1-AG/LO

Kuratorium für Forschung
im Küsteningenieurwesen
Postfach 44 67 - 24043 Kiel
Hindenburgufer 247 - 24106 Kiel

№ 25396 - Lit.

SEEGANGSMESSUNGEN IN DER ELBE

K. Richter

№ 25396 - Lit.

Inhaltsverzeichnis

		Seite
1.	Einleitung	1
1.1	Aufgabenstellung	1
1.2	Planung und Ablauf des Vorhabens	2
1.3	Wissenschaftlicher und technischer Stand des Projektes	3
1.4	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	4
2.	Ergebnisse	4
2.1	Verwendete Meßgeräte	4
2.1.1	Meßdraht	4
2.1.2	Datenerfassung und Speicherung	5
2.1.3	Kelkrohr	5
2.1.4	Wellenmeßbojen	6
2.2	Meßergebnisse	6
2.2.1	Die höchsten gemessenen Wellenhöhen	6
2.2.2	Die höchsten gemessenen Seegangsspektren	8
2.2.3	Eindringtiefe der Nordseewellen in das Elbeästuar	8
2.2.4	Wasserstands- und Strömungsmessungen	9
2.2.5	Seegangsmodell bzw. Interpretation der Messungen	10
2.2.6	Zeitliche Variabilität der Seegangsspektren	10
2.2.7	Doppler-Frequenzverschiebung: Wellen auf homogener Strömung	11
2.2.7.1	Tiefwasser	11
2.2.7.2	Flachwasser	13
2.2.7.3	Mittlere Wassertiefe	13
2.2.7.4	Berücksichtigung der Richtungsverteilung im Seegangsrichtungsspektrum	15

		Seite
2.2.8	Die JONSWAP-Fetchgesetze	20
2.2.8.1.	Das Problem des effektiven Fetch in der Elbe	21
2.2.9.1	Dämpfung und Anfachung der Wellen im Flachwasser	26
2.2.9.2	Refraktion der Wellen durch die Bodentopographie im Elbeästuar	27
2.2.9.3	Refraktion der Wellen durch inhomogene Strömungsfelder im Elbeästuar	29
2.2.9.4	Kombinierte Wirkung von Flachwasser- und Strömungsrefraktion	33
3	Zusammenfassung	35
4	Zukünftige Entwicklung	37

BSH HH?

Schlußbericht
für das KFKI-Projekt "Seegang und Bemessung auf Seegang im Küstenvorfeld und in Ästuarien"

Teilprojekt: Ästuarseegang (Elbe)

1. Einleitung

1.1 Aufgabenstellung

Die bisherigen Messungen des Seegangs im Bereich der deutschen Küsten, die u.a. im Rahmen dieses Projekts in einem gesonderten Atlas zusammengefaßt wurden, dienten im wesentlichen der Beschreibung der Seegangsverhältnisse für das betreffende Küstengebiet. Eine Übertragbarkeit der Ergebnisse auf beliebige andere Gebiete war in der Regel nicht möglich.

Inzwischen hat die Forschung insbesondere auf dem Gebiet der numerischen Modelle für die Beschreibung von Seegang, Strömungen und Wasserständen große Fortschritte gemacht. Aufbauend auf einem besseren Verständnis der den beobachteten Naturerscheinungen zugrundeliegenden physikalischen Prozesse, ist es gelungen, für tiefes und flaches Wasser zuverlässige numerische Strömungs- bzw. Wasserstands- und Seegangsmodelle zu entwickeln, die weltweit an beliebige Seegebiete angepaßt werden können.

Im unmittelbaren Küstenbereich, insbesondere aber im Ästuar der Elbe und deren Verlauf bis in das Hamburger Hafengebiet hinein, kann man die Wechselwirkungen zwischen der Strömung und dem Seegang nicht mehr vernachlässigen. Deshalb war es das Hauptziel dieses Projekts, die bisher noch ausstehende Kopplung zwischen Strömungs- und Seegangsmodellen in Angriff zu nehmen und die Modellergebnisse durch gezielte Messungen zu verifizieren.

....

Man kann sagen, daß das Teilprojekt "Ästuarseegang" von Anfang an in der Priorität hinter den Teilprojekten "Küstenmodell" und "Watt-Seegang" rangierte. Deshalb wurde in der Vorhabensbeschreibung, neben der Entwicklung eines numerischen Modells, als Ersatzmodell auch die Berechnung der Seegangsverhältnisse über die klassischen JONSWAP-Fetchgesetze (Windwirklänge und -dauer) vorgesehen (JONSWAP = Joint North Sea Wave Project).

1.2 Planung und Ablauf des Vorhabens

Wie beim Gesamtprogramm beschrieben, wurde dem KFKI 1986 ein Projektvorschlag vorgelegt und 1987 ein Antrag beim BMFT gestellt, der 1988 genehmigt wurde. Der Planungszeitraum umfaßte die Zeit vom 01.04.1988 bis 31.12.1990.

Leider konnte erst mit dem Zugang des Bewilligungsbescheids im August 1988 mit der Beschaffung und dem Bau der Meßgeräte begonnen werden. Da eine Fertigstellung und Installation im Winter 1988/89 nicht mehr möglich war, wurde mit den Messungen erst im Spätsommer 1989 begonnen. Da aus Kostengründen keine eigenen Meßpfähle als Geräteträger vorgesehen waren, war man auf die Erlaubnis zur Mitbenutzung anderer Meß- und Markierungspfähle und Leuchtfeuer in der Elbe angewiesen. So erwiesen sich in der ersten Meßperiode die Baken Z und Y in der Elbmündung ungeeignet als Meßgeräteträger, weil sie entgegen den Angaben des Betreibers einen beweglichen Rammschutz besaßen. Das Kernkraftwerk Brockdorf konnte sich erst nach langem Drängen entschließen, die Anbringung von Meßgeräten an zwei ihrer Meßpfähle zu gestatten.

Im Winter 1990/91 lief das Meßprogramm in vollem Umfang, im Winter 1991/92 mit gewissen Einschränkungen bis Mitte Februar 1992 (s. Tab. 1, Abb. 1 und Abb. 2).

Im Winter 1989 traten keine Sturmfluten auf. Ab Januar 1990 wurden insgesamt 18 Sturmfluten (Pegel Hamburg-St. Pauli, NN + 350 cm erreicht oder überschritten) erfaßt (s. Abb. 2, vertikale Pfeile).

....

Tabelle 1: Seegangsmeßstationen in der Elbe.
Position, Gerätetyp, Meßzeitraum und Wassertiefe WT
(bez. auf mittl. Springniedrigwasser)

Ort	Position	Gerät	Zeitraum	WT m
Elbe 1	54°00'00''N 08°07'10''E	Waverider	27.11.90 - 12.12.90 28.09.91 - 14.12.91	25
Leuchtturm Großer Vogelsand	53°59'46''N 07°28'42''E	Kelkrohr	22.08.90 - 12.04.91 31.10.91 - 16.11.91 (danach defekt)	7
Otterndorf (Pegel)	53°50'08''N 08°52'12''E	Meßdraht	19.10.89 - 17.02.90 03.09.90 - 25.02.91 13.09.91 - 29.10.91 und 18.12.91 - 27.01.92	10
Brunsbüttel	53°53'20''N 09°06'00''E	Meßdraht	17.10.90 - 10.02.91 11.09.91 - 27.12.91 (danach defekt)	5
Brokdorf	53°51'22''N 09°19'50''E	Meßdraht	17.10.90 - 26.01.91 29.09.90 - 11.10.90 11.09.91 - 03.03.92	5
Bützfleth (Nordhafen)	53°39'23''N 09°30'34''E	Kelkrohr	06.09.89 - 29.03.90 20.08.90 - 10.02.91	2

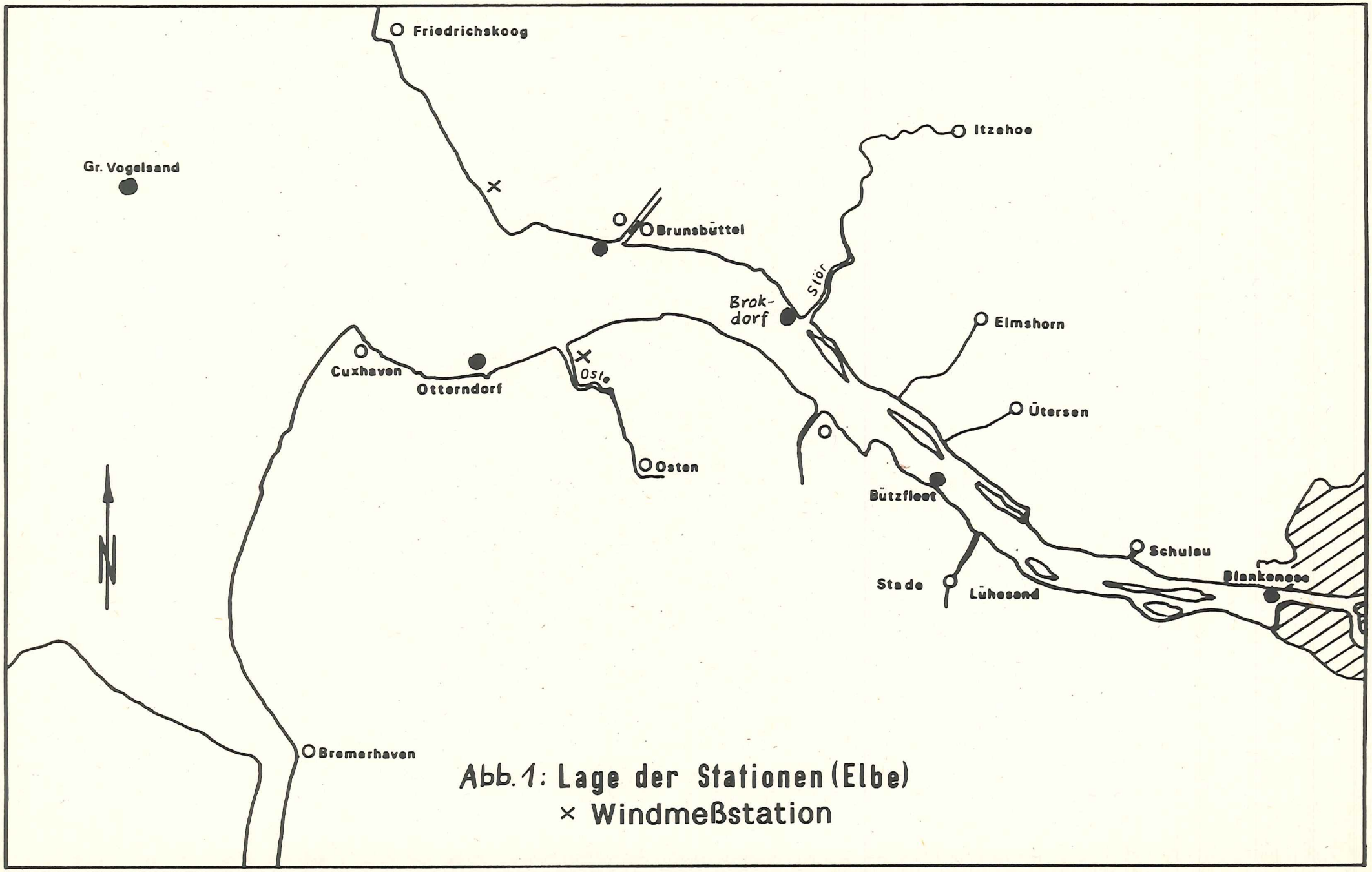


Abb. 1: Lage der Stationen (Elbe)
× Windmeßstation

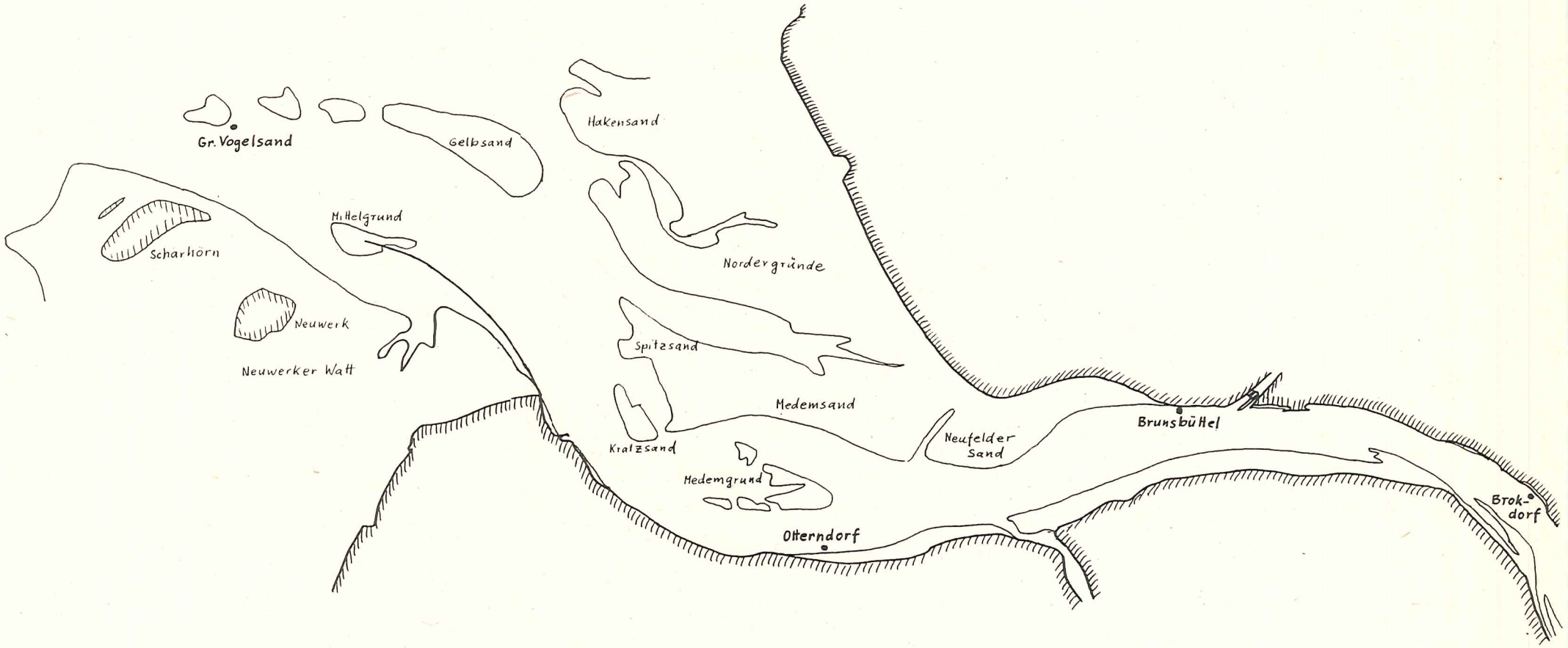


Abb. 1a : Elbeästuar

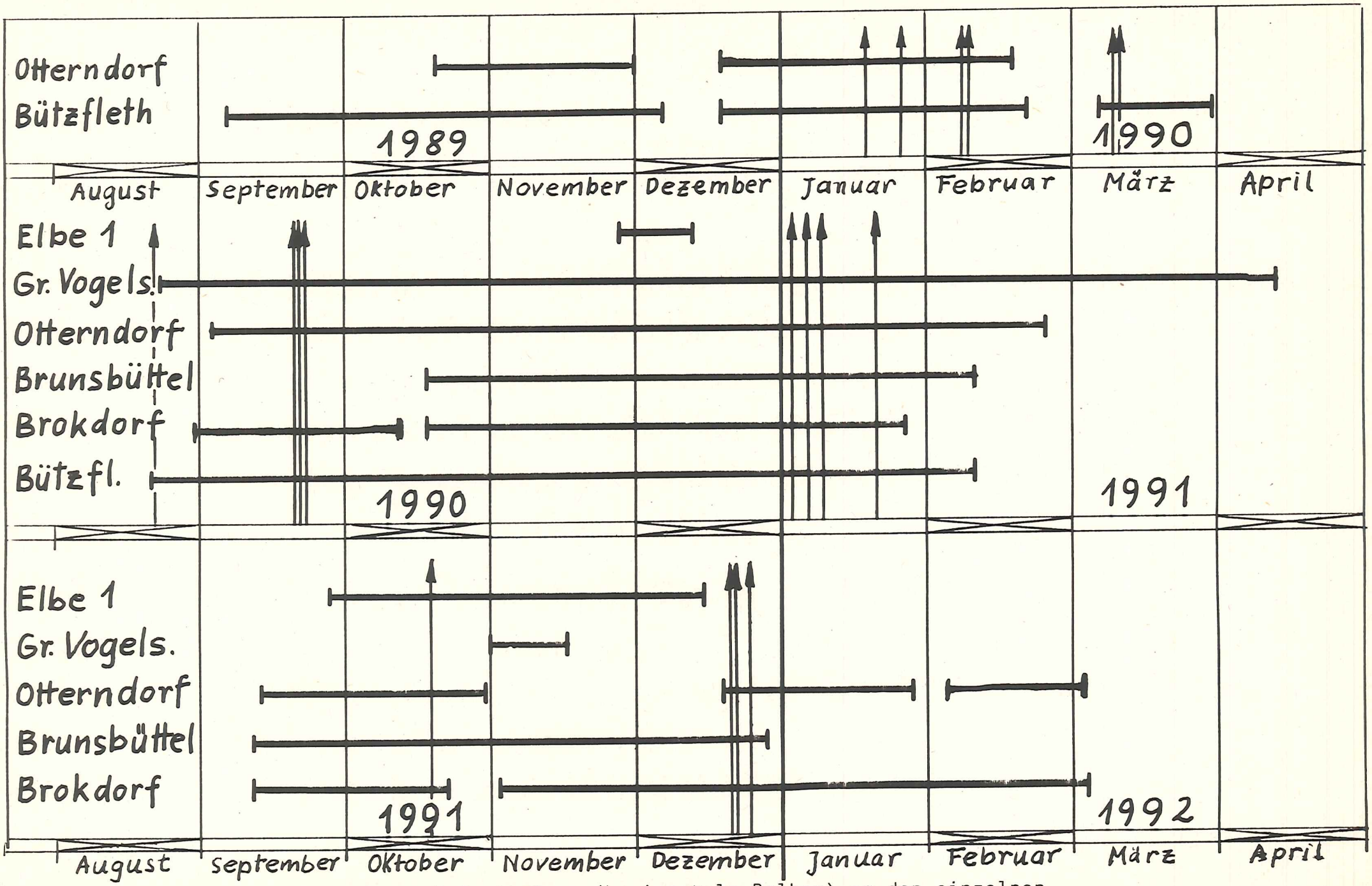


Abb. 2: Meßzeiträume (horizontale Balken) an den einzelnen Meßstationen in der Elbe. Sturmflutereignisse dargestellt durch vertikale Pfeile.

Die Messungen des BSH wurden ergänzt durch weitere Seegangsmessungen bei Nienstedten und im Hamburger Hafen, die im Auftrag von Strom- und Hafenbau von Dr. Wünsche von der Ingenieurgesellschaft MBH, Hamburg, durchgeführt wurden. Der Bericht von Dr. Wünsche für Strom- und Hafenbau ist beigefügt (Anhang 1).

Außerdem werden im Rahmen eines Dauermeßprogramms vom BSH Seegangsmessungen des Richtungsspektrums südwestlich von Helgoland und an der Forschungsplattform "Nordsee" durchgeführt, so daß der in das Elbeästuar einlaufende Seegang im Berichtszeitraum ebenfalls erfaßt wurde.

1.3 Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn des Projekts

Über Seegangsuntersuchungen in Ästuaren ist wenig, in Flüssen gar nichts bekannt. Die umfangreichen und sorgfältigen Messungen von W. Seifert im Bereich der Elbmündung z.B. berücksichtigen noch nicht die spektrale Beschreibung des Seegangs und dessen Wechselwirkung mit den Strömungen.

In dem Teilprojekt "Ästuarseegang" wurden erstmals Seegangsmeßgeräte benutzt, die "on-line" Seegangsspektren messen. Die zugehörigen Zeitserien werden nicht mehr aufgezeichnet, und die zu bearbeitende Datenmenge wird so erheblich reduziert.
Die verwendeten Meßdrähte mit "on-line" Datenverarbeitung und autarker, batteriegepufferter Stromversorgung mit Hilfe von Solarzellen wurden extra vom BSH für die Süß- und Brackwasserverhältnisse in der Elbe entwickelt und zu einer gewissen Anwendungsreife gebracht (s. Anhang 2).

Das BSH ist seit über 20 Jahren auf Seegangsuntersuchungen spezialisiert, so daß man davon ausgehen kann, daß der größere Teil der relevanten Fachliteratur berücksichtigt wurde. Für das Gebiet der Wechselwirkung zwischen Seegang und Strömung wurde die

....

ASFA-Datenbank (Aquatic Sciences and Fisheries Abstracts) der Bibliothek des BSH herangezogen. Sie verzeichnet Veröffentlichungen ab 1982. Für den vorangehenden Zeitraum wurde die "Annotated Bibliography on Wave-Current Interaction" by D.H. Peregrine, I.G. Jonsson, and C.J. Galvin, Misc. Rep. No. 83-7, U.S. Army, Corps of Engineers, 1983, herangezogen.

1.4 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Wie bereits erwähnt, wären die Messungen ohne die großzügige Hilfe anderer Stellen nicht möglich gewesen. Hier sind zu nennen: Strom- und Hafenbau, Hamburg; Wasser- und Schiffahrtsamt Cuxhaven; Wasserwirtschaftsamt, Stade; Kernkraftwerk, Brockdorf; ME, Meerestechnik-Elektronik GMBH, Trappenkamp und IMS, Ingenieurgesellschaft MBH, Hamburg.

2. Ergebnisse

2.1 Verwendete Meßgeräte

2.1.1 Meßdraht

An den Stationen Otterndorf, Brunsbüttel, Brockdorf, Nienstedten, Fischereihafen und Harburg (Elbbrücke) wurden vom BSH entwickelte und gebaute Wellenmeßdrähte benutzt. Im Anhang 2 sind das Meßprinzip, die Konstruktion des Wellenmeßdrahtes und das Gesamtschaltbild der autarken Meßanlage beschrieben (Ausschnitt aus dem Betriebshandbuch S. 1-4, Anhang 2).

....

2.1.2 Datenerfassung und Speicherung

Die analogen Meßspannungen des Meßdrahtes - sie entsprechen der momentanen Auslenkung des Wasserspiegels - werden digitalisiert und im Rechner der Anlage (EPSON HX-20) on-line und zwar ständig zu Seegangsspektren verrechnet (s. Anhang 2, S. 6-7). Die Spektren werden nach den im Programmablauf vorgegebenen Kriterien ausgewählt und auf dem rechnerinternen RAM-Speicher abgelegt. Außerdem werden aus den Spektren berechnete signifikante Wellenparameter: signifikante Wellenhöhe, Peakfrequenz = Frequenz des Maximums der Wellenenergiedichte , mittlerer Wasserstand (bezogen auf den eingestellten Nullpunkt), die Differenz zwischen höchstem Wellenberg und niedrigstem Wellental, sowie Betriebsspannungen abgespeichert.

Die Kapazität des RAM-Speichers beträgt 970 Spektren, so daß die Anlage etwa 2 1/2 Monate unbeaufsichtigt betrieben werden kann. Tatsächlich wurden die Stationen alle 6 - 8 Wochen überprüft und die gespeicherten Daten entweder durch Austausch des Rechners oder Überspielen des Speichers auf eine batteriebetriebene tragbare Diskette ausgelesen. Die Daten können dann auf einem PC weiterverarbeitet werden.

2.1.3 Kelkrohr

An zwei der Meßstationen (Großer Vogelsand und Bützfleth) wurden zwei beim BSH seit langem vorhandene Wellenmeßgeräte der Fa. Kelk, Kanada, verwendet. Die Beschreibung des Gerätes, das Meßprinzip und die Spezifikationen sind ebenfalls dem Anhang 2 beigefügt. Das gleiche gilt für den zugehörigen Period-to-Voltage Converter. Die Rohre wurden durch das Einfräsen weiterer Schlitze modifiziert. Die Grenzfrequenz der Tiefpaßwirkung der Schlitze (sehr kurze Wellen werden nicht registriert) wurde damit zu höheren Frequenzen verschoben.
Die Datenverarbeitung der analogen Signale aus dem Period-to-Voltage Converter erfolgte mit den gleichen Datenerfassungs- und Speichergeräten wie bei den Meßdrähten. Für die Stromversorgung wurden ebenfalls Solarzellen mit Pufferbatterien verwendet.

....

2.1.4 Wellenmeßbojen

An der Position Elbe 1 werden für das Dauermeßprogramm des BSH die bekannte Waveriderboje, bei Helgoland und der Forschungsplattform Nordsee (FPN) die Richtungsmeßbojen der Fa. Datawell eingesetzt. Alle Bojen übertragen ihre Daten per Telemetrie zu den Landstationen Cuxhaven, Helgoland bzw. zur FPN. Es werden Seegangsspektren mit Hilfe eines Rechners on-line berechnet und auf Floppy-Disks aufgezeichnet.

Bei der Station Elbe 1 mußte wegen der begrenzten Reichweite der Telemetrie eine Relaisstation auf dem Leuchtturm "Großer Vogelsand" eingerichtet werden. Leider fällt die Boje bei Elbe 1 häufig aus und muß neu verankert werden, weil sie wegen des starken Schiffsverkehrs häufig von übereifrigen "Findern" aufgenommen wird.

2.2 Meßergebnisse

2.2.1 Die höchsten gemessenen Wellenhöhen

Es wird an dieser Stelle über vorläufige Meßergebnisse der vom BSH betriebenen Meßstationen berichtet.
Die Veröffentlichung der Bojendauermessungen erfolgt regelmäßig in "Meereskundliche Beobachtungen und Ergebnisse des BSH" unter dem Titel "Seegangsmessungen in der Deutschen Bucht im Jahre ...".
Die Spektren werden beim BSH archiviert.
(Die Meßergebnisse bei Nienstedten und im Hamburger Hafen werden im Anhang 1 beschrieben.)

In Tabelle 2 sind die höchsten im Berichtszeitraum gemessenen Wellenhöhen aufgeführt. Dabei ist zu beachten, daß häufig nicht alle Stationen gleichzeitig gemessen haben (s. Tab. 1). Außerdem muß wegen der unterschiedlichen Wind- und Fetchbedingungen bei einer bestimmten Sturmlage nicht an allen Stationen die größtmögliche Wellenhöhe auftreten.

Die genaue Lage der Meßstationen kann man den im Anhang 3 beigefügten Kartenausschnitten entnehmen. Die extremen Wellenhöhen wurden gemessen, als die Sturmfluten ihren höchsten Wasserstand erreichten. Man muß daher die aus den Karten entnommenen Wassertiefen in Tab. 1 um etwa 4 - 5 m für den Zeitpunkt der Extremwertmessung erhöhen.

Die signifikante Wellenhöhe H_S wurde aus den Seegangsspektren gemäß $H_S = 4 \cdot \sqrt{\int E(f)df}$ berechnet, wobei E(f) das Energiedichtespektrum ist. Die Peakfrequenz f_p ist die Frequenz, die zum Maximum der Energiedichte gehört. Die Peakperiode ist $T_p = 1/f_p$.

Die "maximale" Wellenhöhe H'_{max} ist, wie im Anhang 2 beschrieben, die Differenz zwischen dem höchsten und dem niedrigsten Momentanwert des Wasserstandes innerhalb von 124 Sekunden. Diese beiden Werte müssen nicht notwendigerweise unmittelbar aufeinanderfolgen. Innerhalb der 124 s kann sich der mittlere Wasserstand um wenige Zentimeter ändern. Lagen keine Meßwerte vor, wurde H'_{max} gemäß der Statistik zu $H'_{max} \approx 1{,}9\ H_S$ geschätzt.

Da im Berichtszeitraum keine extremen Sturmfluten auftraten, stellen die gemessenen Werte nicht Extremwerte etwa im Sinne einer 50-Jahreswelle dar. Diese ließe sich aber mit einem Elbemodell, das mit dem vorhandenen Datensatz verifiziert werden könnte, berechnen.

Glücklicherweise werden die aus der Deutschen Bucht in das Elbeästuar einlaufenden Wellen infolge der abnehmenden Wassertiefe und Wechselwirkung mit dem Boden stark gedämpft: Von der Forschungsplattform "Nordsee" bis zum Leuchtturm "Großer Vogelsand" um etwa 70%. Sie dringen nicht weit in den Mündungstrichter ein. Dort baut sich entsprechend dem Fetch ein neuer Windseegang auf: Bei Brockdorf treten höhere Wellen als bei Otterndorf und Brunsbüttel auf. Im weiteren Verlauf der Elbe sind die Wellen stark von der Windrichtung und dem Verlauf und der Topographie der Elbe abhängig. Die Station Bützfleth ist zum Beispiel sehr geschützt gegenüber den vorwiegend aus Süd bis Nordwest kommenden Sturmwinden und weist bei weitem die geringsten gemessenen Wellenhöhen auf.

...

2.2.2 Die höchsten gemessenen Seegangsspektren

Die Abb. 3 bis 8 zeigen die zu den in Tab. 2 aufgeführten Messungen gehörenden Seegangsspektren.
Sie geben, deutlicher noch als die in Tab. 2 eingetragenen Peakfrequenzen fp, Auskunft darüber, in welchem Frequenz- bzw. Periodenbereich der jeweilige Seegang liegt. Mit Kenntnis der Wassertiefe kann man auch den zugehörigen Wellenlängenbereich berechnen.
Man sieht sofort, daß wir es in der "freien" Nordsee mit viel längerperiodischen (tieffrequenten) Wellen als im Elbeästuar und in der Elbe zu tun haben.

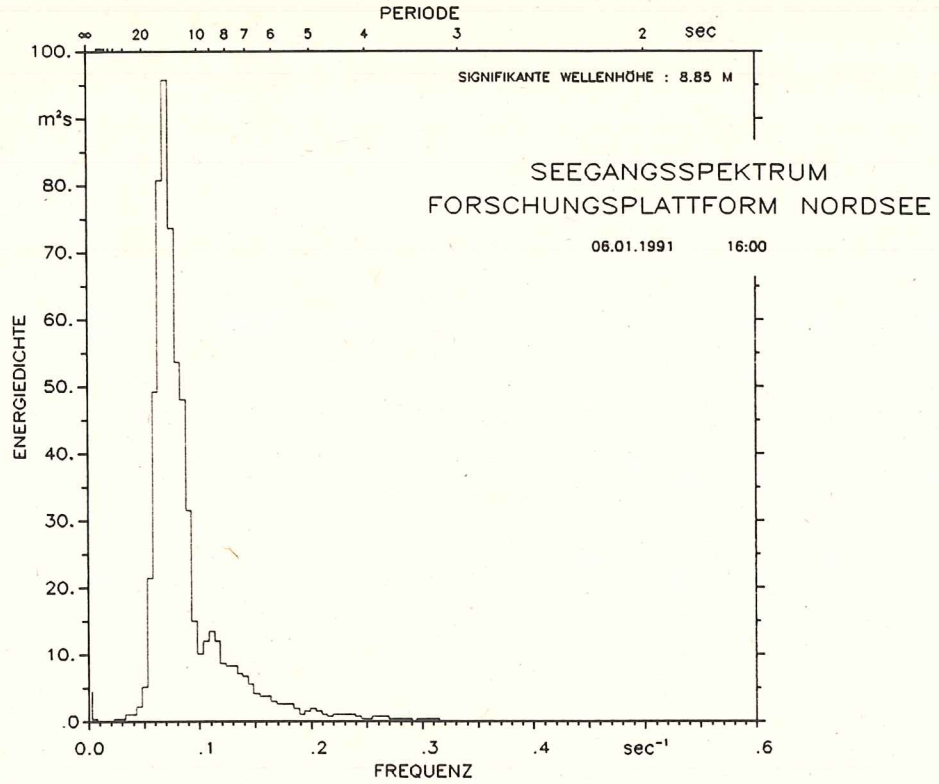
2.2.3 Eindringtiefe der Nordseewellen in das Elbeästuar

Bei genauer Betrachtung der Spektren kann man die bisher ungeklärte Frage, wie weit der in der Nordsee entstandene Seegang in das Elbeästuar eindringt, zumindest annähernd beantworten.

An der Station "Großer Vogelsand" (Abb. 3 und 4) ist praktisch die gesamte Energie links vom Peak (Maximum der Energiedichte) des sehr langwelligen Seegangs in der "freien" Nordsee (repräsentiert durch das Spektrum bei der FPN) bereits weggedämpft. Von dem Teil rechts vom Peak ist nur noch ein Teil vorhanden. (Beachte den Ordinatenmaßstab: Er ist im unteren Bild um den Faktor 25 gegenüber dem oberen größer.)

Bei den Stationen Otterndorf und Brokdorf, die durch die vorgelagerten Untiefen Medemgrund und Medemsand offensichtlich auch bei hohem Wasserstand gut abgeschirmt werden, ist von dem "Nordsee-Seegang" nichts mehr vorhanden. Der dort gemessene Seegang ist im Ästuar neu entstanden. Man kann aus den vorhandenen Messungen schließen, daß längere Wellen aus der Nordsee bei günstigen Windrichtungen etwa bis Cuxhaven entlang der Fahrrinne laufen können.

...



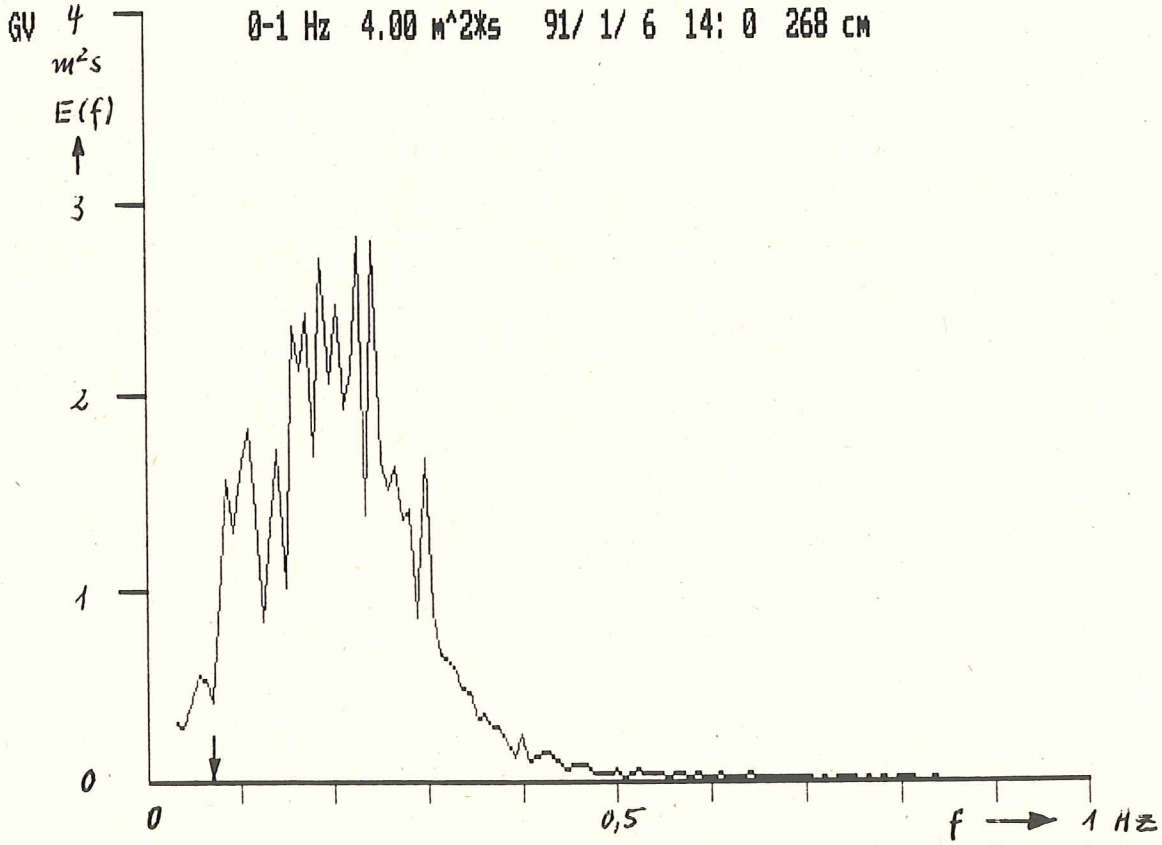
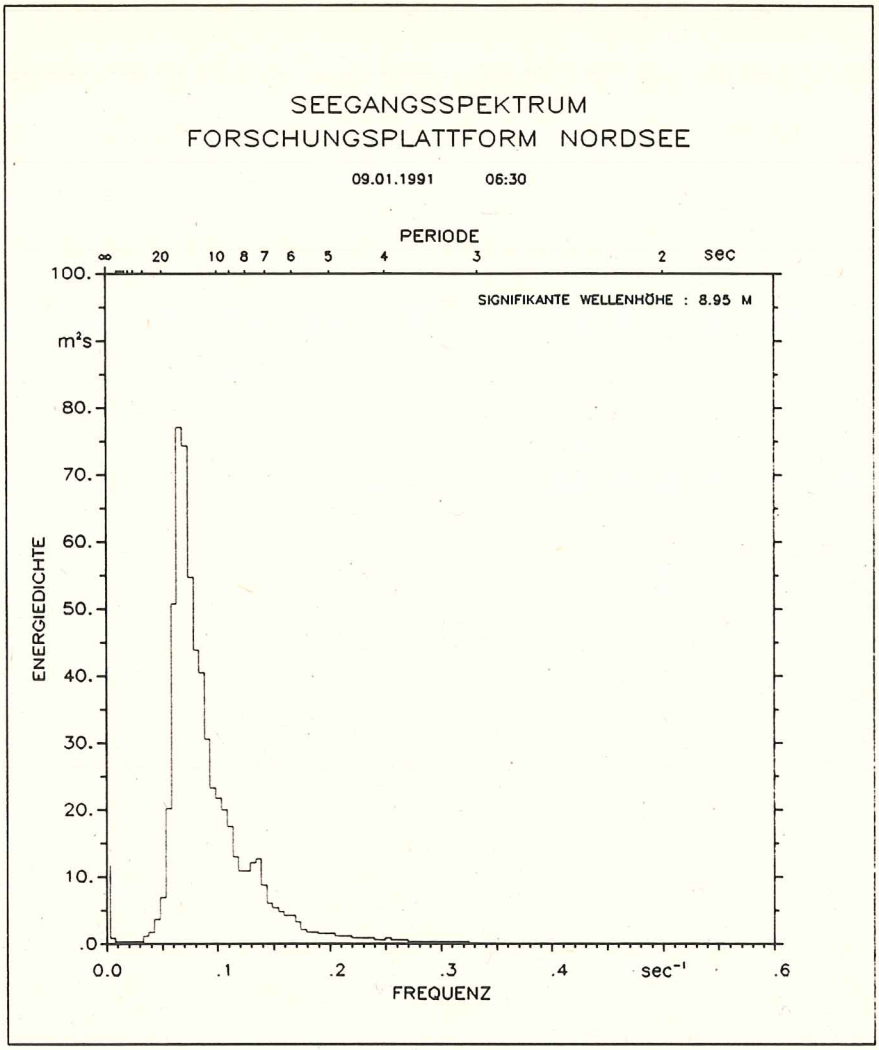


Abb. 3: Seegangsspektren gemessen etwa zur gleichen Zeit bei der Forschungsplattform "Nordsee" (oben) und am Leuchtturm "Großer Vogelsand" (unten).
Die Beschriftung im unteren Bild bedeutet wie auch in den nachfolgenden gleichartigen Darstellungen:
Meßstation: GV; Abszisse: 0 - 1 Hz (Frequenz);
Ordinate: 4.00 m²s (Energiedichte);
Datum: 91/1/6 (Jahr/Monat/Tag); Uhrzeit 14:0 (Stunde, Minute) und signifikante Wellenhöhe: 286 cm).
Der Pfeil markiert die Lage der zum Maximum der Energiedichte gehörigen Frequenz (Peakfrequenz) im oberen Bild.

Meßstation	Anzahl Messungen	Wasser-tiefen (m)	Datum	Uhrzeit UTC	H_S m	H'max	fp Hz	$T_P = 1/fp$ s
FPN	-	30	09.01.91	06:30	8,95	17 *	0,070	14
			06.01.91	16:00	8,85	17 *	0,070	14
Helgoland	-	20	20.12.91	09:00	4,77	9 *	0,100	10
			23.12.91	15:00	4,58	8,7 *	0,110	9
Gr. Vogelsand	2403	7	09.01.91	06:00	2,67	4,92	0,109	9
			06.01.91	14:00	2,68	4,89	0,227	4,4
Otterndorf	1259	5	26.01.90	02:00	0,86	2,24	0,203	4,9
			26.01.90	04:00	0,82	1,41	0,250	4,0
Brunsbüttel	1585	5	20.12.91	06:00	0,81	1,71	0,203	4,9
			20.12.91	03:00	0,66	1,22	0,266	3,8
Brockdorf	1138	5	23.12.91	14:00	0,93	2,13	0,367	2,7
			06.01.91	14:00	0,90	1,61	0,336	3,0
Bützfleth	2844	2	02.10.89	16:00	0,34	0,64 *	0,430	2,3
			09.03.90	14:00	0,30	0,54	0,453	2,2
	Σ 9229							

*1.9·H_S

Tabelle 2: Höchste gemessene Wellenhöhen
(weitere Erklärung s. Text)



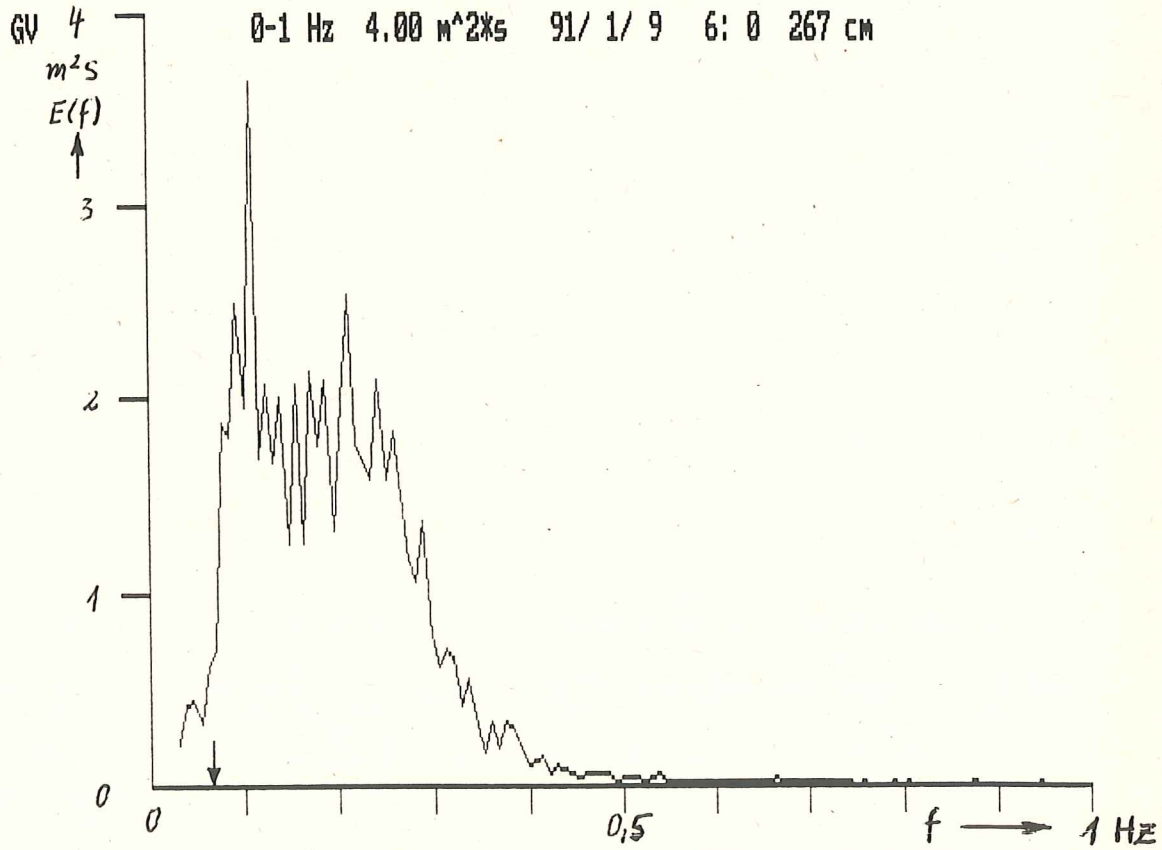
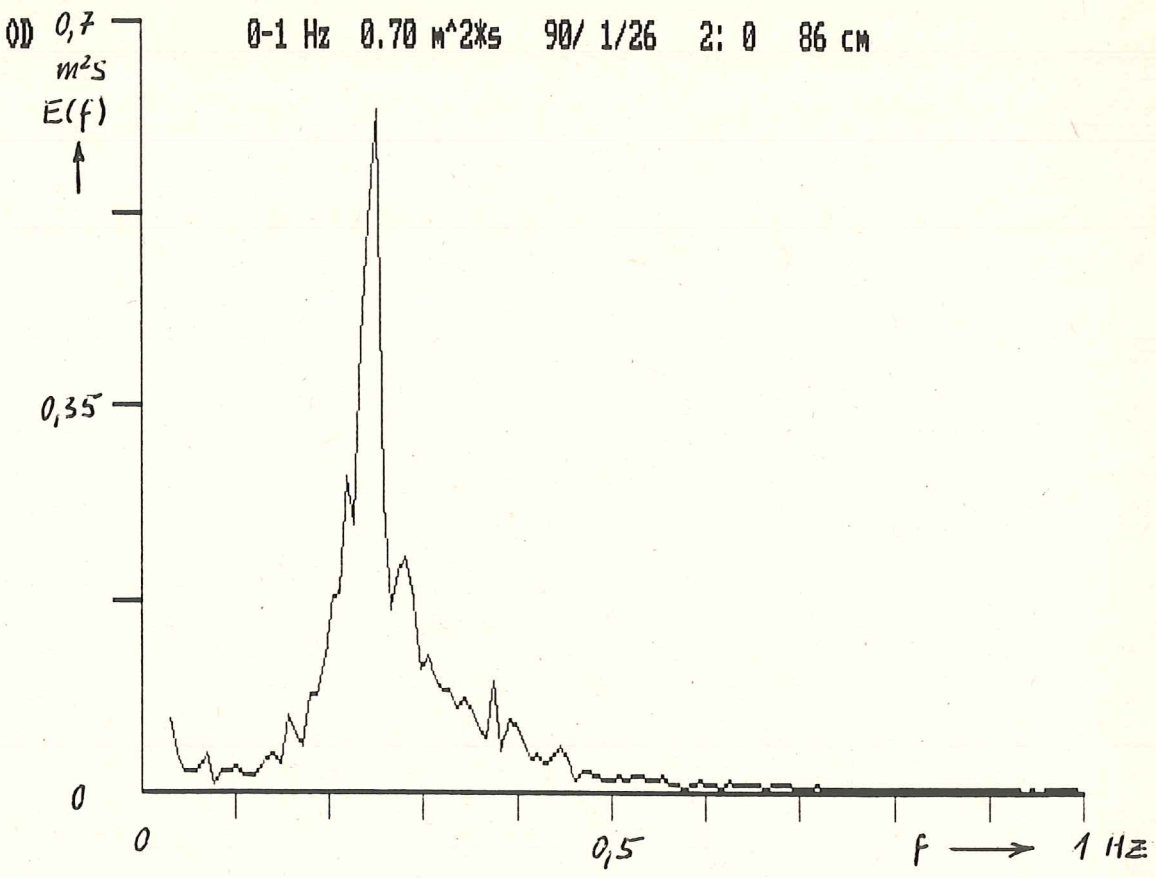


Abb. 4: Seegangsspektren gemessen an FPN und bei "Gr. Vogelsand" (weitere Erklärung wie bei Abb. 3).



