

Flachwasserseegang im Weserästuar

VON VOLKER BARTHEL

Zusammenfassung

Umfangreiche Seegangsmessungen im Bereich der Rinnen und Sände der Außenweser wurden von 1976–1980 mit dem Ziel durchgeführt, einen Überblick über das Seegangsklima und eventuell eine Basis für eine Seegangsvorhersage zu gewinnen. Ein weiteres Ziel war die Korrelation morphologischer Vorgänge in diesem topographisch instabilen Gebiet mit der langzeitlichen Verteilung der freigesetzten Seegangenergie.

Ein stark wechselndes Bodenprofil und die Folge von tiefen Rinnen und Sandbänken beeinflussen bei bestimmten Windrichtungen die aus dem tiefen Wasser einlaufenden Wellen und führen zu einem sehr komplexen Bild des Seegangs. Mit der Tide wechselnde Wassertiefen vergrößern die Schwierigkeiten der Zuordnung der gewonnenen Seegangparameter zu den Einflußgrößen Windgeschwindigkeit, Windrichtung und Topographie.

Trotz zeitweiligen Einsatzes von bis zu sechs waverider-Meßbojen und einigen Wellenpegeln können deshalb nur Anhaltswerte für das Seegangsklima gegeben werden. Der vorliegende Bericht kommentiert bisher nicht analysierte Meßergebnisse und greift ein Phänomen auf, dem in der Fachwelt in zunehmendem Maße Aufmerksamkeit gewidmet wird: In Abweichung von der GAUSSschen Normalverteilung neigt insbesondere der Flachwasserseegang dazu, in Gruppen größerer und kleinerer Wellen aufzutreten. Diese Konzentration von Energie in Gruppen größerer Wellen kann für bestimmte Küstenbauwerke oder auch Schiffe gefährlich werden. Mehr noch können die mit den Wellengruppen auftretenden langperiodischen Wellen, die als Wasserspiegelabsenkung unter der Wellengruppe und als Spiegelanhebung zwischen den Gruppen mit oft nur geringer Amplitude erscheinen, sich nachteilig auf die Bewegung schwimmender Objekte, z. B. mit geringer „underkeel-clearance“ fahrender Tanker, auswirken, insbesondere, wenn bestimmte Eigenfrequenzen der Schiffe erregt werden. Beim Eindringen der stabilen langperiodischen Komponenten in Hafenregionen können Resonanzerscheinungen auftreten.

Da die im Rahmen des Meßprogramms verwendeten waverider-Meßbojen Frequenzen zuverlässig nur innerhalb bestimmter Grenzen registrieren, wird ein Verfahren angewendet, die nicht oder fehlerhaft erfaßten niederfrequenten Energieanteile zu bestimmen und in das Spektrum wiederinzubetten.

Die Ergebnisse der fünf behandelten Meßreihen führen zu den folgenden Beobachtungen:

1. Entsprechend der Flachwassercharakteristik des Ästuars folgen die kennzeichnenden Wellenparameter mit wenigen Ausnahmen dem Windverlauf. Die Überlagerung von zwei oder mehreren Systemen an bestimmten Stellen des Ästuars ist klar zu erkennen.

2. In Abweichung von früheren Ergebnissen wurde bei Messungen im Inneren des Ästuars ebenso oft eine Übereinstimmung von Höhenverteilungen mit der Normalverteilung wie mit der früher überwiegend besser passenden RAYLEIGH-Verteilung festgestellt. Ebenso wurde für die Periodenverteilungen eine früher nicht bemerkbare klare Zuordnung zur Normalverteilung festgestellt. Eine Erklärung ist nur in der Besonderheit der hier untersuchten Meßreihen zu suchen.

3. Die Spektralanalyse zeigt die Existenz der bereits früher nachgewiesenen Überlagerung von mehreren Seegangssystemen und weist die Stabilität von langwelligen Komponenten beim Eindringen in das Ästuar nach.

4. Eine weitergehende Analyse unter Zuhilfenahme der SIWEH-Funktion und des Gruppierungsfaktors GF unterstreicht das Vorhandensein von Wellengruppierungen im Ästuar und weist die damit verbundenen gruppengebundenen langen Wellen (GLW) nach. Die Ergebnisse weisen darauf hin, daß

- trotz der Kompliziertheit des Seegangsklimas im Ästuar ein deutliches Gruppierungsverhalten nachzuweisen ist,
- ein Zusammenhang zwischen dem Faktor GF und dem Spektralformfaktor Q_p besteht,
- die GLW, die aufgrund unzureichender Meßtechnik nicht erfaßt werden konnte, rekonstruiert und in den Wellenzug wiedereingebettet, zu einer merklichen Erhöhung der Wellenenergie im niederfrequenten Bereich des Spektrums führen kann.

Eine umfassende Analyse des vorhandenen Datenmaterials in dieser Hinsicht und die Erforschung des Einflusses langperiodischen Seegangs auf die Bewegung von Schiffen und anderen schwimmenden Konstruktionen sollte eine natürliche Konsequenz dieser ersten Ergebnisse sein. Empfohlen wird auch die Einrichtung von Dauermeßstationen in gefährdeten Bereichen der Seeverkehrswege.

S u m m a r y

Extended field investigations of waves in the outer Weser Estuary were undertaken between 1976-1980 in order to obtain a better knowledge of the wave climate and a data base for a predictive model.

An attempt was also made to correlate morphological changes with a long term wave energy distribution for this topographically unstable area. Under certain wind conditions a complex wave climate results from the interaction between deep water waves, abruptly changing bottom profiles and the associated sequence of deep channels and sand bars. Interpretation of the interrelationship between wave parameters, topography and wind velocity is complicated by the tidally dependent water depth.

In spite of the simultaneous deployment of up to 6 waverider buoys and several staff gauges, only approximations of this local wave climate can be given. This paper deals with wave records which had not been analysed as yet. Moreover, emphasis is given to a phenomenon which has received increasing attention by experts during the last few years, namely that waves (especially in shallow water) tend to form groups of greater and smaller heights as compared to those given by a Gaussian distribution. This concentration of energy can be dangerous for certain coastal structures and ships. Furthermore, the long period, small amplitude waves travelling with the group can negatively effect the motion of moored floating structures or vessels having small underkeel clearances. This is especially valid if the wave spectrum includes the vessels resonant frequency.

Since the waverider buoys used in this investigation have a reliable frequency response only between certain limits, a method needed to be applied in order to determine the low natural frequencies which could not be recorded. Results for 5 sets of measurements lead to the following conclusions:

1. With a few exceptions, shallow estuary wave parameters correlate with wind velocities. Superposition of two or more wave fields can be detected at certain locations in the estuary.

2. Wave height distributions in shallow areas are as often in agreement with a theoretically determined normal distribution as with a Rayleigh distribution. Previous investigations had indicated a trend towards a Rayleigh distribution. The period distribution is normal. This can only be explained by consideration of the particular characteristics of these measurements.

3. A spectral analysis proves the existence of two or more superimposed wave systems and shows the stability of the long wave components entering the estuary.

4. Further analysis using the SIWEH-function and the groupiness factor GF, emphasizes the grouping properties of estuarine waves and proves the existence of group-bounded long waves. Results suggest, that a distinct groupiness can be detected in spite of the complex wave climate in this estuary and that

*- a correlation exists between the groupiness factor GF and the peakedness factor Q_p
- inclusion of group bounded long waves, which could not reliably be measured due to deficiencies of the waverider buoys, leads to a remarkable increase in the long wave energy.*

A comprehensive analysis of all existing data and an investigation of the influence of long waves on ship motion should be conducted. The results also indicate that permanent wave gauges should be installed in exposed estuarine areas.

I n h a l t

1. Einführung	271
2. Meßergebnisse	272
2.1 Ort und Zeit der Messungen	272
2.2 Ergebnisse	273
2.2.1 Messung vom 13.-15. 11. 1978	274
2.2.2 Messung vom 2.-7. 12. 1978	277

2.2.3 Messung vom 25./26. 11. 1979	279
2.2.4 Messung vom 10.-18. 12. 1979	280
2.2.5 Messung vom 23./25. 4. 1980	283
2.3 Statistische Verteilung	283
2.3.1 Höhen	283
2.3.2 Perioden	288
2.4 Energietransfer	289
3. Wellengruppierungen und langperiodische Wellen	294
3.1 Wellengruppen	294
3.2 Gruppengebundene lange Wellen	300
3.3 Nachweis der GLW in Naturmessungen	301
4. Schriftenverzeichnis	304

1. Einführung

Seegangsmessungen an der deutschen Nordseeküste sind bis vor wenigen Jahren nur in sehr begrenztem Umfang durchgeführt worden. Bis auf einige küstennahe Messungen im Zusammenhang mit Bauvorhaben beschränkte sich das Interesse auf den Tiefwasserbereich der Nordsee, wobei Schwerpunkte mehr im Bereich der Wellendynamik und dem Zusammenwirken von Wasseroberfläche und Atmosphäre als auf dem Gebiet des für den Küsteningenieur interessanten Flachwasserseegangs mit unmittelbarem Bezug zur Anwendung lagen. Die ersten systematischen Untersuchungen größeren Umfangs im Flachwasserbereich der Nordseeküste wurden als Grundlage für Planungen für einen Tiefwasserhafen bei Neuwerk (SIEFERT, 1971) und mit Küstenschutzmaßnahmen auf der Insel Sylt (DETTE, 1974) durchgeführt. Die Gründung des Kuratoriums für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI), die Koordination der Zweckforschung und die damit verbundene Förderung durch den BMFT boten die Basis für weitere Meßprogramme, die Informationslücken im Nordseeküstenbereich schließen sollten. So wurden mit unterschiedlicher Datenausbeute Seegangsprogramme im Weserästuar (BARTHEL, 1979, 1980, 1981, 1982), in der Außenjade (YSKER, 1979) und im Bereich der Ostfriesischen Inseln (LUCK und NIEMEYER, 1976) durchgeführt.

Der vorliegende Bericht befaßt sich mit einigen Meßreihen, die im Weserästuar gewonnen und deren Analysenergebnisse bisher noch nicht veröffentlicht worden sind. Dabei wurden im wesentlichen Auswerteverfahren benutzt, die den bereits veröffentlichten Daten zugrundeliegen. Die Übereinstimmung mit bisher getroffenen Aussagen wird überprüft. Zusätzlich wird auf einen neuen Aspekt des Flachwasserseegangs verwiesen, der in zunehmendem Maße die Aufmerksamkeit der Fachwelt erregt und als Bemessungs- bzw. Beurteilungskriterium für die Stabilität von Küstenbauwerken bereits vielfach angewendet wird:

Anhand von Beispielen wird nachgewiesen, daß unter bestimmten Bedingungen auch in einem Ästuar durch Wellengruppierungen sogenannte *gruppengebundene lange Wellen* (Theorie 2. Ordnung) entstehen können, die sehr stabil sind und gegebenenfalls eine Gefahr für schwimmende, verankerte Konstruktionen oder für Schiffe, die in Fahrrinnen begrenzter Tiefe fahren, bilden können (BARTHEL, 1983). Typisch ist die Stabilität dieser niederfrequenten Komponenten, über deren Verhalten beim Fortschreiten in extrem flaches Wasser noch nicht viel bekannt ist. Ihr Auftreten zusammen mit der Wellengruppe, die eine Konzentration von Seegangenergie darstellt, gab Anlaß, weltweit Untersuchungen über das sogenannte „wave grouping“ anzustellen (z. B. RYE, 1976; SIEFERT, 1976; SAND, 1981).

Eine systematische Untersuchung der zur Verfügung stehenden Meßreihen unter besonderer Berücksichtigung dieses Phänomens ist geplant. Die Ergebnisse werden in einem späteren Bericht veröffentlicht werden.

2. Meßergebnisse

2.1 Ort und Zeit der Messungen

Das Ästuarmeßprogramm in der Außenweser, das vom Wasser- und Schiffsamt Bremerhaven betreut und vom Bundesminister für Forschung und Technologie (BMFT) durch das KFKI gefördert wurde, sah Messungen an zunächst fünf Stationen im Bereich der Außensände und der Schifffahrtsrinnen der Außenweser vor (Abb. 1). Die im vorliegenden Report behandelten Stationen sind:

ST: Wassertiefe ca. 18,5 m bei Tnw. Eingangsstation im tiefen Wasser.

RSW: Wassertiefe ca. 10,5 m bei Tnw. Lage am Ostrand der tiefen Rinne der Neuen Weser, Randbeeinflussung hoher Wellen durch Refraktion möglich.

RSO: Wassertiefe ca. 7,5 m bei Tnw, Lage hinter der Untiefe Roter Sand, Schutz vor Nordweststurm; jedoch Überlagerung von zwei Systemen möglich, die durch die beiden Haupttrinnen einlaufen.

TPW: Wassertiefe ca. 10 m bei Tnw, Lage am Ostrand der Hauptschifffahrtsrinne im Bereich der bei Tnw freifallenden Platen.

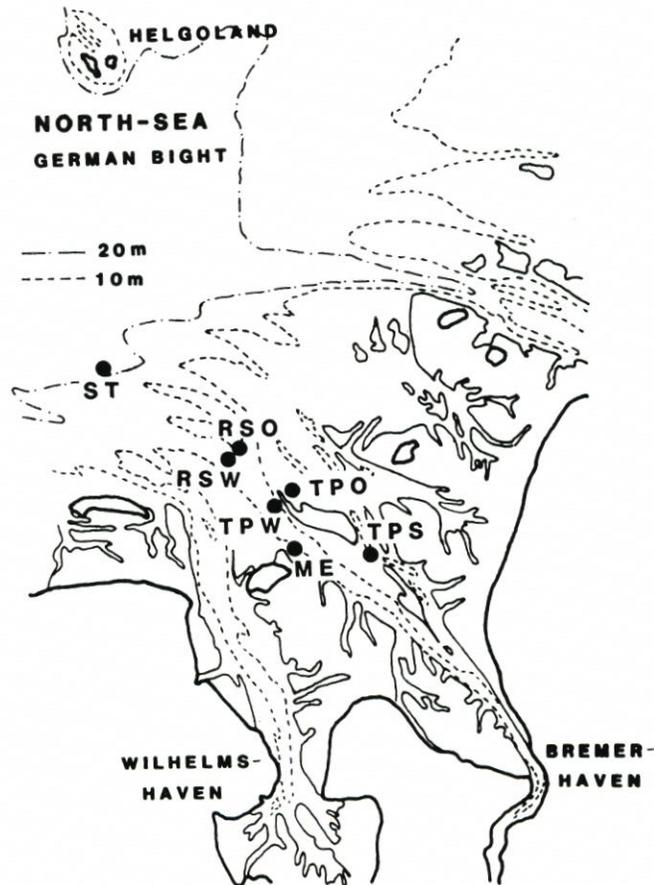


Abb. 1. Lageplan der Meßstationen

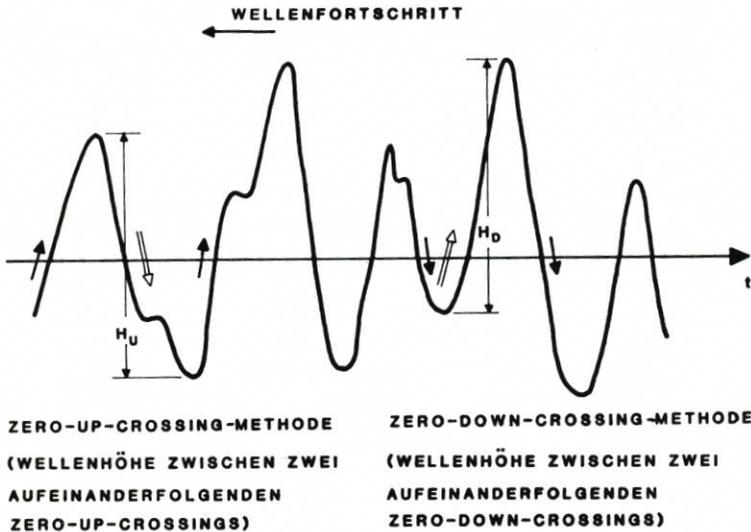


Abb. 2. Wellenauswerteverfahren

TPN: Wassertiefe ca. 8 m bei Tnw, Lage vor einer Plate im Einzugsbereich der Alten Weser. Alle hier aufgeführten Stationen waren mit der Datawell-waverider-Boje ausgestattet. Eine eingehende Beschreibung des Meßprogramms und Einzelheiten über Geräte und Gerätestandorte sind bei BARTHEL (1982) zu finden. Dort werden ebenfalls detaillierte Vergleiche zwischen den verwendeten Meß- und Auswerteverfahren gezogen.

