

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Report, Published Version

Niemeyer, Hanz Dieter; Gärtner, Joachim; Grüne, Joachim
Naturuntersuchungen von Wattseegang an der Deutschen Nordseeküste

Zur Verfügung gestellt in Kooperation mit/Provided in Cooperation with:
Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI)

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/110354>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Niedersächsisches Landesamt für Wasser und Abfall - Forschungsstelle Küste, Amt für Land- und Wasserwirtschaft Heide und Husum, Forschungseinrichtung großer Wellenkanal (Hg.) (1992): Naturuntersuchungen von Wattseegang an der Deutschen Nordseeküste.

Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



BUNDESMINISTERIUM FÜR FORSCHUNG UND TECHNOLOGIE

-Meerestechnik-

NATURUNTERSUCHUNGEN VON WATTSEEGANG AN DER DEUTSCHEN NORDSEEKÜSTE

von

Hanz Dieter Niemeyer
Joachim Gärtner
Joachim Grüne

NIEDERSÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR WASSER UND ABFALL
- FORSCHUNGSSTELLE KÜSTE -

AMT FÜR LAND- UND WASSERWIRTSCHAFT HEIDE

AMT FÜR LAND- UND WASSERWIRTSCHAFT HUSUM

FORSCHUNGSEINRICHTUNG GROSSER WELLENKANAL

31-2

Schlußbericht zum Forschungsvorhaben MTK 464 B - Teil I, September 1992

029928 21-1

INHALT

Seite

1. Einleitung	3
2. Stand der Forschung	5
3. Das Naturmeßprogramm	
3.1 Zielsetzungen	8
3.2 Hydrographisch-morphologische Charakteristik der Untersuchungsgebiete	
3.2.1 Vorbemerkungen	10
3.2.2 Einzugsgebiet des Norderneyer Seegats	11
3.2.3 Wurster Watt	13
3.2.4 Eider-Ästuar	14
3.2.5 Einzugsgebiet der Hever	17
3.3 Meßstellen und Meßtechnik	
3.3.1 Einzugsgebiet des Norderneyer Seegats	19
3.3.2 Wurster Watt	23
3.3.3 Eiderästuar	23
3.3.4 Einzugsgebiet der Hever	25
3.4 Datenerfassung und -auswertung	
3.4.1 Datenerfassung	28
3.4.2 Datensätze und Einordnung der Daten	29
3.4.3 Auswerteverfahren und Parameterauswahl	30
4. Untersuchungsergebnisse	
4.1 Ursprung und Erscheinungsformen des Seegangs	33
4.2 Verteilung der Wellenhöhen und -perioden	
4.2.1 Vorbemerkungen	34
4.2.2 Verteilung der Wellenhöhen	39
4.2.3 Verteilung der Wellenperioden	45

4.3 Wellensteilheiten	47
4.4 Windeinwirkungen	55
4.5 Seegang, Stau und Sunk	71
4.6 Energiespektren	81
4.7 Flachwassereffekte	97
5. Zusammenfassung und Schlußfolgerungen	116
6. Danksagung	118
7. Schrifttum	119

1. EINLEITUNG

Das Festland an der deutschen Nordseeküste besteht - von wenigen Ausnahmen pleistozäner Rudimente abgesehen - aus alluvialen Niederungsgebieten, zu deren Schutz vor Sturmfluten der Bau und die Unterhaltung von Seedeichen erforderlich ist. Neben der Kehrung der bei Sturmfluten zu erwartenden Wasserstände muß deren Bestick so ausgelegt sein, daß durch den Sturmflutseegang bewirkter Wellenauflauf nur in begrenztem, sehr geringem Maß überlaufen kann. Ebenso muß die funktionale und konstruktive Ausbildung von Seedeichen hinreichend sein, um unter der Einwirkung bei Sturmfluten auftretender dynamischer und statischer Seegangbelastungen unter Hinnahme begrenzter Schäden funktionsfähig zu bleiben.

Von daher gesehen sind eingehende Kenntnisse über den Seegang in den dem Festland vorgelagerten Wattgebieten der deutschen Nordseeküste von hoher Bedeutung für die Gestaltung eines technisch sicheren und volkswirtschaftlich angemessenen Küstenschutzes. Der Mangel an hinreichenden Kenntnissen machte es allerdings unumgänglich, den Wellenauflauf empirisch auf der Grundlage von Teekeinemessungen eingetretener Sturmfluten zu bestimmen [BRAHMS 1754,1757; TWB 1969]. Es ist mittlerweile gelungen, Verfahren zu entwickeln, die eine objektivierte Extrapolation von Teekeinemessungen für den Bemessungsfall ermöglichen [NIEMEYER 1976, 1977a]. Diese Vorgehensweise bleibt jedoch mit einer Reihe von Unsicherheiten behaftet und ist hinsichtlich einer Bestickfestlegung von Seedeichen in Orientierung an den hier genannten Kriterien nur als begrenzt taugliche Möglichkeit zur vorübergehenden Nutzung anzusehen, solange keine zuverlässigeren Verfahren zur Verfügung stehen. Voraussetzung für die Einführung verbesserter Bemessungsgrundlagen sind zum einen die Fortentwicklung von Bemessungsverfahren und zum anderen eingehende Kenntnisse des Seegangklimas unmittelbar vor den Deichlinien.

Noch vor kurzer Zeit machte es der Mangel an geeigneten Meßgeräten [DRESKE 1964] unmöglich, zuverlässige Daten über den Seegang in Wattgebieten zu gewinnen [GÖHREN 1974]. Die nach der Sturmflut vom 16./17. Februar 1962 erhobene Forderung nach Naturmessungen von Seegang [AG STFL 1962; HENSEN 1966; LÜDERS 1966; TWB 1969] bewirkte zwar Impulse hinsichtlich der Entwicklung geeigneter Meßgeräte [DRESKE 1964; GÖHREN 1970], jedoch keine Umsetzung in erforderliche flächendeckende Meßprogramme. Ein erstes derartiges Programm wurde in Wattgebieten des deutschen Nordseeküstengebietes im Rahmen der Planungen für das Vorhafenprojekt Neuwerk-Scharhörn ausgeführt [SCHRADER 1968; SIEFERT 1971, 1974]. Eine über das KURATORIUM FÜR

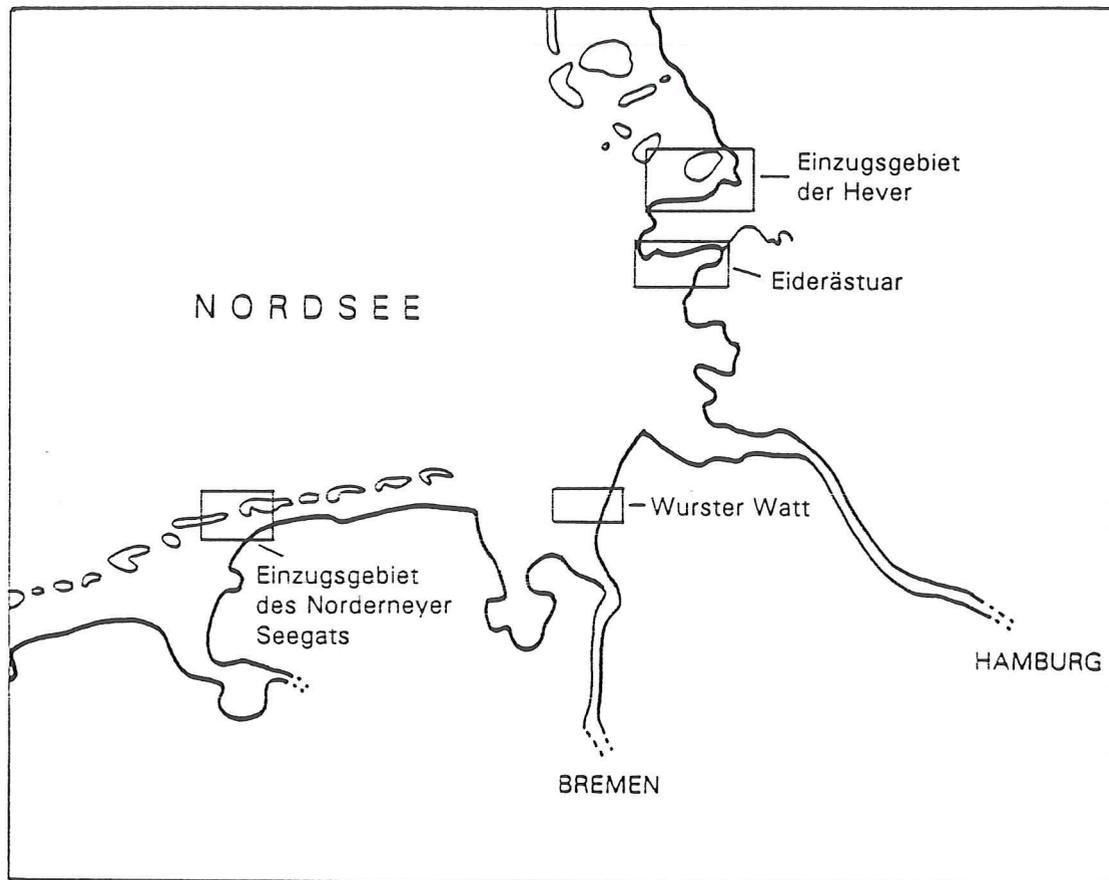


Abb. 1: Lage der Untersuchungsgebiete an der deutschen Nordseeküste

FORSCHUNG IM KÜSTENINGENIEURWESEN erfolgende Förderung des BUNDESMINISTERIUMS FÜR FORSCHUNG UND TECHNOLOGIE ermöglichte wenig später ein flächendeckendes Seegangmeßprogramm im Wattenmeer, das primär Zielsetzungen des Insel- und Küstenschutzes verfolgte [LUCK & NIEMEYER 1976, 1977; NIEMEYER 1979a, 1979b, 1983]. Danach sind in Wattgebieten der deutschen Nordseeküste nur in geringem Umfang Seegangmeßprogramme ausgeführt worden [COLDEWEY 1982; GRÜNE 1983, 1991; NIEMEYER 1984], da der erforderliche personelle und materielle Aufwand sehr hoch war.

Fortschritte in der Meßtechnik und insbesondere in der Datenerfassung und -verarbeitung lassen es aber in jüngster Zeit als machbar erscheinen, aufbauend auf bisher gewonnenen Kenntnissen gezielte Planungen für weiterführende Naturmeßprogramme vorzunehmen. Die Förderung des BUNDESMINISTERIUMS FÜR FORSCHUNG UND TECHNOLOGIE über das KURATORIUM FÜR FORSCHUNG IM KÜSTENINGENIEURWESEN machte es dann im Rahmen des Forschungsvorhabens "Seegang und Bemessung auf Seegang im Küstenvorfeld und in den Ästuarien der Deutschen Bucht" möglich, ein Teilprojekt zur Ausführung von Naturmessungen in vier Wattgebieten der deutschen Nordseeküste (Abb. 1) einschließ-

lich der exemplarischen Anwendung eines mathematischen Seegangmodells in einem der Teilgebiete einzurichten. Wegen der unterschiedlichen Aufgabenstellungen bei den Teilaufgaben wird über den Eignungstest des mathematischen Modells gesondert berichtet [NIEMEYER, KAISER & DEN ADEL 1992]. Hier werden in Orientierung an dessen originären Zielsetzungen die Ergebnisse des Naturmeßprogramms dargestellt.

2. STAND DER FORSCHUNG

Erste bekannte systematische Erkenntnisse über den Wattseegang im Hinblick auf den Wellenauflauf an Seedeichen bis hin zu quantitativen Angaben hat der friesische Deichbaumeister Albert BRAHMS [1754, 1757] geliefert (Abb. 2) [LUCK & NIEMEYER 1980]. Hinsichtlich der Bedeutung des Seegangs für die morphologische Prägung von Wattgebieten sind die Arbeiten von KRÜGER [1911, 1913, 1922] richtungsweisend gewesen, obwohl ihre Bedeutung hierfür - ebenso wie die von BRAHMS - jahrzehntelang im Schrifttum des deutschen Küsteningenieurwesens nicht reflektiert worden ist [NIEMEYER 1983, 1984, 1987a, 1987b]. SCHÄFER [1941] berichtet über Einwirkungen des Seegangs auf das Ökosystem Wattenmeer am Beispiel von Quellerpopulationen und Schillakkumulationen; aber auch seine Untersuchungsergebnisse haben lange Zeit kein erkennbares Echo in einschlägigen Publikationen gefunden [NIEMEYER 1987a, 1987b; KAISER 1991].

Im Zuge der Voruntersuchungen für den geplanten Tiefwasserhafen Neuwerk-Scharhörn wurde – erstmalig im deutschen Küsteningenieurwesen gezielt für die Planung eines Vorhabens – ein großräumiges Seegangsmeßprogramm vor und auf

SEEGANGSABSCHÄTZUNG NACH BRAHMS (1754)
Vergleich mit Naturmessungen

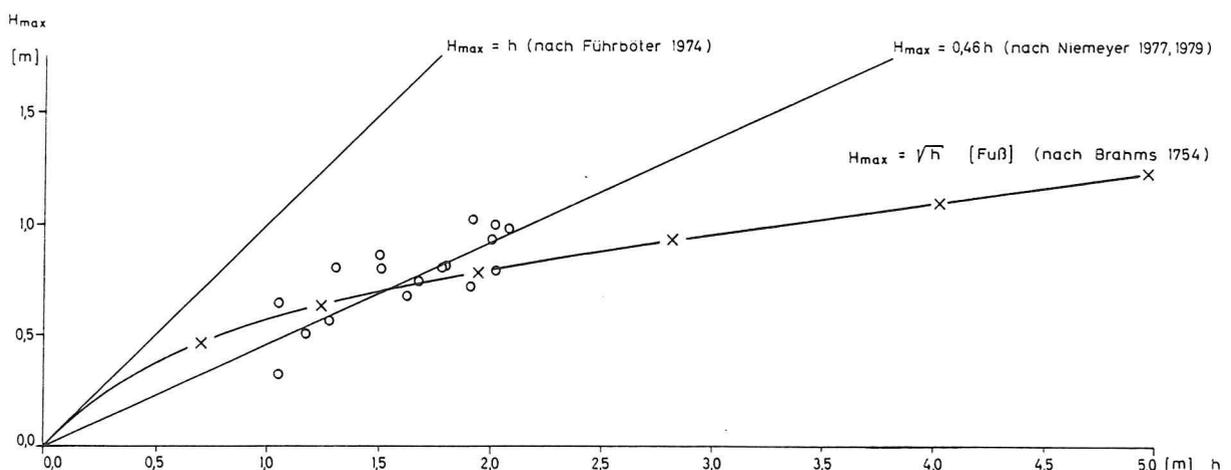


Abb. 2: Seegangsabschätzung nach BRAHMS [LUCK u. NIEMEYER 1980]

den Watten des südlichen Elbmündungsgebietes ausgeführt [SCHRADER 1968; SIEFERT 1971, 1974]. Wesentliches Untersuchungsergebnis war eine Parametrisierung und Quantifizierung von seegangsgeprägten hydrodynamisch-morphologischen Wechselwirkungen mit gebietsspezifischer Differenzierung für ästuarine Wattgebiete [SIEFERT 1974].

Im Rahmen des Seegangsmeßprogramms Ostfriesische Inseln und Küste [LUCK & NIEMEYER 1976, 1977] konnten erstmals quantitative Erkenntnisse über den Seegang an einer inselgeschützten Wattküste gewonnen werden. Wesentliche Ergebnisse dieses Forschungsvorhabens, die später durch Naturuntersuchungen zur Vorplanung des Bauvorhabens Leyhörn im Bereich der Leybucht [NIEMEYER 1984, 1991] bestätigt und erweitert werden konnten, sind hinsichtlich des Seegangs im Bereich durch Düneninseln geschützter Watten:

1. Morphologisch prägend für die Watten - insbesondere oberhalb des Tidemittelwassers - ist der bei auflandigen Starkwind- und Sturmlagen aus der Nordsee einschwingende Seegang [NIEMEYER 1979a, 1979b, 1983, 1984, 1986, 1987c, 1991],
2. Die Seegaten üben auf den von See einschwingenden Seegang eine Filterwirkung aus, die unabhängig von der Windrichtung wattseitig zu einem nahezu einheitlichen Ausbreitungsverhalten führt, das weitgehend von der Wattmorphologie bestimmt wird [NIEMEYER 1983, 1984, 1986, 1991]. Der Tunnel-effekt der Seegaten bedingt dabei auf den Watten an der Festlandsküste ein Maximum der Seegangsbelastung in Verlängerung ihrer Rinnenachse; der Schatteneffekt der Inseln bewirkt eine mit der Entfernung von den Seegaten wachsende Abnahme der Seegangsintensität infolge verstärkter Dämpfungseffekte infolge Beugung und Reibung [NIEMEYER 1983]. Die Wirkung dieses Tunneleffektes konnte in Zusammenhang mit der Verlagerung von Seegaten anhand der Ausbildung von Hellern und Errichtung von Poldern und deren anschließendem Verschwinden exemplarisch nachgewiesen werden [NIEMEYER 1990].
3. Stabile Watten und einschwingender Seegang auf den Watten oberhalb des Tidemittelwassers stehen in einem dynamischen Gleichgewicht, das mittels eines engen linearen Zusammenhangs von Wellenhöhen und Wassertiefen parametrisiert werden kann (Abb. 3). Mit wachsender Entfernung von den Seegaten nehmen die Wellenhöhen ab und die Wathöhen bis hin zur Ausbildung von Hellern oder Salzwiesen zu [NIEMEYER 1979a, 1979b, 1983]. In

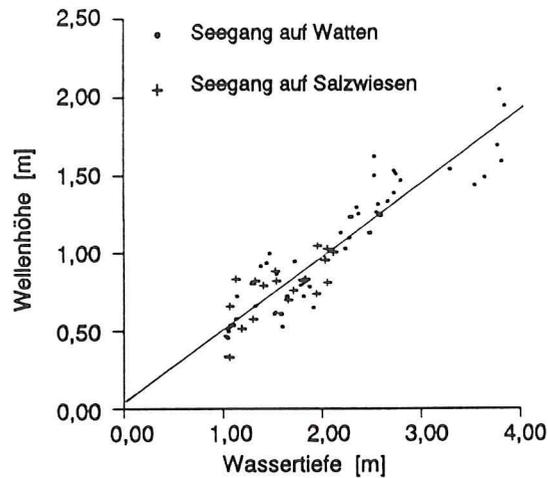
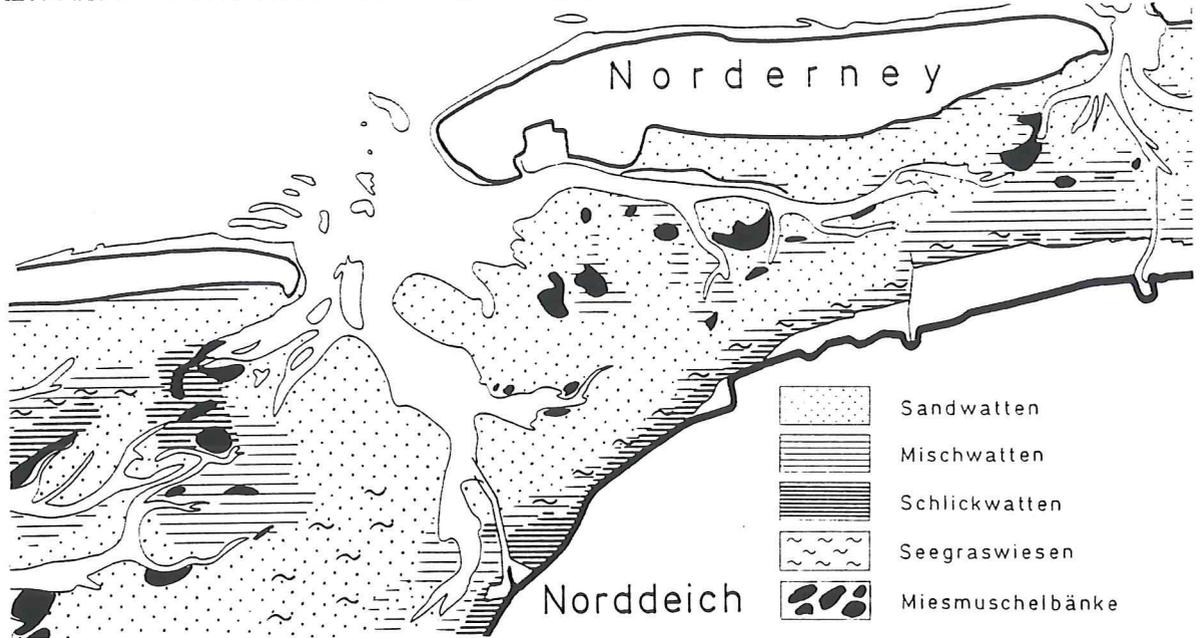
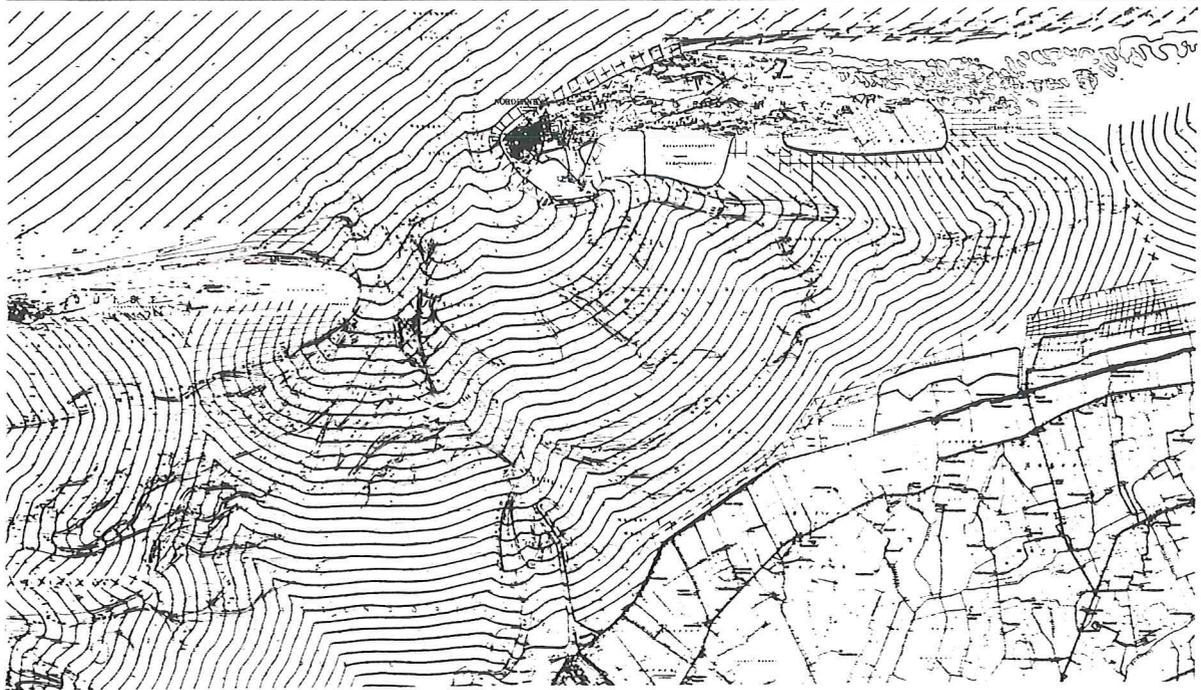


Abb. 3: Wechselwirkungen von Seegang und Wattmorphologie im Einzugsgebiet des Norderneyer Seegats: Seegangsausbreitung und Verteilung der Oberflächen-sedimente; Wellenhöhen-Wassertiefen-Verhältnis [NIEMEYER 1987a, 1987b]

Sedimentationsbereichen kann auf dieser Grundlage das Maß zu erwartender Verlandung abgeschätzt werden [NIEMEYER 1984, 1991].

