina ermittelt. Die Ergebnisse zeigen die folgenden Aufstellungen (Tab. 1 und 2). Starke Veränderungen traten erwartungsgemäß im Zusammenhang mit der 1970 begonnenen Vordeichung auf.

Die absolute Entwicklung spiegelt sich in dem Index der vertikalen Veränderung der auf NN - 0,5 m bezogenen Watt- und Wasserkörper wieder:

Tabelle 2  
Der Index (m) Wattvolumen : Wattfläche ( $m^3/m^2$ ) für die Jahre 1942 bis 1976

Aufnahme- jahr	Watt		Wasser	
	m	%	m	%
1942	0,74	100	2,52	100
1956	0,76	103	2,70	107
1969	0,80	108	2,24	89
1973	0,80	108	2,34	93
1976	0,83	112	2,28	91

Diese Zahlen zeigen, daß die Wattflächen auch ohne die Berücksichtigung der Vordeichungseffekte gegenüber den von Wasser bedeckten Flächen abgenommen haben, während das Wattvolumen auf Kosten des Wasservolumens zugenommen hat, d. h., die Watthöhen haben zugenommen. Der Sedimentzuwachs betrug oberhalb NN bis NN + 0,5 m im Mittel 3,9 cm, über NN + 0,5 m 4,9 cm pro Jahrzehnt. Die Hauptpriele mäandrierten bisher ohne wesentliche Verlagerungstendenz. Nach der Vordeichung sind eine Wasserraumabnahme und eine Schrumpfung der Prielenden unmittelbar vor dem neuen Seedeich zu beobachten.

Zur Überprüfung einer Abhängigkeit des Sedimentationsgeschehens von der Wasserbewegung, wie sie im Sahlenburger Watt nachgemessen werden konnte, wurden erste Daten gesammelt, deren Ergebnisse jedoch noch keinen Schluß zulassen. Eine spezielle Veröffentlichung über die Dithmarscher Bucht und ihre Veränderung ist im Rahmen des Abschlußberichtes geplant.

#### 4. Geologische Untersuchungen

##### 4.1 Begriffsbestimmung „Schlick“

Wegen des eingangs erwähnten Fehlens einer allgemein anerkannten Definition des Schlicks stellte sich zunächst die Aufgabe, eine für das Forschungsvorhaben anwendbare Begriffsbestimmung vorzunehmen. Sie wird ermöglicht durch die Untersuchung der Ablagerungen in der Dithmarscher Bucht und den Vergleich der Ergebnisse mit dem Aufbau der Wattsedimente in Ost- und Nordfriesland.

Der Schlick des Wattenmeeres ist ein marines – oder örtlich brackisches – Sediment von komplexer Zusammensetzung. Eine Definition und Beschreibung seiner Eigenschaften ist deshalb nicht durch einen einzelnen Parameter möglich, sondern nur durch die Kombination verschiedener Merkmale. Zur Abgrenzung von anderen Wattsedimenten müssen diese in die Betrachtung mit einbezogen werden.

Die Wattablagerungen werden aus mineralischen und organischen Komponenten aufgebaut.

Sand (2–0,063 mm) und Schluff (0,063–0,002 mm) bestehen überwiegend aus Körnern der

Minerale Quarz, Feldspat und Glimmer. Dazu treten als organische Komponenten Schalen-splitter und Schalen (meist von Foraminiferen).

Im Tonanteil ( $< 0,002$  mm) stehen die Tonminerale im Vordergrund. Außerdem nehmen die Anteile an  $C_{org}$  und organisch-chemischen Verbindungen zu (BRÜMMER, 1968). Im KFKI-Programm sind diese Komponenten durch DEGENS u. KEMPE (1980) näher beschrieben worden.

Bei der Diskussion über Wattsedimente hat es oft durch begriffliche Unklarheiten erhebliche Verwirrung gegeben, da zwischen Korngrößenangaben und Sedimenttypen in nicht ausreichendem Maße unterschieden worden ist.

#### a) Korngrößenangaben nach DIN

Sand	2	-0,063 mm	}	Grobsand	2	-0,63 mm
				Mittelsand	0,63-0,2	mm
				Feinsand	0,2	-0,063 mm
Schluff		0,063-0,002 mm				
Ton		$< 0,002$ mm				

#### b) Sedimenttypen

Wattsand	(Sediment des Sandwattes)
Schlicksand	(Sediment des Mischwattes)
Schlick	(Sediment des Schlickwattes)

Diese drei Sedimenttypen sind Mischsedimente aus Sand, Schluff und Ton im Sinne der DIN-Definitionen. Sie unterscheiden sich in den Mischungsverhältnissen dieser Komponenten.

In weiten Wattgebieten bilden in allen drei Sedimenttypen die Korngrößen zwischen 0,125 und 0,063 mm („very fine sand“ im Sinne der WENTWORTH-Skala) 40 bis 60 % der Gesamtmenge, also näherungsweise die Hälfte des Sediments. Somit erreichen die Anteile der gröberen ( $> 0,125$  mm) und der feineren ( $< 0,063$  mm) Korngrößen zusammen in der Regel ebenfalls ungefähr die Hälfte der Gesamtmenge. Die Unterschiede zwischen den Wattsedimenten werden in erster Linie durch das Mischungsverhältnis zwischen diesen Sedimenttypen bestimmt.

Schluff- und Tonanteile  $> 60$  bis  $70$  % sind selten und treten – mit Ausnahme von Ästuaren und anderen brackischen Sedimentationsräumen – nur in wenigen Gebieten mit größerer flächenhafter Verbreitung auf, z. B. in der Umgebung von Muschelbänken.

Eine Angabe des Anteils  $< 0,063$  mm (Schluff und Ton) ermöglicht deshalb eine näherungsweise Beschreibung der Gesamtverteilung, die nur in verhältnismäßig kleinen Bereichen nicht anwendbar ist. Eine allgemeingültige Festlegung von Grenzen, vergleichbar den Korngrößenangaben nach DIN, gibt es bisher nicht. Bei ausschließlichem Bezug auf die Kornverteilung hat sich zunächst folgende Stufung nach dem Gehalt  $< 0,063$  mm als naturgerecht und für eine Darstellung der Zusammenhänge geeignet erwiesen:

$< 10$  % W a t t s a n d (Sandwatt)

Je nach dem Aufbau eines Gebietes kann eine weitere Unterteilung in  
 $< 5$  % Wattsand i. e. S.

5 bis 10 % schwach schlickiger Wattsand erforderlich sein.

10 bis 50 % S c h l i c k s a n d (Mischwatt)

Vielfach ergibt sich die Notwendigkeit einer weiteren Aufgliederung in

10 bis 25 % sandiger Schlicksand (sandiges Mischwatt)

25 bis 50 % schlickiger Schlicksand (schlickiges Mischwatt)

$< 50$  % S c h l i c k (Schlickwatt)

In extremen Gebieten kann die zusätzliche Abtrennung eines stark tonigen Schlicks mit > 85 % Schluff und Ton sinnvoll sein.

Charakteristische Korngrößenmerkmale für das Sediment „Schlick“ sind also:

- > 50 % Schluff und Ton (< 0,063 mm)
- < 50 % sehr feiner Sand (0,063 bis 0,125 mm)
- sehr wenig Sand > 0,125 mm

Die bodenmechanischen Eigenschaften der Wattsedimente sind sehr unterschiedlich. Wattsande sind in der Regel dicht gelagert und trittfest, Schlick ist dagegen flüssig-breig und kohäsiv. Er kann jedoch durch diagenetische Vorgänge verfestigt sein (z. B. die im nordfriesischen Watt als „alter Klei“ auch an der Wattoberfläche weit verbreiteten älteren Schlicke).

Die Werte für Scherfestigkeit, Lagerungsdichte bzw. Porenanteil und Wassergehalt wechseln stark und sind nicht nur von der Kornverteilung abhängig. Geringe Scherfestigkeiten und hohe Wassergehalte lassen ein Sediment für den Beobachter bei der Grobansprache „schlickiger“, niedrige Porenanteile und entsprechend geringe Wassergehalte „sandiger“ erscheinen, als es der im Labor ermittelten Korngrößenverteilung entspricht.

Die angegebene Stufung für die Kornverteilung bezieht sich auf durchschnittliche bodenmechanische Eigenschaften der Wattsedimente. Sie muß durch weitere Bodenkennwerte ergänzt bzw. modifiziert werden. Entsprechend sind die Grenzen von Wattsand, Schlicksand und Schlick nicht scharf, sondern als breite Übergangsbereiche zu verstehen.

Die verschiedenen Zusammenhänge können gegenwärtig noch nicht in praktikabler Form quantifiziert werden. Eine erste systematische Untersuchung ist im Arbeitsjahr 1980 erfolgt. Die Auswertung der Daten ist noch im Gange.

#### 4.2 Die Sedimente der Dithmarscher Bucht

Das Watt in der Nordhälfte der Dithmarscher Bucht wurde von Juni bis September 1978 durch R. GAST kartiert. Eine Wiederholung von Mai bis Juli 1979, mit Ausnahme des Gebietes der nun eingedeichten Flächen, diente der Erfassung zwischenzeitlich eingetretener Veränderungen.

Die Dithmarscher Bucht ist im Vergleich zu Wattengebieten anderer Küstenabschnitte ein schlickarmes Gebiet. Es gibt nur eine größere zusammenhängende Schlickfläche mit Schlickmächtigkeiten von mehr als 30 cm. Diese liegt nördlich vom Helmsand, wo der Helmsander Damm und dessen seitliche Bühnen die Schlicksedimentation gefördert haben. Eine kleinere schlickreiche Fläche liegt südlich von Deichhausen, wo Testfelder für Detailuntersuchungen festgelegt wurden. Schlicksedimentation findet sich ebenfalls im Südostteil des Helmsander Lochs und in einigen alten Rinnenresten auf der mittleren Plate (Abb. 1).

Schlicksand ist jeweils im Umfeld der Schlickgebiete anzutreffen, ist also teilweise auch an ehemalige Rinnen oder noch existierende kleine Priele gebunden. Schlicksandgebiete sind außerdem in Bereichen ruhigeren Wassers hinter als Wellenbrecher dienenden, höher liegenden Sandwattpartien anzutreffen. In solchen Gebieten scheint die Besiedlung mit *Cardium edule* in Zusammenhang mit der Schlicksandbildung zu stehen.

Wattsande nehmen in der nördlichen Hälfte der Dithmarscher Bucht den flächenmäßig größten Anteil ein und bauen die großen Platen westlich des neuen Seedeiches auf.

Zur Ergänzung der Sedimentkartierungen wurden ausgewählte Tierarten in ihrer Verbreitung erfaßt, die an der Sedimentoberfläche entweder selbst oder durch ihre Spuren deutlich zu erkennen waren. Für die Sedimenttypen im Watt scheinen vor allem Kombinationen von Arten unter Berücksichtigung ihrer Besiedlungsdichte charakteristisch zu sein. Recht