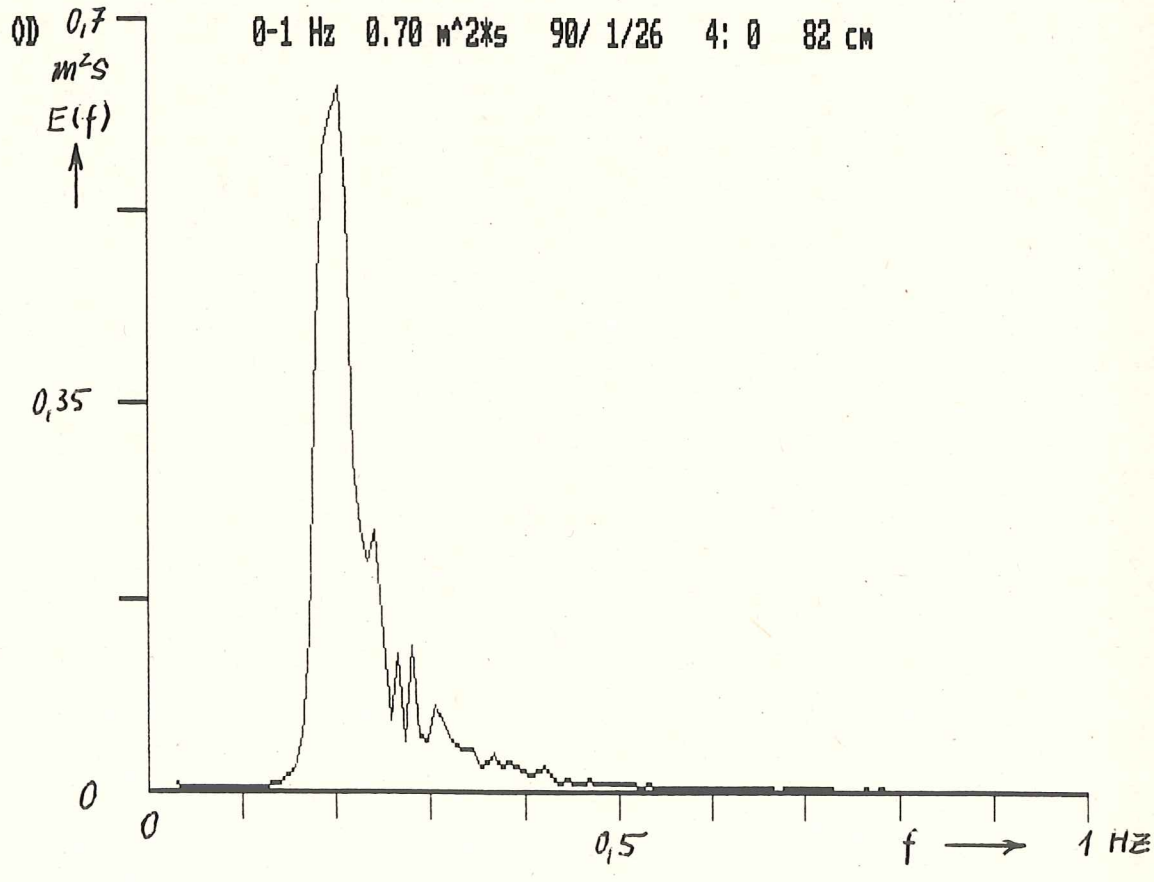
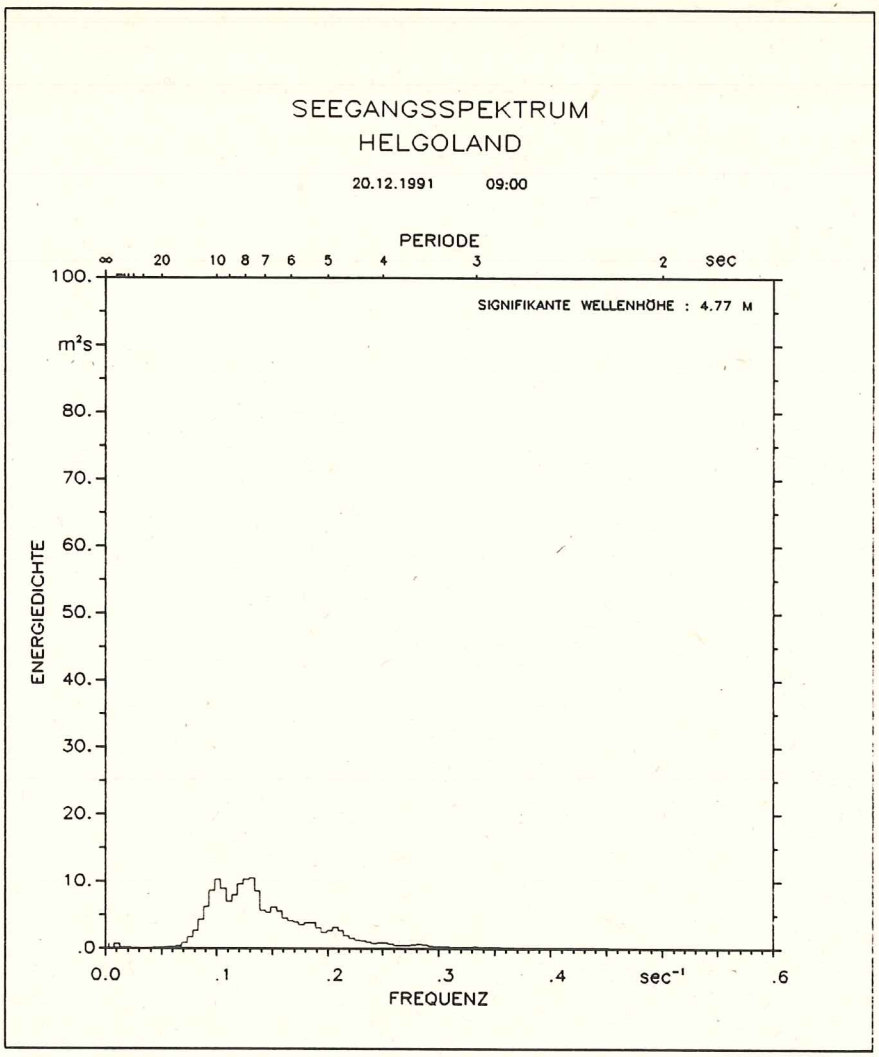


Abb. 5: Seegangsspektren bei Station "Otterndorf" (weitere Erkärung wie bei Abb. 3).



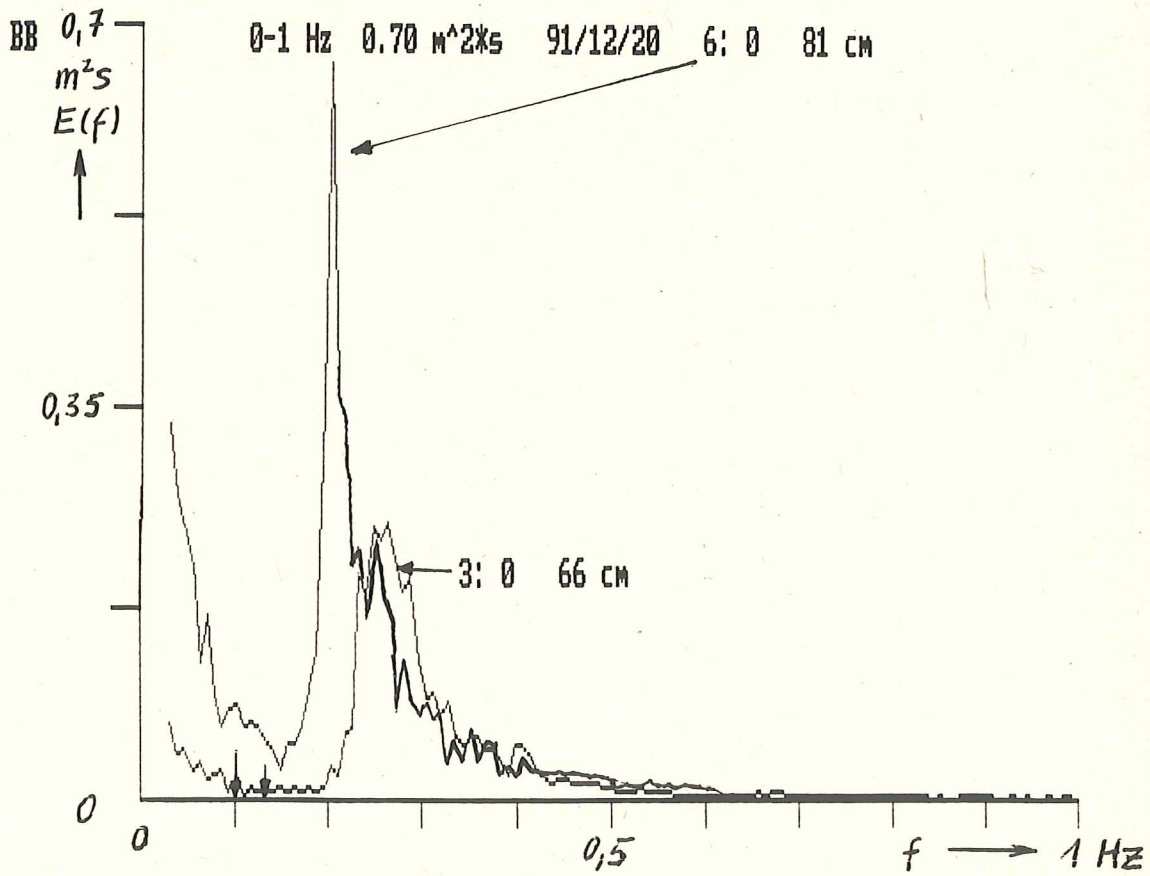
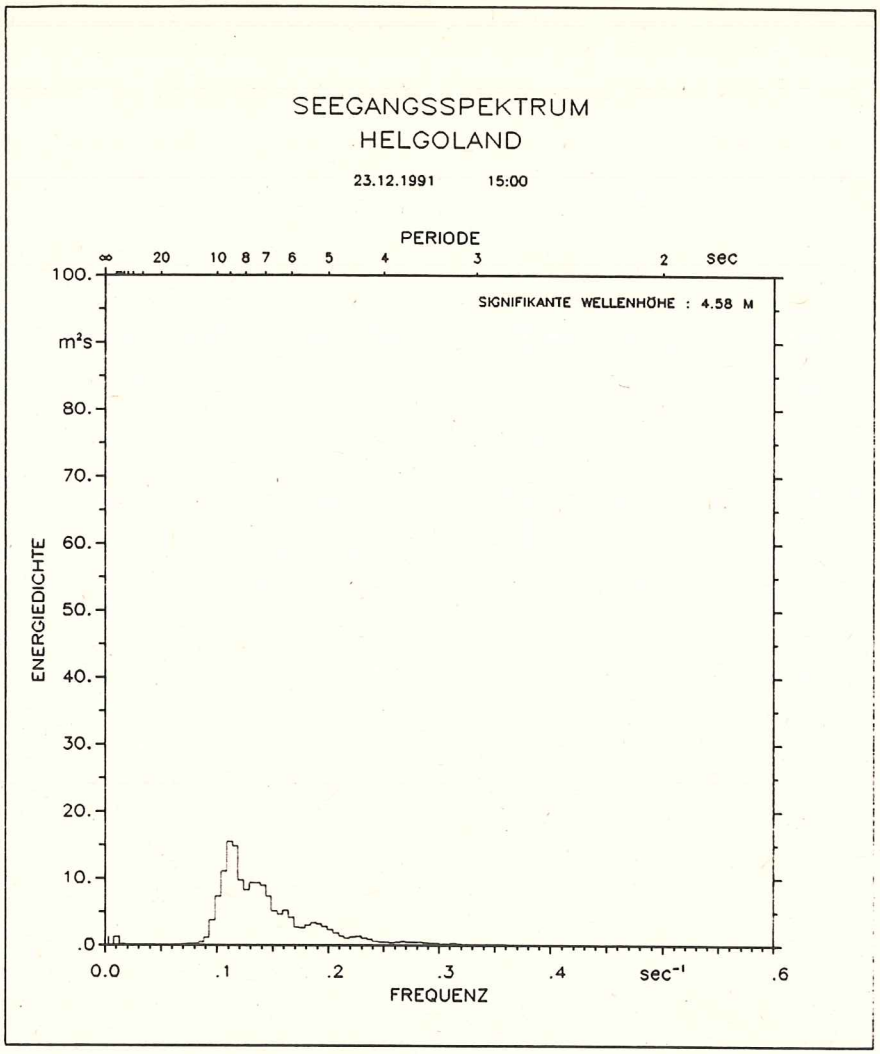


Abb. 6: Seegangsspektren gemessen bei "Helgoland" und bei "Brunsbüttel" (weitere Erklärung wie bei Abb. 3, unterer Teil enthält 2 Spektren)



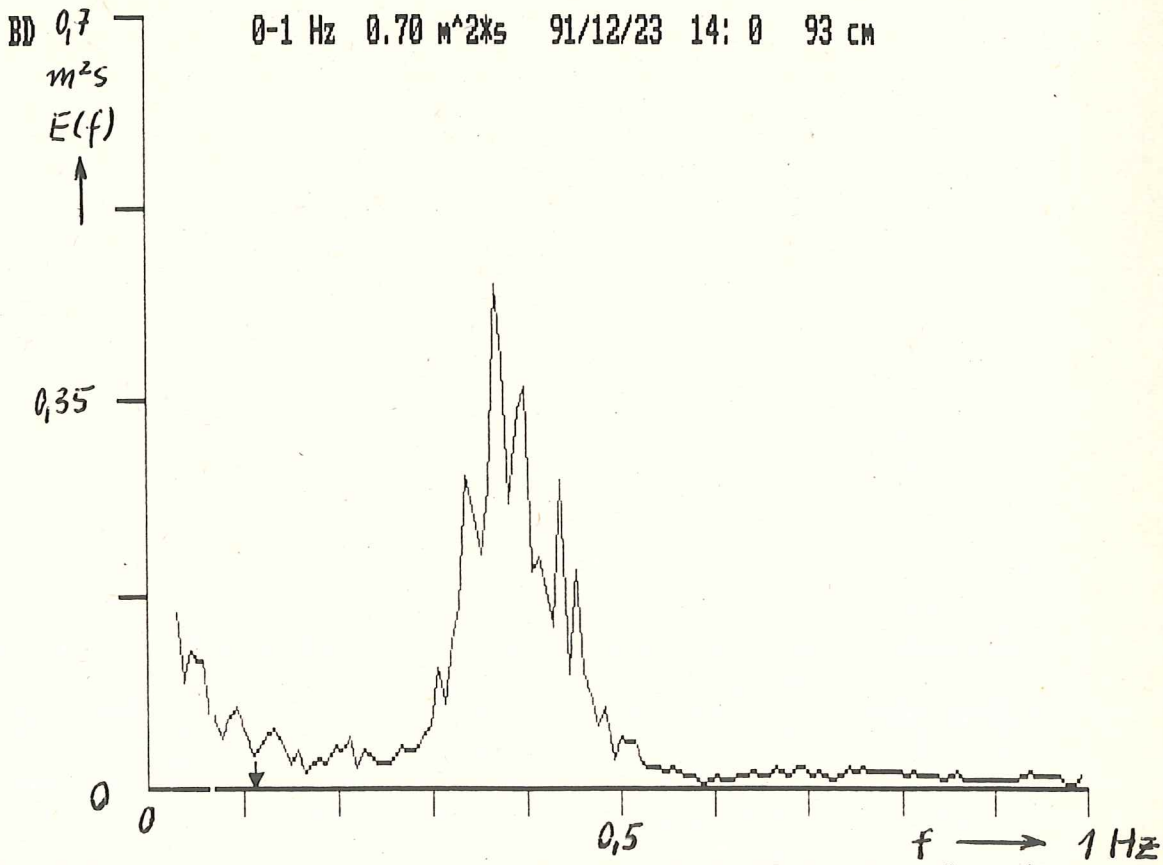
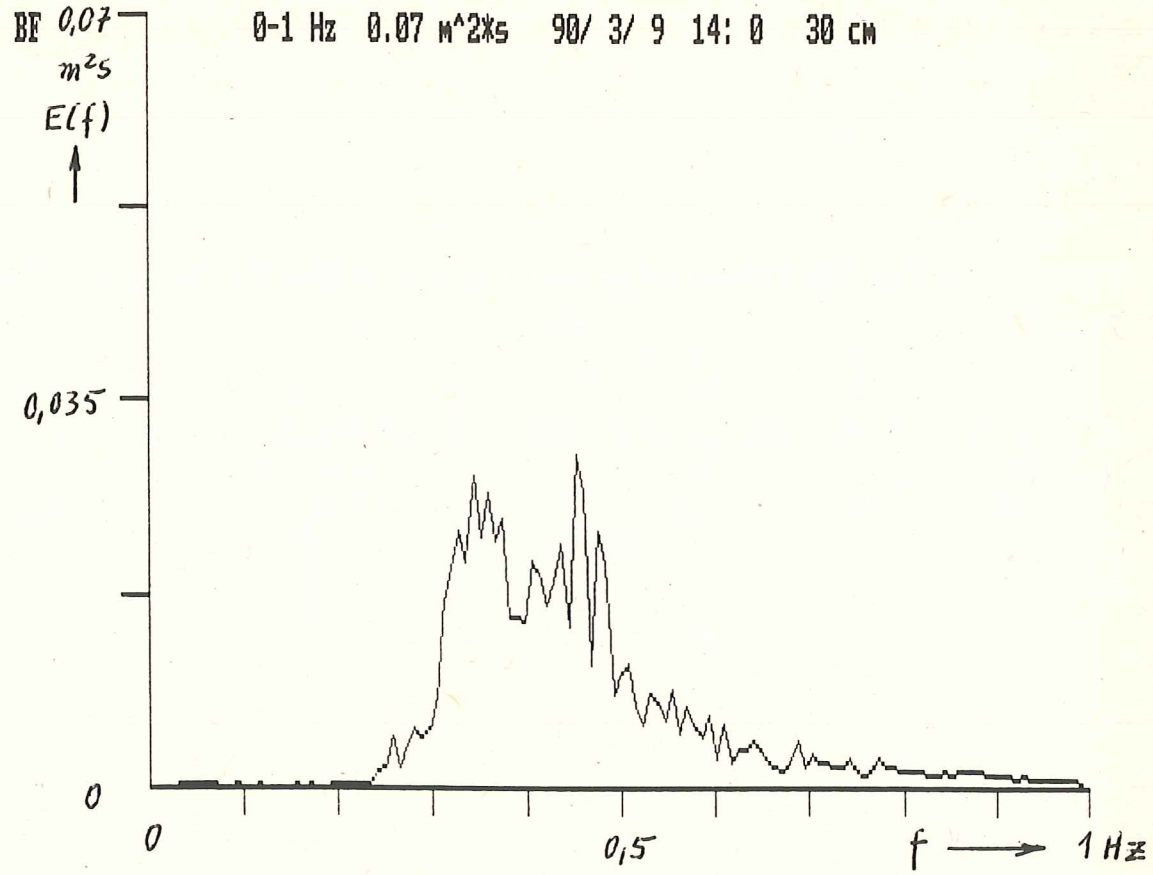


Abb. 7: Seegangsspektren gemessen bei "Helgoland" und "Brockdorf"
(weitere Erklärung wie bei Abb. 3)



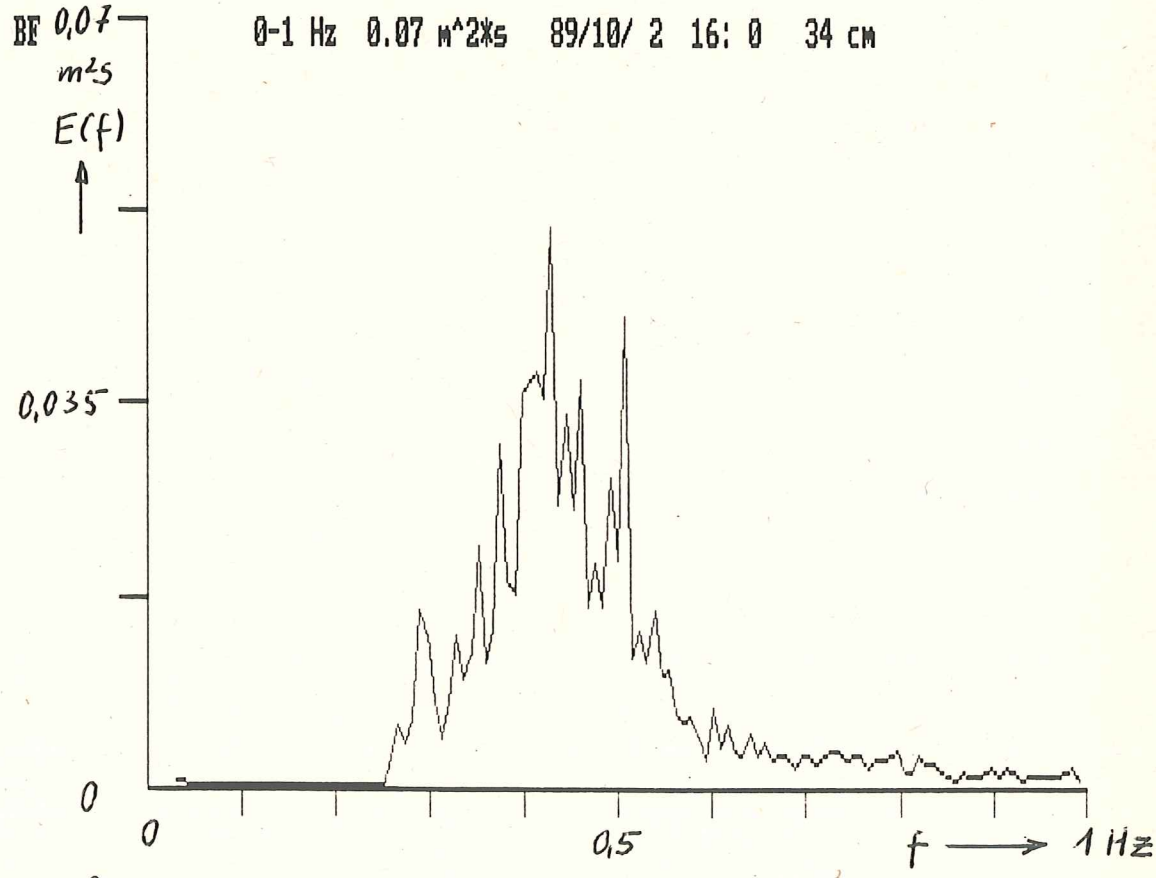


Abb. 8 : Seegangsspektren gemessen bei "Bützfleth"
(weitere Erklärung wie bei Abb. 3)

Da die Höhe der längeren Wellen beim "Großen Vogelsand" bereits nur 10 - 20 % der Höhe bei der FPN beträgt (die Energiedichte ist proportional dem Quadrat der Amplitude der Wellen in dem betreffenden Frequenzintervall), kann man davon ausgehen, daß etwa auf der Höhe von Cuxhaven nur noch 1 - 2 % der ursprünglichen Wellenhöhe erreicht wird.

Zur Bestätigung dieser Aussage wird das BSH möglichst noch im Winter 1992/93 einen der Meßpfähle unmittelbar vor dem Hafen von Cuxhaven mit einem Wellenmeßgerät bestücken und Messungen durchführen.

Die weiter landeinwärts gelegenen Meßstationen zeigen im Ästuar und dem weiteren Elbeverlauf entstandenen lokalen Windseegang. Allerdings ist dieser sehr variabel bezüglich Wellenhöhe und Peakfrequenz. Während an der Station "Großer Vogelsand" die Wellenhöhe hauptsächlich vom augenblicklichen Wasserstand abzuhängen scheint (Abb. 9), ist bei den anderen Elbestationen diese Abhängigkeit nicht erkennbar (Abb. 10: Station Brokdorf).

2.2.4 Wasserstands- und Strömungsmessungen

Für Brokdorf liegen Messungen des Wasserstandes und Strömungsmessungen der Fa. ME-Elektronik vor, die freundlicherweise zur Verfügung gestellt wurden. Sie zeigen u.a. deutlich die Phasenverschiebung zwischen den Strömungen und dem Wasserstand. Die Übereinstimmung zwischen den Wasserstandswerten der Fa. ME-Elektronik und den aus Wellenmessungen ausgemittelten Werten ist bei normalen Bedingungen besser als bei den hier gezeigten Sturmflutlagen. Welche der beiden Messungen genauere Werte liefert, läßt sich aus dem Vergleich beider Messungen nicht ermitteln.

Da sich die Wellenmeßgeräte erst ab einem gewissen Mindestwasserstand einschalten, werden die Wasserstandsminima im allgemeinen nur bei Sturmflutlagen erfaßt. Betrachtet man die Eintrittszeiten der Wasserstandsmaxima an den einzelnen Stationen, erkennt man die bekannte Erscheinung, daß der Flutberg im Mittel mit 24 km/h die Elbe hinaufläuft. Diese Tatsache ist zu beachten, wenn man die Messungen verschiedener Stationen zu bestimmten Zeitpunkten vergleicht.

....

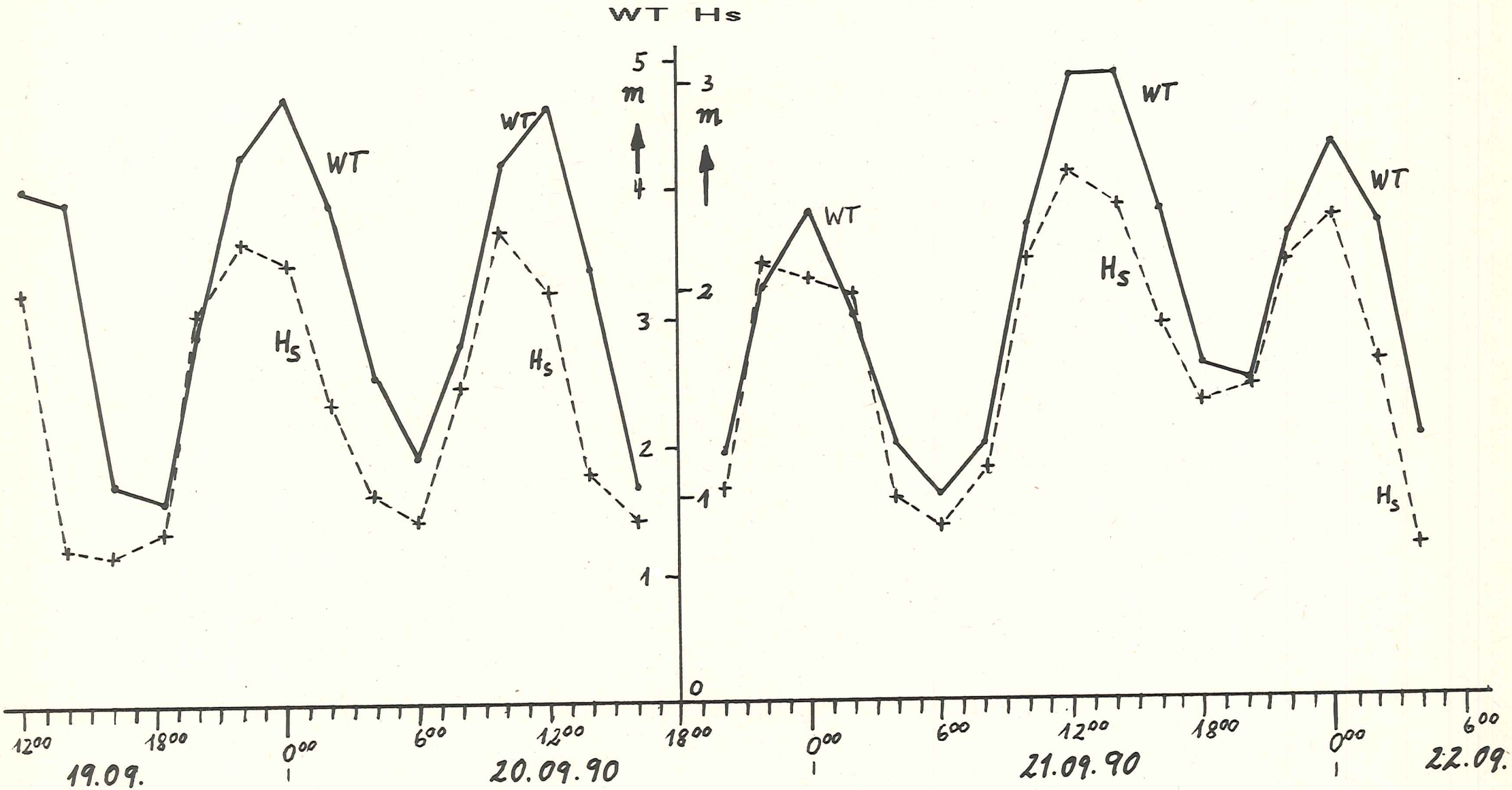


Abb. 9: Verlauf von Wasserstand WT (aus Wellenmessungen durch Mittelwertbildung, willkürliche Bezugshöhe) und signifikanter Wellenhöhe H_s an Station "Großer Vogelsand" (19.-22.09.1990).

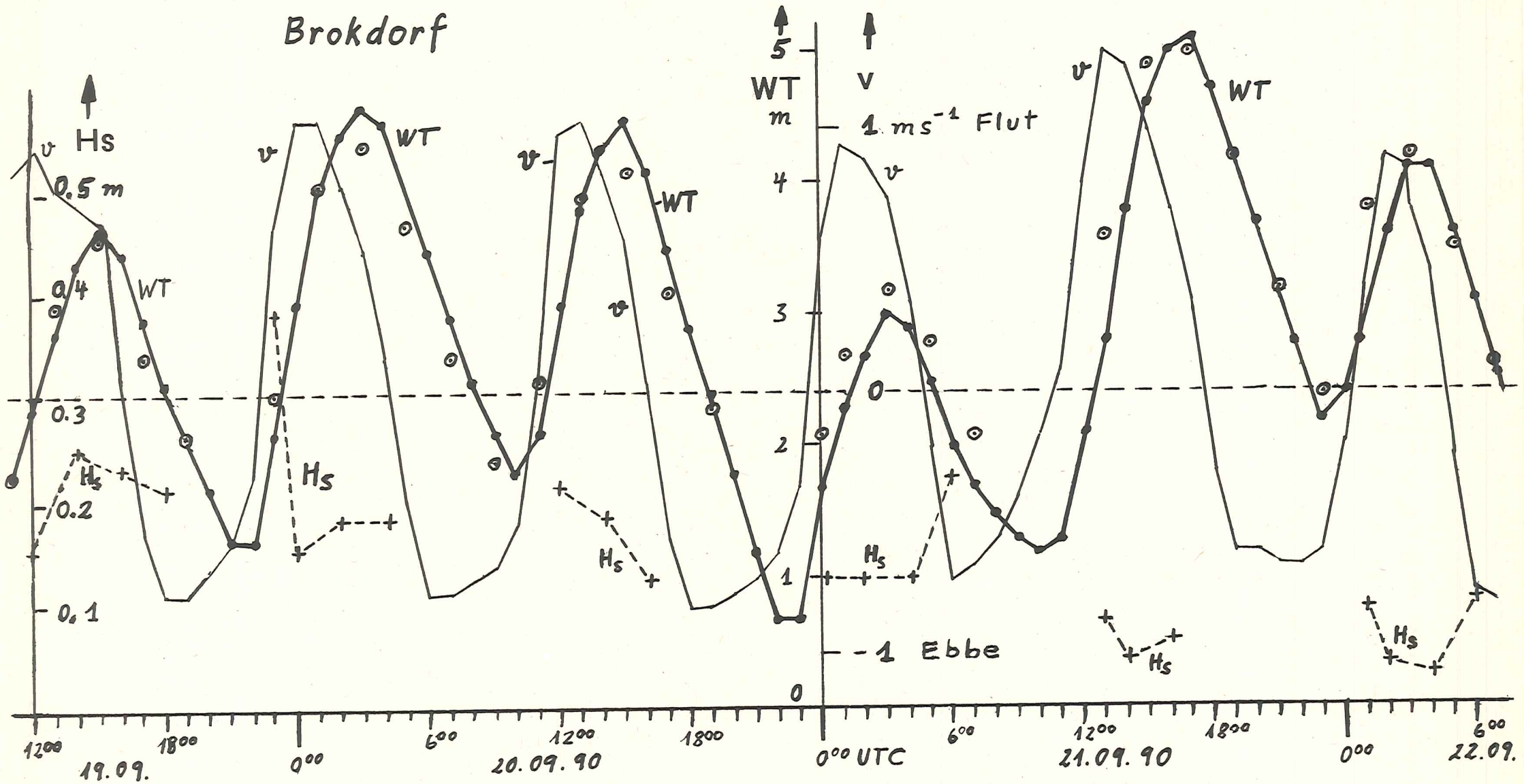


Abb. 10: Verlauf von Wasserstand WT (über 5,4 m) und Strömungsgeschwindigkeit v (Stundenmittel, von ME-Elektronik bzw. KKW-Brokdorf zur Verfügung gestellt).
Außerdem signifikante Wellenhöhe H_s und Wassertiefe durch Mittelwertbildung aus Wellenmessungen (Kreise) an Station "Brokdorf" (19.-22.09.90).

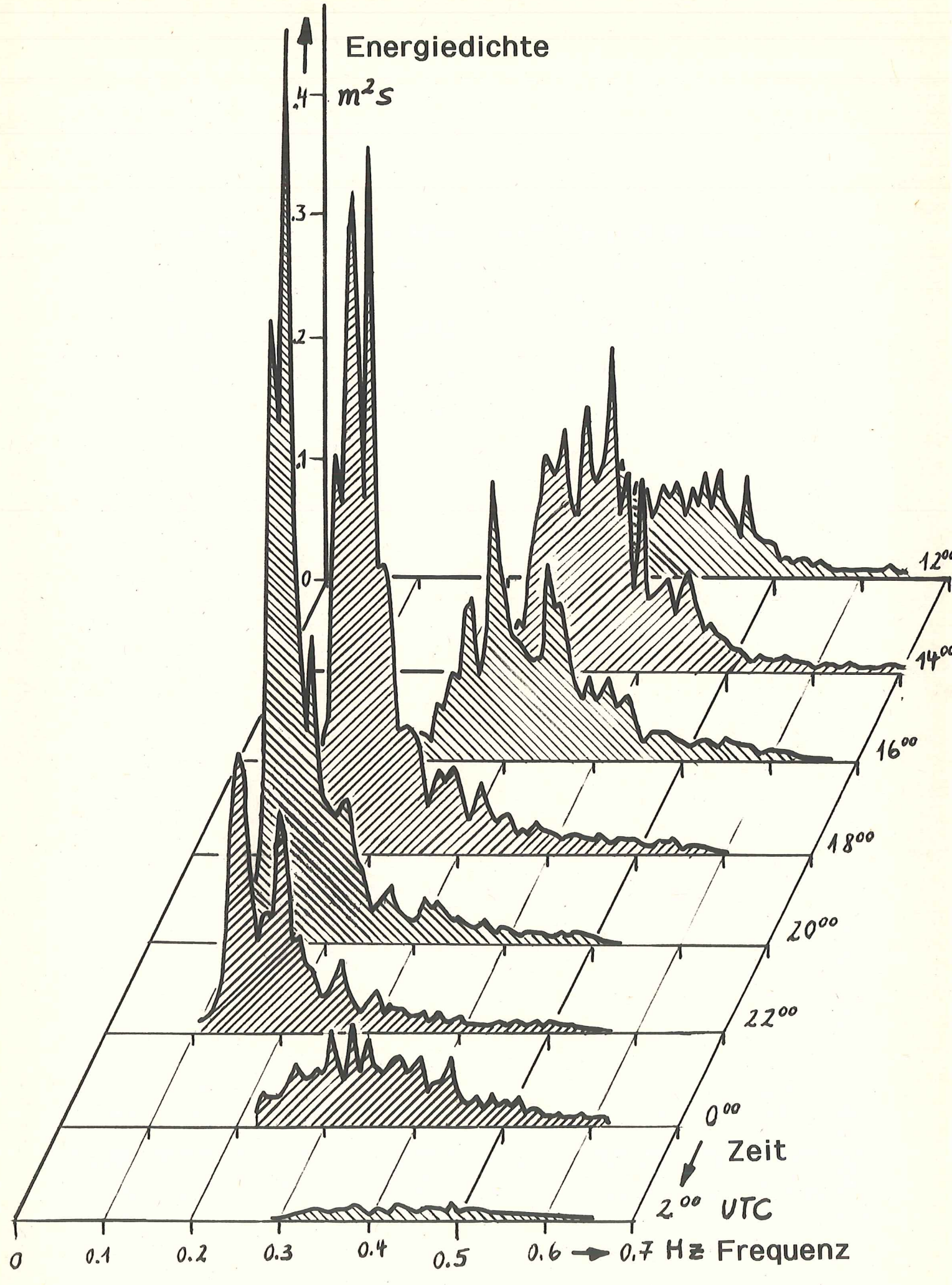


Abb. 11: Variabilität der Spektren an Station "Brokdorf". Siehe auch Tab. 3 und Abb. 12.

2.2.5 Seegangsmodell bzw. Interpretation der Messungen

Die Modellgruppe war mit der Entwicklung der gekoppelten Seegangs-Strömungsmodelle und des atmosphärischen Grenzschichtmodells für die vorgesehenen Küstentestgebiete voll ausgelastet. In dem relativ kurzen zur Verfügung stehenden Zeitraum konnte die Entwicklung eines Ästuar- oder gar Elbemodells nicht mehr in Angriff genommen werden.

Nachdem die erste Auswertung der Messungen ergeben hatte, daß der Seegang aus der Nordsee nicht sehr weit in die Elbe eindringt, lag es nahe, die Seegangsverhältnisse in der Elbe aus den bekannten Fetchverhältnissen mit Hilfe der einfachen JONSWAP-Formeln zu berechnen. Es sah zunächst so aus, als ließen sich die gemessenen Seegangsspektren zumindest grob verifizieren, wenn man zusätzlich die durch die Strömungen verursachte Dopplerverschiebung in der Frequenz berücksichtigen würde.

2.2.6 Zeitliche Variabilität der Seegangsspektren

Betrachtet man die Spektren in Abb. 11, so fällt zunächst auf, daß wir sowohl sehr schmale, hohe Spektren mit niedrigen Peakfrequenzen (18-22 Uhr) als auch höherfrequente, breite und niedrige Spektren haben. Die signifikante Wellenhöhe (proportional der Fläche unter dem Spektrum) ändert sich weniger stark, jedenfalls solange die Windstärke (s. Tab. 3 oder Abb. 2) annähernd konstant bleibt.
Auf der Suche nach einer Ursache für dieses extreme, auf offener See nicht beobachtbare Verhalten, kommt man zwangsläufig auf die gezeitenbedingten Strömungen, die auf dem Meer nicht in der Stärke und schnell alternierend anzufinden sind. Tatsächlich erkennt man in Abb. 12, daß die Strömung bzw. die Komponente der Strömung in Richtung des Windvektors (entgegengesetzt Windrichtung), die wir zunächst auch als Wellenlaufrichtung annehmen, bei den niederfrequenten, spitzen Spektren der Wellenlaufrichtung entgegengesetzt ist. Bei den übrigen Spektren laufen die Wellen mehr oder weniger in Strömungsrichtung. Da wir die Wellen, die auf der Strömung reiten, an einem festen Ort registrieren, müssen die Spektren die bekannte Doppler-Frequenzverschiebung aufweisen.

...

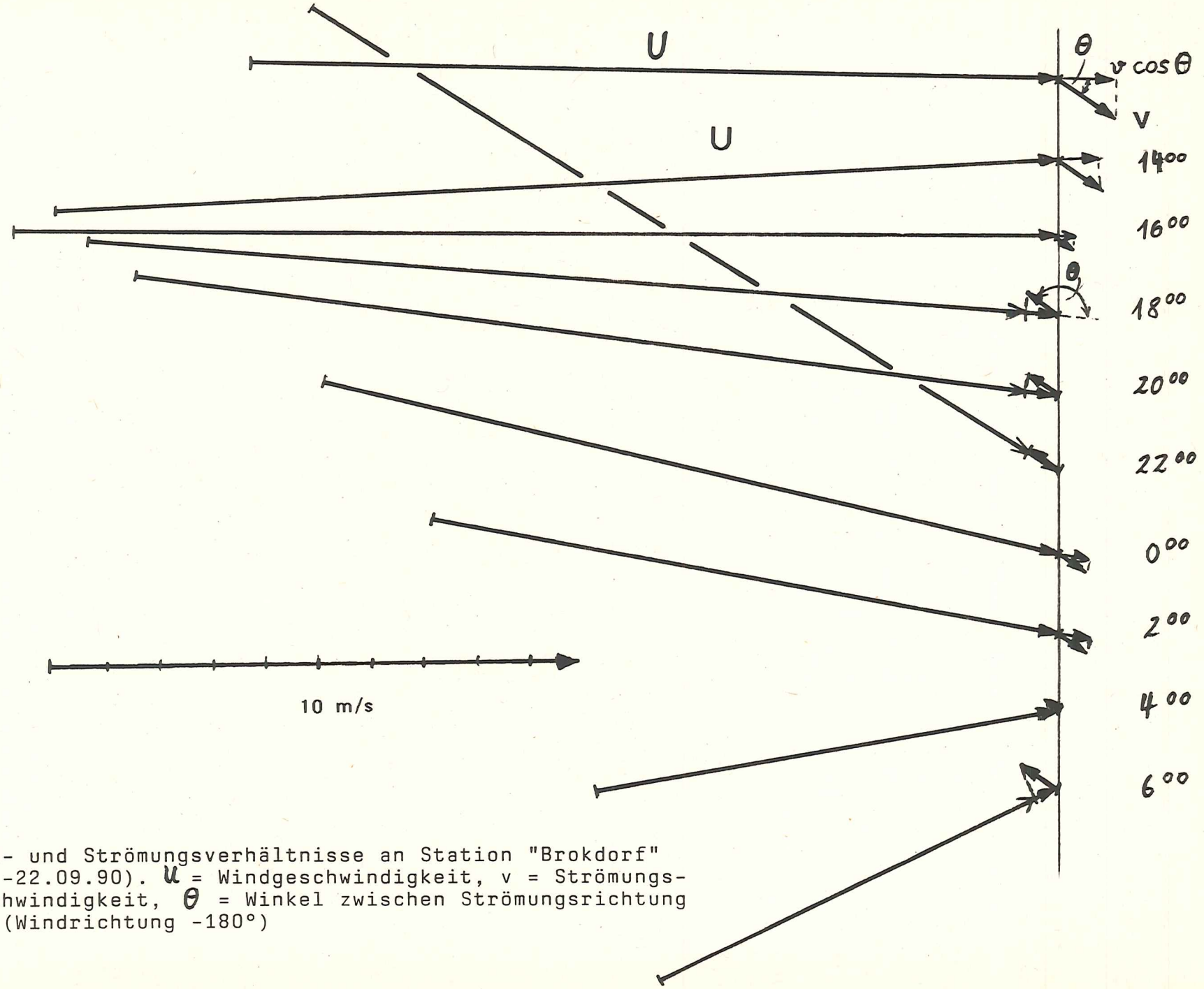
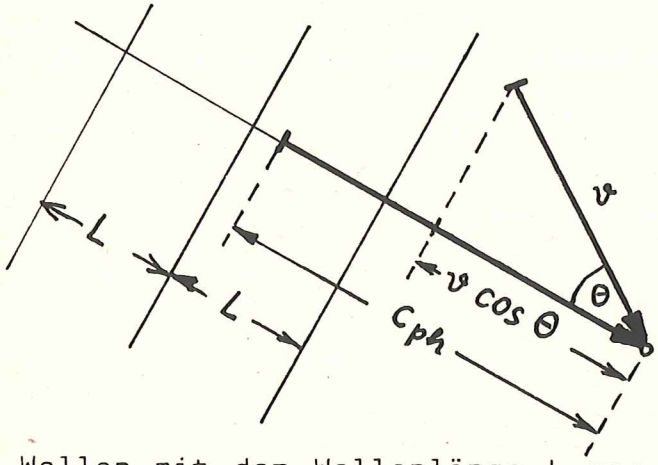


Abb. 12: Wind- und Strömungsverhältnisse an Station "Brokdorf" (21.-22.09.90). u = Windgeschwindigkeit, v = Strömungsgeschwindigkeit, θ = Winkel zwischen Strömungsrichtung und (Windrichtung -180°)

2.2.7 Doppler-Frequenzverschiebung: Wellen auf homogener Strömung

2.2.7.1 Tiefwasser



c_{ph} = Phasengeschwindigkeit der Wellen

v = Strömungsgeschw.

L = Wellenlänge der Wellen

Θ = DW = Winkel zwischen Strömungsrichtung und Wellenlaufrichtung

Wellen mit der Wellenlänge L passieren den Meßdraht mit der Geschwindigkeit $c_{ph} + v \cos \Theta$ einmal alle T_B Sekunden, wobei T_B die Begegnungsperiode bzw. $f_B = 1/T_B$ die Begegnungsfrequenz ist, d.h.

$$T_B = \frac{L}{c_{ph} + v \cdot \cos \Theta} = \frac{1}{f_B}, \text{ oder } \quad f_B = f + \frac{2\pi f^2}{g} v \cdot \cos \Theta$$

Diese Formel gilt für Tiefwasser ($c_{ph} = \sqrt{gL/2\pi}$, g = Erdbeschleunigung, $f = c_{ph}/L$).