2.2 Ergebnisse

Die Ergebnisse sind grundsätzlich in zwei Gruppen einzuteilen. Die erste Gruppe deckt alle Resultate ab, die mit Hilfe des für dieses Projekt entwickelten Programms erarbeitet wurden. Dazu gehören statistische Auswertungen mit der Ausgabe von Wellenhöhen und -perioden, deren statistische Verteilungen sowie eine Spektralanalyse mit der Fast-Fourier-Transformation (COOLEY-TUKEY, 1965) mit Ausgabe der Peakfrequenzen und Darstellung der Energiespektren. Im zweiten Teil sind die Ergebnisse zusätzlicher Auswertungen zusammengefaßt, die der Autor während eines Studienaufenthaltes beim National Research Council in Ottawa, Kanada, mit Hilfe z. T. selbst entwickelter Programme durchführen konnte. Hierunter fallen u. a. die Betrachtungen langperiodischen Seegangs und Energiebilanzen. Außerdem wurde eine generelle Überprüfung der o. a. Ergebnisse mit anderen Methoden durchgeführt. Dazu gehören die Ermittlung der Höhen- und Periodenverteilungen sowie ihre Zuordnung zu bestehenden theoretischen Verteilungen und die Spektralanalyse mit besonderer Berücksichtigung der Frequenzanteile, die von der waverider-Boje nicht zuverlässig erfaßt wurden.

Zum besseren Verständnis seien noch einmal die Bedeutungen der wichtigsten Parameter wiedergegeben:

\bar{H} ist das arithmetische Mittel aller Wellenhöhen, die nach dem zero-crossing-Verfahren ermittelt wurden,

$H_{1/3} = H_s$ ist das arithmetische Mittel der 33 % höchsten Wellen (nicht zu verwechseln mit der charakteristischen Wellenhöhe $H_{char.} = 4\sqrt{m_0}$ (s. auch BARTHEL, 1982)

H_{\max}	ist die höchste im Schrieb vorhandene Welle
$H_{\max}/H_{1/3}$	ist das Verhältnis der höchsten zur signifikanten Wellenhöhe (Ästuarbereich: 1.6 . . . 1.88)
T	ist das arithmetische Mittel aller im Schrieb vorhandenen Perioden
$TH_{1/3}$	ist das arithmetische Mittel der zu den 33 % höchsten Wellen zugehörigen Perioden
T_{\max}	ist die längste im Schrieb vorhandene Periode (nicht notwendigerweise zur höchsten Welle gehörig)
T_{fo}	ist die Periode im Bereich des Maximums im Energiespektrum. (Eine bessere Definition ist durch die Delft-Methode gegeben, die den Bereich des Spektrums links und rechts des Peaks in Betracht zieht und somit eine Periode im Bereich höchster Energiekonzentration darstellt.)

Es sei an dieser Stelle noch eine Bemerkung zur Auswertungsmethode erlaubt. In den letzten Jahren hat sich weltweit die zero-crossing-Methode durchgesetzt. Dabei wird unterschieden zwischen dem zero-up-crossing- und dem zero-down-crossing-Verfahren. In einer Empfehlung einer Arbeitsgruppe der IAHR (International Association of Hydraulic Research), der „IAHR-List of Wave Parameters“, wird die zero-down-crossing-Methode als maßgebende Definition einer Welle angegeben. Es sei jedoch angemerkt, daß lt. Abb. 2 die zero-down-crossing-Methode eine Welle zwischen zwei zero-down-crossings beschreibt, d. h. eine zero-up-crossing-Welle. Es hat sich herausgestellt, daß für bestimmte Anwendungen die Höhe zwischen Wellental und nachfolgendem Wellenberg bedeutungsvoller als die Höhe zwischen Berg und nachfolgendem Wellental ist. Der Vergleich beider Methoden zeigt, daß mittlere und kennzeichnende Wellenhöhen sich kaum unterscheiden, wohl aber Unterschiede in der maximalen Wellenhöhe auftreten können. Um eine gemeinsame Basis zu schaffen, wurden die bereits vorher ermittelten Ergebnisse mit denen aus einer zero-down-crossing-Analyse beim NRC verglichen.

Ganglinien der Wellenparameter: Zur besseren Übersicht sind die Ganglinien der Parameter in den Abb. 2.1–2.7 dargestellt. Dabei muß erneut darauf hingewiesen werden, daß entsprechend der Konfiguration des Meßsystems keine Simultanaufnahme von mehreren Stationen erfolgen konnte. Die Aufnahmezeit der einzelnen Stationen (je 20 Min.) hing deswegen von der Anzahl der eingesetzten und empfangenen waverider-Bojen „n“ ab. Die Ganglinien stellen somit eine Verbindung der alle $n \times 20$ Min. ermittelten Parameter dar, wobei Spitzenwerte verlorengehen können. Dennoch zeigen die Ganglinien die Entwicklung bestimmter Tendenzen und Unterschiede zwischen den einzelnen Stationen.

2.2.1 Messung vom 13. – 15. 11. 1978

Die Meßperiode vom 13.–15. 11. 1978 (Abb. 2.1) ist gekennzeichnet durch eine stabile Windrichtung zwischen SSW und WSW. Die Windgeschwindigkeit ist ebenfalls über weite Bereiche konstant und erreicht Maximalwerte von 18 m/s. Die signifikanten Wellenhöhen H_s folgen dem Verlauf der Windgeschwindigkeiten, während die Maximalwerte Ausreißer zeigen, die nicht in den Rahmen der bisherigen Verhältniswerte H_s/H_{\max} passen. Eine eingehende Prüfung der Zeitserien zeigte, daß – wahrscheinlich hervorgerufen durch Übertragungsstörungen – die Wellenhöhen untypische Spitzen aufweisen, die sowohl die statistische Auswertung als auch das Spektrum beeinflussen. Abb. 2.1 zeigt in vergrößerter Form einen Zeitausschnitt einer Registrierung der Station RSO mit derartigen Störungen. Es handelt sich dabei um einen Wellenzug relativ geringer mittlerer Höhen. Die Zeitserie zeigt, wie der

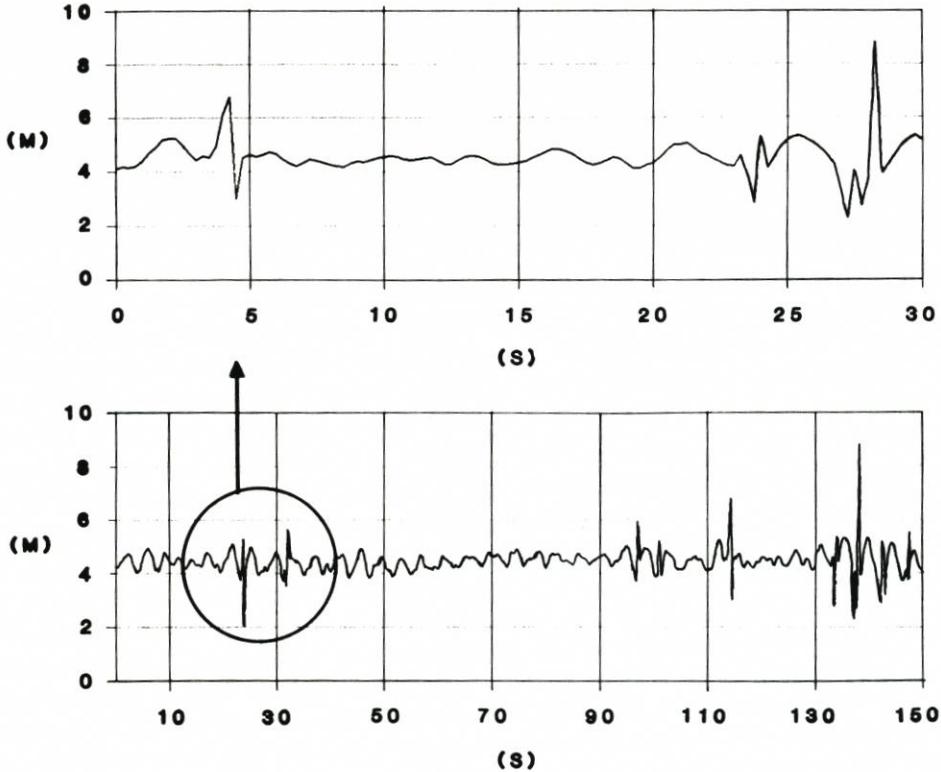


Abb. 2.1 Übertragungsfehler

normale Wellenablauf zwischen 280 und 300 s durch die kurz hintereinander auftretenden Übertragungsstörungen unterbrochen wird und Einzelwellenhöhen von 6–7 m vorgetäuscht werden können. Obwohl im ursprünglichen Auswerteprogramm ein Prüftest eingebaut war, um derartige Ausreißer zu eliminieren, erwiesen sich die angegebenen Grenzwerte als nicht ausreichend, um alle auftretenden Fehler abzudecken. Aus diesem Grunde wurden die Datensätze der hier behandelten Meßperioden einer eingehenden Prüfung unterzogen und derartige Ausreißer ausgemerzt. Darüber hinaus wurden in der Zwischenzeit im National Research Council Rechenprogramme entwickelt, die derartige statistische Ausreißer erfassen und den Wellenzug bzw. die Zeitserie der Wasserspiegelauslenkungen korrigieren. Einzelheiten hierzu werden in einem Report des NRC erscheinen. In der vorliegenden Meßserie folgen die kennzeichnenden Wellenhöhen und die mittleren Perioden mit geringer Phasenverschiebung dem Windverlauf. Kurz nach Erreichen der maximalen Windgeschwindigkeiten sind kennzeichnende Wellenhöhen von bis zu 2,5 m und mittlere Perioden bis 5 s zu verzeichnen. Da in dieser Zeit keine Übertragungsstörungen in den Wellenschrieben festgestellt werden konnten, liegen die Maximalhöhen bei 4,5 m. Zwischen den einzelnen Stationen sind auf der Basis der Ganglinien keine signifikanten Unterschiede festzustellen.

Die Ermittlung des Energiespektrums aus den 20-Min.-Schrieben gibt weiteren Aufschluß über die Eigenheiten des Seegangs. Wie bereits bei BARTHEL (1982) beschrieben, wurden eine Fast-Fourier-Transformation nach COOLEY-TUKEY (1965) verwendet und die resultierenden Spektren mit einem Hamming-Filter geglättet. Die in Abb. 2.2 dargestellte

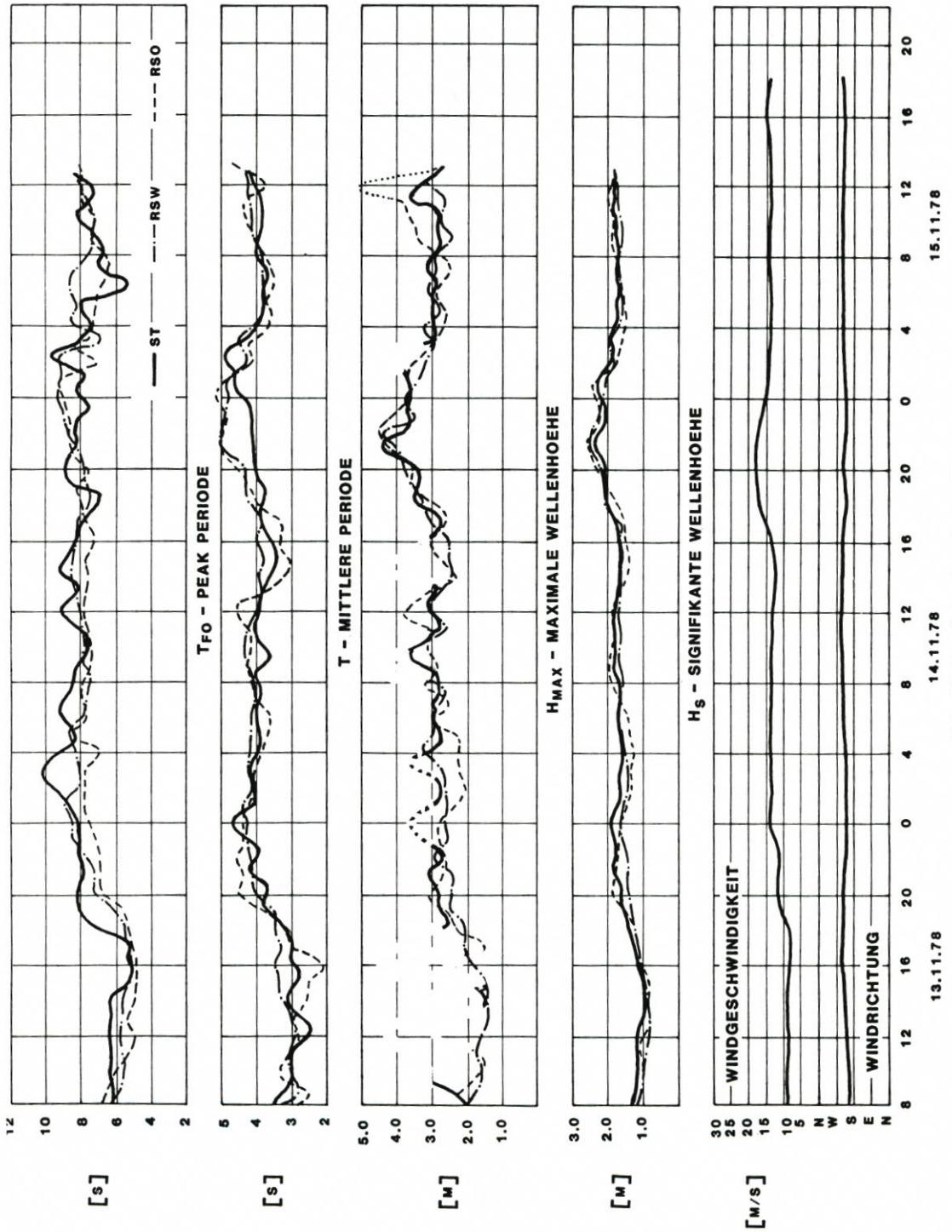


Abb. 2.2 Ganglinien 13.-15. 11. 1978

Peak-Periode bezeichnet den Frequenzbereich höchster Energiedichte im Spektrum und gibt Aufschluß darüber, in welchem Frequenz- oder Periodenbereich sich die Seegangenergie für den besagten Wellenschrieb konzentriert.

Im allgemeinen wurden die in der Literatur (z. B. KAMPHUIS, 1969) erwähnten Verhältniswerte

$$T_{fo}/T = 1,4$$

für den Ästuarseeang weit überschritten, da bei überlagerten Wellensystemen ein breiter Frequenzbereich dieses Verhältnis stark beeinflusst. Die hier ermittelten Werte gruppieren sich um

$$T_{fo}/T = 2,0$$

Auf eine eingehende Untersuchung wurde wegen der o. a. Unsicherheiten verzichtet.

2.2.2 Messung vom 2. - 7. 12. 1978

In der hier vorliegenden Meßserie (Abb. 2.3) wurden die Stationen ST, RSW, RSO und TPN erfaßt. TPN liegt an der Nordspitze der Tegeler Plate am Rande der Tegeler Rinne. Der hier vorkommende Seegang ist durch die durch die Alte Weser einlaufenden Wellen und durch örtlich erzeugte Windsee charakterisiert. Abb. 2.3 zeigt neben der Windinformation die für die o. a. Stationen ermittelten Wellenparameter $H_{1/3}$, T_{fo} , GF und Q_p .

Während der Faktor GF, der das Gruppierungsverhalten der Wellen beschreibt, in einem späteren Kapitel erläutert wird, sei zum Faktor Q_p hier nur folgendes gesagt: Der von GODA (1970) eingeführte Peakedness-Faktor Q_p beschreibt die Form des Energiespektrums und wird um so größer, je mehr sich das Spektrum einem schmalen Modellspektrum, wie z. B. dem JONSWAP-Spektrum, nähert. Die mathematische Formulierung

$$Q_p = 2/m_0^2 \int_0^{\infty} f [S(f)]^2 df$$

beinhaltet das Integral über die quadrierte Spektralfunktion, multipliziert mit dem doppelten Kehrwert des 0.ten Moments der Spektralfunktion. Ein P-Faktor zwischen 4 und 5 beschreibt daher in den meisten Fällen ein Spektrum mit einer klaren Energiekonzentration um nur eine Peakfrequenz und mit eindeutigem Peak. Bei Werten unter 3 liegt häufig ein Multipeak-Spektrum vor, das auf eine Überlagerung von aus verschiedenen Richtungen einlaufenden Seegangssystemen hindeuten kann.