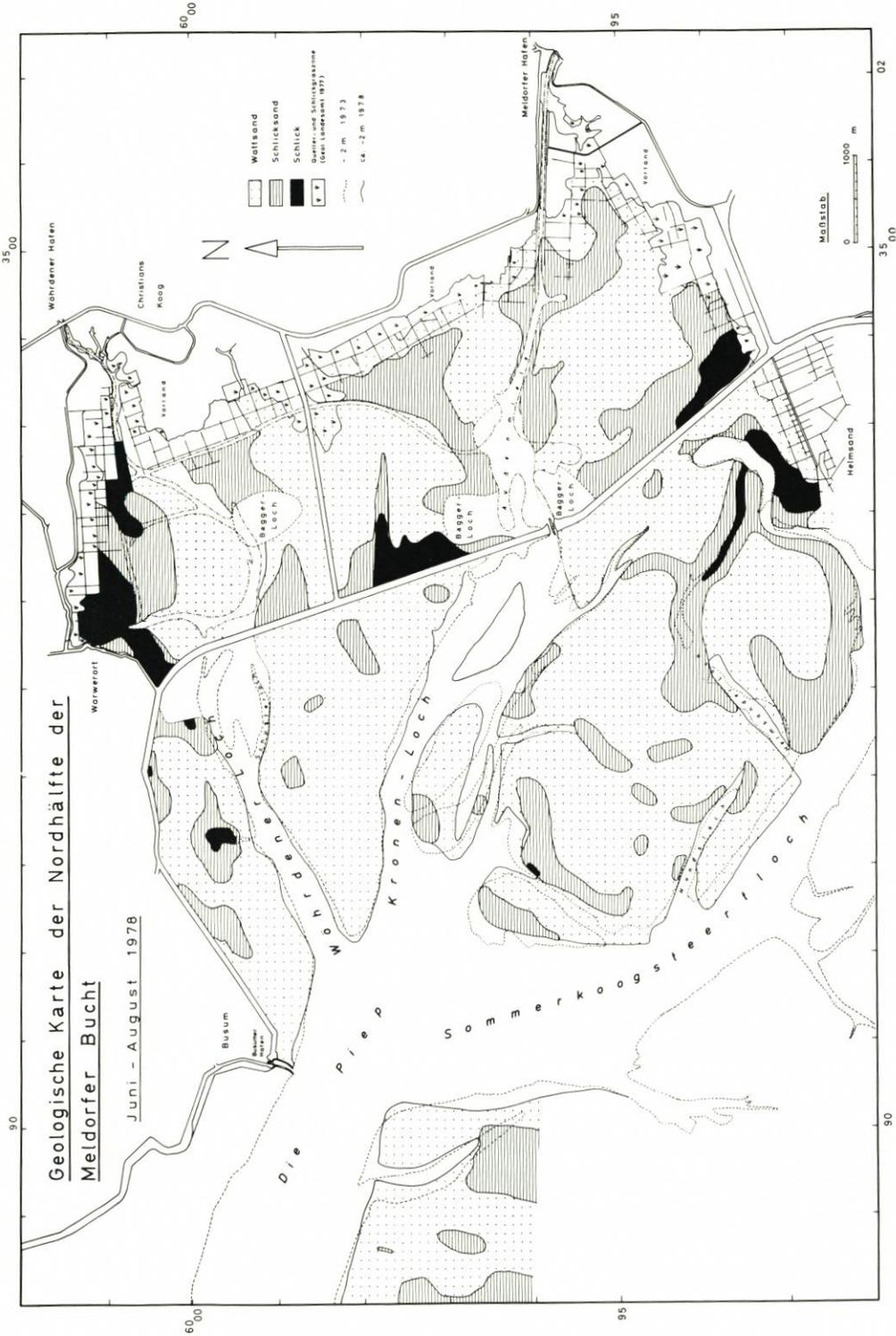


Abb. 1. Geologische Karte der Nordhälfte der Melderfer Bucht im Sommer 1978



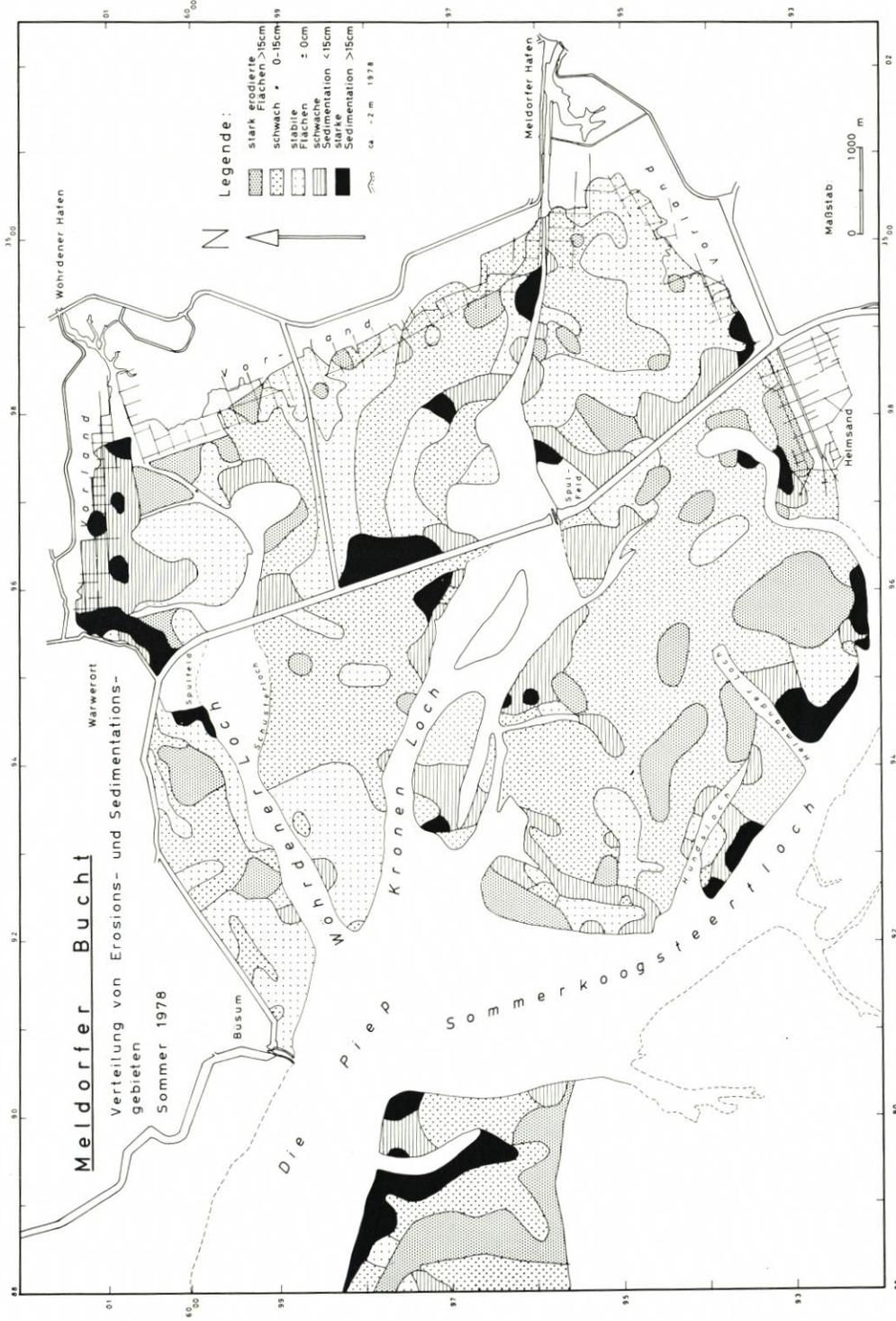


Abb. 3. Verteilung von Erosions- und Sedimentationsgebieten in der Meldorfer Bucht im Sommer 1978

gut interpretierbare Ergebnisse liefert z. B. die Kartendarstellung über die Verteilung von *Arenicola marina* und *Cardium edule* (Abb. 2).

Die Tendenz der Veränderungen im Umfeld der Dithmarscher Bucht ist seit Jahrhunderten durch einen Zuwachs der Landflächen charakterisiert. In der Bucht selbst war die Sedimentation in den letzten Jahrzehnten dagegen gering. Der Vergleich von Luftbildern aus den Jahren 1958 und 1977 zeigt, daß sich vor allem die großen Platen in erheblichem Umfang konsolidiert haben. Auch in den beiden Untersuchungsjahren war an den Westrändern der Platen teilweise eine positive Sedimentationsbilanz zu beobachten. Dagegen überwog zwischen den Platen und dem neuen Deich die Erosion (Abb. 3).

Genauere Untersuchungen über kurzfristige Sedimentveränderungen wurden an drei Teststreifen über einen Zeitraum von zweieinhalb Jahren vorgenommen. Zwei dieser Profile grenzen die Testfelder bei Deichhausen nach Westen (1. Profil) und Osten (2. Profil) ab.

#### TESTGEBIET "BÜSUMER WATT"

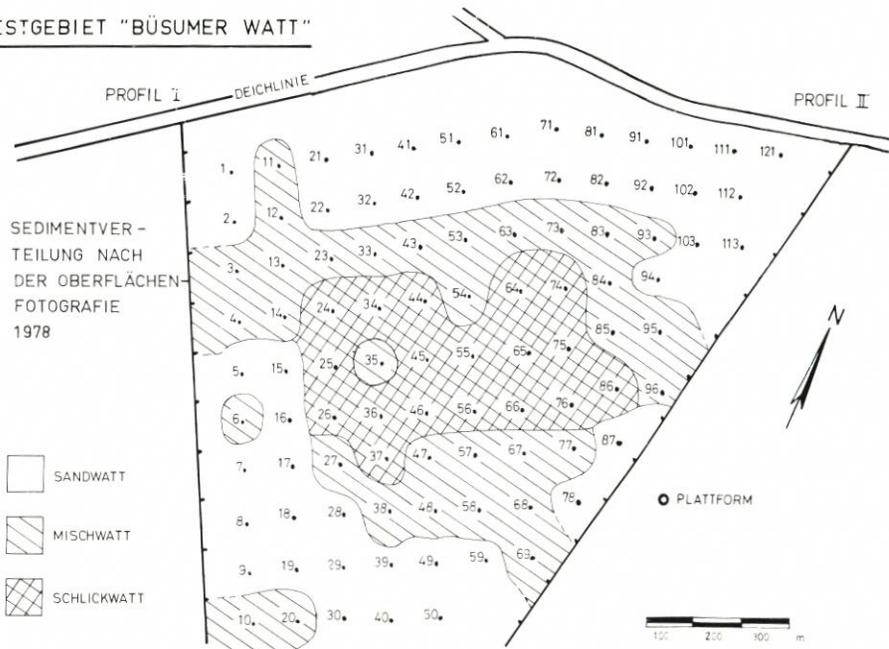


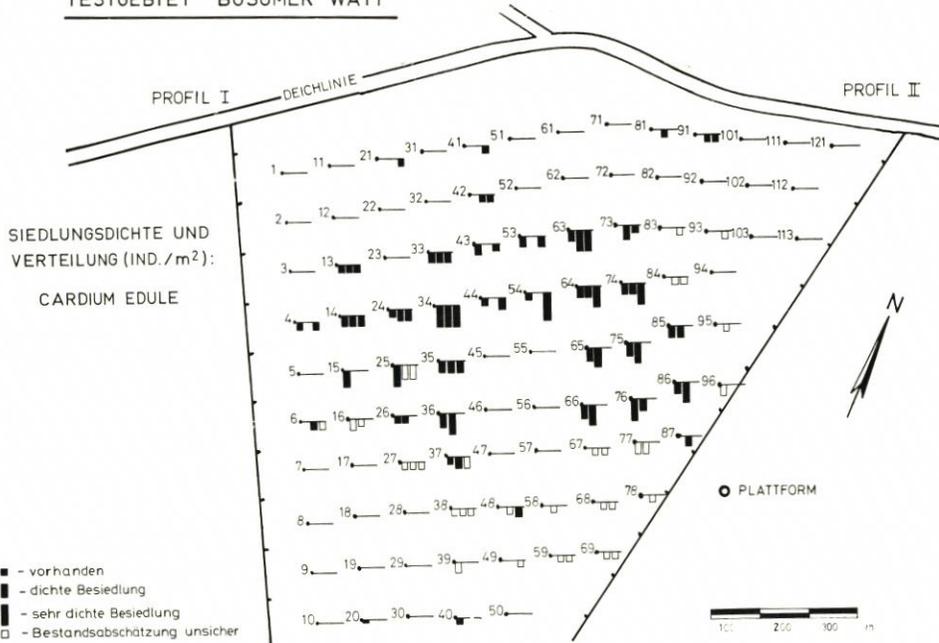
Abb. 4. Testgebiet „Büsumer Watt“ und Lage der Profile I und II

In diesem Bereich wurden 168 2-m-Bohrsondierungen ausgeführt, um Vertikalprofil und Lagerungsdichte der Sedimente zu erfassen. Der teilweise recht mächtige Schlick wird von schmalen Schlicksandstreifen umgeben, auf die Wattsandflächen folgen. Alle Übergänge sind fließend.

Die auffallendsten Veränderungen, die entlang der Profile 1 und 2 beobachtet werden konnten, sind auf vorhergegangene extreme Wetterlagen zurückzuführen. Vor allem starke West- und Nordwestwinde über mehrere Tage brachten stets eine deutliche Abtragung der Wattsandflächen. Ruhiges Wetter oder Ostwind hatten dagegen Sedimentation zur Folge.

Eine auffallende Veränderung der Sedimentzusammensetzung wurde durch die Eisbedeckung der beiden Winter im Untersuchungszeitraum verursacht. Im Winter 1977/78 hatte die Vereisung eine flächige Ablagerung von etwa 10 cm und im Winter 1978/79 von etwa 20 cm und mehr zur Folge. Diese Schlick- und Schlicksandsedimente wurden nach Abschmelzen des Eises während der Frühjahrsstürme schnell wieder abgetragen.

TESTGEBIET "BÜSUMER WATT"



TESTGEBIET "BÜSUMER WATT"

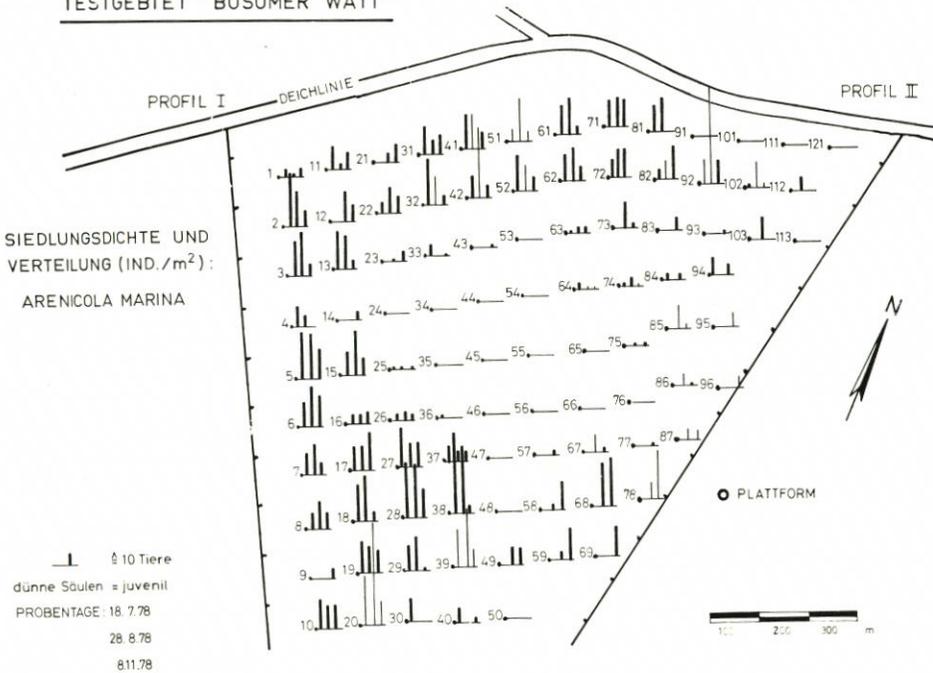


Abb. 5. Siedlungsdichte von *Cardium edule* und *Arenicola marina* im Testgebiet „Büsumer Watt“

## 5. Biologische Untersuchungen

## 5.1 Die Auswirkungen der Organismen auf das Sediment

Die Schlickbildung ist ein Prozeß, der in starkem Maße auch von den Organismen, die auf und im Schlick leben, beeinflußt werden kann. Ein Forschungsvorhaben, das sich die Begriffsbestimmung des Sedimenttyps „Schlick“, dessen Entstehung und Transport zum Ziel gesetzt hat, muß daher zwangsläufig auch dessen lebende Komponenten einbeziehen. Diese lassen sich nach ihren Größen definieren, ohne dabei ihre Funktionen zu berücksichtigen:

Makrofauna: Tiere größer als (0,5) 1 mm. Hierzu gehören die mit bloßem Auge beobachtbaren Muscheln, Schnecken, Würmer und Krebse.

Makrophyten: Blütenpflanzen und Algen.

Meiofauna: Tiere zwischen 0,04 und 1 mm, meist Evertebraten, aber auch Foraminiferen.

Mikrophyten: Einzellige Algen, vorwiegend Diatomeen.

Mikrofauna: Einzellige Organismen, etwa 2 bis 40 µm.

Mikroorganismen: Bakterien und Pilze.