Wir verwenden weiterhin den aus der Schiffstheorie stammenden Ausdruck Begegnungsfrequenz. Er meint die Frequenz, die von einem an einem fahrenden Schiff angebrachten Wellenmeßgerät gemessen wird, wenn es die Wellen unter einem beliebigen Winkel durchschneidet. In unserem Fall werden die Wellen - von der Strömung mitgeführt - durch das Wellenmeßgerät getragen.

Tatsächlich zeigen die Spektren in Abb. 11 qualitativ die theoretisch vorhergesagte Dopplerverschiebung: Laufen die Wellen in Strömungsrichtung ($\Theta < 90°$) erhöht sich die (gemessene) Begegnungsfrequenz. Bei gegenläufiger Laufrichtung wird die Begegnungsfrequenz niedriger. Laufen die Wellen quer zur Strömung, verändert sich die Frequenz nicht. Das gilt natürlich nur, wenn alle Frequenzkomponenten dieselbe Laufrichtung haben, was bei Windseegang nicht der Fall ist.

...

Leider sind die Verhältnisse noch etwas komplizierter, wenn man verschiedene Frequenzen und Laufrichtungen bzw. verschiedene Phasengeschwindigkeiten und Strömungsgeschwindigkeiten betrachtet. Setzen wir in obiger Formel $\tau = 2\pi v/g$ und lösen nach der Frequenz **f** im mitbewegten System auf, dann erhalten wir eine mehrdeutige Lösung

$$f = -\frac{1}{2\tau \cos\theta}\left\{1 \mp \sqrt{1 + 4\tau f_B \cos\theta}\right\}$$

Es gibt im allgemeinen drei Wellensysteme (die Lösung mit negativer Frequenz ist physikalisch nicht sinnvoll), die dieselbe Begegnungsfrequenz erzeugen. Mißt man z.B. eine Begegnungsfrequenz von f_B = 0,15 Hz bei einer Strömungsgeschwindigkeit v = 2 m/s und einem Winkel θ = 60°, so kann dieses Meßergebnis von 3 (Sinus)-Wellen verschiedener Phasengeschwindigkeit und Wellenlänge hervorgerufen worden sein:

f_B Hz	f Hz	c_{ph} m/s	L m
0,15	1,39	1,12	0,81
0,15	0,17	9,81	54
-0,15	1,70	0,92	0,54

Die Begegnungsfrequenz hat für mit der Strömung mitlaufende Wellen ein Maximum für

$$f^{max} = \frac{-1}{2\tau \cos\theta} = 2 f_B^{max}$$ und es wird

$f_B = 0$ für $f_0 = \frac{-1}{\tau \cos\theta} = 4 f_B^{max}$. Letzteres entspricht

in Tiefwasser der Bedingung

$$-c_{ph} = v \cos\theta,$$

d.h. die Strömungskomponente in Wellenlaufrichtung ist entgegengesetzt gleich der Phasengeschwindigkeit der Wellen.

...

2.2.7.2 Flachwasser

In Flachwasser ist bekanntlich die Phasengeschwindigkeit der Wellen nur von der Wassertiefe h abhängig:

$$c_{ph} = \sqrt{g\ h} \qquad (h/L \lesssim 0.1)$$

Zwischen der Begegnungsfrequenz f_B im ortsfesten Bezugssystem und der Frequenz f im mit der Strömung mitbewegten System besteht die Beziehung

$$f_B = f\ (1 + \frac{v \cos \theta}{\sqrt{gh}})$$

2.2.7.3 Mittlere Wassertiefe

Für mittlere Wassertiefen ($0.1 \lesssim h/L \lesssim 0.5$), mit denen wir es in der Elbe und im Ästuar meistens zu tun haben, muß man die Dispersionsrelation in der Form

$$f^2 = (gk/4\pi^2) \cdot \tanh kh \qquad (\text{Wellenzahl } k = 2\pi/L)$$

berücksichtigen. Andererseits gilt für die Frequenzen f und f_B für Wellen, die sich auf einer gleichförmig bewegten Wassermenge befinden:

$$f = f_B - (1/2\pi)\cdot(k\cdot v\cdot \cos \theta).$$

Aus beiden Formeln ergibt sich:

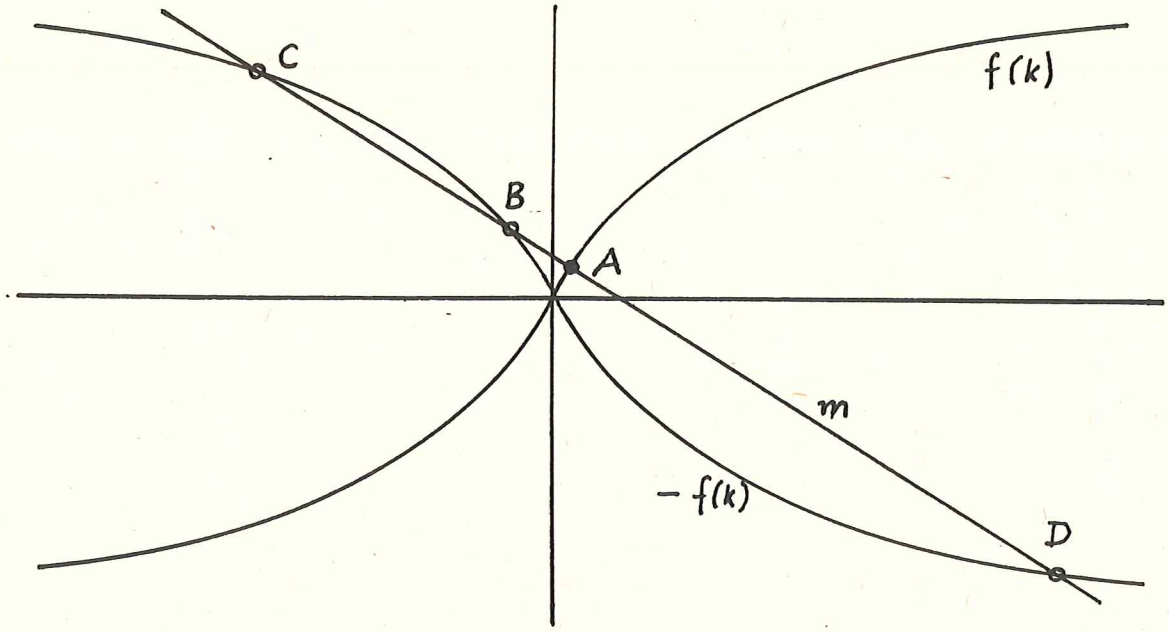
$$f_B = \pm\ (1/2\pi)\ (\sqrt{gk \tanh kh} + k\ v \cos \theta)$$

D.H. Peregrine diskutiert (in "Interaction of Water Waves and Currents", Adv. in Appl. Mech., Academic Press, 1976) die Lösung dieser Dispersionsrelation, indem er die Kurven

$$m = f_B - (1/2\pi)\ (k\cdot v\cdot \cos \theta)$$

...

und $f(k) = \pm(1/2\pi)\sqrt{gk \tanh kh}$ zum Schnitt bringt



Man kann i.a. 4 Lösungen (Schnittpunkte) unterscheiden, sofern nicht v = o ist, oder die Wellen senkrecht zur Strömung (θ = 90° oder 180°) laufen:

A entspricht Wellen, die eine Komponente in Richtung der Strömung haben. Dann ist $f_B > f$. Ebenso ergibt sich für Wellen, die eine Komponente entgegen der Strömungsrichtung aufweisen (Fall B), $f_B < f$. Die Wellen zeigen den Doppler-Effekt mit der entsprechenden Korrektur für die Dispersion.

C entspricht Wellen, die gegen die Strömung laufen, und zwar so, daß die Kämme zwar gegen den Strom, ihre Energie jedoch stromabwärts läuft. D.h.

$$-c_{ph} < v \cos\theta \leq c_g$$

$$c_{ph} = 2\pi f_B/k, \quad c_{gr} = \frac{1}{2}\left\{1 + (2\,kh/\sinh 2\cdot kh)\right\}\cdot c_{ph}$$

D entspricht Wellen, die sich zwar gegen den Strom bewegen, deren Phasengeschwindigkeit jedoch kleiner als die Strömungsgeschwindigkeit ist, so daß sich ihre Kämme, von einem festen Punkt aus beobachtet, stromabwärts bewegen.

...

Die Punkte B und C können zusammenfallen (Tangente an die Dispersionskurve). In diesem Falle ist

$$c_{gr} + v \cdot \cos\theta = 0$$

und die Wellenenergie ist ortsfest (oder bewegt sich senkrecht zur Strömung). Da stets $c_{ph} > c_{gr}$, bewegen sich die Wellenkämme gegen den Strom, die Energie aber steht still.

Lösungen vomTyp B und C existieren nur, wenn

$$c_{gr} + v \cdot \cos\theta < 0.$$

Im Fall $c_{ph} + v \cdot \cos\theta = 0$ ist $f_B = 0$. Die Wellen sind stationär, obwohl ihre Energie stromabwärts transportiert wird.

Da wir es in der Elbe mit einem breiten Band von Wellenfrequenzen (0.1 - 1 Hz), Strömungsgeschwindigkeiten von 0 - 2 m/s und Wassertiefen von 0 - 30 m zu tun haben, können prinzipiell alle genannten Fälle eintreten, und zwar gleichzeitig in verschiedenen Frequenzbereichen oder Wassertiefen. Man darf sich also nicht über die Variabilität der Seegangsspektren wundern. Außerdem gelten die obigen Beziehungen nur, wenn die Zeit- und Längenskalen, die durch die Strömungen bestimmt sind, groß gegenüber den seegangsbestimmten Skalen sind.

2.2.7.4 Berücksichtigung der Richtungsverteilung im Seegangsrichtungsspektrum

In der Natur gibt es keinen unidirektionalen Seegang ($\theta = \theta_0 \approx$ const für alle Spektralkomponenten). Im allgemeinen rechnet man bei einer Windsee mit einer Richtungsverteilung

$$K(\theta') = \frac{2}{\pi} \cos^2\theta', \quad \text{mit } -90° \leq \theta' = \theta - \theta_0 \leq 90°$$

$$\text{und } \int_{-90°}^{+90°} K(\theta') \cdot d\theta' = 1.$$

Lange Dünungen haben schmalere Richtungsverteilungen und sind entsprechend langkämmiger als Windseen.

...

Bei den von uns gemessenen Spektren handelt es sich um Begegnungsspektren (außer zum Zeitpunkt der Stromkenterung, wenn v = o), die gegenüber normalen, nicht auf strömendem Wasser entstandenen Spektren, verzerrt sind. Wollen wir z.B. die JONSWAP-Gesetze anwenden, müssen wir wissen, wie die Spektren vom ruhenden Koordinatensystem ins mitbewegte System transformiert werden - und umgekehrt.
Wir betrachten im folgenden nur den Tiefwasswer- und den Flachwasserfall. Der Fall mittlerer Wassertiefen liegt etwa dazwischen, läßt sich aber nur numerisch iterativ lösen. Die Transformation für den Tiefwasserfall ist erstmals vernünftig von D. E. Cartwright (in "The Use of Directional Spectra in Studying the Output of a Wave Recorder on a Moving Ship", Ocean Wave Spectra, Proc. of a Conf., Prentice-Hall, 1963) beschrieben worden. Es ist trivial, den Fall eines sich mit einem Schiff durch die Wellen bewegenden Meßgerätes auf den Fall eines ortsfesten Meßgerätes zu übertragen, dem die Wellen auf einer Strömung zugetragen werden.
Basis ist die bereits eingeführte Gleichung für die Begegnungsfrequenz

$$f_B = f + \tau f^2 \cdot \cos\theta \qquad , \tau = 2\pi v/g$$

Im ruhenden System kann das Seegangsrichtungsspektrum beschrieben werden durch

$$F(f, \theta') = E(f) \cdot K(\theta') = E(f) \cdot \frac{2}{\pi} \cos^2 \theta'$$

wobei z.B. E(f) das bekannte JONSWAP-Spektrum ist und die Richtungsverteilung K(θ') durch die oben erwähnte Kosinus-Quadrat-Formel festgelegt wird.

Wir betrachten als nächstes die Darstellung der Formel für die Begegnungsfrequenz in der (f, θ)-Ebene. Dabei ist prinzipiell jede Richtung θ nicht von der Gegenrichtung -θ unterscheidbar. (Die Halbebene $0° \leqslant \theta \leqslant 180°$ liegt spiegelbildlich zur Halbebene $180° \leqslant \theta \leqslant 360°$.)

...

In den Abb. 13 - 17 finden sich Darstellungen für verschiedene Strömungsgeschwindigkeiten für den Tiefwasser- und den Flachwasserfall. Der Hauptunterschied liegt darin, daß wir im Tiefwasserfall (und bei mittleren Wassertiefen) wegen der Dispersion bei mitlaufenden Wellen einen Wendepunkt in den Kurven f_B = const haben.

Dieser Wendepunkt liegt für v = 1,5 m/s in Abb. 13 auf der Frequenzachse (θ = 180°) bei $1/2\,\tau$ = 0.52). Dazu gehört eine maximale Begegnungsfrequenz $1/4\,\tau$. Bei der Frequenz $1/\tau$ ist die Begegnungsfrequenz Null. Für den ortsfesten Wellenmeßdraht bedeutet dies, daß er keine Frequenzänderung mißt. Die Begegnungsfrequenz ist also Null und man würde diesen Wellen eine beliebig lange Periode bzw. Wellenlänge zuordnen. Da der Wellenmeßdraht keine Laufrichtungen unterscheiden kann, wird er die negativen Begegnungsfrequenzen (s.a. Abb. 14) genauso registrieren wie die positiven mit derselben Frequenz.

Das Vorhandensein einer oberen Grenze für die Begegnungsfrequenz, würde für unidirektionale Seegangsspektren (z.B. θ = 180° für alle Frequenzen f) dazu führen, daß aus einem kontinuierlichen Spektrum E(f) mit einem allmählichen Abfall der Energie nach hohen Frequenzen ein bei f_B^{max} abgehacktes Begegnungsspektrum $E(f_B)$ entstehen würde. Der Abschneideeffekt kann bei entsprechenden Bedingungen (wenig Wind, starke Strömung) mitten im Peak des Begegnungsspektrums auftreten. Die Transformation (s.u.) hat an dieser Stelle außerdem eine Singularität, so daß die Energiedichte bis zur Abschneidefrequenz auf unendlich hohe Werte ansteigen würde (stets $\theta \approx 180°$).

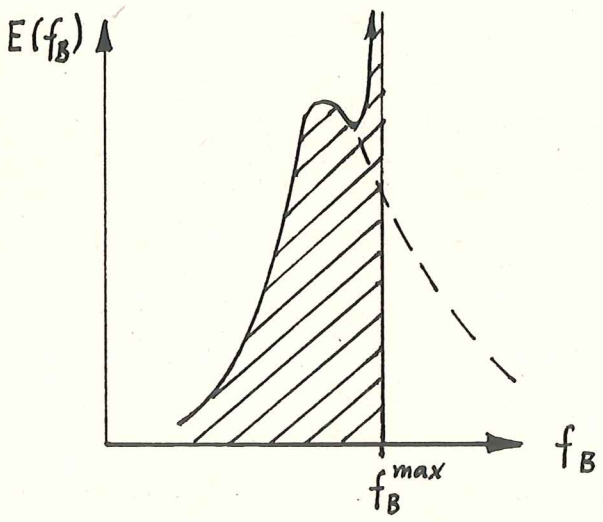


Abb. 18: Theoretisches ——— und gemessenes - - - - - - Begegnungsspektrum. f_B^{max} maximale Begegnungsfrequenz für unidirektionalen Seegang E(f).

...

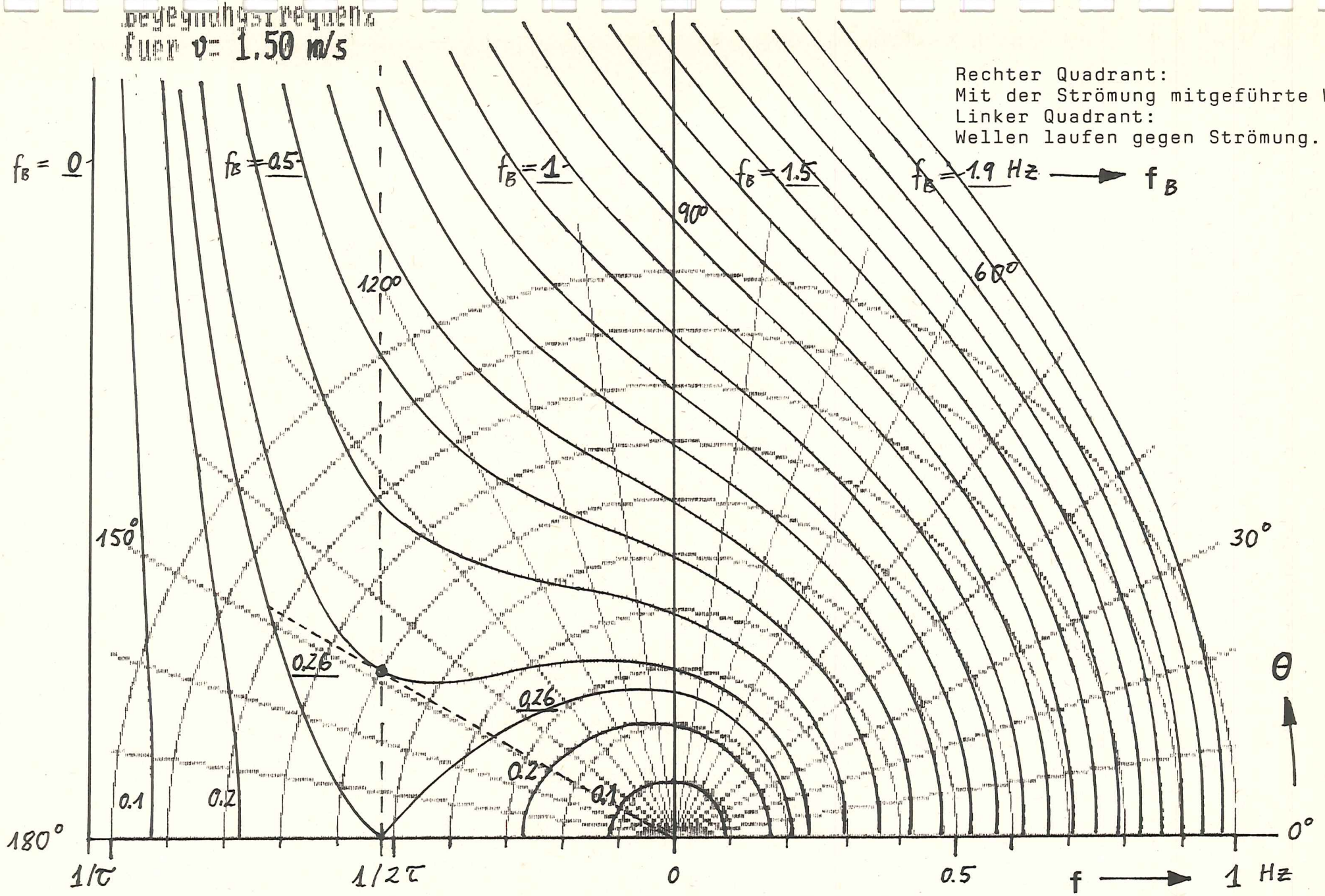


Abb. 13: Darstellung des Zusammenhangs zwischen der Begegnungsfrequenz f_B und der Frequenz f im bewegten System in der (f, θ)-Ebene (Tiefwasser).
(Konzentrische Kreise f = const.) $v = 1{,}5$ m/s

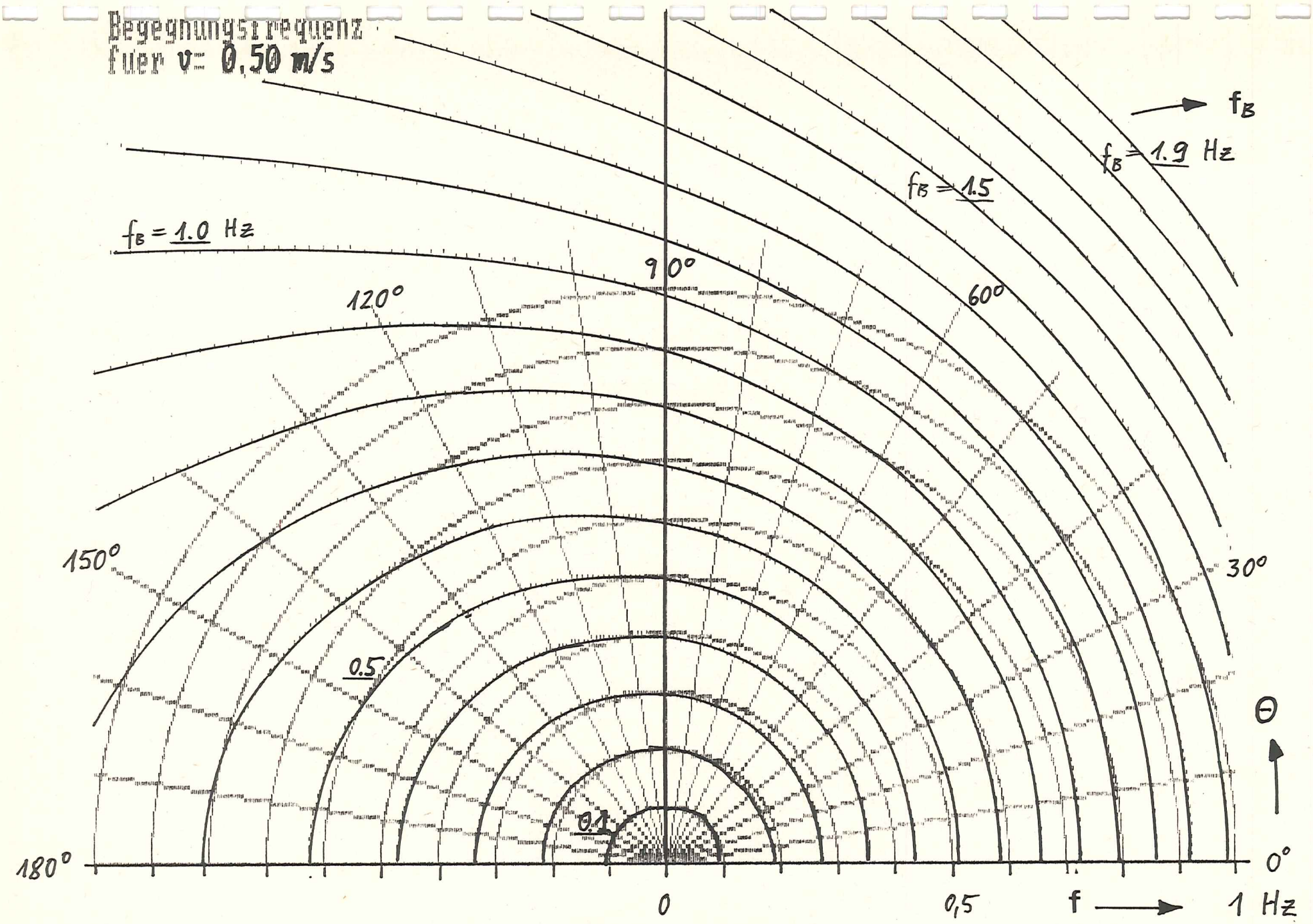


Abb. 15: Wie Abb. 13, jedoch geringere Strömungsgeschwindigkeit $v = 0{,}5$ m/s

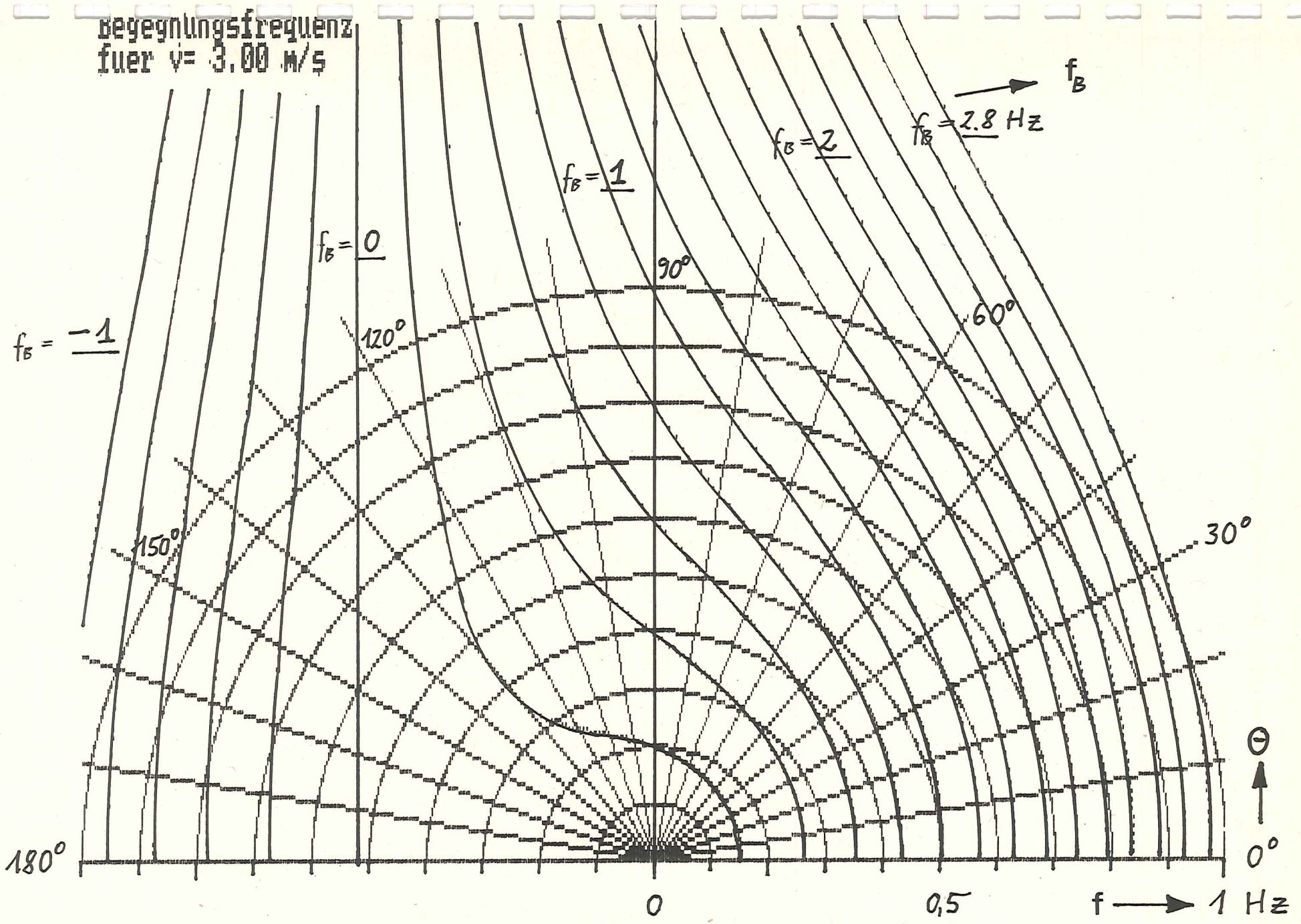


Abb. 14: Wie Abb. 13, jedoch doppelte Strömungsgeschwindigkeit. $v = 3$ m/s
Beachte negative Begegnungsfrequenzen für θ >120°.
(Phasengeschwindigkeit der Wellen kleiner als die
entgegengesetzt gerichtete Strömungsgeschwindigkeit.)

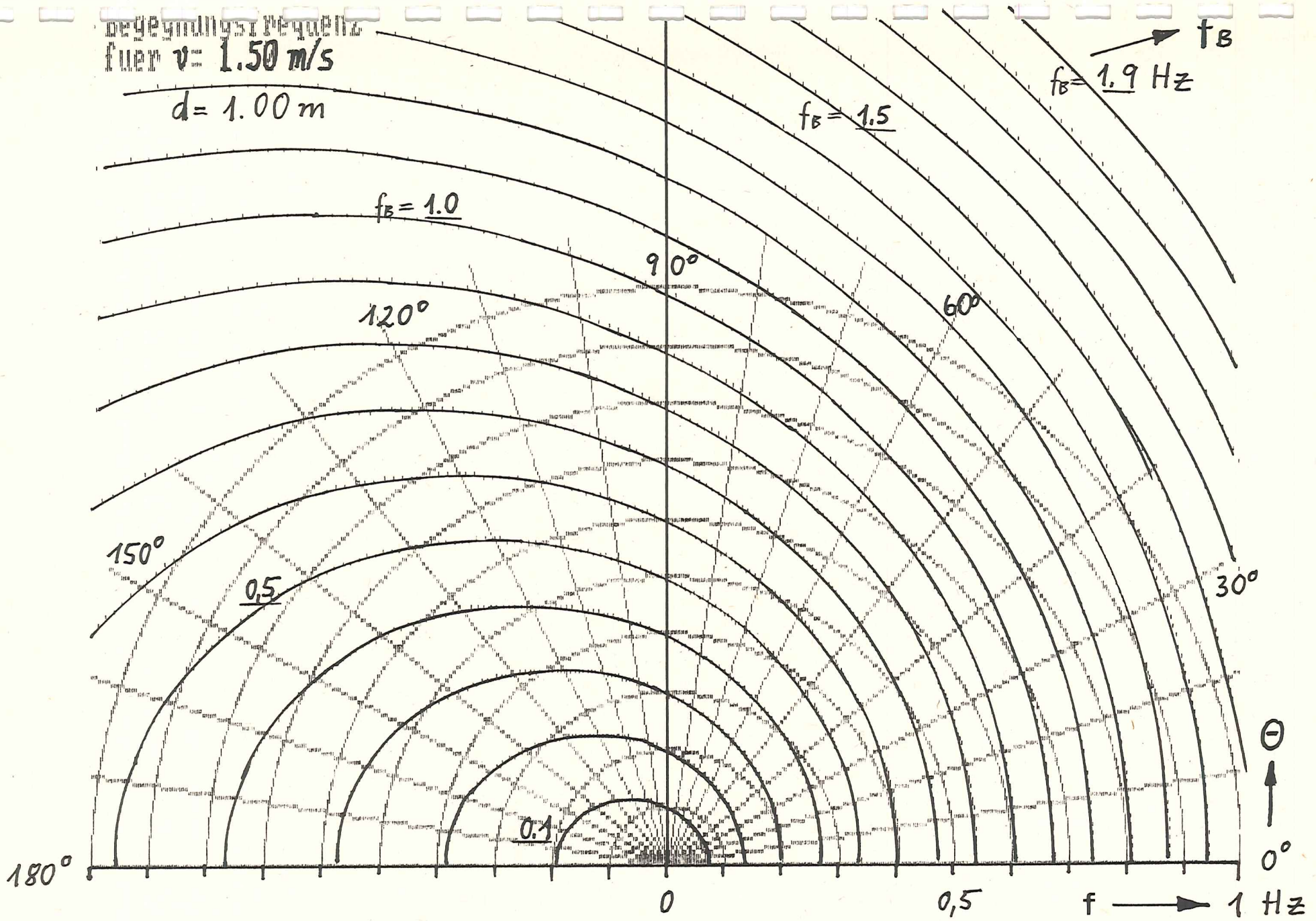


Abb. 16: Wie Abb. 13, jedoch Flachwasserbedingungen,
Wassertiefe = 1 m.
Beachte Ähnlichkeit zu Abb. 15. $v = 1{,}5\ m/s$

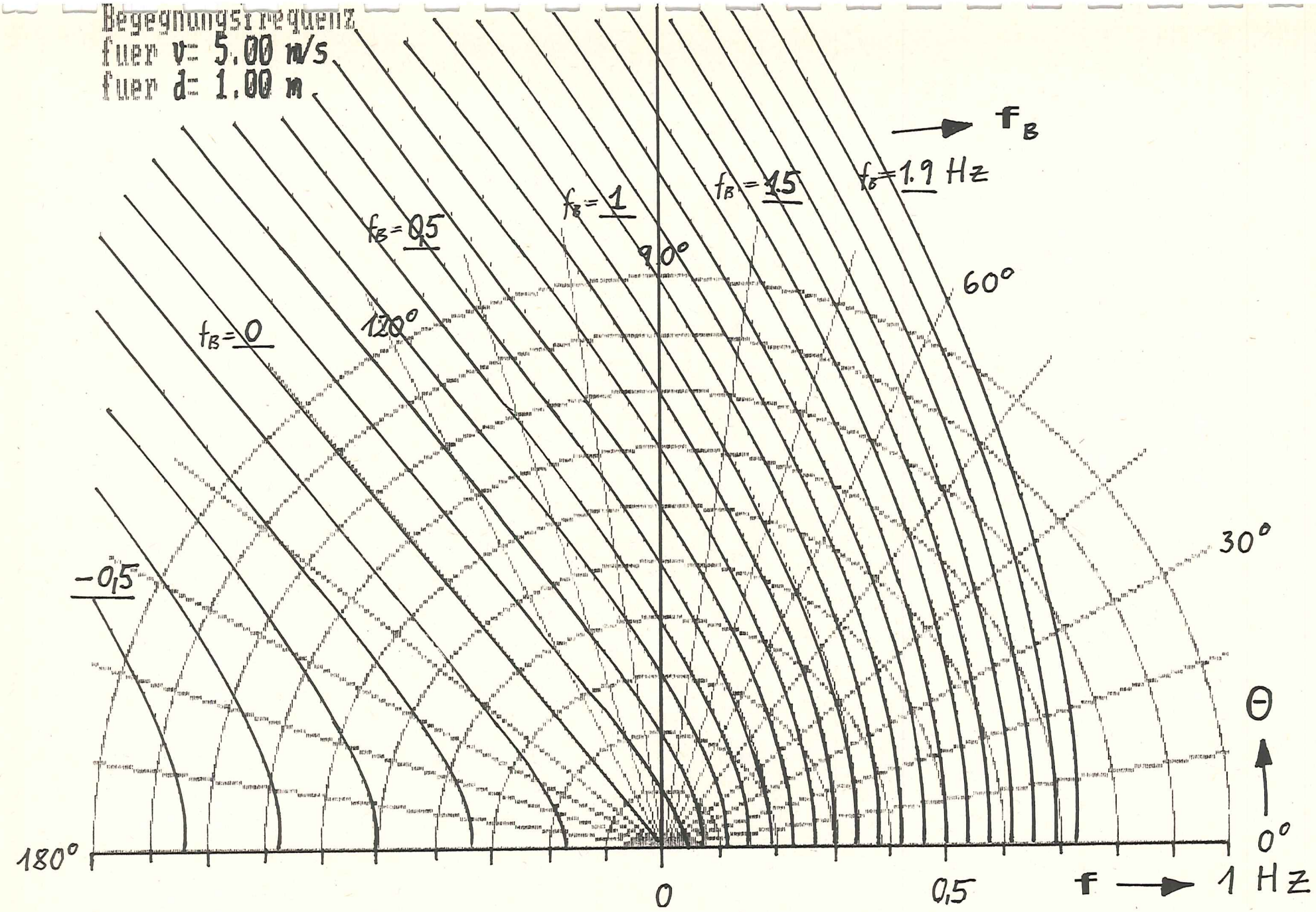


Abb. 17: Wie Abb. 13 bzw. Abb. 16, jedoch höhere Strömungsgeschwindigkeit
v = 5 m/s, Wassertiefe ebenfalls 1 m.
Beachte: Auch hier Auftreten von negativen Begegnungsfrequenzen.

Die Messungen in der Elbe zeigen keine Spektralformen dieser Art, wohl aber ausgeprägt spitze und auch breite runde Spektren. Ursache für ein Fehlen des Abschneideeffekts ist offenbar, daß die Spektren nicht unidirektional sind, sondern eine relativ breite Richtungsverteilung aufweisen.
In Abb. 18 ist ein vertikaler Schnitt entlang einer der Konturlinien f_B= const durch ein Seegangsrichtungsspektrum gelegt worden. Das Begegnungsspektrum $E(f_B)$, das an einem festen Ort gemessen wird, erhält man, wenn man das Richtungsspektrum entlang dieser Konturlinien c integriert und die Beiträge für alle f_B = const aufsummiert.
Man kann entweder f oder θ als unabhängige Variable wählen und erhält für f_B = const:

$$E(f_B) = \int_c F(f, \theta) \left| \frac{\partial f}{\partial f_B} \right| d\theta$$

$$= \int_c \frac{E(f) \cdot [K(\theta') + K(-\theta')]}{\sqrt{1+4\tau f_B \cdot \cos \theta'}} \cdot d\theta' \quad , \quad \text{mit (s.o.)}$$

$$f = -\frac{1}{2\tau \cos \theta'} \left\{ 1 \mp \sqrt{1+4\tau f_B \cdot \cos \theta'} \right\}$$

oder $$E(f_B) = \int_c F(f, \theta) \left| \frac{\partial \theta}{\partial f_B} \right| \cdot df$$

$$= \int_c \frac{E(f) [K(\theta') + K(-\theta')]}{\tau f^2 |\sin \theta'|} \cdot df \qquad \text{mit}$$

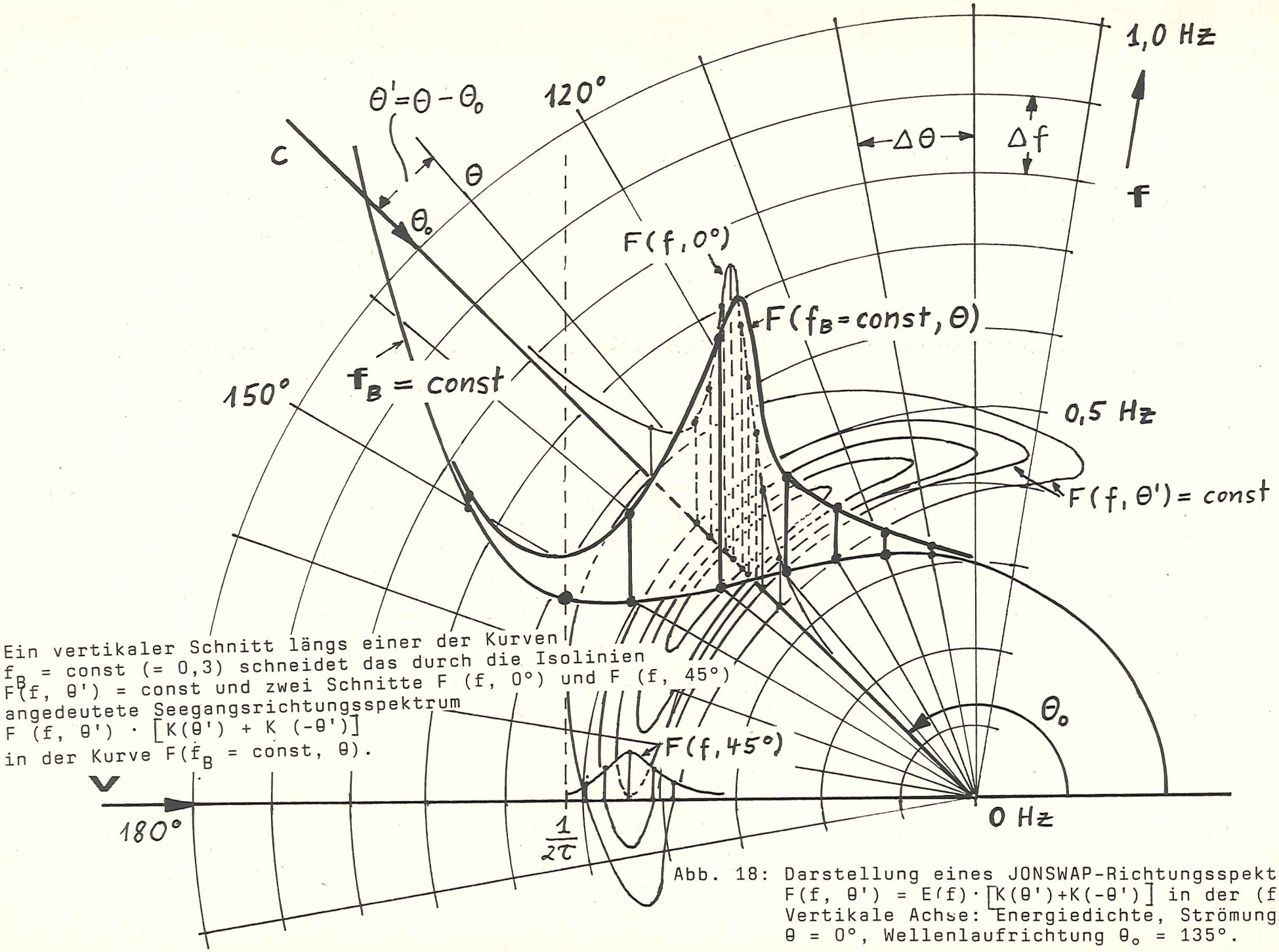
$$\cos \theta' = \frac{f_B - f}{\tau f^2} \qquad (\tau = 2\pi v/g)$$

Die Gesamtenergie E_B erhält man durch Integration über alle Begegnungsfrequenzen, und da die Gesamtenergie sich bei der Transformation nicht ändern kann, ist

$$E_B = \int_{-\infty}^{+\infty} E(f_B)\, df_B = \int_0^{\infty} E(f)\, df = E$$

Entscheidet man sich für die erste Formel, so sieht man, daß das Integral für die maximale Begegnungsfrequenz $1/4\,\tau \cos \theta'$ (beim Wendepunkt) wegen der Gewichtsfunktion im Nenner unendlich groß wird. In der Natur tritt diese Singularität nicht in Erscheinung. (Man könnte dann mit Hilfe des Wellenmeßdrahtes die Strömungsgeschwindigkeit v bestimmen.)

...



Ein vertikaler Schnitt längs einer der Kurven f_B = const (= 0,3) schneidet das durch die Isolinien $F(f, \theta')$ = const und zwei Schnitte F (f, 0°) und F (f, 45°) angedeutete Seegangsrichtungsspektrum $F(f, \theta') \cdot [K(\theta') + K(-\theta')]$ in der Kurve $F(f_B = const, \theta)$.

Abb. 18: Darstellung eines JONSWAP-Richtungsspektrums $F(f, \theta') = E(f) \cdot [K(\theta') + K(-\theta')]$ in der (f, θ)-Ebene. Vertikale Achse: Energiedichte, Strömungsrichtung θ = 0°, Wellenlaufrichtung θ_0 = 135°.

Für Flachwasser ($c_{ph} = \sqrt{gh}$) lauten die Formeln:

$$E(f_B) = \int_{c'} \frac{E(f) \cdot [K(\theta'+K(-\theta')]}{1+\tau_1 \cdot \cos\theta'} \cdot d\theta' \quad \text{mit } \tau_1 = v/\sqrt{gh} \text{ und}$$

$$f = \frac{f_B}{1+\tau_1 \cdot \cos\theta'} \quad , \; h = \text{Wassertiefe}$$

$$\text{oder } E(f_B) = \int_{c'} \frac{E(f) \cdot [K(\theta')+K(-\theta')]}{\tau_1 f |\sin\theta'|} \cdot df \quad \text{mit}$$

$$\cos\theta = \frac{f_B - f}{\tau_1 f}$$

In Abb. 19 und 20 sind aus JONSWAP-Spektren E(f) berechnete Begegnungsspektren $E(f_B)$ für verschiedene Begegnungsrichtungen und zwar für Tief- und Flachwasserverhältnisse aufgetragen.
Abb. 21 soll den Einfluß der Wassertiefe auf die Doppler-Verschiebung zeigen. Man sieht zunächst, daß die Peakfrequenz bei mit der Strömung mitgeführtem Seegang nach rechts vom ursprünglichen Peak von E(f), d.h. zu höheren Frequenzen verschoben wird, bei gegen die Strömung laufendem Seegang in die umgekehrte Richtung. Wir finden, wie in den gemessenen Spektren (Abb. 11), sowohl schmale spitze Spektren ($\theta = 180°$) als auch breite, runde Spektren bei querlaufenden Wellen (s. Abb. 20, $\theta = 90°$). Im zuletzt genannten Fall erhält man also nicht die für ein unidirektionales Spektrum zu erwartende Reproduktion des ursprünglichen Spektrums ($E(f_B) = E(f)$), sondern eine erheblich veränderte ungewöhnliche Spektralform. Der Betrag der Doppler-Frequenzverschiebung nimmt mit zunehmender Strömungsstärke v zu, im Flachwasser wird der Effekt zusätzlich durch abnehmende Wassertiefe verstärkt (Abb. 21).

Die Singularität bei $f_B^{max} = 0{,}26$ Hz macht sich wegen der relativ groben Diskretisierungsintervalle Δf und $\Delta\theta$ bei der numerischen Integration lediglich in einer Stufe in der abfallenden Flanke von $E(f_B)$ für $\theta = 180°$ und 135° in Abb. 19 bemerkbar.

...

2.2.8 Die JONSWAP-Fetchgesetze

Wir hatten im vorangehenden gesehen, daß der Seegang im Elbeästuar wahrscheinlich durch das lokale Windfeld erzeugt wird, und aus der Nordsee einlaufende Wellen zumindest östlich Cuxhaven keine Rolle mehr spielen sollten. Es lag daher nahe, z.B. die bei Brokdorf gemessenen Spektren (Abb. 11) mit Hilfe der im JONSWAP-Projekt gefundenen Wachstumsgesetze - unter Berücksichtigung des Doppler-Effekts infolge der Strömung - zu berechnen.
Die fetchbegrenzten Wachstumsgesetze (veröffentlicht in Hasselmann, K. et al.: "Measurements of Wind-Wave Growth and Swell Decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP)", DHZ, Erg. Heft Nr. 12, Hamburg 1973) werden hier in einer vom Verfasser leicht abgewandelten Form angewendet:

Das JONSWAP-Spektrum hat die Form:

$$E(f) = \alpha g^2 (2\pi)^{-4} f^{-5} \exp\left\{-1{,}25\left(\frac{fp}{f}\right)^4 + \ln\gamma \exp\left[\frac{-(f-f_p)^2}{2\, b^2 f_p^2}\right]\right\}$$

fp = Peakfrequenz

α = Philips-"Konstante"

γ = 3,2, Peak-Überhöhungsfaktor

$b = \begin{cases} b_V = 0{,}07, & f \leq fm \\ b_U = 0{,}09, & f > fm \end{cases}$ Peak-Breiten

Wachstumsgesetze (fetchbegrenzt):

$\hat{f}_p = 2{,}84 \cdot \hat{x}^{-0{,}3}$ mit $\hat{x} = gx/U^2$ und $\hat{f} = Uf_p/g$

$\alpha = 0{,}029 \cdot \hat{f}_p^{\,2/3}$

$\hat{H} = 1{,}65 \cdot 10^{-3}\, \hat{x}^{1/2}$ mit $\hat{H} = g\, H_s/U^2$ und $H_s = 4\sqrt{\int E(f)\,df}$

x = Fetch = Windstreichlänge

H_s = signifikante Wellenhöhe

U = Windgeschwindigkeit

...