4. Verbunden mit der abnehmenden Seegangintensität und wachsenden geodätischen Wathöhen ist eine gleichsinnige Zonierung der Oberflächensedimente mit der Tendenz zu kleineren Korndurchmessern und zunehmenden Anteilen organischer Substanzen (Abb. 3) [NIEMEYER 1983, 1984, 1987a, 1987b, 1991].

Untersuchungen im Bereich der Ems, des Seegats Harle und auf Watten des Eiderästuars bestätigten ebenfalls für exemplarische Vergleiche den linearen Zusammenhang zwischen Wellenhöhen und örtlichen Wassertiefen. Unklar blieb aber, ob es sich um einschwingenden Seegang oder örtliche Windsee handelt. Gegen die seinerzeitige Auffassung von HUNDT [1962], der Sturmflutseegang auf Watten sei örtliche Windsee, spricht aber, daß die örtliche Wellenhöhen/Wassertiefen-Relation auf Variationen von Windgeschwindigkeit und -richtung keine signifikanten Reaktionen zeigt [GRÜNE 1991].

3. DAS NATURMESSPROGRAMM

3.1 Zielsetzungen

Vorrangigere Zielsetzung der Naturuntersuchungen war, eingehendere Kenntnisse über das Seegangsklima in Wattgebieten verschiedenartigen Typs zu erhalten. In Orientierung an parametrisierbaren hydrodynamisch-morphologischen Randbedingungen sollte die Frage der Übertragbarkeit auf ähnlich strukturierte Wattgebiete geprüft werden. Im Vordergrund standen hierbei Fragen der Seegangsbelastung von Bauwerken und hydrodynamisch-morphologische Wechselwirkungen.

Hinsichtlich der Seegangsbelastung von Bauwerken war eine Orientierung an verfügbaren Bemessungsansätzen für verschiedenartige Belastungsfälle von Küstenbauwerken - unabhängig von deren zum Teil erheblichen Unzulänglichkeiten - für die Ermittlung von quantitativ hinreichend gesicherten Eingangsparametern aus dem Seegang erforderlich. Als Beispiele seien dafür genannt:

- Wellenauflauf an Seedeichen und Deckwerken
Ansätze: WASSING [1957]; HUNT [1959]; VAN OORSCHOT & D'ANGREMOND [1968]

- Brecherdruckschläge auf Böschungen
Ansätze: FÜHRBÖTER [1966]; TAW [1984a, 1984b]
- Wellendruck auf Wände
Ansätze: SAINFLOU [1928]; MINIKIN [1963]; CERC [1977]
- Wellenbelastung pfahlartiger Bauwerke
Ansätze: MORISON [1953]; MC CAMY & FUCHS [1954]

Darüber hinaus wurde angestrebt, vertiefte Einblicke in primär seegangsgeprägte hydrodynamisch-morphologische Wechselwirkungen zu gewinnen, wie zum Beispiel in Sediment- und Biotopzonierungen im Wattenmeer oder in das Höhenwachstum von Watten bis zur Vorlandbildung.

In Verfolgung dieser übergeordneten Zielsetzungen ist folgende Untersuchungsstrategie für die Meßprogramme entwickelt worden, wobei eine parallele Bearbeitung vorhandener und neu zu messender Daten hinsichtlich des Erreichens kurz- und langfristiger Untersuchungsziele vorgesehen wurde:

- Mit Hilfe bewährter und fortzuentwickelnder empirisch-statistischer Verfahren einschließlich der Verwendung verfügbarer Ergebnisse aus mathematischen Modellen sollen Ergebnisse formuliert werden, die kurzfristig als Entscheidungsgrundlagen bei Planungen im Küsteningenieurwesen zur Verfügung stehen.
- Die Konzeption der Meßprogramme soll eine Nutzung der Daten für Anwendungstests und die Fortentwicklung von Modellen erlauben, um hiermit langfristig eine Verbesserung der flächenhaften Informationen zum Seegangsklima in Wattgebieten erreichen zu können und zudem eine weitgehendere Unabhängigkeit als bisher von kostenintensiven Meßprogrammen zu ermöglichen.
- Der Seegang vor den Bauwerken soll in Abhängigkeit von der Morphologie des Vorfeldes (Wattrinnen, Wattrücken, Insellee, Lahnungsfelder, Deichvorländer) dargestellt werden. Hierbei soll gewährleistet werden, daß die Meßorte flächenhaft für ihr Umfeld repräsentativ sind.
- Die Verformung des Seegangs auf der Laufstrecke vom Küstenvorfeld soll auf der Grundlage physikalischer Ansätze sowohl in empirisch-statistischer als auch in deterministischer Form erfolgen, um die Übertragbarkeit der Untersuchungsergebnisse auf andere Bereiche über die parametrische Formulierung der morphologischen Randbedingungen zu ermöglichen.

- Eine parallele Untersuchung in offenen und inselgeschützten Watten soll klären, ob die Wechselwirkungen von Seegang dort jeweils andersartigen Gesetzmäßigkeiten unterliegen.
- Mit der Einbindung bisher untersuchter Gebiete wird eine Überprüfung vorliegender Ansätze hydrodynamisch-morphologischer Wechselwirkungen für Wattgebiete der deutschen Nordseeküste in vergleichbaren topographischen Strukturen ermöglicht werden. In diesem Zusammenhang sind die weitergehende Bearbeitungen vorhandenen älteren Meßmaterials zu sehen.

Die in den Zielsetzungen und in der Untersuchungsstrategie enthaltenen Vorgaben sind sowohl für die räumliche Konzeption des Meßprogramms, der Datenerfassung, -aufbereitung und -analyse bestimmend gewesen. Ebenso sind sie Leitlinie der wissenschaftlichen Bearbeitung aller Daten und Ergebnisse.

3.2 Hydrographisch-morphologische Charakteristik der Untersuchungsgebiete

3.2.1 Vorbemerkungen

Der aus dem Seegebiet zur Küste fortschreitende Seegang wird bei abnehmenden Wassertiefen zunehmend von den morphologischen Formen des Seegrundes beeinflusst. Die deterministischen Wellentheorien berücksichtigen das durch eine an der relativen Wassertiefe h/L_0 orientierten Gebietseinteilung in Tiefwasser, Übergangsbereich und Flachwasser. Diese Unterteilung ist für die Küsten von Schelfmeeren wie die der südlichen Nordsee wenig geeignet. Hier herrschen bei stark entwickeltem Seegang selbst im Seegebiet selten Tiefwasserbedingungen. Erschwert wird die Einteilung nach der relativen Wassertiefe zudem durch starke Veränderlichkeit der Perioden der sich vielfältig überlagernden Windsee- und Dünnungssysteme. Es wird deshalb eine an der Morphodynamik der Untersuchungsgebiete orientierte Einteilung von Gebieten angestrebt, die von den relativen Wassertiefen der deterministischen Wellentheorien losgelöst ist. Deren Differenzierungen werden lediglich bei der rechnerischen Anwendung von Wellentheorien unabhängig vom jeweiligen Bereich des Untersuchungsgebietes verwandt.

Als Verständnisgrundlage für die Diskussion der Analyseergebnisse werden vorab die hinsichtlich der Untersuchungsziele wesentlichen hydrographischen und morphologischen Charakteristiken der verschiedenen Untersuchungsgebiete dargestellt. Dies erscheint hier im besonderem Maß erforderlich, da der Seegang in Wattgebieten in erheblich stärkerem Maß durch die Wechselwirkungen mit den

örtlichen hydrographischen Randbedingungen geprägt wird, als beispielsweise der im Küstenvorfeld.

3.2.2 Einzugsgebiet des Norderneyer Seegats

Das Einzugsgebiet des Norderneyer Seegats ist Teil des Ostfriesischen Wattenmeeres (Abb. 4). Charakteristisch für das Gebiet ist die Kette seewärts vorgelagerter Düneninseln, die vom Festland durch Watten wechselnder Ausdehnung getrennt sind. Die Füllung und Entleerung dieser Gebiete erfolgt im Tiderhythmus durch die Seegaten mit schmalen, tiefen Rinnen über ein weitverzweigtes System von Baljen und Prielen. Seewärts sind die Seegaten von Riffbögen (Ebbdeltas) begrenzt. In dieser Gleichgewichtsformation von Seegang und Strömungen und des daraus resultierenden Küstenquer- und -längstransports verzweigt sich das Seegat in eine Anzahl von Stromrinnen, die von einer Kette amphibischen Platen separiert werden. Über die Riffbögen erfolgt zum einen die Litoraldrift zwischen

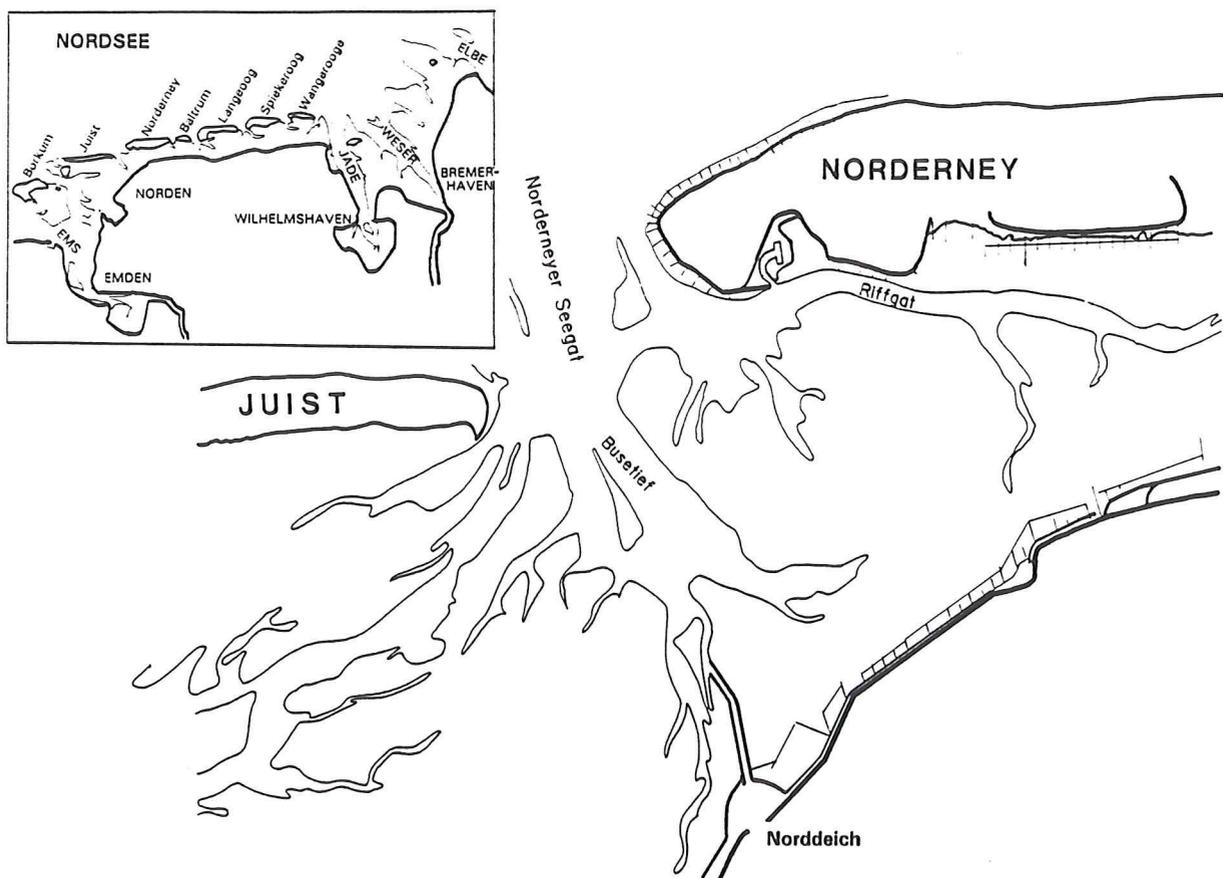


Abb. 4: Einzugsgebiet des Norderneyer Seegats

den Düneninseln und zum anderen der Materialaustausch zwischen offener See und Watt, für den die Riffbögen eine Pufferfunktion [STIVE + EYSINK 1989; NIEMEYER 1990] haben.

Die Seegaten bilden die Verbindung zwischen dem Seegebiet und dem Wattenmeer, das in deren Nähe noch stark in Rinnen und amphibische Bereiche gegliedert ist. Mit wachsender Entfernung vom Seegat werden die amphibischen Bereiche zunehmend großflächiger und höher als in Nähe des Seegats bis hin zur Ausbildung von Verlandungsbereichen als Übergang zu Hellern oder Salzwiesen.

Das vielfältige morphologische Formeninventar wird von der gestaltenden Kraft des Seegangs mitgeprägt, verändert ihn aber auch in erheblichem Maß bei seinem Fortschritt von der offenen See in das Küstenvorfeld und bei seiner Fortpflanzung auf den Wattflächen vor dem Erreichen der Insel- und Festlandsküsten. Es war daher nicht nur sinnvoll, sondern auch erforderlich, die Topographie des Untersuchungsgebietes bei der Planung des Seegangmeßprogramms zu berücksichtigen (Abb. 4).

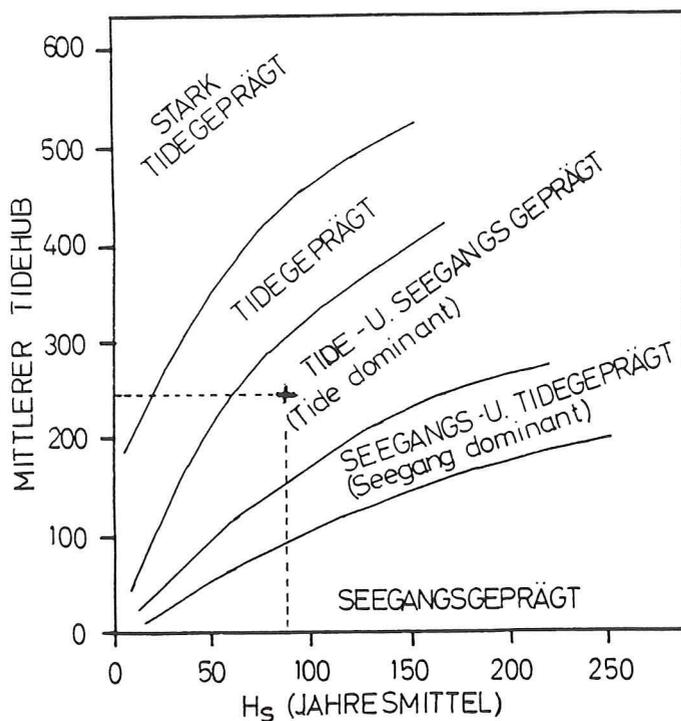


Abb. 5: Seegatsklassifikation nach HAYES [1975] mit Einordnung des Norderneyer Seegats [NIEMEYER 1992]

Der mittlere Tidehub variiert im gesamten Tidebecken nur geringfügig zwischen 2,4 m am Pegel Norderney und 2,6 m nahe der Festlandsküste und liegt somit insgesamt im hoch mesotidalen Bereich. Die aus Phasenverschiebungen entstehenden Gradienten erreichen bei Normaltiden sowohl in West-Ost- als auch in Nord-Süd-Richtung Maximalwerte von 2 bis 3 dm [NIEMEYER 1990]. Nipp- und Springtiden modulieren den Tidehub um bis zu $\pm 0,7$ m. Der höchste bei Sturmfluten gemessene Stau betrug am 16. Februar 1962 am Pegel Norderney 2,87 m.

Nach der hydodynamischen Seegatsklassifikation [NIEMEYER 1990] ist das Norderneyer Seegat mit einem mittleren Tidehub von 2,4 m und einer im Jahresmittel zwischen 0,7 bis 1,0 m

betragenden signifikanten Wellenhöhe im Küstenvorfeld als tide- und seegangsprägendes Seegat mit überwiegender Tideeinwirkung zu klassifizieren (Abb. 5).

Hinsichtlich der Ausbildung von Seegang im Küstenvorfeld, der auf die Watten einschwingt, ist der Sektor der Windrichtungen von West bis Nordost bedeutsam für die Entwicklung erhöhter Wasserstände, die eine Fortpflanzung energiereichen Seegangs ermöglichen, der von West bis Nordwest reicht. Außer bei erniedrigten Wasserständen tritt die Entwicklung ortsständiger Windsee im Wattenmeer vornehmlich bei östlichen bis südwestlichen Windrichtungen auf. Der aus der Nordsee in das Wattenmeer einschwingende Seegang wird durch die Riffbrandung im Bereich des Ebbdeltas vollständig umgewandelt, wobei ein neues Seegangssystem angeregt wird, das sich - primär bestimmt von Wechselwirkungen mit den morphologischen Formationen - über das Seegat und dessen tributäre Rinnen auf die Watten bis an die Insel- und Festlandsküsten fortpflanzt.

3.2.3 Wurster Watt im Einzugsgebiet der Robinsbalje

Die von den Ästuarien der Außenweser und Außenelbe flankierte Wurster Küste ist durch einen etwa 20 km tiefen Wattaum nach Nordwesten gegen die offene See abgeschirmt. Während die nordöstlichen und südwestlichen Randbereiche des Wurster Watts zu den unmittelbaren Einzugsbereichen von Außenelbe und Außenweser gehören, werden die zentral gelegenen Wattgebiete zu eigenständigen Systemen mit Hauptfluter und ausgeprägten Wattwasserscheiden zu Elbe und Weser: die Till und die Robinsbalje (Abb. 6).

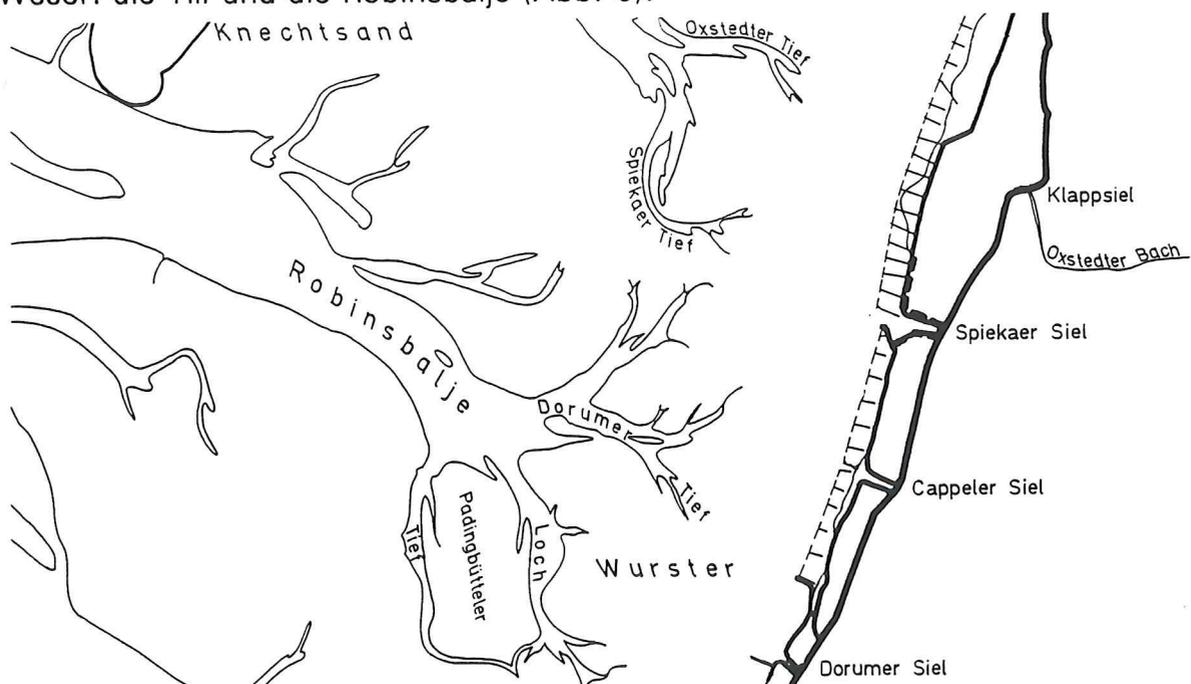


Abb. 6: Einzugsgebiet der Robinsbalje mit Übersicht Wurster Watt

Die Robinsbalje wird nach Süden und Südwesten durch die Wattgebiete Nordheversand und Eggerswerf, nach Norden und Nordosten durch die Wattgebiet Knechtsand mit der gleichnamigen - in jüngster Zeit in erheblichen Maß durch Erosion bedrohte - Strandinsel und Spiekaer Barre sowie landwärts in ostsüdöstlicher Richtung durch das Wurster Watt begrenzt. Sie spaltet sich landseitig in die Rinnen Padingbütteler Tief, Padingbütteler Loch, Dorumer und Altcappeler Tief. Vor Umstellung der Binnenentwässerung im Land Wursten mündete das Cappeler Außentief in das Dorumer Tief.

Der Bereich der Wurster Küste und des Wurster Wattes außerhalb des unmittelbaren Einzugsgebietes der Ästuarien Weser und Elbe war bis zu der Untersuchung von HOMEIER [1969] eines der am wenigsten erforschten Gebiete der niedersächsischen Küste. Ursache wird gewesen sein, daß die Nutzung durch den Menschen über Landwirtschaft und Fischerei ohnedem möglich war. Die im Vergleich zu anderen Bereichen weniger wechselvolle Entwicklung der Küstenlinie hat hierzu noch beigetragen. Ausdruck hierfür dürfte auch die Tatsache sein, daß für den zentralen Bereich der Wurster Küste kein Dauerpegel in einer Position existiert, wo eine kontinuierliche Erfassung der Tideniedrigwasser möglich ist. Informationen hierzu sind von LASSEN und SIEFERT [1992] aus den Aufzeichnungen von Reisepegeln hergeleitet worden: der mittlere Tidenhub beträgt 2,98 m für die Jahresreihe 1982/86.

Auch hinsichtlich des Seegangs bestehen nur insoweit Erkenntnisse, wie die Untersuchungsergebnisse von SIEFERT [1974] aus den benachbarten, nordöstlich der Till und südwestlich der Außenelbe gelegenen Wattgebieten hierher als übertragbar anzusehen sind. Der Seegang in diesem Gebiet wird - soweit es sich nicht um ortsständige Windsee handelt - primär über die Robinsbalje und ihre Nebenrinnen an die Küste einschwingen. Für das engere Untersuchungsgebiet wird somit der Seegang aus dem Dorumer Tief maßgebend sein.