Alle diese Organismengruppen sind für Schlickbildung und Sedimentation von Bedeutung. Der hohe Gehalt an organischer Substanz dient den Bakterien und sedimentfressenden großen Tieren als Nahrung. Organisch gebundene Energie wird dadurch verbraucht, und die Sedimente werden in ihrer Korngröße und Bindigkeit verändert. Das aufgenommene Material wird von vielen Arten zu Kotballen geformt, die weniger leicht transportiert werden und die die turbulente Strömung in der Bodengrenzschicht beeinflussen. Bakterien und besonders Diatomeen können durch ihre hohe Anzahl und durch die Ausscheidung von schleimigen Substanzen die Schlickoberfläche stabilisieren, so daß erst stärkere Strömungen zu Erosion und Umlagerung führen, als dies ohne diese organische Bindung der Fall wäre. In ähnlicher Weise verkleben die Foraminiferen Sedimentpartikel durch ihr in den Pseudopodien ausgestrecktes Protoplasma. Seegräser (*Zostera spec.*), Queller (*Salicornia spec.*) und verschiedene Gräser wie *Spartina spec.* werden seit langer Zeit zur Förderung der Aufschlickung verwendet. Die herabgesetzten Transportgeschwindigkeiten in Pflanzenbeständen führen zu verstärkter Ablagerung und stellen erste Schritte der Landgewinnung dar. Auch fädige Algenbüschel (*Cladophora spec.*) und die blatt- oder schlauchförmigen Grünalgen (*Enteromorpha spec.*, *Ulva spec.*) kommen auf den Wattflächen vor und fördern die Schlicksedimentation.

Über die Auswirkung der Meiofauna auf den Schlickverband liegen nur wenige Beobachtungen vor (CULLEN, 1973), es kann aber als sicher gelten, daß auch diese Faunenkomponente durch Nahrungsaufnahme und -umsatz sowie durch Wühltätigkeit in der Wattenbiocoenose von Bedeutung ist. Einige Zahlenwerte zu Bestandsdichten geben einen Hinweis auf die Bedeutung der Organismen im Wattenschlick (Tab. 3).

Tabelle 3

Hohe Bestandsdichten einiger Organismengruppen in Oberflächensedimenten des Schlickwatts. (Nach FENCHEL u. STRAARUP, 1971; HICKEL u. GUNKEL, 1968; LAMADE, 1978; MCINTYRE, 1969; WESTHEIDE, 1968)

Organismengruppe	Anzahl Organismen cm <sup>-3</sup>
Bakterien	10 <sup>9</sup>
Diatomeen u. a. einzellige Algen	10 <sup>7</sup>
Foraminiferen	3 × 10 <sup>2</sup>
Meiofauna	3 × 10 <sup>2</sup>

Am besten bekannt und teils auch quantitativ erfaßt ist die Tätigkeit der Makrofauna in den Wattgebieten. Einige Beispiele sind in den Tabellen 4 bis 6 zusammengefaßt.

Tabelle 4

Bestandsdichte (Indiv./m<sup>2</sup>) und Sedimentumsatz (l/m<sup>2</sup>/Jahr) einiger sedimentfressender Wattorganismen (nach GRAY, 1974 u. ALLER, 1977)

	Bestandsdichte Indiv./m <sup>2</sup>	Sedimentumsatz l/m <sup>2</sup> /Jahr
<i>Arenicola marina</i>	15-85	60-600
<i>Pectinaria californiensis</i>	560-16 000	12,4
<i>Pectinaria gouldi</i>	10	4
<i>Thoracophelia mucronata</i>	30 000	1500

Tabelle 5

Bestandsdichte (Indiv./m<sup>2</sup>) und Biodeposition (kg Naßgewicht/m<sup>2</sup>/Jahr) einiger filtrierender Wattorganismen (nach ALLER, 1977)

	Bestandsdichte Indiv./m <sup>2</sup>	Biodeposition kg Naßgewicht/m <sup>2</sup> /Jahr
<i>Cardium edule</i>	100-600	24-144
<i>Mya arenaria</i>	10-100	0,2-2

Tabelle 6

Die Auswirkung der Muschel *Nucula proxima* auf Wassergehalt und Erodierbarkeit eines Sedimentes im Experiment (nach RHOADS u. YOUNG, 1970)

	Sediment mit <i>nucula proxima</i>	Sediment ohne <i>nucula proxima</i>
Wassergehalt in der 0 bis 5 cm Sedimentschicht	53-60 %	45-53 %
Erodierbarkeit bis 4 cm/sec oszillierend	hoch	gering

Die Auswirkungen der Organismen-tätigkeiten sind vielfältig:

- Partikel werden zu Kotballen vereinigt,
- Partikel werden durch abgesonderten Schleim und durch Röhrenbau vereinigt und teils in bestimmte Größenklassen selektiert,
- Partikel werden durch die Nahrungsaufnahme nach Größen sortiert,
- Veränderung des Sediment-Wassergehaltes,
- Veränderung der Erodierbarkeit der Sedimente,
- Stabilisierung der Sedimente durch Röhrenbau.

Die Veränderung der Sedimenteigenschaften wird durch zahlreiche Faktoren beeinflusst:

- Entwicklungsstatus und Größe der Individuen,
- Freß- und Ausscheidungsrate,
- Bestandsdichten in den Populationen,
- Wasser- und Lufttemperatur,
- Wasserbedeckungszeit,
- Sauerstoffangebot und Redoxverhältnisse,
- Strömungen.

Diese Auflistungen lassen erkennen, daß die Auswirkungen der Organismen auf das Sediment starken Fluktuationen unterworfen sind. Die Bestände können im kleinräumigen Maßstab stark variieren, sie sind den jahreszeitlichen Einflüssen unterworfen, und mehrjährig lebende Arten können langfristige Schwankungen verursachen.

## 5.2 Organismenbestände im Büsumer Watt

Innerhalb der Dithmarscher Bucht – und in geringem Umfang auch im Sahlenburger Watt – wurden biologische Kartierungen durch H. GROSSMANN, B. MEIN und H. SPYCHALA vorgenommen. Im Büsumer Watt wurde eine Testfläche ausgewählt, die alle Sedimenttypen aufweist und die alle wichtigen Arten der Makrofauna des Watts beherbergt. Die Organismenkartierungen wurden zunächst in der üblichen Weise durch Probenentnahme und -sortierung vorgenommen (z. B. KÖNIG, 1943; PLATH, 1943). Das erforderliche Stationsnetz mit Abständen von 100 m in dem etwa 1 km<sup>2</sup> großen Gebiet verlangte jedoch eine Reduzierung der nachfolgenden Sortierarbeiten. Aus diesem Grunde wurde ein neues Verfahren vergleichsweise getestet und später fortgeführt, bei dem an jeder Station zwei Flächen von je 1/3 m<sup>2</sup> auf Farbfilm fotografiert wurden. Die Wiederholung der fotografischen Erfassung im Abstand von 4 bis 6 Wochen macht die Veränderungen an einer Station deutlich (Abb. 6 bis 9).



Abb. 6. 28. 8. 78, ungestörte, sandige Oberfläche. Kothaufen von *Arenicola marina* und Kriechspuren von *Hydrobia spec.*

Organismen aus der Sedimentoberfläche, deren Spuren und die Sedimentstrukturen werden mit diesem Verfahren dokumentiert. Das Auszählen der Fauna auf den projizierten Diapositiven in der Kombination mit einigen aussortierten Proben ließ eine Bestandsabschätzung zu (Tab. 7).

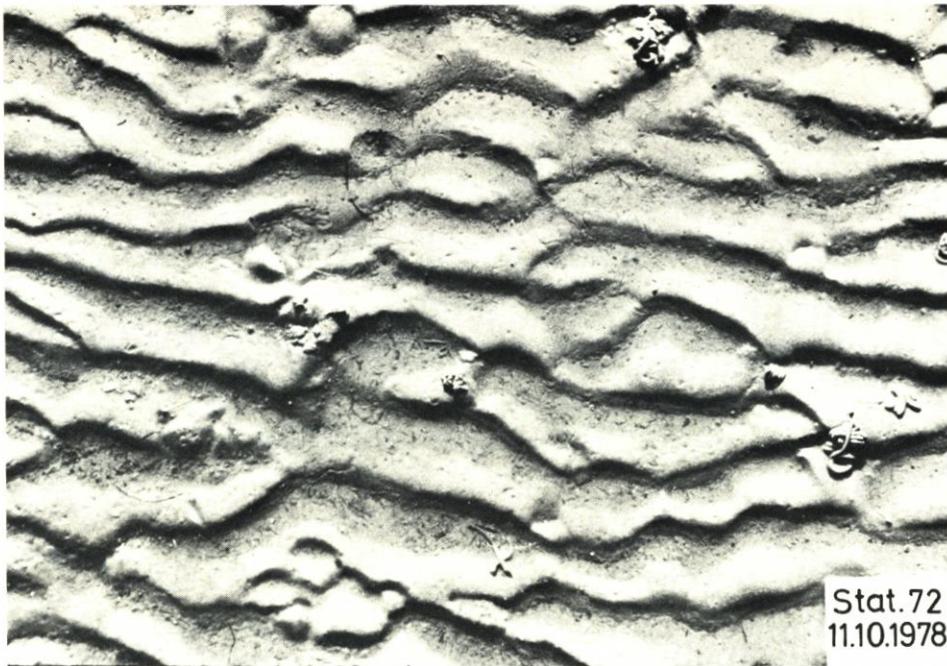


Abb. 7. 16. 10. 78, ausgeprägte Rippeln. Kothaufen und Einsturztrichter von *Arenicola marina*. Freigelegte Röhren von *Pygospio elegans* und Kriechspuren von *Hydrobia spec.*

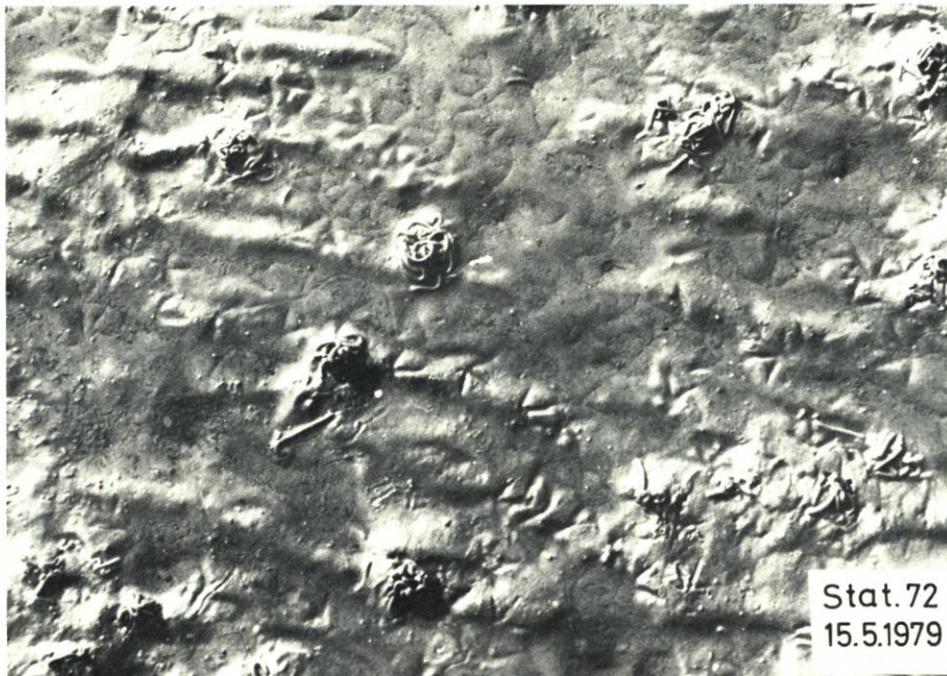


Abb. 8. 15. 5. 79, geringe Schlickauflagerung auf Sandrippeln. Kothaufen von *Arenicola marina* und Kriechspuren von *Hydrobia spec.*



Abb. 9. 11. 10. 79, schlickige Oberfläche mit Algen (*Cladophora spec.*). Kothaufen und Einsturztrichter von jungen und alten *Arenicola marina*. Ca. 5000 *Hydrobia spec.* pro m<sup>2</sup>

Tabelle 7

Maximale Besiedlungsdichten und Biomassen (aschefreies Trockengewicht) für die häufigen Arten der Makrofauna im Testgebiet des Büsumer Watts

Art	Indiv./m <sup>2</sup>	Biomasse/m <sup>2</sup>
<i>Hydrobia ulvae</i>	188 000	86 g
<i>Mya arenaria</i> (diesjähr.)	155 000	622 g
<i>Peloscolex benedeni</i>	28 000	6,5 g
<i>Cardium edule</i> 5 bis 13 mm lang	20 500	1625 g
26 mm lang	1 400	2490 g
<i>Pygospio elegans</i>	12 900	25 g
<i>Heteromastus filiformis</i>	8 500	37,5 g
<i>Tharyx marioni</i>	5 900	10,2 g
<i>Macoma baltica</i>	3 000	9,6 g
<i>Corophium spec.</i>	1 600	8,8 g

In den Abbildungen 2 und 5 ist die Verteilung von zwei häufigen Arten, *Arenicola marina* und *Cardium edule*, im Testfeld des Büsumer Watts dargestellt. Der Vergleich dieser Karten zeigt die komplementäre Verbreitung beider Arten. Abb. 1 gibt die Sedimentverteilung, wie sie nach der Oberflächenfotografie bestimmt worden ist, wieder und zeigt, daß vergleichbare Verteilungsmuster im Sedimenttyp und bei den Tieren auftreten. Die Verteilung der Organismen steht also in enger Beziehung zu den Sedimenttypen, oder die die Sedimente bestimmenden Faktoren sind gleichfalls für die Tierarten von ökologischer Bedeutung. Aber auch der Einfluß der Organismen auf die Sedimente kann damit zum Ausdruck kommen.

Mit Hilfe von bekannten Filtrationsleistungen und dem Partikelgehalt der Suspension lassen sich z. B. Tagesleistungen der Biodeposition errechnen (Tab. 8).

Tabelle 8  
Besiedlungsdichte (Indiv./m<sup>2</sup>), Biodeposition (g/m<sup>2</sup>) und theoretische Schichtzunahme (mm/Tag) für drei Bivalvia-Arten aus dem Büsser Watt

Art	Besiedlungsdichte Ind./m <sup>2</sup>	Deposition/Tag	Schichtzunahme
<i>Cardium edule</i>	1400 adulte	700 g/m <sup>2</sup> ≙ 350 cm <sup>3</sup>	0,35 mm/Tag
<i>Macoma baltica</i>	200 bis 1000	8,6–43 g/m <sup>2</sup> ≙ 4,3–22,5 cm <sup>3</sup>	0,022 mm/Tag
<i>Mya arenaria</i>	bis 100 (max.)	2,5 g/m <sup>2</sup> ≙ 1,3 cm <sup>3</sup>	0,0013 mm/Tag

Die Filtrationsleistungen verringern sich stark in den Wintermonaten, da aufgrund der Kälte die Aktivität herabgesetzt ist. Im Winter 1978/79 wurde durch die lang anhaltende Kälte und durch schweren Eisgang eine katastrophale Veränderung bewirkt. Die gesamte *Cardium*-Population wurde vernichtet, und im Frühjahr 1979 haben sich daher zunächst andere Muschelarten angesiedelt, bevor *Cardium* seinen Bestand langsam durch Jungtiere ersetzen konnte (Tab. 9).