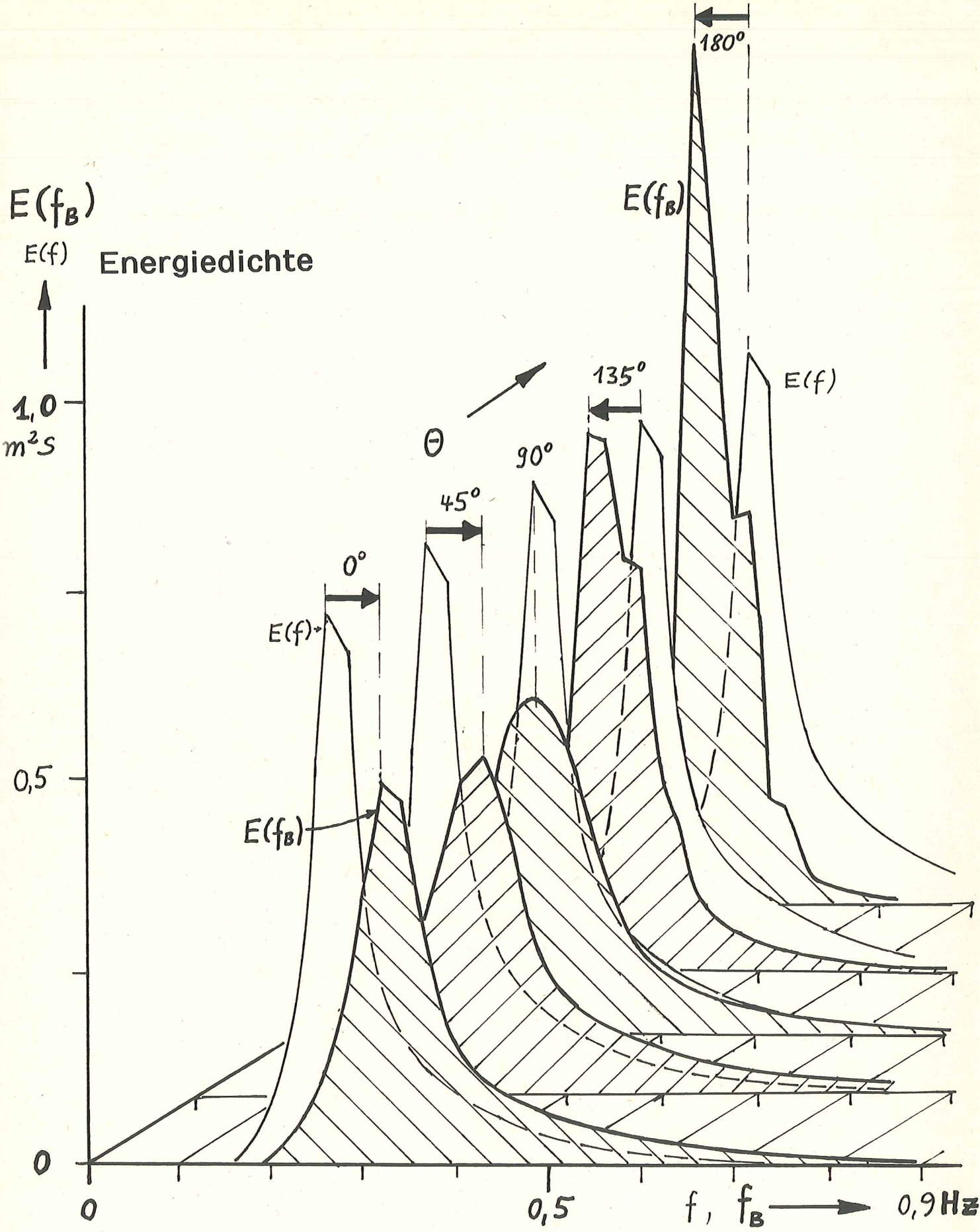


Abb. 19: Begegnungsspektren $E(f_B)$ berechnet aus dem Spektrum E(f) für verschiedene Winkel θ zwischen der Laufrichtung der Wellen und der Strömungsrichtung für Tiefwasser. Strömungsgeschwindigkeit v = 1,5 m/s. E(f) entspricht einem JONSWAP-Spektrum, berechnet für eine Windstärke von 20 m/s und einem Fetch von 10 km (sowie v = 0). Die horizontalen Pfeile geben Richtung und Betrag der Doppler-Frequenzverschiebung für die Peakfrequenz an. Es wurde eine Richtungsverteilung gemäß einem Kosinus-Quadrat-Gesetz (s.o.) zugrunde gelegt.

Bei bekannter Windgeschwindigkeit U und bekanntem Fetch x, kann man fp und α berechnen und das zugehörige Spektrum E(f) konstruieren. Die signifikante Wellenhöhe H_s läßt sich einerseits durch Integration von E(f), andererseits direkt aus $\hat{H}$ ermitteln. Die erwähnten Änderungen (im Rahmen der Genauigkeit der Messungen) gegenüber den Original-JONSWAP-Formeln, gewährleisten lediglich, daß die aus $\hat{H}$ bzw. E(f) ermittelten Werte von H_s gleichgroß sind.

Der obige Formelsatz stellt das einfachste numerische Seegangsmodell für stationäre und homogene Windfelder und Tiefwasserverhältnisse dar.

2.2.8.1 Das Problem des effektiven Fetch in der Elbe

Die in der Elbe bei "Brokdorf" auftretenden niedrigsten Peakfrequenzen von 0,156 Hz (s. Tab. 3) entsprechen Tiefwasserwellenlängen von über 60 m. Wir müssen deshalb mit erheblichen Wechselwirkungseffekten mit dem Boden, insbesondere in Ufernähe und über überfluteten Wattgebieten rechnen. Diese Effekte dämpfen i.a. die Wellen. Es ist jedoch schwierig, diese Effekte zu identifizieren und sie zu quantifizieren. Damit ist auch eine Berechnung der Wellenhöhen auf einfache Weise nicht möglich.
Wir wissen aber, daß sich die Periode bzw. Frequenz einer Welle beim Einlaufen in flaches Wasser nicht ändert. Die bisher mit Erfolg eingesetzten Flachwassermodelle berechnen zwar eine Reduzierung der Spektren, jedoch (prakisch) keine Änderung der Peakfrequenz. Da außer der meist gut definierten Peakfrequenz fp_β auch die Windgeschwindigkeit U bekannt ist, kann man zunächst die Peakfrequenz fp im ruhenden System ausrechnen und mit Hilfe der Fetchformeln den Spektren einen effektiven Fetch x_{eff} und eine Wellenhöhe H_s^{ber} zuordnen, die über tiefem Wasser längs x_{eff} durch den Wind U angefacht worden wäre. Aus den Fetchformeln ergibt sich:

$$x_{eff} = 6683\ U^{-4/3} \cdot fp^{-10/3} \qquad \text{und}$$

$$H_s^{ber} = 5{,}27 \cdot 10^{-4} \cdot U\ x_{eff}^{1/2}$$

...

Das Verhältnis von gemessener zur berechneten Wellenhöhe kann man als ein Maß für die Dämpfung der Wellen:

$$D = H_s^{gem} / H_s^{ber}$$

ansetzen.

Die angegebenen Größen wurden in Tab. 3 eingetragen, und zwar außer für "Brokdorf" auch für die Meßstation "Otterndorf". Da für Otterndorf keine Strömungsmessungen vorlagen, wohl aber Wasserstandsmeldungen, wurden die Strömungsmessungen von Brokdorf mit entsprechendem zeitlichen Versatz (etwa 1,5 Stunden) gegenüber dem Wasserstand für "Otterndorf" übernommen. Zusätzlich wurde die Hauptströmungsrichtung ebenfalls als uferparallel angenommen. Diese Extrapolation liefert sicherlich quantitativ ungenaue Werte, ist aber für die mehr qualitative Betrachtung der Seegangsverhältnisse ausreichend.

In die Tab. 3 wurde auch die Tiefwasserwellenlänge

$$L_o = g/2\pi f_p^2$$

aufgenommen. Vergleicht man diese mit der Wassertiefe bei Sturmflutlagen von 15 m bzw. 10 m, so sieht man, daß im Bereich der Fahrrinne lediglich die über 30 m langen Wellen merklich vom Boden beeinflußt werden. Über den im Elbeästuar zahlreich vorhandenen, bei Sturmfluten von Wasser überdeckten Sänden, sind Wechselwirkung und Dämpfung der längeren Wellen hingegen beträchtlich.

Die aus den Peakfrequenzen berechneten Fetchlängen wurden in Abb. 22 in Windrichtung abgetragen. Die extrem langen Fetche, insbesondere für Brokdorf, fallen völlig aus dem Rahmen. Sie führen überdies über weite Strecken über Wattgebiete oder Landzungen. Diese Wellen können bei ihrer Entstehung nicht den geraden Weg in Windrichtung genommen haben, sondern müssen den vorgegebenen topographischen Konturen gefolgt sein. Da die beobachteten langen Wellen für ihre Entwicklung tieferes Wasser benötigen, drängt sich die Annahme auf, daß sie den Weg entlang der Fahrrinne gneommen haben.

...

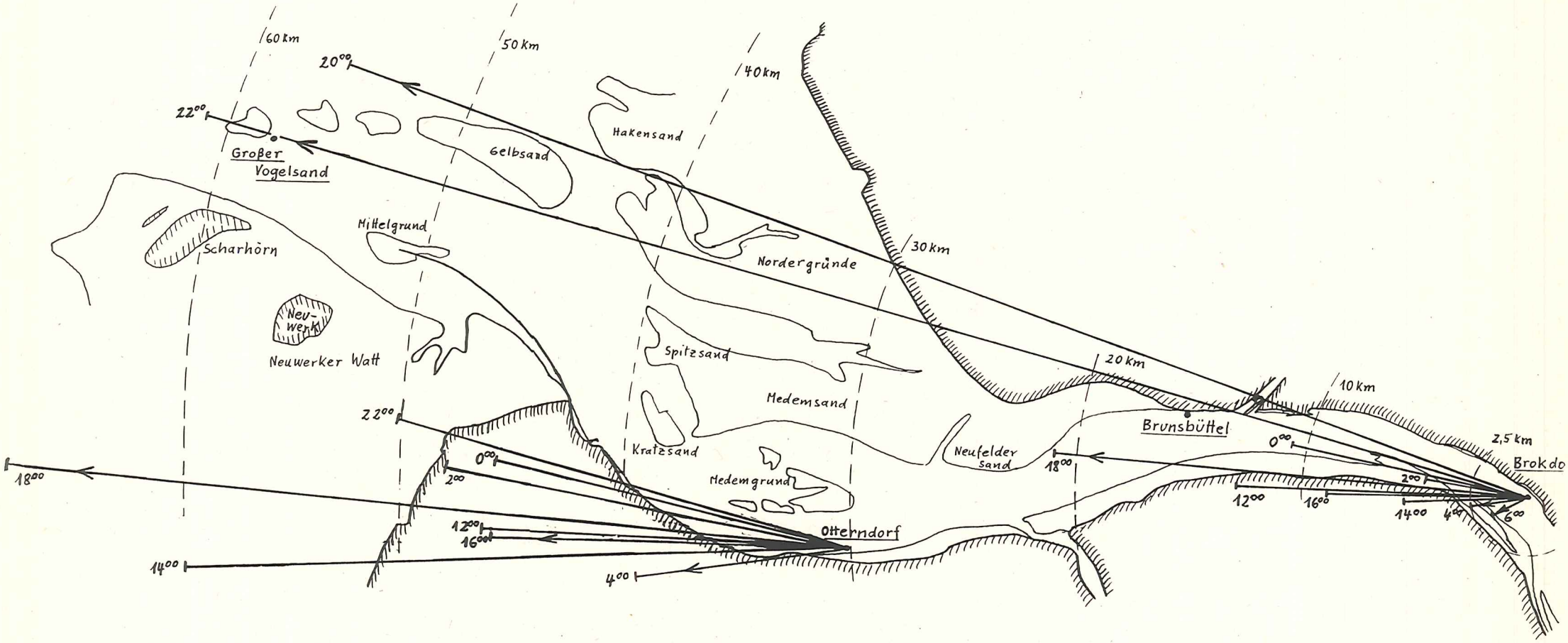


Abb. 22: Das Elbeästuar bei Brokdorf.
Eingezeichnet sind die berechneten effekt. Fetchlängen in Windrichtung bei "Otterndorf" und "Brokdorf". Die Pfeile deuten an, daß in diesen Fällen die Wellen an der Meßstation gegen den Strom laufen.

Über das Problem, bei langgestreckten Seen oder Meeresflächen den geometrischen Fetch durch einen effektiven Fetch ersetzen zu müssen, ist viel spekuliert worden. Es bietet sich an, bei streifendem Windeinfall am Ufer nicht den rein geometrischen Fetch zu nehmen, sondern über einen bestimmten Winkelbereich z.B. $\pm$10° die Fetchlängen zu mitteln. Für die Fälle, die das Südufer der Elbe vor Brokdorf streifen, ist so verfahren worden ($x \pm 10°$ in Tab. 3). Man kommt zu annähernd vernünftigen Werten im Vergleich zu x_{eff}.

Am Nordufer würde man jedoch mit dieser Methode zu Werten kommen, die im Gegensatz zu den berechneten x_{eff} -Werten stehen würden. Hier haben ausgerechnet die x_{eff}-Werte, die zur Mitte des Mündungstrichters zeigen, den geringsten Betrag. Offenbar sind nordwestliche Windrichtungen günstig für das Auftreten langer Wellen.

Ein von M. Donelan für die kanadischen Seen vorgeschlagenes Konzept führt im Fall der Elbe zu keinem brauchbaren Ergebnis. Er schlägt vor, in der Fetchformel für die Peakfrequenz (s.o.) nicht die Windgeschwindigkeit U und den geometrischen Fetch x zu benutzen, sondern eine von der Windrichtung um den Winkel Ψ abweichende Richtung mit einem (größeren) Fetch x'_{eff}, für den zwar die Windkomponente in Fetchrichtung $U \cdot \cos \Psi$ kleiner ist, die Peakfrequenz jedoch ein Minimum (und H_s ein Maximum) erreicht.

Für die Verhältnisse bei Brokdorf ergibt sich dann, daß man für den Windsektor 230° - 350° den größtmöglichen geometrischen Fetch x'_{eff} von über 40 km ansetzen müßte, was den Beobachtungen in den meisten Fällen widerspricht.

In Abb. 22 sind diejenigen Fälle durch einen Pfeil markiert, bei denen am Meßort eine Strömungskomponente entgegengesetzt zur Windrichtung oder Laufrichtung der Wellen vorhanden war. Bei Windrichtungen >270° finden wir in diesen Fällen stets große effektive Fetchlängen. Das Auftreten von langen Wellen wird also offenbar bei nordwestlichen Winden und zusätzlich gegenläufiger Strömung besonders begünstigt. Dabei ist zu berücksichtigen, daß

...

wir x_{eff} im ruhenden System mit fp anstatt mit der gemessenen Begegnungsfrequenz fp_B berechnet und damit den Effekt der Doppler-Frequenzverschiebung bereits eliminiert haben.

Bleiben wir bei der Annahme, daß die Wellen entlang der Fahrrinne laufen, treffen sie auf die Hauptströmung, die ebenfalls die Fahrrinne bevorzugt. Da das Vorhandensein einer (konstanten) Gegenströmung den Effekt nicht erklären kann, soll im nächsten Abschnitt der Einfluß eines (horizontalen) Strömungsgradienten über den Querschnitt der Elbe und seinen Einfluß auf das Wellensystem als Erklärungsmöglichkeit diskutiert werden.

Vorher muß man jedoch noch den Effekt einer Veränderung der Wachstumsbedingungen in den Fetchgesetzen berücksichtigen, der dadurch entsteht, daß die Wellen, die von der Strömung mitgeführt werden, eine bestimmte Fetchstrecke schneller durchlaufen und so weniger Zeit haben, ihren sonst im ruhenden System "zustehenden" Wachstumsgrad zu erreichen. Umgekehrt müßte bei gegenläufiger Strömung ein höherer Wachstumsgrad erreicht werden. Das betrifft nicht nur die Wellenhöhe, sondern auch die Peakfrequenz. (Im Fall gegenläufiger Strömung: Wellenhöhe höher, Peakfrequenz niedriger.)
Tatsächlich ist der Effekt im Wellentank mit überlagerter Strömung nachgewiesen worden (Kato, H. and Tsuruya, H.: Experimental Study of Wind Waves Generated on Currents, Proc. 16th Coast. Engin. Conf., 1978, Hamburg).
Sie benutzen die bekannte Beziehung zwischen Fetch F_1 und Windwirkdauer t_1

$$t_1 = F_1/c_{gr}\,,\quad c_{gr} = \text{Gruppengeschwindigkeit der Wellen}$$

Sie ergibt sich aus der Tatsache, daß eine Wellenkomponente nur dann eine dem Fetch entsprechende Energie bzw. Wellenhöhe erlangen kann, wenn sie genügend Zeit hat, mit der Gruppengeschwindigkeit den gesamten Fetch zu durchlaufen.
Nun ändert sich die Phasen- und Gruppengeschwindigkeit während der Entwicklung einer Wellenkomponente. Nehmen wir die dominante Komponente mit der Peakfrequenz fp. In Tiefwasser ist

$$c^p_{gr} = c^p_{ph} / 2 = g/4\pi fp$$

...

Über die Fetchgesetze (s.o.) und fp läßt sich der Gruppengeschwindigkeit eine äquivalente Laufstrecke entlang des Fetch zuordnen:

$$C^p_{gr}(x) = 0{,}111 \cdot U^{0{,}4} \; x^{0{,}3}$$

Ohne Strömung wird die Windwirkdauer t_o, die für die volle Entwicklung der Gesamtwellenenergie längs des Fetch F erforderlich ist:

$$t_o = \int_o^F (1/C^p_{gr}(x)) \cdot dx$$

Im Falle einer Strömung wird die Gruppengeschwindigkeit der Peakkomponente je nach Strömungsrichtung um den Betrag $v \cdot \cos\theta$ reduziert oder vergrößert, also wird die benötigte Windwirkdauer t_s:

$$t_s = \int_o^F dx/(C^p_{gr} + v \cos\theta)$$

Wir können jetzt eine effektive Fetchlänge F_{eff} definieren und sie mit dem Fetch F ohne Strömungseinfluß vergleichen:

$$F_{eff} = F \cdot (t_s/t_o),$$

wobei wir für F den Wert x_{eff} aus Tab. 3 genommen haben.

Das Integral für t_o läßt sich explizit lösen:

$$t_o = 12{,}85 \cdot U^{-0{,}4} \; F^{0{,}7}$$

Das Integral für t_s muß man numerisch lösen.

In Tab. 3 sind Werte für F_{eff} eingetragen. Man sieht, daß eine Gegenströmung den effektiven Fetch erhöht, ein mitlaufender Strom dagegen erniedrigt. Allerdings ist der Effekt nur bei niedrigen Windgeschwindigkeiten und relativ hohen Peakfrequenzen erheblich, da in diesen Fällen die relativ niedrige Gruppengeschwindigkeit C^p_{gr} mit der Strömungskomponente $v \cdot \cos\theta$ vergleichbar groß werden kann. Auf keinen Fall können aber mit diesem Effekt die großen Unterschiede im effektiven Fetch bzw. in den Peakfrequenzen erklärt werden.

....

Der beschriebene Effekt ist außerdem zu Beginn der Windwirkstrecke (luvseitig) am größten, weil dort die Gruppengeschwindigkeit zunächst noch niedrig ist. Wenn wir jedoch die Spektren in den Abb. 23 a-i betrachten, sehen wir z.B. bei der Station "Großer Vogelsand", daß dort in allen Frequenzbereichen noch genügend Wellenenergie vorhanden ist und die Wellenkomponenten nicht erst langsam angefacht werden müssen, sondern sofort mit ausreichender Energie und ausreichender Gruppengeschwindigkeit starten können. Zweifellos werden sie auf ihrem Weg z.B. zur Station "Brokdorf" sowohl durch Bodeneinflüsse gedämpft als auch durch den Wind angeregt und von der Strömung beeinflußt. Die verschiedenen Effekte können einander verstärken oder gegenläufig sein. Die Wellenkomponenten treffen auf ihrem Weg je nach Tide unterschiedliche Wassertiefen, entgegengesetzt-, mitlaufende oder querlaufende Strömungen unterschiedlicher Stärke und unterschiedliche Windbedingungen an. Für jede Wellenkomponente läuft die Entwicklungsgeschichte je nach Frequenz bzw. Laufgeschwindigkeit anders ab. Dieses komplizierte Zusammenspiel kann nur mit einem numerischen Modell beschrieben werden, das alle Randbedingungen und Wechselwirkungen berücksichtigt.

2.2.9.1 Dämpfung und Anfachung der Wellen im Flachwasser

Betrachten wir zunächst die Wechselwirkungsprozesse im einzelnen, mit denen wir es im Elbeästuar zu tun haben.

Erfahrungsgemäß überwiegt beim Einlaufen von Wellen in flaches Wasser der Dämpfungseffekt durch Wechselwirkung mit dem Meeresboden. Der über einen bestimmten Bereich ebenfalls vorhandene Shoaling-Effekt (Erhöhung der Wellenamplitude durch das Aufsteilen der Wellen) spielt meist eine untergeordnete Rolle.
Die langen Wellen sind zuerst betroffen, wie die Messungen bestätigen (Abb. 23 a-i). Der langwellige Anteil nimmt im Spektrum landeinwärts von Station zu Station ab. Es gibt eine Ausnahme um 22.00 Uhr. Zu diesem Zeitpunkt gibt es bei "Brokdorf" einen niederfrequenten Peak, der bei "Otterndorf" nicht vorhanden ist. Leider gibt es für 20.00 Uhr keinen Vergleich, da sich um diese Zeit die Station "Otterndorf" wegen zu niedrigen Wasserstandes

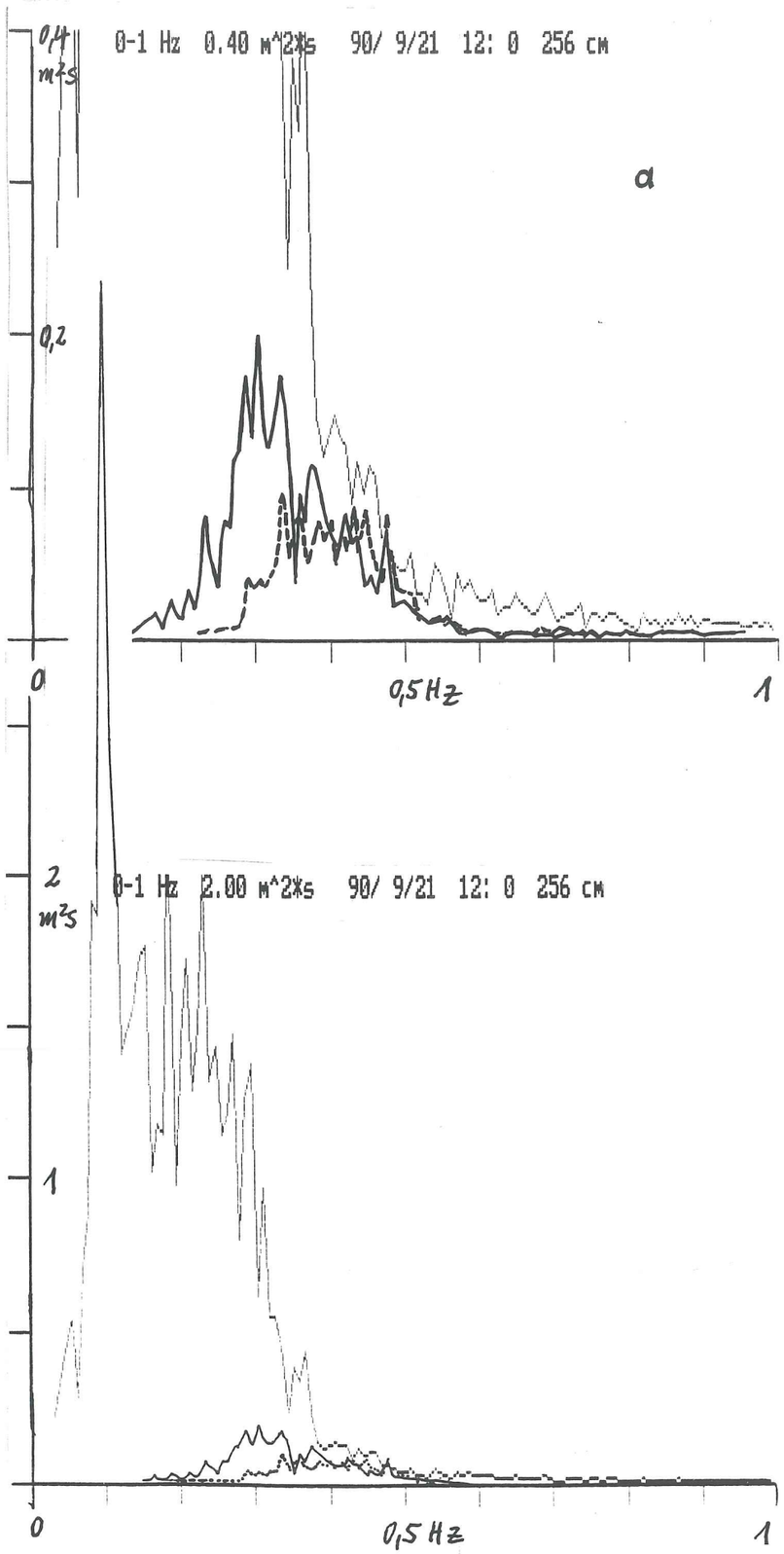
...

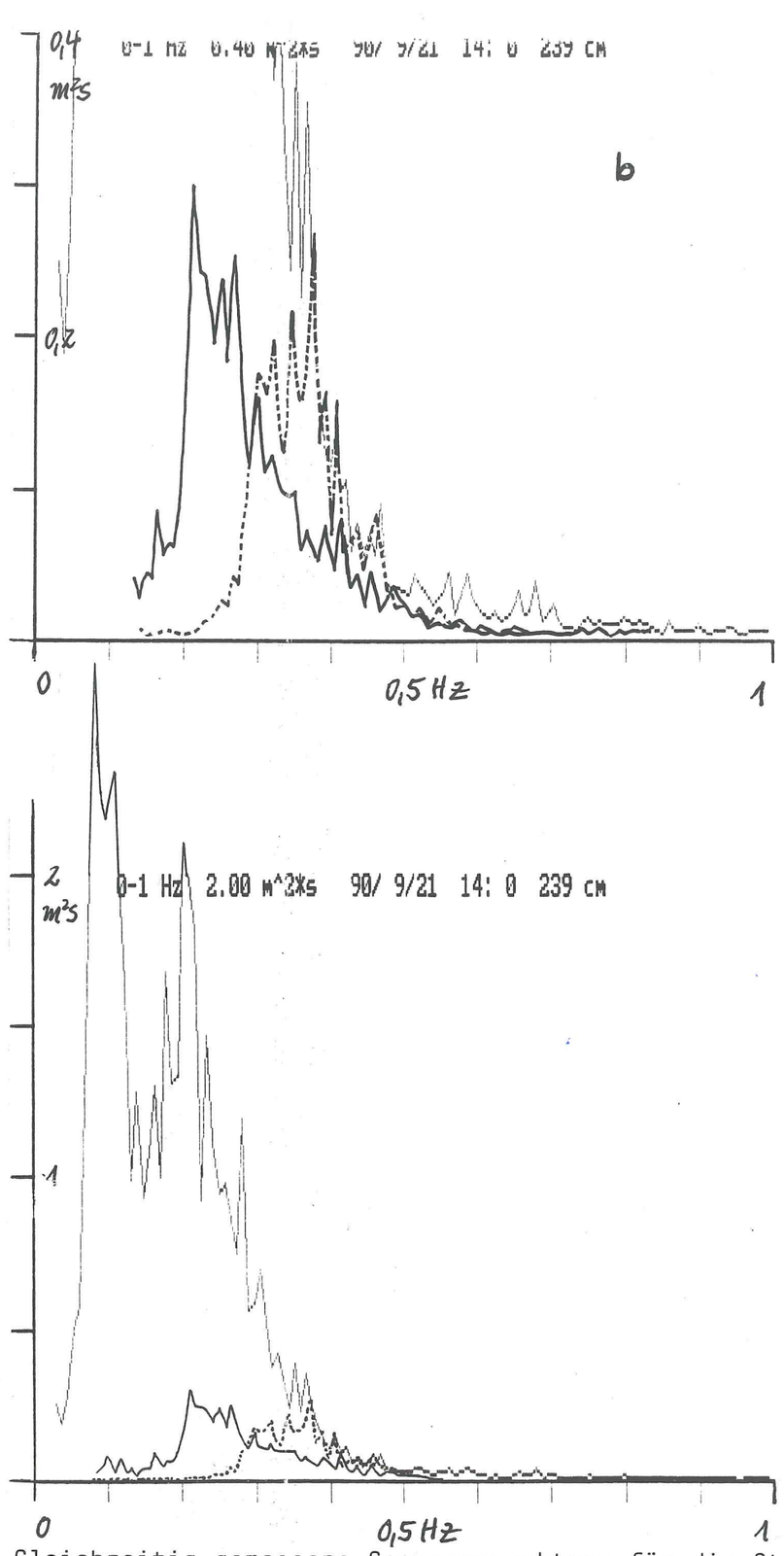
Datum 1990	Uhr UTC	H_s^{gem} m	fp_B Hz	WT m	v m/s	U m/s	WR Grad	$\|\theta\|$ Grad	fp Hz	x_{eff} km	$x_{\pm 10°}$ km	F_{eff} km	H_s^{ber} m	D	L_o m	Ort
21.09.	12	0,53	0,336	2,84	1,24	15.3	272	33	0,283	11,8	14,9	9,1	0,88	0,60	19.4	**Brokdorf**
	14	0,71	0,375	4,63	0,93	19.0	268	37	0,325	5,6	7,8	4,5	0,75	0,95	14.8	
	16	0,65	0,289	5,09	0,30	19.8	271	34	0,277	9,0	13,1	8,4	0,99	0,66	20.7	
	18	0,80	0,203	4,21	-0,67	18.4	275	150	0,221	21,1	18,2	25,0	1,41	0,57	35.0	
	20	0,77	0,156	3,19	-0,70	17.6	290	165	0,168	55,8	-	66,6	2,19	0,35	55.2	
	22	0,56	0,156	2,25	-0,64	16.7	286	161	0,167	61,0	-	70,0	2,17	0,26	55.9	
22.09.	0	0,53	0,336	3,22	0,67	14.3	283	22	0,300	10,7	-	9,0	0,78	0,68	17.3	
	2	0,26	0,480	4,06	0,65	12.1	281	24	0,415	4,5	-	3,6	0,43	0,60	9.1	
	4	0,24	0,508	3,64	-0,36	8.9	261	136	0,553	2,6	2,9	3,3	0,24	1,0	5.1	
	6	0,22	0,531	2,51	-0,84	8.4	245	120	0,642	1,7	2,5	3,6	0,18	1,2	3.8	
21.09.	12	0,68	0,305	3,27	*1,10	15.3	272	2	0,258	16,1		12,5	1,02	0,67	23.4	**Otterndorf**
	14	0,83	0,211	4,13	0,50	19.0	268	2	0,198	29,1		26,4	1,71	0,83	39.8	
	16	0,86	0,219	3,23	-0,42	19.8	271	181	0,234	15,8		17,8	1,31	0,86	28.5	
	18	0,76	0,172	2,16	-0,64	18.4	275	185	0,186	37,5		44,2	1,88	0,76	45.1	
	20	-	-	1,10	-0,65	17.6	290	200	-	-		-	-	-	-	
	22	0,62	0,234	1,69	0,07	16.7	286	16	0,232	20,4		20,0	1,26	0,62	29.0	
22.09.	0	0,59	0,305	3,01	0,88	14.3	283	13	0,266	15,9		12,9	0,95	0,59	22.0	
	2	0,52	0,281	2,84	0,15	12.1	281	11	0,274	18,0		17,3	0,86	0,52	20.8	
	4	0,26	0,305	1,56	-0,80	8.9	261	171	0,377	9,4		15,5	0,45	0,26	11.0	

Tabelle 3: Seegang und Umgebungsbedingungen an den Stationen "Brokdorf" und "Otterndorf"

H_s^{gem} = gemessene signif. Wellenhöhe, fp_B = gemess. Peak-Begegnungsfrequenz, WT = Wassertiefe über NN, v = Strömungsgeschw. uferparallel (+ östl., -westl.), U = Windgeschw. (Mittelwert aus Station "Oste" und "Kaiser-Wilhelm-Koog"), WR = Windrichtung, θ = Winkel zwischen WR und v, fp = berechnete Peakfrequenz aus Doppler-Frequenzverschiebung, x_{eff} = effekt. Fetch aus fp, $x_{\pm 10°}$ gemittelter geometr. Fetch, F_{eff} = effekt. Fetch unter Berücksichtigung der Winkwirkdauer, H_s^{ber} = H_s aus x_{eff} berechnet, $D = H_s^{gem}/H_s^{ber}$ = Dämpfung, L_o = Tiefwasserwellenlänge aus fp.

*) Werte für "Otterndorf" aus den Werten für "Brokdorf" extrapoliert.





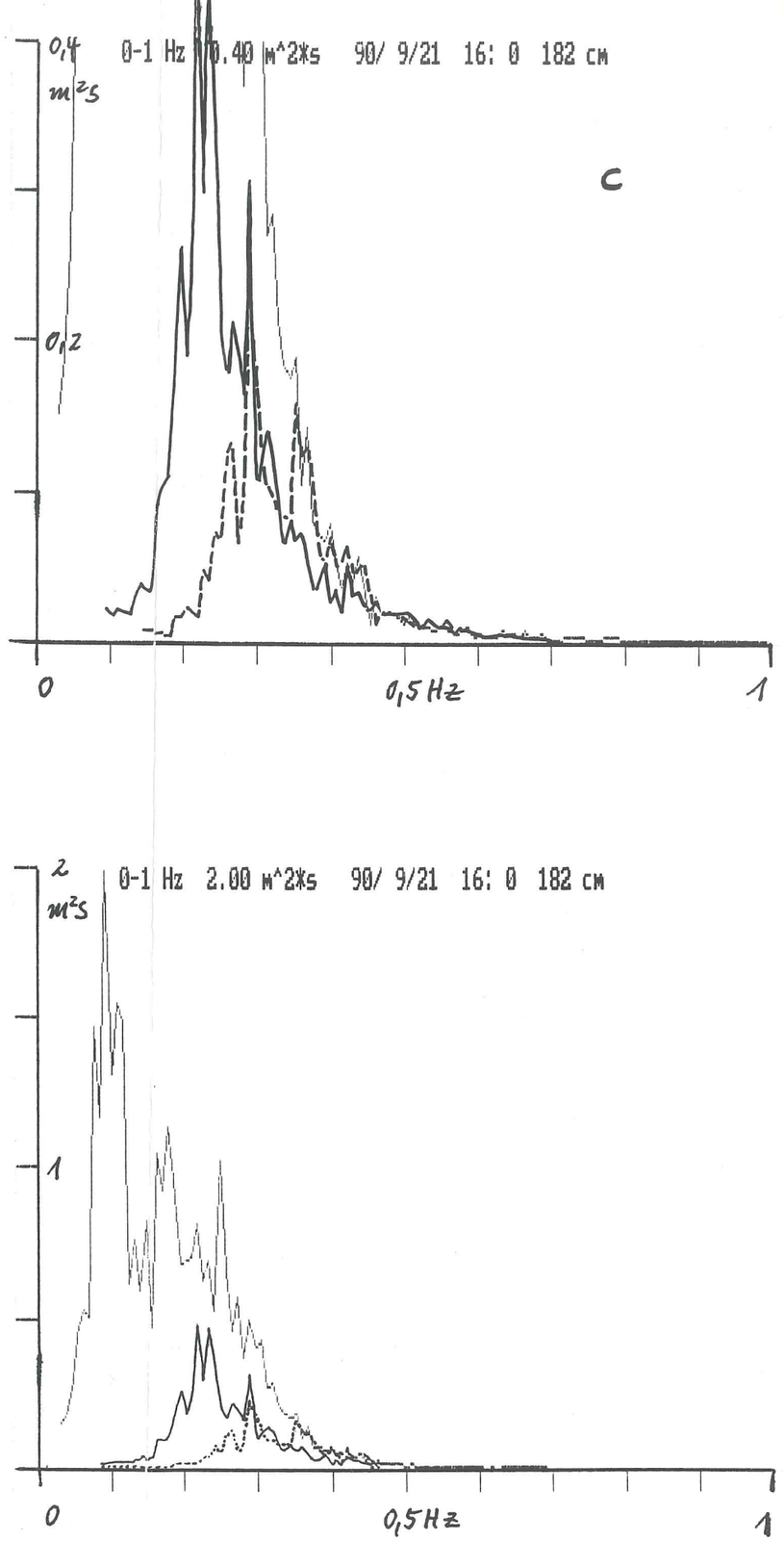
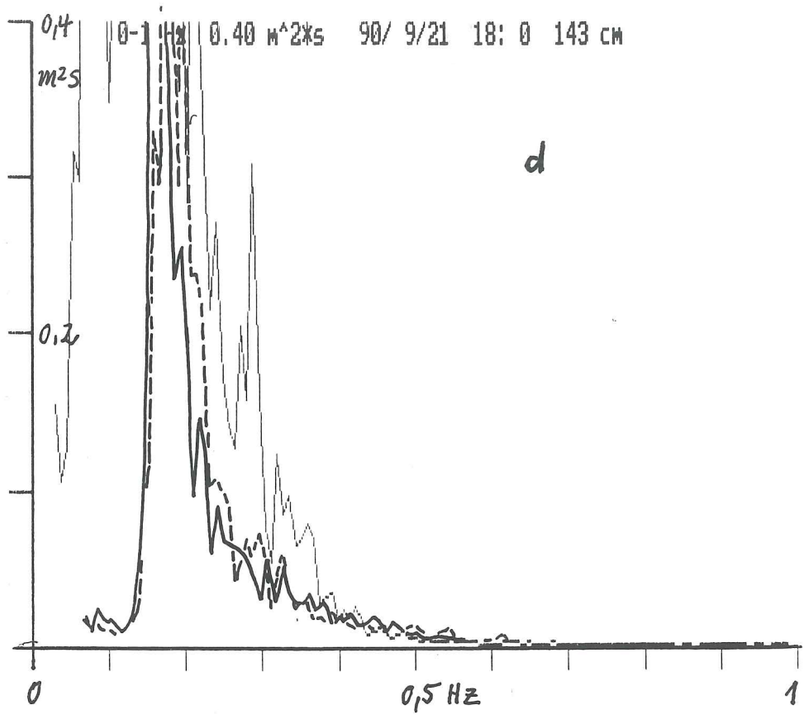
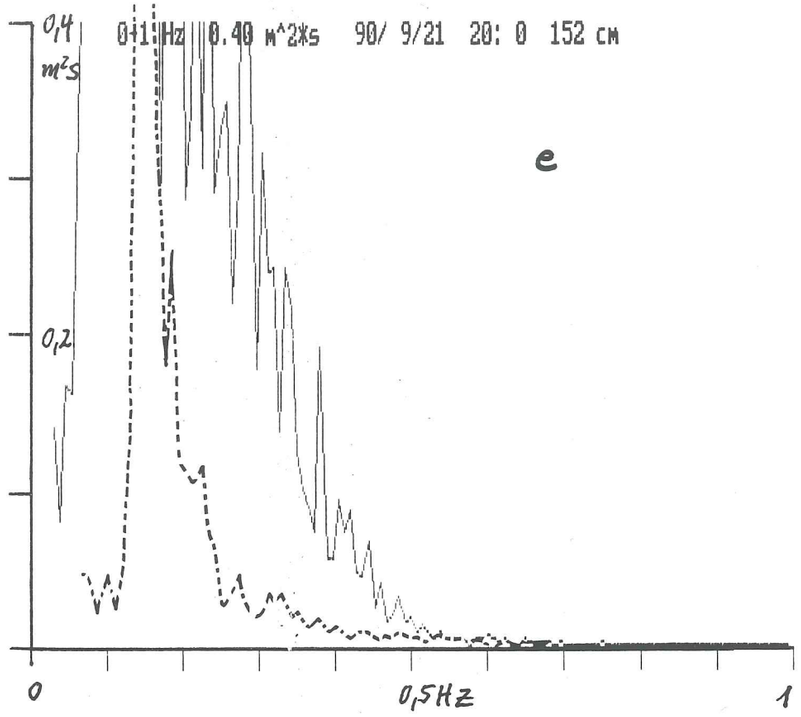
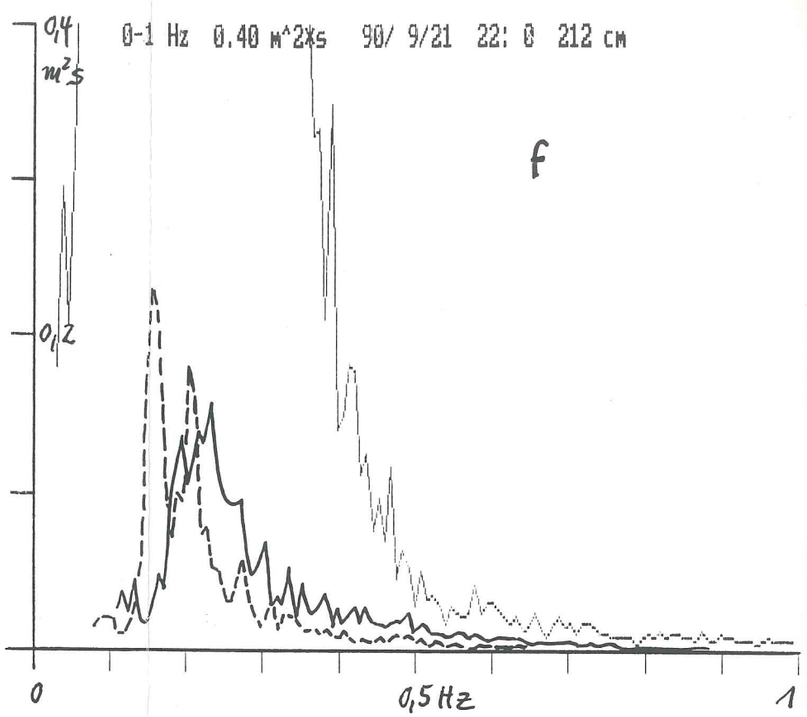
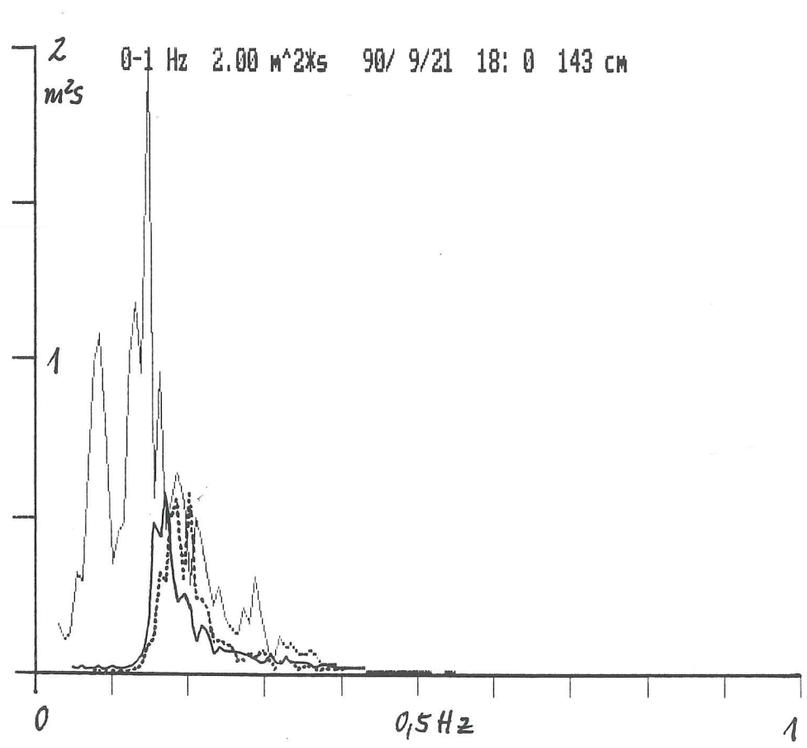


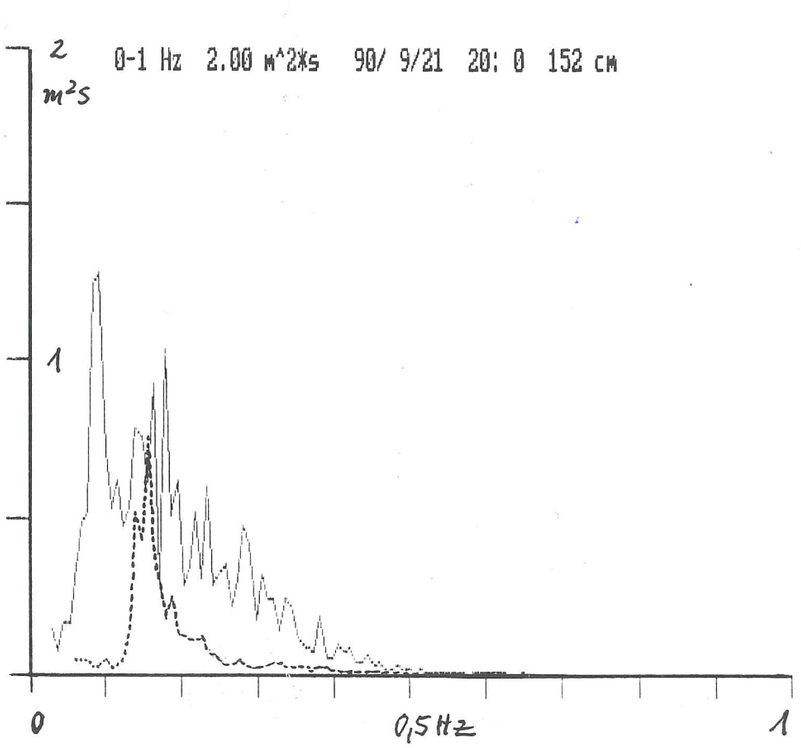
Abb. 23 a-i: Gleichzeitig gemessene Seegangsspektren für die Stationen "Großer Vogelsand" (dünne Linie), "Otterndorf" (dicke Linie) und "Brokdorf" (gepunktete Linie) für den 21./22.09. 1990, 12.00 - 04.00. In oberer Reihe ist der Ordinationsmaßstab um den Faktor 5 gegenüber der unteren Reihe vergrößert.