3.2.4 Eiderästuar

Das Ästuar der Außeneider ist durch ausgedehnte Wattflächen gekennzeichnet, die durch ein System von Haupt- und Nebenrinnen zergliedert werden (Abb. 7). In jüngerer Zeit hat das Gebiet starke hydrographisch-morphologische Veränderungen erfahren, die wesentlich durch menschliches Einwirken mit der Errichtung des Eidersperrwerks und daran anschließenden baulichen Eingriffen beeinflusst oder gar verursacht worden sind. Hinsichtlich der Ausbildung von Sturmfluten und See-

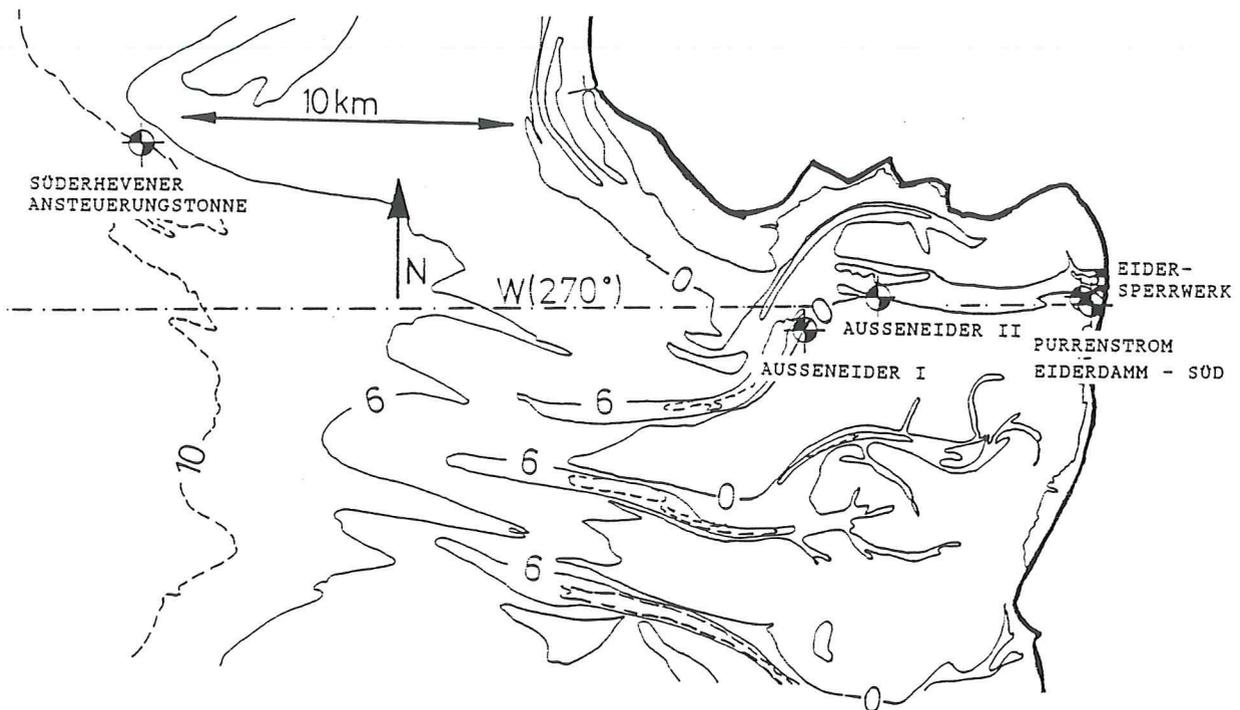


Abb. 7: Eiderästur

gang bildet der Sektor Südwest bis Nordwest den Bereich der wirksamen Windrichtungen [GRÜNE 1991].

Das Ästuar erstreckt sich - orientiert an der seeseitigen Wattgrenze und landseitig am Eiderdamm und der nördlichen dithmarscher Küste - in West-Ost-Richtung etwa bis 12 km (Abb. 8). Im Gegensatz zu den anderen Ästuarien an der deutschen Nordseeküste liegt das Eiderästuar nicht im makro- sondern im hoch meso-tidalen Bereich der Deutschen Bucht [NIEMEYER 1990]. Der mittlere Tidehub von 3,1 m am Pegel Eidersperrwerk läßt aber darauf schließen, daß die Morphologie des Ästuars primär tide- und somit strömungsgeprägt ist. Nach der hydrodynamischen Klassifikation von Seegaten und Ästuarien nach [HAYES 1975] ist allerdings das Eiderästuar als tide- und seegangsgeprägtes Seegat mit überwiegender Tideeinwirkung zu klassifizieren.

Der aus der Nordsee bei auflandigen Windrichtungen aus dem westlichen Sektor einschwingende Seegang kann sich zum einen im Rinnensystem des Ästuars fort-pflanzen und zum anderen über die Wattflächen (Abb. 8). Aufgrund der dort vor-handenen geringen Wassertiefen ist zu erwarten, daß ausgeprägter Seegang, der von der 10 m-Tiefenlinie landwärts in das Ästuar einläuft, bis zum Erreichen der Küste stark gedämpft wird. In den Haupttrinnen und den Prielen ist wegen der aus-geprägten Krümmungen ebenfalls eine spürbare Dämpfung des Seegangs zu erwarten, zumal ein erheblicher Anteil des Seegangs sich beim Einschwingen an

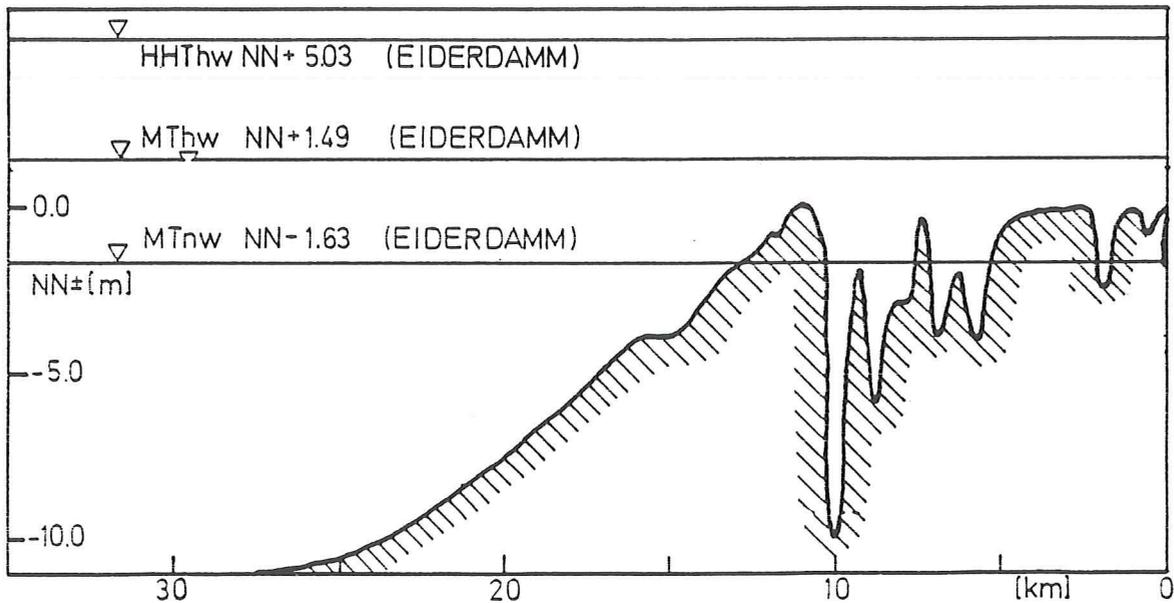


Abb. 8: Innerer Teil des Eider-Ästuars

die Küste nur über Teilstrecken über Rinnen fortpflanzt und dann in Kurven in Verlängerung der Rinnenachse auf die Watten läuft.

Nur unter Sturmflutbedingungen mit stark erhöhten Wasserständen kann sich ausgeprägter Seegang bis an die Deiche fortpflanzen [GRÜNE 1991]. Der in der Nordsee erzeugte Seegang wird beim Einlaufen in die flacheren Bereiche des Ästuars gedämpft und dabei teilweise oder sogar überwiegend gebrochen. In den Rinnen ist die Dissipation umso geringer, je tiefer und breiter die Querschnitte sind. Hier erfolgt aber eine zusätzliche Dämpfung durch Beugung an den Rinnenrändern mit Ausbreitung auf die Wattflächen. Weiterhin erfolgen - insbesondere in den Rinnen - Wechselwirkungen zwischen Seegang und Gezeitenströmungen, die sich aber an den landseitigen Rändern des Ästuars verringern, insbesondere bei geschlossenem Sperrwerk und zu den Eintrittszeiten der Sturmflutscheitelwasserstände.

Andererseits wird ein Teil des Seegangs auf den Wattflächen und den Rinnen durch die örtliche Windeinwirkung neu erzeugt, wobei eine starke Abhängigkeit vom Gang der Tidewaterstände besteht, durch den sowohl die Windwirkdauer als auch die Wassertiefe über dem Windwirkweg bestimmt wird. Die Entstehung örtlichen Seegangs ist insbesondere bei nördlichen Windrichtungen streichlängenbegrenzt.

3.2.5 Einzugsgebiet der Hever

Das Untersuchungsgebiet liegt an der nordfriesischen Küste im Einzugsgebiet der Hever. Es erstreckt sich im südlichen Bereich des nordfriesischen Wattenmeeres von Eiderstedt im Süden bis zur Wattwasserscheide mit der Süderaue im Norden, als deren Eckpfeiler Süderoogsand, Pellworm und die Hamburger Hallig anzusehen sind. Das südliche nordfriesische Wattenmeer wird seewärts von einer Kette von Außensänden begrenzt, die morphodynamisch die Funktion von Dünen- oder Barriereinseln haben und von breiten und tiefen Seegaten unterbrochen werden. Landwärts dieses Abschnitts erstrecken sich morphologisch stark gegliederte, bis zu 25 km breite Wattgebiete mit den Marscheninseln Pellworm und Nordstrand und einer Reihe von Halligen (Abb. 9).

Die Füllung und Entleerung des Wattgebietes erfolgt im Tiderhythmus im wesentlichen durch das im Südwesten zwischen Eiderstedt und Süderoogsand gelegene Wattstromsystem der Hever. Charakteristisch für das Seegat der Hever ist die Ausbildung von Flut- und Ebbestromrinnen mit einem eng gestaffelten Ebbdelta, dessen Barrensysteem im Mittel auf NN -3,00 m liegt. Die Hever spaltet sich nördlich des Westerheversandes in den Heverstrom und die Norderhever auf. Der Heverstrom ist seewärtig durch ein breites Mündungsgebiet mit zahlreichen, von Platen separierten Teilrinnen gekennzeichnet. Landwärts der Hallig Südfall hat sich eine einheitliche, ausgeprägte Stromrinne mit Wassertiefen bis zu 15 m ausgebildet, die bei geringer Mäandrierung bis Husum führt. Die Norderhever hat sich nach dem Zerfall der Insel Strand in die Rudimente Pellworm, Nordstrand und Nordstrandischmoor, der mit erheblichen Verlusten an Arealen verbunden war, in den letzten dreihundert Jahren zu einem durchgehenden, breiten und bis zu 30 m tiefen Wattstrom zwischen Pellworm und Nordstrand entwickelt mit zum Festland vordringenden Nebenrinnen Fuhle Schlot, Holmer Fähre und Butterloch. Nordwestlich der Hamburger Hallig ist die Wattwasserscheide durch einen Priel unterbrochen, über den Verdriftungen von größeren Wassermengen in das nördliche angrenzende Tidebecken der Süderaue erfolgen.

Die in Süd-Nord-Richtung sich entlang der dithmarscher und nordfriesischen Küste nahezu küstenparallel fortpflanzende Gezeitenwelle ist durch einen nach Norden abnehmenden Tidehub gekennzeichnet, der beim Pegel Süderoog noch 2,7 m beträgt und am Übergang zum nördlichen Nordfriesischen Wattenmeer 2,5 m am Pegel Wittdün. Ausgeprägte Reflektionserscheinungen bedingen einen im Tidebecken der Hever landwärts signifikant wachsenden Tidehub, der bei Strucklahnungshörn im Mittel 3,40 m beträgt. Die hierdurch bewirkten starken Tideströmungen sind für die Morphologie der Wattstromrinnen in Wechselwirkung mit der

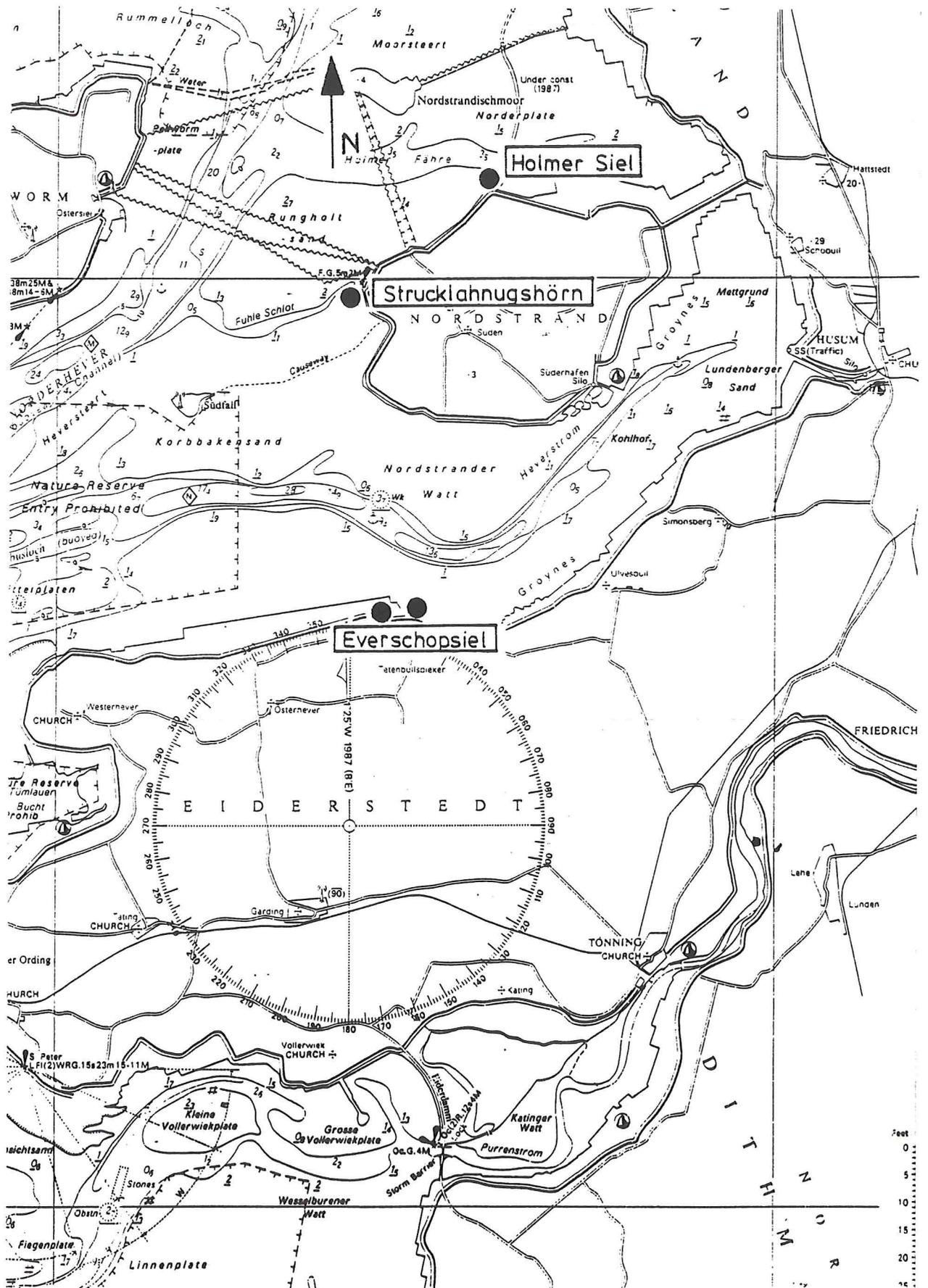


Abb. 9: Einzugsgebiet der Haver mit Pegelstandorten (Abschnitt 3.2.5)

geologischen Beschaffenheit dominant prägend. Auf den Wattflächen nimmt die Intensität der Strömungen dagegen ab, so daß hier der Seegang und Driftströmungen eine weitaus größere Wirkung auf die Reliefausbildung haben. Nach der hydrodynamischen Klassifikation von Seegaten [NIEMEYER 1990] ist die Hever als tide- und seegangsgeprägtes Seegat mit überwiegender Tideeinwirkung einzuordnen. Hierzu ist allerdings anzumerken, daß auf dieser Klassifikation aufbauende morphologische Gestaltmerkmale für Küsten mit genetisch andersartigem Aufbau als die der rudimentären nordfriesischen Küste entwickelt worden und somit nicht ohne grundsätzliche Prüfung übertragbar sind.

Der aus der südlichen Deutschen Bucht einlaufende Seegang kann sich wegen der Lage der Hevermündung insbesondere bei westlichen bis südwestlichen Windrichtungen unmittelbar ohne Beugung in die Hever fortpflanzen, wo er durch die Barren im Mündungsgebiet (Ebbdelta) gedämpft wird und danach wattstromaufwärts und über die Nebenpriele weit in das Watt hinein vordringt. Infolge der morphologisch bedingten Dämpfung durch Refraktion, Diffraktion, Shoaling, Bodenreibung und Brechen wird er bei seinem Fortschreiten bis an die Küste erheblich reduziert. In den Wattströmen erfolgen zudem weitere Modulierungen des Seegangs durch die Tideströmungen, die zum einen Beugungseffekte bewirken und zum anderen die Wellensteilheiten beeinflussen, wodurch bei Gegenläufigkeit von Seegang und Strömungen das Brechen übersteilender Wellen bewirkt werden kann. Daneben kann sich auf dem Watt ortsständige Windsee entwickeln, der von Starkwinden in Abhängigkeit von Wassertiefe und Streichlänge erzeugt wird.

3.3 Meßstellen und Meßtechnik

3.3.1 Einzugsgebiet des Norderneyer Seegats

- Meßstation Ostfriesisches Wattenmeer

Auf einer Wattfläche westlich der tiefen Rinne des Norderneyer Seegats befindet sich die Meßstation Ostfriesisches Wattenmeer [NIEMEYER 1985], an welcher der Seegang mit einer Druckmeßdose und zeitweilig auch mit einem Wellenmeßdraht erfaßt wurde. Der Datentransfer erfolgt per Funk in die Datenzentrale der Forschungsstelle Küste. Bei von See her auf die Watten einschwingendem Seegang können diese Daten als Ausgangsgrößen im Hinblick auf das Ausbreitungsverhalten des Seegangs im Tidebecken des Norderneyer Seegats angesehen werden (Abb. 10 u. 11) [NIEMEYER 1983].

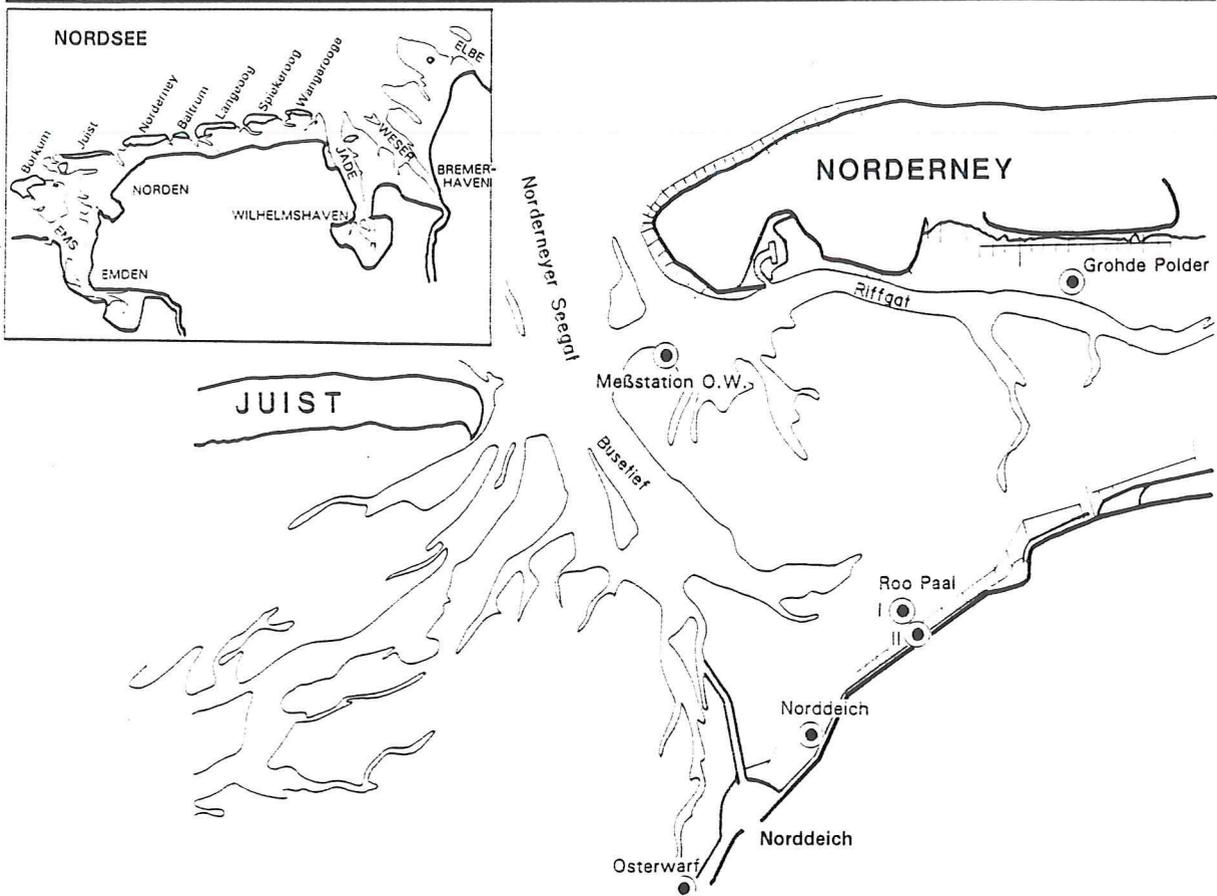


Abb. 10: Meßnetz im Einzugsgebiet des Norderneyer Seegats

- Osterwarf und Norddeich

Beide Stationen sind in einem Lahnungsfeld vor einem Schardeich angeordnet, die Wathöhen am Meßort betragen an der Station Osterwarf NN +0,65 m und an der Station Norddeich NN +0,48 m. Die Station Osterwarf liegt im Bereich der westlichen Wattwasserscheide des Tidebeckens des Norderneyer Seegats. Bei westlichen Windrichtungen tritt dort auch ortsständige Windsee aus dem Tidebecken der Osterems auf. Die Station Norddeich liegt in dem Wattbereich, auf den der Seegang aus dem Norderneyer Seegat mit einem Minimum an Dämpfung durch Beugungseffekte einschwingen kann [NIEMEYER 1983]. An beiden Stationen werden als Sensoren Druckaufnehmer verwendet (Abb. 12), die Kabelverbindung zu einem binnendeichs gelegenen Meßcontainer haben, über die Datentransfer und Energieversorgung stattfinden.