Der während der Meßperiode herrschende Wind kommt aus südöstlicher bis südlicher Richtung und erreicht, stetig anwachsend, Geschwindigkeiten bis 19 m/s. Da diese Windrichtung ablandig ist und entsprechend kurze Fetchlängen im Verhältnis zu den Meßpositionen vorhanden sind, kann sich kaum bemerkenswerter Seegang in Landnähe entwickeln. Dementsprechend erreichen die kennzeichnenden Wellenhöhen nur Werte bis zu 1,7 m und die Peak-Perioden nicht mehr als 5,6 s, ein Wert, der für schwimmende Bauwerke oder Schiffe wenig Bedeutung hat.

Auffallend ist jedoch, daß sowohl in den Ganglinien der Höhen als auch der Perioden eine langperiodische Variation erkennbar ist, die dem Rhythmus der Tidebewegung entspricht. Da Wellen dieser Größe nicht von der Wassertiefe beeinflusst werden, liegt eine Beeinflussung durch Tideströmungen nahe. Wie schon bei BARTHEL (1981) bemerkt, wachsen die Perioden mit einer Strömungsrichtung, die der Wellenfortschrittsrichtung entgegengesetzt ist. Dies ist besonders ausgeprägt bei den drei Stationen ST, RSW und RSO, während im

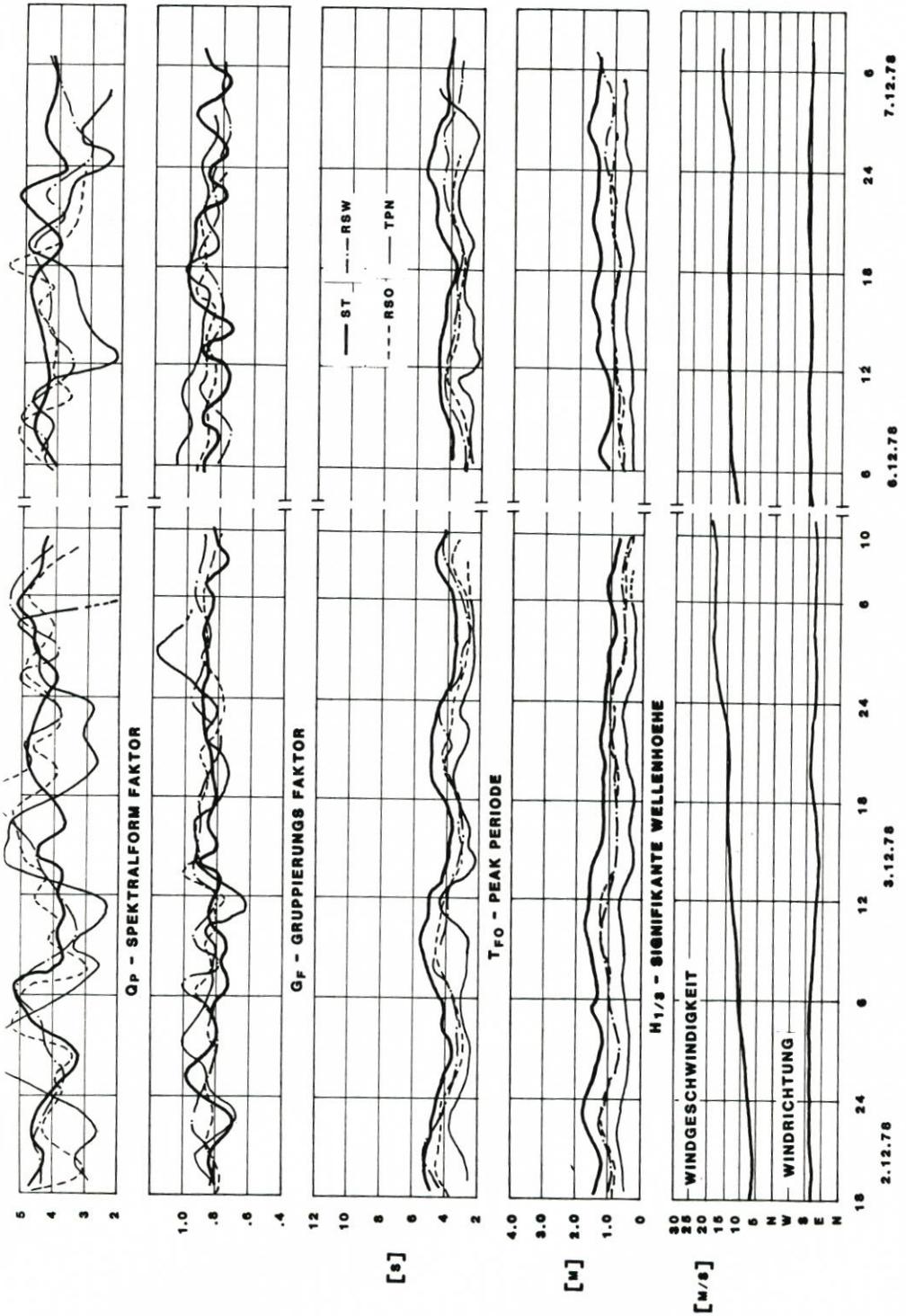


Abb. 2.3 Ganglinien 2.-7. 12. 1978

Bereich der Station TPN dieser Trend, offensichtlich bedingt durch während der Tidephase wechselnde Strömungsrichtungen, nicht so augenscheinlich ist.

Bedauerlicherweise lagen dem Autor zur Zeit der Abfassung dieses Berichts keine Tide- und Strömungsdaten vor, so daß eine fundierte Korrelation nicht vorgenommen werden konnte. Obwohl der Peakedness-Faktor innerhalb dieser Untersuchung und speziell für die in dieser Meßreihe gewonnenen Daten von untergeordneter Bedeutung ist, sei eine Beobachtung an der Station TPN erwähnt: Die Ganglinie für Q_p scheint hier einem sehr charakteristischen Verlauf zu folgen. Trotz der geringen Wellenhöhe bildet sich während der Ebbstromphase ein Spektrum aus, das mit einem hohen Q_p -Wert um eine relativ hohe Frequenz (0,4 Hz) konzentriert ist. Offensichtlich wurden reine örtliche Windwellen gemessen, die erst bei zunehmender Überstauung der umgebenden Wattenflächen durch „Fremdwellen“ beeinflusst bzw. überlagert werden. Es erfolgt dann eine Energieumlagerung auf ein breiteres Frequenzband.

2.2.3 Messung vom 25./26. 11. 1979

Die Meßserie vom 25./26. November 1979 (Abb. 2.4) ist gekennzeichnet durch mäßigen Wind um 15 m/s aus Richtung SSW bis SW, der langsam zunimmt und eine Geschwindigkeit von 20 m/s erreicht. Die signifikanten Wellenhöhen folgen dieser Windentwicklung und erreichen, je nach Station, Werte von 1,5 bis 2,7 m, wobei die Messungen bei ST ($H_{1/3}$ und H_{max}) zwischen 10.00 und 20.00 Uhr, bedingt durch Übertragungsstörungen, nicht zuverlässig sind. Die höchsten Werte wurden, hervorgerufen durch Refraktions- und Überlagerungseffekte, bei RSO gemessen. Auf die besondere topographische Eigenheit dieser im Bereich des Zusammenflusses zweier tiefer Rinnen gelegenen Station wurde bereits früher hingewiesen (BARTHEL, 1982).

In der Darstellung der Tfo-Ganglinien fällt auf, daß bei der Station TPN, wie bei allen anderen, zunächst ein leichter Anstieg zu bemerken ist, der die mit zunehmendem Wind wachsende Verschiebung des Energiemaximums in einem niedrigeren Frequenzbereich kennzeichnet. Dann aber ergeben sich gegen 4.00 und 10.00 Uhr starke Schwankungen und ein Rückgang der Peak-Periode auf 3,3 s. Dies ist darauf zurückzuführen, daß bei rechnerischer Ermittlung der Peak-Periode nur ein Peak in einem Multipeak-Spektrum berücksichtigt wird, obwohl um einen zweiten, nominell nur wenig kleineren Peak mehr Energie konzentriert sein kann. Die bei BARTHEL (1981) beschriebene Methode der Parametrisierung von bis zu Dreifach-Peak-Spektren mit Hilfe der „least-squares-Methode“ konnte hier nicht verwendet werden. Außerdem ist noch erhebliche Entwicklungsarbeit erforderlich, um die Parametrisierung von Multi-Peak-Spektren nicht nur mit Benutzung eines, sondern mehrerer verschiedenartiger Modellspektren zu vervollkommen.

Abb. 2.5 zeigt die zeitliche Entwicklung der Energiespektren an den Stationen TPN, RSW und RSO und demonstriert die Entwicklung und Überlagerung von verschiedenen Seegangssystemen. Bei den hier herrschenden Windverhältnissen muß die Spektralform folgendermaßen interpretiert werden: Mit zunehmender Windintensität und – bei TPN – zunehmender Überstauung der Watten gelangt Seegang aus dem Tiefwasserbereich durch die Rinnen in das Ästuar. Hier überlagert er sich mit der örtlich erzeugten Windsee, die im Energiespektrum als zweiter Peak höherer Frequenz erscheint. Diese Entwicklung kann insbesondere an all den Positionen beobachtet werden, deren Seegangsklima durch eine unter Tide mehr oder weniger überstaute Plate oder Sandbank beeinflusst wird.

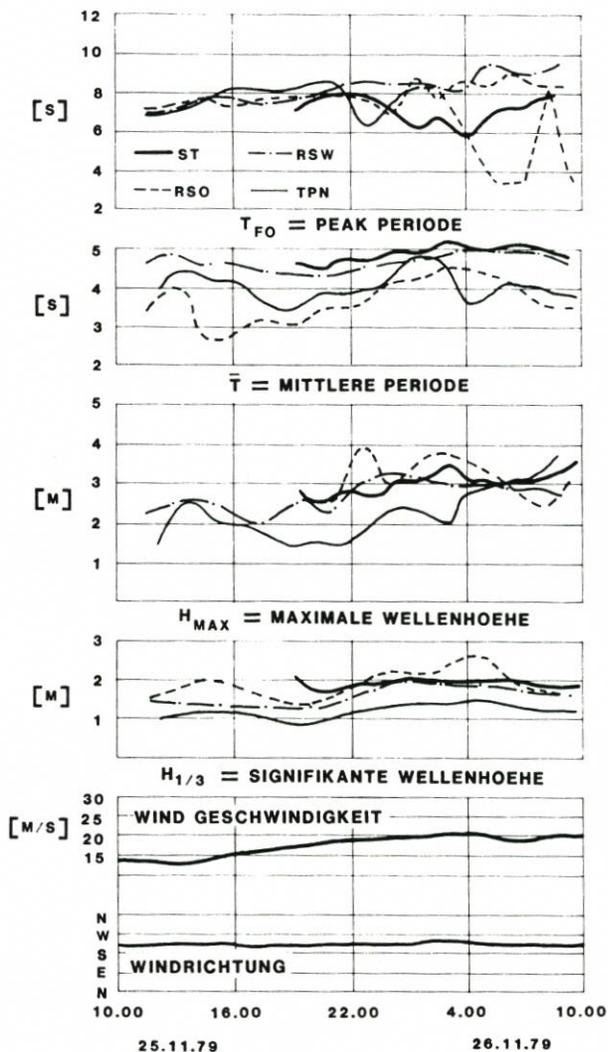


Abb. 2.4 Ganglinien 25./26. 11. 1979

2.2.4 Messung vom 10. - 18. 12. 1979

Teilergebnisse dieser Meßreihe sind bereits von BARTHEL (1981) veröffentlicht worden. Abb. 2.6 zeigt noch einmal in zusammenfassender Form die Ganglinien von $H_{1/3}$, T_{fo} , GF und Q_p für die Stationen RSW, RSO und TPN. Innerhalb der mehrfach unterbrochenen Meßreihe erweist sich der Abschnitt vom 17.-18. 12. 1979 als besonders interessant. Obwohl die Windrichtung zwischen SW und WSW schwankt und die Windstärken 25 m/s nicht überschreiten, erreichen die Wellenhöhen ($H_{1/3}$) Werte bis zu 3,5 m.

Maximale Wellenhöhen innerhalb dieser Meßperiode wurden mit 5,4 m gemessen. Eine erstaunliche Entwicklung zeigt sich bei den Peak-Perioden. Bis in die Platenregion (TPN) hinein sind Perioden höchster Energiedichte bis zu 13 s zu verzeichnen. Offensichtlich wirkt

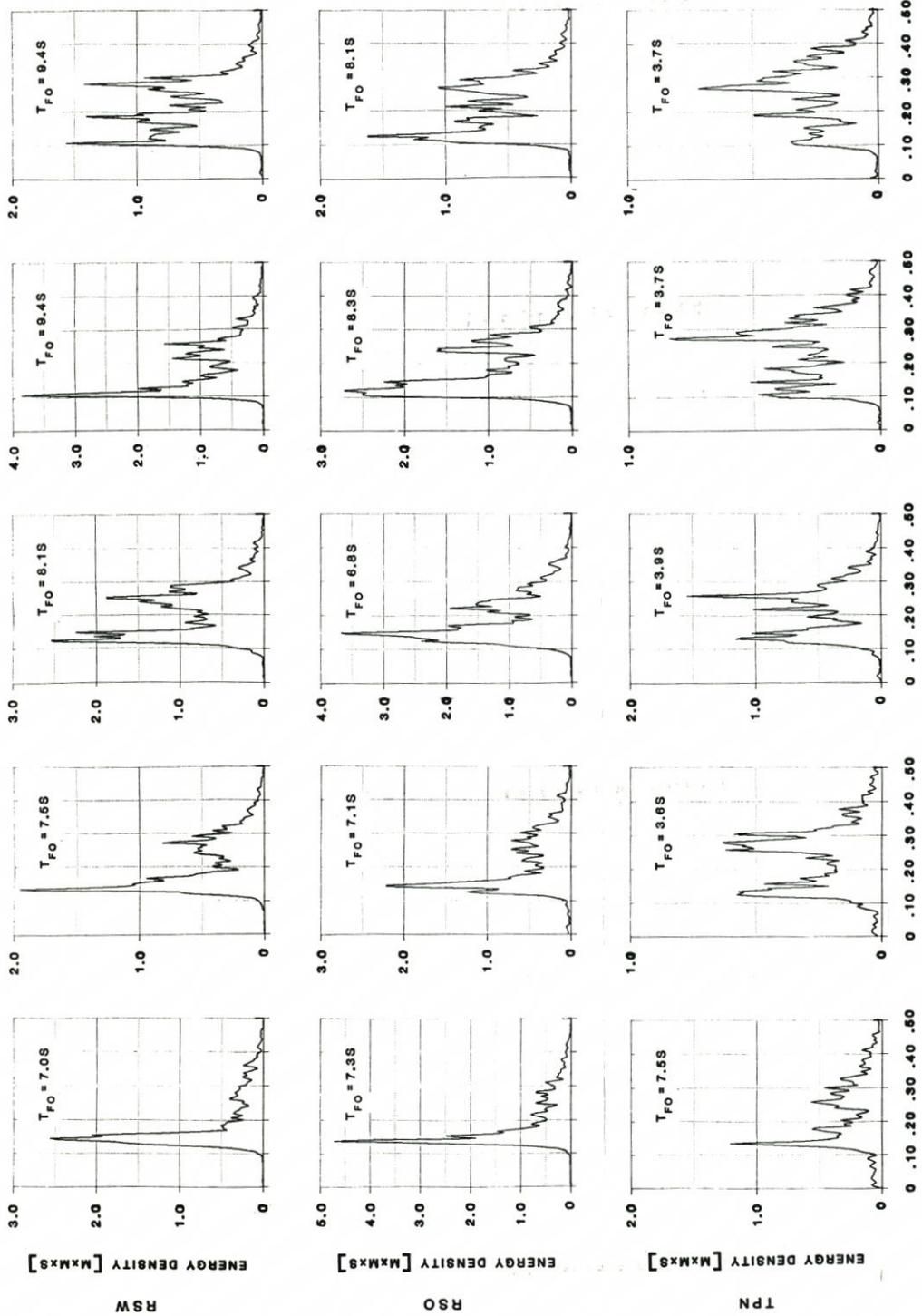


Abb. 2.5 Energiespektren 25./26. 11. 1979

sich die Windrichtung stark auf die Gruppenbildung und die Spektralform aus. Während bei südöstlichen Winden sowohl GF als auch Q_p relativ hohe Werte am 14. 12. 1979 erreichen, sinken beide Parameter am 17. 12. 1979 bei Windrichtungen um SW trotz ansteigender Windgeschwindigkeiten ab. Es liegt die Vermutung nahe, daß die relativ kurze Fetchlänge hier eine entscheidende Rolle spielt. Aus der Literatur liegen jedoch kaum Beispiele über die Zusammenhänge zwischen Gruppierungsfaktor GF und Wind vor, um einen Vergleich ziehen zu können, und die vielfältigen Einflußfaktoren des Seegangs in einem Ästuar lassen bei dem vorliegenden Datenmaterial einen eindeutigen Schluß noch nicht zu.