Tabelle 9  
Neubesiedlung eines ehemaligen *Cardium*-Bereiches nach Absterben dieser Muschelart im Eiswinter 1978/79

Art	3. 7. 79 1 Probe 1/20 m <sup>2</sup>	30. 7. 79 $\bar{x}$ aus 18 Proben	16. 8. 79 $\bar{x}$ aus 21 Proben
<i>Cardium edule</i>	0	8 600	7 700
<i>Mya arenaria</i>	18 000	104 400	78 100
<i>Macoma baltica</i>	13 000	14 400	9 000

Im Zusammenhang mit der unterschiedlichen Besiedlung steht auch die Konzentration chemischer Komponenten im Sediment, die sich zum Teil durch kleine Organismen oder deren abgesonderten Schleim und die Kittsubstanzen von Wohnröhren erklären läßt. Die von den Organismen produzierten Schleime und andere organische Substanzen dürften wesentlich zu den charakteristischen Eigenschaften des Schlicks beitragen.

## 6. Ausblick

Die gemeinsamen Untersuchungen von Hydrologen, Geologen und Biologen über die Schlickverteilung und die Schlicksedimentation haben ergeben, daß die interdisziplinäre Forschung die Deutung der Meßdaten erleichtert und zu komplementären Ergebnissen führt. Es wird allerdings auch klar, wo noch Lücken vorhanden sind, die durch weitere Teilprojekte ausgefüllt werden müßten, um die komplexen Beziehungen verstehen zu lernen.

## 7. Schriftenverzeichnis

- ALLER, R. C.: The influence of macrobenthos on chemical diagenesis of marine sediments. Dissertation, Yale University, 1977.
- BRÜMMER, G.: Untersuchungen zur Genese der Marschen. Dissertation, Kiel, 1968.
- CULLEN, D. J.: Bioturbation of superficial marine sediments by interstitial meiobenthos. *Nature*, 242, 1973.
- DEGENS, E. T. u. KEMPE, S.: Geochemische und elektronenmikroskopische Untersuchungen der Schlickbildung im Büsumer Watt. Unveröffentlichter Bericht, Geol. Inst. Univ. Hamburg, 1980.
- FENCHEL, T. u. STRAARUP, B. J.: Vertical distribution of photosynthetic pigments and the penetration of light in marine sediments. *Oikos*, H. 22, 1971.
- GRAY, J. S.: Animal-sediment relationships. *Oceanogr. Mar. Biol. Ann. Rev.* 12, 1974.
- GÖHREN, H.: Studien zur morphologischen Entwicklung des Elbmündungsgebietes. *Hamb. Küstenf.*, H. 14, 1970.
- HICKEL, W. u. GUNKEL, W.: Untersuchungen über die Häufigkeit der Bakterien in der obersten Sedimentschicht der Deutschen Bucht in Beziehung zu den Substrateigenschaften. *Helgoländer wiss. Meeresunters.*, H. 18, 1968.
- KÖNIG, D.: Vergleichende Bestandsaufnahme an bodenbewohnenden Wattieren im Gebiet des Sicherungsdammes vor dem Friedrichskoog in den Jahren 1935-1939. *Westküste, Kriegsheft*, 1943.
- LAMADE, S.: Die räumliche Verteilung der Foraminiferenarten *Nonion depressulum*, *Elphidium excavatum* und *Elphidium selseyense* im Gezeitenbereich der Meldorfer Bucht. Diplomarbeit, Univ. Hamburg, (unveröff.), 1978.
- MCINTYRE, A. D.: Ecology of marine meiobenthos. *Biol. Rev.*, H. 44, 1969.
- PLATH, M.: Die biologische Bestandsaufnahme als Verfahren zur Kennzeichnung der Wattsedimente und die Kartierung der nordfriesischen Watten. *Westküste, Kriegsheft*, 1943.
- REINECK, H.-E. u. SIEFERT, W.: Faktoren der Schlickbildung im Sahlenburger und Neuwerker Watt. (Beitrag in diesem Heft.)
- RHOADS, D. C. u. YOUNG, D. K.: The influence of deposit feeding organisms on sediment stability and community trophic structure. *J. Mar. Res.*, H. 28, 1970.
- SIEFERT, W.: Zusammenstellung der wichtigsten Meßdaten und Untersuchungsergebnisse 1964/77 aus dem Sahlenburger Watt. Strom- und Hafengebäude Hamburg, Forschungs- und Vorarbeitenstelle Neuwerk, Studie Nr. 41, 1979.
- WESTHEIDE, W.: Zur quantitativen Verteilung von Bakterien und Hefen in einem Gezeitenstrand der Nordseeküste. *Mar. Biol.* 1, 1968.

# Albert Brahms und die Orkanflut von 1717

Von Günter Luck und Hanz Dieter Niemeyer

## Inhalt

1. Vorbemerkung . . . . .	205
2. Einführung . . . . .	206
3. Der Deichbaumeister . . . . .	206
4. Ingenieur-Hydrographie . . . . .	208
4.1 Wasserstandsmessungen . . . . .	208
4.2 Sturmzeitenklassifikation . . . . .	210
4.3 Seegangsbeobachtungen . . . . .	211
5. Deichbau . . . . .	213
5.1 Funktionelle Gestaltung . . . . .	213
5.2 Deichbau und Deichunterhaltung . . . . .	215
6. Optimierung und Nutzen-Kosten-Analyse . . . . .	216
7. Schlußbemerkung . . . . .	220
8. Schriftenverzeichnis . . . . .	221

## 1. Vorbemerkung

Seit der Orkanflut vom 17. Februar 1962 ist es üblich geworden, daß die deutschen Küstenländer die in einem solchen Zusammenhang gewonnenen Einsichten durch „Ingenieurkommissionen“ berichtsmäßig zusammentragen und beurteilen lassen. Diese Berichte, in welchen das Sturmflutereignis dokumentiert ist und die eingetretenen Schäden in Ursache und Wirkung gedeutet sowie Folgerungen für den Insel- und Küstenschutz gezogen sind, werden dann durch Veröffentlichung der fachlichen Diskussion zugänglich gemacht. Sie sind auch häufig Grundlage von Empfehlungen für die funktionelle und konstruktive Gestaltung von Küstenschutzwerken, für die Katastrophenabwehr und den Sturmflutwarndienst. So geschah es nach den Orkanfluten von 1962, 1973 und 1976.

Eine in Aufbau und Aussage vergleichbare Arbeit wurde nach der Orkanflut von 1717 durch den damaligen Deich- und Sielrichter der Sandumer Sprengel (Jeverland), Albert BRAHMS (1692 bis 1758), geleistet. Die Auswertung der 1717 und im Zuge der Deichwiederherstellung gewonnenen Erfahrungen sowie sein in diesem Zusammenhang erarbeitetes Wissen faßte er schließlich zusammen in seinem 1754/57 erschienenen Werk „Anfangs-Gründe der Deich- und Wasser-Baukunst“, das wohl als erstes Fachbuch des Küsteningenieurwesens bezeichnet werden kann. Die in ihm gegebenen Deutungen des Naturgeschehens sowie die die Beobachtungen stützenden theoretischen Erwägungen waren damals richtungweisend und haben an Aktualität seither nichts eingebüßt. Albert BRAHMS hat hierdurch den wissenschaftlichen Rang des Küsteningenieurwesens begründet.

LÜDERS (1958) hat anläßlich des 200. Todestages das Lebensbild von Albert BRAHMS gezeichnet und die Frage gestellt: „War dieser BRAHMS mit seinem Wissen seiner Zeit um 200 Jahre voraus, oder sind wir Heutigen in den verflossenen 200 Jahren nicht recht weitergekommen?“ In der Tat, es gibt kein Problem des modernen Küsteningenieurwesens, mit welchem sich BRAHMS nicht schon befaßt und zu welchem er sich nicht geäußert hätte, wobei es erst heute oftmals gelingt, seine Auffassungen durch den Einsatz neuartiger Geräte und Verfahren voll zu bestätigen bzw. abzuschließen.

Es ist nicht verwunderlich, daß in unserer schnellebigen Zeit, deren wichtigstes Instrumentarium in den klimatisierten Sälen der Rechenzentren zu finden ist, das Werk von Albert BRAHMS zwar nicht vergessen ist, aber nur noch selten seine gebührende Würdigung erfährt. In Abwandlung des LESSING'schen Aphorismus' auf KLOPSTOCK kann auch von BRAHMS gesagt werden: „Wer wird nicht einen BRAHMS loben, doch wer wird ihn lesen? Er will nicht gelobt, er will gelesen sein!“

Sinn dieser Arbeit ist es daher, das Werk von Albert BRAHMS erneut in Erinnerung zu bringen und durch einige Beispiele sowie unter Verwendung wörtlicher Zitate seine Auffassung mit späteren – verfahrensmäßig oder inhaltlich gleichartigen – Untersuchungen zu vergleichen. Die „Modernität“ seines Werkes kann nicht besser verdeutlicht werden.

## 2. Einführung

In der Weihnachtsnacht 1717 wurde die Nordseeküste durch die bis dahin schwerste bekannte Orkanflut heimgesucht. Von der Zuidersee bis zur Tonderner Marsch brachen die Deiche, und die in ihrem Schutz liegenden Niederungsgebiete wurden überflutet. Allein in Ostfriesland waren 2752 Menschenleben zu beklagen, und 930 Häuser fielen der zerstörenden Kraft des Wassers zum Opfer. Ungeheure Verwüstungen hinterlassend, hatte die Orkanflut das landeskulturelle Generationenwerk der damaligen Küstenbewohner vernichtet. Die Wiederherstellung der Küstenschutzwerke lief tatsächlich auf einen völligen Neuaufbau hinaus. Große Ausdeichungen mit Rückverlagerung der Deiche waren an vielen Stellen der Küste erforderlich, um die gewünschte Landessicherheit in kurzer Zeit wieder gewährleisten zu können. Die organisatorische und finanzielle Leistungsfähigkeit der Küstenbewohner wurde in den folgenden Jahren bis an die äußerste Grenze des Tragbaren beansprucht. Der damals 25jährige Albert BRAHMS verbrachte diese Weihnachtsnacht mit seiner jungen Frau und dem eben erst geborenen Kinde in der Unwirtlichkeit des Dachbodens seines Bauernhauses, das in der Nähe der Ortschaft Sande am westlichen Jadebusen gelegen war. Der Sorge um die Familie folgte diejenige um deren wirtschaftliche Existenz, denn sein ganzes Land war überflutet worden und auf längere Zeit verdorben, und auch an seinem beweglichen Vermögen erlitt er großen Schaden (LÜDERS, 1958).

Für Albert BRAHMS waren diese Ereignisse das Schlüsselerlebnis für seinen weiteren Lebensweg. Er folgerte: „Kein Deich, kein Land, kein Leben“ und widmete sich tatkräftig der schnellen und ausreichenden Wiederherstellung der in der Weihnachtsnacht zerstörten Deiche. Bereits 1718 wurde er zum Deich- und Sielrichter der Sandumer Sprengel bestellt und verblieb in diesem Amte bis 1752. Erst danach entschloß er sich, seine großen Erfahrungen und sein theoretisches Wissen schriftlich niederzulegen. Bereits 1754 konnte er dann den 1. Teil seines Werkes „*Anfangs-Gründe der Deich- und Wasser-Baukunst*“ veröffentlichen. Der 2. Teil erschien 1757. Es war ihm nicht vergönnt, auch den 3. Teil noch fertigzustellen. Am 3. August 1758 – im 66. Lebensjahr – nahm Albert BRAHMS Abschied von dieser Welt und von seinem Werk.

## 3. Der Deichbaumeister

Albert BRAHMS hat erstmals das Berufsbild des Küsteningenieurs gezeichnet, wie er seinen „Deichbaumeister“ heute wohl nennen würde. Er forderte, das Erfahrungswissen des Küsteningenieurwesens nicht allein auf subjektive Einsichten zu gründen, sondern es zunehmend auf wissenschaftliche Grundlagen zu stellen (Vorrede, T. I):

„Es ist also gar nicht zu verwundern, wann man in denen historischen Nachrichten aus denen älteren Zeiten so viele Einbrüche und Ueberschwemmungen, Untergang und Verlust vieler schöner Länder antrifft; der Mangel benötigter Erfahrung, die schlechte Regiments-Verfassung, und Uneinigkeiten, die Nachlässigkeit im Observiren, experimentiren, und annotiren, und endlich der Mangel benötigter Wissenschaften der damaligen Zeiten sind Schuld daran, daß es mit dem Deichbau nicht weiter kommen, als es gekommen ist.“

Hieran anschließend entwickelte er den Gedanken, daß die Deichbaukunst eine eigenständige Wissenschaft mit einer ihr eigenen Problematik sei. Insofern hat BRAHMS den heute allgemein anerkannten wissenschaftlichen Rang des Küsteningenieurwesens begründet (Vorrede, T. I):

„Dieses mag allhier genug seyn, um zu zeigen, daß die Deich-Bau-Kunst eben so wol, als die Civil- und Militär-Bau-Kunst auf gewisse untrügliche Grund-Sätze, und die eben so wol in regelmässiger Ordnung gebracht werden können, als jene, beruhe.“

BRAHMS entwirft sogar ein umfangreiches Curriculum des Küsteningenieurwesens, das in vielen Bereichen immer noch dem Lehrstoff des heutigen Grundlagenstudiums entspricht (§§ 5–7):

„Arithmetic, practische Geometrie, Trigonometrie, Mechanic, Static, Hydrostatic, Hydraulic, Analysis, höhere Geometrie, Infinitesimal-Rechnung.“

Neben dieser eingehenden Beschäftigung mit den Grundlagen empfiehlt er ergänzend dazu (§ 7):

„Observationes und Experimente mit Verstand und Judicio anzustellen.“

um zu

„denen theoretischen und practischen Wissenschaften eines geschickten Deich-Bau-Meisters“

zu gelangen (Überschrift 2. Kapitel). In der gegenseitigen Durchdringung von Theorie und der durch Naturbeobachtung gewonnenen Erfahrung sieht BRAHMS somit die unerläßliche Grundlage erfolgreicher Tätigkeit im Küsteningenieurwesen. Dieser heute beinahe trivial erscheinende Gedanke war seinen Zeitgenossen sicherlich nicht selbstverständlich. Für die Ingenieurausbildung folgert er weiter (§ 8):