- Ostermarsch: Roo Paal I und Roo Paal II

Vor dem Schardeich der Ostermarsch sind auf Höhe der Deichachtgrenzmarke Roo Paal in einem Meßprofil zwei Stationen angebracht, von denen sich je eine innerhalb und außerhalb des Lahnungsfeldes befindet. Die Wathöhe an der Station Roo Paal I im Watt beträgt NN \pm 0,0 m, die an der Station Roo Paal II im

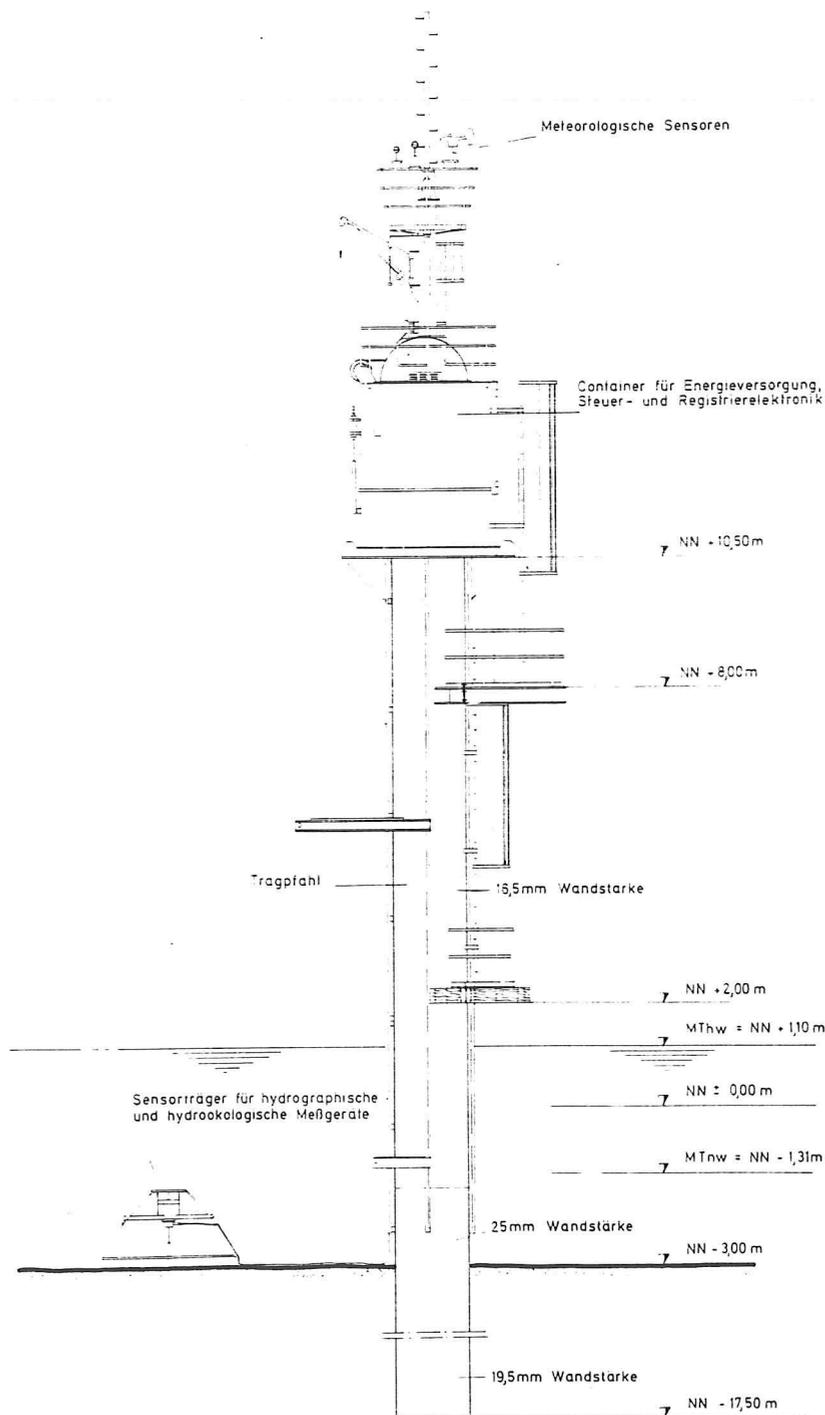


Abb. 11: Meßstation Ostfriesisches Wattenmeer

Lahnungsfeld NN + 0,46 m. Das Ostermarscher Watt liegt - hinsichtlich des Ausbreitungsverhalten des Seegangs - ebenso im unmittelbaren Wirkungsbereich des aus der tiefen Rinne des Seegats in Verlängerung der Achse fortpflanzenden Seegangs [NIEMEYER 1983]. Die Meßkette ermöglicht es, den Seegang auf dem offenen Watt mit dem im Lahnungsfeld synchron zu erfassen, um auf dieser Grundlage Erkenntnisse zur hydrodynamischen Wirksamkeit von Lahnungen zu erhalten. Beide Stationen sind mit Druckaufnehmern zur Erfassung des Seegangs-

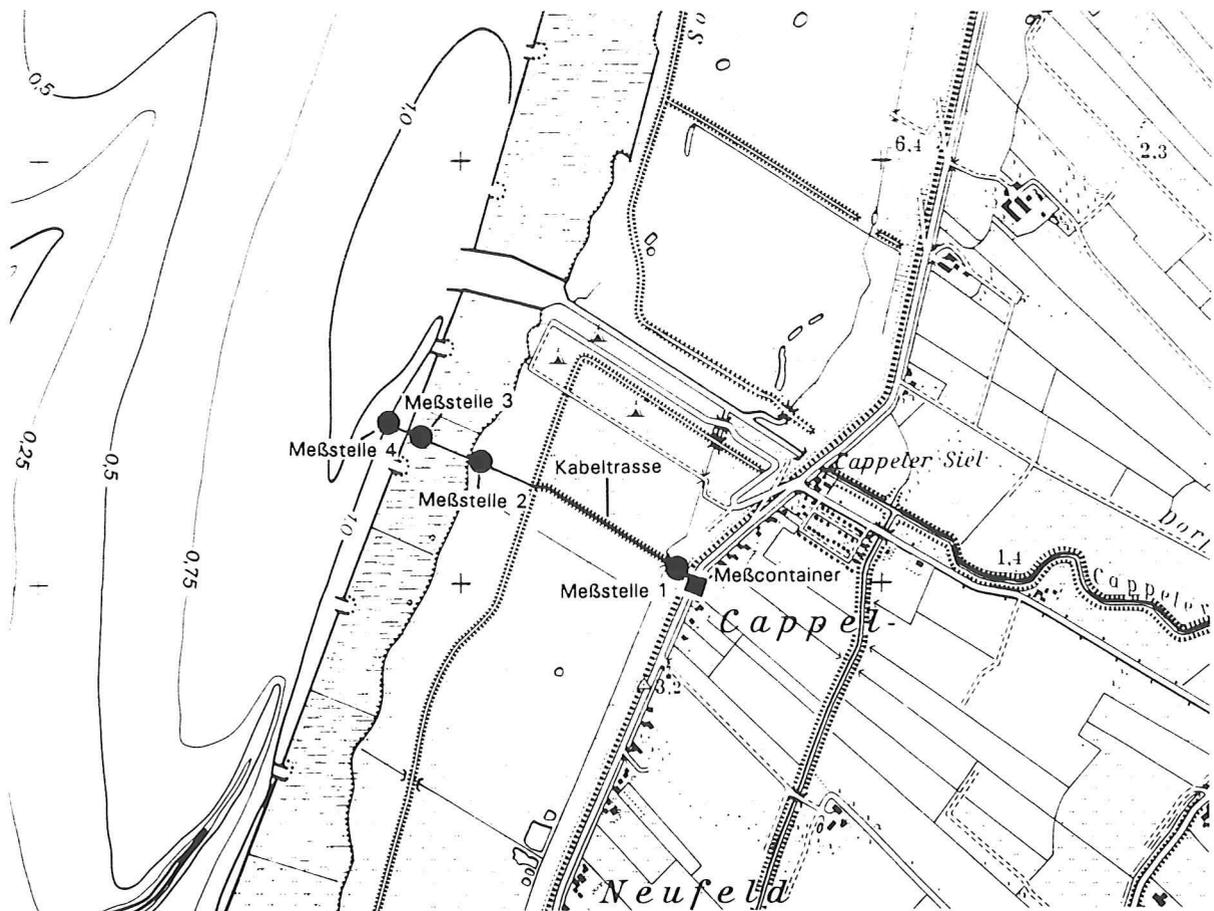
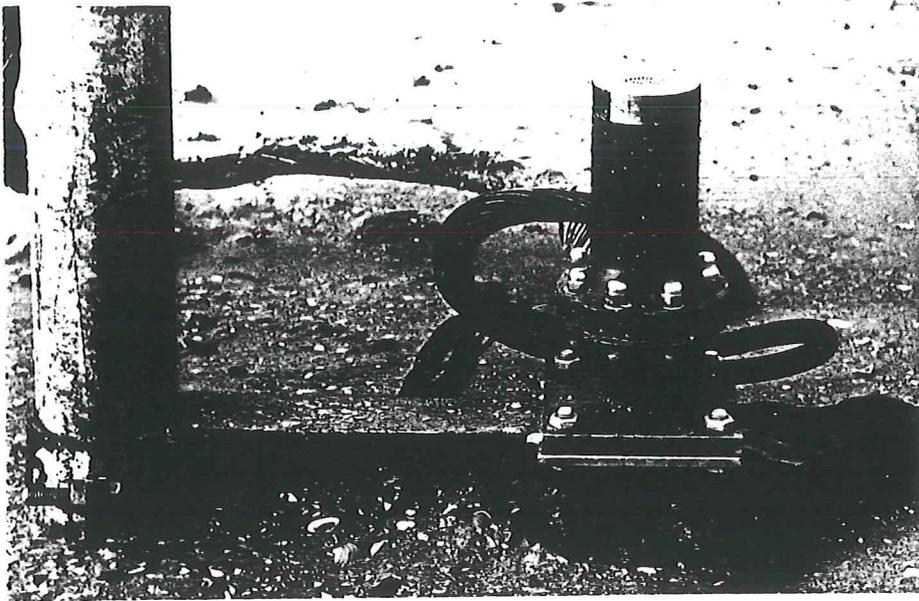


Abb. 12: Druckaufnehmer Wellenpegel (oben)
Meßkette Wurster Küste (unten)

ausgestattet (Abb. 12); Energieversorgung der Sensoren sowie deren Datentransfer zur Registrierung erfolgen über Kabelverbindung zu einem binnendeichs angeordneten Meßcontainer.

3.3.2 Wurster Watt

Südwestlich des Cappeler Tiefs wurde im Einzugsgebiet der Robinsbalje ein Meßprofil mit vier Stationen errichtet, das sich vom Deichfuß in einen Sommerpolder über den Heller und ein Lahnungsfeld bis in das vorgelagerten Watt erstreckt. Auf dem Watt wird der von der Robinsbalje einschwingende Seegang erfaßt (Abb. 11). Bei hinreichend erhöhten Wasserständen wird entsprechend der Wassertiefen an den landwärts anschließenden Stationen die Verformung und Dämpfung des Seegangs erfaßt. Die Höhenlagen der Stationen sind:

Watt: NN + 0,78 m

Lahnungsfeld: NN + 1,66 m

Heller: NN + 2,72 m

Deichfuß: NN + 3,08 m

Wesentlich ist hierbei, daß die Kronenhöhe des Sommerdeichs bei NN + 3,50 m liegt, was hinsichtlich der Dämpfung des durch den Sommerpolder auf den Deich einschwingenden Seegangs von Bedeutung sein kann. Das Lahnungsfeld hat mittlerweile den Endzustand eines aquatischen Verlandungsbereiches erlangt; nahezu die gesamte Fläche ist dicht mit Andelrasen bewachsen und hat den Charakter eines niedrigen Hellers. An allen vier Stationen wurde der Seegang mit Druckmeßdosen erfaßt (Abb. 12), deren Energieversorgung und Datentransfer über eine Kabelverbindung zu einem landseits des Deichs errichteten Meßcontainer erfolgte.

3.3.3 Eiderästuar

- Süderheverener Ansteuerungstone

Um den im tieferen Bereich der 10 m-Tiefenlinie auftretenden Seegang zu erfassen, wurde eine Wellenmeßboje, die nach dem Prinzip der Beschleunigungsmessung arbeitet, im Bereich der Ansteuerungstone der Süderhever ausgelegt (Tab. 1, Abb. 7). Die örtliche Wassertiefe beträgt etwa 13 m bei MThw. Der hier erfaßte Seegang kann für einen weiteren Bereich des Küstenvorfeldes nördlich und südlich dieser Station als repräsentativ angesehen werden. Die Empfangsstation der Wellenmeßboje wurde im Meßhaus Eiderdamm-Süd installiert. Während des Meßbetriebs traten zeitweise Störungen auf, die vermutlich auf die große Entfernung der Funksignalstrecke zurückzuführen ist, zumal die Strecke über den Westzipfel von Eiderstedt (St. Peter-Ording) führt.

- Außeneider I und Außeneider II

Die beiden Meßstationen Außeneider I und Außeneider II liegen in den südlichen Randbereichen der tiefen Rinne der Außeneider (Tab. 1, Abb. 7). Die Entfernung zum Eidersperrwerk beträgt etwa 6,8 km Luftlinie für die Station Außeneider II und etwa 9 km für die Station Außeneider I. Die Sohllagen liegen an der Station Außeneider I bei NN -1,86m und an der Station II bei NN -1,82m, so daß die örtlichen Wassertiefen bezogen auf MThw am Pegel Eidersperrwerk-AP um 3,3 m betragen. Der Seegang wurde mit Druckmeßdosen gemessen, die Daten mit einer

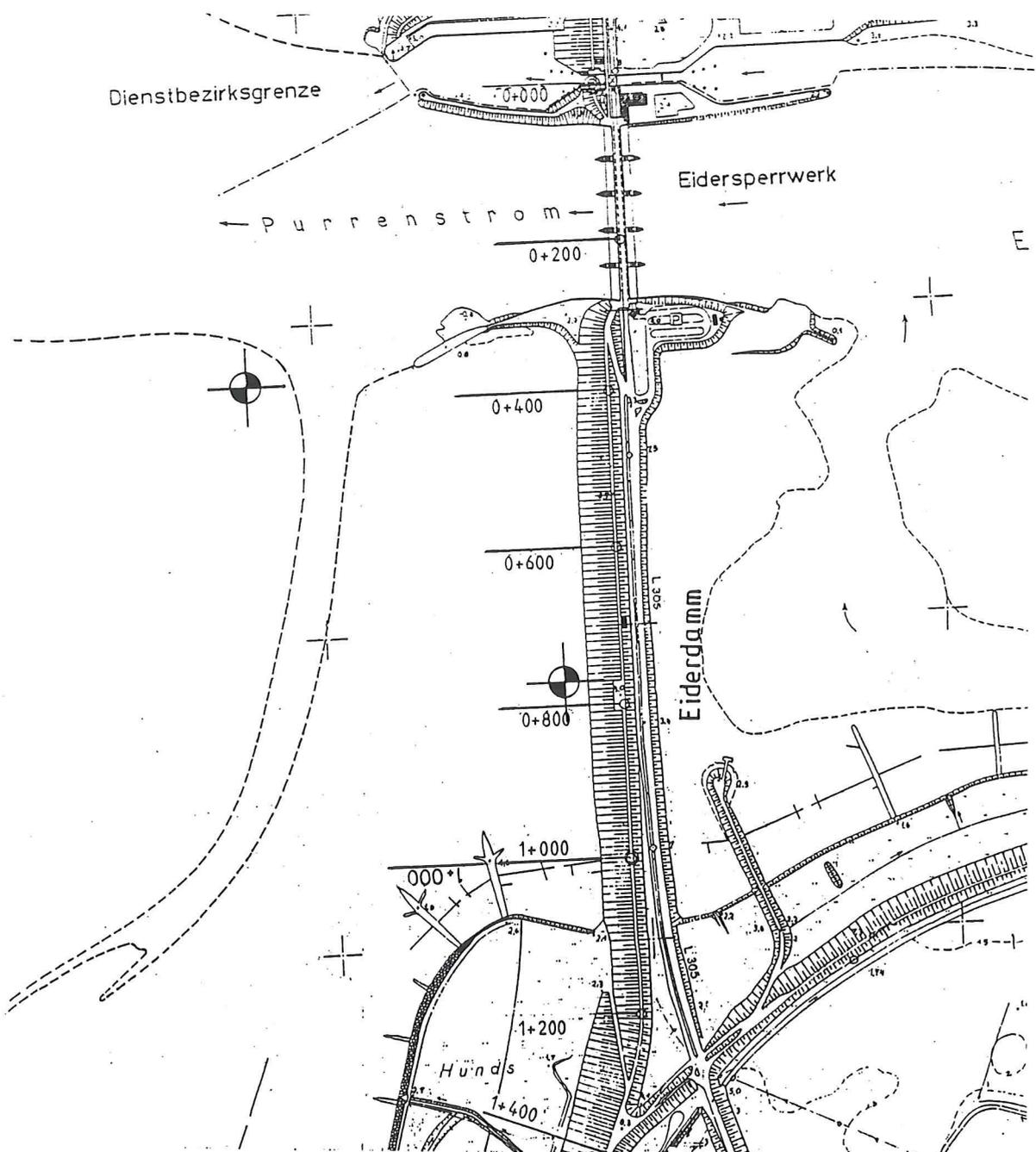


Abb. 13: Meßkette Eider

Telemetrieanlage an die Empfangsstation Eiderdamm-Süd übertragen. Die Stromversorgung erfolgte mit einer batteriegepufferten Solarzellenanlage.

- Purrenstrom

Die Meßstelle Purrenstrom liegt etwa 430 m vor dem südlichen Abschlußdamm des Eidersperrwerkes und etwa 200 m südlich der Sperrwerksachse (Tab. 1, Abb. 7 u. 13). Sie liegt ebenso wie die beiden Stationen Außeneider I und II am südlichen Rand der Außeneider, jedoch mit NN -0,03m bereits im amphibischen Bereich. Zur Seegangsmessung wurde eine Druckmeßdose (Abb. 12) verwendet, die Stromversorgung und Datenübertragung erfolgte mit einer Kabelverbindung an Land zur Meßstation Eiderdamm-Süd.

- Eiderdamm-Süd

Die Meßstelle Eiderdamm-Süd bildet den landseitigen Abschluß der Meßkette im Eiderästuar. Sie befindet sich unmittelbar vor dem südlichen Anschlußdamm des Eidersperrwerkes in einer Entfernung von etwa 600 m südlich von der Sperrwerksachse (Tab. 1, Abb. 7 u. 13). Die Entfernung vom Fuß des Dammes beträgt 30 m. Die Lage der Meßstation ist nur geringfügig in Dammachse verschoben gegenüber derjenigen, die in den Jahren 1976 bis 1983 im Rahmen von Untersuchungen zum Druckschlag und Wellenauflauf [GRÜNE 1983, 1989, 1991] betrieben wurde. Wie an der Meßstelle Purrenstrom wurden zur Seegangsmessung Druckmeßsonden mit Kabelverbindung zur Landstation verwendet, wobei hier jedoch zwei in der Höhe gestaffelt angeordnet wurden, um Tiefpaßfiltereffekte kalibrieren zu können.

3.3.4 Einzugsgebiet der Hever

- Ansteuerungstonne Süderhever

Aus ökonomischen Gründen wurde für die Erfassung des Seegangs im Küstenvorfeld hier eine Station eingerichtet, die auch der Meßkette Eiderästuar Eingangsdaten lieferte. Bei auflandigen Windrichtungen kann davon ausgegangen werden, daß Daten erhoben werden, die für beide Gebiete repräsentativ sind.

- Everschopsiel (Abb. 14)

Die Meßstellen liegen vor der Nordküste der Halbinsel Eiderstedt im Einzugsgebiet des Heverstromes. Es wurden je eine Meßstation westlich und östlich des Außen-

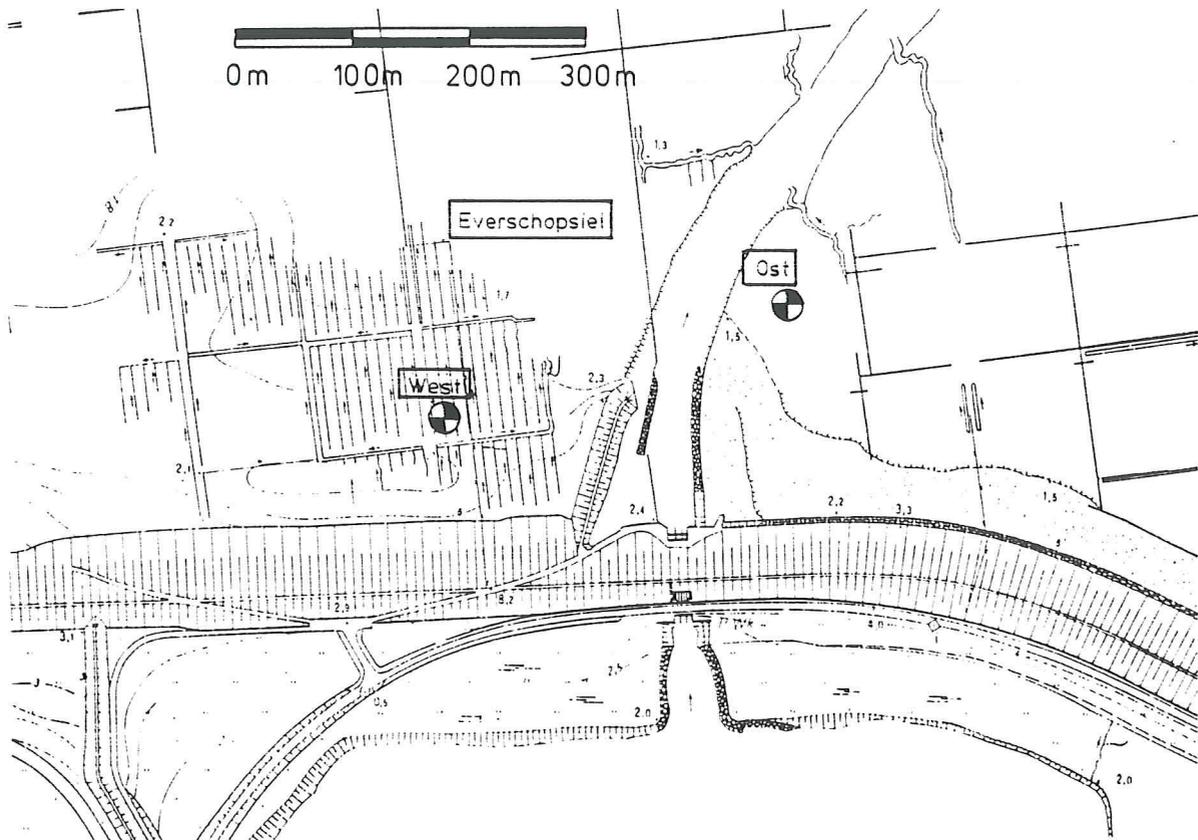


Abb. 14: Meßkette Everschopsiel

tiefs am Everschopsiel eingerichtet. Die westliche Meßstation befindet sich auf einem etwa 300 m breiten Vorland und liegt etwa 60 m vom Deichfuß entfernt auf einer Geländehöhe von NN +1,90 m. Vorgelagert ist ein ungefähr 2 km breiter Wattbereich an den die tiefe Rinne des Heverstromes angrenzt. Die östliche Meßstelle befindet sich vor einem tiefliegenden, schmalen und durch Abbruch gefährdeten Vorlandbereich auf einer Höhe von NN +1,00 m, der durch eine Nebenrinne des Außentiefs vom davorliegenden Wattbereich getrennt ist. Der aus dem Heverstrom einlaufende Seegang erreicht die Nordseite der Küste von Eiderstedt infolge Beugung nur stark gedämpft. Wesentlicher ortsständiger Seegang kann nur bei höheren Wasserständen und Starkwind aus nordwestlichen Richtungen auftreten. An beiden Meßstellen wurden Druckmeßdosen (Abb. 12) verwendet; Energieversorgung und Datentransfer erfolgten über Kabelverbindung an Land.