2.2.5 Messung vom 23./25. 4. 1980

Die Windentwicklung vom 23. bis 25. 4. 1980 (Abb. 2.7) zeigt leicht schwankende Windstärken zwischen 10 und 13 m/s für ca. 17 Stunden, einen Anstieg bis auf 18 m/s und nachfolgend ein Absinken der Geschwindigkeiten unter 10 m/s. Die Windrichtung schwankt während dieser Zeit um NW, so daß Einflüsse unterschiedlicher Fetchlängen nicht zu erwarten sind.

Entsprechend dem Windverlauf steigen die Peak-Perioden von 5 auf 8 s an, während die kennzeichnenden Wellenhöhen, die sich im Bereich 1,0–1,3 m bewegt haben, jetzt Werte bis zu 3 m erreichen. Die Wellenhöhen sinken unmittelbar mit der Windgeschwindigkeit, die Peak-Perioden sind stabiler und zeigen auch nach Abflauen des Windes noch einen leichten Aufwärtstrend. Das zeigt, daß der Energietransfer von höheren zu niedrigeren Frequenzen während und auch noch nach dem Energieeintrag durch den Wind anhält. Eine ähnliche Entwicklung wurde bereits von SIEFERT (1972) für das der Elbe vorgelagerte Wattengebiet festgestellt und anhand von einzelnen Spektren und einer Energiebilanz für verschiedene Stationen im Weserästuar bestätigt (BARTHEL, 1981). Einzelheiten werden in einem der folgenden Kapitel beschrieben.

2.3 Statistische Verteilung

Die Kenntnis der statistischen Verteilung von Seegangparametern innerhalb einer bestimmten Aufzeichnungsdauer ist ein wertvolles Instrument, z. B. zur Bestimmung von möglichen Maximalwerten aus visuellen Beobachtungen oder signifikanten Werten aus unvollständigen Wellenschrieben. Die im Weserästuar gewonnenen Wellenschriebe wurden bisher auf ihre Zugehörigkeit zu bestimmten theoretischen Verteilungen geprüft (BARTHEL, 1982). Die dabei angewendete Methode sah einen Vergleich mit einer

- a. Normalverteilung
- b. Logarithmisch-Normalverteilung
- c. RAYLEIGH-Verteilung

und eine Übereinstimmungsprüfung mit dem Chi²-Test vor. Abb. 2.8 zeigt den Vergleich einer Messung mit den entsprechenden theoretischen Verteilungen als Histogramm.

2.3.1 Höhen

Umfassende Untersuchungen mit allen zu diesem Zeitpunkt analysierten Meßreihen zeigten, daß in überwiegendem Maße die RAYLEIGH-Verteilung als am besten passende

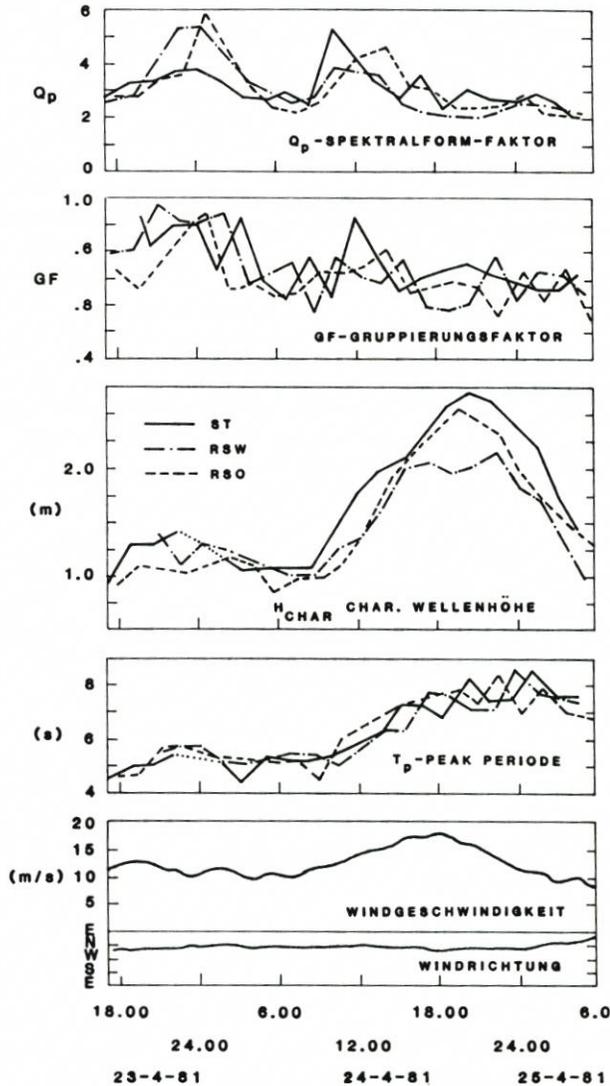


Abb. 2.7 Ganglinien 23./25. 4. 1981

theoretische Verteilung für die Wellenhöhen im Ästuar anzusetzen ist. Die Wahrscheinlichkeit des Auftretens einer bestimmten Wellenhöhe im Schrieb wird nach LONGUET-HIGGINS (1952) durch die Funktion

$$p(H/\bar{H}) = 1 - e^{-\frac{\pi}{4} \left(\frac{H}{\bar{H}}\right)^2}$$

beschrieben. Inzwischen wurde diese Verteilung, die ursprünglich für tiefes Wasser und ein enges Spektrum ermittelt worden war, verbessert und abgewandelt. Eine mehr ins Detail gehende Betrachtung der Wellenhöhenverteilung ergab, daß der Exponent α der RAYLEIGH-Verteilung

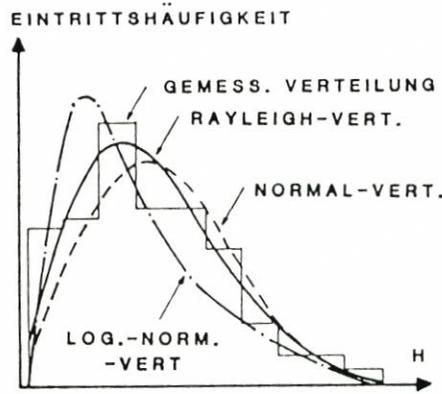


Abb. 2.8 Theoretische Höhenverteilungen

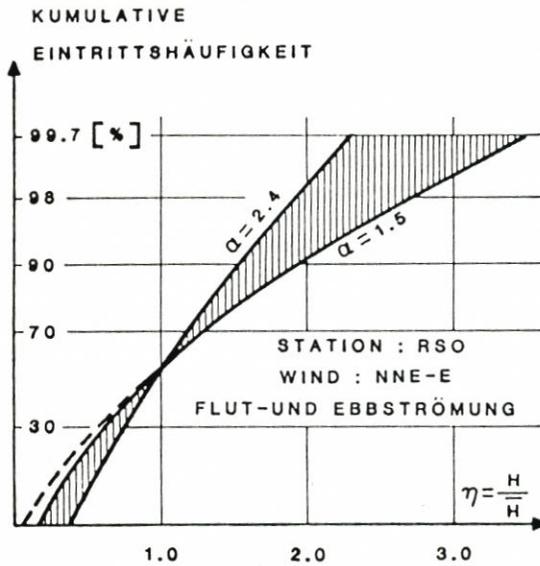


Abb. 2.9 Grenzbereiche der Werte α

$$P\left(\frac{H}{H}\right) = 1 - e^{-\frac{\pi}{4}\left(\frac{H}{H}\right)^\alpha}$$

für bestimmte Bereiche kennzeichnende Werte annimmt, die um $\alpha = 2,0$ schwanken (BARTHEL, 1982). Abb. 2.9 zeigt den für das Weserästuar ermittelten Bereich der alpha-Werte. Für die vorliegenden Meßreihen 2, 3 und 4 wurden die Verteilungen in ähnlicher Weise ermittelt und mit der theoretischen RAYLEIGH- und Normalverteilung verglichen. Die Normalverteilung wird allgemein benutzt, um Zufallsprozesse zu beschreiben:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$$

μ = mittlere Abweichung, σ = Standardabweichung

In gleicher Weise kann die RAYLEIGH-Verteilung ausgedrückt werden mit

$$f(x) = \frac{1}{2x \sqrt{\sigma^2 + \mu^2}} e^{-\frac{x^2}{\sigma^2 + \mu^2}}$$

Die Übereinstimmung der Modellverteilung mit der des gemessenen Datensatzes wird hier durch den Korrelationskoeffizienten ausgedrückt. Für eine weitergehende Analyse mit Berücksichtigung unterschiedlicher α -Exponenten stand keine Rechenzeit zur Verfügung.

Das in Abb. 2.10 gezeigte Auswertbeispiel zeigt sowohl die Höhen- als auch die Periodenverteilung, auf die später noch eingegangen wird. Es sind hier direkt die Verteilungsfunktionen dargestellt, wobei die dünnste, unregelmäßigste Linie die Verteilungsfunktion der Messung, die nächststärkere Linie die am besten passende Modellverteilung und die dickste Linie die übrigbleibende Modellverteilung darstellen. Die im gleichen Feld aufgeführte Beschriftung zeigt mit

- a) NAME: die am besten passende theoretische Verteilung
- b) CORR: den Korrelationskoeffizienten des besten Vergleichs
- c) GOF (goodness of fit): die Übereinstimmungswahrscheinlichkeit nach dem CHI2-Test
- d) CHI DF: die Anzahl der Freiheitsgrade für den CHI2-kritischen Wert
- e) STD.VAR: die Fehlerstandardabweichung

Alle Werte wurden nach SPIEGEL (1961) ermittelt.

Im aufgeführten Beispiel paßt die Höhenverteilung der Meßserie am besten zu einer RAYLEIGH-Verteilung ($r = 0,92$) mit einem GOF = 25,5 nach dem CHI2-Test. Die Verteilung der Perioden folgt einer Normalverteilung mit einem Korrelationskoeffizienten von $r = 0,92$ und einem GOF-Faktor von 37,8.

Die Ergebnisse der auf diese Weise untersuchten Meßreihen lassen sich wie folgt zusammenfassen: In 59 % aller untersuchten Fälle sind die Höhen mit größerer Wahrscheinlichkeit entsprechend einer RAYLEIGH-Verteilung angeordnet, in 41 % der Fälle entsprechen sie einer Normalverteilung. Der dabei erzielte Grad der Übereinstimmung ist durch einen mittleren Korrelationskoeffizienten von $r = 0,86$ beschrieben, der, betrachtet man die grafischen Darstellungen der Verteilungsfunktion, bereits eine hohe Übereinstimmung ausdrückt. In Tab. 1 sind die Werte der einzelnen Stationen und Meßreihen zusammengefaßt. Dabei ist die relative Übereinstimmung ausgedrückt durch eine Wichtung der Auftretenshäufigkeit mit den erzielten mittleren Korrelationskoeffizienten.

Es zeigt sich, daß, obwohl in der Gesamtheit aller Fälle die RAYLEIGH-Verteilung überwiegt, bei den Stationen im Inneren des Ästuars insbesondere bei SW-Wind häufiger die Normalverteilung maßgebend ist. Wegen unterschiedlicher Auswertemethoden ist es schwierig, diese Ergebnisse direkt mit schon veröffentlichten Ergebnissen aus dem Weserästuar (BARTHEL, 1982) zu vergleichen. Es ist jedoch offensichtlich, daß für diese Messungen – insbesondere in den Flachwasserbereichen – eine weit höhere Wahrscheinlichkeit der Zugehörigkeit zu einer Normalverteilung vorliegt, als bisher festgestellt wurde. Für die untersuchten Windrichtungen SSW bis WSW muß daher festgestellt werden, daß in den Flachwasserbereichen die Höhenverteilungen mindestens ebenso oft einer Normalverteilung wie einer RAYLEIGH-Verteilung zugeordnet werden können, während im tiefen Wasser die RAYLEIGH-Verteilung überwiegt. Diese Entwicklung wird belegt durch die Darstellung der Seegangsspektren in Abb. 2.4.

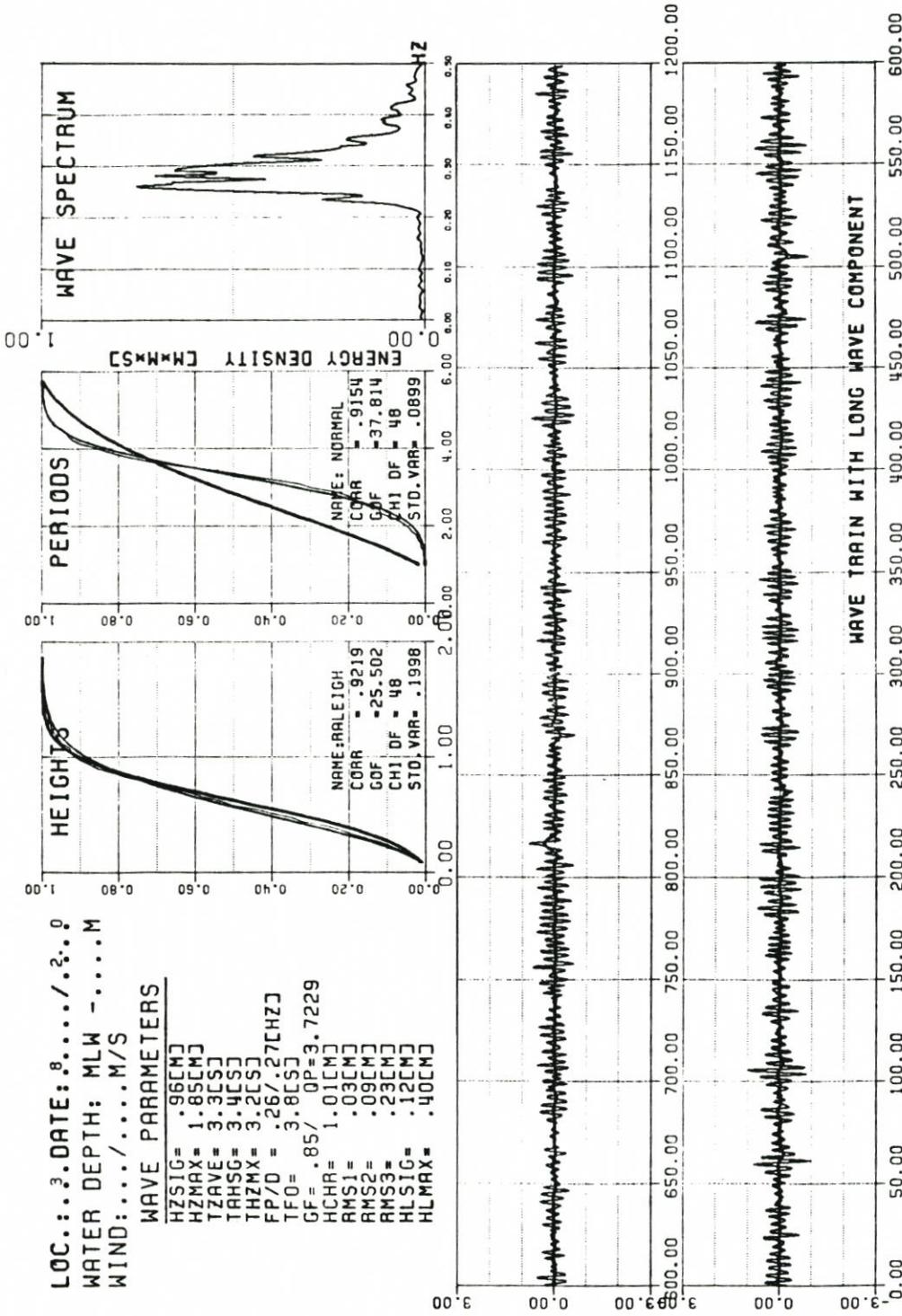


Abb. 2.10 Auswertbeispiel RSO 14. 12. 1979

2.3.2 Perioden

In gleicher Weise wurden auch die in den Meßserien gewonnenen Perioden einer Verteilungsanalyse unterzogen und mit theoretischen Verteilungen verglichen. Das Ergebnis weicht völlig von bisher im Weserästuar beobachteten Verteilungen ab. Tab. 2 gibt einen Überblick über die Zugehörigkeit der gemessenen zu den theoretischen Normal- und RAYLEIGH-Verteilungen:

Tabelle 1
Eintrittshäufigkeit von RAYLEIGH- und Normalverteilungen der Wellenhöhen für 3 Meßserien