„Wenn nun einer durch obige Wissenschaften einen guten Grund geleet, so will die Nothdurft erfordern, daß er sich auch zur wirklichen Ausübung und Praxi habil und geschickt mache, denn da die Werke der Kunst durchgängig einer solchen Natur und Eigenschaft sind, daß eine Fertigkeit durch die wirkliche Uebung entsteht, so muß einer auch ebenfalls allhier diesen Weg gewisser massen einschlagen. Zu dem Ende ist nöthig, daß er sich alles und jedes, was zum wirklichen Deichbau gehöret, wohl bekant mache, dabey sich nicht schäme zu lernen, was er noch nicht weiß, und vor allen Dingen sich für närrischen Hochmuth und Einbildung hüte, die angelegten Werke in unterschiedlichen Ländern und Provinzen in Augenschein nehme, alle und jede Umstände wohl remarquire, und sich deren erkundige, und also durch diesen Weg um so viel gewisser und sicherer dasjenige, was practicabel, nöthig, sicher, gut und nützlich; von demjenigen, was impracticabel, untauglich, mangelhaft, überflüssig, unsicher, gefährlich, oder zu kostbar und beschwerlich, zu unterscheiden und zu beurtheilen lerne; welches alles ohne sonderbare Mühe alsdann leichte geschehen kann, in so ferne durch obige Wissenschaften dazu ein guter Grund geleet worden.“

Nur in einer Beziehung hat sich Albert BRAHMS beim Berufsbild seines „Küsteningenieurs“ nicht festgelegt, nämlich bei der Wahl eines „angemessenen“ Titels (Zusatz T. I, Art. I, Anmerkung):

„Durch den Deich-Baumeister wird allhier diejenige Person verstanden dem das Directorium und Ober-Aufsicht aufs Deichwesen zu führen anvertrauet ist, von welchem mit Recht gefordert werden kan, daß er eine hinlängliche Wissenschaft, Einsicht und Erfahrung in allen dahin gehörigen Sachen haben müsse; übrigens thut nichts zur Sache, was für ein Character oder Titel demselben beygelegt worden, nur daß behörige Achtung und Pouvoir dadurch erhalten werde.“

Wegen der vielleicht willkürlich erscheinenden, zunächst verbalen Gleichsetzung des Deichbaues im Sinne von BRAHMS und des modernen Küsteningenieurwesens seien bereits hier einige grundsätzliche Bemerkungen eingefügt. Der Deichbaumeister des späten Mittelalters und der frühen Neuzeit war in seiner Tätigkeit nicht auf den eigentlichen Deichbau beschränkt. In seiner Obhut lagen auch der Sielbau und damit die Entwässerung und als Folge davon auch die landeskulturelle Erschließung des geschützten Landes. Gelegentlich mögen auch Forderungen des Hafenaufbaues von ihm erfüllt worden sein, wenn sich auch der Verkehrs-wasserbau damals noch auf niedriger Entwicklungsstufe befand. Da die Deichbaumeister sich neben rein handwerklichen Tätigkeiten aber auch mit Fragen etwa der Wasserstände, des Wellenauflaufes und insbesondere des Bodens als Baustoff und Basis der Deiche zu befassen hatten, ist es nicht abwegig, ihre Tätigkeiten in den großen Rahmen des Küsteningenieurwesens derzeitigen Verständnisses einzufügen.

Durch die Wahl seines Buchtittels, in welchem BRAHMS den Deich- und Wasserbau ausdrücklich als „Kunst“ apostrophiert, geht er in seinen Forderungen an das Können des Ingenieurs weit über das alltägliche hinaus. Kunst verlangt Prädestination, den schöpferischen Menschen. Theoretisches Wissen oder praktische Erfahrung vor Ort allein befähigen noch nicht zur schöpferischen Gestaltung. Erst das dem erfolgreichen Wasserbauingenieur eigentümliche und in Theorie und Praxis geschulte „Fingerspitzengefühl“ befähigen ihn zu der im Sinne von „Wasserbau-Kunst“ geforderten Leistung.

Die Auffassung von BRAHMS hinsichtlich der Einheit von Theorie und Praxis verdient auch deshalb besonders hervorgehoben zu werden, weil das derzeitige Küsteningenieurwesen zunehmend in „Theoretiker“ und „Praktiker“ zu zerfallen scheint. Seine Mahnung, die Praxis habe auf der Theorie aufzubauen und die Theorie finde ihren tieferen Sinn erst in der praktischen Anwendung, bedarf keiner Ergänzung.

#### 4. Ingenieur-Hydrographie

Albert BRAHMS hat neben seinen theoretischen Erwägungen das Naturgeschehen eingehend beobachtet und auch zu messen versucht. Trotz einiger quantitativer Unzulänglichkeiten, die sich aus apparativen Gründen erklären, sind seine Meinungen besonders wegen der angewandten Verfahren bemerkenswert.

##### 4.1 Wasserstandsmessungen

BRAHMS hatte zu Wasserstandsmessungen bereits einen Grenzwert-Pegel konstruiert (§ 98), der gegen den Seegang gedämpft war und das „Äquilibrium“ aufzeichnete. Mittels eines herausziehbaren, benähten Pfahles hat BRAHMS das Tidehochwasser mit einer Genauigkeit von 1 Zoll  $\approx$  2,5 cm feststellen können (Abb. 1). Hierdurch sind die Scheitelwerte einiger Sturmtiden überliefert, deren höchste die Weihnachtsflut 1717 war. Sie erreichte eine Höhe über der „ordinairen täglichen Fluth“ von 12 Fuß und 4 Zoll (etwa 3,87 m). Gerade diese Angaben von BRAHMS haben entscheidend dazu beigetragen, für das Jadegebiet den Nachweis zu führen, daß der Anstieg der Orkanflutsscheitel im Verlauf der Jahrhunderte der säkularen Entwicklung des mittleren Tidehochwassers parallel verlaufen ist (LÜDERS, 1971).

BRAHMS stellte damals bereits die Forderung nach einem dichten Pegelnetz entlang der Küste, um Klarheit über die jeweils örtlich auftretenden Sturmtidewasserstände zu gewinnen (Zusatz T. I, Art. IV):

„Von denen unumgänglich notwendigen Observationen, die beym Deich- und Wasserbau nicht aus der acht zu lassen sind.

Der Deich-Baumeister besorget, daß alle 2 bis 3 Meilen ohngefehr nachdem es nöthig erachtet wird Fluth-Mässer oder solche Maschinen, womit zu jederzeit die eigentliche oder wahre Höhe derer Sturm-Fluthen nach dem Aequilibrio oder ebenen und stillem Wasser gerechnet, accurat abgemessen werden können,...

Weiterhin hat BRAHMS den Wasserstandsverlauf fortlaufend gemessen und so erstmals eine Tide für einen Ort im Jadebusen aufzeichnen können (§ 96, s. auch Abb. 2).

THW - PEGEL  
nach Albert Brahms (1754)

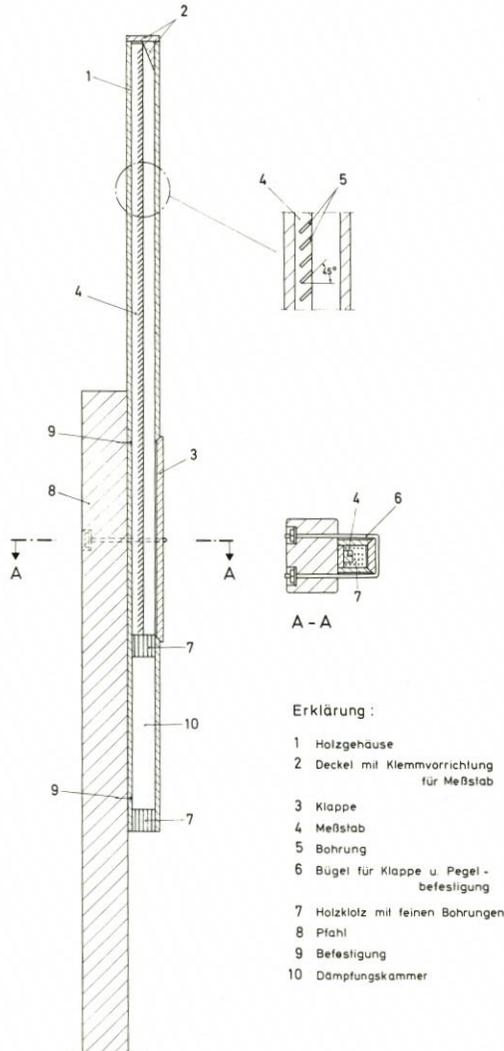


Abb.: 1.

## TIDEKURVE AN DER JADE

nach Aufzeichnungen von Albert Brahms (1754)

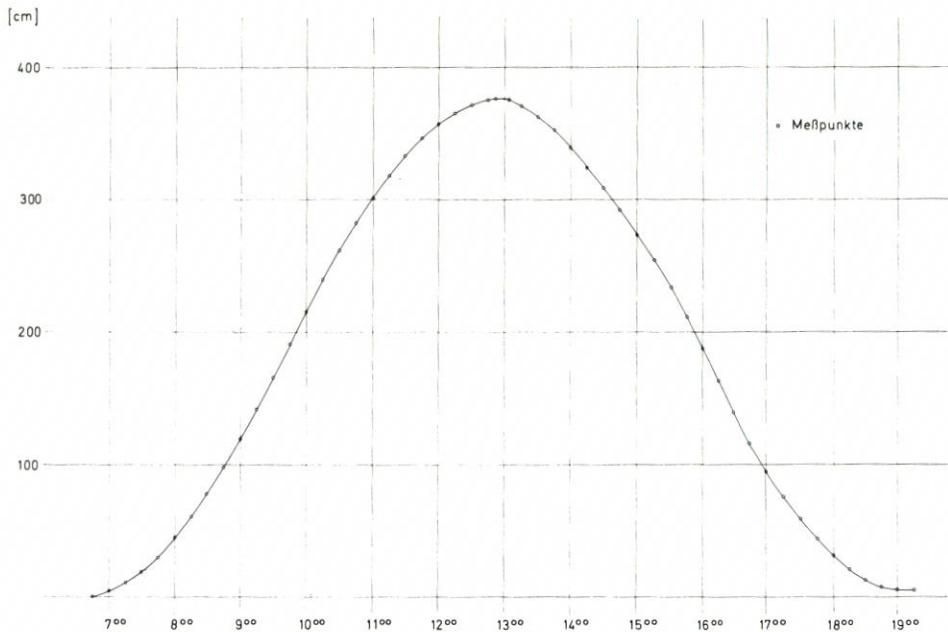


Abb.: 2.

## 4.2 Sturmtidenklassifikation

Albert BRAHMS hat seine Wasserstandsmessungen langfristig ausgewertet und aus ihnen erstmals eine Sturmtidenklassifikation entwickelt. Er teilte die Sturm- oder See-Fluthen, wie er sie nannte, in folgende Höhenstufen ein (§ 100):

*„Es versteht sich aber auch zugleich von selbst, daß sothane Deiche suffisant und stark genug seyn müssen, nicht nur geringe und mittelmäßige, sondern hauptsächlich auch grosse und totale Fluthen zu widerstehen. Durch geringe Fluthen werden diejenigen verstanden, die etwa nur 6, 7, 8 bis 9, durch mittelmäßige die 9, 10, bis 11, und durch grosse und totale diejenige, die 11, 12 bis 13 reinländische Fuß nach dem Aequilibrio gerechnet, über der ordinären täglichen Fluth steigen: denn eben diese sind es, die Land und Leuten so zu sagen den Hals brechen, unwiederbringlichen Schaden, Untergang und Verderben anrichten; unter welchen letztern die grosse Fluth vom 25. Dec. 1717 billig mit gerechnet werden muß (§ 48. fqq.). Die ersten kommen öfters, die andern seltener, und die letztern am allerseltensten; indessen ist man doch niemals davor sicher, und können entstehen, ehe man sich versiehet.“*

LÜDERS (1975) hat die Höhenangaben von BRAHMS auf metrische Maße umgerechnet und ebenfalls den Bezug zum MThw hergestellt. Hieraus ergeben sich folgende Grenzen:

„geringe Fluthen“:  $\text{Thw} < \text{MThw} + 1,09 \text{ m}$

„mittelmäßige Fluthen“:  $\text{MThw} + 1,09 \text{ m} \leq \text{Thw} < \text{MThw} + 1,72 \text{ m}$

„große Fluthen“:  $\text{MThw} + 1,72 \text{ m} \leq \text{Thw} < \text{MThw} + 2,35 \text{ m}$

„totale Fluthen“:  $\text{MThw} + 2,35 \text{ m} \leq \text{Thw}$

Ergänzend zu der Höheneinteilung der Sturmtiden hat BRAHMS auch eine Häufigkeitseinteilung vorgenommen (§ 182):

„1) Das Wasser steigt in der Höhe in der ordinären täglichen Flut, alle höhere, oder etwas niedrigere mit eingerechnet, jährlich über 700 mal, und unter solcher ordinären Fluts-Höhe kan nichts wachsen oder grünen, daß den Grund decken und schützen könnte, also müssen die Ufern allwo es nöthig ist, bis auf dieser Höhe mit erforderliche Ufer-Baue versehen seyn, welches allhier die Steine verrichten.

2) Zu 1 bis 2 Fuß hoch über der täglichen Flut, steigt es so oft nicht, jährlich kaum 100 mal. Diese Höhe wächst schon dichte und grün aus. Es versteht sich aber leicht, daß diese unter obigen 700 und etlichen mit begriffen sind.

3) Von 2 bis 3 Fuß kömmts Jahr aus, Jahr ein, durcheinander gerechnet, keine 40 mal; diese sind unter eben gedachten 100 mitgerechnet.

4) Von 3 bis 4 Fuß nicht über 20 mal.

5) Von 4 bis 5 Fuß kaum 10 mal.

6) Von 5 bis 6 Fuß keine 5 mal.

7) Von 6 bis 7 Fuß selten 2 mal.

8) Von 7 bis 8 Fuß höchstens 1 mal.

9) Von 8 bis 9 Fuß, alle 2 bis 3 Jahr ein mal.