- Strucklahnungshörn und Holmer Siel (Abb. 15)

Die Meßstellen Strucklahnungshörn und Holmer Siel liegen im Einzugsgebiet der Nebenrinnen Fuhle Schlot und Holmer Siel des Wattstromes Norderhever. Die Meßstelle Strucklahnungshörn ist in einem Buhnenfeld circa 100 m vor dem scharliegenden Westdeich der Halbinsel Nordstrand im unmittelbaren Einflußbereich der hier etwa 4 m tiefen Watrinne Fuhle Schlot und eines parallel zur Küste

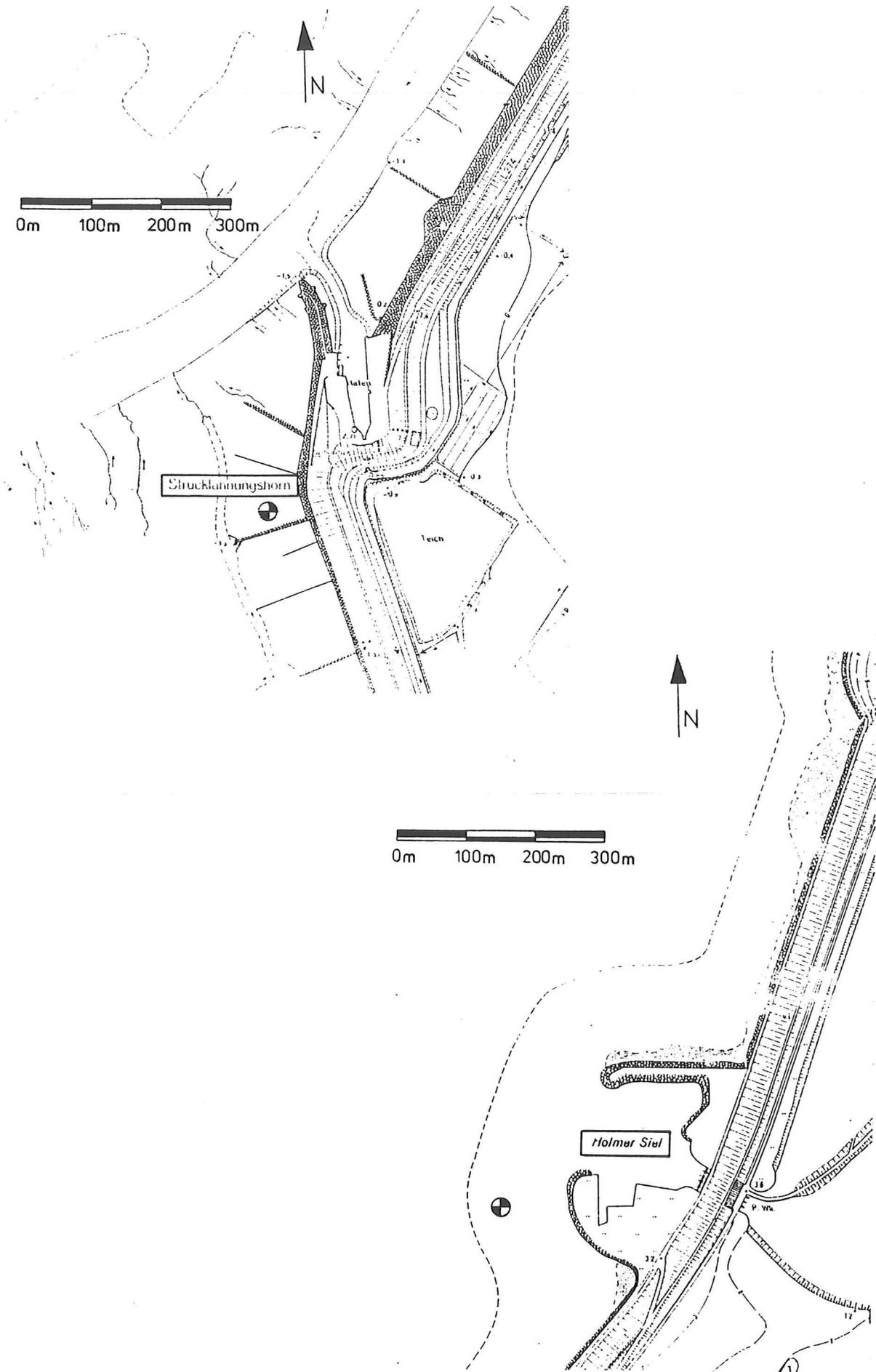


Abb. 15: Meßstationen Strucklannungshörn und Holmer Siel

verlaufenden Nebenprieles bei einer Sohllage des Wattes von NN - 0,55m angeordnet. Zwischen der Mündung des Fuhle Schlotes und der dort etwa 20 m tiefen Norderhever liegt ein 2,5 km breites Wattgebiet. Bei Windrichtungen aus dem Sektor Südwest bis Nordwest mit größeren Streichlängen kann sich bei erhöhten Wasserständen energiereicher Seegang entwickeln. Die Meßstelle Holmer Siel befindet sich in einem Abstand von circa 200 m vor dem scharliegenden Deich der 1987 fertiggestellten Vordeichung Hattstedter Marsch in unmittelbarer Nähe der Südmole des Sielvorhafens und der 6 bis 10 m tiefen Wattrinne Holmer Fähre. Das Höhenniveau der Wattflächen liegt im deichnahen Bereich bei NN -1,00 m. Als morphologische Reaktion auf die Vordeichung wird über einen längeren Zeitraum mit Sedimentation gerechnet [WL 1989]. Wegen der großen Wassertiefen in der Holmer Fähre kann energiereicher Seegang bei Windrichtungen aus dem Sektor West bis Nordwest bis an den Deich gelangen. In beiden Stationen wurden über Kabel mit Landstationen verbundene Druckmeßdosen (Abb. 12) eingesetzt.

3.4 Datenerfassung und -auswertung

3.4.1 Datenerfassung

Die analogen Meßsignale werden von AT-Rechnern, die mit Tastatur, Bildschirm, Disketten-Laufwerk, Festplatte mit 40 MB Speicherkapazität und einem A/D-Wandler ausgerüstet sind, erfaßt und gespeichert. Zur Steuerung des automatischen Meßbetriebs wurde ein aus mehreren Modulen bestehendes Programm erstellt. Die Programmbausteine erfüllen folgende Funktionen:

- Steuerung des Analog-Digital-Wandlers,
- Start des Meßbetriebs,
- Kontrolle der Referenzmeßwerte für Start und Ende von Messungen,
- Abspeichern der Daten.

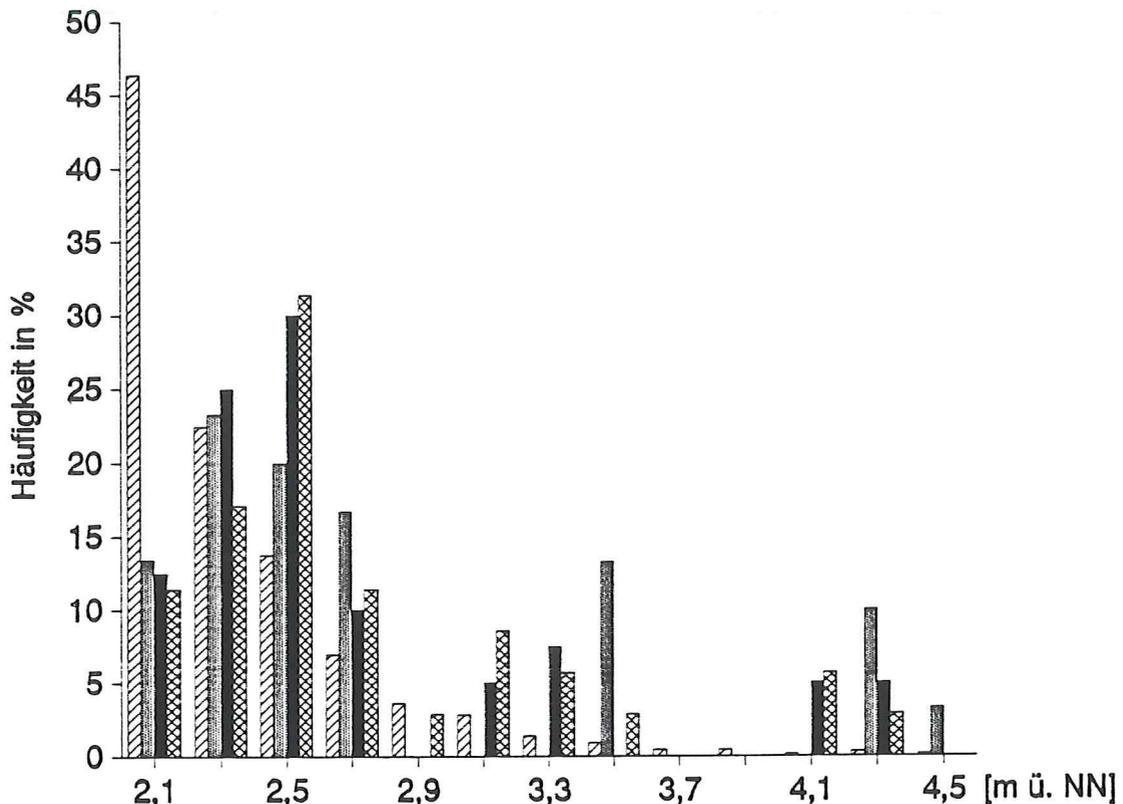
Das Programm gestattet über ein Menü in Dialogform die Vorgabe folgender Randbedingungen für den Meßbetrieb in flexibler Form:

- Anzahl der zu speichernden Signale,
- Abtastrate,
- Meßbereiche der Sonden,
- Einteilung und Bezeichnung der Dateien,
- physikalische Umrechnungsfaktoren für die Sondenmeßwerte,
- Referenzwerte für Beginn und Ende der Datenabspeicherung.

Beginn und Ende der Datenspeicherung können wahlweise durch einen beliebigen Zeitpunkt, Über- und Unterschreitung eines Referenzmeßwertes einer beliebig vorzugebenden Sonde sowie über eine vorgegebene Meßdauer nach Beginn des Meßbetriebs festgelegt werden, wobei die Kombination der Randbedingungen in beliebiger Form möglich ist. Der Meßbetrieb kann zu jeder Zeit über das auf dem Bildschirm angezeigte Statusmenü hinsichtlich aller relevanten Randbedingungen kontrolliert werden. Nach vorübergehendem Stromausfall erfolgt automatisch über das Programm ein Neustart des Meßbetriebs. Bei diesem Meßprogramm wurde der Start stets über einen Wasserstand als Referenzsignal gestartet und beendet. Die Daten wurden zunächst auf die Festplatte geschrieben und in zeitlichen Abständen je nach aufgetretenem Ereignis zum Datentransfer zur Auswertung bei der Forschungsstelle Küste auf Disketten übertragen.

3.4.2 Datensätze und Einordnung der Daten

Zur Einordnung der Daten wurden als Bezug das Thw an einem Referenzpegel im Untersuchungsgebiet als Orientierung herangezogen. Da die landnahen Stationen ihren Meßbetrieb erst bei Überschreiten eines vorgegebenen Grenzwasserstandes begannen, wurde dieser Wert als Bezugsgröße herangezogen. Die Gesamtzahl der Messungen oberhalb dieses Grenzwertes am Referenzpegel für die zurückliegende 10-Jahresreihe wurde auf den Wert 100 % gesetzt und anschließend in Klassen von 2 dm Breite nach anteiliger Häufigkeit unterteilt. Dieselbe Prozedur wurde anschließend für die gemessenen Tiden wiederholt, um hierdurch eine Einordnung der Daten zu ermöglichen. Naturgemäß traten dabei hinsichtlich der Meßgebiete und der Meßorte Unterschiede auf. Beispielhaft für alle Untersuchungsbereiche ist dieser Vergleich hier für das Einzugsgebiet der Hever graphisch dargestellt worden (Abb. 16). Der relative Anteil höherer Tiden für die Messungen ist deutlich höher als nach dem langjährigen Mittel der Tidewasserstände zu erwarten wäre. Insofern kann davon ausgegangen werden, daß mit den hier gewonnenen Datensätzen eine besonders geeignete Grundlage für Fragestellungen der Bemessung auf Seegang gewonnen werden konnte.



Legende:

-  MThw-Verteilung Pegel Strucklahnungshörn (1981-90)
-  MThw-Verteilung, Meßreihen Holmer Siel
-  MThw-Verteilung, Meßreihen Strucklahnungshörn
-  MThw-Verteilung, Meßreihen Everschopsiel

Abb. 16: Relative Verteilung der Meßreihen an den Stationen im Einzugsgebiet der Hever im Vergleich zur Zeitreihe 1981/90 am Pegel Strucklahnungshörn

3.4.3 Auswerteverfahren und Parameterauswahl

Die Auswertung von Seegangsmessungen kann entweder im Frequenzbereich durch Spektralanalyse erfolgen oder - nach Zerlegung der Meßreihe in Einzelwellen - im Zeitbereich nach der Extremwertstatistik. Für letztere stehen mehrere Verfahren zur Verfügung, um die Ganglinien kurzperiodischer Wasserspiegelauslenkungen in die kennzeichnenden Wellenparameter Höhe und Periode zu zerlegen: das Wellenkammverfahren [PUTZ 1952], aus dem zwei weitere Varianten, das Tal-Kamm- und Kamm-Tal-Verfahren entwickelt worden sind [BLANKENSTEIN ab 1980], sowie das Nulldurchgangsverfahren [PIERSON 1954], das inzwischen

ebenfalls modifiziert ist und das Wellenhöhenquadrat-Verfahren [SCHÜTTRUMPF 1973].

Untersuchungen zu deren Vergleich [BLANKENSTEIN et al. 1980] haben ergeben, daß die Ergebnisse nach den verschiedenen Verfahren zumeist nicht übermäßig voneinander abweichen und auch gut miteinander korrelieren. Auszunehmen sind hiervon die nach dem Nulldurchgangsverfahren ermittelten Perioden. Hierbei können sich erheblich längere Perioden als bei den anderen Verfahren ergeben. Es lassen sich für die nach dem Nulldurchgangsverfahren ermittelten Periodenwerte auch keine statistisch abgesicherten Zusammenhänge mit den nach den anderen Verfahren ermittelten Perioden herstellen. Für die Auswertung wurde daher das Tal-Kamm-Verfahren gewählt, das problemlos eine automatisierte objektive Auswertung der Seegangsaufzeichnungen ermöglicht. Das Tal-Kamm-Verfahren ist insbesondere auch geeignet für die Analyse von Zeitreihen, die mit Druckmeßdosen erfaßt wurden und bei denen der Tiefpaßfiltereffekt kompensiert werden muß.

Die Erfahrungen bisheriger Untersuchungen haben gezeigt, daß der Umfang an Parametern von Zeitreihenanalysen eingegrenzt werden kann, wenn Naturmessungen von Wattseegang im Hinblick auf hydrodynamische Beanspruchungen von Küstenschutzwerken und auf hydrodynamisch-morphologische Wechselwirkungen untersucht werden sollen [NIEMEYER 1977a, 1983, 1987c, 1991].

Parallel zur Auswertung der Daten im Zeitbereich sind auch Spektralanalysen im Frequenzbereich vorgenommen worden. Wenngleich von deren Parametern unmittelbar keine zusätzlichen Informationen hinsichtlich der primären Fragestellungen erwartet werden, so erlauben deren Ergebnisse eine Einordnung des örtlichen Seegangs hinsichtlich seines Ursprungs und seiner Erscheinungsformen. Hierin ist wiederum ein wesentlicher Beitrag für die Datenauswahl zur Extrapolation für Extrembedingungen zu sehen. Ebenso können die Ergebnisse der Spektralanalysen wesentliche Hinweise für künftige Ansätze zur Neu- und Fortentwicklung mathematischer Modelle liefern, insbesondere hinsichtlich der Möglichkeiten pragmatischer Vereinfachungen für den operationellen Betrieb bei Steuerung durch Meßdaten.

Bei der Untersuchung stochastischer Naturprozesse wie Seegang und Brandung stellt sich für die Auswertung die Frage nach der für repräsentative Aussagen notwendigen Länge der Zeitreihen. Gleichzeitig ist aber hier der instationäre Verlauf des Tidewasserstandes als eine wesentliche Randbedingung zu berücksichtigen. Nach Erfahrungen aus früheren Untersuchungen von Seegang in Wattgebie-

ten [NIEMEYER 1983] ist hier eine einheitliche Länge der Zeitreihen von 20 Minuten festgelegt worden. Hiermit wird eine hinreichende Datenmenge für eine abgesicherte Stichprobe ebenso gewährleistet, wie die annähernde Konstanz der Randbedingungen Tidewasserstand und Windentwicklung innerhalb vertretbarer Toleranzen. Insbesondere für die hinsichtlich der Bemessung von Küstenschutzwerken maßgebliche Seegangsentwicklung und -ausbreitung im Küstenbereich in der Zeitspanne um den Eintritt des Tidehochwassers kann von einer hinreichenden Konstanz dieser Randbedingungen ausgegangen werden. Dies ist von hoher Bedeutung, da mit den auf der Grundlage der Messungen gewonnenen Beziehungen zwischen Seegangsparametern und Wasserständen mit hinreichender Sicherheit über das von den Messungen erfaßte Spektrum der Tidewasserstände hinaus in den Bereich der Orkanfluten und für den Bemessungsfall extrapoliert werden kann.

Die statistische Verteilung der Wellenhöhen, -perioden und -längen wird hier nicht hinsichtlich der Anpassung an vorgegebene Verteilungen untersucht. Die Ergebnisse früherer Untersuchungen [NIEMEYER 1977b, 1983] haben gezeigt, daß der aus der Überlagerung verschiedenartiger Systeme entstandene Wattseegang hierdurch im Hinblick auf die statistische Verteilung seiner Parameter nicht reproduziert werden kann. Daher werden hier nur die seit ihrer Einführung durch LONGUETT-HIGGINS [1953] gebräuchlichen Verhältniswerte kennzeichnender Parameter wiedergegeben.

In der üblichen Weise wurden die für die Höhen- und Periodenverteilung maßgebenden Seegangsparameter nicht nur miteinander, sondern auch wechselseitig zueinander in Beziehung gesetzt. Hierdurch werden neben Einblicken in die Höhen- und Längenstruktur auch solche in die Steilheit des Seegangs gewonnen, die gleichzeitig einen Vergleich mit anderen Seegangsuntersuchungen in morphologisch ähnlichen Gebieten erlauben.

Die Spektralanalyse wurde mit Hilfe der Fast-Fourier-Transformation vorgenommen. Die Parametrisierungen erfolgten nach den allgemein üblichen Definitionen. Eine Diskussion dieser Parametrisierungen ist von RYE [1977] vorgenommen worden. Es bleibt aber festzuhalten, daß die Übertragbarkeit derartiger - für Randbedingungen des Seegebiets ermittelter - Erkenntnisse auf Wattseegang nicht uneingeschränkt möglich ist und entsprechende Interpretationen keine hinreichende Absicherung erfahren können [NIEMEYER 1983].

4. UNTERSUCHUNGSERGEBNISSE

4.1 Erscheinungsformen des Wattseegangs

Seegang in Wattgebieten tritt in unterschiedlichen Erscheinungsformen auf, die sich in vielfältiger Form überlagern können. Grundsätzlich lassen sich drei elementare Typen hinsichtlich Entstehung und Entwicklung unterscheiden, die singulär oder in Überlagerung als Wattseegang auftreten [NIEMEYER 1984, 1991]:

1. Örtliche Windsee, die auf den Watten in ihrer Richtung im wesentlichen vom erzeugenden Wind bestimmt und in den Rinnen durch die dort vorherrschende Strömung gebeugt wird.
2. Von See anlaufende Dünung, deren Ausbreitungsverhalten allein von den Wechselwirkungen mit den morphologischen Formen und den Strömungen bestimmt wird.
3. Aus dem Küstenvorfeld einschwingender Seegang bei auflandigen Starkwind- oder Sturmweatherlagen, dessen Richtungsverhalten fast ausschließlich durch seine Wechselwirkungen mit dem morphologischen Formeninventar und in den Wattrinnen durch das Strömungsgeschehen geprägt wird.

Seegang ist im Küstenvorfeld der südlichen Nordsee bei auflandigen Stark- und Sturmweatherlagen bereits nach etwa drei Stunden voll ausgereift, wobei die Tide über den Gang der Wasserstände und Strömungen nur begrenzt modulierend wirkt. Beim Einschwingen auf den Vorstrände und in die Seegaten und Ästuarien ist hingegen der Gang der Wasserstände bedeutsam. Insbesondere beim Passieren der Ebbdeltas und der Ästuarbarren ist neben dem einschwingenden Seegang die örtliche Wassertiefe maßgebend für den Grad der Dämpfung [NIEMEYER 1987c]. Von daher sind nicht nur die Windentwicklung, sondern die örtlichen Wasserstände in ihrem Gesamtverlauf und nicht nur hinsichtlich ihrer Scheitelwerte bestimmend für die Intensität und Häufigkeit von See auf Watten einlaufender Seegangssysteme.

Hinsichtlich energetischer Intensität, morphologischer und ökologischer Wirksamkeit ist insbesondere bei durch Düneninseln geschützten Watten - obwohl während zeitlich begrenzter Phasen der Tide wirksam - bei auflandigen Starkwind- oder Sturmweatherlagen aus dem Küstenvorfeld einschwingender Seegang für Bemessungsfragen maßgeblich und mit der gleichsinnig wirkenden Dünung morpho-

logisch und ökologisch prägend [NIEMEYER 1983, 1984, 1987a, 1987b, 1991]. Diese Zusammenhänge sind qualitativ sogar auf andere Bereiche mit ähnlicher morphologischer Struktur übertragen worden, für die kein für quantitative Untersuchungen hinreichendes Datenmaterial vorlag [NIEMEYER 1987a, 1987b].

Eine der wesentlichen Fragestellungen dieses Meßprogramms war, ob in den durch Meßketten abgedeckten Wattgebiete unterschiedlicher Genese und Struktur hierdurch geprägte verschiedenartige Erscheinungsformen des Seegangs aufweisen und ob und inwieweit bisher für einheitlich strukturierte Gebiete erarbeitete extrapolierbare Zusammenhänge - unter Beachtung der physikalischen Randbedingungen übertragbar sind.

Hinsichtlich der Seegangsentwicklung im Küstenvorfeld war hierzu bekannt, daß die Seegangsentwicklung im Küstenvorfeld für den Bereich der südlichen Nordseeküste im Bereich der Ostfriesischen Inseln und der Elbemündung ähnliche Randbedingungen vorliegen, wenngleich geringe Unterschiede im Höhenspektrum erkennbar wurden. Das breitere Küstenschelf vor der nordfriesischen Küste bewirkt hingegen eine stärkere Dämpfung, was aus der deutlich geringeren Spreizung des Höhenspektrums hergeleitet wurde [NIEMEYER 1983]. Diese Aussage findet auch ihre Bestätigung in einer Mitteilung des DANISH HYDRAULIC INSTITUTE [1986], daß der limitierende Faktor der Seegangsbildung in der südlichen Nordsee allein die Wassertiefe ist.