Station	Anzahl der Meßschriebe	% Rayleigh	Rxy RA	% Normal	Rxy NO	Überwieg. Verteilg. - %
2.-7. 12. 1978 - Wind SE-S						
ST	39	56	.88	44	.86	RA 56
RSW	42	76	.88	24	.89	RA 76
RSO	40	80	.89	20	.89	RA 80
TPN	9	67	.93	33	.88	RA 67
25.-26. 11. 1979 - Wind SSW-SW						
ST	12	50	.82	50	.81	RA 50
RSW	14	57	.85	43	.88	RA 57
RSO	16	37	.86	63	.85	NO 63
TPN	14	43	.87	57	.87	NO 57
10.-18. 12. 1979 - Wind SW-WSW						
RSW	28	68	.78	32	.77	RA 68
RSO	29	75	.81	25	.79	RA 75
TPW	26	46	.87	54	.85	NO 54
TPN	28	50	.82	50	.84	NO 50

Tabelle 2
Eintrittshäufigkeiten von RAYLEIGH- und Normalverteilungen der Wellenperioden für 3 Meßserien

Station	Anzahl der Meßschriebe	% Rayleigh	Rxy RA	% Normal	Rxy NO	Überwieg. Verteilg. - %
2.-7. 12. 1978 - Wind SE-S						
ST	39	-	-	100	.89	NO 100
RSW	42	-	-	100	.90	NO 100
RSO	40	-	-	100	.91	NO 100
TPN	9	-	-	100	.89	NO 100
25.-26. 11. 1979 - Wind SSW-SW						
ST	12	8	.75	92	.74	NO 92
RSW	14	14	.64	86	.72	NO 86
RSO	16	38	.69	62	.74	NO 62
TPN	14	21	.77	79	.81	NO 79
10.-18. 12. 1979 - Wind SW-WSW						
RSW	28	25	.57	75	.77	NO 75
RSO	29	29	.71	71	.72	NO 71
TPW	26	19	.84	81	.87	NO 81
TPN	28	36	.77	64	.83	NO 64

Obwohl bei den schon vorliegenden und veröffentlichten Ergebnissen der Trend zur RAYLEIGH-Verteilung bei den Wellenperioden nicht so stark war wie bei den Höhen, ist das hier erzielte Ergebnis doch überraschend. In keinem der Fälle überwiegt eine RAYLEIGH-Verteilung, und in der ersten Meßserie (2./7. 12. 1978) mit SE-S-Wind ist eine Normalverteilung die am besten passende Perioden-Verteilung in 100 % aller Fälle.

Eine denkbare Erklärung liegt einmal in den unterschiedlichen Auswertemethoden und zum anderen in der Verschiedenheit der hier und dort untersuchten Meßreihen. Zur Frage der unterschiedlichen Auswertemethoden kann hier nicht abschließend Stellung genommen werden. Die Korrelation ergibt jedoch wesentlich günstigere Werte als die früher verwendete Auftretenswahrscheinlichkeit nach dem CHI2-Test. Der generelle Trend und die Zuordnung zu einer theoretischen Verteilung werden jedoch dadurch kaum beeinflusst.

Eine starke Abhängigkeit von den Windrichtungen, wie sie sich bereits im Vergleich der o. a. Meßreihen zeigt, ist wahrscheinlich. Die von BARTHEL (1981) veröffentlichten Periodenverteilungen sind vorwiegend bei Windlagen zwischen NW und SW gewonnen worden. Bei dieser Windrichtung gelangt meistens im Tiefwasser erzeugter Seegang ins Innere des Ästuars und überlagert die örtlich entstandene Windsee.

2.4 Energietransfer

Das Energie- oder Powerspektrum des Seegangs stellt eine frequenz- bzw. periodenabhängige Energieverteilung des Seegangs dar. Sowohl die lineare Wellentheorie als auch Vorgänge 2. Ordnung beschreiben den Energietransfer von hohen zu niedrigen Frequenzen, wenn ein Wellenzug über ein ansteigendes Bodenprofil in flaches Wasser eindringt. Demzufolge werden an Stellen mit unterschiedlichen topographischen Eigenschaften sehr unterschiedliche Typen von Spektren beobachtet. In gleicher Weise baut sich ein Spektrum mit zunehmender Windgeschwindigkeit auf, und Energie wird vom hochfrequenten zum langwelligen Teil verschoben, wie Windenergie in die Wasseroberfläche eingetragen wird. Stabile, vorwiegend langwellige Anteile des Spektrums laufen ohne sichtbare Energieverluste in das Ästuar ein und beeinflussen wesentlich das örtliche Seegangsgeschehen. Die „Geschichte“ eines Sturmseegangs konnte an Hand einer Meßserie vom April 1979 unter Berücksichtigung der in den einzelnen Frequenzbereichen enthaltenen Energieanteile hinreichend genau „nachvollzogen“ werden (BARTHEL, 1979).

Bei den hier diskutierten Messungen liegt die Hauptwindrichtung quer zum Ästuar; es ist jedoch nicht auszuschließen, daß langwellige Anteile durch Refraktion, Diffraktion und die Tendenz, tiefen Rinnen zu folgen, quer zur Hauptwindrichtung landwärts laufen. Abb. 2.11 bis 2.16 zeigen die Ergebnisse dieser Untersuchungen. Tatsächlich dargestellt ist die prozentuale Verteilung der RMS-Werte für die Frequenzbereiche

- a) 0-0,125 (0-8 s Perioden)
- b) 0,125-0,25 (8-4 s Perioden)
- c) 0,25-0,5 (4-2 s Perioden)

$$\text{RMS} = \sqrt{m_0}, \quad m_0 = \int_0^{f_{\max}} S(f) df$$

wobei der RMS (root-mean-square)-Wert als Ergebnis der Spektralanalyse ein Maßstab der im jeweiligen Frequenzband enthaltenen Seegangenergie ist.

Die Serie vom 2./7. 12. 1978 (Abb. 2.11), die bei SE- bis S-Wind gewonnen wurde, zeigt, daß an den drei dargestellten Stationen deutlich ein Tide- bzw. Tideströmungseinfluß zu

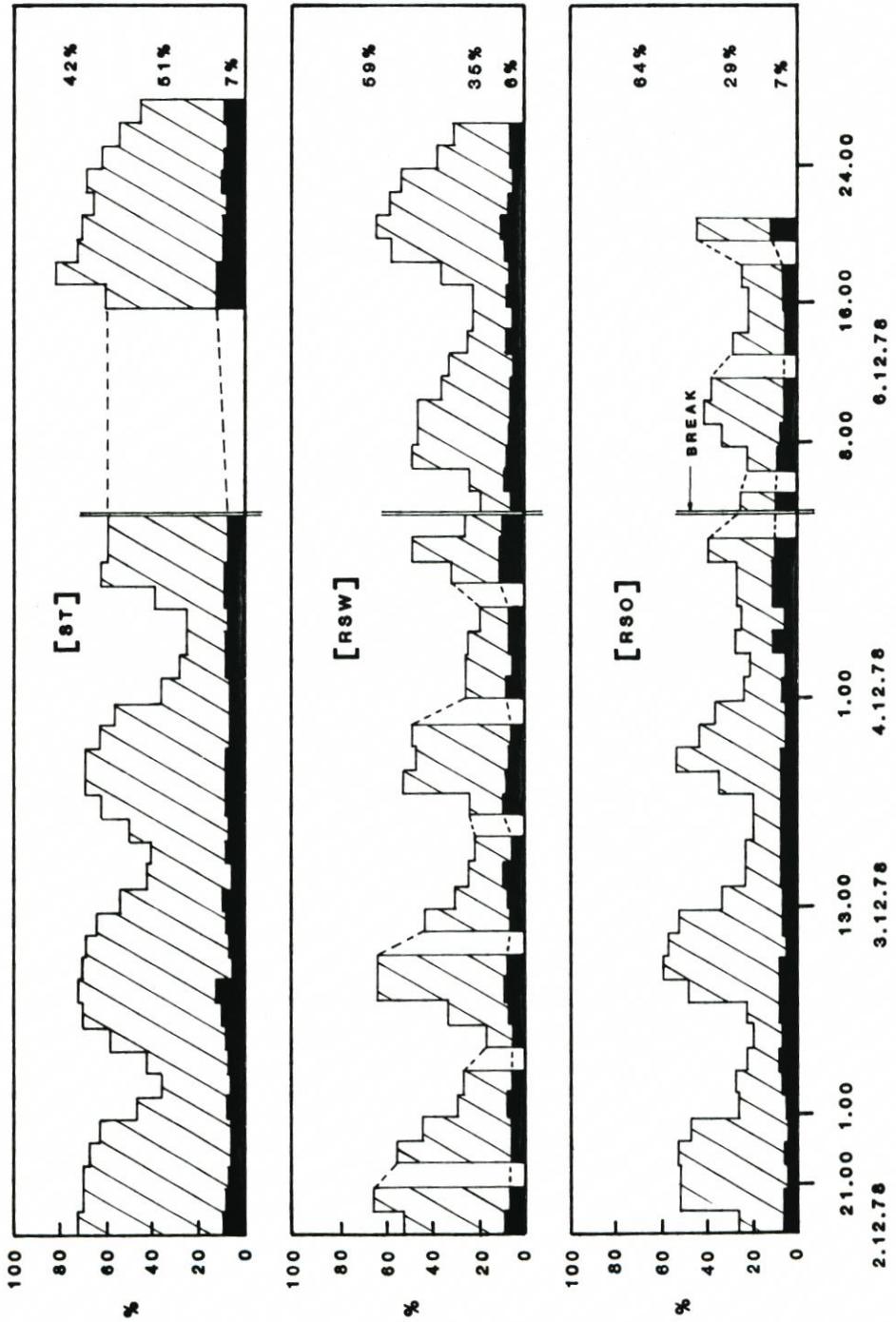


Abb. 2.11 Energieverteilung 2.-7. 12. 1978

erkennen ist. Da die signifikanten Wellenhöhen im Bereich 0,5 bis 1,5 m liegen, deckt sich diese Beobachtung mit früher gemachten, wo Strömungseinflüsse bis $H_s = 1,0$ m nachgewiesen werden konnten. Die Zunahme der Peak-Periode, wie auch in Abb. 2.2 zu erkennen, ist bei nur leicht und stetig ansteigendem Wind auf Flutstrom zurückzuführen. Obwohl die Peak-Perioden für die drei dargestellten Stationen im Bereich 3 bis 5 s bleiben, ist ein langwelliger Anteil in allen Spektren vorhanden. Wegen der fehlenden Richtungsinformation kann nur angenommen werden, daß es sich hierbei um stabile Schwellkomponenten handelt, die aus der freien See unverändert einlaufen.

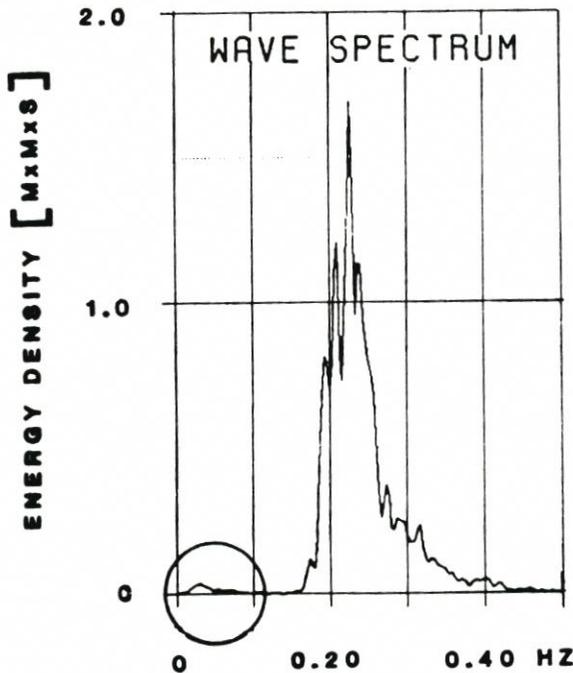


Abb. 2.12 Spektrum RSW $H_{LMAX} = 0,58$ m; $H_{LSIG} = 0,19$ m

Abb. 2.12 zeigt die in einem Spektrum der Station RSW enthaltene langwellige Energie. Bei entsprechender Filterung der Zeitserie der Wasserspiegelauslenkungen, wobei alle Frequenzen $> 0,125$ Hz unterdrückt werden, ergibt eine Analyse der resultierenden Zeitserie eine maximale Wellenhöhe von 58 cm, genug, um bei wiederholtem Auftreten ein fahrendes Schiff oder eine schwimmende, verankerte Konstruktion in horizontale und vertikale Bewegung zu versetzen, insbesondere wenn die Periode dieser Wellen weit über 8 s liegt. Die in der gleichen Zeitserie an der Station ST gemessenen „langwelliger“ Anteile erreichten Höhen bis zu 22 cm (Abb. 2.13).

Abb. 2.14 stellt in gleicher Weise die Energieverteilung für die Meßserie vom 25./26. 11. 1979 dar (vgl. Abb. 2.3). Bei einer stetigen Windrichtung, jedoch vergleichsweise höheren Windgeschwindigkeiten und demzufolge höheren Wellen mit längeren Perioden, ist der Einfluß der Tide weitaus geringer. Im Gesamtbild weisen alle vier Stationen keine wesentlichen Unterschiede in der Energieverteilung auf. Betrachtet man jedoch den zweiten Teil der Messung (Abb. 2.3 und 2.14) ab ca. 22 Uhr, so ist ein leichter Anstieg im langwelliger Teil des Energiespektrums zu erkennen. In jedem Fall dringt jedoch langperiodischer Seegang auch bei

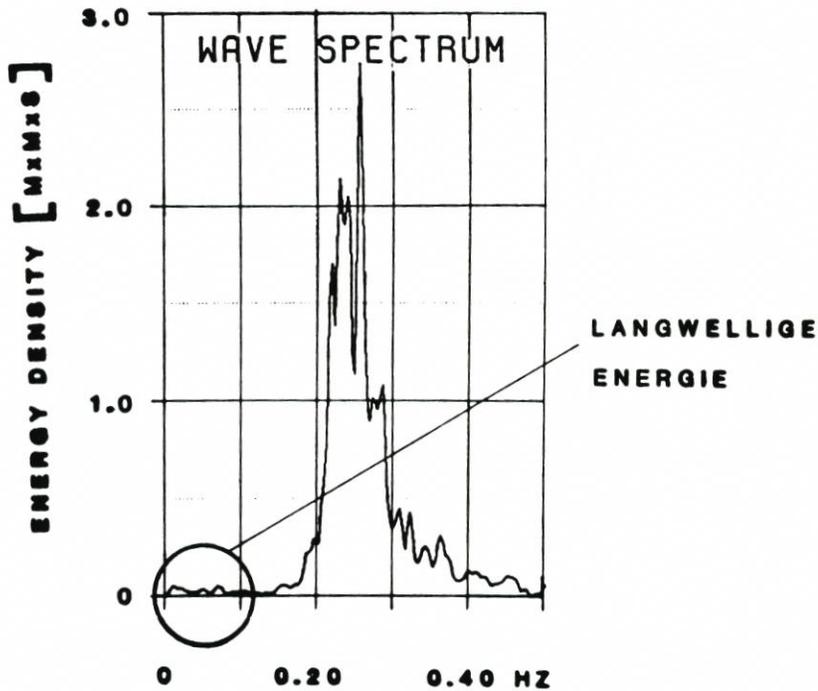


Abb. 2.13 Spektrum ST $H_{LMAX} = 0,22$ m; $H_{LSIG} = 0,14$ m

dieser Windrichtung in das Ästuar ein und kann selbst bei der im Schutz der Tegeler Plate gelegenen Station TPN nachgewiesen werden.

Abb. 2.5 zeigt Spektren von Messungen, die kurz hintereinander an den Stationen ST, RSW, RSO und TPN gewonnen wurden. Teile des Hauptspektrums liegen im Bereich des Frequenzbandes 0–0,125 Hz. Es sind jedoch auch Energieanteile in noch niedrigeren Frequenzen zu erkennen. Auf diese Erscheinung wird später eingegangen werden. Die im Bereich dieses Frequenzbandes liegenden Wasserspiegelauslenkungen erreichen maximale Höhen von

ST:	H_{max}	=	1,32 m
RSW:	H_{max}	=	1,81 m
RSO:	H_{max}	=	1,66 m
TPN:	H_{max}	=	0,90 m

Ein erheblich höherer Anteil langwelliger Energie kann in der Meßserie vom 10.–18. 12. 1979 festgestellt werden. Mit einem mittleren Anteil von 29% und maximalen Werten von bis zu 44% aller Energie im langwelligen Bereich bei RSW werden Wellenhöhen von 4,3 m erreicht (Abb. 2.6 u. 2.15). Diese Energie ist als langperiodische Windsee jedoch im Hauptpeak des Spektrums angesiedelt, und der prozentuale Anteil nimmt wegen geringer Fetchlängen im inneren Ästuar (TPW) ab. Maximale Wellenhöhen des ersten Frequenzbandes erreichen bei RSO 5,04 m, bei TPW nur noch 1,52 m und bei TPN immerhin noch 2,73 m.