10) Von 9 bis 10 Fuß, etwa ums 5te Jahr ein mal; und

11) Von 10 bis 11 Fuß, kaum alle 10 Jahre ein mal. Dieses alles nach ebenen oder stillem Wasser gerechnet.“

BRAHMS stellte hiermit nicht nur eine rein „akademische“ Betrachtung an, sondern folgte aus seinen Beobachtungen für den praktischen Deichbau (§ 35):

„Denn obwol die kleinern Fluthen, so den Fuß des Deichs nur ein wenig übersteigen, und etwa nicht über die halbe Höhe des Deichs steigen, eben keine so grosse Gewalt haben, als wenn sie höher und der Kappe näher kommen, so ist doch aber auch gewiß, daß jene desto öfterer sich einstellen, und den niedrigen Theil des Deichs nicht so feste und dichte sich verbinden lassen, als den obern Theil: ...“

Der Versuch einer Sturmtidenklassifikation ist in der Vergangenheit mehrfach und zuletzt von LÜDERS (1975) unternommen worden, wobei sich letzterer stark den Werten von BRAHMS nähert. Diese Versuche haben in den Fachkreisen erstaunlicherweise selten Verständnis oder Widerhall gefunden. Das muß um so mehr überraschen, als schon BRAHMS erkannte, daß die funktionelle Gestaltung der Außenböschung der Deiche wesentlich an den Eintrittshöhen und -häufigkeiten der Tidehochwasserstände zu orientieren ist. Das heute allein gebräuchliche Häufigkeitsverfahren zur Sturmtidenklassifikation steht in nur geringem innerem Bezug sowohl zu den erzeugenden Kräften als auch zu den Beanspruchungsbereichen der Küstenschutzwerke.

#### 4.3 Seegangsbeobachtungen

Die meßtechnischen Voraussetzungen, mit welchen BRAHMS sein Wissen um den Ablauf des Naturgeschehens zu bereichern suchte, zogen ihm damals – im 18. Jahrhundert – recht enge Grenzen. Um so mehr widmete er sich der Beobachtung der für die Sicherheit der Küste bedeutsamen Vorgänge. Das gilt insbesondere für die Zusammenhänge zwischen Seegang, Brandung, Wellenauflauf und Deichgestaltung. Lediglich durch Beobachtung und logische Überlegung kam er hier zu ersten Ergebnissen, die im großen und ganzen noch heute gültig sind. Für ihn kann somit nicht gelten, was GÖHREN (1974) über die Generationen von Küsteningenieuren sagte, die nach dem Tode von BRAHMS die Küstenforschung prägten: „Wir verfügen in der Küstenforschung seit rund 100 Jahren über den Tidepegel, ein Meßgerät, welches die Gezeitenschwingung und Windstauwellen einwandfrei aufzeichnet. Erst seit rund 10 Jahren sind wir in der Lage, mit erträglichem Aufwand und genügender Genauigkeit den Seegang zu messen. Dieses Ungleichgewicht hat die Arbeit – ja sogar das Denken – in der

Küstenforschung bis tief hinein in die Gegenwart geprägt. Es bedurfte unter anderem der Sturmfluten mit ihren schweren Seegangsschäden an den Seedeichen und sonstigen Küstenschutzwerken, um zu erkennen, welche Bedeutung die Seegangsforschung hat. Man kann – um ein Beispiel zu nennen – eine Deichhöhe nicht zuverlässig bemessen, wenn man nicht weiß, welche Wellenhöhen vor dem Deich auftreten. Und das weiß man – leider – heute immer noch nicht bzw. nicht genügend genau.“

Albert BRAHMS hat versucht, anhand der örtlichen Randbedingungen die möglichen Wellenhöhen vor dem Deich abzuschätzen. Er erkannte bald, daß die maximal mögliche Wellenhöhe im Flachwasser eine Funktion der örtlichen Wassertiefe ist und mit ihr steigt oder fällt. Damit nähert er sich bereits einer Betrachtungsweise, die sich in den rund 200 Jahren später entwickelten Brecherkriterien für den Flachwasserbereich wiederfindet (§ 71):

„Wie hoch aber bey allerley Wasser-Tiefen solche Wasser-Wellen eigentlich gehen können, ist wol nicht leicht zu determiniren möglich; nimt man folgende Umstände an: 1) daß das Wasser einen geraumen freyen Lauf habe, und vom Winde recht bewegt und getrieben werden könne, und 2) die Wellen entweder völlig oder beynabe perpendicular aufstossen, so wird es bey gleicher Stärke des Windes wenig differiren, oder es erheben sich die Wasser-Wellen in ratione, wie die Radices Quadratae der Wasser-Höhen: das ist, wann auf einer Wasser-Tiefe von 16 Fuß die Wellen sich 4 Fuß hoch erheben, so werden auf einer Tiefe von  $12\frac{1}{4}$  Fuß sich selbige erheben  $3\frac{1}{2}$  Fuß und auf

9 Fuß = 3 Fuß

$6\frac{1}{4}$  --- =  $2\frac{1}{2}$  ---

4 --- = 2 ---

$2\frac{1}{4}$  --- =  $1\frac{1}{2}$  ---

Wornach alles übrige leichtlich wird ausfündig zu machen seyn, wobey es sich von selbst versteht, daß diese angegebene Regel unter gleicher Stärke vom Winde verstanden werden muß.“

Wenn auch die von FÜHRBÖTER (1974) vorgeschlagene Beziehung für die mögliche Wellenhöhe vor Deichen

$$H_{\max} \approx h$$

erheblich höhere Werte ergibt, so ist für die Abschätzung des Seegangs vor Deichen, die durch Inseln oder hochliegende Watten geschützt sind, die Abschätzung von BRAHMS

$$H_{\max} = \sqrt{h}$$

wobei  $H_{\max}$  = max. Wellenhöhe;  $h$  = Wassertiefe

eher zutreffend, wie der Vergleich umfangreicher Naturmessungen vor Schar- und Vorlanddeichen (NIEMEYER, 1977 u. 1979) gezeigt hat (Abb. 3).

Ebenso wie der Aufzeichnung der Sturmzeitenwasserstände maß BRAHMS der Beobachtung des Wellenaufbaus für die Festlegung der Bestickhöhe große Bedeutung bei (§§ 30 u. 98):

„... dannhero muß zuvorderst dem Deiche eine genugsame Höhe gegeben werden, damit er nicht überströmet werden möge. Als, es könne an einem Ort das Wasser, nach dem ebenen und stillen Wasser gerechnet, 12 Fuß über dem flachen Mey-Felde, worauf der Deich gelegen, aufschwellen, und die Höhe der auflaufenden Wellen betrüge über gedachtem Wasser-Paß noch 4 Fuß: so müßte dem Deiche an einem solchen Orte eine Höhe, die nicht minder als 16 Fuß über das Mey-Feld sich betrüge, gegeben werden, und unter dieser Höhe darf man den Deich nicht kommen lassen.“

„Zur accuraten Abmessung solcher hohen Sturmfluthen werden erfordert 1) deren Höhe über der ordinären täglichen Fluth, so wie dieselbe §. 54. beschrieben und bezeichnet worden, nach ebenem oder stillem Wasser gerechnet; und sodann 2) die Grösse oder Höhe derer aufschlagenden Seewellen über sothanes Aequilibrium des Wassers.“

Zur Festlegung dieses Wellenaufbaus empfiehlt BRAHMS bereits die Einmessung von Teekgrenzen. Dieser Vorschlag, der in der Literatur erst wieder in den „Allgemeinen

SEEGANGSABSCHÄTZUNG NACH BRAHMS (1754)  
Vergleich mit Naturmessungen

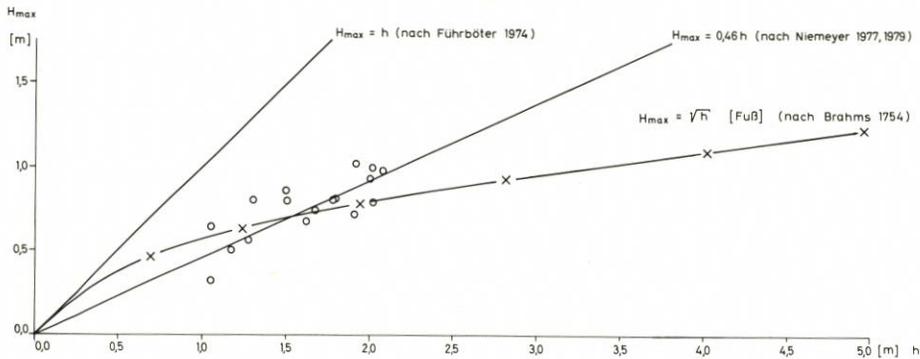


Abb.: 3.

Empfehlungen für den deutschen Küstenschutz“ (Arbeitsgruppe „Küstenschutz“ 1955) auftaucht, ist bis in die jüngste Zeit zur systematischen Erfassung des örtlichen Wellenaufbaus angewandt (ERCHINGER, 1974; KRAMER, KRAUSE u. LUCK, 1976) und zur Abschätzung des Bemessungswellenaufbaus herangezogen worden (NIEMEYER, 1976).

## 5. Deichbau

Obwohl ein großer Teil des Werkes von BRAHMS dem Siel- und Schleusenbau sowie dem Kanalbau gewidmet ist, wird doch der Deichbau allem anderen übergeordnet. Hierfür hat er Anregungen und Vorschläge entwickelt, die seiner Zeit weit voraus waren.

### 5.1 Funktionelle Gestaltung

BRAHMS versuchte, die Deichgestaltung weitgehend durch Wissenschaft und Beobachtung zu begründen. Zwar ist sein „Bemessungswert“ inhaltlich anders zu beurteilen als der aus dem Vergleichsverfahren entwickelte „Bemessungswasserstand“ heutigen Verständnisses, doch ist die Festlegung der Bestickhöhe (§ 98):

Bestickhöhe nach BRAHMS:

$$\text{HHThw} + \text{maximaler beobachteter Wellenauflauf}$$

Bestickhöhe nach Vergleichsverfahren 1962:

$$\text{HHThw} + \text{Zuschlag} + \text{maximaler beobachteter Wellenauflauf}$$

(KRAMER, LIESE u. LÜDERS, 1962)

für die damalige Zeit bemerkenswert, wobei BRAHMS die Berücksichtigung eines Sack- und Setzmaßes nicht vergaß (§§ 44 u. 45):

„Es muß also dem Deiche eine feste Höhe von 17 Fuß ohne Sinkung über der täglichen Fluth gegeben werden, . . .“

„Die Einsinkung ehe der Deich festen Grund und Boden bekommt, beträgt 11 Zoll, . . .“

Wegen der bei dem damaligen Stand der Bodenmechanik nicht auszuschließenden

Unwägbarkeiten eines geschätzten Sack- und Setzmaßes empfahl BRAHMS, die Deichhöhe im Hinblick auf Sackungen und Setzungen regelmäßig zu überprüfen (§ 53):

*„Da auch die Erfahrung lehret, daß die Deiche, wenn sie gleich einmal in einen guten Stand gesetzt worden, nicht jederzeit darinn verbleiben: sondern durch Sinkung, Abspülung, Regen und Wind an einem Orte mehr, am andern weniger, von Zeit zu Zeit schwächer und unhaltbarer werden, so muß wenigstens ums andere oder dritte Jahr eine accurate Deich-Visitation und Nachmessung vorgenommen werden: und zwar, damit man erfahre, ob und wie viel an einem jeden Orte der Deich an Stärke abgenommen habe?“*

Da er diese Nachmessungen am MThw zu orientieren empfahl (§ 54):

*„Damit man auch zu allen diesen Abmessungen ein zuverlässiges Fundament habe: so habe dazu kein besseres, beständigeres und so man auch in folgenden Zeiten leicht wieder finden kann, zu erdenken vermogt, als die Höhe der ordinären täglichen Fluth.“*

wäre bei konsequenter Anwendung auch der Bezug zum säkularen Anstieg des Meeresspiegels hierdurch erfaßt worden.

Daß sonst ausreichend bemessene Deiche gelegentlich trotzdem bei voller Beanspruchung brachen, führt BRAHMS neben anderen Ursachen auf überschwappende Wellen und zu steile Binnenböschungen zurück. Hierzu führte er aus (§ 37):

*„... : denn daferne selbige zu steil, können sie 1) wenn bey starken und hohen Fluthen sie vom Wasser durchdrungen werden, leichte herunter schiessen; worauf denn nothwendig ein Durchbruch entstehen muß: 2) bey übertriebenen Wasser-Wellen stürzt die Kappe eines Deiches, daferne derselbe nicht inwendig eine genugsame Fläche hat, überaus leichte hinweg, woraus denn Ueberschwemmungen erfolgen müssen.“*

In diesem Zusammenhang schlägt er vor, die Außenböschungen der Deiche konvex zu gestalten (Abb. 4). Erst HENSEN (1955) hat diesen Gedanken aufgegriffen und in Modellversuchen nachgewiesen, daß die konvexe Form der konkaven tatsächlich überlegen ist. BRAHMS, § 35:

*„Je höher das Wasser steigt, je stärkere Wellen es führet: und weil der obere Theil des Deiches mehr von der Bewegung des Wassers gegen selben auszustehen hat, als der niedrige, so müste billig jenem eine grössere Dossirung gegeben werden als diesem. Die Gefährlichkeit, worin der Deich geräth, wenn die Kappe einstürzt, und das Wasser bis in die inneren Theile durchdringen kan, erbeischt ebenfals dieses: Dannenhero dem Deiche mit Raison eine Figur nach der Wasser-Seite gegeben werden könnte, wie Tab. 1. Fig. 11. ausweist.“*

ENTWURF EINES SEEDEICHPROFILS  
nach Albert Brahms (1754)

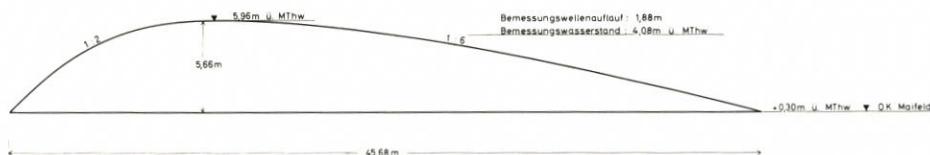


Abb.: 4.