4.2 Verteilung der Wellenhöhen und -perioden

4.2.1 Vorbemerkungen

Seit der grundlegenden Arbeit von LONGUETT-HIGGINS [1953] und insbesondere der weiterführenden Arbeit von BRETSCHNEIDER [1959] wird die Verteilung der Seegangparameter in vielen Fällen durch die Verhältniswerte verschiedener kennzeichnender Werte substituiert. Es erscheint in diesem Zusammenhang angemessen, auf den Wert dieser Relationen einzugehen. Ihre Berücksichtigung in der Literatur erfolgt mit unterschiedlicher Intensität, ohne daß hierfür in allen Fällen ein fachlicher Grund erkennbar ist. Zum einen geben diese Daten nur begrenzt Auskunft über die Anteile verschiedenartiger Systeme und können im Hinblick hierauf bestenfalls nur das Erfordernis einer Spektralanalyse zur Ursachendeutung legitimieren. Zum anderen sind - insbesondere für Bemessungszwecke - abgesicherte Zusammenhänge zwischen möglichen Extremwerten und verschiedenartig gewichteten Mittelwerten von sehr hohem Wert. Insofern erscheint es insbeson-

Gebiet/Meßort	Parametrisierung	
Einzugsgebiet des Norderneyer Seegats	H_{\max}/H_s	H_s/H_m
Meßstation O.W.	1,65	1,52
Osterwarf	1,67	1,57
Norddeich	1,65	1,60
Roo Paal I	1,68	1,65
Roo Paal II	1,65	1,61
Grohde Polder	1,65	1,55
Wurster Watt	H_{\max}/H_s	H_s/H_m
Cappeler Watt	1,61	1,54
Cappeler Heller	1,50	1,50
Eiderästuar	H_{\max}/H_s	H_s/H_m
Süderhever	1,63	1,49
Außeneider I	1,62	1,47
Außeneider II	1,58	1,47
Purrenstrom	1,55	1,47
Eiderdamm – Süd	1,47	1,45
Einzugsgebiet der Hever	H_{\max}/H_s	H_s/H_m
Everschopsiel – West	1,55	1,60
Everschopsiel – Ost	1,64	1,57
Strucklahnungshörn	1,69	1,57
Holmer Siel	1,63	1,55

Tabelle 1: Verhältniswerte kennzeichnender Wellenhöhen

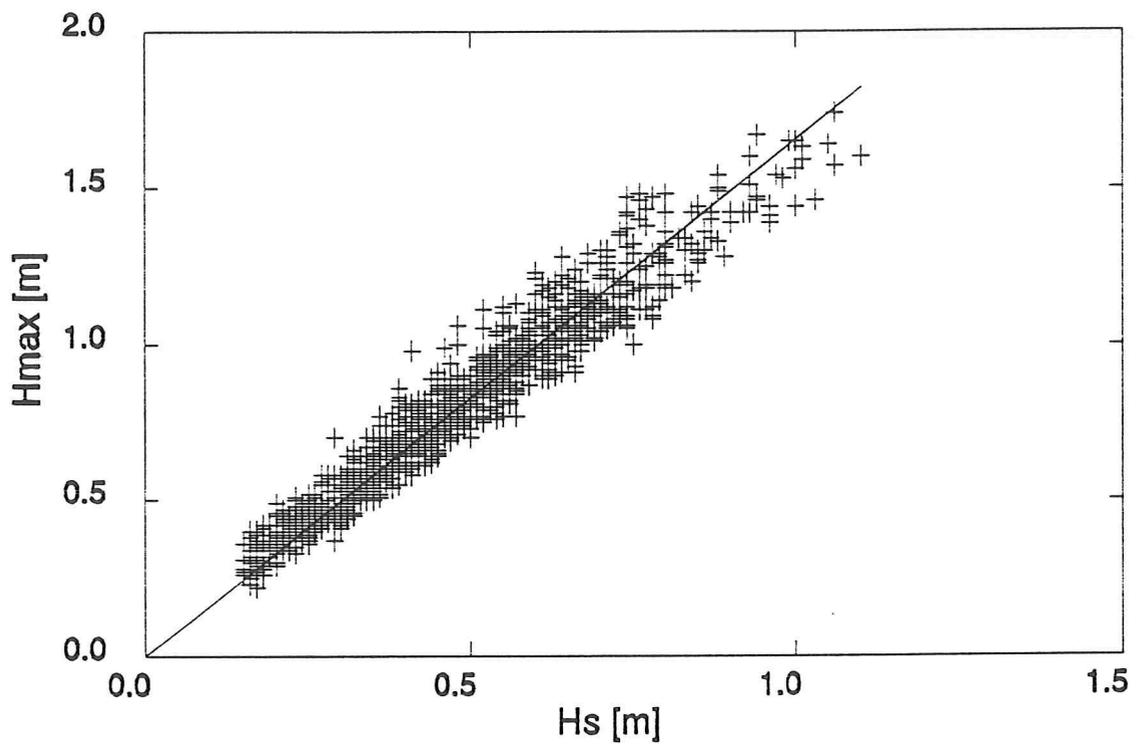


Abb. 17: Relation von maximaler und signifikanter Wellenhöhe; Osterwarf

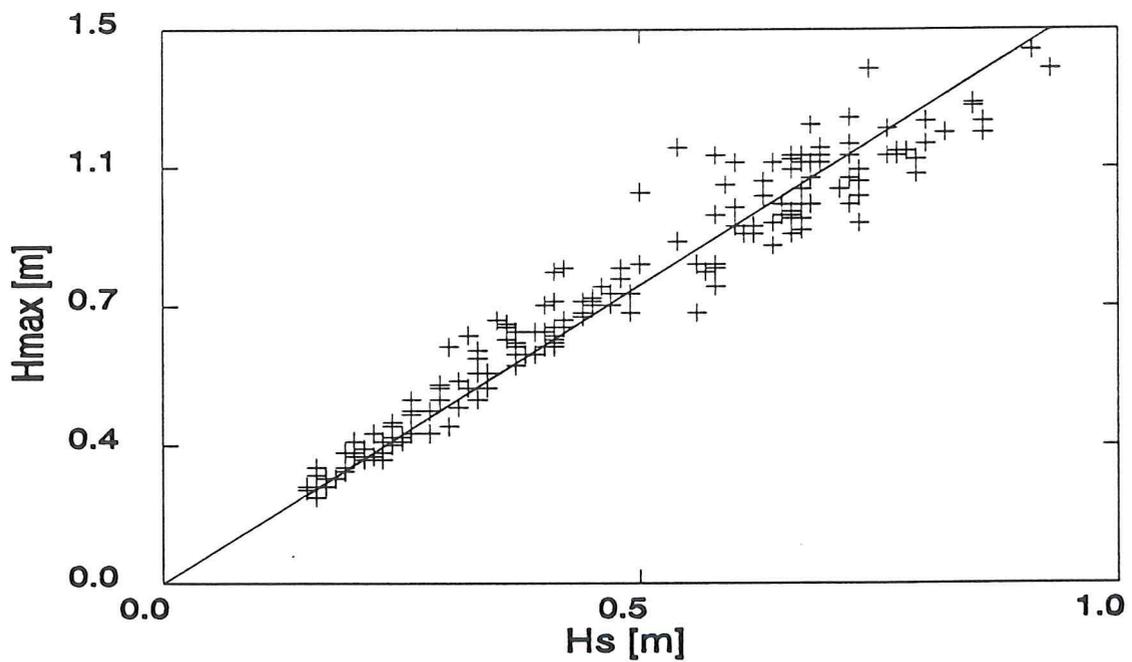


Abb. 18: Relation von maximaler und signifikanter Wellenhöhe; Capper Watt

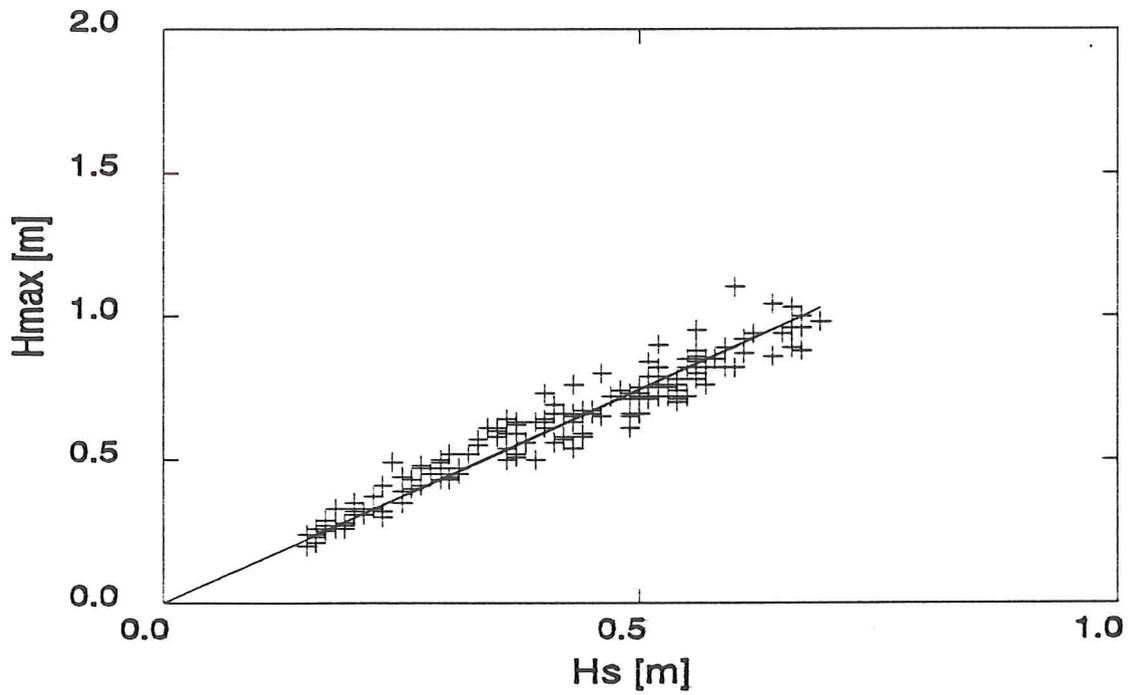


Abb. 19: Relation von maximaler und signifikanter Wellenhöhe; Capper Heller

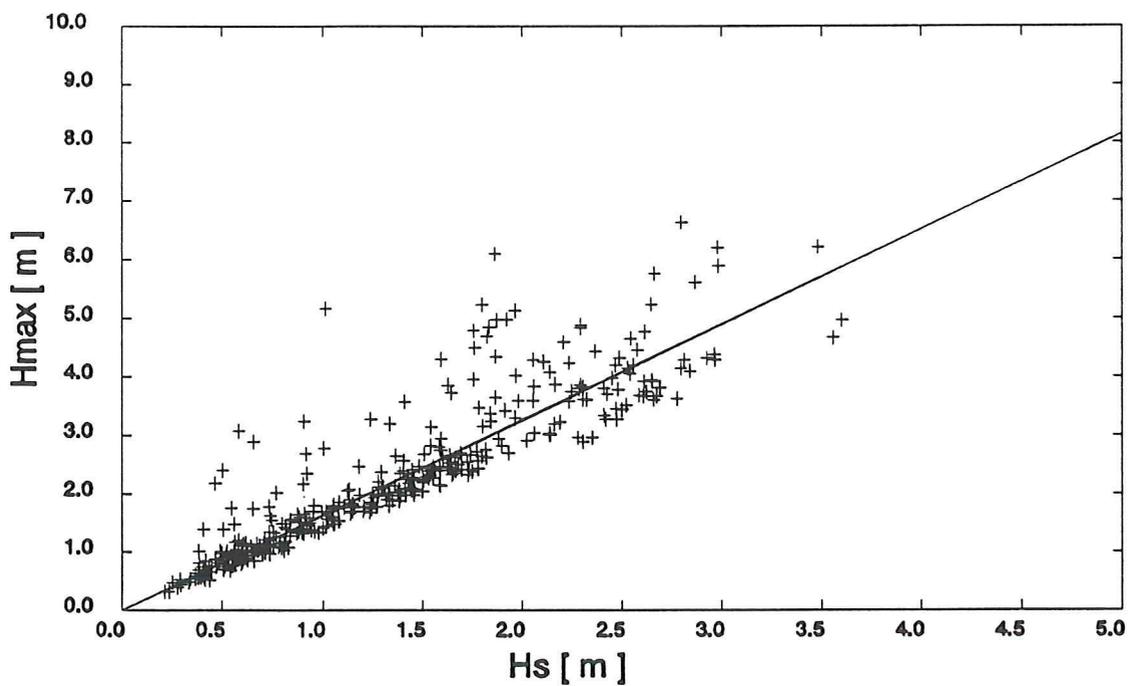


Abb. 20: Relation von maximaler und signifikanter Wellenhöhe; Süderhever

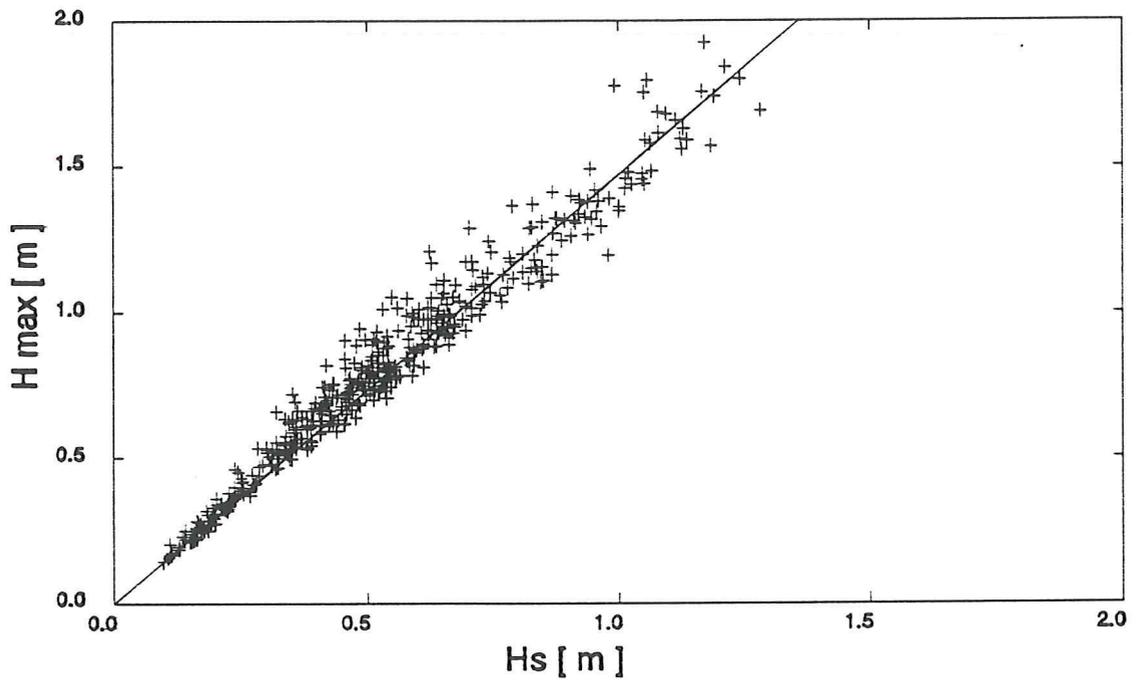


Abb. 21: Relation von maximaler und signifikanter Wellenhöhe; Eiderdamm-Süd

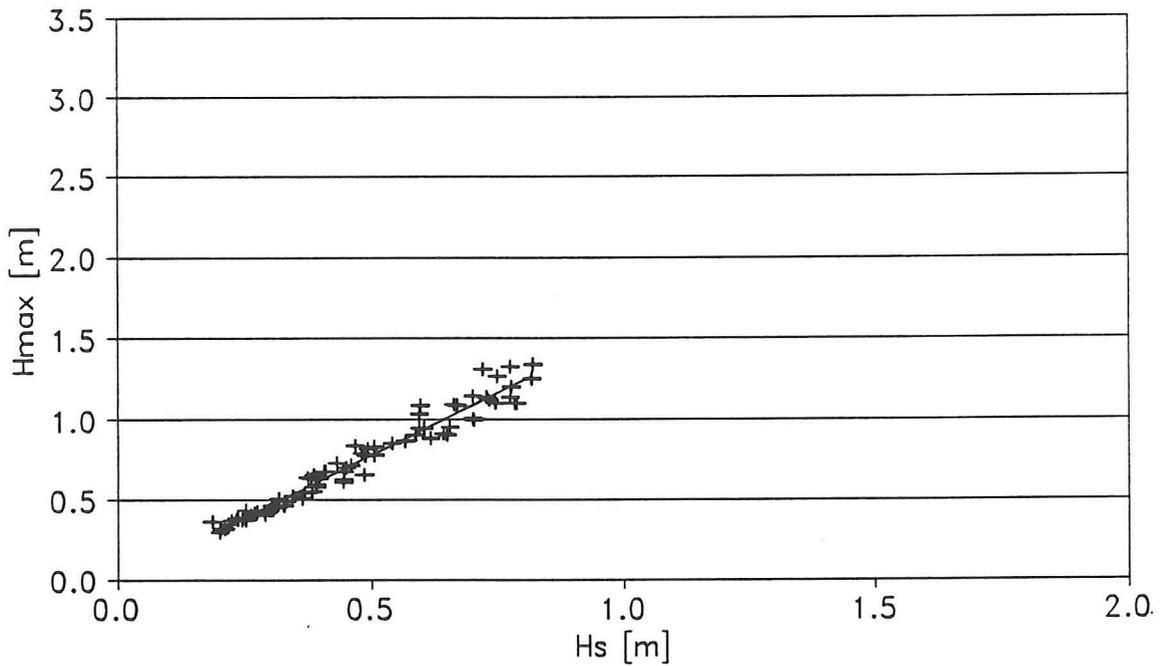


Abb. 22: Relation von maximaler und signifikanter Wellenhöhe; Everschopsiel-West

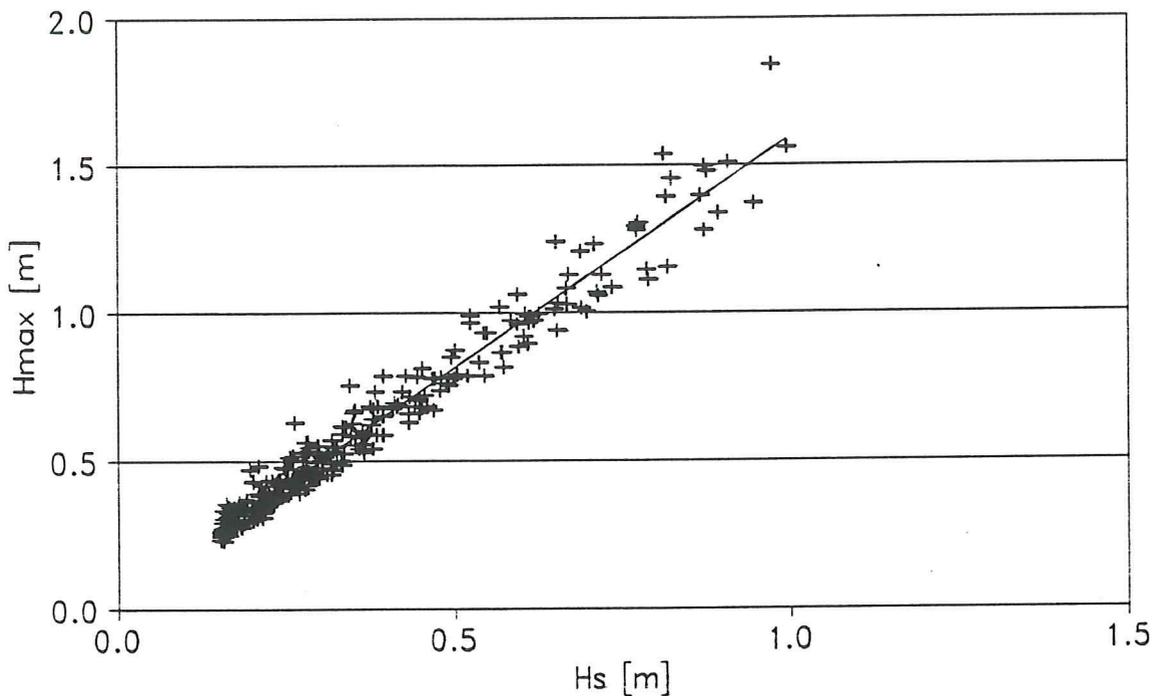


Abb. 23: Relation von maximaler signifikanter Wellenhöhe; Everschopsiel-Ost

dere angesichts des relativ zur Gesamtanalyse begrenzten Aufwands - angebracht, dieser Fragestellung nachzugehen.

Abgesicherte, für Gebiete repräsentative Erkenntnisse hierzu werden in nächster Zukunft von wachsendem Wert sein: Die zunehmende Verwendung mathematischer Modelle wird mit deren fortlaufender Verbesserung zu flächendeckenden Informationen über eine begrenzte Zahl kennzeichnender Parametrisierungen des Seegangs führen. Über Naturmessungen abgesicherte Zusammenhänge zwischen diesen Parametern und Extremwerten erlauben somit eine wesentlich weitergehende Nutzung der Modellergebnisse.

4.2.2 Verteilung der Wellenhöhen

Diskutiert wird hier vorrangig die für weitergehende Nutzungen wesentlichste Relation der Höhenverteilung von maximalen und signifikanten Wellenhöhen (Tab. 1). Sie weist für alle Stationen im Einzugsbereich des Norderneyer Seegats Werte auf (Abb. 17), die nur sehr unwesentlich von dem theoretischen Wert für die RAYLEIGH-Verteilung von 1,64 [LONGUETT-HIGGINS 1953] für 200 Wellen ab. Dies bestätigt weitgehend die Ergebnisse früherer Untersuchungen, die aber auch

gezeigt haben, daß diese Relation oft exakt übereinstimmt, ohne daß aber die Gesamtheit der Wellenhöhen RAYLEIGH-verteilt ist [NIEMEYER 1983].

Die Werte für das ästuarine Wurster Watt zeigen dagegen mit Werten von 1,61 und 1,50 an (Abb. 18 u. 19), daß hier das Höhenspektrum des Seegangs enger gespreizt ist als auf den inselgeschützten ostfriesischen Watten. Der Wert für das Watt liegt erheblich und für das anschließende Lahnungsfeld immer noch deutlich höher als der mit 1,45 für die benachbarten brandungsfreien Watten im südwestlichen Elbmündungsgebiet von SIEFERT [1974] ermittelte. Der Unterschied ist möglicherweise darauf zurückzuführen, daß die letztgenannten Messungen wegen der Eisgefahr für die Geräte nicht in den sturmreichen Winterperioden vorgenommen wurden. Die Werte für das Wurster Watt liegen etwas näher bei denen von BARTHEL [1981] für die Außenweser ermittelten von 1,50 für alle Daten und 1,55 für die Sturmflut von 1976. Insgesamt zeigt der lokale Vergleich von Watt und Lahnungsfeld wiederum, daß dämpfende Einwirkungen zu einer Einengung des Höhenspektrums führen.

Die vergleichbaren Werte für das Eiderästuar (Tab. 1) liegen im Seegebiet knapp unterhalb des theoretischen Wertes von LONGUETT-HIGGINS [1953] und nehmen dann kontinuierlich landwärts ab (Abb. 20 u. 21). Hierin ist eine Bestätigung früherer Interpretationen der Verhältniszahlen [NIEMEYER 1983] zu sehen, nach der Einengungen in der Spreizung des Höhenspektrums als Zeichen für dämpfende Einwirkungen zu sehen sind. Zudem wird hieran - im Vergleich zu früheren Untersuchungen für den Inselvorstrand und das Seegat von Norderney - deutlich, daß die Dämpfung durch engräumige Energieumwandlung auf den Riffbögen auf die Spreizungen des Höhenspektrums anders wirkt als die kontinuierliche in einem Ästuar. Im Gegensatz zu dem landwärts abnehmenden Verhältniszahlen von maximalen und signifikanten Wellenhöhen im Eiderästuar war dort für die genannten Bereiche ein höherer Wert als für das Seegebiet festgestellt worden; der auf den Watten anschließend wieder die gleiche Größenordnung wie im Seegebiet annimmt [NIEMEYER 1983]. Hieraus ist zu folgern, daß die Form der Dämpfung unterschiedliche Wirkungen auf die Spreizungen des Höhenspektrums des Seegangs hat. Die vollständige Energieumwandlung auf dem Riffbogen führt zu einer größeren Spreizung, während die allmähliche Energiedissipation in Ästuarien und auf Watten zu einer Einengung des Höhenspektrums führt.

Im Einzugsgebiet der Hever sind die Ergebnisse weit weniger eindeutig (Tab. 1), da selbst für zwei jeweils nah beieinanderliegende Meßstellen wie Everschopsiel-Ost und -West deutliche Differenzen aufweisen (Abb. 22 u. 23). Ähnlich - wenn gleich mit geringeren Abweichungen - verhält es sich mit den Relationen der maximalen und signifikanten Wellenhöhen an den Stationen Strucklahnungshörn

und Holmer Siel. Die geringere Spreizung des Höhenspektrums an der Station Everschopsiel-West ist vermutlich auf die hohe Lage der Station auf dem Deichvorland und den damit verbundenen intensiveren Wechselwirkungen zwischen Seegang und Morphologie zurückzuführen. Den infragekommenden Ursachen soll weiter in Zusammenhang mit Flachwasereffekten nachgegangen werden.