Auffallend ist jedoch der Energietransfer zu ganz niedrigen Frequenzen. In einem Vergleich fast simultaner Meßschriebe in Abb. 2.16 hat zwischen den Stationen RSW/RSO und TPW/TPN eine nichtlineare Energietransformation stattgefunden und zur Entstehung langwelliger Anteile geringer Amplituden geführt. Dies deutet darauf hin, daß gewisse

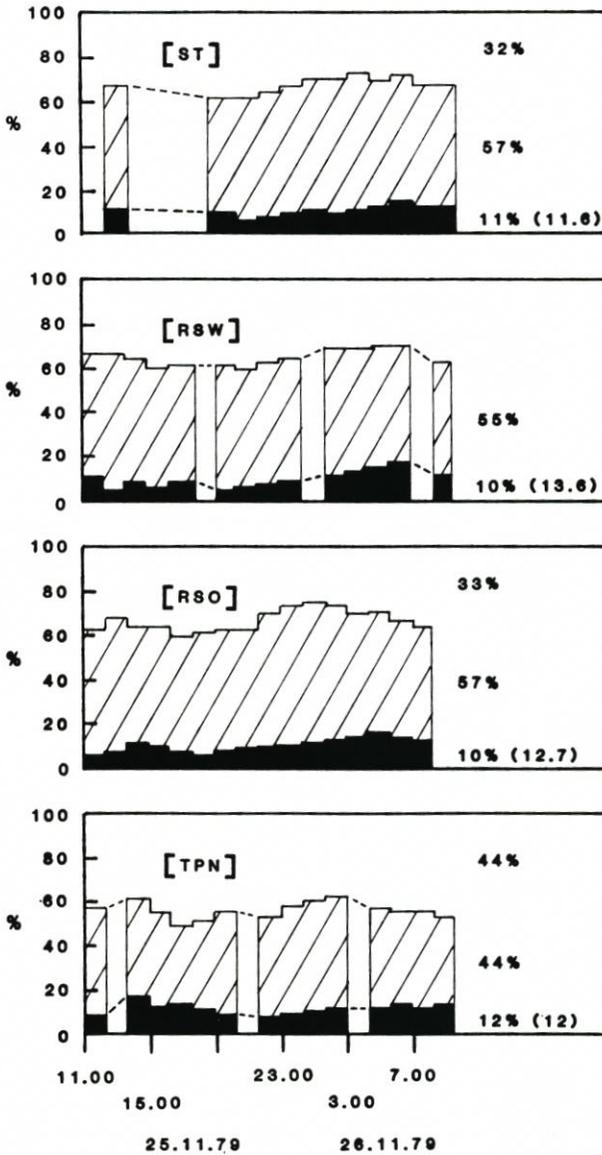


Abb. 2.14 Energieverteilung 25./26. 11. 1979

Seegangsanteile, an die tiefen Rinnen gebunden, unter Zunahme der Periode und damit Wellenlänge ins Ästuar eindringen. Da über die Dynamik dieser langen Wellen und ihr Verhalten im flacher werdenden Wasser noch relativ wenig bekannt ist, kann nur vermutet werden, daß sie, ähnlich wie eine Tidewelle, unter Zunahme der Amplitude den Haupttrinnen folgen und durch die Wasserspiegelauslenkungen und die damit verbundenen Orbitalströmungen zu unerwarteten und unerwünschten Bewegungen verankerter und fahrender Schiffe bzw. zur Hafenbeckenresonanz führen können. Eine eingehende Untersuchung anhand von zusätzlichen Naturmessungen, z. B. entlang der Hauptschiffahrtsrinne des Weserästuars bis in die Hafenregion, wäre geeignet, Aufschluß über derartige Fragen zu geben.

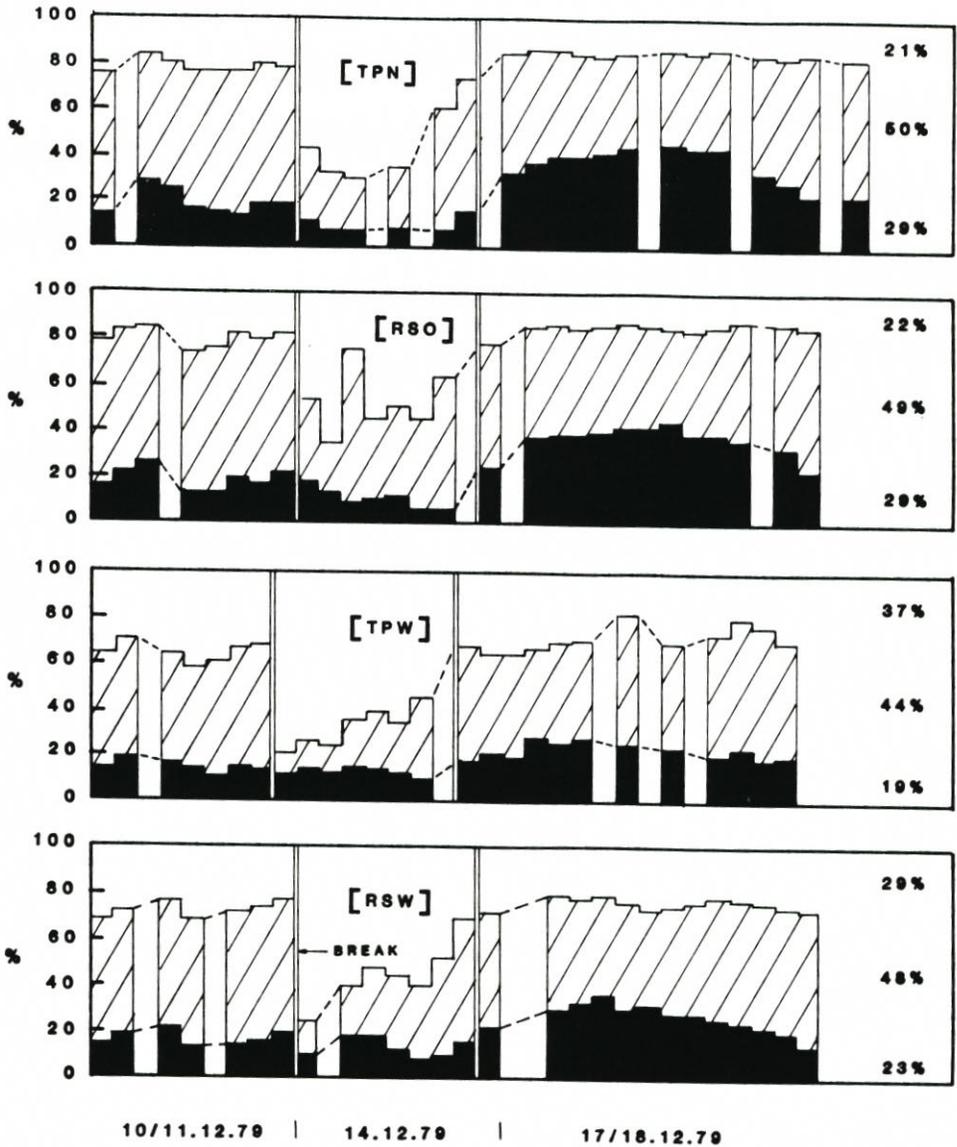


Abb. 2.15 Energieverteilung 10.-18. 12. 1979

3. Wellengruppierungen und langperiodische Wellen

3.1 Wellengruppen

Untersuchungen der letzten Jahre haben gezeigt, daß besonders im flachen Wasser Wellen nicht immer bestimmten Verteilungen unterliegen, sondern oft – z. B. in Abweichung vom GAUSSschen Prozess – in Gruppen höherer und kleinerer Wellen auftreten. Die Bedeutung dieser Erkenntnis und des Wissens um bestimmte Gruppierungen ist offensichtlich,

bedenkt man, daß in einer Gruppe von Wellen, die eine bestimmte Höhe (z. B. $H_{1/3}$) überschreiten, eine Energie konzentriert ist, die sonst über einen größeren Zeitraum verteilt ist. Diese plötzliche Belastung von Bauwerken kann zum Versagen oder zur Zerstörung führen, insbesondere wenn die Frequenz der beteiligten Wellen die charakteristische Frequenz eines Bauwerkes abdeckt. Schiffe oder andere schwimmende Konstruktionen, die vielleicht bei der Normalverteilung von Wellen nur eine geringe Bewegung ausführen würden, reagieren plötzlich heftig und können außer Kontrolle geraten, insbesondere wenn mit der Wellengruppe eine langperiodische Wasserspiegelauslenkung zweiter Ordnung verbunden ist.

Verschiedene Ansätze zur Beschreibung des Gruppierungsverhaltens von Wasserwellen wurden von RYE (1974) und SIEFERT (1976) für Nordseemessungen geliefert. Dabei diente die Anzahl der aufeinanderfolgenden Wellen mit einer Höhe, die die kennzeichnende Höhe überschritt, und ihre Auftretenshäufigkeit als Maßstab für die Gruppierung. In gleicher Weise wurden Messungen im Weserästuar auf Wellengruppen untersucht (BARTHEL, 1982). Alle drei Ergebnisse stimmten weitgehend mit einer von GODA (1976) erarbeiteten Auftretenshäufigkeit überein, die auf theoretischen Überlegungen basiert. Eine andere Methode wird von NOLTE und HSU (1972) vorgeschlagen. Die Verbindung von Wellenbergen und Wellentälern in der Zeitfunktion der Wasserspiegelauslenkungen ergibt eine Hüllkurve, die ein annäherndes Bild von Wellengruppierungen im jeweiligen Meßschrieb darstellt. Eine physikalisch bedeutungsvollere Interpretation, die die Konzentration von Energie in einer Wellengruppe berücksichtigt, wird von FUNKE und MANSARD (1979) durch die SIWEH-Funktion gegeben (SIWEH = Smoothed Instantaneous Wave Energy History). Die Funktion wird beschrieben durch

$$E(t) = 1/T_p \int_{\tau=-T_p}^{T_p} \eta^2(t+\tau) \cdot Q_e(\tau) dt \text{ für } T_p \leq t \leq T_n - T_p$$

mit T_n = Länge der Zeitserie
 T_p = Peak-Periode des Spektrums
 Q_e = Glättungsfunktion (Tiefpaßfilter)

und stellt die Verteilung der Wellenenergie längs der Zeitachse dar. Dabei ist die Wellenenergie als Quadrat der Wasserspiegelauslenkungen definiert. Die Spektralanalyse dieser Funktion ergibt das SIWEH-Spektrum, das bei der Wellensynthese für Modellversuche eine wichtige Rolle spielt.

Abb. 3.1 zeigt in einem Beispiel die Aussagekraft der SIWEH-Funktion eines Wellenzuges für seine Wellengruppierung. Extremwerte in der Funktion weisen auf die Existenz von Gruppen höherer Wellen und somit Energiekonzentration hin. Die Intensität dieses Gruppierungsverhaltens wird durch den Gruppierungsfaktor

$$GF = \frac{\sqrt{m_{0e}}}{m_0}$$

beschrieben. Dabei sind m_0 = 0-tes Moment des Seegangsspektrums
 m_{0e} = 0-tes Moment des SIWEH-Spektrums.

Ein $GF = 0,9$ beschreibt einen hohen Grad der Gruppenbildung. Werte bis zu $GF = 1,1$ sind in Naturmessungen ermittelt worden. Typische GF -Werte bewegen sich jedoch zwischen 0,5 und 0,8. Weitere bedeutende Parameter in der Beschreibung der Wellengruppenbildung sind

- die Länge der Wellengruppe
- die Gruppenperiode
- die Variation der Gruppenperiode.

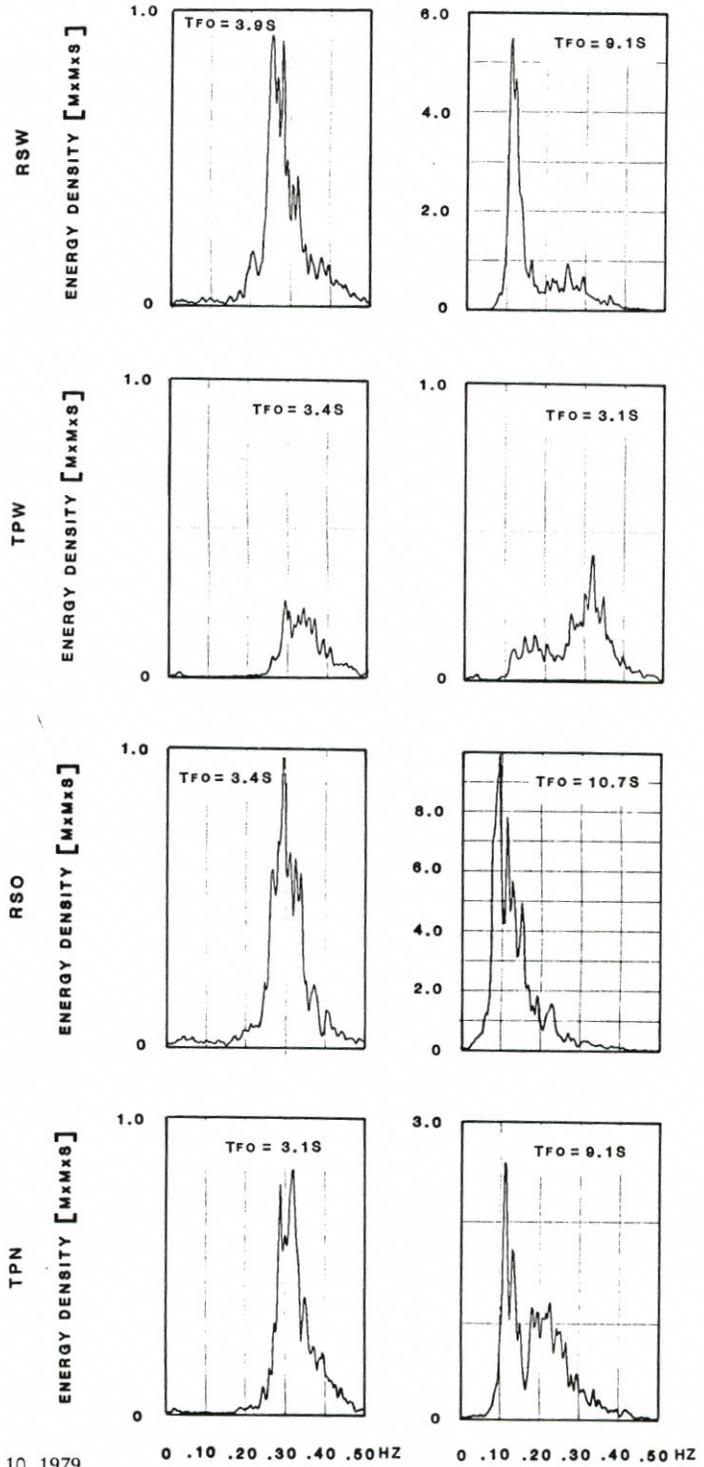
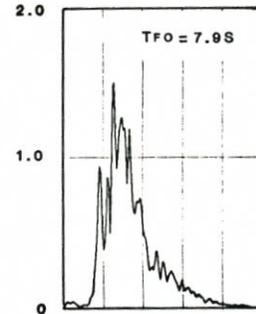
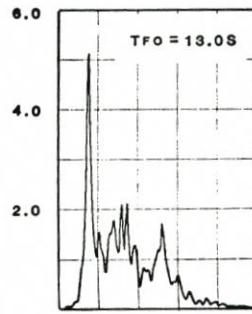
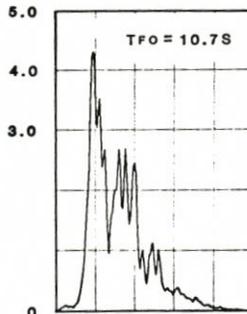
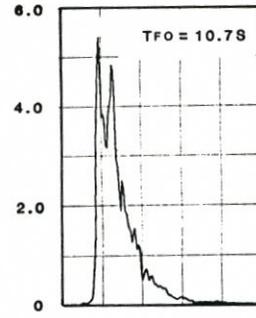
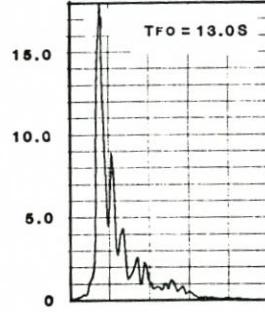
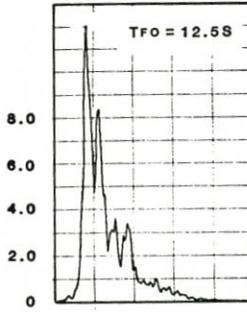
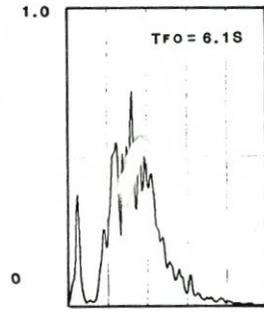
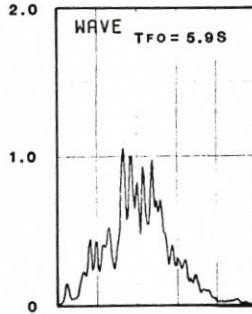
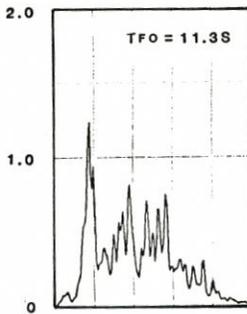
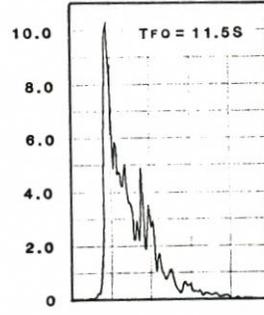
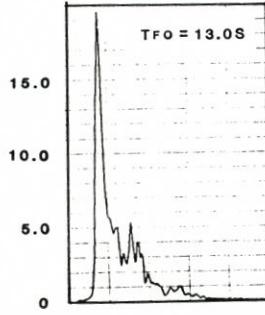
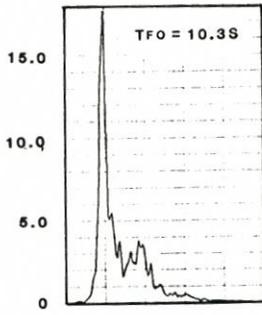