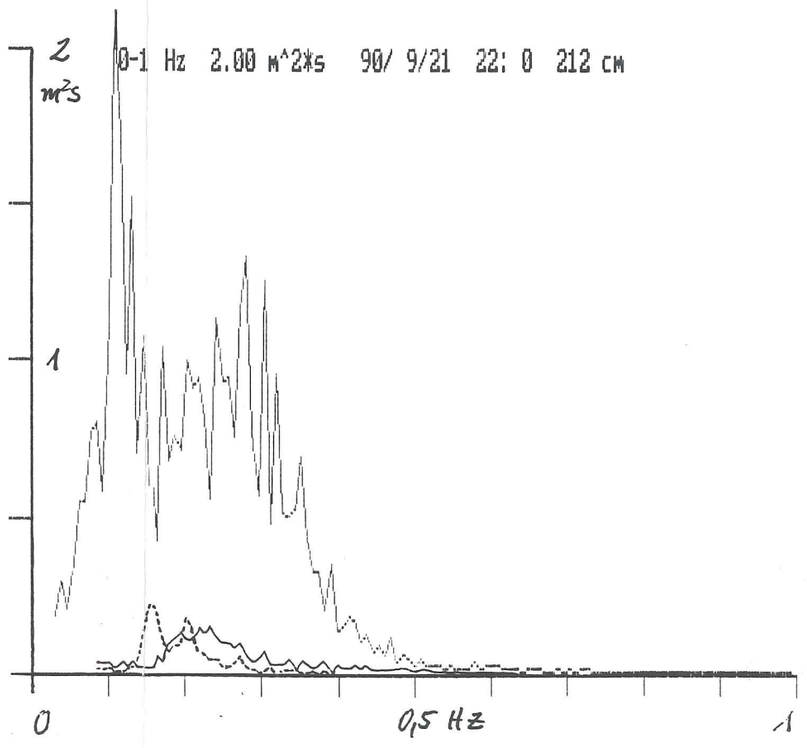

0,4
m²s
0-1 Hz 0.40 m^2%s 90/ 9/21 18: 0 143 cm
d
0,2
0
0,5 Hz
1

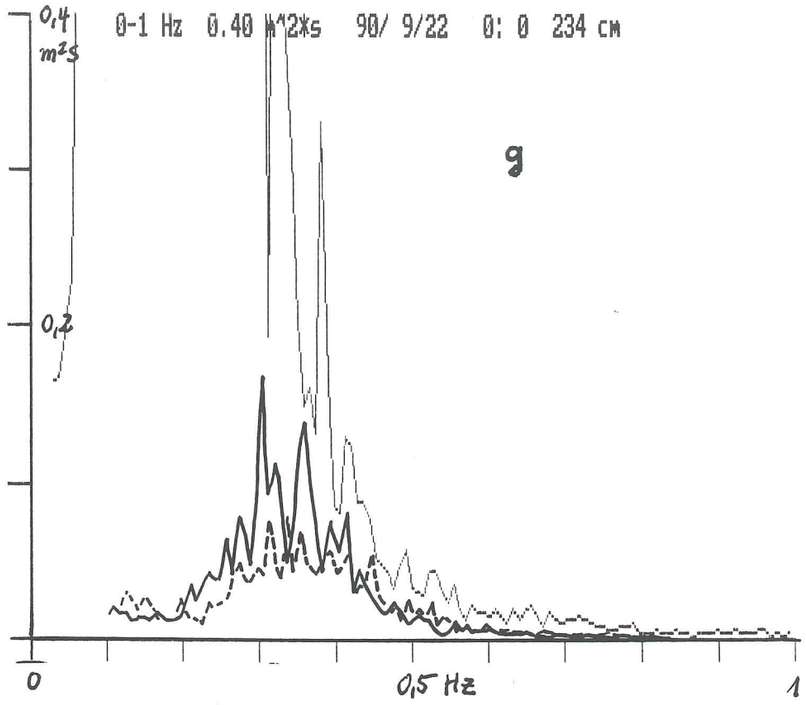

0,4
m²s
0-1 Hz 0.40 m^2%s 90/ 9/21 20: 0 152 cm
e
0,2
0
0,5Hz
1

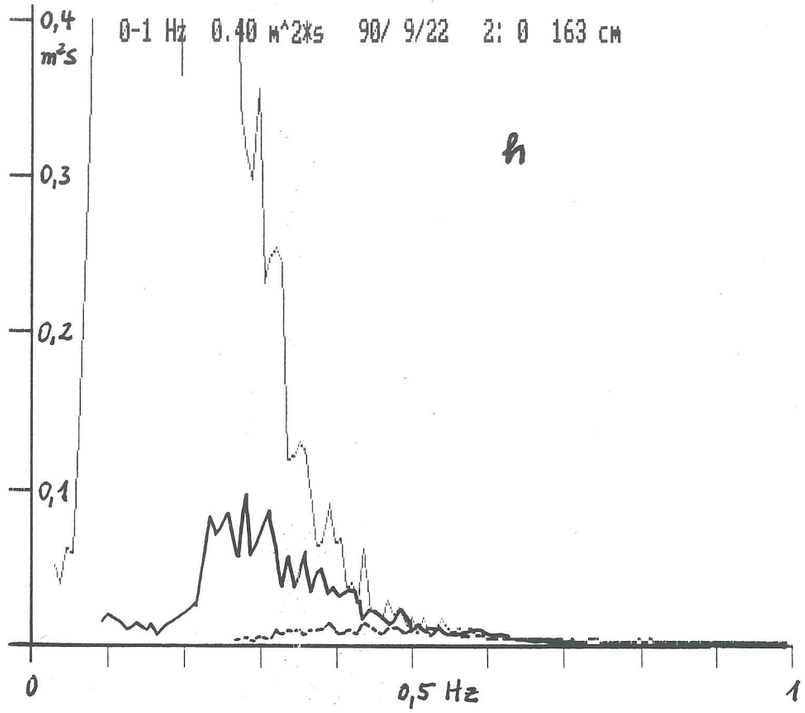

0,4
m²s
0-1 Hz 0.40 m^2%s 90/ 9/21 22: 0 212 cm
f
0,2
0
0,5 Hz
1

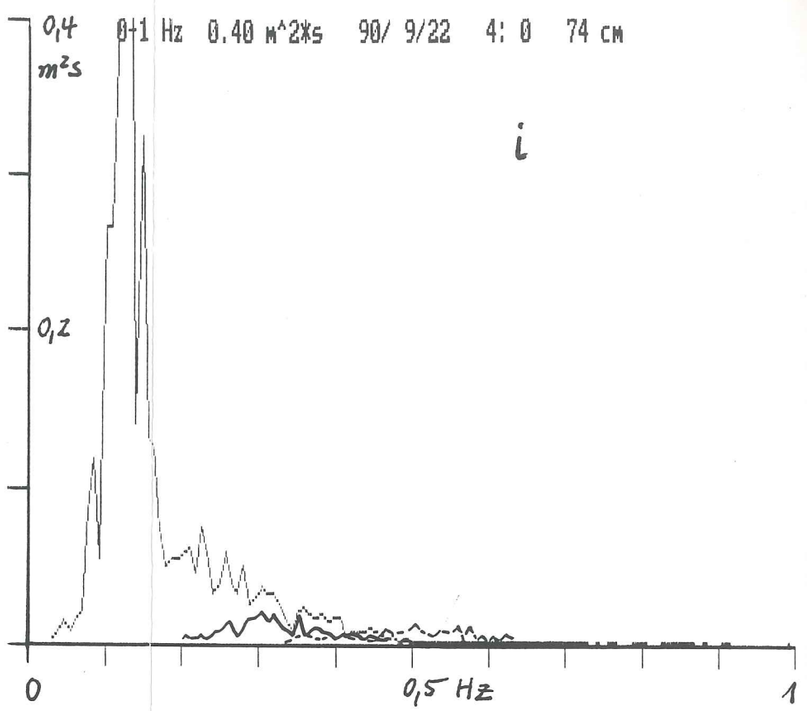

2
m²s
0-1 Hz 2.00 m^2%s 90/ 9/21 18: 0 143 cm
1
0
0,5 Hz
1

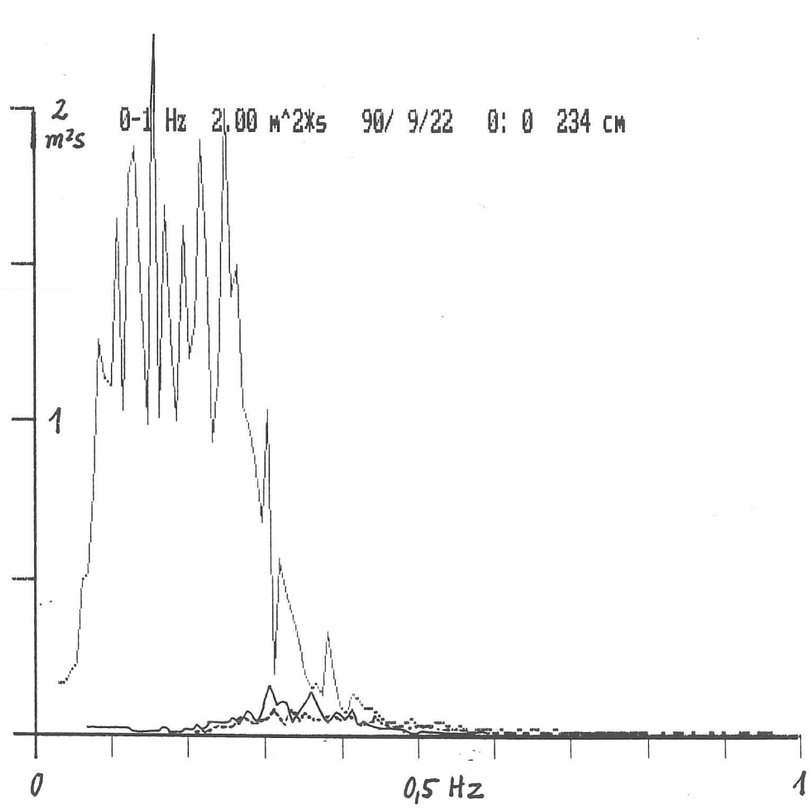

2
m²s
0-1 Hz 2.00 m^2%s 90/ 9/21 20: 0 152 cm
1
0
0,5 Hz
1

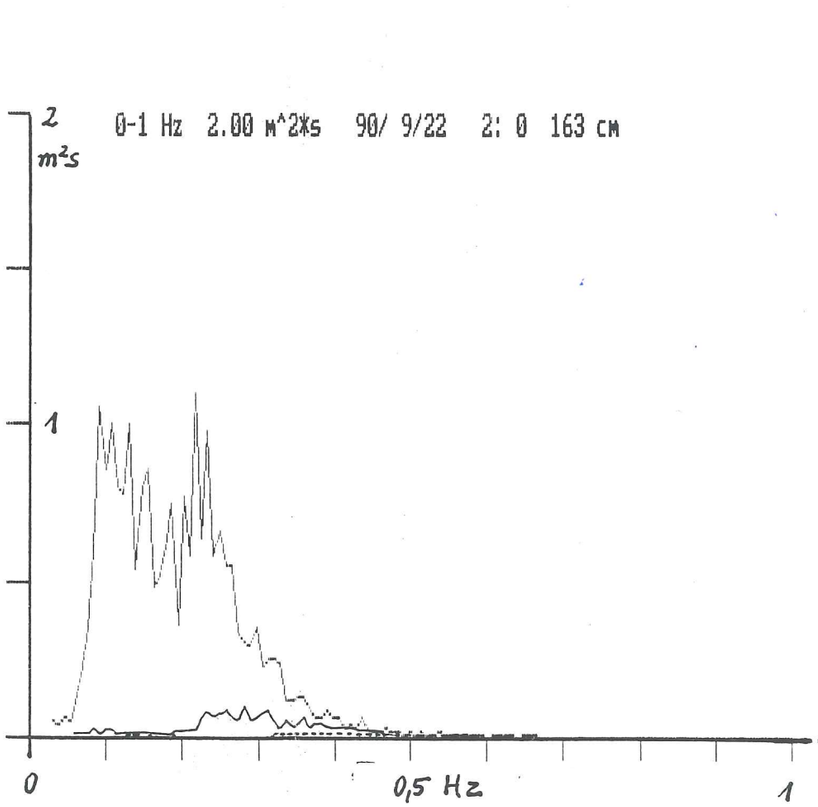

2
m²s
0-1 Hz 2.00 m^2%s 90/ 9/21 22: 0 212 cm
1
0
0,5 Hz
1

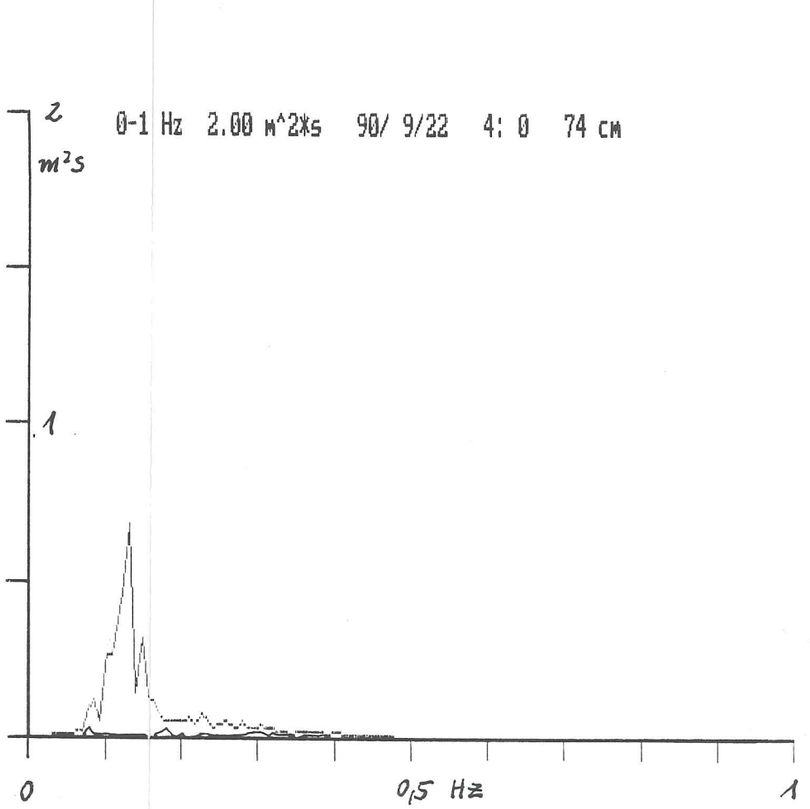

0,4
m²s
0-1 Hz 0.40 м^2%s 90/ 9/22 0: 0 234 см
g
0,2
0
0,5 Hz
1


0,4
m²s
0-1 Hz 0.40 м^2%s 90/ 9/22 2: 0 163 см
h
0,3
0,2
0,1
0
0,5 Hz
1


0,4
m²s
0-1 Hz 0.40 м^2%s 90/ 9/22 4: 0 74 см
i
0,2
0
0,5 Hz
1


2
m²s
0-1 Hz 2.00 м^2%s 90/ 9/22 0: 0 234 см
1
0
0,5 Hz
1


2
m²s
0-1 Hz 2.00 м^2%s 90/ 9/22 2: 0 163 см
1
0
0,5 Hz
1


2
m²s
0-1 Hz 2.00 м^2%s 90/ 9/22 4: 0 74 см
1
0
0,5 Hz
1

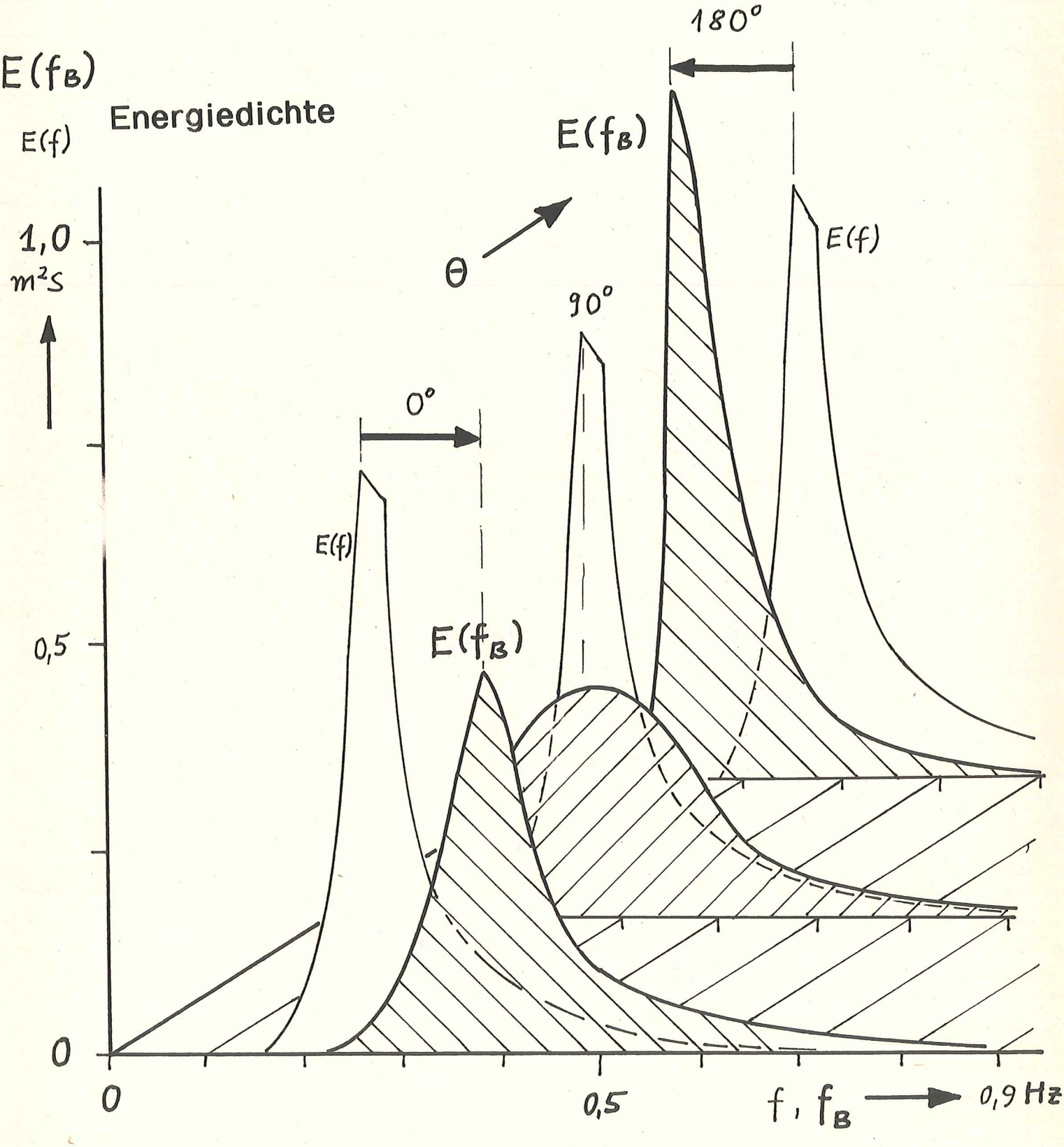


Abb. 20: Begegnungsspektren $E(f_B)$ wie in Abb. 19, jedoch berechnet für extrem flaches Wasser (Wassertiefe h = 1 m).

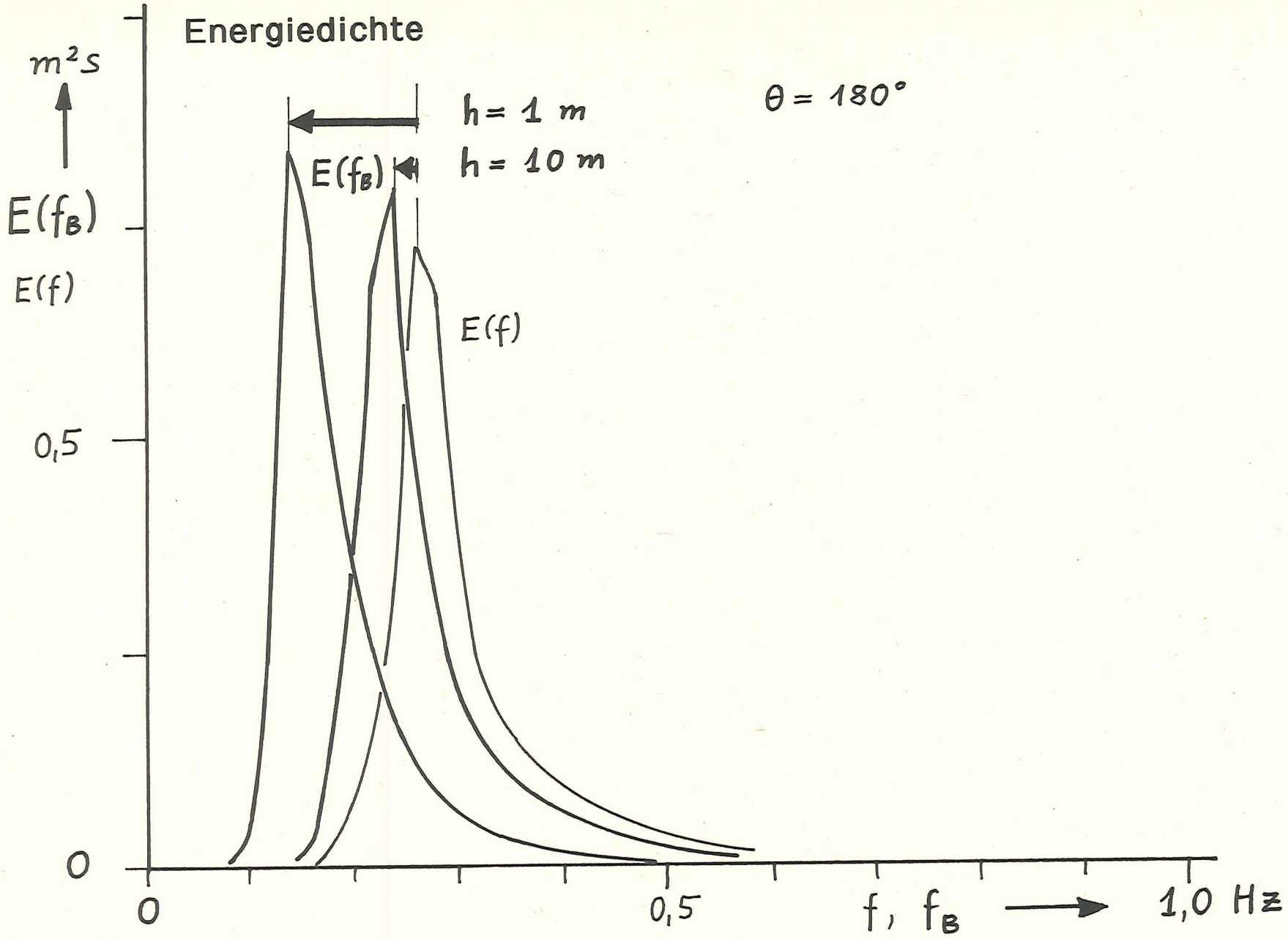


Abb. 21: Begegnungsspektren $E(f_B)$ wie in Abb. 20, jedoch für zwei unterschiedliche Wassertiefen h = 1 m und h = 10 m und Wellenlaufrichtung entgegen Strömungsrichtung ($\theta = 180°$).

nicht eingeschaltet hatte. "Brokdorf" hatte zu diesem Zeitpunkt noch einen höheren Wasserstand und ein hohes, extrem spitzes Spektrum. Obwohl der Seegang wegen des abnehmenden Windes allgemein kleiner wird, sind Reste dieser niederfrequenten Spitze - wahrscheinlich wegen günstiger Randbedingungen - auch zwei Stunden später bei "Brokdorf" noch vorhanden, während bei "Otterndorf" um 20.00 Uhr dieser extreme Seegang wahrscheinlich nicht vorhanden war und deshalb auch um 22.00 Uhr nicht mehr gemessen werden konnte.

Wir können aber gleichzeitig eine fetchabhängige Anfachung der Wellen beobachten, die naturgemäß bei höheren Frequenzen einsetzt: In den höherfrequenten Bereichen des Spektrums liegen die Energien bei "Brokdorf" in der Regel höher als bei der Station "Otterndorf" (s. z.B. Abb. 23 b, 14.00 Uhr).

Da wir bei "Otterndorf" einen geringeren Fetch mit weniger Anfachung *und* weniger Dämpfung infolge geringerer Laufstrecke über flaches Wasser gegenüber "Brokdorf" haben (längere Dämpfungsstrecke, aber *auch* längerer Fetch), wundert es nicht, daß sich die gemessenen Wellenhöhen nur geringfügig unterscheiden. Sie sind bei Otterndorf geringfügig höher. Auch der Dämpfungsfaktor D in Tab. 3 unterscheidet sich nur wenig, bis auf die Ausnahme der extremen Fetche bei "Brokdorf".

Über die physikalische Natur des Dämpfungsmechanismus kann man zunächst keine Aussagen machen. Es gibt im Verlauf der Elbe Schlickansammlungen, die eine besonders starke Wellendämpfung hervorrufen können. Ob dieser Effekt in unseren Messungen eine Rolle gespielt hat, muß noch untersucht werden.

2.2.9.2 Refraktion der Wellen durch die Bodentopographie im Elbeästuar

Unabhängig von der Dämpfung der Wellen durch direkte Wechselwirkung mit dem Boden, werden die Wellen bei sich ändernder Wassertiefe und schrägem Einfall von ihrer ursprünglichen Laufrichtung abgelenkt. Ursache ist die mit abnehmender Wassertiefe h ebenfalls abnehmende Phasengeschwindigkeit c_{ph} der Wellen

...

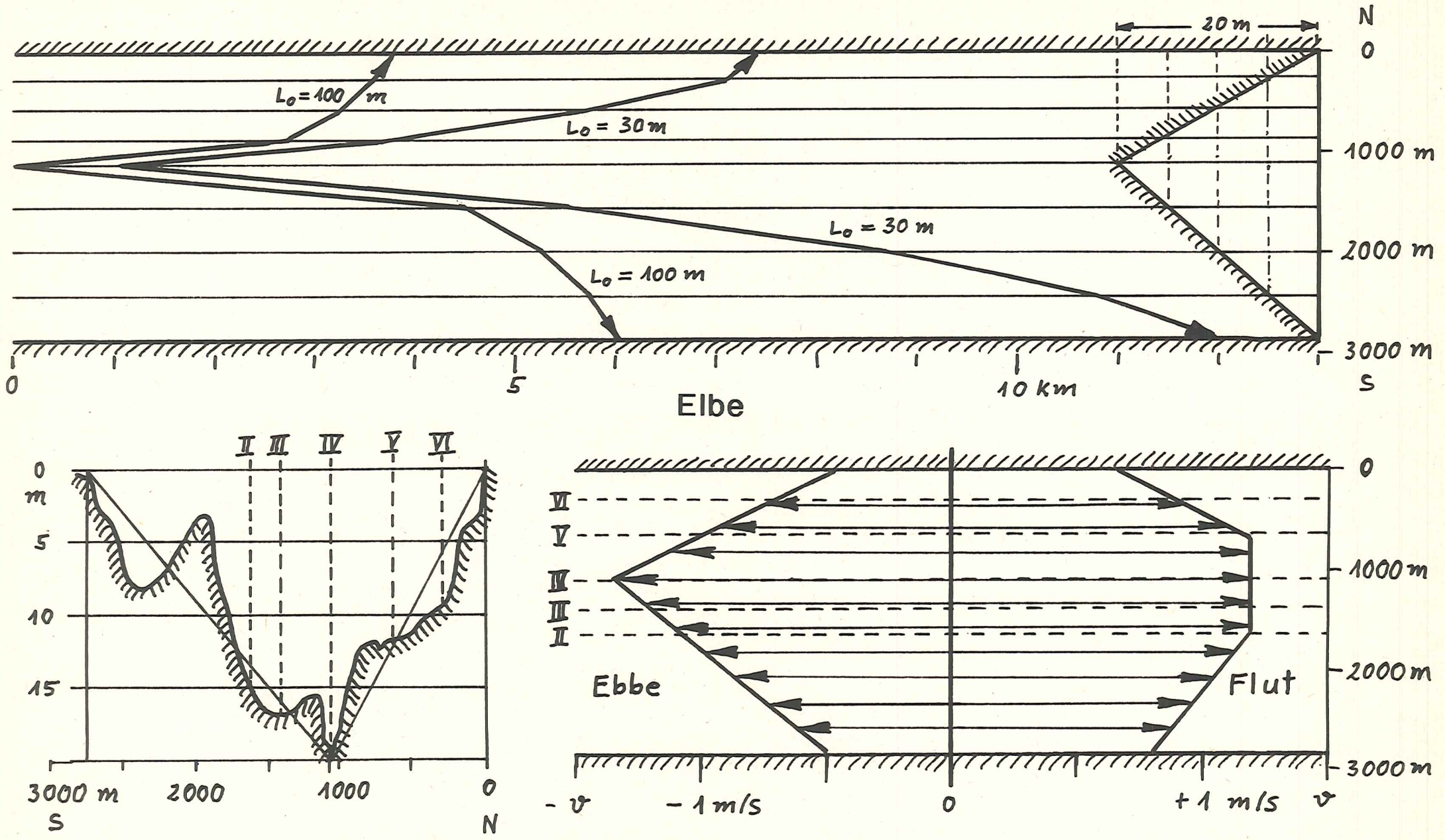


Abb. 24: Wellenrefraktion in der Elbe bei "Brokdorf" mit idealisiertem Tiefenprofil. Tatsächliches Tiefenprofil s. unten links. Idealisierte Strömungsprofile s. unten rechts. II-VI: Lage der Stömungsprofile quer über die Elbe.

$$c_{ph} = \sqrt{(gL/2\pi) \cdot \tanh(2\pi h/L)}$$

Im einfachsten Fall von zum Ufer parallelen Tiefenlinien nimmt der Winkel φ zwischen der Laufrichtung der Wellen und einer zum Ufer senkrechten Linie gemäß dem Snelliusschen Brechungsgesetz ab:

$$\frac{\sin\varphi}{\sin\varphi_o} = \frac{c_{ph}}{c_{ph_o}} = \frac{L}{L_o}$$

Der Index $_o$ kennzeichnet den jeweiligen Wert für Tiefwasser.
Die Wellen werden umso stärker in Richtung flacheres Wasser abgelenkt, je länger die Wellen und je stärker der Gradient der Tiefenänderung ist.

In Abb. 24 ist das Tiefenprofil der Elbe bei Brokdorf eingezeichnet und durch ein stark idealisiertes V-förmiges Profil ersetzt worden. Außerdem ist der Weg von Wellenkomponenten von 30 m bzw. 100 m Wellenlänge aufgezeigt, die in Strommitte bzw. der zur maximalen Tiefe gehörenden Tiefenlinie unter $\varphi_o = 85°$ eintreten.

Die Wellen werden ausnahmslos zu den Ufern hingebeugt und enden je nach Eintrittswellenlänge früher oder später am Ufer, wo ihre Energie vernichtet oder teilreflektiert wird. So wird einem Wellensystem in einem solchen Flußbett laufend Energie entzogen.

Im Falle einer über den Querschnitt der Elbe konstanten Strömungsgeschwindigkeit werden die Laufstrecken der Wellen entweder verlängert oder verkürzt, je nachdem ob die Strömung in oder entgegen der Laufrichtung der Wellen gerichtet ist.

Das Bild ändert sich jedoch erheblich, wenn wir über den Stromquerschnitt unterschiedliche Strömungsgeschwindigkeiten haben.

...

2.2.9.3 Refraktion der Wellen durch inhomogene Strömungsfelder im Elbeästuar

Für die weitere Interpretation wurden Strömungsmessungen herangezogen, mit deren Hilfe der Durchfluß der Elbe bestimmt werden sollte (Mitteilungen der Wasser- und Schiffahrtsdirektion Hamburg, Nr. 16: Strömungsverhältnisse und Wassermengen der Tide-Elbe, Hamburg 1967).

Die Messungen wurden als Punktmessungen mit Flügelstrommessern durchgeführt. Bei "Brokdorf" wurden z.B. auf **5** Meßlotrechten (II-VI) in **4-6** Tiefenhorizonten gemessen und über diese Messungen gemittelt. Die Messungen erfolgten über eine volle Tide.

Für "Brokdorf" gibt es eine Meßserie bei NW-Wind, Stärke 6, abnehmend auf Stärke 3. Die Stromprofile über den Elbquerschnitt zeigen ein deutliches Maximum in Strommitte (tiefste Stelle). Die Form des Profils ist außer in der Nähe der Kenterzeiten jeweils für Ebbe und Flut annähernd gleich und ist in Abb. 24 (rechts unten) grob vereinfacht dargestellt. Dabei ist für die folgenden Betrachtungen der genaue Wert der Strömungsgeschwindigkeiten unwesentlich. Es interessieren nur die Strömungsgradienten.

Man hatte früher schon vermutet, daß Meereswellen von starken auf ein schmales Band begrenzten Meeresströmungen wie dem Golf-Strom und dem Agulhas-Strom abgelenkt, teilweise oder total reflektiert oder innerhalb eines strahlförmigen (jetlike) Stromes eingefangen (trapped) werden können. In der bereits erwähnten Arbeit von D.H. Peregrine finden sich erste Berechnungen. K.E. Kenyon hat das Thema später ausführlicher bearbeitet ("Wave Refraction on Ocean Currents", Deep Sea Res., Vol. 18, No. 10, 1971).

Die allgemeine Theorie über die Ausbreitung von Wellen (Strahlen) in einem inhomogenen sich bewegenden Medium in der sog. geometrischen Optik-Näherung (Wellenamplitude und -Frequenz ändern sich nur geringfügig innerhalb einer Wellenlänge) läßt sich auf die Ausbreitung von Oberflächen-Schwerewellen in einem inhomogenen stationären Strömungsfeld übertragen.

...

Allgemein gilt: $\omega_B = \omega_0 + \vec{K} \cdot \vec{V}$, wobei $W = 2\pi f$ und mit dem Index B die Begegnungsfrequenz im ortsfesten Koordinatensystem und mit 0 die Frequenz im mitbewegten System bezeichnet wird, $\vec{K}(x)$ und $\vec{V}(x)$ sind der Wellenzahlvektor und der Strömungsvektor, beide Funktionen des Ortsvektors $\vec{x}$.
Beschränken wir uns auf zweidimensionale Felder in der x, y-Ebene, ergibt sich eine Näherungsformel für den Krümmungsradius R der Strahlen:

$$R \approx c^{\circ}_{gr} / \zeta \quad , \text{ wobei}$$

$c^{\circ}_{gr} = \partial W_0 / \partial k$ die Gruppengeschwindigkeit der Wellen relativ zur Strömung und ζ die Komponente der Strömungs-Vorticity in der positiven z-Richtung ist (außerdem $c^{\circ}_{gr} >> V$).

Hieraus ergeben sich folgende Aussagen für die Wellen-Strömungswechselwirkung (Refraktion):

a) $R = \infty$, d.h. die Strahlen sind gerade Linien, wenn die Strömungsgeschwindigkeit konstant ist ($\zeta = 0$).

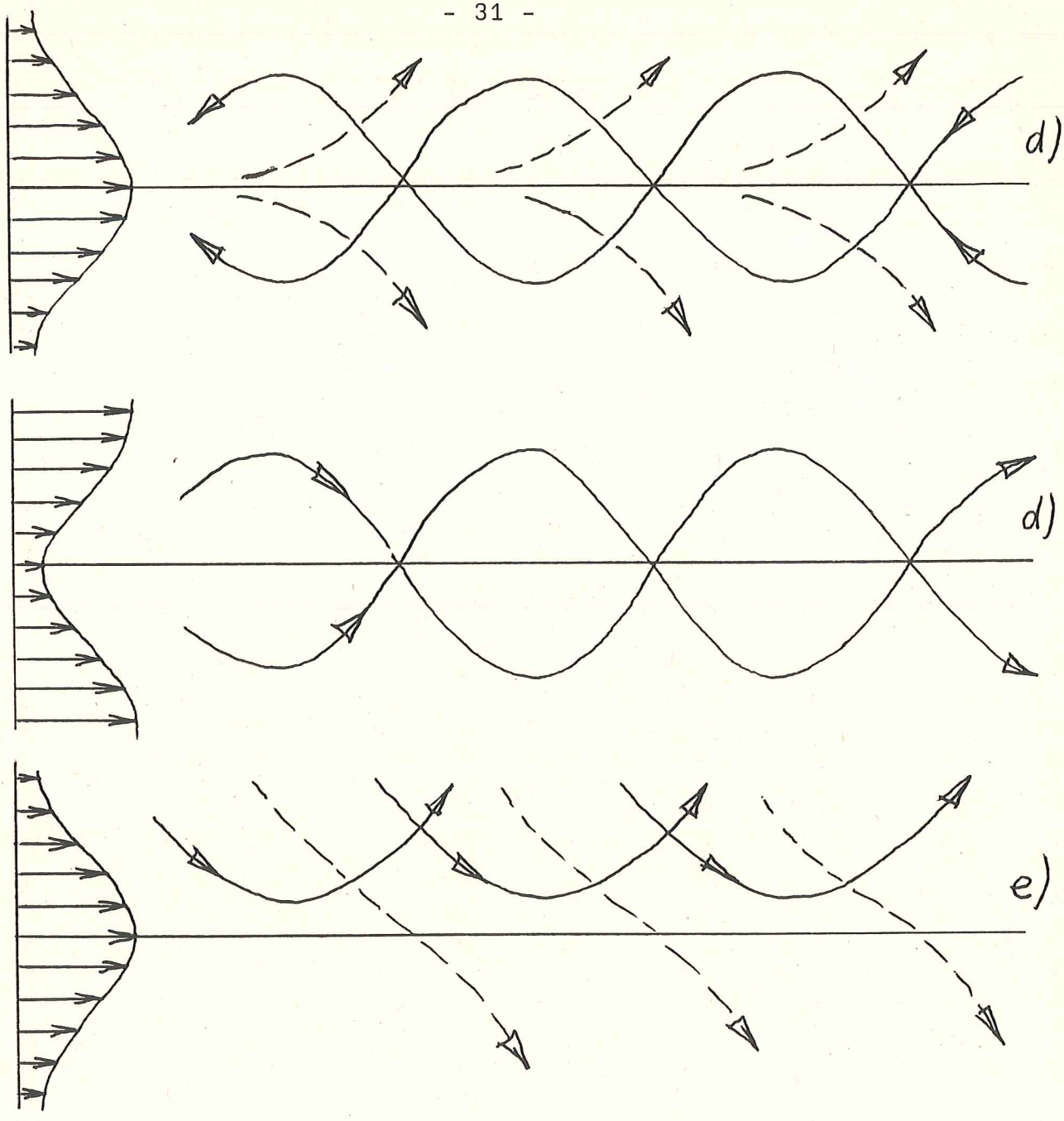
b) Der Krümmungsradius der Strahlen charakterisiert den Refraktionseffekt. Er verringert sich mit zunehmender Strömungs--Vorticity und abnehmender Gruppengeschwindigkeit.

c) Wellen, die sich mit (entgegen) einer variablen Strömung bewegen, werden in Richtung abnehmender (zunehmender) Strömungsgeschwindigkeit abgelenkt.

d) Deshalb können bei den entsprechenden Bedingungen Wellen, die mit (entgegen) einer Strömung laufen, in Bereichen der Strömung eingefangen (trapped) werden, wo diese ein lokales Minimum (Maximum) der Strömungsgeschwindigkeit hat.

e) Außerdem können Wellen,die mit (entgegen) einer Strömung laufen, an einem lokalen Maximum (Minimum) der Strömungsgeschwindigkeit teilweise oder total reflektiert werden.

...



In Tiefwasser lautet die Dispersionsgleichung

$$\omega_o = \sqrt{gk}$$

und die Gleichung für R wird:

$$R = g/(2\, w_o \zeta) = g/(4\pi\, fo\, \zeta),$$

d.h. die Wellen werden umso stärker abgelenkt je höher ihre Frequenz ist. Das ist genau die entgegengesetzte Wirkung wie bei der Refraktion der Wellen im Flachwasser. Refraktion durch inhomogene Strömungen gibt es sowohl im Tief- als auch im Flachwasser.

Haben wir es wie in der Elbe mit einer (idealisierten) Scheerströ-

...

mung zu tun, wo die Strömungsgeschwindigkeit nur vom Abstand von der Strommitte abhängt, läßt sich R sowohl angenähert als auch exakt ausrechnen (s. Kenyon).

Wir haben z.B. für den Fall der Ebbe mit einer den Wellen entgegengesetzten Strömung ein V-förmiges Strömungsprofil

$$u(y) = my \quad \text{für } y \geq o$$
$$u(y) = o \quad \text{für } y < o$$
$$v(x) = o \quad \text{für alle } x$$

Der Strömungsgradient m ist

$$m = -8 \cdot 10^{-4}\ s^{-1} \quad \text{im Nordteil der Elbe}$$
$$m = -5 \cdot 10^{-4}\ s^{-1} \quad \text{im Südteil der Elbe}$$

Die Vorticity ist

$$\zeta = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} = -m, \text{ d.h.}$$

$$R \approx g/(4\pi f_o\, m)$$

Wir können auch für den Fall der Refraktion infolge einer Strömung das Snelliussche Brechungsgesetz angeben:

$$\frac{\sin\psi}{\sin\psi_o} = \left[1 - \frac{u}{c^o_{ph}} \sin\psi_o\right]^{-2}$$

ψ ist der Winkel zwischen der Wellenlaufrichtung und der y-Achse. ψ_o ist der Winkel, unter dem die Wellen in das Strömungsfeld eintreten. ψ hängt von der Strömungsgeschwindigkeit u, der Wellenfrequenz f_o ($c^o_{ph} = g/2\pi f_o$) und dem Eintrittswinkel ψ_o ab.

...

Uns interessiert der Fall, in dem die Wellen innerhalb des Strömungsfeldes laufen (d). In Abb. 25 sind für zwei Wellenkomponenten mit unterschiedlicher Frequenz bzw. Periode die gebeugten Strahlen bei verschiedenen Eintrittswinkeln eingetragen worden. Man sieht, daß die kürzeren Wellen stärker gebeugt werden als die langen. Man beachte, daß die Komponenten eines Windseegangs eine breite Richtungsverteilung haben können. Kurze Wellenkomponenten (T = 3 s), die von der Strommitte senkrecht auf das Ufer zulaufen, werden zurückgebeugt und verlassen das Strömungsfeld nicht. Bei Wellenperioden von 10 s können hingegen Komponenten, die zu steil auf das Ufer zu starten, gegen das Ufer laufen und ihre Energie verlieren.

Generell wirkt jedoch ein strahlförmiges Stromfeld in Gegenrichtung wie eine Falle oder ein Wellenleiter für Wellen bis zu einer bestimmten Wellenperiode.

2.2.9.4 Kombinierte Wirkung von Flachwasser- und Strömungsrefraktion

Im Falle einer mitlaufenden Strömung (Flut) mit dem Strömungsprofil aus Abb. 24, würden die Wellen in Strommitte unabgelenkt weiterlaufen (v = const.), während sie im Uferbereich zu den Rändern hin abgelenkt würden. Diese Refraktion erfolgt also im gleichen Sinne wie die Refraktion der Wellen infolge abnehmender Wassertiefe. Allerdings ist die Ablenkung im ersten Fall umso stärker, je kürzer die Wellen, im zweiten Fall, je länger sie sind.
Für das System - Wellen gegen "Strahlstrom" - sollten sich beide Effekte zumindest teilweise kompensieren. Auf diese Weise sollte bei bestimmten Wellenlängen infolge guter "Anpassung" an den Wellenleiter eine gute Durchlässigkeit für ausgewählte Wellenlängenbereiche entstehen.

Gehen wir weiterhin von der Annahme aus, daß die Wellen bevorzugt der Fahrrinne folgen, wäre das Konzept eines abgestimmten Wellenleiters eine plausible Erklärung für das Auftreten der extrem schmalbandigen, niederfrequenten Spektren und der daraus abgeleiteten extrem langen effektiven Fetchlängen.

.....

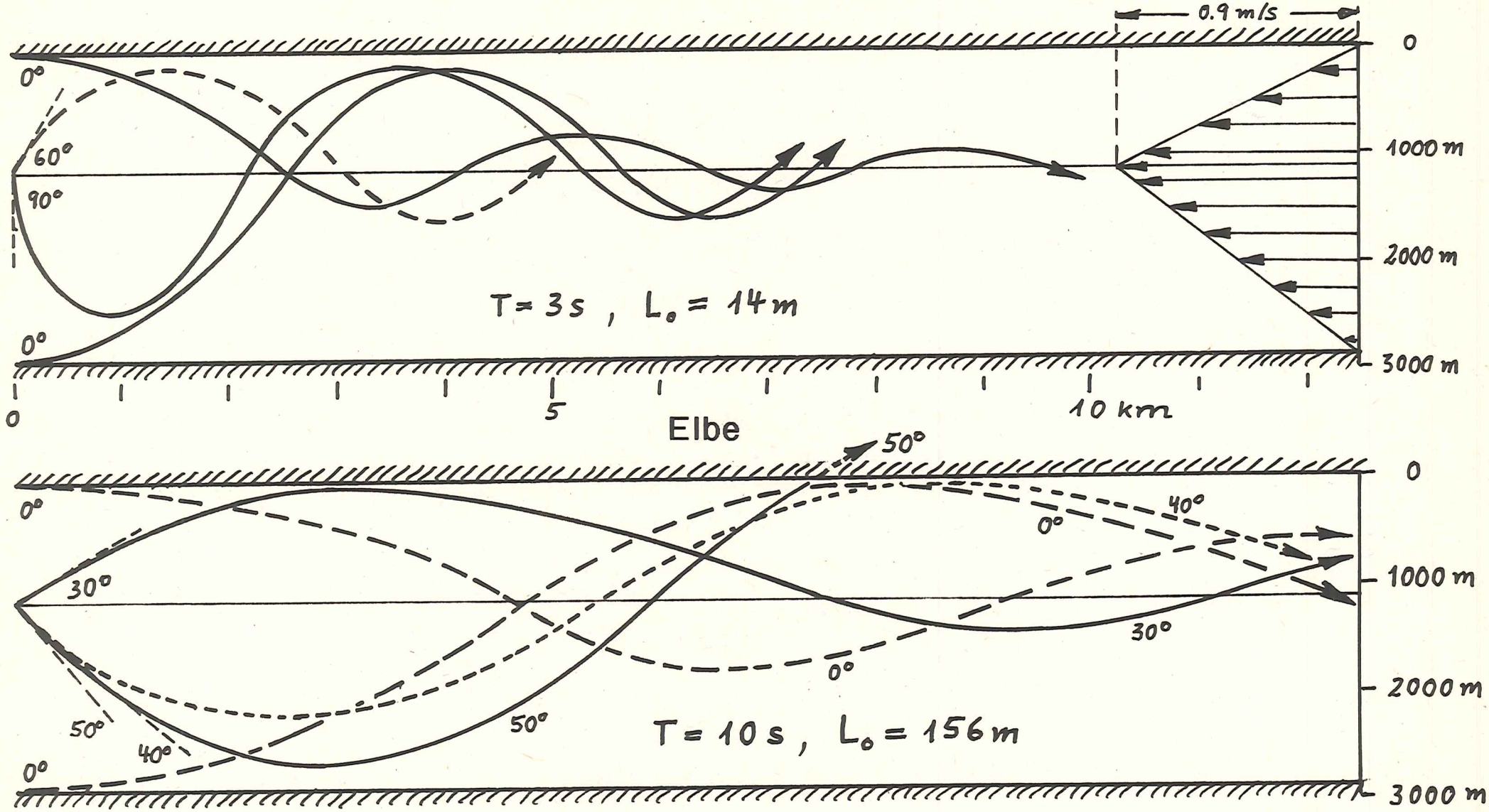


Abb. 25: Wellenrefraktion in der Elbe bei "Brokdorf" mit idealisiertem Strömungsprofil für zwei Wellenperioden T= 3 s und T= 10 s und verschiedene Eintrittswinkel.