Ebenso hat FÜHRBÖTER (1974) in seiner Arbeit „Küstenschutz auf neuen Wegen“ in Zusammenhang mit der Druckschlagbelastung von Seedeichen vorgeschlagen: „Da diese Zone höchster Belastung auf der Höhe des Ruhewasserspiegels der Bemessungssturmflut liegt, empfiehlt sich auch hieraus das konvexe Deichprofil, . . .“

Die Wechselwirkungen von Deichneigung und Seegang sind BRAHMS qualitativ bereits bis zu einem Grad klar gewesen, wie er aus heutigen Untersuchungen (vgl. FÜHRBÖTER, 1974) zum Druckschlagproblem bekannt ist. So schlägt er bereits Neigungen von 1:4 bis 1:6 – je nach Kleiqualität – bei seegangsexponierten Deichen vor (§ 36 u. Fig. 11 [Abb. 4]):

*„Dahingegen aber wann ein grosses und gewaltiges Wasser von etwa 15, 16 und mehr Fuß hoch bey starkem Sturm-Winde einem Deiche unter freyem offenem Lauffe fast perpendicular aufstösset, da können die Dossirungen besonders wenn die Deich-Erde etwas schlecht seyn solte, nicht unter 4, 5 bis 6 Fuß auf jeden Fuß Höhe genommen werden; welches man der Klugheit und Erfahrung eines geschickten Deich-Baumeisters überlassen muß. Ueberhaupt kann man nur so viel davon sagen, daß alle auswendige Dossirungen eines Deichs so stark genommen werden müssen, daß die auswendige Fläche desselben so wenig als möglich von der Gewalt des Wassers angegriffen werden könne: wobey dasjenige, so von der äussern Figur des Deichs § 35. erinnert worden, in reifliche Consideration zu ziehen ist.“*

In Abb. 5 ist ein von BRAHMS vorgeschlagenes Deichprofil für folgende hydrographische Randbedingungen wiedergegeben (§ 105): Bei HHT<sub>hw</sub> = 13 Fuß = 4,08 m ü. MThw und einem beobachteten maximalen Wellenauflauf von 6 Fuß = 1,88 m sowie einer Wassertiefe am Deichfuß von 12 Fuß = 3,77 m beträgt die maximale Wellenhöhe dort (§ 71):

$$H_{\max} \approx 3 \frac{1}{2} \text{ Fuß} = 1,10 \text{ m}$$

In Analogie zur DELFTER Formel ergibt sich für die vorgegebene Außendeichneigung von 1:6:

$$A = \frac{H_{\max}}{n} \cdot \alpha$$

$$1,88 = \frac{1,10}{6} \cdot \alpha$$

$$\alpha = 10,33$$

worin: A = Wellenauflauf  
 $H_{\max}$  = maximale Wellenhöhe  
 n = Neigung  
 $\alpha$  = dimensionsloser Beiwert zur Bestimmung des Wellenaufbaus

sind.

Der Wellenaufbau nach BRAHMS beträgt somit

$$A = \frac{H_{\max}}{n} \cdot 10,33,$$

was etwa der DELFTER Formel in der an Naturmessungen orientierten Fassung (NIEMEYER, 1976)

$$A = \frac{H_{\max}}{n} \cdot 8$$

entspricht.

## 5.2 Deichbau und Deichunterhaltung

Neben seinen eingehenden grundsätzlichen Überlegungen hat BRAHMS Fragen des praktischen Deichbaus und der Deichunterhaltung nicht vernachlässigt. Wenn auch im modernen

Seedeichbau die maschinentechnischen Verfahren andere und effektivere Möglichkeiten erschließen, so sind doch einige Auffassungen von BRAHMS auf diesem Gebiet immer noch beachtenswert. Als Beispiel sei der Vorschlag angeführt, Grassoden für den Deichbau in Stärken von 4 bis 6 Zoll (etwa 10 bis 15 cm) zu stechen (§ 56),

*„und werden die dicken nicht so leichte von dem Wasser ausgehoben, als die dünnern“.*

Im „Fachgespräch am runden Tisch“ (LÜDERS, 1959) wird hervorgehoben, daß bei Deichen, die starkem Wellenangriff ausgesetzt sind, sich Soden von 15 cm bei Neueindeckung bewährt haben.

Sehr eingehend hat BRAHMS sich mit der Vorlanderhaltung befaßt. Zwar kannte er den Begriff des „aktiven Küstenschutzes“ noch nicht, doch halten die von ihm herausgestellten Vorteile von Deichvorländern modernen Auffassungen stand (LÜDERS, 1957 b). Er nennt u. a. folgende Gründe, die für die Erhaltung von Deichvorländern sprechen:

1. Dämpfung des Seegangs (§ 195)
2. Nahegelegene Entnahmefähigkeiten von Klei und Soden für Deichreparaturen und -erhöhungen (§ 60)
3. Verhinderung von Strombrüchen bei Deichbruch (§ 86)
4. Ersparnis schwerer Holzungen (heute Deckwerke) an „Wasserdeichen“ (Schardeichen), da selbst bei drohendem Vorlandabbruch der Schutz dort durch leichtere Holzungen erfolgen kann (§ 60)

BRAHMS gibt deswegen grundsätzlich dem Vorlanddeich den Vorzug, wobei allerdings bedacht werden muß, daß die heutige bewährte Form von Schardeichen erst durch neue Bauverfahren und -techniken ermöglicht wurde.

In jüngeren Untersuchungen ist nachgewiesen, daß bei Orkanfluten der Seegang auf Vorländern nicht wesentlich gedämpft wird (NIEMEYER, 1977, 1979). Die Auffassung von BRAHMS ist in dieser Beziehung jedoch seit mehr als 200 Jahren richtungweisend.

## 6. Optimierung und Nutzen-Kosten-Analyse

Wie LÜDERS (1958) berichtet, hatte BRAHMS mit seinen Deichbauplänen bei den Deichpflichtigen erhebliche Widerstände zu überwinden, da sie die Kosten hierfür nicht tragen wollten. Diese Widerstände suchte er mit Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen zu überwinden, die heute als Nutzen-Kosten-Analysen und Optimierungen bezeichnet würden.

So gibt er bereits Hinweise auf den Zusammenhang zwischen Ausbau- und Unterhaltungskosten von Deichen (§ 102):

*„Die Dossirungen eines Deichs müssen so genommen werden, daß sie die allerwenigste Kosten verursachen: diese Kosten bestehen in unterschiedene Arten von Ausgaben; als zu vorderst in dem ersten Anbau, und hiernechst in der jährlichen Unterhaltung; Je gelinder, oder stärker man im ersten Anbau die Dossirung nimmet, je weniger oder mehr Geld dieselbe kosten, und zwar in der Proportion, wie die Grösse solcher Dossirungen genommen werden. . . .*

*Solchemnach müssen die ersten Anbau-Kosten notiret, und aufgeschrieben werden, die jährliche Reparatur- und Unterhaltungs-Kosten aber müssen als Zinsen von einem aufgenommenen Capital betrachtet, und dieses Capital zu gedachten Anbau-Kosten hinzu gethan werden, so muß sodann diese Summa die geringste seyn, so möglich ist, daferne die Dossirung aufs beste angeordnet worden. . . .*

*Damit auch dieses um so viel klärlicher in die Augen falle, ist auf unterschiedene Grössen derer auswendigen Dossirungen folgendes Täflein berechnet.*

Auf jeden Fuß Höhe Dossirung	Macht an Dossirung zu 16 F. hoch	Jährliche Unterhaltungs-Kosten	Macht an Capital	Erste Anbau-Kosten	Summa in Tot.
Fuß	Fuß	Rthlr.	Rthlr.	Rthlr.	Rthlr.
2	32	2 <sup>13</sup> / <sub>20</sub>	53	10 <sup>2</sup> / <sub>3</sub>	63 <sup>2</sup> / <sub>3</sub>
2 <sup>1</sup> / <sub>2</sub>	40	1 <sup>24</sup> / <sub>29</sub>	36 <sup>16</sup> / <sub>29</sub>	13 <sup>1</sup> / <sub>3</sub>	49 <sup>27</sup> / <sub>87</sub>
<i>usw.</i>					
6	96	5 <sup>3</sup> / <sub>148</sub>	7 <sup>6</sup> / <sub>37</sub>	32	39 <sup>6</sup> / <sub>37</sub>

So viel die inwendige Dossirungen, und die Dicke des Deichs oder obere Breite der Kappe betrifft, davon ist § 37. und 38. hinlängliche Nachricht gegeben worden, da nun die niedrigen steilen und dünnen Deiche, nicht alleine dem Lande schlechte Sicherheit verschaffen, sondern auch noch überdem weit kostbarer und beschwerlicher zu unterhalten sind, als recht gute haltbare Deiche, so erhellet aus obigem zur Gnüge, wie unrichtige Begriffe, und geringe Einsicht diejenige vom Deich-Bau haben müssen, die vor der Hand die erforderliche Kosten scheuen, und um nur vor erst einen Thaler zu ersparen und weniger Zeit mit gedoppelten, und noch mehrfachen Kosten und Schaden, man wolle oder wolle nicht, dennoch nothwendig hingeben muß.“

Diese „Optimierung“ ist ein in modernen Volkswirtschaften übliches Verfahren, das auch im Küsteningenieurwesen angewandt wird, wie z. B. in den Untersuchungen von KRAMER (1977) über die Wirtschaftlichkeit unterschiedlicher Deichformen.

Eine eingehende Nutzen-Kosten-Analyse entwickelte BRAHMS an den Beispielen einer geplanten Eindeichung und einer notwendigen Deicherhöhung, wobei er die Baukosten zu den Erträgen eines neu einzudeichenden Landes bzw. zu dem materiellen Schaden einer Überflutung in Beziehung setzt. Da dieses Verfahren seinerzeit grundsätzlichen Charakter hatte, werden seine Auffassungen und Berechnungen sehr ausführlich zitiert (§§ 46 bis 49):

„Um auch zu wissen, wie viel Pflüge an Arbeitern man anzusetzen hat, so wird ordinair die Arbeit am Haupt-Deich primo May angefangen, und so eingerichtet, daß die Erd-Arbeit innerhalb 10 bis 11 Wochen mit der völligen Mannschaft verrichtet seyn könne: Also kommen auf etwa 10000 Pütten, so mit Schub-Karren einzubringen (da indessen der Ueberrest mit Wüppen eingefahren werden kan) auf jede Woche etwa 1000 Pütten. Ein jeder Pflug von 9 Mann kan wöchentlich einbringen 6 Pütten 1 bis 2 Schacht: folglich werden zur Keuer-Arbeit erfordert etwa 160 Pflüge, jedweden Pflug zu 9 Mann, machen in allen 1440 Mann.

Jedweder Pflug braucht 640 Fuß Keuer-Dielen; machen in allen 102400 Fuß. Davon 40 Fuß frey zur Stelle auf einen Reichthaler gerechnet, machen zusammen an Gelde 2560 Rthlr.

Jedweder Mann braucht eine Schub-Karre, und auf jeden Pflug eine in Reserve fürs Brechen: Dagegen sich die Arbeiter solche während der Arbeit selber unterhalten müssen: folglich in allen 1600 Schub-Karren. Diese kosten frey zur Stelle a 18 Schaf; macht in allen 1066 Rthlr. 18. Sch.

Für 180 Arbeiter-Hütten an Stroh, Latten und Nagel, jedwede 2½ Reichthaler; machen zusammen 450 Rthlr.

Also für Keuer-Diehlen . . . . .	2560 Rthlr.	— Sch
Für Keuer-Karren . . . . .	1066	18 —
Für Hütten bey der Arbeit . . . . .	450	— —

Summa Materialien kosten 4076 Rthlr. 18 Sch.

Die Erde, so mit Wüppen eingefahren werden kan, ist viel vorteilhafter, als diejenige, welche mit Schubkarren angebracht werden muß: denn 1) werden die Materialien von Karren und Brettern erspart, 2) wird nicht so viel Volk dazu erfordert, 3) wird der Deich ungemein viel stärker, solider und dichter. Es kommt aber theils auf den Grund und Boden, theils auch auf die Witterung an, ob dieselbe gebraucht werden können oder nicht.

Der Kay-Deich, so in allen 836 Ruthen, a 20 Fuß, lang, kostet inclusive der durchzudammen-den Rillen und Balgen per Ruthe 5 Rthlr., thut 4180 Rthlr.

Der Rein- oder Zug-Schloot wird 20 Fuß vom inwendigen Fuß des Deichs ab, oben 12 unten

im Boden 7 Fuß weit, und 4 Fuß tief gemacht: und woferne der Grund und Boden feste, wird derselbe das erste Jahr bey der Bedeichung, wo aber dem Grunde nicht zu trauen stehet, das folgende Jahr, geöffnet; und da die Erde mit zum Deich employret wird, so kömmt desfalls nichts im Anschlage.

910 Ruthen Fahr-Weges durch das neue Land, so zu beyden Seiten mit Graben versehen werden, kosten per Ruthe 12 Schaf, und also in Summa 404 Rthlr. 12 Sch. Für eine Abwässerungs-Pumpe, so Landwerts zu legen, 400 Rthlr. Endlich für Extra-Kosten in allen 2000 Rthlr. Solchemnach betragen die Kosten

1. An Füll-Erde . . . . .	49396 Rthlr.	13 Sch.	3 $\frac{1}{4}$ Witt.
2. An Belegungs-Kosten mit grünen Rasen . . . . .	2108 ———	9 —	= —
3. Für Materialien . . . . .	4076 ———	18 —	= —
4. Die Kay-Deichs-Kosten . . . . .	4180 ———	= —	= —
5. Anlegung des Fahr-Weges . . . . .	404 ———	12 —	= —
6. Zu einer Abwässerungs-Pumpe . . . . .	400 ———	= —	= —
7. Und auf Extra-Kosten überhaupt . . . . .	2000 ———	= —	= —
Summa totalis	62565 Rthlr.	25 Sch.	3 $\frac{1}{4}$ Witt. (§ 46)

Die Größe des zu gewinnenden Landes, so innerhalb des Bezirks derer Rein-Schlöte belegen, ist befunden worden nach 20füßigen Rheinländischen Ruthen, wovon 120 □ Ruthen auf ein Matt gerechnet werden, in Summa 795 Matt 60 □ R.

Davon gehet ab für Fahr-Wege . . . . .	13 Matt	5 □ R.
An grossen Balgen, so zu halb Land angeschlagen werden, 12 Matten,		
62 □ Ruthen, machen halbscheidlich . . . . .	6 Matt	31 □ R.
Summa Abgang . . . . .	19 Matt	36 □ R.
Also bleibt an gut Land	776 Matt	24 □ R.

Unter vielen Projecten, wie das Land am vortheilhaftesten zu nutzen, ist am convenabelsten befunden worden, dasselbe auf hinlängliche Terminen, bey anständigen Parcelen zu verkaufen, und nach erlegten Terminen einen leidlichen jährlichen Canonem darauf zu legen. Allhier soll die Kauf=Summe in 8 Jahren bezahlet, und der Anfang auf Martini des Jahres, darinnen die Bedeichung geschiehet, gemacht werden: Weiter wird in diesen Jahren nichts davon entrichtet; nach geendigten Zahl=Jahren aber wird im 9ten Jahre zum ersten male, und folglich alle Jahre in Perpetuum ein Reichsthaler pro Canone, und weiters nichts, gegeben.