Abb. 2.16 Spektren 14.-18. 10. 1979



0 .10 .20 .30 .40 .50 HZ

0 .10 .20 .30 .40 .50 HZ

0 .10 .20 .30 .40 .50 HZ

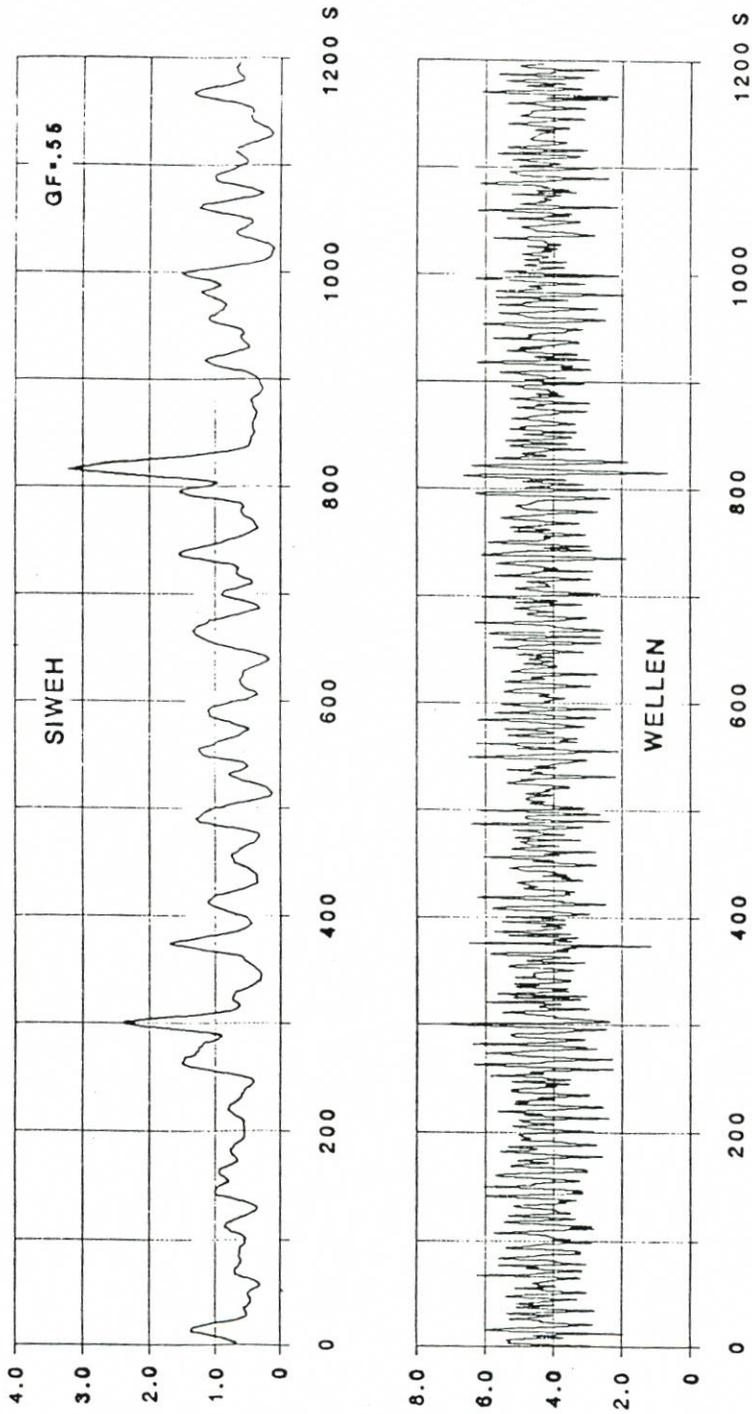


Abb. 3.1 Beispiel SIWEH-Funktion

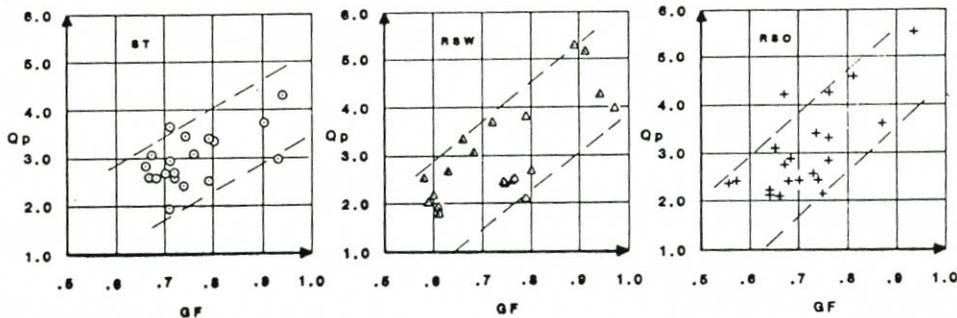
Um die Gruppierungseigenschaften des Ästuarseegangs zu bestimmen, wurden drei der hier behandelten Meßreihen untersucht. Die Ergebnisse sind in den Abb. 2.2, 2.5 und 2.6 dargestellt.

In Abb. 2.2 sind bei stetig wachsendem Wind aus SE-S keine außergewöhnlichen Tendenzen in den GF-Werten an allen Stationen zu bemerken, obwohl alle Werte ungewöhnlich hoch sind und teilweise $GF = 1,0$ erreichen bzw. überschreiten. Wegen der insgesamt geringen Wellenhöhen ist der Einfluß tidebedingter Wasserspiegelschwankungen ausgeschlossen. Es ist jedoch eine schwache Variation der GF – Mittel aller Stationen in Abhängigkeit von den unter Tideströmungseinfluß stehenden Wellenhöhen und besonders -perioden – zu erkennen. Diese Schwankungen sind auch bei den Ganglinien der Spektralformfaktoren Q_p zu bemerken.

Schwankende Windgeschwindigkeiten und -richtungen prägen die Messung vom 10.–18. 12. 1979 (Abb. 2.5). Entsprechend schwanken und streuen die GF-Werte. Eine Abhängigkeit von den Wellenhöhen bzw. -perioden ist wiederum dadurch gegeben, daß mit ansteigenden Peak-Perioden (14. 12. 1979 – 20.00 Uhr) GF absinkt (ebenso 17. 12. – 12.00 Uhr bis 18. 12. – 4.00 Uhr), während offensichtlich bei sinkenden Höhen und Perioden (10./11. 12.) GF ansteigt. Inwieweit dieser Prozeß, insbesondere bei größeren Wellenhöhen, mit einem Einfluß der Topographie zusammenhängt, kann aufgrund dieser Messungen nur vermutet werden. In jedem Fall spielt der kurzfristige Energieeintrag des Windes und damit die Böigkeit des Windes eine Rolle. Entsprechende Windmessungen stehen jedoch leider für diese Meßserien nicht zur Verfügung.

Die Messungen vom 23./25. 4. 1980 passen in den Rahmen des zuvor Gesagten. Weitgehend unabhängig von der Lage der Meßstation sinken die GF-Werte bei steigenden Höhen und Perioden vom 0,9 bis 0,6 ab (Abb. 2.8). Die drei o. a. Abbildungen zeigen neben GF auch den Spektralformfaktor Q_p . Trotz starker Schwankungen ist in beiden Parametern eine einheitliche Tendenz festzustellen. RYE (1974) hat festgestellt, daß die Wellengruppierung mit ansteigender Windgeschwindigkeit zunimmt. Dies scheint jedoch nur bis zu einem gewissen Sättigungsgrad zu gelten, da bei noch zunehmendem Wind am 24. 4. 1980 zwischen 12.00 und 18.00 Uhr GF deutlich abnimmt. Dies zeigt, daß nicht nur stündliche Windmittel für derartige Untersuchungen benutzt werden sollten, sondern eine Aufzeichnung auch der Böigkeit von besonderer Bedeutung bei zukünftigen Messungen ist.

Obwohl die Existenz von Wellengruppen in einem engen Spektrum mit scharf ausgebildetem Peak wahrscheinlicher ist als in breiteren Spektren (RYE, 1977; GODA, 1976), konnte eine Beziehung zwischen GF und Q_p bisher in Naturmessungen nicht festgestellt werden (MOGRIDGE et al., 1982). Die Tatsache, daß bei Modelluntersuchungen synthetische Spektren

Abb. 3.2 Q_p -GF

ihre Form für verschiedene GF beibehalten können, spricht ebenfalls gegen eine derartige Beziehung. In Abb. 3.2 sind die Parameter Q_p in Abhängigkeit von GF für die drei Stationen ST, RSW und RSO dargestellt. Trotz der Streuung scheint eine deutliche Abhängigkeit zu bestehen. Die Korrelationskoeffizienten R_{xy} schwanken zwischen 0,75 und 0,78.

Wie bereits oben gesagt, ist ein erheblich umfangreicheres Datenkollektiv nötig, um unter Ausschaltung anderer Einflußfaktoren diese Beziehung nachzuweisen. Eine theoretische Untersuchung liegt noch nicht vor.

3.2 Gruppengebundene lange Wellen

Wie bereits erwähnt, ist die Kenntnis über die im Seegang enthaltenen langwelligen bzw. niederfrequenten Anteile ein bedeutender Faktor für die verschiedensten Bereiche. Wie LONGUETT-HIGGINS und STEWART (1964) für einfache Wellengruppen nachgewiesen haben, bilden sich als Folge nichtlinearer interner Wellenprozesse (radiation stress) gruppengebundene lange Wellen, die als Wasserspiegelabsenkung unter der Wellengruppe und als Anhebung zwischen den Gruppen höherer Wellen auftreten (Abb. 3.3). Diese langen Wellen zweiter Ordnung schreiten mit der Gruppe fort und können, oft als Welle visuell nicht erkennbar, zu erheblichen Reaktionen besonders verankerter schwimmender Konstruktionen führen. Unglücklicherweise sind einige der heute verwendeten Meßinstrumente nicht in der Lage, diese niederfrequenten Wasserspiegelauslenkungen zuverlässig zu registrieren. So verfälscht z. B. die häufig benutzte waverider-Boje Registrierungen unter 0,1 Hz, so daß eine Kompensationsfunktion bei der Auswertung benutzt werden sollte. Und zwischen 0,05 und 0,03 Hz wird die Reaktion des Meßgeräts so schlecht, daß die registrierten Werte nicht mehr

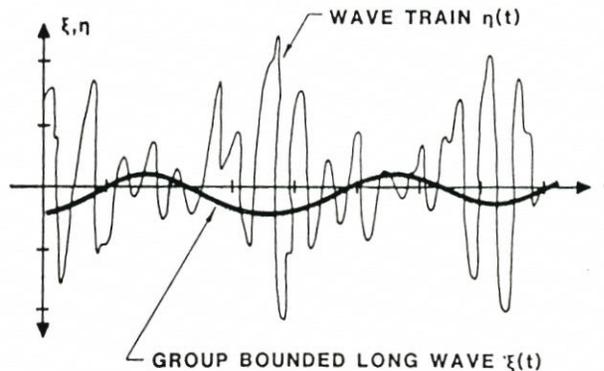


Abb. 3.3 GLW-Systemskizze

akzeptabel sind. Daher sollten, falls keine anderen Meßgeräte zur Verfügung stehen, die niederfrequenten Anteile des Seegangs für diese Bereiche nachträglich ermittelt werden. BOWERS (1980), DEAN und SHARMA (1981) benutzten die LAPLACE-Gleichungen, um diese gruppengebundenen Wellen zu bestimmen, während OTTENSEN-HANSEN (1978) auf der Basis der Impulserhaltungsgleichungen eine befriedigende Beschreibung gibt:

Grundsätzlich erzeugt jedes Frequenzpaar in einem Wellenzug eine Komponente der gruppengebundenen langen Welle (GLW). Die GLW wird daher auf der Basis der Fourieranalyse des eigentlichen Wellenzuges als Summe der Ergebnisse der Fourierkoeffizientenpaare zu

$$\xi_{nm}(t) = G_{nm}(f, \Delta f) \{ [a_n a_m + b_n b_m] \cos(\Delta \omega_{nm} t) + (a_m b_n - a_n b_m) \sin(\omega_{nm} t) \}$$

bestimmt. Dabei ist G_{nm} die Übertragungsfunktion, erläutert bei OTTENSEN-HANSEN (1978) und SAND (1982).

a, b = Fourier-Komponenten

ω_{nm} = Phasenwinkel

t = Zeit

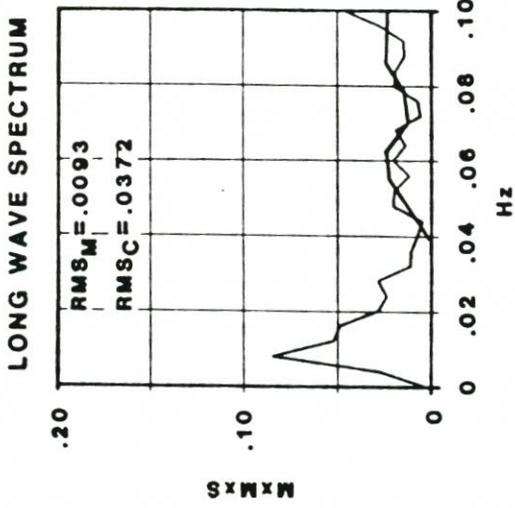
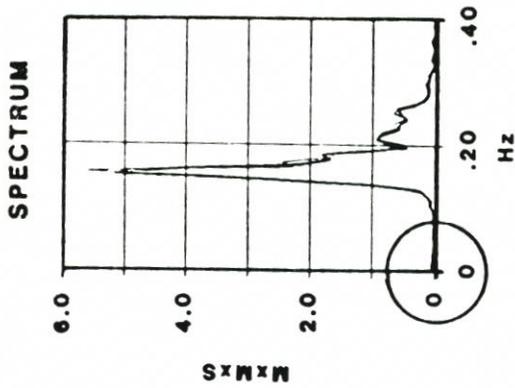
Die korrekte Reproduktion dieses GLW-Phänomens für Modellversuche ist mit erheblichem Aufwand verbunden und wird bei BARTHEL et al. (1983) beschrieben. Dabei wurde nachgewiesen, daß die Bedeutung dieser langperiodischen Wellen zweiter Ordnung mit abnehmender Wassertiefe zunimmt, d. h. unter Flachwasserbedingungen, wie sie in einem Ästuar vorherrschen, sind die physikalischen Voraussetzungen für eine deutlich ausgebildete GLW besonders günstig.