Bisher waren die Meßstationen im Elbeästuar ausnahmslos am Rande der Fahrrinne aufgestellt worden. Das BSH plant noch im Winter 1992/93 Kontrollmessungen mit zusätzlichen Stationen auf dem Watt, um auszuschließen, daß der langwellige Seegang auch die (überfluteten) Watten überqueren kann oder etwa dort aus ausbrandenden Wellen z.B. durch nichtlineare Prozesse entsteht.

Sollten sich die Annahmen über die Wirksamkeit der genannten Refraktionsprozesse in der Elbe bestätigen, muß man davon ausgehen, daß sie auch in den Küstengebieten mit vorgelagerten Inseln und in den Watten mit ihren Prielsystemen, d.h. also auch in dem "Küstenmodell" stärker als bisher beachtet werden müssen. Hier könnten durchaus auch ins offene Meer austretende Strahlströmungen oder inhomogene küstenparallele Strömungssysteme , die oben unter e) genannten Reflektionserscheinungen hervorrufen.

....

3 Zusammenfassung

Im Elbeästuar und im Verlauf der Elbe bis Hamburg wurden umfangreiche Seegangsmessungen an ausgewählten Stationen entlang der Fahrrinne durchgeführt. Die Messungen schließen zahlreiche Sturmflutlagen ein.
Die Qualität der Messungen (Seegangsspektren) ist gut. Es fällt jedoch die sehr starke Variabilität der Spektren, selbst zum gleichen Zeitpunkt, an den verschiedenen Meßorten auf.

Ein numerisches Modell für die Elbe, ähnlich wie es für die Küste im "Küstenmodell" entwickelt wurde, konnte nicht mehr entworfen werden.
Der Versuch, die Meßergebnisse mit Hilfe der JONSWAP-Fetchgesetze zu interpretieren, schlug wegen der Komplexität der Verhältnisse fehl.
Daraufhin wurden die einzelnen Wechselwirkungsprozesse, die für die Entwicklung und Dämpfung der Wellen wichtig sind, insbesondere die Wechselwirkung mit der Strömung, im einzelnen untersucht.
Dazu wurde zunächst ein beschränkter Datensatz ausgewählt.
Die Berücksichtigung der Doppler-Frequenzverschiebung durch ein homogenes Strömungsfeld im Wellenspektrum und im Richtungsspektrum vermochte zwar Tendenzen in der Deformation der Spektren zu erklären, die beobachteten Frequenzverschiebungen waren jedoch vom Betrag her in besonderen Fällen sehr viel größer als erwartet.
Diese besonderen Fälle gehen meist mit nordwestlichen Winden und Strömungen einher, die entgegengesetzt zur Laufrichtung der Wellen strömen (Ebbstrom).
Erst die Annahme von inhomogenen "Strahlströmungen", d.h. Strömungen, bei denen die Strömungsgeschwindigkeit in Strommitte ein Maximum hat und zu den Ufern abnimmt, eröffnete eine Erklärungsmöglichkeit. Diese Annahme wird durch Strömungsmessungen, insbesondere bei der erwähnten Gegenstromsituation gestützt.

....

Im allgemeinen werden die Wellen infolge der vorherrschenden Tiefengradienten zu den Ufern hin gebeugt und verlieren so laufend Energie. Ein Gegenstrahlstrom wirkt diesem Refraktionsprozeß jedoch entgegen und lenkt die Wellen in Richtung Strommitte (Strommaximum) ab. Die Wellen werden so eingefangen und erreichen das Ufer überhaupt nicht oder erst nach einer längeren weniger gekrümmten Laufstrecke.

Die Kombination beider Refraktionsmechanismen kann auf diese Weise wie ein auf bevorzugte Frequenzen abgestimmter Wellenleiter wirken und so die beobachteten extremen Unterschiede in den Peakfrequenzen und die sich daraus ergebenden effektiven Fechtlängen erklären. Diese Erklärung setzt allerdings voraus, daß sich die Wellen bevorzugt entlang der Fahrrinne bewegen, auch wenn bei Sturmflutlagen die umgebenden Wattflächen mit Wasser bedeckt sind.

...

4 Zukünftige Entwicklung

Eine quantitative Beschreibung der Seegangsverhältnisse im Elbeästuar und der Elbe ist nur mit Hilfe eines gekoppelten Seegangs-, Strömungs- und Wasserstandsmodells möglich. Dabei müssen die Wechselwirkungsprozesse zwischen Wellen und inhomogenen Strömungen besonders berücksichtigt werden. Inwieweit auch vertikale Strömungsinhomogenitäten eine Rolle spielen, muß noch untersucht werden.

Bisher wurde nur ein geringer, ausgewählter Teil der vorhandenen Meßdaten benutzt. Für weitere Auswertungen und die Verifikation kommender Modellentwicklungen steht ein umfangreicher Datensatz zur Verfügung.

Es sind weitere Messungen vorgesehen, die die bisherigen Ergebnisse stützen sollen.

Zwischen Strom- und Hafenbau, GKSS und BSH wurde vereinbart, gemeinsam dafür zu sorgen, daß in das von Bund und Ländern geplante Expertensystem für die Elbe, das beim BSH enwickelt werden soll, neben der Wasserstands- und Strömungsvorhersage auch ein gekoppeltes Seegangsmodell eingearbeitet wird.

Mit der GKSS besteht Übereinstimmung, daß die hier behandelte Strömungs-Wellenwechselwirkung auch in dem im selben Projekt entwickelten "Küstenmodell" berücksichtigt werden sollte.

ANHANG 1

Die Seegangsmessungen bei Nienstedten und im Hamburger Hafengebiet

Wellenmeßprogramm Hamburger Hafen

1989 - 1992

Hamburg, September 1992

I N H A L T S V E R Z E I C H N I S

1.0 Vorbemerkungen

2.0 Meßprogramm

3.0 Installiertes Meßsystem

4.0 Datenerfassung und Auswertung
4.1 Meßprinzip
4.2 Fourieranalyse

5.0 Ergebnisse

6.0 Ausblick auf weitere Aktivitäten

7.0 Zusammenfassung

8.0 Anlagen
8.1 Lage der Messstationen
8.2 Errechnete maximale Wellenhöhen
8.3 Ausgewählte Messungen von Starkwindereignissen
8.4 Energiespektrum vom 19.04.1992 an den drei Meßstandorten
8.5 Betriebshandbuch

1.0 Vorbemerkungen

Die Häufung von Sturmfluten in Verbindung mit steigenden Sturmflutwasserständen innerhalb der letzten Jahrzehnte, hat die Diskussion über die Sicherheit der vorhandenen Hochwasserschutzanlagen neu entfacht.

Die zur Lösung dieser Aufgabe gebildete unabhängige Kommission für Sturmfluten im Unterelbebereich unter Einschluß des Hamburger Hafens hat hierfür Unterlagen erarbeitet und eine neue Bemessungshöhe für die Schutzbauwerke vorgeschlagen.

Ergänzend zur generellen Frage des höchsten möglichen Scheitelwertes eines Hochwasserereignisses mußte der Sicherheitszuschlag zur Abdekkung von Windstau und Wellenhöhe festgelegt werden.

Da die hierfür geltenden Formeln, zur Berechnung der maximalen Wellenhöhe, für tidebeeinflußte Systeme zu ungenau sind, hat man sich entschlossen, ein mehrjähriges Wellenmeßprogramm durchführen zu lassen.

Im folgenden soll über dieses Programm und erste Ergebnisse berichtet werden.

2.0 Meßprogramm

Ausgehend von der Entscheidung der Messung von Wellenparametern bei Sturmwetterereignissen im Bereich des Tidegewässers Elbe, wurden zwischen Hamburg und Vogelsand insgesamt zehn Stationen realisiert. Die Auswahl der Standorte erfolgte nach folgenden Kriterien:

- exponierte Lage,

- vorhandene Infrastruktur (Pfähle,Energieversorgung, etc.),

- günstige Voraussetzungen für Kontrollfahrten (Anlegemöglichkeit).

Unter den genannten Bedingungen wurden insgesamt drei Stationen im Hamburger Hafen (Nienstedten, Fischereihafen, Harburg) und die restlichen sieben Stationen zwischen Stade und Neuwerk installiert.

Das Meßprogramm wurde auf drei Jahre befristet, mit der Möglichkeit einer Verlängerung. Die Durchführung des Programms lag in den Händen von Strom- und Hafenbau und der Bundesanstalt für Seeschiffahrt und Hydrographie (BSH Abteilung M15).

3.0 Installiertes Meßsystem

Langjährige Erfahrungen des BSH mit in-situ Messungen von winderzeugtem Seegang wie JOHNSWAP, Ostsee, Steinhuder Meer, gaben den Ausschlag, das aktuelle Problem der Ermittlung von Seegangsparametern (Wellenhöhe, Wellenperiode) für das Tidegewässer Elbe mit folgendem System zu lösen:

- Feststehender Wellenmeßdraht mit einer Gesamtlänge von 6,0 m bzw. 8,0 m angehängt an Pfählen.

- Kontinuierliche Registrierung der Wellenhöhe und Periode oberhalb eines frei wählbaren Tidewasserstandes.

- Speicherung und Verarbeitung der registrierten Daten über einen Zeitraum von acht Wochen.

- Versorgung der Rechner und Meßeinheit in zwei Varianten, siehe auch Anlage 8.5,
  1. Fremdversorgung über 220 Volt Wechselspannung,
  2. Eigenversorgung über Solarpanel mit 17 Volt Gleichspannung.

Die vom BSH entwickelte Meß- und Registriereinheit ist in der Lage, selbst Wellen von nur wenigen Zentimetern Größe zu erfassen und auszuwerten. Darüberhinaus hat sich das Gesamtsystem nach anfänglichen Anpassungsproblemen im dreijährigen Wintereinsatz als sehr zuverlässig erwiesen.

4.0 Datenerfassung und Auswertung

4.1 Meßprinzip

Ein Wechelstrom (Frequenz 5 Hz) mit konstanter Amplitude fließt durch den Meßdraht, das Wasser und den Rückleiter zurück zur Stromquelle. Mit dem Wasserstand ändert sich der Widerstand des Stromkreises und damit der Spannungsabfall am Draht gegen Masse. Diese Spannung ist also ein Maß für den Wasserstand bzw. die Wellenhöhe, bezogen auf ein Referenzniveau.

Die gemessene Spannung ist proportional zum Widerstand des "trockenen" Drahtstücks oberhalb der Wasseroberfläche, wenn der Widerstand der Anordnung unter Wasser vernachlässigbar gering ist, d.h. das eingetauchte Drahtstück durch das Wasser an der Oberfläche kurzgeschlossen ist.

Die am Meßdraht anstehenden analogen Eingangsspannungen werden von einem Rechner im 0,5 sec.-Takt abgefragt und in Blöcken mit jeweils 256 Werten abgespeichert.

4.2 Fourieranalyse

Die abgespeicherten Blöcke werden nunmehr fouriertransformiert. Eine vorwählbare Anzahl solcher Teilspektren wird ermittelt. Das gesamte Spektrum besteht aus 14 Blöcken (Standardwert) mit einer Meßdauer von 0,5 sec. x 256 x 14 = 1792 sec. = 30 min.

Das Seegangsspektrum besteht aus insgesamt 128 Spektralwerten bei Frequenzwerten zwischen 0-1 Hz. Aus dem Spektrum werden die signifikante Wellenhöhe und die Peakfrequenz (Frequenz des spektralen Maximums) bestimmt. Außerdem wird die Differenz zwischen höchstem und niedrigsten Meßwert (Wasserstand) aus dem gesamtem Meßabschnitt gespeichert.

Das Ergebnis einer Seegangsmessung ist ein Datensatz, bestehend aus:

Stationsname, Datum, Zeit (Anfangszeit der Messung), signifikante Wellenhöhe, Peakfrequenz, mittlerer Wasserstand (bezogen auf den eingestellten Nullpunkt), Differenz zwischen höchstem und niedrigstem Wasserstand, 128 Spektralwerte in normierter Form.

Weitere Details können dem Betriebshandbuch, Abschnitt 8.5, entnommen werden.

5.0 Ergebnisse

Während der dreijährigen Meßkampagne konnten an allen Stationen Sturmflutereignisse registriert werden.

Das während des gesamten Meßprogramms gewonnene Datenmaterial ist im Ordner 1 nach Zeiten geordnet abgelegt.

Von diesem Material wurden insgesamt 15 Einzelereignisse für weitere Betrachtungen ausgewählt, Tabelle 1, wobei als Rechengrößen aus den Meßdaten folgende Parameter errechnet wurden.

- signifikante Wellenhöhe H_s [m]
- Peakfrequenz des Wellenspektrums F_p [s]
- Energiemaximum S_{max} [m²/s]
- Maximale Wasserspiegeldifferenz (Meßintervall 120 sec) H_{max} [m]
- Änderung des Wasserspiegels innerhalb einer Messung, ca. 30 Minuten W_T [m]

Die Lage der einzelnen Stationen kann der Anlage 8.1 entnommen werden. Als Zusatzinformation sind die maximal möglichen Fetchlängen in km angegeben, die nur während einer Messung erreicht wurden. Eine Abschätzung der maximal möglichen signifikanten Wellenhöhen an den drei Meßstationen kann der Anlage 8.2 entnommen werden. Für die einzelnen Stationen ergeben sich demnach folgende Werte:

- Station Nienstedten H_s = 1,76 m
- Station Fischereihafen H_s = 1,76 m
- Station Harburg H_s = 0,80 m

Erste Auswertungen der Spektren nach der Winterperiode 1989/90 in bezug auf signifikante Wellenhöhen der Station Nienstedten zeigten, daß die unter 8.2 ermittelten Werte als realistisch anzusehen sind. Zwar waren die Spektren wahrscheinlich durch zu geringen Abstand des Wellenmeßdrahtes zur Pfahlkonstruktion fehlerhaft (Bild 1), doch der mit H_{max} = 1,92 m registrierte Wert am 21.09., Tabelle 2, bei Windstärken von etwa 8 - 9 bestätigt in der Tendenz die errechneten Wellenhöhe von H_s = 1,76 m für die Station Nienstedten.

Der Versuch einer Zuordnung von signifikanter Wellenhöhe zu Windgeschwindigkeit und "Fetch" wie für Tiefwassersysteme (Bild 2) anwendbar, führte zu keinem brauchbaren Ergebnis.

Die in Tabelle 4 aus den Aufzeichnungen entnommenen Werte lassen keine Zuordnung erkennen.

Der in Bild 3 beispielhaft dargestellte zeitliche Verlauf der Zu- und Abnahme eines Seegangsspektrums (Station Nienstedten) zeigt anschaulich, wie sich ein winderzeugtes Wellensystem um die Peakfrequenz herum entwickelt.

Etwas komplizierter stellt sich das Wellenspektrum bei gleichzeitigem Auftreten von Dünung und Windsee dar. Die in Bild 4 aufgetragenen Darstellungen zeigen einen solchen Fall.

Die auf Bild 5 dargestellten Spektren zeigen, wie sich die Peakfrequenz bei begrenzten Fetchlängen verschiebt. Während sie im Fall der Station Nienstedten mit 13 km Fetchlänge bei 0,2 - 0,3 Hz liegt, erhält man für die Station Harburg einen Wert von 0,5 - 0,7 Hz.

Exemplarisch am Beispiel der Messungen des 19.04.1992 (Anlage 8.4) kann gezeigt werden, wie unterschiedlich Wellenhöhen und Perioden an unterschiedlichen Standorten ausfallen.

Während z.B. bei seinen Westwindlagen die Station Harburg durch ihre Leelage in bezug auf winderzeugte Wellen nur unbedeutende Wellenhöhen von wenigen cm erreichen, ergeben sich bei nord-westlichen Winden von 290° - 300°, mit etwa 8 - 10 m/s Windgeschwindigkeit, schon Wellenhöhen im Dezimeterbereich.

Die Stationen Nienstedten bzw. Fischereihafen erreichen wegen ihrer Leelage in diesem Fall nur geringfügig höhere Werte. Der zugehörige Wasserstand kann der Anlage 8.4.1 entnommen werden.

6.0 Ausblick auf weitere Aktivitäten

Mit dem dreijährigen Programm, der Messung von Seegang bei Starkwindereignissen im Tidegewässer Elbe, entstand umfangreiches Datenmaterial.

Die vorhandenen Datensätze reichen nach Aussage des BSH aus, um ein rechnergestütztes Tidemodell der Elbe zu erstellen.

Mit diesem Modell könnten dann für jeden Standort längs des Stromes die ungünstigsten Wellenhöhen errechnet werden. Dies gilt auch für den Hafenbereich Hamburg.

Im Ergebnis erhält man dann unterschiedliche Bemessungshöhen für die Hochwasserschutzbauwerke, die sich durch das Merkmal gleicher Sicherheit gegen Überströmen auszeichnen.

Die Erstellung eines Sturmfluttidemodells ist insofern von Bedeutung, da die bisher gemessenen Wellenhöhen wegen der vorherrschenden Windrichtungen nicht das Maximum darstellen.

Um hier zu verläßlichen Aussagen zu gelangen, sollte das installierte Meßprogramm weitergeführt werden und die gemessenen Werte zur weiteren Eichung in das Modell eingespeist werden.

In dieser Kombination von Naturmessungen und Rechnermodell könnte dann in relativ kurzer Zeit ein verläßliches Instrumentarium für zukünftige Entscheidungen des Hochwasserschutzes geschaffen werden.

7. Zusammenfassung

In den Jahren 1989 bis 1992 wurden an insgesamt zehn Stationen zwischen Vogelsand und dem Hamburger Hafen Seegang bei Sturmwetterereignissen gemessen.

Die im Hamburger Hafen an drei Stationen gewonnenen Meßdaten können der Anlage 8.3 "ausgewählte Messungen von Starkwindereignissen" entnommen werden.

Den Ergebnissen ist zu entnehmen, daß die vorliegenden Daten wegen ungünstiger Windrichtungen nicht die möglichen maximalen Wellenhöhen erbracht haben.

Weitere Messungen sollten deshalb auch in den folgenden Jahren durchgeführt werden.

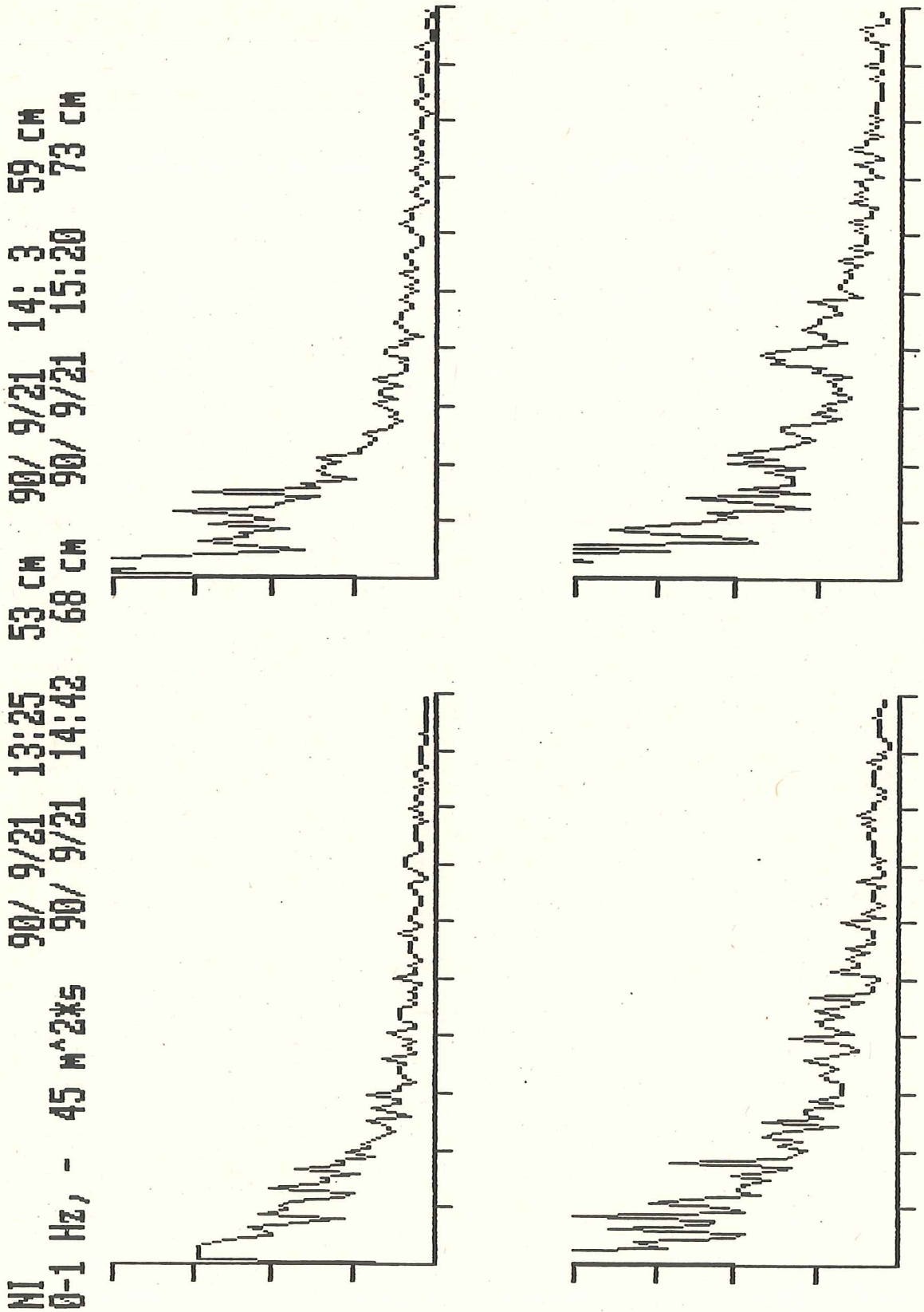
Darüberhinaus ist es von besonderem Interesse, die vorliegenden Daten in einem mathematischen Tidemodell der Elbe einzubringen, um somit für zukünftige Deichsicherungsmaßnahmen Bemessungsansätze für die maximalen Wellenhöhen und Perioden errechnen zu können.

Mit der weiteren Aufzeichnung von Seegang bei Sturmfluten können dann höhere gemessene Wellenparameter in das Modell eingespielt werden, womit die Aussagekraft des Rechenprogramms erhöht wird.

L i t e r a t u r :

(1) RICHTER Schiff im Seegang
15. Fortbildungskursus des Instituts für Schiffbau der Universität Hamburg
Kontaktstudium 1979 Hamburg

Hamburg, September 1992
Wü/la



Beispiel für ein durch Wellenüber-
lagerungen am Meßpfahl fehlerhaft
ausgewertetes Energiespektrum

– Station Nienstedten –

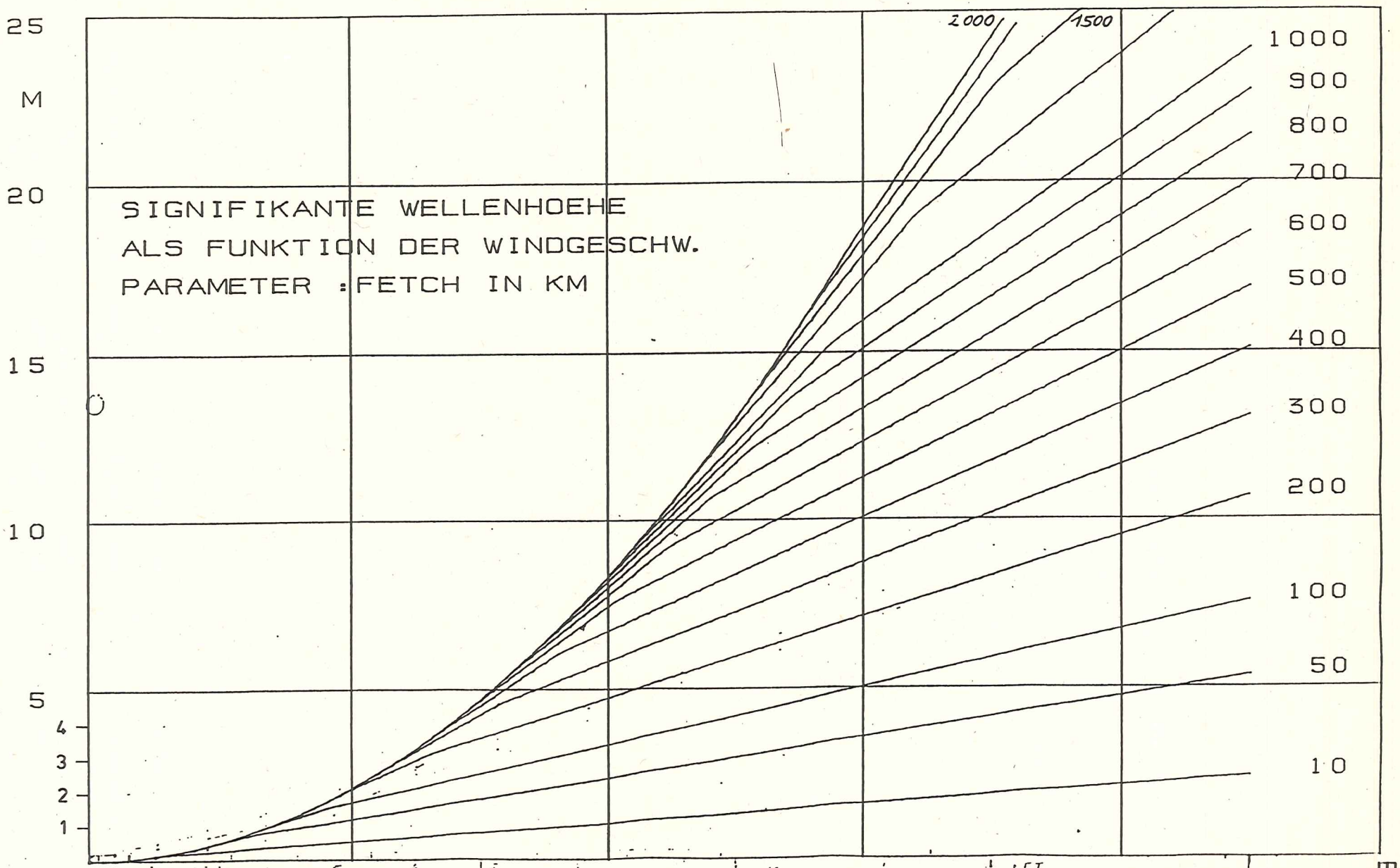
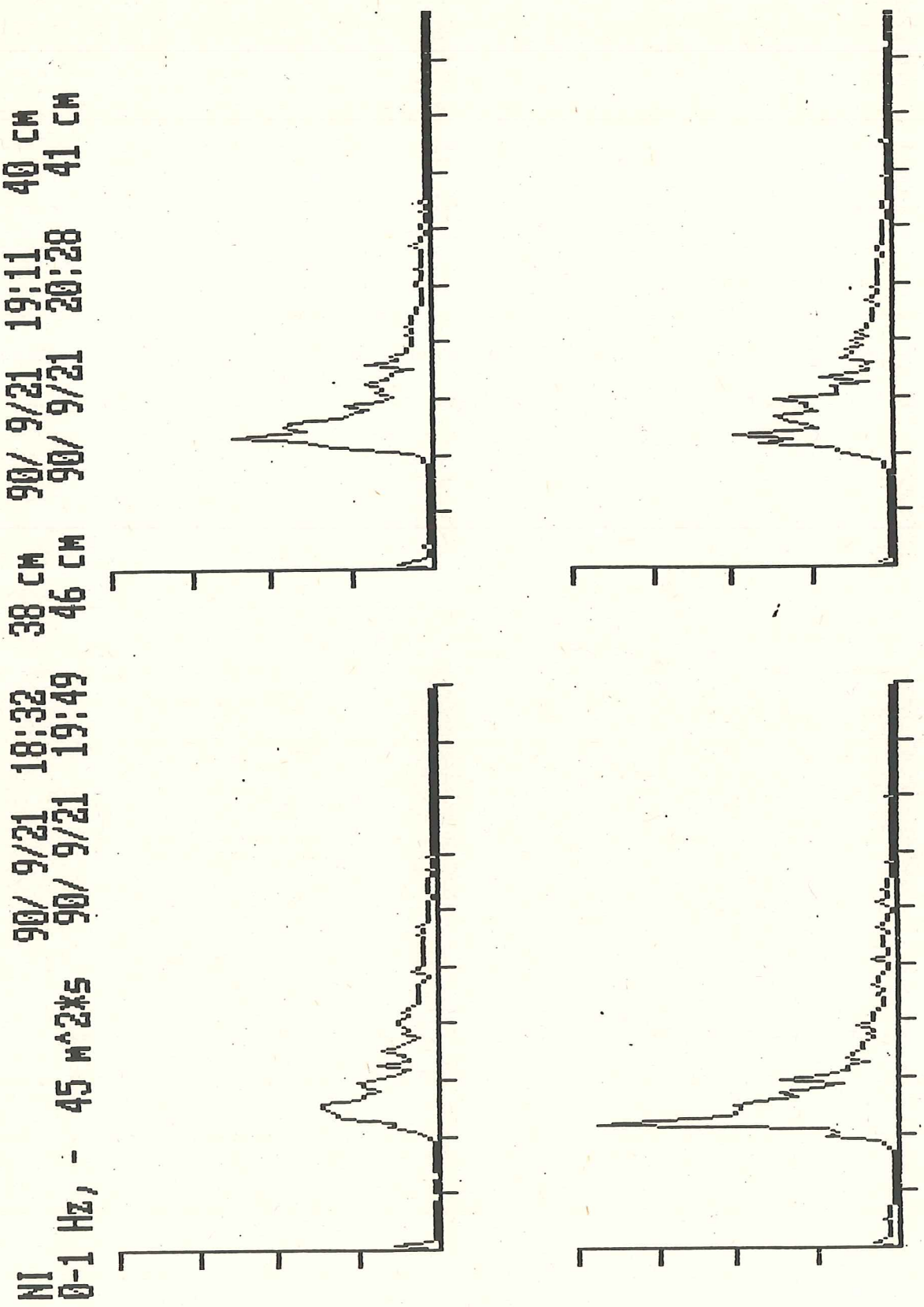
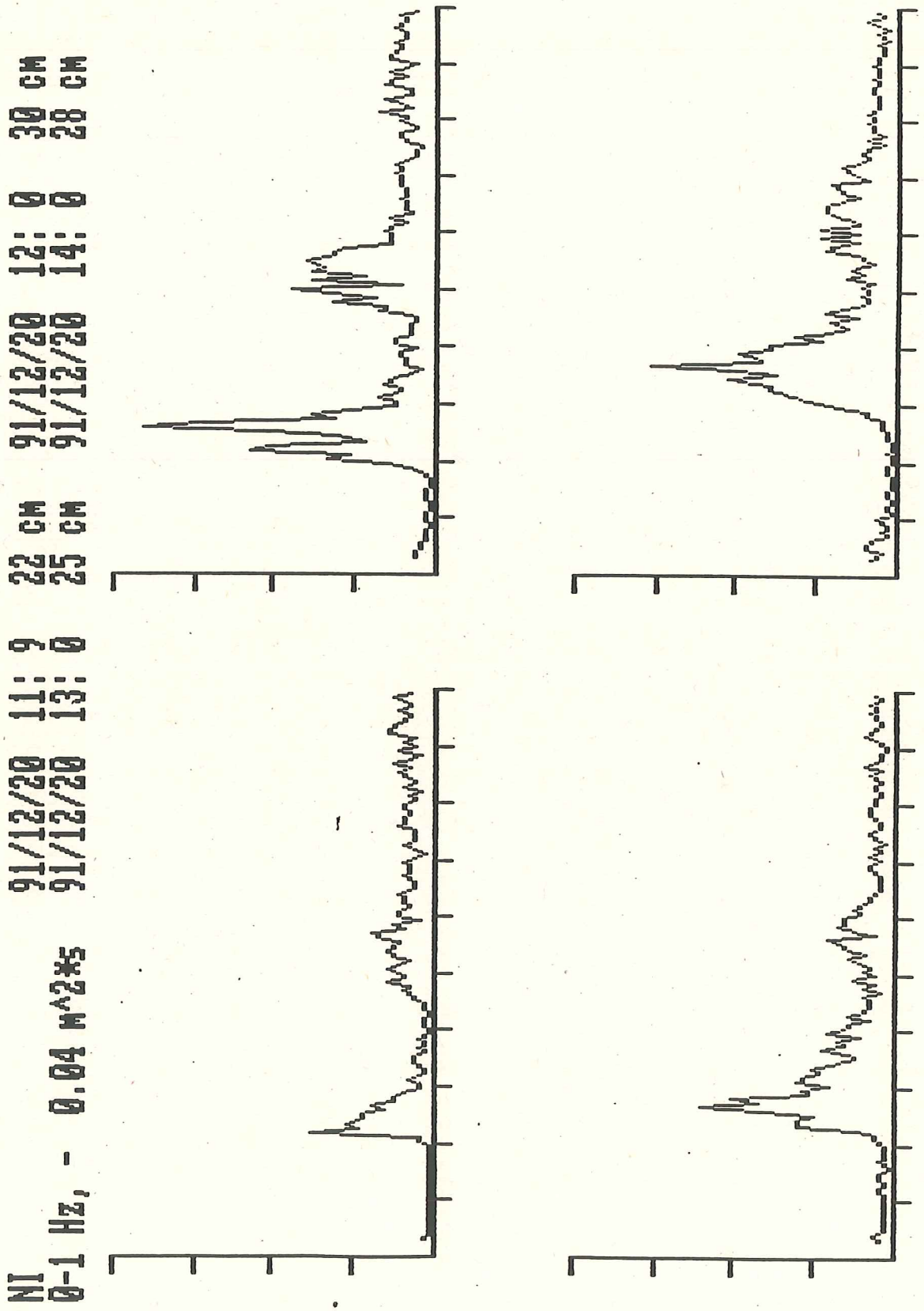

SIGNIFIKANTE WELLENHOEHE
ALS FUNKTION DER WINDGESCHW.
PARAMETER : FETCH IN KM
25
M
20
15
10
5
4
3
2
1
10
20
30
40
M/S
2000
1500
1000
900
800
700
600
500
400
300
200
100
50
10

Bild 2



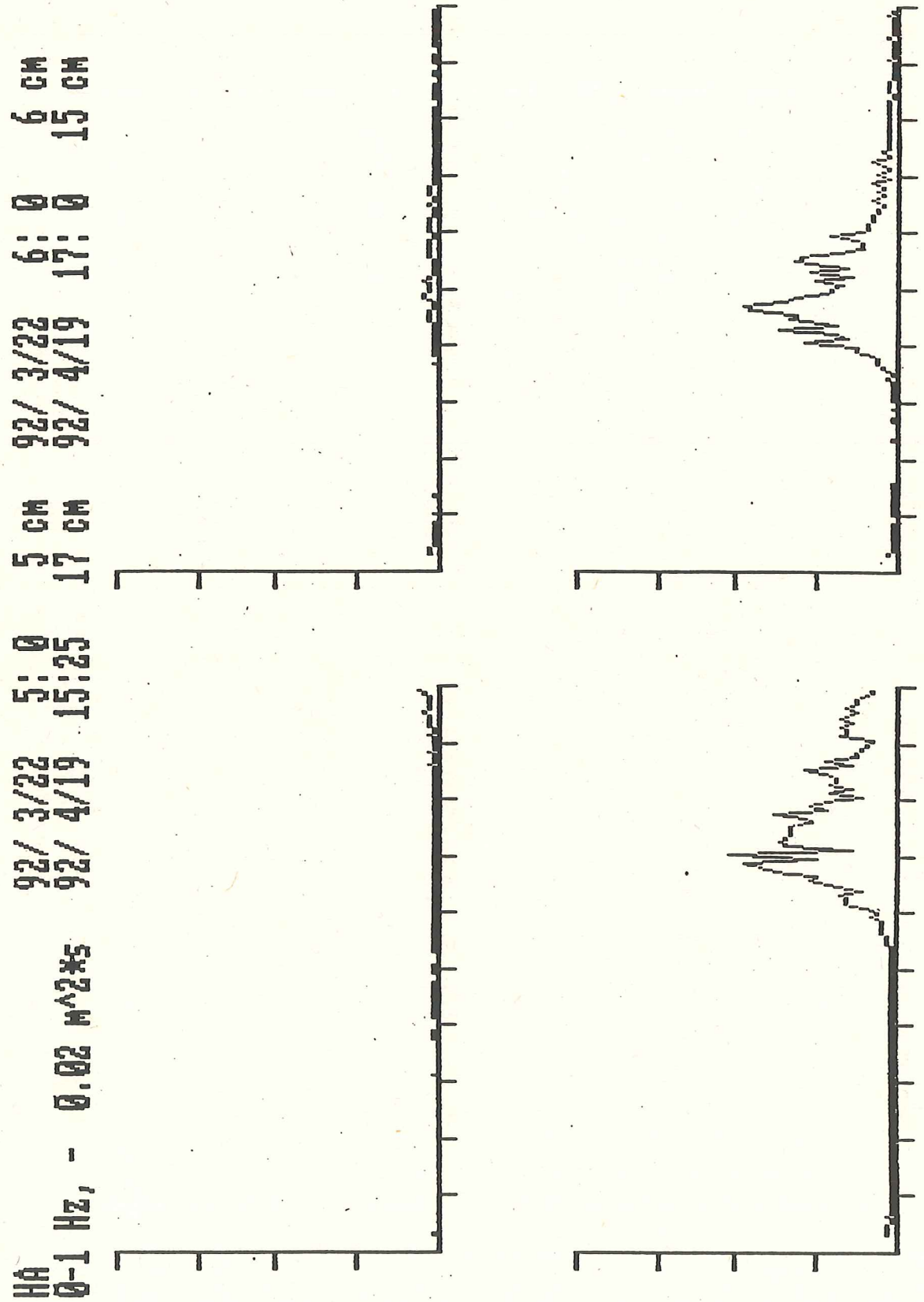
Beispiel der Zu- und Abnahme
eines winderzeugten Seegangs

– Station Nienstedten –



Doppelpeakspektren bestehend aus
Dünungs– und Windseeanteilen

– Station Nienstedten –



Energiespektren

– Station Harburg –

Tabelle 1 Zusammenstellung aufgezeichneter Meßdaten bei Starkwindereignissen

Nr.	Station (Ort)	Datum (Tag)	Windrichtung (°)	Windstärke (m/s)	Bemerkungen Windbeobachtung - Station -
	Station Nienstedten (NI)				
1		20. Aug. 1990	240 - 250	7,7 - 11,1	Fuhlsbüttel
2		21. Sept. 1990	260	7,4 - 10,8	Fuhlsbüttel
3		07. Okt. 1990	280	7,3 - 5,1	Fuhlsbüttel
4		27. Dez. 1990	85 - 100	2,5	Schweinesand
5		06. Jan. 1991	76 - 123	2,2 - 2,4	Schweinesand
6		20. Dez. 1991	240	8,9	Fuhlsbüttel
7		19. Apr. 1992	290	7,9	Fuhlsbüttel
	Station Fischereihafen (FI)				
8		27. Dez. 1990	85 - 100	2,5	Schweinesand
9		06. Jan. 1991	76 - 123	2,2 - 2,4	Schweinesand
10		16. Apr. 1991	330	6,5	St. Pauli
11		20. Dez. 1991	240	8,9	Fuhlbüttel
12		19. Apr. 1992	290	9,0	Fuhlsbüttel
	Station Harburg (HA)				
13		16. Apr. 1991	330	6,5	Fuhlsbüttel
14		03. Febr. 1992	280	9,0	Fuhlsbüttel
15		19. Apr. 1992	290	7,9	Fuhlsbüttel

				Hs	Fp	Smax	Hmax	WT
39	NI	90/ 9/20	13: 2	0.24	0.258	3.588	0.76	-1.50
40	NI	90/ 9/20	13:41	0.28	0.227	5.018	0.74	-0.91
41	NI	90/ 9/20	14:19	0.27	0.242	5.489	0.64	-0.52
42	NI	90/ 9/20	14:58	0.24	0.289	4.257	0.61	-0.28
43	NI	90/ 9/20	15:36	0.21	0.297	3.613	0.58	-0.26
44	NI	90/ 9/20	16:15	0.15	0.766	0.958	0.39	-0.59
45	NI	90/ 9/20	16:53	0.19	0.289	2.413	0.47	-1.09
46	NI	90/ 9/20	17:32	0.18	0.297	2.634	0.49	-1.54
47	NI	90/ 9/20	18:10	0.12	0.305	1.440	0.28	-1.96
48	NI	90/ 9/21	2:44	0.23	0.773	3.232	0.39	-1.75
49	NI	90/ 9/21	3:23	0.29	0.750	4.593	0.66	-1.50
50	NI	90/ 9/21	4: 1	0.26	0.875	4.069	0.56	-1.44
51	NI	90/ 9/21	4:39	0.28	0.477	5.462	0.59	-1.55
52	NI	90/ 9/21	5:18	0.30	0.367	9.866	0.75	-1.89
53	NI	90/ 9/21	13:25	0.53	0.086	24.050	1.41	-1.57
54	NI	90/ 9/21	14: 3	0.59	0.117	36.290	1.60	-0.80
55	NI	90/ 9/21	14:42	0.68	0.086	45.240	1.84	-0.15
56	NI	90/ 9/21	15:20	0.73	0.086	40.100	1.91	0.37
57	NI	90/ 9/21	15:58	0.71	0.086	38.240	1.69	0.80
58	NI	90/ 9/21	16:37	0.66	0.133	60.230	1.50	1.06
59	NI	90/ 9/21	17:15	0.51	0.109	17.059	1.48	0.90
60	NI	90/ 9/21	17:54	0.42	0.336	9.997	0.77	0.45
61	NI	90/ 9/21	18:32	0.38	0.250	16.543	0.63	-0.06
62	NI	90/ 9/21	19:11	0.40	0.234	27.694	0.77	-0.56
63	NI	90/ 9/21	19:49	0.46	0.219	41.930	1.04	-0.94
64	NI	90/ 9/21	20:28	0.41	0.234	21.999	0.68	-1.31
65	NI	90/ 9/21	21: 6	0.43	0.219	17.443	1.50	-1.59
66	NI	90/ 9/21	21:44	0.39	0.086	21.010	1.57	-1.90
67	NI	90/ 9/22	1:32	0.31	0.094	8.099	0.87	-1.63
68	NI	90/ 9/22	2:10	0.24	0.180	4.300	0.64	-1.13
69	NI	90/ 9/22	2:49	0.23	0.930	2.392	0.43	-0.69
70	NI	90/ 9/22	3:27	0.26	0.281	3.047	0.56	-0.43
71	NI	90/ 9/22	4: 6	0.25	0.289	3.688	0.52	-0.39
72	NI	90/ 9/22	4:44	0.20	0.320	3.037	0.43	-0.59
73	NI	90/ 9/22	5:23	0.13	0.383	1.230	0.25	-1.05
74	NI	90/ 9/22	6: 1	0.18	0.297	4.383	0.41	-1.50
75	NI	90/ 9/22	6:39	0.20	0.305	3.602	0.57	-1.92
76	NI	90/ 9/22	15:14	0.19	0.250	4.687	0.54	-1.78

Ergebnisse durch Wellenüberlagerungen fehlerhaft ausgewerteter Spektren

– Station Nienstedten –

DWD FLU I (b.