Aus der Gesamtheit der Daten (Tab. 1) ist zu schließen, daß die Spreizung des Höhenspektrums des Seegangs auch in ihrer Variation gebietsspezifische Merkmale aufweist: Im Einzugsgebiet der Hever reagiert sie im oberen Bereich erheblich sensitiver auf Wechselwirkungen mit der Morphologie als im niedrigeren: der Verhältniswert von signifikanter und mittlere Wellenhöhe weist an allen Meßorten weit weniger starke Schwankungen auf als der von maximaler und signifikanter. Besonders deutlich wird dies an den Werten für Everschopsiel-West, wo die geringe Reduktion sogar dazu führt, daß die erstgenannte Relation den größeren Wert hat. Noch deutlicher ist diese Erscheinung im Eiderästuar, wo das Verhältnis H_s/H_m nahezu konstant bleibt, während die für H_{max}/H_s kontinuierlich abnehmen. Die Werte für die Eider zeigen, daß aber regional starke Unterschiede möglich sind: Die Werte liegen hier insgesamt niedriger als in den anderen Meßgebieten. Im Tidebecken des Norderneyer Seegats variieren hingegen die Relationen von signifikanten und mittleren Wellenhöhen mehr als die von maximalen und signifikanten. Das Verhältnis H_s/H_m nimmt dabei mit wachsender Entfernung vom Seegat ab (4.1).

Eine Dämpfungswirkung von Lahnungen wird an den Werten der Stationen Cappeler Watt und Cappeler Heller an der Wurster Küste deutlich: Für den gesamten Bereich des Höhenspektrums oberhalb der mittleren Wellenhöhe ist eine verengte Spreizung festzustellen. Als Ursache können die Wechselwirkungen von Seegang und der zwischen beiden Stationen liegenden Lahnung - insbesondere für den niedrigeren Bereich der Wasserstände - in Betracht gezogen, aber nicht mit Sicherheit genannt werden. Dieser hier aufgetretene Fragestellung der Wechselwirkungen von Seegang und Lahnungen wird noch weiter nachzugehen sein.

Insgesamt kann aus der Gesamtheit der Werte die Schlußfolgerung gezogen werden, daß hier eine solide Grundlage für die Bestimmung von Extremwerten gelegt worden ist. Insofern stellen die Ergebnisse eine geeignete Ergänzung für künftige Modelluntersuchungen dar. Überwiegend lassen sich - bei üblicher Sicherheitsvorgabe - sogar regional einheitlich Werte vorgeben, die für spezifische Bereiche wie Lahnungsfelder und Heller modifiziert werden können. Lediglich für das Eiderästuar ist eine Abstufung in Anlehnung an die Daten erforderlich. Es ist zu vermuten,

Gebiet/Meßort	Parametrisierung	
Einzugsgebiet des Norderneyer Seegats	T_{Hs}/T_m	T_{max}/T_m
Meßstation O.W.	1,00	2,27
Osterwarf	1,00	2,27
Norddeich	1,00	2,39
Roo Paal I	1,00	2,46
Roo Paal II	1,00	2,39
Grohde Polder	1,01	2,12
Wurster Watt	T_{Hs}/T_m	T_{max}/T_m
Cappeler Watt	1,00	1,95
Cappeler Heller	1,00	1,98
Eiderästuar	T_{Hs}/T_m	T_{max}/T_m
Süderhever	1,19	2,30
Außeneider I	1,19	3,23
Außeneider II	1,04	3,22
Purrenstrom	1,12	2,98
Eiderdamm – Süd	1,17	2,74
Einzugsgebiet der Hever	T_{Hs}/T_m	T_{max}/T_m
Everschopsiel – West	0,70	2,15
Everschopsiel – Ost	0,99	2,01
Strucklahnungshörn	1,00	2,07
Holmer Siel	0,70	1,90

Tabelle 2: Verhältniswerte kennzeichnender Wellenperioden

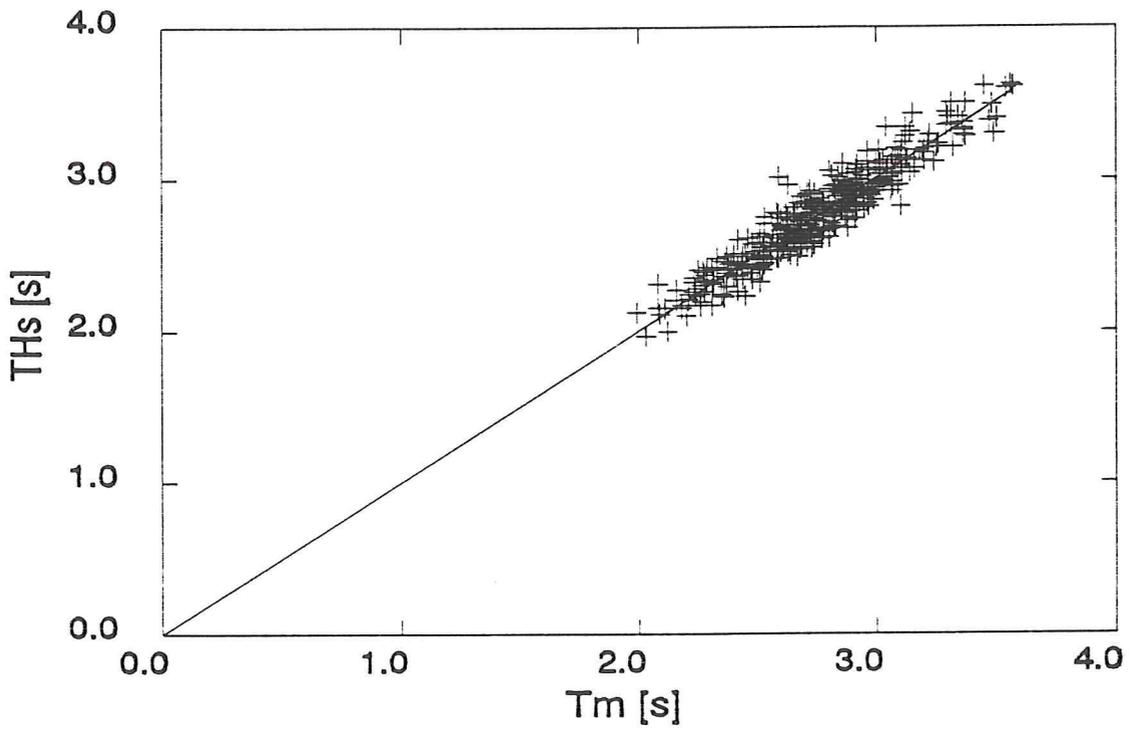


Abb. 24: Relation von signifikanter und mittlerer Wellenperiode; Norddeich

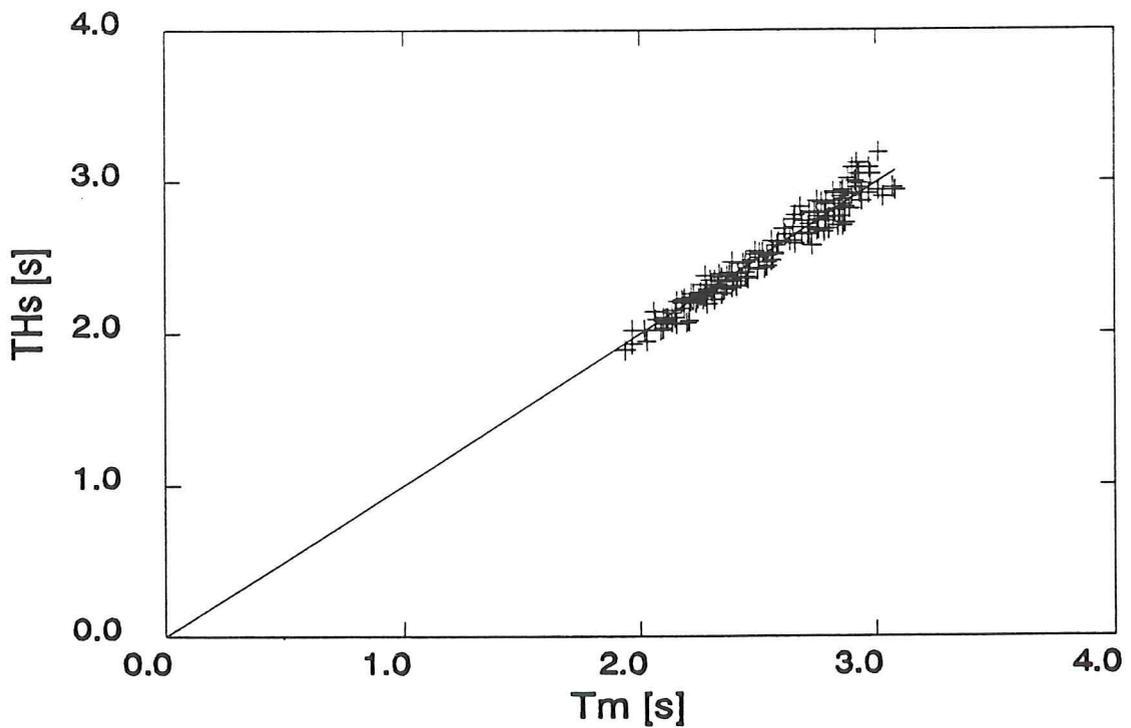


Abb. 25: Relation von signifikanter und mittlerer Wellenperiode; Cappeler Tief 1

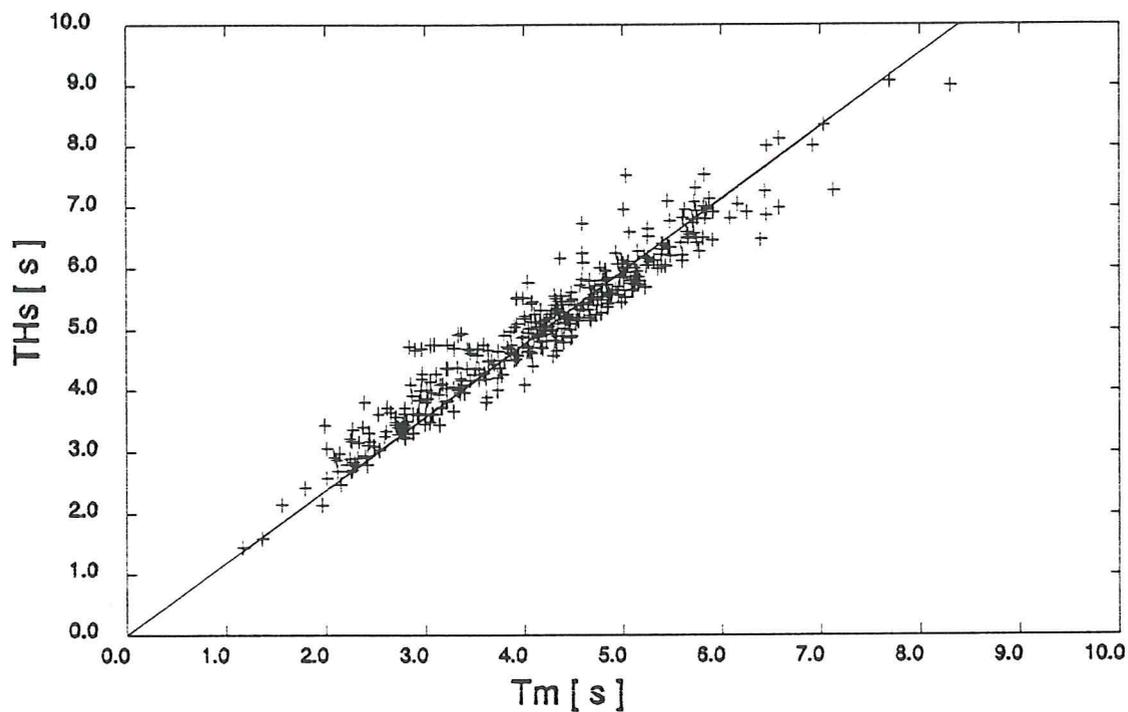


Abb. 26: Relation von signifikanter und mittlerer Wellenperiode; Süderhever

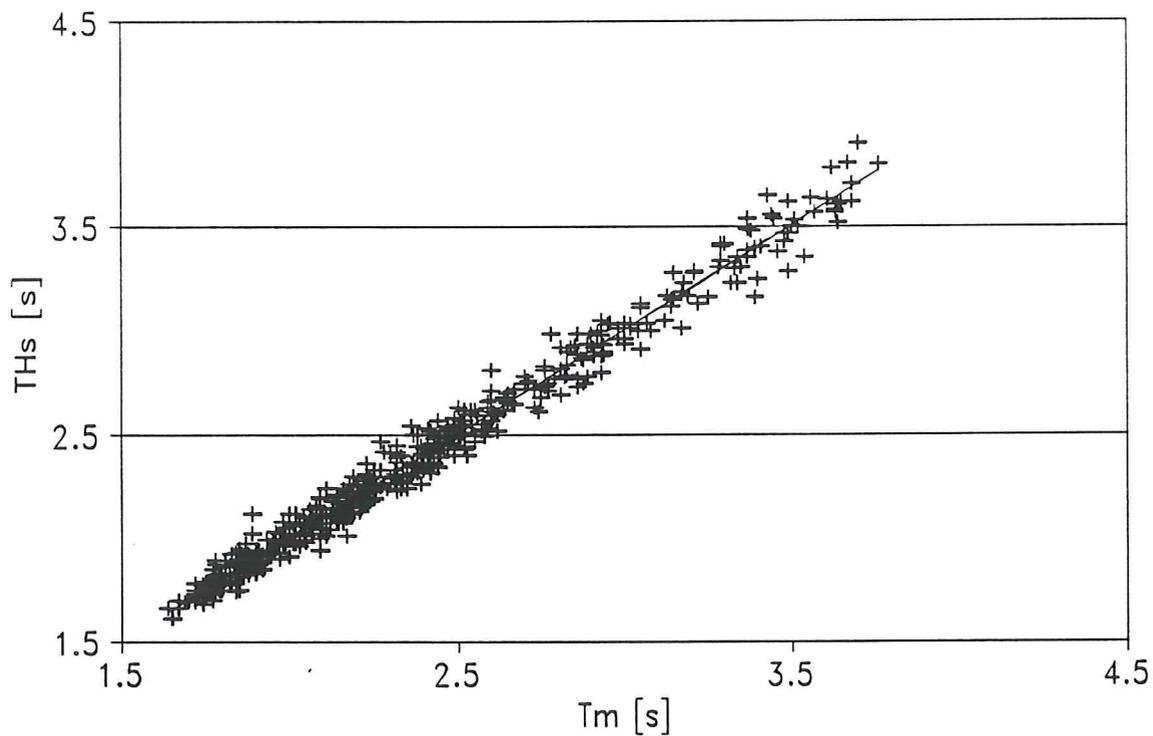


Abb. 27: Relation von signifikanter und mittlerer Wellenperiode; Strucklahnungshörn

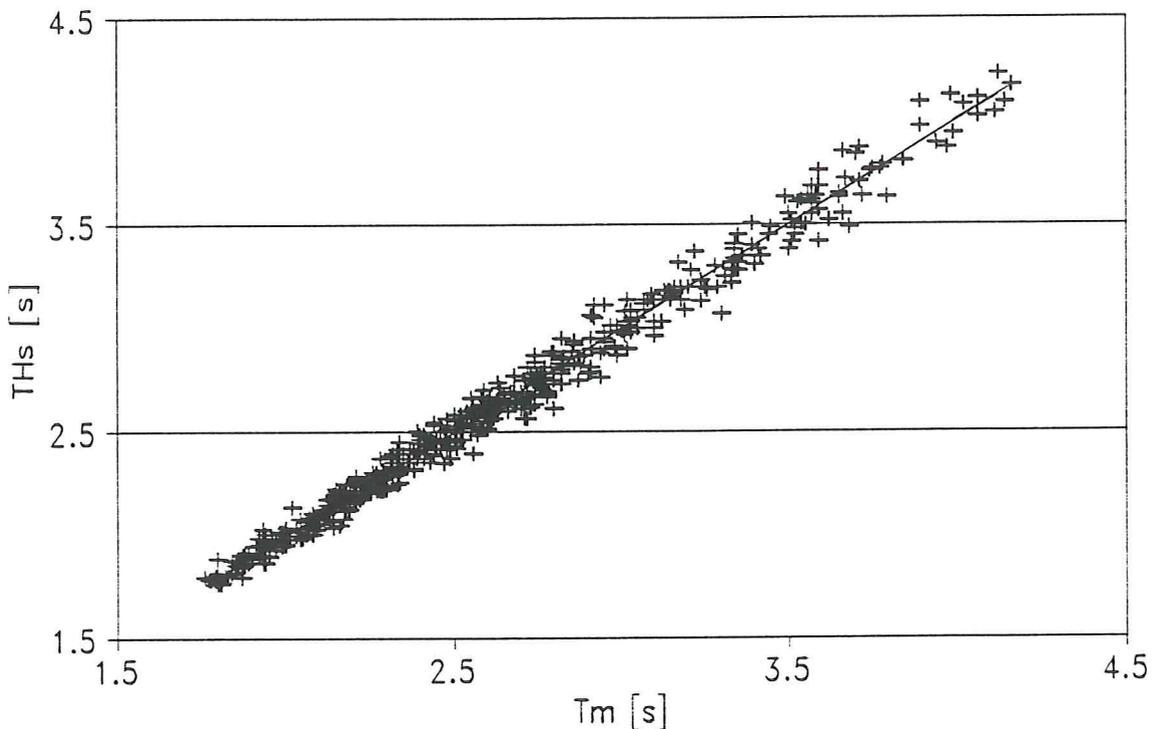


Abb. 28: Relation von signifikanter und mittlerer Wellenperiode; Holmer Siel

daß eine ähnliche Vorgehensweise auch für die anderen Ästuarien an der deutschen Nordseeküste geboten sind. Frühere Angaben von BARTHEL [1981] für die Außenweser können nach den hier gewonnenen Ergebnissen für die Wurster Küste und das Eiderästuar nicht mehr als hinreichend sicher für die Ableitung maximaler Wellenhöhen aus den Ergebnissen von Modelluntersuchungen angesehen werden.

4.2.3 Verteilung der Wellenperioden

Die statistisch hohen, gleichartigen Zusammenhänge der signifikanten und mittleren Wellenperioden deuten an (Tab. 2), daß der höhere Anteil des Seegangs im Einzugsgebiet des Norderneyer Seegats hinsichtlich der Entstehung einheitlich durch dieselbe Erscheinungsform geprägt ist und nicht durch die Überlagerung verschiedenartig entstandener Systeme. Die Gegebenheit, daß die mittlere Periode des höchsten Drittels aller Wellen nahezu gleich lang ist wie der Gesamtmittelwert (Abb. 24) läßt vermuten, daß der Anteil von Dünungswellen oder aus der Nordsee einschwingenden Seegangs hinsichtlich der Häufigkeit im Verhältnis zu kleinen und kurzen Wellen signifikant ist. Für das Wurster Watt sind die Verhältniswerte in etwa gleich (Abb. 25) wie im Tidebecken des Norderneyer Seegats (Tab. 2),

was angesichts der im regionalen und auch im lokalen Vergleich für die Höhenverteilung auftretenden Unterschiede nicht unbedingt zu erwarten war.

Die Verhältniswerte für die Meßorte im Eiderästuar sind hingegen größer (Tab. 2). Insbesondere für die Station Süderhever ist dies überraschend (Abb. 26), da hier ein merklicher Dünungsanteil mit relativ kleinen Wellen zu erwarten ist. Ob und inwieweit der Gesamtmittelwert durch einen starken Anteil kleiner und kurzer Wellen beeinflusst wird oder aber ob die höheren Wellen hier auch erheblich längere Perioden aufweisen, ist aus dem Verhältniswert von signifikanter und mittlerer Wellenperiode aber nicht eindeutig herleitbar.

Noch stärker als bei den Wellenhöhen zeigt sich bei den Verhältniswerten von signifikanten und mittleren Perioden eine deutliche Übereinstimmung zwischen den Werten von den ost- und zwei Meßorten auf den nordfriesischen Watten (Tab. 2). Hieraus darf legitimerweise geschlossen werden, daß hinsichtlich der Entwicklungs- und Ausbreitungsbedingungen zwischen inselgeschützten Watten - unabhängig vom geomorphologischen Charakter der vorgelagerten Inseln - weitgehende Übereinstimmungen hinsichtlich der Längenstruktur des höheren Anteils im Seegang bestehen können (Abb. 27). Der Wert für den Meßort Holmer Siel - der als klares Indiz für die Dominanz örtlicher Windsee zu werten ist - zeigt aber ebenso deutlich (Abb. 28), daß Wattgebiete mit großer Ausdehnung und entsprechend langen Windwirkwegen Wattseegang verschiedenartiger Struktur aufweisen können.

Die maximalen Wellenperioden sind an der Wurster Küste etwa doppelt so lang wie die mittleren, im Einzugsgebiet des Norderneyer Seegats mehr als doppelt so lang, wobei diese Marke in Nähe und Achsenrichtung des Seegats stärker überschritten wird als an den anderen Meßorten (Tab. 2). Auf den Watten des Einzugsgebietes der Hever ist das Verhältnis beider Parameter von ähnlicher Größenordnung wie im Wurster Watt. Die Unterschiede zwischen den drei Untersuchungsgebieten sind im wesentlichen auf die unterschiedlich langen Laufstrecken von Dünungsanteilen im Seegang zu erklären, die von der Nordsee in das Watt einschwingen. Auch die lokalen Unterschiede im Tidebecken des Norderneyer Seegats können auf diesen Effekt zurückgeführt werden, der hier möglicherweise noch durch die Schattenwirkung der Insel dämpfend überlagert wird.

Ein völlig anderes Bild bieten die Relationen für das Eiderästuar: Hier wird das Periodenspektrum des Seegangs offenbar bei seinem Einschwingen in das Ästuar vorübergehend stärker gespreizt und anschließend wieder gestaucht. Im Gegensatz zu der in den anderen Untersuchungsgebieten erkennbaren Dämpfung der

längeren relativen Perioden ist hier selbst auf den hohen Watten das Verhältnis von maximalen und mittleren Perioden größer als im Seegebiet (Tab. 2).

Die Zusammenhänge zwischen signifikanter und mittlerer Periode bieten aufgrund der hohen statistischen Qualität eine geeignete Grundlage für die Hochrechnung von Modellergebnissen. Für eine entsprechende Bestimmung der maximalen Periode kann eine pauschale Übernahme der hier ermittelten Verhältniswerte wegen der stärkeren Streuung nicht ohne weiteres empfohlen werden. Es wird - in Abhängigkeit von der jeweiligen Problemstellung - gegebenenfalls erforderlich sein, das vorhandene Datenkollektiv unmittelbar für eine Berechnung gezielt zu evaluieren.