Unter diesen Bedingnissen kan das Matt allhier gelten 120 Reichsthaler, als:

		Rthlr.	Sch.	Witt
Das erste Jahr gleich baar	15 Rthlr., machen	15	—	— = —
Das zweyte Jahr	15 ——— sind so gut, als gleich baar	14	— 7	— 14 $\frac{6}{21}$
Das dritte Jahr	15 ——— — — —	13	— 17	— 3 $\frac{7}{11}$
Das vierte Jahr	15 ——— — — —	13	— 1	— 3 $\frac{11}{23}$
Das fünfte Jahr	15 ——— — — —	12	— 13	— 10
Das sechste Jahr	15 ——— — — —	12	— =	— =
Das siebente Jahr	15 ——— — — —	11	— 14	— 10 $\frac{10}{13}$
Das achte und letzte Jahr	15 ——— — — —	11	— 3	— =
Summa baar gegen 5 pro Cent Courtage Rthlr.		103	— 3	— 2 $\frac{1}{2}$

Folglich machen 776 Matten 24 □ Ruthen in allen . . . . . 80037 Rthlr. 26 Sch. = Wit.  
Davon abgezogen die Bedeichungskosten, als . . . . . 62565 Rthlr. 25 Sch. 3 $\frac{1}{4}$  Wit.

Bleibt übrig . . . . . 17472 Rthlr. 0 Sch. 16 $\frac{1}{4}$  Wit.  
Und da der Groden unbedeicht jährlich 200 Rthlr. einbringen können, so an Capital zu 5 pr. C. beträgt . . . . . 4000 ——— = — = —  
Abgezogen, bleibet Profit . . . . . 13472 ——— = — 16 $\frac{1}{4}$  Wit.

ohne den nachherigen jährlichen Canonem, daferne diese Unternehmung glücklich von Statten gehet. Man siehet also, das unter solchen Umständen es rathsamer sey, ein sothanes Stück Land zu bedecken, als länger liegen zu lassen. Uebrigens wird es nicht schwer seyn, jedesmal, wenn nur alle und jede dabey einschlagende Umstände wohl überleget werden, ausfündig zu machen, ob eine dergleichen Bedeckung der Mühe und Kosten werth sey, oder nicht.“

„Es ist aus der Erfahrung mehr als zu bekannt, wie oftermalen bald hier, bald dort Einbrüche vom Wasser geschehen, wobey man jedoch keines weges gedenken muß, als ob selbige allemal ganz und gar unvermeidlich gewesen wären. Es ist im Gegentheile aus der Hydraulic zur Gnüge bekant, und auch Cap. 3. angewiesen worden, daß das Wasser doch nur eine abgemessene und determinirte Kraft habe. Also kommt es nur auf folgende Stücke an:

- 1) Daß man untersuche, zu welcher Höhe und Kraft das Wasser an diesem und jenem Orte zu einiger Zeit gestiegen, oder in denen allergrössten und schweresten Fluthen, davon Nachricht vorhanden, angewachsen sey, damit man daraus urtheilen könne, durch welche Verstärkung der Deiche einem solchen Gewässer hätte Widerstand geschehen können und mögen. Sodann
- 2) Ob es vortheilhaft und profitabel, daß man die übrige, und zur Verstärkung annoch erforderliche Kosten anwende, oder die Deiche nur so im Stande lasse, wie sie sind, und es darauf ankommen lasse.“

„Damit ihr aber in einer so importanten Sache um so viel gewisser gehet, so setzet, wie gesagt

1. Zum Fundament eine solche Fluth, als euch eine aus denen aufgezeichneten Nachrichten und Erfahrungen bekant ist, und merket an, zu welcher Höhe dieselbe gestiegen.
2. Bestimmt das Besteck eines Deichs, so hinlänglich, einer solchen Fluth an dem gegebenen Orte zu widerstehen, welches geschehen kann, wenn ihr die Höhe und Force des aufgeschwellenen Gewässers zu determiniren wisset.
3. Calculiret, wie groß die Kosten seyn müssen, die erfordert werden, um euren bisherigen geringen Deich in einen so verbesserten und verstärkten Zustand zu bringen.
4. Erweget aus denen aufgezeichneten Nachrichten und Erfahrungen die Grösse des Unglücks, Verlusts und Schadens, so durch eine dergleichen grosse Fluth verursacht worden, und rechnet solches, so gut sichs thun lässet, zusammen.
5. Vergleichet den Verlust und Schaden mit denen anzuwendenden Kosten, um die Deiche einer Provinz in einen haltbaren Stand zu setzen; so wird sichs finden, daß insgemein die anzuwendenden Kosten dem besorglichen Unheil und Schaden bey weitem nicht gleich kommen; es also weit besser sey, solche anzulegen, als Land und Leute der Gefahr zu exponiren.

Dieses mit einem Exempel zu erläutern, so lasset eine Landschaft oder Provinz seyn, deren ganzer Deich-Band 8000 Ruthen ausmacht, und dabey 40000 Matten Landes in sich begreift, so alle vom Wasser überströmet werden können, und Schaden nehmen. Diese Deiche, so von unterschiedlicher Grösse und Stärke sind, müssen theils 2, 2½ bis 3 Fuß höher, und nach Proportion auch so viel stärker und dicker seyn, als sie bis daher gewesen. Hiezu werden nach gemachten Ueberschlag 11½ Rthlr. Kosten, nach einem Durchschnitt gerechnet, auf jede Ruthe erfordert: machen also 8000 Ruthen 90000 Rthlr.; Und daß hiedurch die Deiche in einen solchen Stand gesetzt werden, daß sie eine solche Wasserfluth, als im Jahr 1717 gewesen, abhalten, und das Land für Ueberschwemmung decken können.

Der Schade, so durch angeregte Fluth in der Provinz verursacht worden, bestehet in folgenden:

	Rthlr.	Sch.	W.
1. Für 455 Pferde, so ertrunken, durcheinander gerechnet jedes zu 25 Rthlr. machet . . . . .	11375	—	— =
2. 2896 Stück Horn-Vieh, so zu der Zeit theuer, das Stück zu 15 Rthlr. beträgt . . . . .	43440	—	— =
3. 2019 Stück Schaaf und Schweine à 2½ Rthlr. . . . .	4542	— 20	— 5
4. 262 ganz und gar hinweg gespülte Häuser . . . . .	30000	—	— =
5. Der Verlust an denen zum Theil ruinirten und beschädigten Häusern macht über . . . . .	30000	—	— =
6. An verlorenen, hinweggeschwemmeten, und im Wasser verdorbenen Sachen und Hausgeräthe in allen überhaupt nur . . . . .	20000	—	— =
7. An Heu und Früchten, so im Wasser verdorben, nur . . . . .	20000	—	— =
8. Für Herstellung von 7500 Ruthen Deiche weniger und mehr durcheinander gerechnet per Ruthe zu 9 Rthlr. macht . . . . .	67500	—	— =

9. Für Anlegung von 500 Ruthen Einlage-Deichs, nebst Stopfung der eingerissenen Brüche und Kolken, und was dem mehr anhängig . . .	87000	—	=	—	=
10. An hinweggegangenen und zerrissenen Syblen, und was dahin gehörig, wenigstens . . . . .	20000	—	=	—	=
11. Für 500 Grasen guten Landes, so ausgedeicht werden müssen, und nicht wieder hergestellt werden können, daß Graß nur zu 50 Rtblr. angeschlagen, beträgt . . . . .	25000	—	=	—	=
12. Endlich ist der Schade an den Früchten des Landes und dem Lande selbst unter allen der beträchtlichste: Da nicht allein alle Winter-Saat von Raap-Saat, Winter-Gersten ec. ruiniret worden, sondern auch das Land dermassen seine Fruchtbarkeit verloren, daß die besten Lande in etlichen Jahren wenig Frucht tragen wollen. Item an allerhand Arten von Bäumen und andern Gewächsen. Dieser Schade wird nicht zu hoch angeschlagen, wenn er gesetzt wird auf . . . . .	200000	—	=	—	=
Summa Summarum	558857	—	20	—	5

Dann ist hiebey noch in Erwegung zu ziehen, wie viele Menschen bey grossen Ueberschwemmungen ihr Leben im Wasser verlieren müssen. Wie denn deren Anzahl bey der Wasserfluth von Anno 1717 in dieser Provinz sich auf mehr als dreyzehenthalb hundert Seelen erstreckt hat.

Vergleichen man den erlittenen Verlust und Schaden mit denen anzuwendenden Kosten, wodurch selbiger aller Vermuthung nach verhütet werden können, so zeigt sich, daß jener diese wohl 6 und mehrmalen übertroffen habe. Und hiebey ist nicht einmal in Anschlag gebracht worden, was an Capitalien, ausstehende Schuldforderungen, Intraden, Gefällen und Praestationen verloren gegangen.“

## 7. Schlußbemerkung

Ziel dieser Arbeit war, das Werk von Albert BRAHMS vor der Vergessenheit zu bewahren bzw. in die Erinnerung zurückzurufen. Aus diesem Grunde ließen die Verfasser vor allem ihn selbst zu Wort kommen. Beabsichtigt war aber auch, darzutun, welch hohen Wissensstand dieser Deichbaumeister der frühen Neuzeit den nachfolgenden Generationen überliefert hat. Durch den Vergleich seiner Auffassungen mit modernen Arbeitsergebnissen ist sein Werk in den großen Zusammenhang langjähriger Küstenforschung gestellt worden. Wie weit Albert BRAHMS seiner Zeit voraus war, soll abschließend durch die Gegenüberstellung zweier Zitate deutlich gemacht werden.

LÜDERS (1957 a) formulierte die Grundgedanken des modernen Küstenschutzes wie folgt: „Wir warten nicht ab, bis das Unglück eingetreten ist, sondern versuchen, unter Heranziehung all unserer wissenschaftlichen und praktischen Erkenntnisse die zu erwartenden Orkanfluten ihrer Höhe nach abzuschätzen, schon heute die danach sich ergebenden notwendigen Deichhöhen herzustellen und somit vorausschauend ein neues Unglück nach menschlichem Ermessen abzuwehren.“

BRAHMS schrieb hierzu 1754 in der Vorrede seines Werkes:

„Wer an einem vorgegebenen Ort einen guten proportionirten Deich angeben will, der muß vor allen Dingen die Grösse und Force des anfallenden Gewässers an den vorgegebenen Ort gründlich kennen und wissen. . . .

Man kan, soll und muß nicht allein für geringe und mittelmässige, sondern auch für grosse und totale Fluthen deichen. . . .

Alle Deiche, die noch nicht im Stande sind, solche grosse und starke Sturm-Fluthen auszuhalten, und der Beschädigung vom Wasser so sehr exponiret, müssen so bald möglich, in solchem guten Stande gesetzt werden.“

## 8. Schriftenverzeichnis

- BRAHMS, A.: Anfangs-Gründe der Deich- und Wasser-Baukunst, I. und II. Teil. Aurich, 1754 u. 1757.
- Arbeitsgruppe „Küstenschutz“ des Küstenausschusses Nord- und Ostsee (BOTHMANN, KATTENBUSCH, LORENZEN, LÜDERS, SCHAUBERGER, SNUIS, THILO): Allgemeine Empfehlungen für den deutschen Küstenschutz. Küste, Jg. 4, 1955.
- ERCHINGER, H. F.: Wellenauflauf an Seedeichen – Naturmessungen an der ostfriesischen Küste. Mitt. d. Leichtweiß-Inst., H. 41, 1974.
- FÜHRBÖTER, A.: Küstenschutz auf neuen Wegen. VDI-Z. 116, H. 8, 1974.
- GÖHREN, H.: Das Meßwesen in der Küstenforschung. Jb. d. Hafentechn. Gesell. 1972/73, 23. Bd., 1974.
- HENSEN, W.: Modellversuche zur Bestimmung des Einflusses der Form eines Seedeiches auf die Höhe des Wellenaufbaus. Mitt. d. Franzius-Inst., H. 7, 1955.
- KRAMER, J.: Sicherheit von Seedeichen gegen Sturmfluten. Küste, H. 31, 1977.
- KRAMER, J., LIESE, R., LÜDERS, K.: Die Sturmflut vom 16./17. Februar 1962 im niedersächsischen Küstengebiet. Küste, H. 1, 1962.
- KRAMER, J., KRAUSE, G., LUCK, G.: Erfahrungen aus den Sturmfluten vom November/Dezember 1973 und Folgerungen für die niedersächsischen Küstenschutzwerke. Küste, H. 29, 1976.
- LÜDERS, K.: Die Wiederherstellung der Deichsicherheit an der deutschen Nordseeküste von der holländischen Grenze bis zur Elbe. Wasser u. Boden, H. 2, 1957 (a).
- LÜDERS, K.: „Passiver“ oder „aktiver“ Deichschutz? Wasser u. Boden, H. 19, 1957 (b).
- LÜDERS, K.: Wer war Albert Brahm? Wasser u. Boden, H. 7/8, 1958.
- LÜDERS, K.: Wie dick sollen Rasensoden sein? Wasser u. Boden, H. 2, 1959.
- LÜDERS, K.: Über die Gültigkeit des „Bemessungswasserstandes für Seedeiche“ an der niedersächsischen Nordseeküste. Jber. 1969 d. Forsch.-Stelle f. Insel- u. Küstenschutz Norderney, Bd. XXI, 1971.
- LÜDERS, K.: „Sturmtiden“ – Begriffserläuterung und Einteilung in Höhenstufen. Jber. 1974 d. Forsch.-Stelle f. Insel- u. Küstenschutz Norderney, Bd. XXVI, 1975.
- LÜDERS, K. u. LUCK, G.: Kleines Küstenlexikon, 3. erw. Aufl., Hildesheim, 1976.
- NIEMEYER, H. D.: Zur Abschätzung des maximalen Wellenaufbaus an Seedeichen aus der Einmessung von Teekgrenzen. Küste, H. 29, 1976.
- NIEMEYER, H. D.: Seegangsmessungen auf Deichvorländern. Jber. 1976 d. Forsch.-Stelle f. Insel- u. Küstenschutz Norderney, Bd. XXVIII, 1977.
- NIEMEYER, H. D.: Untersuchungen zum Seegangsklima im Bereich der ostfriesischen Inseln und Küste. Küste, H. 34, 1979.