ED Hi — Beobachtungsort: Hamburg-Finkenwerder — Datum: 20 Sept 1990

Date	Time UTC	Wind ddd	ff	$f_m f_m$	Visibility VVVV	Weather w'w'	Abbrev.	Clouds 1	Clouds 2	Temp. T'T'	$T'_d T'_d$	QNH hPa	übermittelt UTC	Name
20.9.	0452	260	12		9999	21	RERA	4 SC 030		09	06	1003	0452	SD
	0950	270	18		9999			3 SC 020		12	07	1004	0947	RS
	1150	270	20		9999			1 SC 025	4 SC 050	13	07	1005	1153	RS
	1350	260	13		9999			7 SC 025		12	07	1005	1335	RS
21.9.	0500	230	12	22	9999			1 ST 010	5 SC 030	10	07	982	0507	SD
	0750	280	18		9999	25	RESH	2 ST 008	5 SC 020	10	07	985	0752	SD
	0950	270	21	31	9999			3 CB 015		12	05	988	1001	RS
22.9.	0550	200	06		5000	61	RA	2 ST 006	7 SC 010	12	10	997	0550	SD
	0750	230	10		8000	25	RESH	3 CU 012		12	09	998	0757	RS
	0950	240	14		9999			6 CU 024		13	07	998	0946	RS
	1150	240	12		9999			4 CU 020	7 SC 030	10	07	999	1148	LS
	1350	240	12		9999			7 SC 025		10	07	999	1355	LS
2[illegible].9.	0550	240	10		9999			2 SC 030		08	05	1002	0550	SD
	0750	240	12		9999			2 SC 030		11	07	1002	0750	LS
	0950	220	12		9999			2 CU 032		12	07	1004	0950	SD
	1150	220	15		9999			6 SC 024		13	07	1005	1210	RS
	1350	270	14		9999			7 SC 025		13	07	1006	1358	RS
26.9.	0550	270	08		5000	10	BR	7 SC 015		09	07	1018	0600	LS
	0950	330	03		9999			2 CU 016		12	08	1020	0955	RS
	1150	300	06		9999			8 CU 028	4 SC 050	14	07	1020	1154	RS
	1350	200	03		9999	60	RA	6 SC 020		12	07	1020	1357	RS
27.9.	0550	220	06		9999	21	RERA	2 SC 030		07	05	1022	0555	SD
	0950	270	09		9999			5 SC 030	6 SC 020	12	07	1024	0955	RS
	1150	270	10		9999			2 SC 010	6 SC 050	12	06	1024	1213	RS
	1350	270	10		9999			2 SC 024	6 SC 050	12	06	1024	1348	RS
28.9.	0550	220	06				CAVOK			09	06	1022	0600	SD
	0950	250	12		6000	10	BR	7 ST 002		11	07	1022	0935	RS
	1150	270	14		8000			4 SC 025	8 SC 050	13	07	1022	1138	RS

Tabelle 3

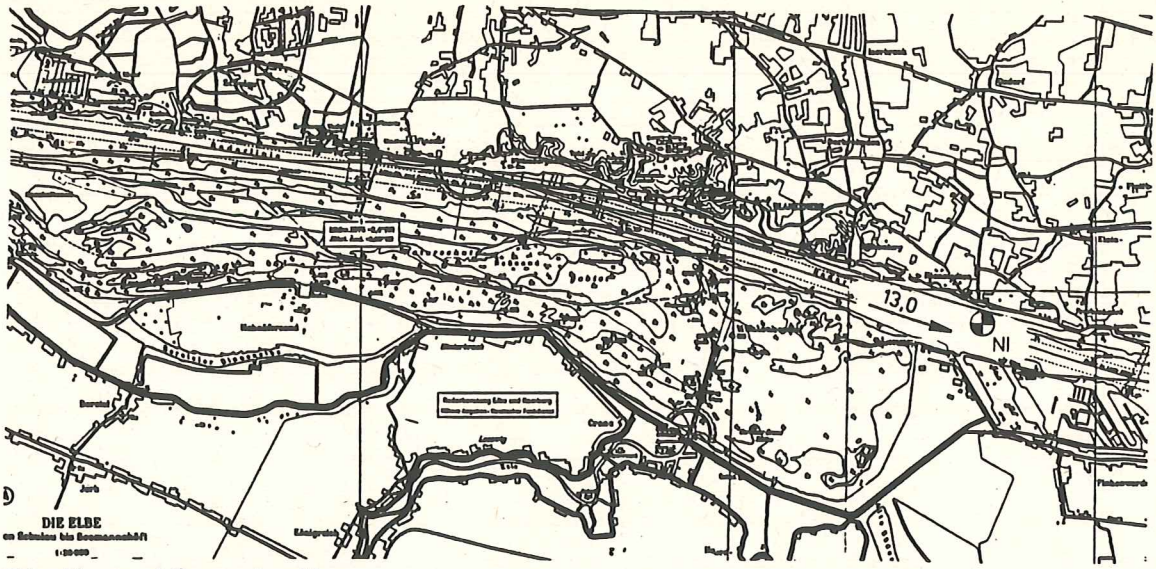
Tabelle 4 Signifikante Wellenhöhe als Funktion der Windgeschwindigkeit und der Fetchlänge

Nr.	Station	Datum	Uhrzeit	Fetchlänge (km)	Windgeschwindigkeit (m/s)	Signifikante Wellenhöhe H_s (m)	Bemerkungen
1	NI	20.08.90	18.00-19.00	0,8	9,8	0,47	Spektrum OK.
2	NI	21.09.90	19.00-20.00	1,2	10,8	0,46	Spektrum OK.
3	NI	07.10.90	19.00-20.00	13,0	4,1	0,21	Spektrum OK.
4	NI	27.12.90	12.00-13.00	0,4	2,5	0,36	Spektrum OK.
5	NI	09.01.91	11.00-12.00	0,5	2,4	0,28	Spektrum OK.
6	NI	20.12.91	13.00-14.00	0,7	8,9	0,28	Spektrum OK.
7	NI	19.04.92	15.00-16.00	0,1	7,9	0,24	Spektrum OK.
8	FI	27.12.90	11.00-12.00	0,3	2,5	0,32	Spektrum OK.
9	FI	06.01.91	20.00-21.00	0,3	2,5	0,30	Spektrum OK.
10	FI	16.04.91	16.00-17.00	0,1	6,5	0,26	Spektrum OK.
11	FI	20.12.91	13.00-14.00	0,7	8,9	0,51	Spektrum OK.
12	FI	19.04.92	16.00-17.00	0,1	8,1	0,28	Spektrum OK.
13	HA	16.04.91	16.00-17.00	0,7	6,5	0,13	Spektrum OK.
14	HA	03.02.92	15.00-16.00	1,8	9,3	0,18	Spektrum OK.
15	HA	19.04.92	15.00-16.00	1,2	7,9	0,17	Spektrum OK.

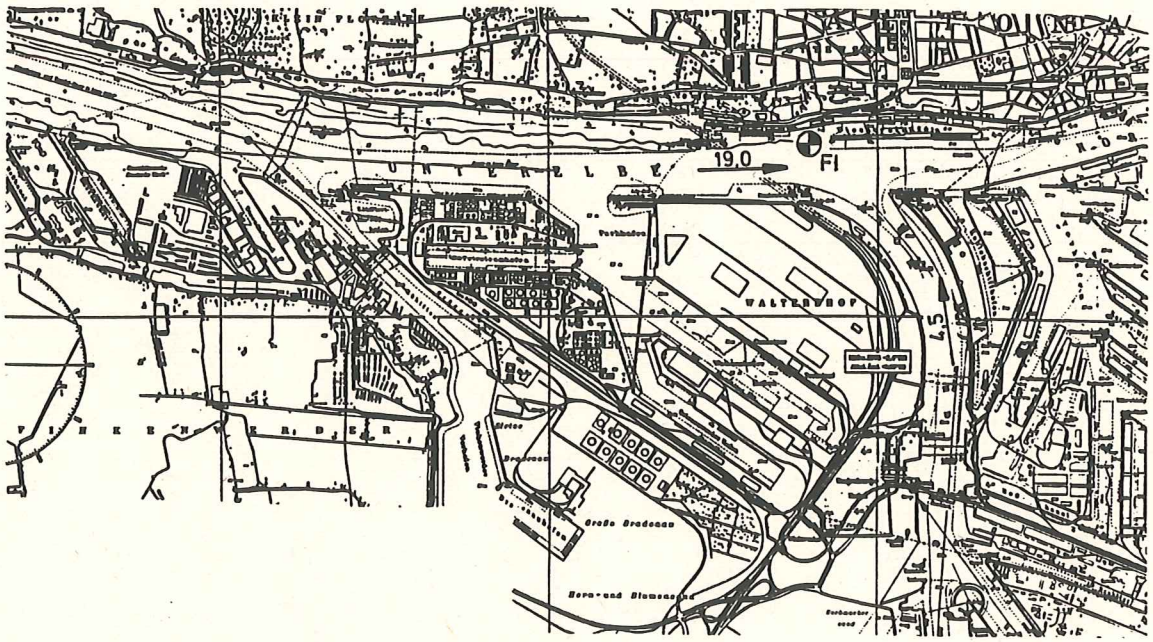
Stationen: NI = Nienstedten
FI = Fischereihafen
HA = Harburg

8.0 ANLAGEN

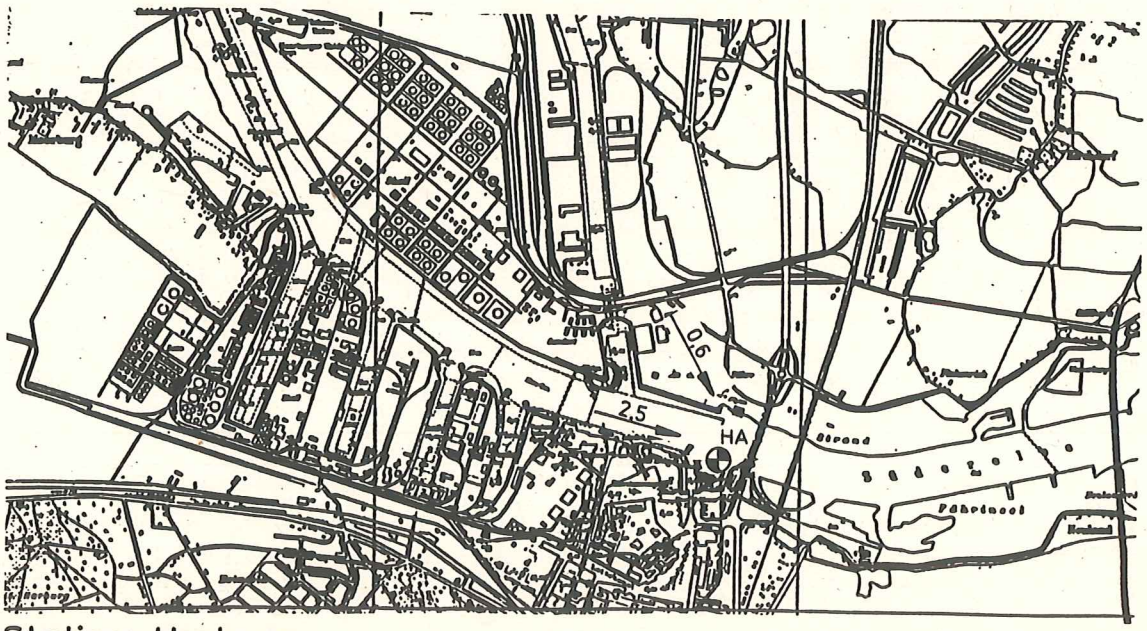
8.1 Lage der Meßstationen



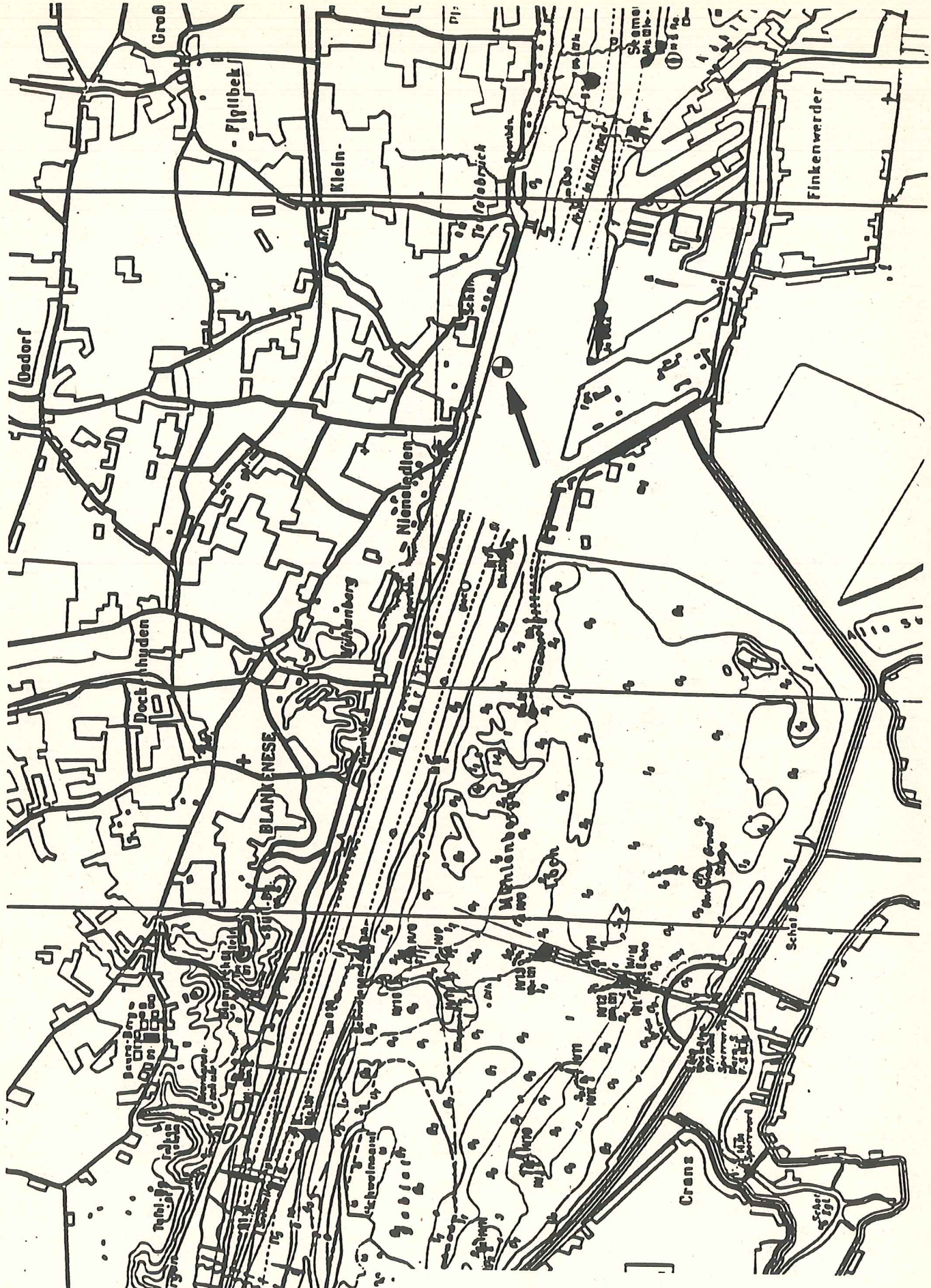
Station: Nienstedten



Station: Fischereihafen

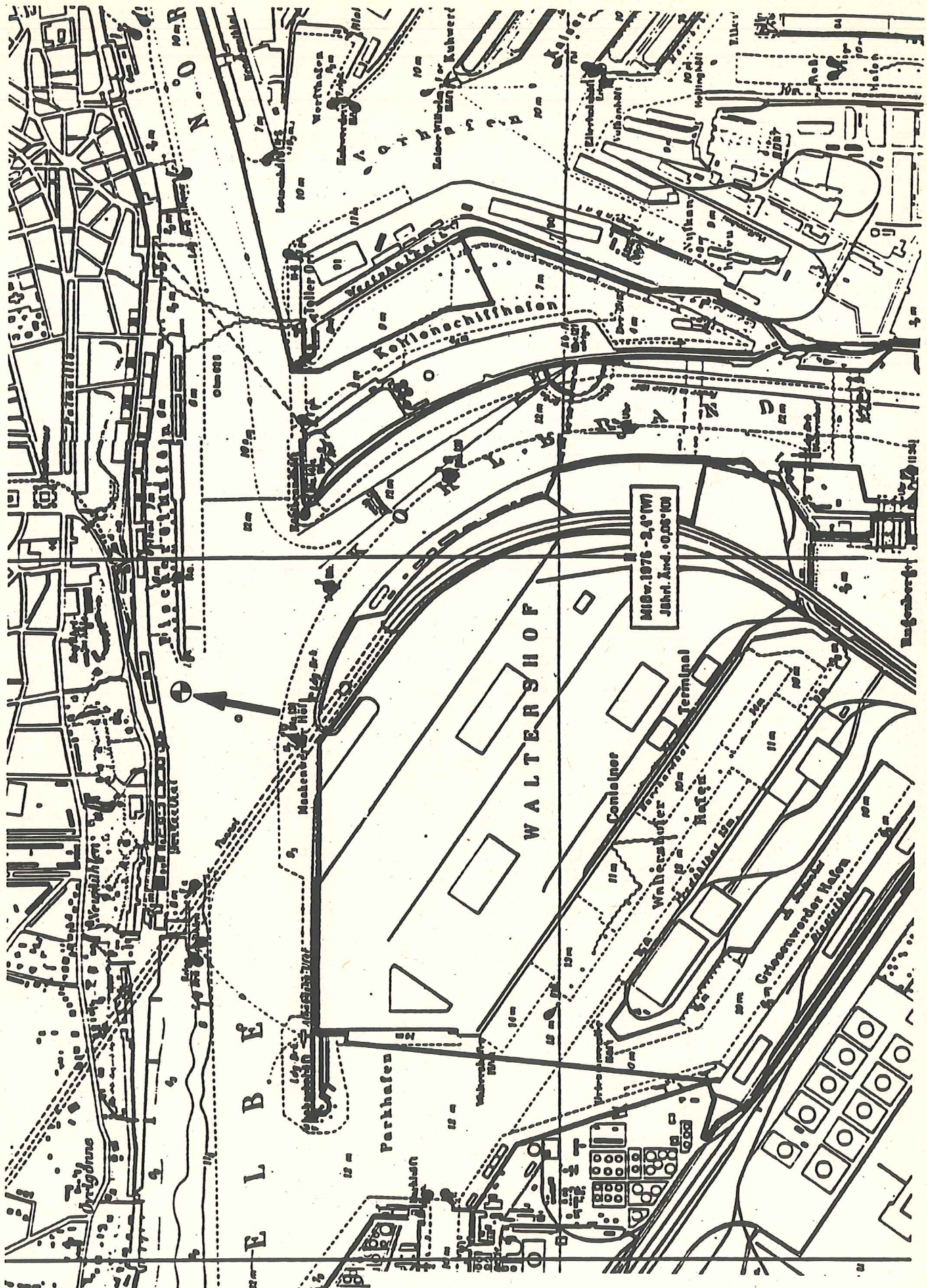


Station: Harburg



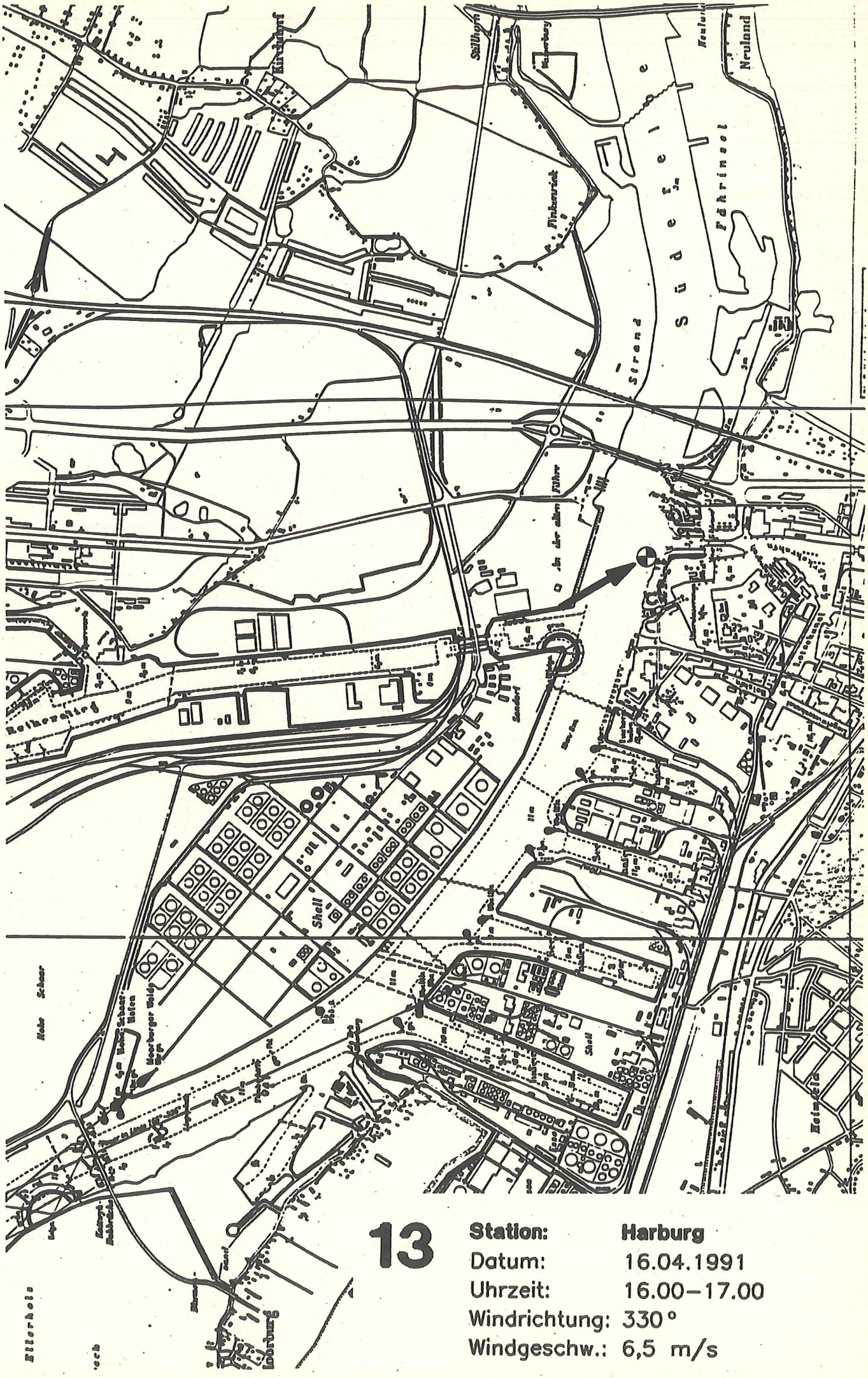
1

Station:	**Nienstedten**
Datum:	20.08.1990
Uhrzeit:	18.00–19.00
Windrichtung:	250°
Windgeschw.:	9,8 m/s



8

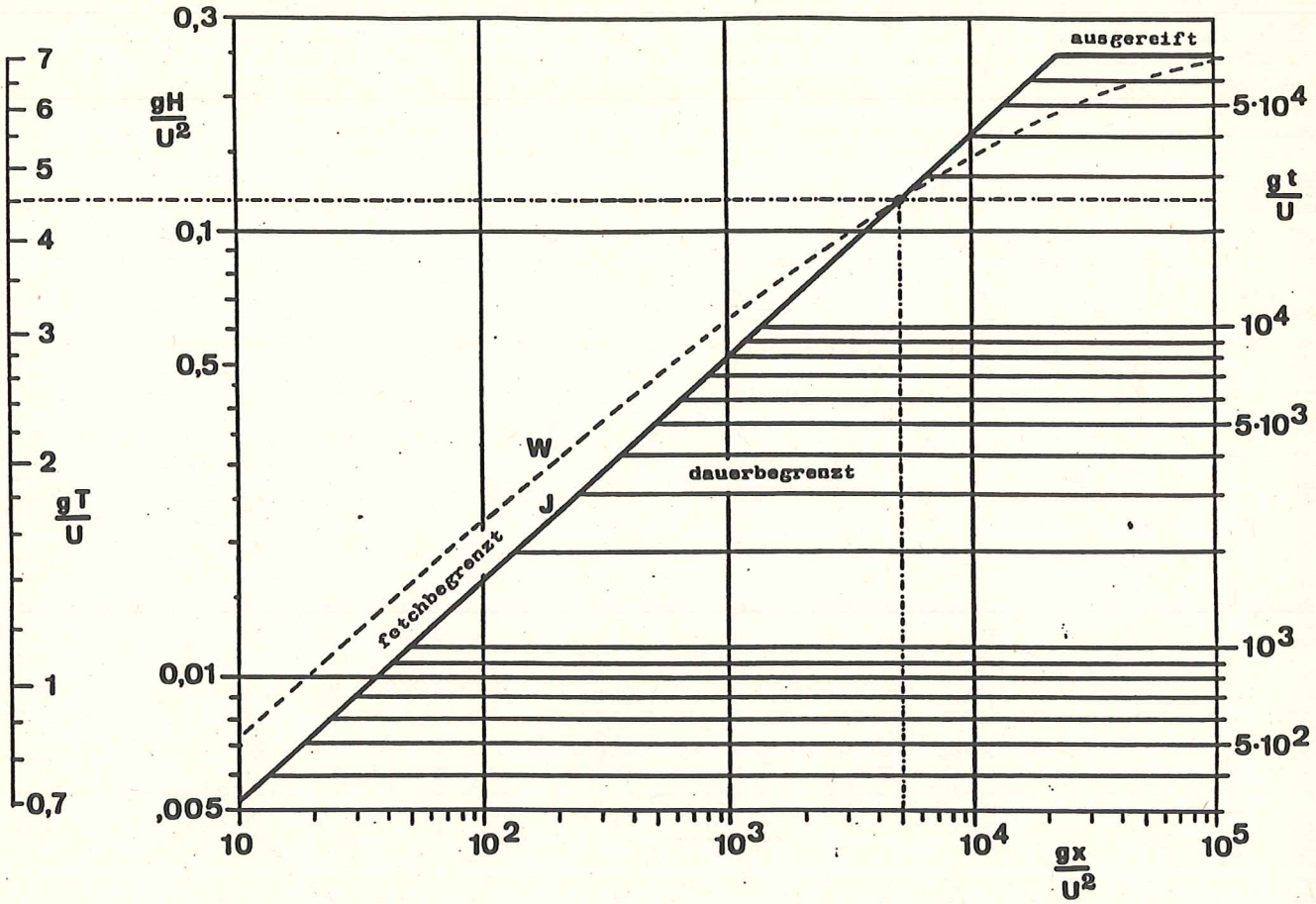
Station:	**Fischereihafen**
Datum:	27.12.1990
Uhrzeit:	11.00–12.00
Windrichtung:	101°
Windgeschw.:	2,5 m/s



13

Station: **Harburg**
Datum: 16.04.1991
Uhrzeit: 16.00–17.00
Windrichtung: 330°
Windgeschw.: 6,5 m/s

8.2 Diagramm zur Bestimmung maximaler Wellenhöhen nach (1)



Ortsbezogene Rechengrößen zur Bestimmung signifikanter Wellenhöhen (siehe 8.2)

Nr.	Meßstation	Maximale Windstärke u [m/s]	Maximale Streichlänge x [km]	Anlauf-richtung
1	Nienstedten	28,0	13,0	West/Nordwest
2	Fischreihafen	28,0 18,0	19,0 4,5	West Süd
3	Harburg	28,0 28,0	2,5 0,6	West/Nordwest Nord/Nordwest

Bestimmung signifikanter Wellenhöhen nach (1) und Tabelle 2

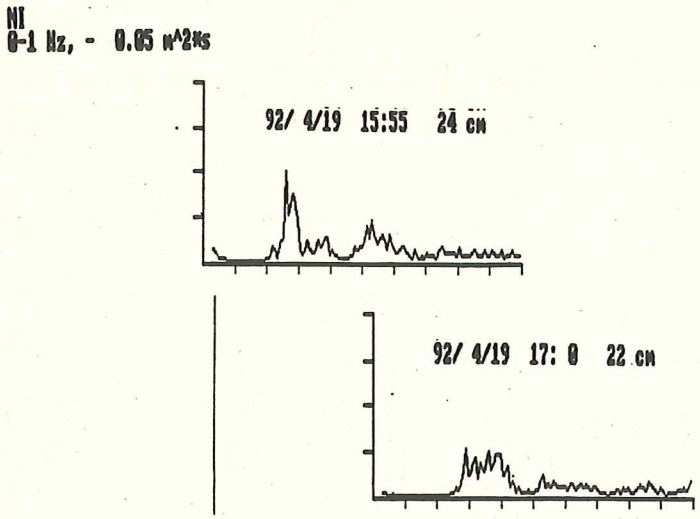
Nr.	Meßstation	u [m/s]	x [km]	T [s]	$g \cdot x/u^2$	$g \cdot T/u$	$g \cdot H/u^2$	H_s [m]
1	Nienstedten	28,0	13,0	4,0	0,163	1,401	0,022	1,76
2	Fischereihafen	28,0 18,0	19,0 4,5	4,0 3,5	0,238 0,136	1,401 1,908	0,022 0,038	1,76 1,26
3	Harburg	28,0 28,0	2,5 0,6	3,0 2,5	0,031 0,008	1,051 0,876	0,010 0,073	0,80 0,58

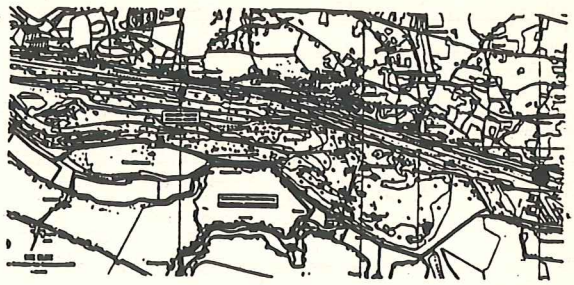
8.3
AUSGEWÄHLTE MESSUNGEN VON STARKWINDEREIGNISSEN

- STATION NIENSTEDTEN
- STATION FISCHEREIHAFEN
- STATION HARBURG

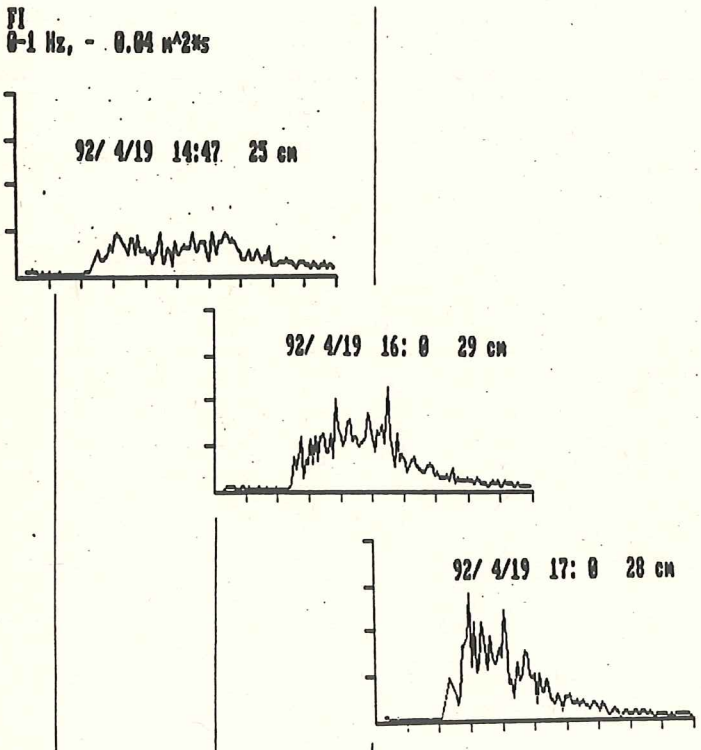
Die umfangreiche Auflistung der Spektren wurde nicht vervielfältigt (erhältlich auf Anforderung)

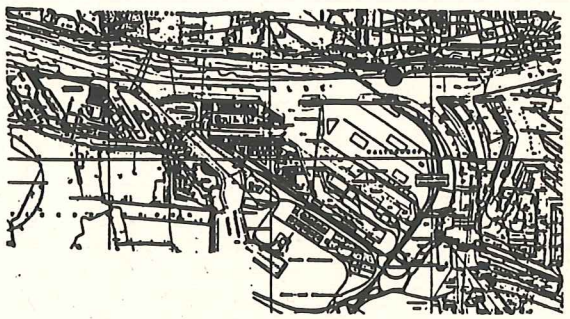
8.4 Energiespektren an den Meßstandorten - Messung vom 19.04.1992 -



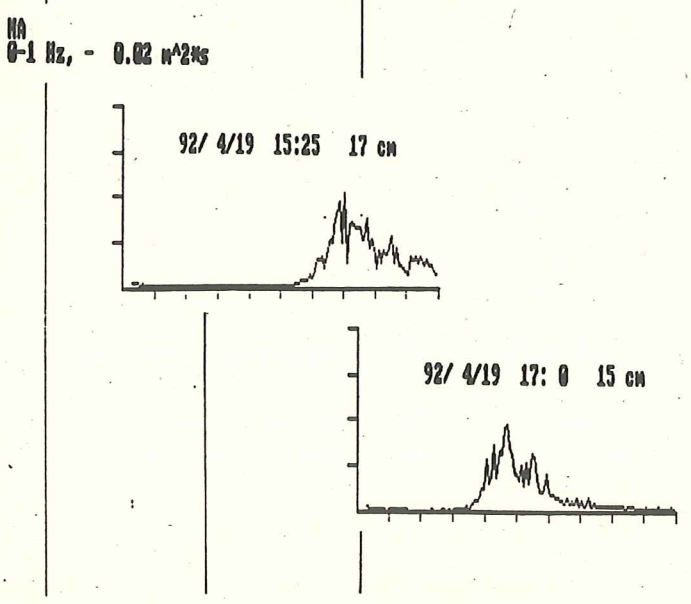


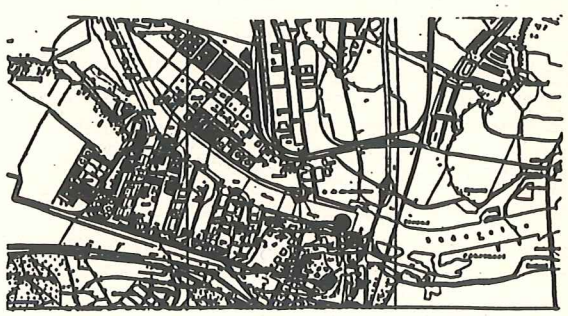
Station: Nienstedten





Station: Fischereihafen





Station: Harburg

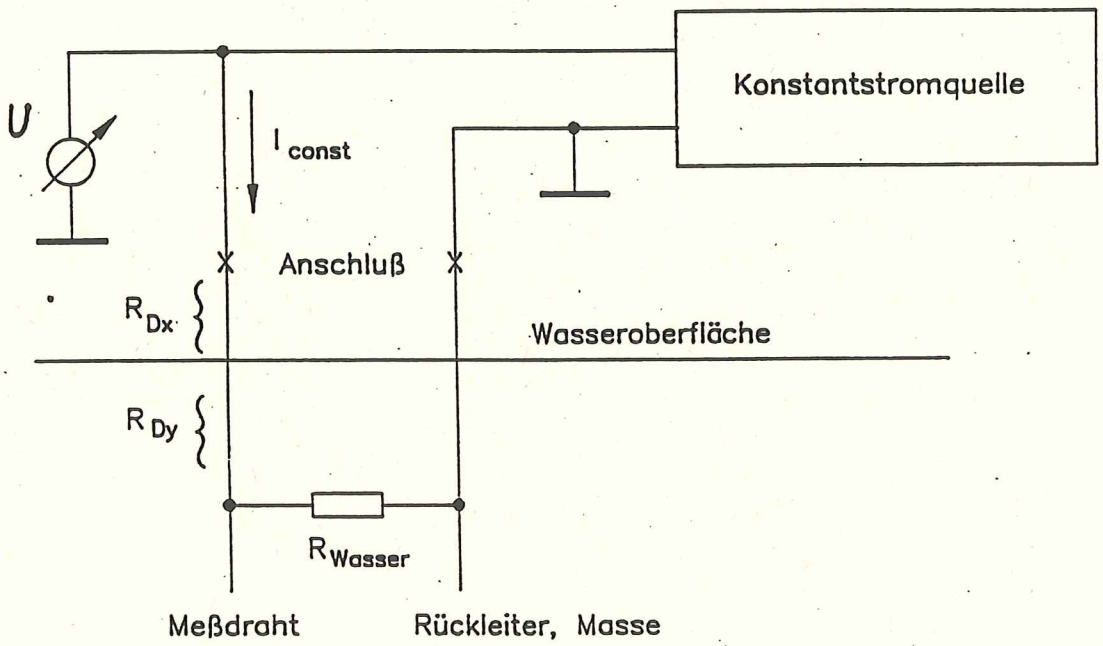
ANHANG 2

Beschreibung der Meßeinrichtung

3.0 Technische Beschreibung

3.1 Meßprinzip

Ein Wechselstrom (Frequenz 5 kHz) mit konstanter Amplitude fließt durch den Meßdraht, durch das Wasser und den Rückleiter zurück zur Stromquelle. Mit dem Wasserstand ändert sich der Widerstand des Stromkreises und damit der Spannungsabfall am Draht gegen Masse. Diese Spannung ist also ein Maß für den Wasserstand bzw. die Wellenhöhe, bezogen auf ein Referenzniveau.



$$U = I_{const} \cdot R_{gesamt} = I_{const} \cdot (R_{DX} + R'_{unter\ Wasser'} + R_{Rückleiter})$$

Die gemessene Spannung ist dann proportional zum Widerstand des 'trockenen' Drahtstücks oberhalb der Wasseroberfläche, wenn der Widerstand der Anordnung unter Wasser vernachlässigbar gering ist, d.h. das eingetauchte Drahtstück durch das Wasser an der Oberfläche kurzgeschlossen wird.

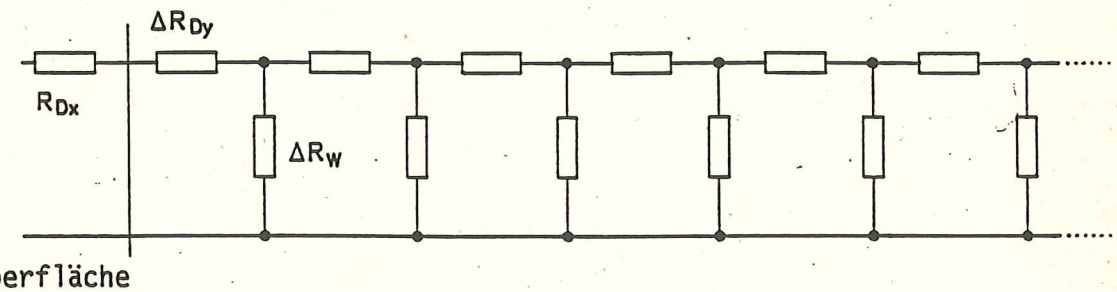
Dann gilt: $U = I_{const} \cdot (R_{DX} + R_O)$.

R_O = const ist die Summe aller unveränderlichen Leitungswiderstände. Der Widerstand des Drahtes ist proportional zu seiner Länge:

$R_{DX} = \varrho \times \frac{x}{q}$ (q - Querschnitt, - spez. Widerstand).

$$\Delta U = E \cdot \Delta X$$

Diese Gleichung liefert die Spannungsänderung bei Änderung des Wasserstandes, E ist der Proportionalitätsfaktor (Eichfaktor). Den Ersatzwiderstand für den Teil des Stromkreises unter Wasser kann man sich als Parallel-/Reihenschaltung von Drahtelementen und Scheibchen der Wassersäule vorstellen:



Wasseroberfläche

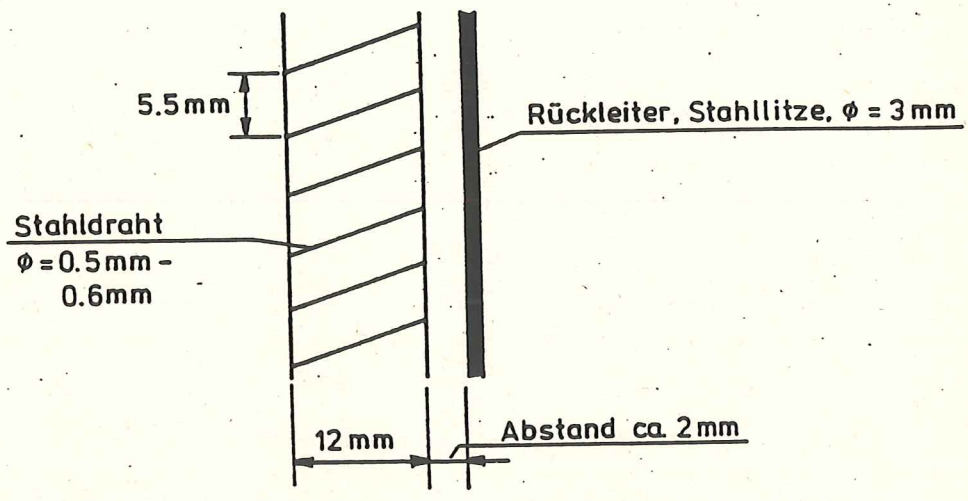
Der Widerstand unter Wasser wird vernachlässigbar, wenn die Anzahl der Elemente in der Kette groß wird und der 'Wasserwiderstand' ΔR_W klein gegen ΔR_{DY}. Praktisch wird diese Bedingung erfüllt ab einer Mindesteintauchtiefe bei Verwendung eines dünnen Drahtes (hoher Widerstand) und geringem Abstand zwischen dem Draht und dem Rückleiter.

Die Praxis zeigt, daß der verwendete Meßdraht in Leitungswasser mindestens 1 m eintauchen muß, in besser leitfähigem Wasser (Salzwasser) wesentlich weniger, damit die Beziehung U(x) linear und unabhängig von der elektrischen Leitfähigkeit des Wassers wird. Der Eichfaktor entspricht dann ziemlich gut dem theoretisch berechneten bzw. im Labor mit Ohmschen Vergleichswiderständen gemessenen Wert.

3.2 Konstruktion des Wellenmeßdrahtes

Ein Edelstahldraht (Ø = 0,5 mm) ist spiralförmig auf einen Isolierkörper (Ø = 12 mm) gewickelt, der Rückleiter ist mit Abstandshaltern außen längs der Spirale geführt (parallel zur Spiralachse). Im Innern des Isolierkörpers verläuft ein Spanndraht zur straffen Aufhängung. Diese Anordnung wird im folgenden kurz als Meßdraht bezeichnet.

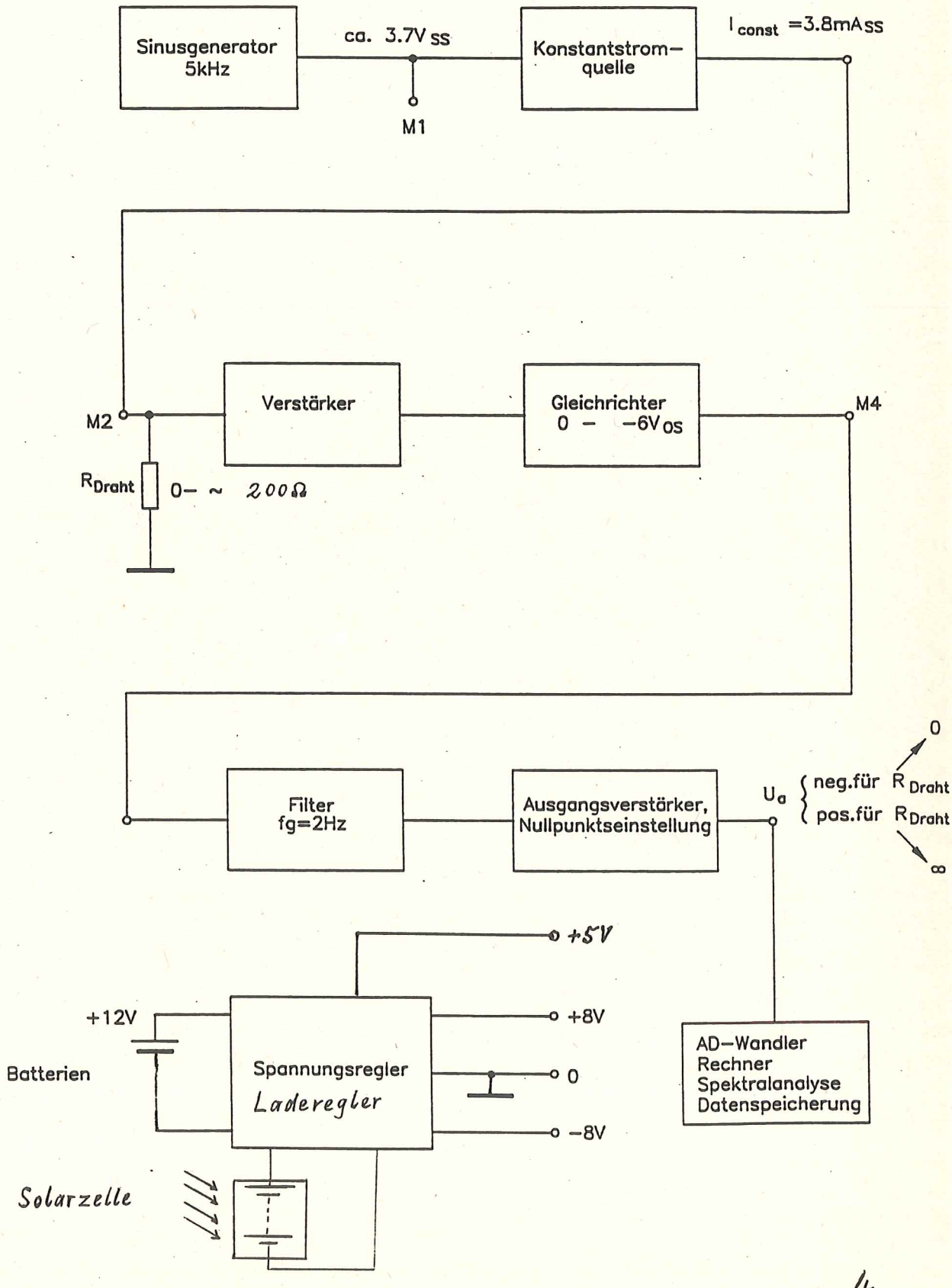
Skizze:



Der Ohmsche Gesamtwiderstand beträgt bei 3 m LÄnge der Spirale ca. 105, bei 4 m Länge ca. 140Ω (abhängig von Drahtdurchmesser und Stahlsorte). Der Rückleiter, der nicht mit der Spirale verbunden ist, hat einen Widerstand von ca. 2 Ω . Die nutzbare Drahtlänge beträgt dann 2 m bzw. 3 m (linearer Anzeigebereich), da die Spirale mindestens 1 m eintauchen muß, in Leitungswasser mit einer Leitfähigkeit von ca. $6 \cdot 10^{-4} \Omega^{-1}\,cm^{-1}$; in Meerwasser (Leitfähigkeit ca. $0.04 \Omega^{-1}\,cm^{-1}$) beträgt die Mindesteintauchtiefe für lineare Anzeige nur wenige Zentimeter.

Bei der Eichung in Leitungswasser ergeben sich Widerstandswerte von 36 Ω /m , gemessen im Vergleich zu einem einstellbaren Ersatzwiderstand anstelle des Meßdrahtes (gleiche Ausgangsspannung). Dies stimmt gut überein mit dem Ohmschen Widerstand der Drahtspirale, die Leitfähigkeit des Wassers hat in den oben angegebenen Grenzen und unter den genannten Voraussetzungen einen vernachlässigbaren Einfluß.