3.3 Nachweis der GLW in Naturmessungen

Im vorhergehenden Abschnitt wurde bereits erwähnt, daß viele der für größere Wassertiefen eingesetzten Meßgeräte nicht in der Lage sind, niederfrequente Seegangsanteile korrekt zu registrieren. Um einen Anhalt über die Größe dieser langperiodischen Wasserspiegelauslenkungen zu bekommen, wurden verschiedene Meßschriebe einem ausgedehnten Test unterzogen:

- Nach Behandlung mit einem Bandpaßfilter, der die hohen Frequenzen (Störungen) eliminiert, wird eine Fouriertransformation der Zeitserie vorgenommen.
- Alle Fourierkomponenten mit einem Energiegehalt, der kleiner als ein vorgegebener Grenzwert ist (z. B. 10 %) und alle Komponenten, die unter der Vertrauensschwelle (z. B. für die waverider-Boje = .04 Hz) liegen, werden = 0 gesetzt.
- Die Fourierkomponenten für die GLW werden mit den o. a. Gleichungen berechnet.
- Durch Inversion der Fouriertransformation werden die Zeitserien sowohl der langen als auch der modifizierten kurzen Wellen ermittelt.
- Überlagerung beider Zeitserien ergibt die gesuchte Zeitreihe der realen Wasserspiegelauslenkungen.
- Spektral- und Zero-crossing-Analyse ergeben den gewünschten Vergleich zwischen gemessenem und theoretischem Wellenzug.

Die für diesen Vergleich erforderlichen FORTRAN-Programme wurden teils vom Autor selbst entwickelt, teils sind sie Bestandteil eines im „Hydraulics Laboratory“ des National Research Council entwickelten Wellenanalyse-Auswertungspakets, das laufend auf den neuesten Stand gebracht wird (MANSARD und FUNKE, 1983). Von den untersuchten Wellenschrieben werden hier nur zwei ausgesuchte Beispiele gebracht. Abb. 3.4 zeigt einen Wellenzug, der bei Nordwind von 17 m/s an der Station RSO registriert wurde. Der GF-Wert ist 0,9, und in der Darstellung der Zeitserie mit der überlagerten GLW kann man deutlich die Wasserspiegelauslenkung unter den Wellengruppen erkennen. Entsprechend den o. a. Analyseprogrammen wurden Spektralanalysen sowohl für die ursprünglich gemessenen Zeitserien als auch für den Zustand nach Überlagerung mit der berechneten langwelligen Komponente durchgeführt. Der obere rechte Teil der Abb. 3.4 zeigt beide Gesamtspektren, wegen des Maßstabs ohne bemerkenswerte Unterschiede. Links davon ist der langwellige Teil des Spektrums vergrößert dargestellt. Abhängig von dem festgelegten niederfrequenten Bereich des Spektrums liegt der RMS-Wert des rekonstruierten Spektrums (RMSc) weit über dem des tatsächlich gemessenen



WESER DATA

LOC. RSO: Z=8.00m

23.4.80 - 17.00

WIND: N-17 m/s

WAVE TRAIN: $\bar{H} = 1.13m$

$H_s = 1.78m$

$H_{max} = 3.14m$

LONG WAVE: $\bar{H} = .07m$

$H_s = .12m$

$H_{max} = .17m$

$\bar{T} = 36s$

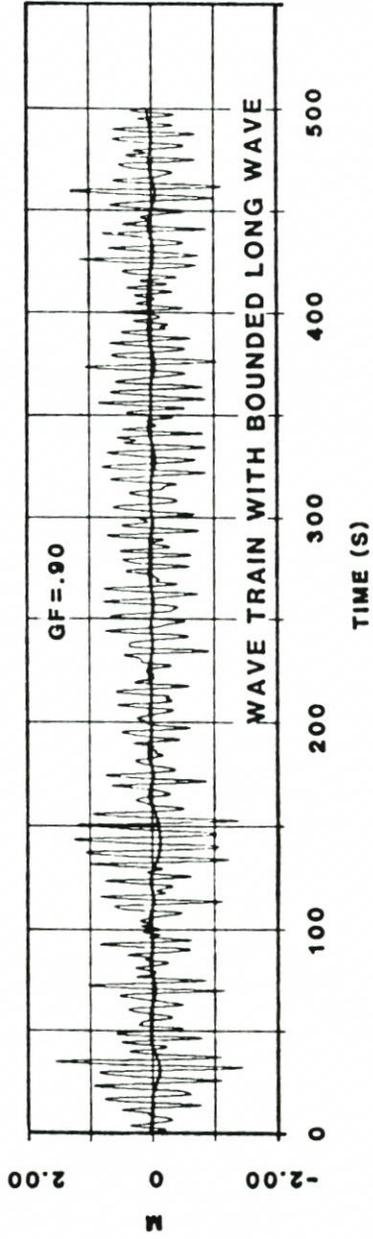
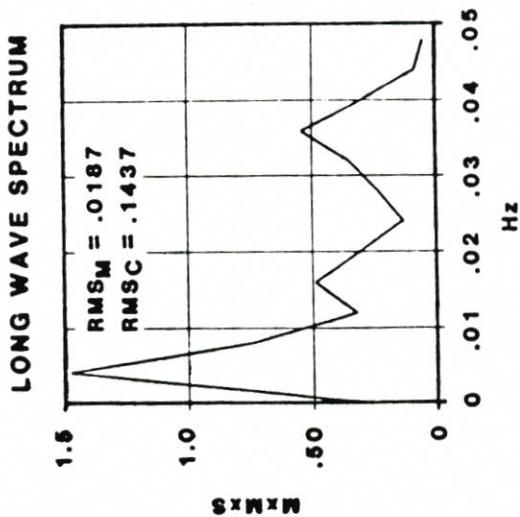
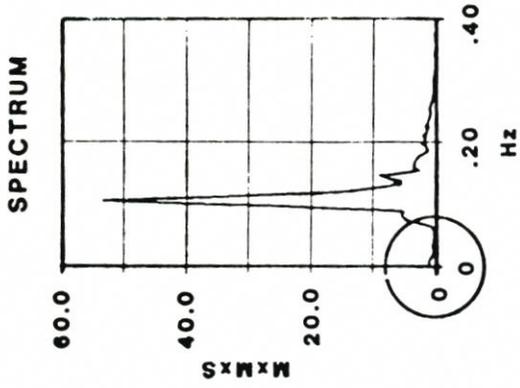


Abb. 3.4 GLW in Naturmessungen - RSO



TRANSFERRED WAVE TRAIN

LOC. ST: Z = 20.00m
 WAVE TRAIN: $\bar{H} = 2.51m$
 $H_s = 4.59m$
 $H_{max} = 8.78m$
 LONG WAVE: $\bar{H} = .37m$
 $H_s = .57m$
 $H_{max} = .65m$
 $T = 61s$
 $T_{max} = 183s$

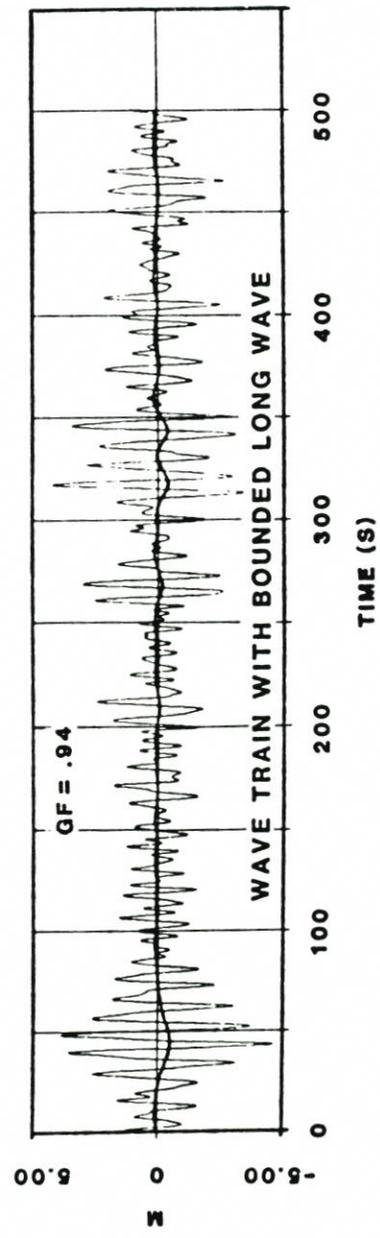


Abb. 3.5 GLW in Naturmessungen - Tiefwasser

(RMSM) und zeigt damit, daß bei dem verwendeten Meßsystem wertvolle Informationen verlorengegangen sind. Ein deutlich ausgebildeter Peak im Bereich 0,01 Hz deutet darauf hin, daß – obwohl im hier dargestellten Zeitausschnitt nicht erkennbar – sehr lange Wellen vorkommen können, die sich selbst auf Tidepegeln nachweisen lassen müßten. Es sei daher dahingestellt, ob die im Sprachgebrauch und gelegentlich in der Literatur erscheinenden „Fernwellen aus der Nordsee“ nicht auf derartige Ereignisse zurückgeführt werden können. Die Ablösung der GLW von der Wellengruppe in flachem Wasser und ihr weiteres Verhalten sind jedoch noch weitgehend ungelöste Probleme.

Die mittlere Periode des niederfrequenten Wellenzuges liegt bei 36 s mit $\bar{H} = 0,07$ m, $H_s = 0,12$ m und $H_{max} = 0,17$ m.

Obwohl im Weserästuar schon maximale Wellenhöhen von $H_{max} > 13,0$ m nachgewiesen worden sind (BARTHEL, 1978), standen für diese Analyse keine rechnerkompatiblen Meßreihen mit höheren Wellen zur Verfügung. Deswegen wurde aus verfügbaren Meßschrieben, die vor der Küste Neufundlands, Kanada, registriert wurden, eine 20-Min.-Zeitreihe ausgesucht, die in ihren signifikanten Werten vergleichbar denen des Außenästuars der Weser ist.

Abb. 3.4 zeigt das Ergebnis für diesen Wellenzug mit $GF = 0,94$, $\bar{H} = 2,52$ m, $H_s = 4,58$ m und $H_{max} = 9,78$ m.

Wiederum zeigt sich, daß unter den Wellengruppen eine deutlich ausgebildete GLW als „set-down“ (Wellental) erscheint, während unter Gruppen kleinerer Wellen der „set-up“ als Wellenberg zu entdecken ist. Der Anteil langwelliger Energie, der bereits im Gesamtspektrum zu sehen ist, wird erheblich erhöht durch den rekonstruierten GLW-Anteil.

Die RMS-Werte, ermittelt bis zu einer COF (cut-off-frequency) von 0,05 Hz, zeigen einen fast 600prozentigen Anstieg der Energie. Die Zero-crossing-Analyse des langwelligeren Teiles ergibt $H = 0,37$, $H = 0,57$ m und $H_{max} = 0,65$ mit einer mittleren Periode von $T = 61$ s.

Es ist nicht bekannt, in welchem Umfang diese langen Wellen die Bewegung von Schiffen anregen können. Hierzu sind ausgedehnte Modellversuche erforderlich. Es muß jedoch erwartet werden, daß eine plötzliche Abnahme der erforderlichen Wassertiefe für Schiffe, die nur mit geringer „underkeel-clearance“ fahren, zusammen mit der Bewegung, die durch die Einwirkung einer Gruppe höherer Wellen verursacht wird, zu gefährlichen Situationen führen kann. Die mit langen Wellen verbundene Änderung der Strömungsgeschwindigkeiten könnte unter Umständen das Steuerverhalten eines Schiffes beeinträchtigen. Wie groß die Wahrscheinlichkeit des Auftretens dieser GLW und eventuell eine Überlagerung mit ohnehin vorhandenen Schwellkomponenten ist, kann nur durch eine eingehende Analyse des vorhandenen und zusätzlichen umfangreicheren Datenmaterials festgestellt werden. Darüber hinaus sollten Dauermeßstationen in gefährdeten Bereichen das Seegangsklima für einen Warndienst registrieren.

4. Schriftenverzeichnis

- BARTHEL, V.: Sturmflutseegang in einem Ästuar. Die Küste, H. 34, 1979.
 BARTHEL, V.: Seegang in einem Ästuar am Beispiel der Außenweser. Die Küste, H. 35, 1981.
 BARTHEL, V.: Wave Energy Distribution in an Estuary. Proc. 17th ICCE, Sydney, Australia, 1980.
 BARTHEL, V.: Über den Seegang in einem Ästuar. Forschungsbericht des Bundesministeriums für Forschung und Technologie, M 82-001, 1982.
 BARTHEL, V.: Height Distribution of Estuarine Waves. Proc. 18th ICCE, Cape Town, South Africa, 1982.
 BARTHEL, V., MANSARD, E. P. D., SAND, S. E. u. VIS, F. C.: Group Bounded Long Waves in Physical Models. Ocean Engineering, Vol. 10, No. 4, 1983.

- BOWERS, E. C.: Long Period Disturbances Due to Wave Groups. Proc. 17th ICCE, Sydney, Australia, 1980.
- COOLEY, J. W. u. TUKEY, J. W.: An Algorithm for the Machine Calculation of Complex Fourier Series. Math. of Computation, Vol. 19, 1965.
- DEAN, R. G. u. SHARMA, F. N.: Simulation of Wave Systems Due to Nonlinear Directional Spectra. Proc. Hydrodyn. in Ocean Eng., 2, Trondheim, Norway, 1981.
- DETTE, H. H.: Wellenmessungen und Brandungsuntersuchungen vor Westerland/Sylt. Mitt. d. Leichtweiß-Inst., H. 40, 1974.
- FUNKE, E. R. u. MANSARD, E. P. D.: On the Synthesis of Realistic Sea States in a Laboratory Flume. National Research Council, Techn. Report LTR-HY-66, Ottawa, Canada, 1979.
- GODA, Y.: Numerical Experiments on Wave Statistics with Spectral Simulation. Rep. of Port and Harbour Res. Inst., Vol. 9, No. 3, 1970.
- GODA, Y.: On Wave Groups. Proc. Conf. Behaviour of Offshore Structures, Trondheim, Norway, 1976.
- KAMPHUIS, W.: Wave Spectrum Analysis Revisited. Civil Eng. Rep. No. 64a, Queens Univ., Kingston, Ontario, Canada, 1969.
- LONGUET-HIGGINS, M. S.: On the Statistical Distribution of the Heights of Sea Waves. Journal Marine Research, 11 (3), 1952.
- LONGUET-HIGGINS, M. S. u. STEWART, R. W.: Radiation Stresses in Water Waves; a Physical Discussion with Application. Deep Sea Res., No. 11, 1964.
- LUCK, G. u. NIEMEYER, H. D.: Seegangsmessungen im Bereich der Ostfriesischen Inseln und Watten. Meerestechnik, No. 4, Bd. 7, 1976.
- MANSARD, E. P. D. u. FUNKE, E. R.: The NRC Advanced Wave Data Analysis Package. National Research Council, Techn. Rep. TR-HY-003, Ottawa, Canada, 1983.
- MOGRIDGE, G. R., FUNKE, E. R., BAIRD, W. F. u. MANSARD, E. P. D.: Analysis and Description of Wave Energy Resources. Proc. Hydrodyn. in Ocean Engineering, Trondheim, Norway, 1982.
- NOLTE, K. G. u. HSU, F. H.: Statistics of Ocean Wave Groups. Proc. 4th Annual Offsh. Techn. Conf., Houston, USA, 1982.
- OTTENSEN-HANSEN, N. E.: Long Period Waves in Natural Wave Trains. Progr. Rep. No. 46, Inst. f. Hydrodyn. and Hydr. Eng., Techn. Univ. of Denmark, 1978.
- RYE, H.: Wave Group Formation Among Storm Waves. Proc. 14th ICCE, Copenhagen, Denmark, 1974.
- RYE, H.: The Stability of Some Currently Used Wave Parameters. Coast. Eng., 1, Amsterdam, 1977.
- SAND, S. E.: Long Wave Problems in Laboratory Models. Journ. of Waterways, Ports, Coast. and Ocean Eng., ASCE, Vol. 108, WW4, 1982.
- SAND, S. E.: Wave Grouping Described by Bounded Long Waves. Ocean Eng., Vol. 9, No. 6, 1982.
- SIEFERT, W.: Über Formen, Längen und Fortschrittsrichtungen von Wellen in küstennahen Flachwassergebieten. Hamb. Küstenforschung, H. 24, 1972.
- SIEFERT, W.: Consecutive High Waves in Coastal Waters. Proc. 15th ICCE, Honolulu, USA, 1976.
- SPIEGEL, M. R.: Theory and Problems of Statistics. McGraw Hill, New York, 1961.
- YSKER, J. S.: Seegangsmessungen in der Jade. Die Küste, H. 34, 1979.