3.3 Schaltbild (Prinzipskizze)



Seite 5 im Original nicht vorhanden

9.0 Meßprogramm

9.1 Eingangsdaten

Der AD-Wandler ADDA-P2 kann analoge Eingangsspannungen von -1023 mV bis +1023 mV verarbeiten (4 Kanäle).
Das Programm fragt im 0,5 s-Takt auf Kanal 0 die Meßwerte ab und speichert sie in Blöcken zu 256 Werten. Über die anderen Kanäle werden die Batteriespannungen kontrolliert.
Die Seegangsdaten werden umgerechnet von Millivolt in Meter; diese Werte sind relative Messungen, bezogen auf einen Nullpunkt, der in der Mitte des linear arbeitenden Teils des Meßdrahtes liegen soll.

9.2 Fourieranalyse

Ein Block von 256 Meßwerten wird fouriertransformiert (ohne Filterung). Eine vorwählbare Anzahl solcher Teilspektren wird gemittelt; Standardwert ist 14 Blöcke, d.h. die Meßdauer beträgt $0{,}5 \cdot 14 \cdot 256 = 1792$ s = 30 min.

Ein Seegangsspektrum besteht nun aus 128 Spektralwerten, Dimension $m^2 \cdot s$, bei den Frequenzwerten 0 - 1 Hz in Schritten von

$$\frac{1}{256 \cdot 0{,}5}\ \text{s} = \frac{1}{128} = 0{,}00781\ \text{Hz}$$

Aus dem Spektrum werden die signifikante Wellenhöhe und die Peakfrequenz (Frequenz des spektralen Maximums) bestimmt (nur im Bereich 0,086 - 1 Hz). Außerdem wird die Differenz zwischen höchstem und niedrigsten Meßwert (Wasserstand) aus dem ganzen Meßabschnitt gespeichert.

9.3 Datensatz

Das Ergebnis einer Seegangsmessung ist ein Datensatz (Record), bestehend aus:
Stationsname, Datum, Zeit (Anfangszeit der Messung), signf. Wellenhöhe, Peakfrequenz, mittl. Wasserstand (bezogen auf den eingestellten Nullpunkt), Differenz zwischen höchstem und niedrigstem Wasserstand, Batteriespannung, 126 normierte Spektralwerte.

9.4 Programmablauf

Es gibt die Möglichkeiten der kontinuierlichen Messung und der Messung in regelmäßigen Intervallen (ganze Stunden). Im zweiten Fall beginnt die Messung zur vollen Stunde, gezählt ab 00 Uhr, also z.B. bei zweistündlicher Messung um 00, 02, 04...Uhr usw. Die erste Messung beginnt aber unmittelbar nach dem Startbefehl.

Fällt der Wasserstand, gemittelt über die Meßdauer, unter eine wählbare Mindesthöhe, bezogen auf den eingestellten Nullpunkt, wird keine Spektrenberechnung durchgeführt.
Wird eine wählbare Mindestwellenhöhe nicht überschritten, erfolgt ebenfalls keine Spektrenberechnung.
Die Prüfung des Wasserstands und der signifikanten Wellenhöhe geschieht erst zu den festgelegten Zeitpunkten, sodaß zwischen der Überschreitung der Schwellenwerte und dem nächsten Meßtermin eine Pause bis zur Länge des Meßintervalls (mind. 1 Stunde, außer bei kontinuierlicher Messung) auftreten kann.

Zwischen den Messungen geht das Programm in eine Warteschleife (außer bei kontinuierlicher Messung), während der nur die Uhrzeit und der Meßwert angezeigt werden.

Nach max. 970 Messungen überschreibt das Programm ab Record-Nr. 1 den Speicher. Record 0 bleibt stehen, damit ein Speicherüberlauf besser erkannt werden kann.

KELK

ELECTRONICS • ELECTROMECHANICS

ZWARTS TYPE
WAVE AND TIDE GAGE
MODEL P121
(Copper Construction)

The Zwarts Gage may be used to measure either fresh or sea water waves having peak to trough amplitudes up to 28.8 metres. The electrical signal may be processed so that the mean water level is simultaneously derived to give a reading of tide.

By virtue of its unique operating principle it requires no moving parts. Automatic data processing and real time telemetry are facilitated by the provision of data in electrical form.

FEATURES

— Substantially infinite resolution
— Negligible hysteresis and zero drift
— Rugged concentric pipe construction
— Permanent calibration
— Low power consumption

APPLICATION

Measurement of either instantaneous or average water surface height with reference to any fixed vertical mounting structure. Determination of wave height, wave period, wave energy spectra.

OPERATING PRINCIPLE

A co-axial transmission line having a heavy gage perforated copper pipe as its outer conductor, is the tuning element of an electronic oscillator. This pipe with the oscillator housed at its top end becomes the measuring staff.

When immersed in water, a sharp change in the electrical impedance of the staff occurs at the water surface. The period of the oscillation is linearly proportional to the length of the un-immersed part of the staff. By frequency division the output signal is brought into the audio range for convenience in transmission or recording.

SIGNAL PROCESSING

The signal may be directly transmitted by radio or wire circuits from the electronic head of the gage. Accuracy is preserved because the measured data is carried in the form of period changes rather than amplitude.

An accessory signal converter is available which will accept the output signal either directly or via a communication circuit and yield a DC voltage analog of the measurement.

INSTALLATION

Installation is greatly simplified by the permanent calibration feature. A reference mark on the head relates to a standardized signal period. The period increases by a fixed increment for each unit of distance from the mark to the water surface.

Mounting to a support structure is by the brackets supplied. A neoprene sheathed 3 conductor cable connects the staff to the battery and also carries the output signal.

The staff is supplied in sections of 3.6 metres (12') length and the total required length is assembled by means of threaded connectors. Normally, two support brackets are installed for each section.

Kelk Limited • 48 Lesmill Road, Don Mills, Ontario, Canada M3B 2T5 • (416) 445-5850 • Telex 06-966670 • Cables: "Kellex" Toronto

SPECIFICATIONS – MODEL P121

Peak to Trough Amplitude Range 0-3.6 metres to 0-28.8 metres depending on number of staff sections used.

Sensitivity 109.36 microseconds/metre.

Static Accuracy Better than ±0.2% of range.

Dynamic Accuracy Better than ±1% for wave periods longer than 3 sec.

Linearity Better than ±0.1% of range.

Temp. Limits Electronic Head operation and storage: −20°C to +80°C.
Installed unit: Lower limit set by icing.

Zero Drift Within ± 5 mm from 0° - 50°C.

Resolution Unlimited.

Output Signal 5V Square wave. Load resistance 500 ohms min. Period: 800 microsec min. (1250 Hz.) extrapolated to calibration mark; 800 plus 109.36 microsec for each metre below the mark.

Power Requirement 12-18V DC, 20 milliamps, floating.

Dimensions 4.09 metres long, plus 3.6 metres for each extra optional staff section used.
76 mm diameter.

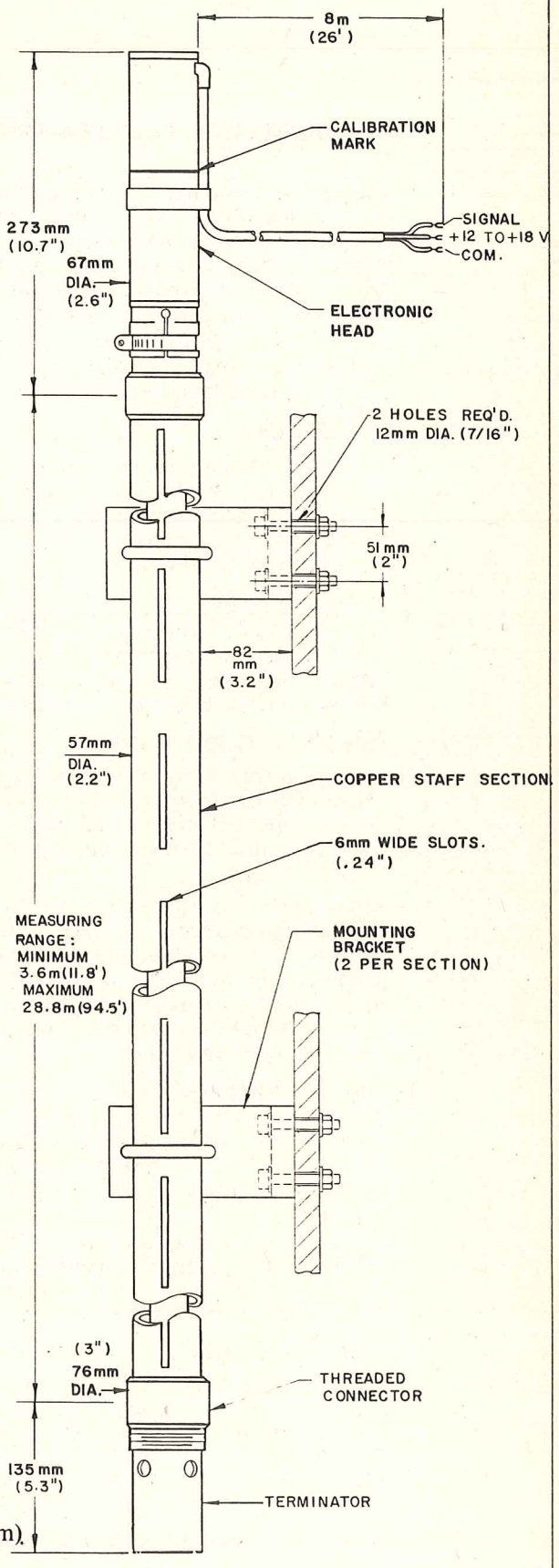
Net Weight 34 kg (75 lbs.)
Shipping Weight 56 kg (125 lbs.) packed in shipping case.

Standard Equipment Model P121 comprises these items:
1 Electronic Head,
1 3.6 m staff section,
2 Insulating Mounting Brackets,
1 Terminator,
1 Accessory Kit (tools, screws, etc.).

Optional Accessories

— 3.6 m staff sections	Part No.	11957.
— Extra mounting bracket	" "	12262.
— Transit case (holds 1 P121 and 3 staff sections)	" "	11687.
— 7.5 Volt carbon-zinc dry battery (2 required)	" "	11689.
— Portable Signal Converter, Model P145	" "	11690.
— Rack Mounting Signal Converter, Model P146	" "	11946.
— Timer	" "	11691.
— A.C. Power Supply 115 or 230 V, 50-60 Hz.	" "	12276.

Related Equipment
Model P147 Water Level Gage (Aluminum).
Model P120 Water Level Gage (Copper).
Model P116 Wave and Tide Gage (Aluminum).
Data Sheets available on request.



This instrument is based on work of Mr. C.M.G. Zwarts of the National Research Council of Canada, and is built under license from Canadian Patents and Development Ltd.

KELK

ELECTRONICS • ELECTROMECHANICS

PERIOD–TO–VOLTAGE CONVERTER

Part No. 11690 & TIMER OPTION

Part No. 11691

DESCRIPTION This unit accepts the square wave output of a Kelk Model P116 Zwarts Gage Wave Height Sensor or Water Level Gage Model P120 and provides an output voltage accurately proportional to water surface height.

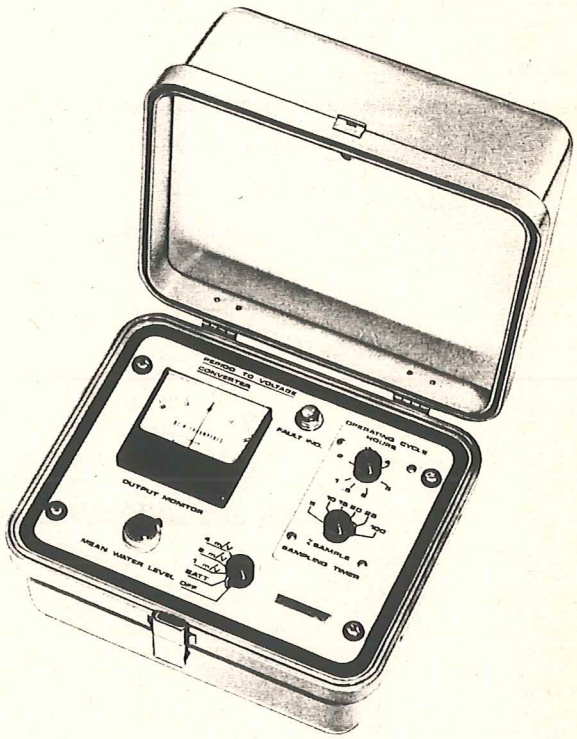
The output voltage can be fed to a recorder or signal processing equipment and is monitored on a built-in meter.

The unit includes a DC-to-DC converter to isolate the wave sensor supply from the voltage output, eliminating ground loops and permitting a freer choice of power sources and recorder circuits.

An optional Timer (Part No. 11691) permits sampling of data.

All external connections are made at a barrier type screw terminal strip on the rear of the case.

A waterproof operating manual is contained in the top cover storage compartment.



PERIOD-TO-VOLTAGE CONVERTER SPECIFICATION

Input signal range	50 mV to 6 V peak-to-peak	
Input frequency range	200 Hz to 1200 Hz	
Range Switch Positions	Meter Scale	Max. Output
4 metres/volt	10-0-10 m	20-0-20 m
2 metres/volt	5-0-5 m	10-0-10 m
1 metre/volt	2.5-0-2.5 m	5-0-5 m
Mean water level output is adjustable over the full range.		
Linearity	.01% of full scale	
Zero Drift	.005%/°C	
Gain Stability	± 250 parts per million/°C	
Max. Output Current	2.5 mA	
Output Voltage for Recorder (Recorder not included)	0 to ± 5 V for full range. Recorder input impedance must be larger than 1000 ohms.	
Output Impedance	.01 ohm	
Output Resistance	Approx. 500 ohms. Output is protected against short circuits.	
DC-to-DC converter	Provides isolated supply for wave height sensor.	
Supply voltage	10.5 V D.C. to 18 V D.C.	
Supply current, including wave sensor	32 mA D.C. average. (37 mA with timer option)	
Protection against polarity reversal and overvoltage is provided.		
Construction	Splashproof fibreglass-reinforced polyethylene case with carrying handle.	
Size	10" x 8" x 8" (254mm x 203mm x 203mm)	
Weight	Approx. 9 lbs. (4.1 kg)	

OCTOBER, 1974

SEE OVER

George Kelk Limited • 48 Lesmill Road, Don Mills, Ontario, Canada M3B 2T5 • (416) 445-5850 • Telex 06-966670 • Cables: "Kellex" Toronto

TIMER OPTION

Part No. 11691

DESCRIPTION

Sampled wave height data can be collected by using this unit to control recording or signal processing equipment. It provides isolated contacts which operate in a cycle such that a recorder can be activated, for example 6 minutes each hour. A second set of contacts de-energizes the wave sensor during quiescent periods to conserve battery power.

TIMER SPECIFICATION

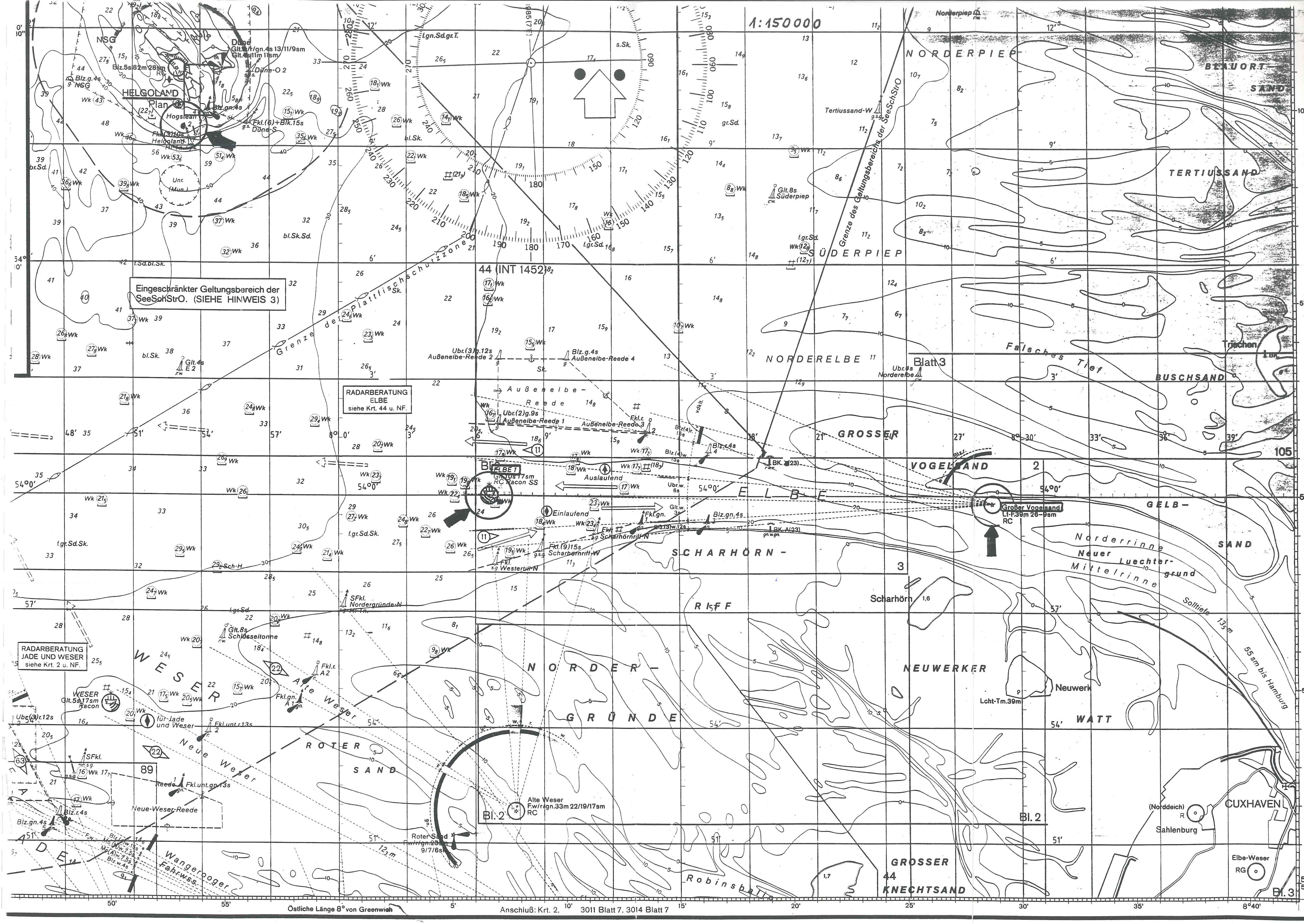
Operating Cycle	0.5 hours to 6 hours, continuously adjustable.
Duty Cycle	Switch positions: 5% to 25% in 5% steps, and a 100% (contacts continuously closed) position.
Output Contacts	Type A (SPST) contacts 3 A max. at 120 V A.C. or 24 V D.C.
Construction	This unit replaces a blank panel on the Period-to-Voltage Converter. It can be fitted in the field using only a screwdriver.

October, 1974

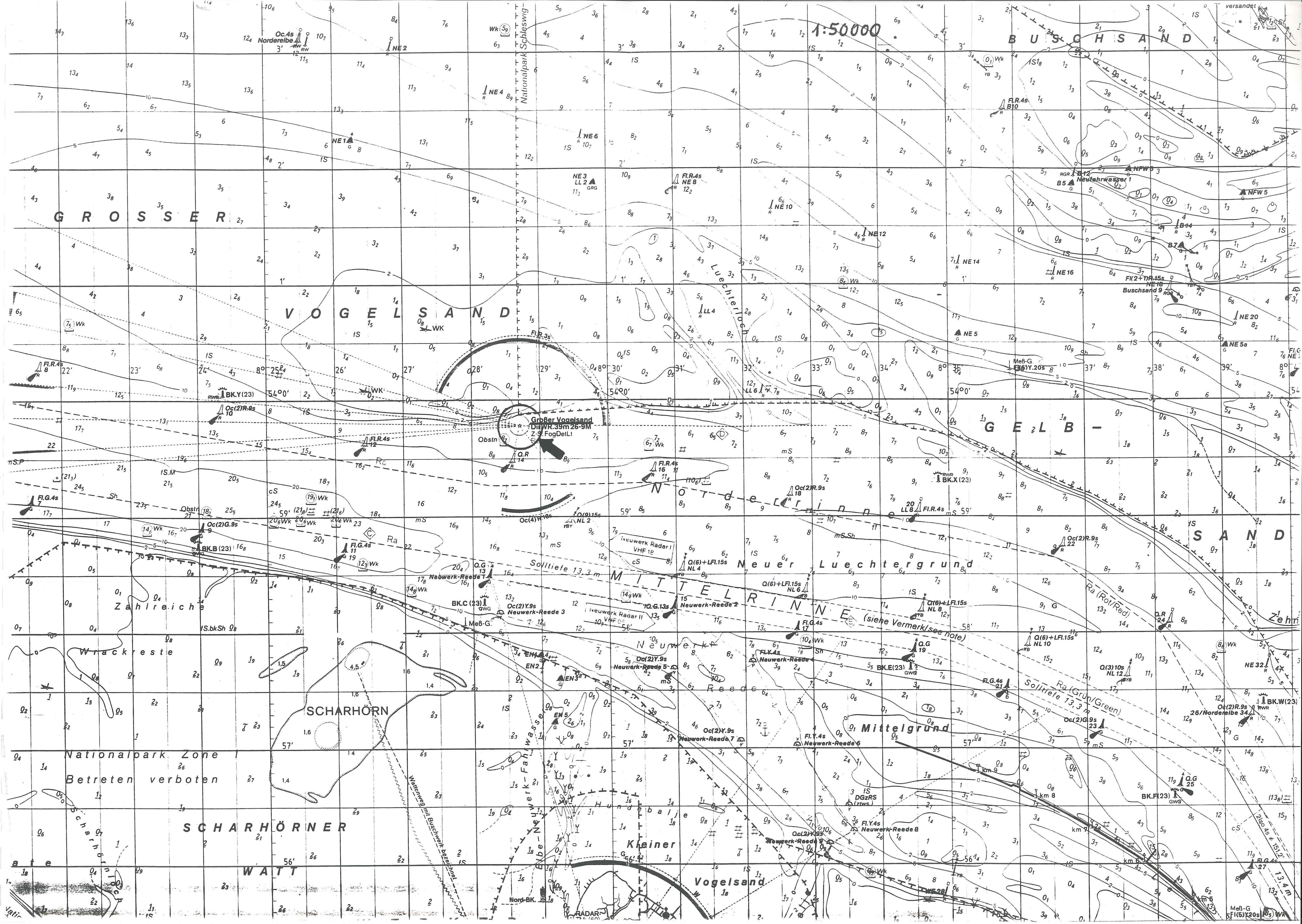
Printed in Canada

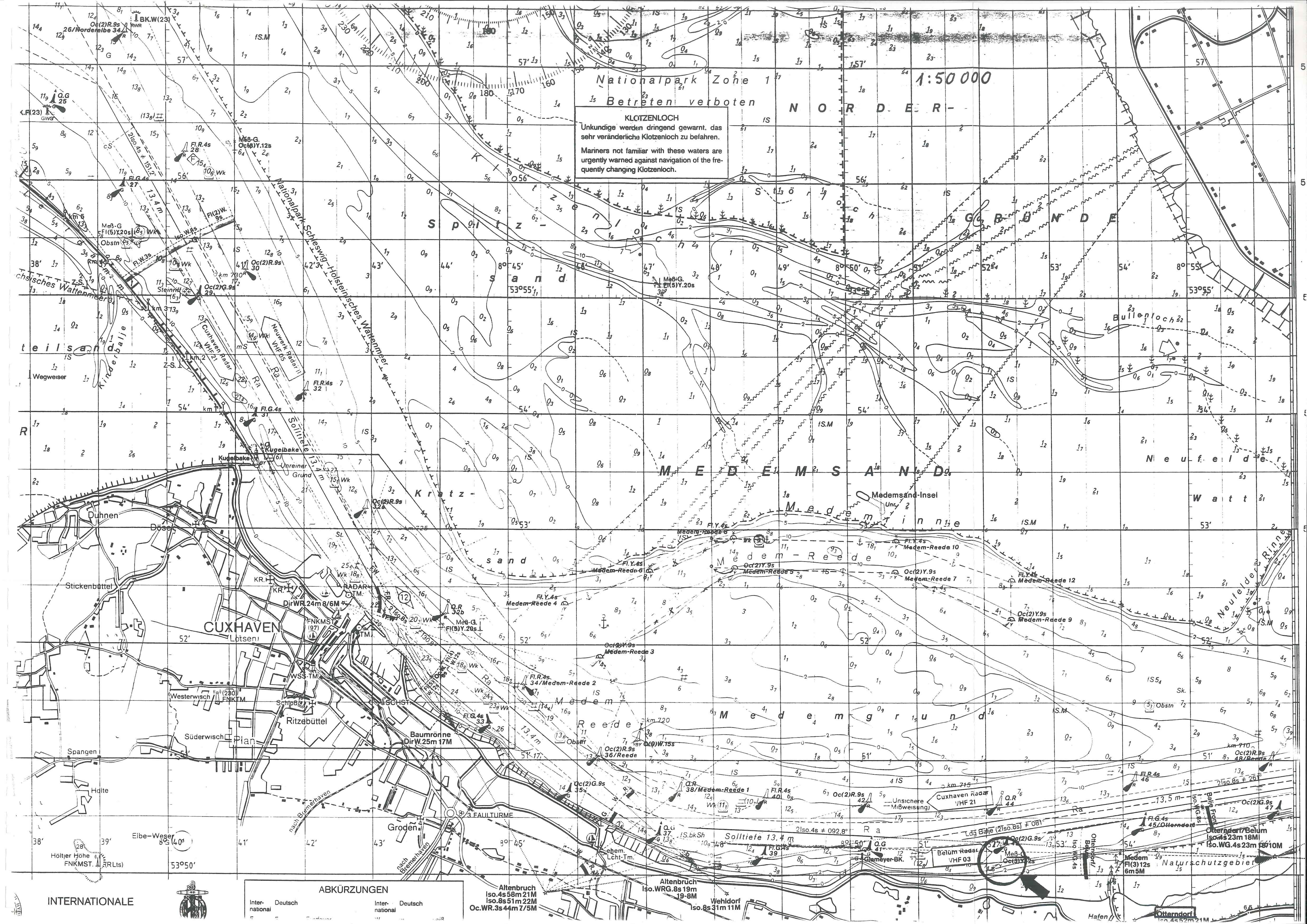
ANHANG 3

Lage der Meßstationen (Seekartenausschnitte)



1:150000
HELGOLAND
Plan
Düne
Hogstean
NSG
Blz.5s 82m 28sm
Düne-O 2
Düne-S
Fkl.(6)+Blk.15s
Unr. (Mun.)
NORDERPIEP
BLAUORT
SAND
Tertiussand-W
TERTIUSSAND
Glt.8s Süderpiep
SÜDERPIEP
Grenze des Geltungsbereichs der SeeSchStrO
Grenze der Plattfischschutzzone
Eingeschränkter Geltungsbereich der SeeSchStrO. (SIEHE HINWEIS 3)
44 (INT 1452)
Glt.4s E 2
Ubr.(3)g.12s Außenelbe-Reede 2
Blz.g.4s Außenelbe-Reede 4
Außenelbe-Reede
Ubr.(2)g.9s Außenelbe-Reede 1
Außenelbe-Reede 3
NORDERELBE
Ubr.4s Nordereibe
Blatt 3
Falsches Tief
Trischen
BUSCHSAND
RADARBERATUNG ELBE siehe Krt. 44 u. NF.
GROSSER VOGELSAND
ELBE 1
RC Racon SS
Auslaufend
Einlaufend
E L B E
Großer Vogelsand
Lt-F.39m 26-9sm
RC
GELB-SAND
Norderrinne
Neuer Luechter-grund
Mittelrinne
Solltiefe 13m
55 sm bis Hamburg
Scharhörnriff-N
Scharhörnriff-W
Westerriff-N
SCHARHÖRN-RIFF
Scharhörn
SFkl. Nordergründe-N
Glt.8s Schlüsseltonne
NORDER-GRÜNDE
NEUWERKER WATT
Neuwerk
Lcht-Tm.39m
RADARBERATUNG JADE UND WESER siehe Krt. 2 u. NF.
WESER
Glt.5s 17sm Racon
Alte Weser
Fkl.r. A2
Fkl.gn. A1
für Jade und Weser
Neue Weser
Neue-Weser-Reede
ROTER SAND
Alte Weser Fw/r/gn.33m 22/19/17sm RC
Roter Sand
JADE
Wangerooger Fahrwss.
Robinsbalje
GROSSER KNECHTSAND
CUXHAVEN
(Norddeich)
Sahlenburg
Elbe-Weser RG
Bl. 2
Bl. 3
105
89
Östliche Länge 8° von Greenwich
Anschluß: Krt. 2. 3011 Blatt 7. 3014 Blatt 7
54°0'
8°0'
8°30'
8°40'


1:50000
GROSSER VOGELSAND
BUSCHSAND
GELB-SAND
Nationalpark Schleswig-
Oc.4s Norderelbe
NE 2
NE 4
NE 1
NE 6
NE 3 LL 2
Fl.R.4s NE 8
NE 10
NE 12
NE 14
NE 16
Fl.R.4s B10
B12 Neufahrwasser 1
B5
NFW 3
NFW 5
B14
B7
Fl(2+1)R.15s NE 18 Buschsand 9
NE 20
NE 5
NE 5a
Meß-G. Fl(5)Y.20s
Luechterloch
LL 4
LL 6
Fl.R.3s
Großer Vogelsand Dir WR.39m 26-9M Z-S. FogDetLt
Obstn
Q.R 14
Fl.R.4s 12
Fl.R.4s 16
Fl.R.4s 8
BK.Y(23)
Oc(2)R.9s 10
Fl.G.4s 7
Oc(2)G.9s 9
BK.B (23)
Fl.G.4s 11
Oc(4)R.18s
Q(9)15s NL 2
Neuwerk Radar I VHF 18
Neuwerk Radar II VHF 05
Norderrinne
Oc(2)R.9s 18
BK.X (23)
20 LL 8 Fl.R.4s
Oc(2)R.9s 22
Neuer Luechtergrund
Solltiefe 13,3 m
MITTELRINNE (siehe Vermerk/see note)
Q.G 13 Neuwerk-Reede 1
BK.C (23)
Oc(2)Y.9s Neuwerk-Reede 3
Meß-G.
Q(6)+LFl.15s NL 4
Q(6)+LFl.15s NL 6
Q.G.13s 15 Neuwerk-Reede 2
Q(6)+LFl.15s NL 8
Q(6)+LFl.15s NL 10
Fl.G.4s 17
Ra (Rot/Red)
Q.R 24
Zehn
Neuwerker Reede
EN 1
EN 2
EN 3
EN 5
Oc(2)Y.9s Neuwerk-Reede 5
Fl.Y.4s Neuwerk-Reede 4
Q.G 19
BK.E(23)
Q(3)10s NL 12
Ra (Grün/Green)
Fl.G.4s 21
NE 32
BK.W(23)
Oc(2)R.9s 26/Norderelbe 34
Oc(2)G.9s 23
Mittelgrund
Oc(2)Y.9s Neuwerk-Reede 7
Fl.Y.4s Neuwerk-Reede 6
km 9
km 8
km 7
km 6
km 5
Q.G 25
BK.F(23)
DGzRS (ztws.)
Fl.Y.4s Neuwerk-Reede 8
Oc(2)Y.9s Neuwerk-Reede 9
Fl.G.4s 27
Meß-G Fl(5)Y.20s
2Iso.4s 151,2°
13,4 m
Zahlreiche Wrackreste
SCHARHÖRN
Nationalpark Zone I
Betreten verboten
SCHARHÖRNER WATT
Scharhörnloch
Wattenweg mit Buschwerk bezeichnet
Elbe-Neuwerk-Fahrwasser
Hundebalje
Kleiner Vogelsand
Nord-BK.
RADAR
versandet



1:50000
Nationalpark Zone 1
Betreten verboten
KLOTZENLOCH
Unkundige werden dringend gewarnt, das sehr veränderliche Klotzenloch zu befahren.
Mariners not familiar with these waters are urgently warned against navigation of the frequently changing Klotzenloch.
N O R D E R - G R Ü N D E
Klotzenloch
Spitzsand
Nationalpark Schleswig-Holsteinisches Wattenmeer
M E D E M S A N D
Medemsand-Insel
Medem-Rinne
Medem-Reede
Medem-Reede 3
Medem-Reede 4
Medem-Reede 5
Medem-Reede 6
Medem-Reede 7
Medem-Reede 9
Medem-Reede 10
Medem-Reede 12
Medemgrund
Neufelder Watt
Neufelder Rinne
Bullenloch
Kratzsand
Kinderbalje
Kugelbake
Solltiefe 13,4 m
Cuxhaven Radar VHF 21
Neuwerk Radar II VHF 05
Belum Radar VHF 03
Duhnen
Döse
Stickenbüttel
CUXHAVEN
Lotsen
Westerwisch
Ritzebüttel
Süderwisch
Spangen
Holte
Groden
Baumrönne
DirW.25m 17M
DirWR.24m 8/6M
3 FAULTÜRME
Elbe-Weser
Höltjer Höhe
nach Bremerhaven
Altenbruch
Iso.4s 58m 21M
Iso.8s 51m 22M
Oc.WR.3s 44m 7/5M
Altenbruch
Iso.WRG.8s 19m 19-8M
Wehldorf
Iso.8s 31m 11M
Otterndorf/Belum
Iso.4s 23m 18M
Iso.WG.4s 23m 16/10M
Medem
Fl(3) 12s 6m 5M
Naturschutzgebiet
Otterndorf
Unsichere Mißweisung
ABKÜRZUNGEN
International
Deutsch
INTERNATIONALE

1 : 30 000

Ordnung".

Mühlenstraßen

Groden

Brunsbüttel

Brunsbüttel-Altenhafen

Zweidorf

BRUNSBÜTTEL

WSS-TM.

KR.

Industriegebiet
Iso.3s46m21M
Brunsbüttel

2 LFl.8s

Lotsen

HS.

Oc.R.5s9m3M

Meß-G. Fl.Y.4s

Schleuseninsel
Iso.3s Fl.3s24m16M

2 WR.(vert)10/8M

Fl.WG.10/6M

Fl.R.4s 60/NOK 1 Reede

Oc(2)R.9s 58a/NOK 2 Reede

Nordwest-Reede

Zufahrt (Siehe Vermerk)

Obstn

Kanal einlaufend

Schleuseninsel Iso.W.3s Fl.W.3s

Solltiefe 13,6 m

13,5 m

2 Iso.8s ≠ 089,2°

Radarlinie

km 695

Elbe einlaufend

Fl.G.4s 57a/Reede

Oc(2)G.9s 59/Reede

Südreede

Südreede 1

Südreede 3

Meß-G. Oc(3)Y.12s

Wildschutzgebiet

Neufelder Watt

Rinne

Neufelder Reede

Fl.Y.4s Neuf.-Reede 12

Q.R 58/Reede

Fl.Y.4s Neuf.-Reede 10

2 Obstn

Oc(2)R.9s 56/Reede

Fl.Y.4s Neuf.-Reede 8

Fl.Y.4s Neuf.-Reede 6

Fl.R.4s 54/Reede

Fl.G.4s 55er

Oc(2)G.9s

Q.R 52/Reede

2 Iso.3s ≠ 065,5°

Balje Iso.WG.8s24m17/15M

EHEM. LCHT-TM.

Balje Iso.8s54m21M Oc.WR.3s5/3M

Sielgraben

Osterriff Vogelschutzgebiet

Iso.WR.6s6m9/3M Oste F.14m5M

Hullen

Hörner

Außendeich

Balje

Elbdeich

km 80

km 79

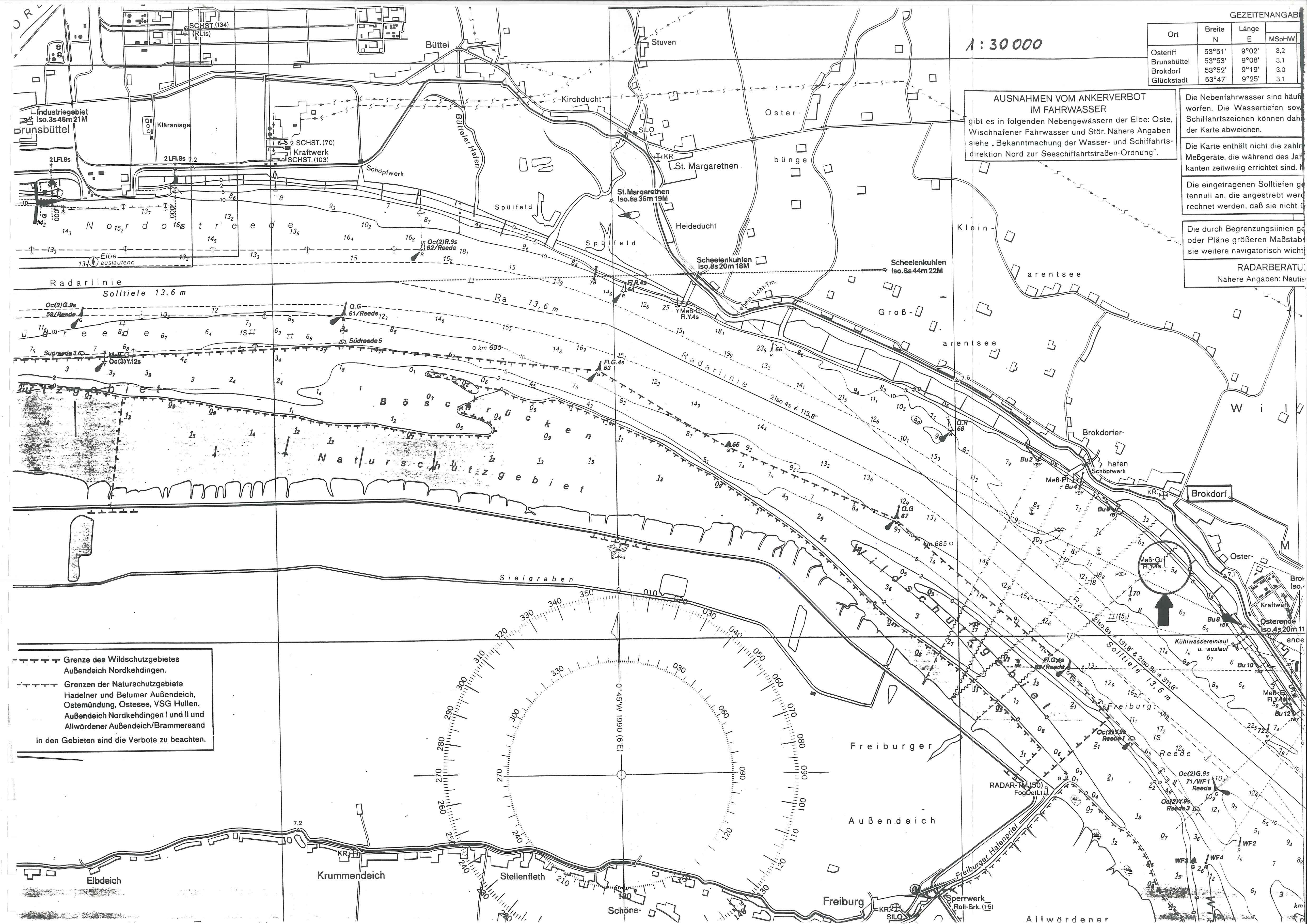
km 78

km 705

km 700

Oste
Solltiefen bei M.H.W.
Mündung–Sperrwerk: 4,7 m
Sperrwerk–Osten: 4,0 m
Osten–Bremervörde: 2,2 m
In der Karte ist der Name Oste bei den Tonnen ab Nr. 4 nicht angegeben.

Grenze des W
Außendeich No
Grenzen der N
Hadelner und
Ostemündung.
Außendeich No
Allwördener Au
In den Gebieten sind



1:30 000
GEZEITENANGABE
Ort | Breite N | Länge E | MSpHW
Osteriff 53°51' 9°02' 3,2
Brunsbüttel 53°53' 9°08' 3,1
Brokdorf 53°52' 9°19' 3,0
Glückstadt 53°47' 9°25' 3,1
AUSNAHMEN VOM ANKERVERBOT IM FAHRWASSER
gibt es in folgenden Nebengewässern der Elbe: Oste, Wischhafener Fahrwasser und Stör. Nähere Angaben siehe „Bekanntmachung der Wasser- und Schiffahrtsdirektion Nord zur Seeschiffahrtstraßen-Ordnung".
Die Nebenfahrwasser sind häuf
worfen. Die Wassertiefen sow
Schiffahrtszeichen können dah
der Karte abweichen.
Die Karte enthält nicht die zahlr
Meßgeräte, die während des Jah
kanten zeitweilig errichtet sind. N
Die eingetragenen Solltiefen ge
tennull an, die angestrebt werd
rechnet werden, daß sie nicht ü
Die durch Begrenzungslinien ge
oder Pläne größeren Maßstab
sie weitere navigatorisch wicht
RADARBERATU
Nähere Angaben: Nautis
Industriegebiet
Iso.3s46m21M
Brunsbüttel
Kläranlage
SCHST.(134)
Büttel
Stuven
Kirchducht
Büttler Hafen
2 SCHST.(70)
Kraftwerk
SCHST.(103)
Schöpfwerk
SILO
KR.
St. Margarethen
Oster-
bünge
St. Margarethen
Iso.8s36m19M
Heideducht
Spülfeld
Klein-
Scheelenkuhlen
Iso.8s20m18M
Scheelenkuhlen
Iso.8s44m22M
arentsee
Groß-
arentsee
Nordostreede
Elbe auslaufend
Oc(2)R.9s
62/Reede
Radarlinie
Solltiefe 13,6 m
Oc(2)G.9s
59/Reede
Q.G
61/Reede
Südreede
Südreede 3
Südreede 5
Oc(3)Y.12s
km 690
Fl.G.4s
63
Meß-G
Fl.Y.4s
Bösch rücken
Naturschutzgebiet
Wildschutzgebiet
Radarlinie
2Iso.4s ≠ 115,8°
Brokdorfer-
hafen
Schöpfwerk
Brokdorf
Meß-G
Fl.Y.4s
Oster-
Kraftwerk
Osterende
Iso.4s20m11
Kühlwassereinlauf u. -auslauf
2Iso.8s ≠ 131,8° & 2Iso.8s ≠ 311,8°
Solltiefe 13,6 m
km 685
Q.G
67
Q.R
68
Fl.G.4s
69/Reede
Freiburg-
Reede
Oc(2)Y.9s
Reede 1
Oc(2)G.9s
71/WF1
Reede
Oc(2)Y.9s
Reede 3
WF2
WF3
WF4
Sielgraben
0°45'W 1990 (6'E)
Freiburger
Außendeich
RADAR-TM (50)
FogDetLt
Freiburger Hafenpriel
Elbdeich
Krummendeich
Stellenfleth
Schöne-
Freiburg
Sperrwerk
Roll-Brk.(I-5)
SILO
Allwördener
Grenze des Wildschutzgebietes Außendeich Nordkehdingen.
Grenzen der Naturschutzgebiete Hadelner und Belumer Außendeich, Ostemündung, Ostesee, VSG Hullen, Außendeich Nordkehdingen I und II und Allwördener Außendeich/Brammersand
In den Gebieten sind die Verbote zu beachten.

Die eingetragenen Solltiefen geben Tiefen unter Kartennull an, sie sind so gewählt, daß mit genügender Sicherheit damit gerechnet werden, daß sie nicht überall vorhanden sind

Die durch Begrenzungslinien gekennzeichneten Karten oder Pläne größeren Maßstabs sind zu benutzen, da sie weitere navigatorisch wichtige Angaben enthalten

RADARBERATUNG ELBE
Nähere Angaben: Nautischer Funkdienst

AUSNAHMEN VOM ANKERVERBOT IM FAHRWASSER
gibt es in folgenden Nebengewässern der Elbe: Haseldorfer Binnenelbe, Dwarsloch, Lühesander Süderelbe und Hahnöfer Nebenelbe. Nähere Angaben siehe „Bekanntmachung der Wasser- und Schiffahrtsdirektion Nord zur Seeschiffahrtstraßen-Ordnung".

1:30 000

1:30 000

Stroh-deich
Bielenberg
Oc.R
Q.R 86/GN 12
Buhne
Groß Kollmar
Deich-reihe
Stein-deich
Meß-Ca. Fl.Y.4s
Oc(2)R.9s 88
Steindeich Oc(2)WRG.9s 31m 9-5M
Kamper-reihe
Kollmar
KR.
Klein Kollmar
Kuhle
Fleien
Radarlinie Solltiefe 13,6 m
2 Iso.6s ≠ 302,7°
Oc(2)G.9s 89
Fl(2+1)R.15s 92/PN1
Kollmar Iso.4s 40m 16M
Hfn.
PN3
PN4
PN5
PN6
Pagensand-N. Oc(4)WRG.15s 11m 6-3M
2 Oc.4s ≠ 134,2°
Ruthensand Iso.4s 15m 9M Oc.WRG.6s 15-11M
Q.G 91
km 665
Pagensand-N. Iso.4s 20m 15M
PN7
PN8
F.WRG. 6-3M
Sperrwerk Drehbrücke (7) SS(Warn.) SS(Verkehr)
km 10
Krückau
Krückau Solltiefe bei M.H.W. Mündung : 4,3 m Elmshorn : 2,3 m
Ruthensand Iso.4s 30m 11M
Naturschutzgebiet teilweise bewachsen
Fl.R.4s 94
Buhne 4
Buhne 6
Oc(2)G.9s 93
Sand-aufspülung
Pagensand-Mitte Fl(2)WRG.15s 11m 9-5M
Pagensand Oc.WRG.4s 18m 9-5M
Q.R 96
Q.G 95
Pagensand Oc.4s 35m 13M
PN9
PN10
PN11
PN12
PN13
PN14
Naturschutzgebiet
Asselersand
Betreten verboten
BK. & Lcht-Tm.
Ruthenstrom
Assel
Hfn.
KR.
Barnkruger Süderelbe
Barnkruger Loch
Wehte
Zgl.
Barnkrug
1852m 165,3° & 345,3°
Radarlinie
Pagensand
Pfähle
Well
Vogelschutzgebiet
Oc(2)WRG.12s 13M
PN15
PN16
PN17
PN18
PN19
PN20
Oc(2)Y.9s Reede 2
Oc(2)Y.9s Reede 4
Oc(2)Y.9s Reede 1
Unt.Gd.
Grauerort
Abbenfleth
Sperrwerk
Bootswerft
Fl.G.4s 99
Fl.R.4s 100
Pagensand-S. LFl(4)WR.25s 11m 7/5M
PN21
PN22
Sollttiefe 13,5
Hasedorfer Naturschutzgebiet
Bishorst
Bützfleth
Süderelbe
SS (Verkehr) ztws.
Elbehaven
Bützfleth
Wk
Bishorster Sand
Binnenelbe
KEHDINGEN
BÜTZFLETH