4.3 Wellensteilheiten

Seit den Formulierungen von STOKES und insbesondere von MICHELL [1893] ist die Steilheit als Kriterium für die Stabilität Bestandteil der Wellenforschung. Durch die Erweiterung von POCKLINGTON [1921, bei BATTJES 1988] und der allgemein bekannten von MICHE [1944] für den Übergangs- und Flachwasserbereich stellt sie ein allgemeingültigeres Brecherkriterium dar als das nur auf dem Wellenhöhen/Wassertiefen-Grenzwert beruhende, der nach der Formulierung von MC COWAN [1894] und vieler Nachfolgender für Flachwasser zumeist als Orientierung genutzt wird. Soweit bekannt, hat erstmals SIEFERT [1974] die Steilheit als Charakteristik für die Wechselwirkungen von Seegang und Morphologie herangezogen, ohne allerdings explizit diese Zuordnung vorzunehmen: Sie dient neben anderen Parametrisierungen als Unterscheidungsmerkmal für verschiedenartige Bereiche der von ihm untersuchten Wattgebiete. Obwohl sich für die Aussagekraft dieser Parametrisierung in dieser Hinsicht weitere Indizien gefunden haben [NIEMEYER 1983], ist diese Betrachtungsweise bisher nicht Bestandteil des üblichen Instrumentariums der Seegangsforschung geworden. Ursache hierfür mag sein, daß im internationalen Küsteningenieurwesen der Seegangsforschung im Bereich von Watten weit weniger Aufmerksamkeit gewidmet wird als der an Stränden. Für die Interpretation der hier zu untersuchenden Daten von Naturmessungen des Wattseegangs wird es aber wegen der von SIEFERT [1974] und auch von NIEMEYER [1983] aufgezeigten Zusammenhänge als sinnvoll angesehen, die Steilheit des Seegangs nicht nur als Stabilitätskriterium zu werten, sondern auch als Indikator für hydrodynamisch-morphologische Wechselwirkungen.

Die Größenordnung der in den verschiedenen Untersuchungsgebieten gemessenen signifikanten und mittleren Wellensteilheiten (Tab. 3) weist ausgeprägte Unterschiede sowohl regional zwischen den einzelnen Meßgebieten, als auch lokal in-

Gebiet/Meßort	Parametrisierung	
	S_s	S_m
Einzugsgebiet des Norderneyer Seegats		
Meßstation O.W.	0,00567	0,00346
Osterwarf	0,00886	0,00566
Norddeich	0,00814	0,00513
Roo Paal I	0,00769	0,00483
Roo Paal II	0,00728	0,00459
Grohde Polder	0,00700	0,00444
Wurster Watt	S_s	S_m
Cappeler Watt	0,00757	0,00488
Cappeler Heller	0,00692	0,00462
Eiderästuar	S_s	S_m
Süderhever	0,00475	0,00455
Außeneider I	–	–
Außeneider II	–	–
Purrenstrom	0,00769	0,00606
Eiderdamm – Süd	0,00429	0,00385
Einzugsgebiet der Hever	S_s	S_m
Everschopsiel – West	0,00595	0,00372
Everschopsiel – Ost	0,00610	0,00390
Strucklahnungshörn	0,00887	0,00570
Holmer Siel	0,00935	0,00606

Tabelle 3: Sigifikante und mittlere Wellensteilheiten

nerhalb der einzelnen Bereiche zwischen den Meßorten. Zur Orientierung wird hier die Zuordnung der mittleren Wellensteilheit zur morphologischen Charakteristik von Wattgebieten von SIEFERT [1974] wiedergegeben, wobei die Näherung

$$L_m \approx T_m^2$$

eliminiert wird, da sie als nicht zutreffend anzusehen ist [NIEMEYER 1983]. Von einer exakten Umrechnung auf Wellenlängen ist hier abgesehen worden, da zum einen dann ein Vergleich mit den Werten nach SIEFERT [1974] verfälscht worden wäre. Zum anderen ist aber mit der Wahl der jeweils anzuwendenden Theorie in Abhängigkeit von dem Bereich der relativen Wassertiefe und der Wellensteilheit und -asymmetrie ebenfalls ein Fehler verbunden. Um aber einen unverfälschten Vergleich mit den Zuordnungen von SIEFERT [1974] zu ermöglichen, wird hier als Steilheit näherungsweise das Verhältnis von Wellenhöhe mit dem Quadrat der Periode angenommen, das aus dimensionsanalytischen Gründen mit der Konstante für die Erdbeschleunigung multipliziert wird. Demgemäß haben die mittleren Steilheiten nach SIEFERT [1974] in den verschiedenen Bereichen folgende Werte:

$$s_m = 0,0055 : \text{tieferes Wasser } (h_{MThw} = 5 - 12 \text{ m});$$

$$s_m = 0,0060 : \text{Wattströme } (h_{MThw} = 5 - 10 \text{ m});$$

$$s_m = 0,0050 : \text{brandungsfreies Watt } (h_{Mthw} \leq 5 \text{ m});$$

$$s_m = 0,0040 : \text{Randwatt; } (h_{Mthw} = 2 - 5 \text{ m});$$

$$s_m = 0,0025 : \text{Brandungswatt } (h_{Mthw} = 1 - 4 \text{ m}).$$

Die Steilheiten in der Außeneider (Position Süderhever) liegen deutlich unter denen des Elbmündungsgebietes, während die auf dem Watt im Purrenstrom (Abb. 29) außerhalb der von SIEFERT [1974] angegebenen Bandbreiten liegen und sich somit dieser Zuordnung entziehen (Tab. 3). Hinsichtlich der Außeneider kann keine abschließende Bewertung der Unterschiede gegeben werden. Die Streuungen um den Repräsentanzwert sind allerdings in beiden Fällen erheblich, so daß ein Urteil ohnehin mit Unsicherheiten behaftet wäre. Die hohen Werte an der Station Purrenstrom sind wahrscheinlich auf den wesentlich höheren Anteil von Sturmmessungen zurückzuführen, der hier im Vergleich zu den Daten von SIEFERT [1974] berücksichtigt werden konnte. Auf jeden Fall erscheint es aber bei

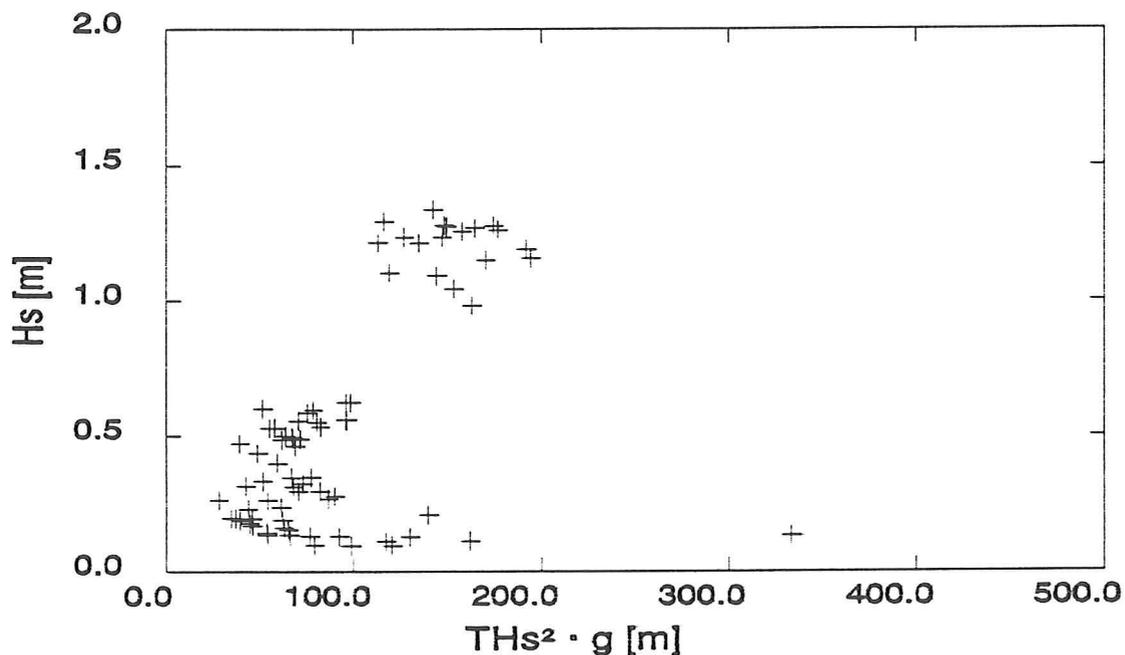


Abb. 29: Signifikante Wellensteilheiten; Purrenstrom

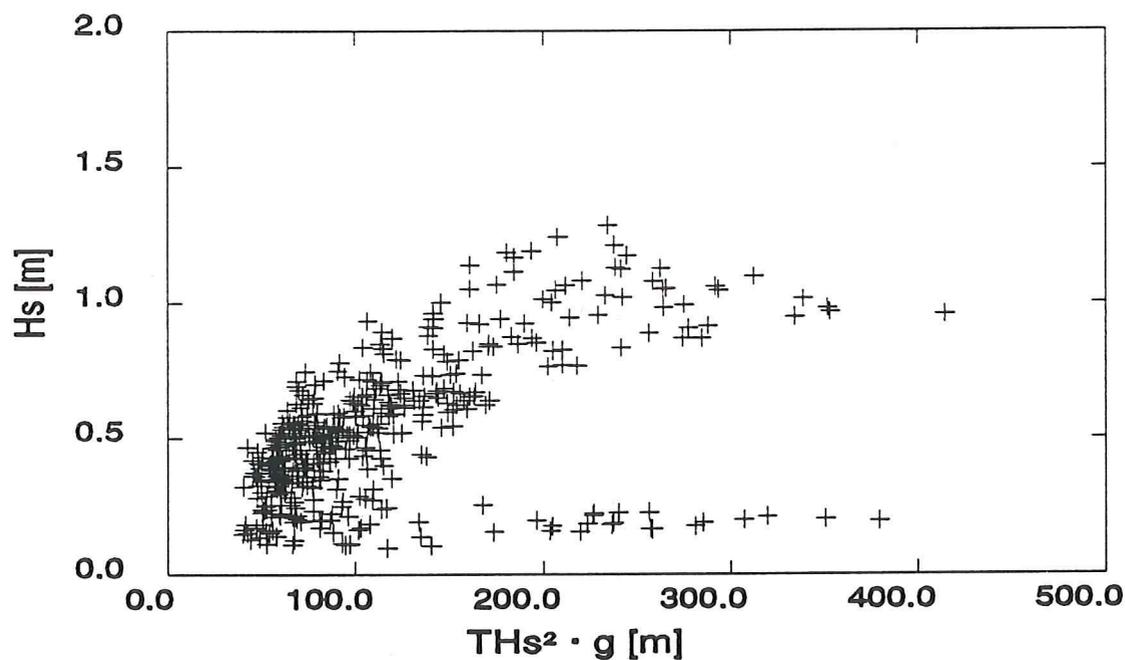


Abb. 30: Signifikante Wellensteilheiten; Eiderdam Süd

einem Vergleich mit den Werten für die Station Eiderdamm-Süd (Abb. 30) legitim, im Bereich zwischen beiden Stationen ausgeprägten Brandungsbereich zu vermuten, was aber – von Schaumkronenbrechern abgesehen – ist nach visuellen Beobachtungen nicht der Fall ist. Die mittleren Steilheiten sind am Eiderdamm größer als für Brandungswatten und liegen nach SIEFERT [1974] im Bereich für Randwatten. Aus der Lage der Stationen (Abb. 7 u. 8) ist aber eher zu vermuten, daß der am Purrenstrom stark aufgesteilte Seegang bei seinem Fortschritt gebrochen ist und entweder auf der Strecke bis zum Eiderdamm sich wieder aufgestellt hat oder nicht soweit an Steilheit verloren hat, wie es für Brandungswatten im Elbmündungsgebiet typisch ist. Letztere Möglichkeit erscheint als die wahrscheinlichere von beiden, da die Entfernung zwischen beiden Stationen kurz ist und zudem die Ausgangssteilheit auch höher war als die Werte für das Elbmündungsgebiet. Als Ursache der grundsätzlichen Unterschiede sind auch die der Randbedingungen anzusehen, unter denen die Datenkollektive gewonnen wurden.

An den beiden Stationen am Everschopsiel sind mittlere Wellensteilheiten gemessen worden (Tab. 3), die für eine morphologische Einordnung in Randwatten spricht. Angesichts der Lage ist diese Typisierung für den Meßort Everschopsiel-Ost (Abb. 31) auch als zutreffend anzusehen (Abb. 9), wohingegen sich die Station Everschopsiel-West bereits oberhalb des Watts auf dem Deichvorland befindet. Die gleichartige Charakteristik von Seegang auf einem Heller und im vorgelagerten Watt ist aber auch bei früheren Untersuchungen bereits festgestellt worden und damit erklärt worden, daß Salzwiesen sich in das zwischen Wattmorphologie und Seegang bestehende Gleichgewicht harmonisch einfügen [NIEMEYER 1983]. Insofern sind die hier festgestellten Werte nicht hinreichend, um die morphologische Klassifizierung anhand von Seegangssteilheiten ad absurdum zu führen.

Bemerkenswerter sind hingegen die absoluten Wellensteilheiten an den Meßorten Strucklahnungshörn und Holmer Siel (Tab. 3), die eine gänzlich andere Seegangscharakteristik ausweisen als sie im Bereich des Everschopsiels festgestellt wurde. Auf jeden Fall stellt sich für die untersuchten Datensätze aller Meßgebiete am Holmer Siel (Abb. 32) der durchschnittlich steilste Seegang aller hier untersuchten Meßorte ein, der nach der Klassifikation von SIEFERT [1974] nicht einzuordnen ist: Die Werte liegen - ebenso wie die der festlandsnahen Watten im Einzugsgebiet des Norderneyer Seegats - in der Größenordnung der dort angegebenen Maximalwerten für Wattströme (Abb. 33). Insofern erscheint die Anwendung dieser Klassifikation für inselgeschützte Watten wenig sinnvoll, da die Einordnung der Werte ohne eingehende Prüfung zu Fehlinterpretationen führen könnte. Eine weitere Besonderheit ist der ungewöhnlich enge Zusammenhang von Wellenhöhen

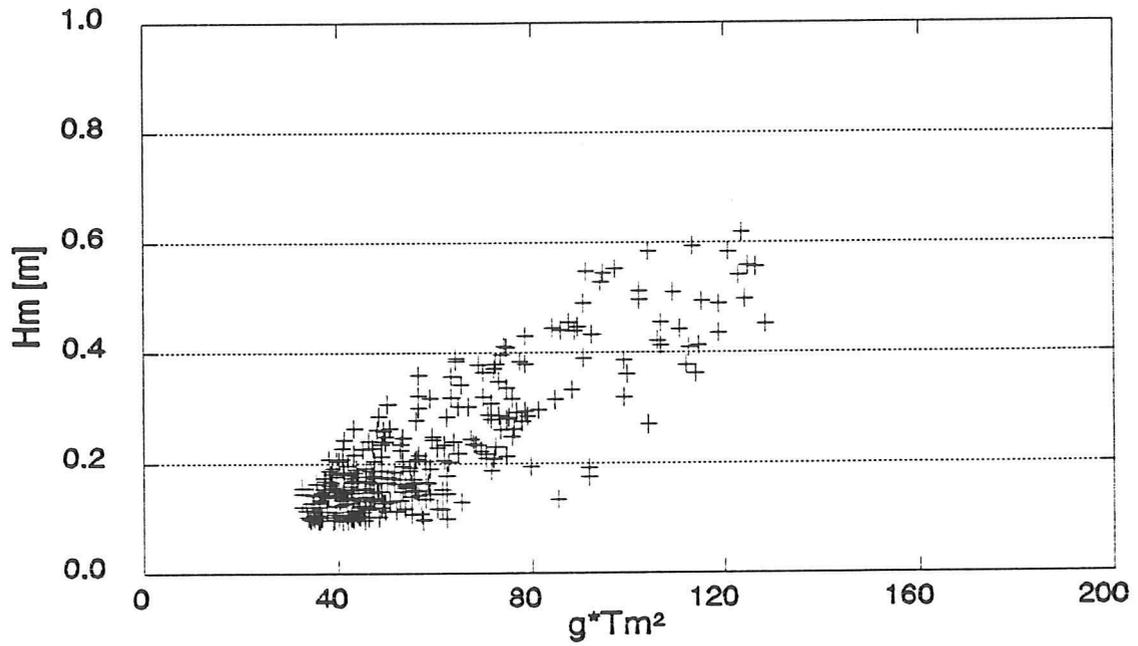


Abb. 31: Mittlere Wellensteilheiten; Everschopsiel Ost

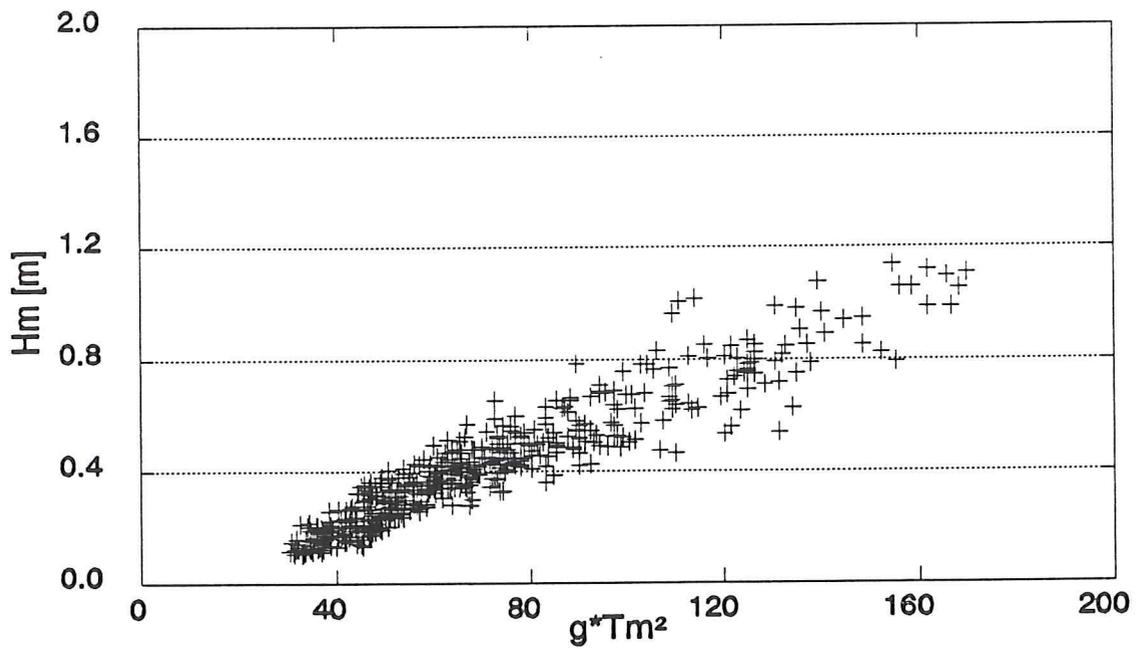


Abb. 32: Mittlere Wellensteilheiten; Holmer Siel

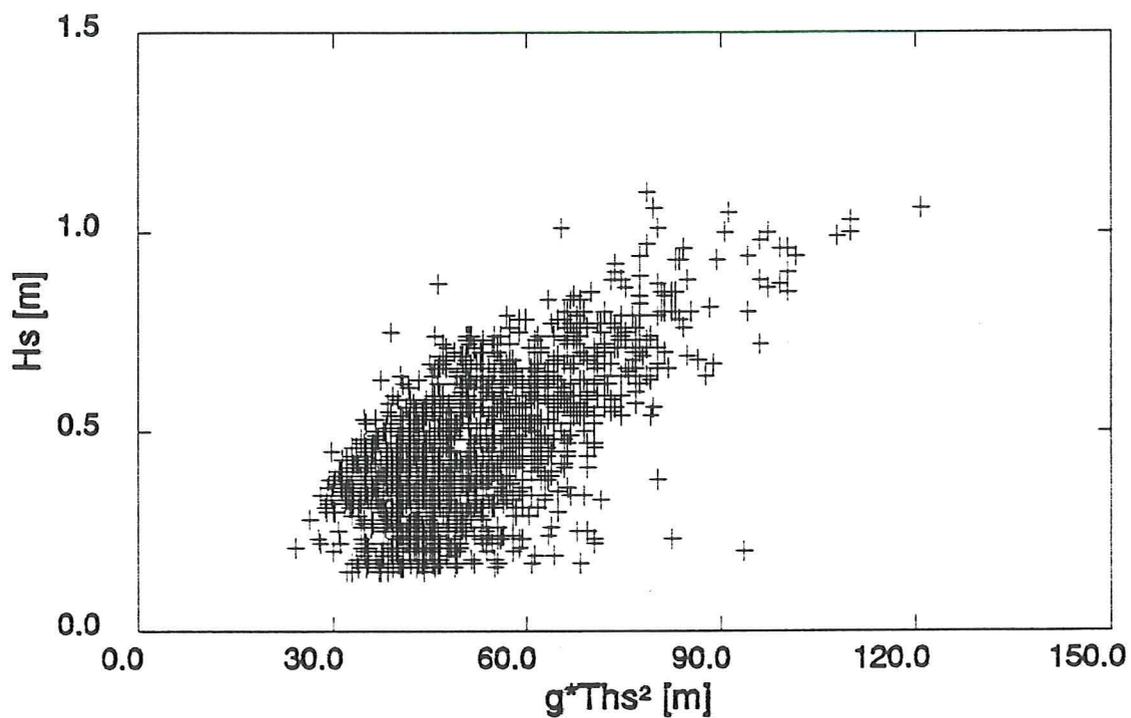


Abb. 33: Signifikante Wellensteilheiten; Osterwarf

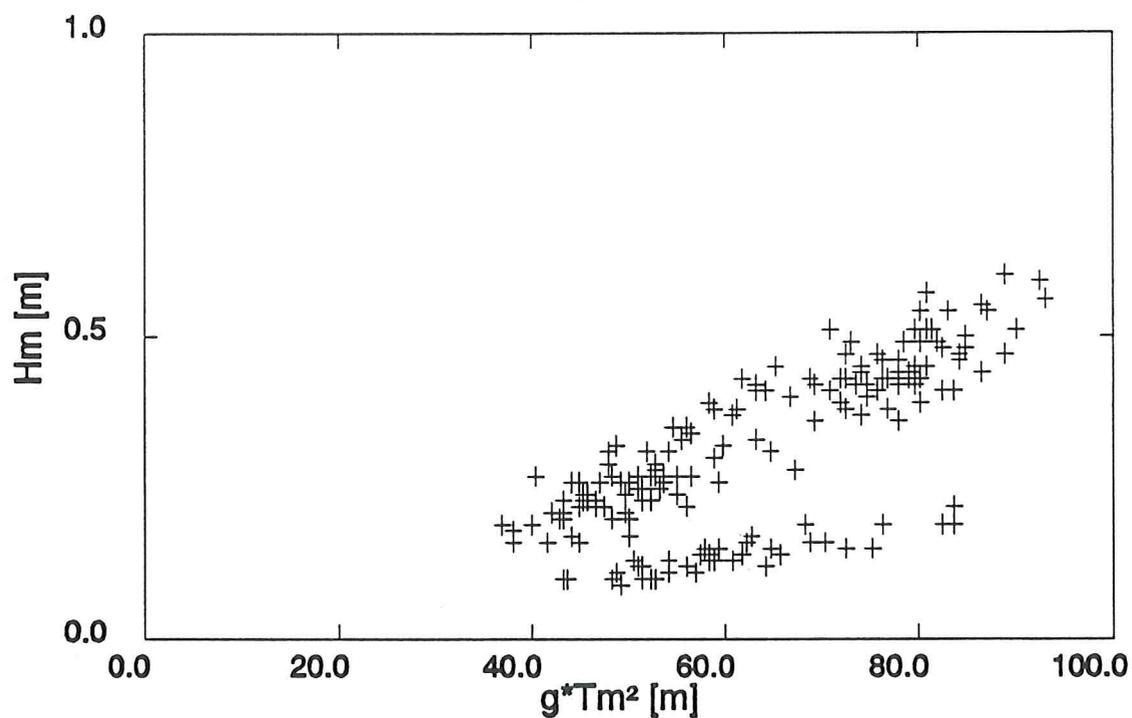


Abb. 34: Mittlere Wellensteilheiten; Capper Watt

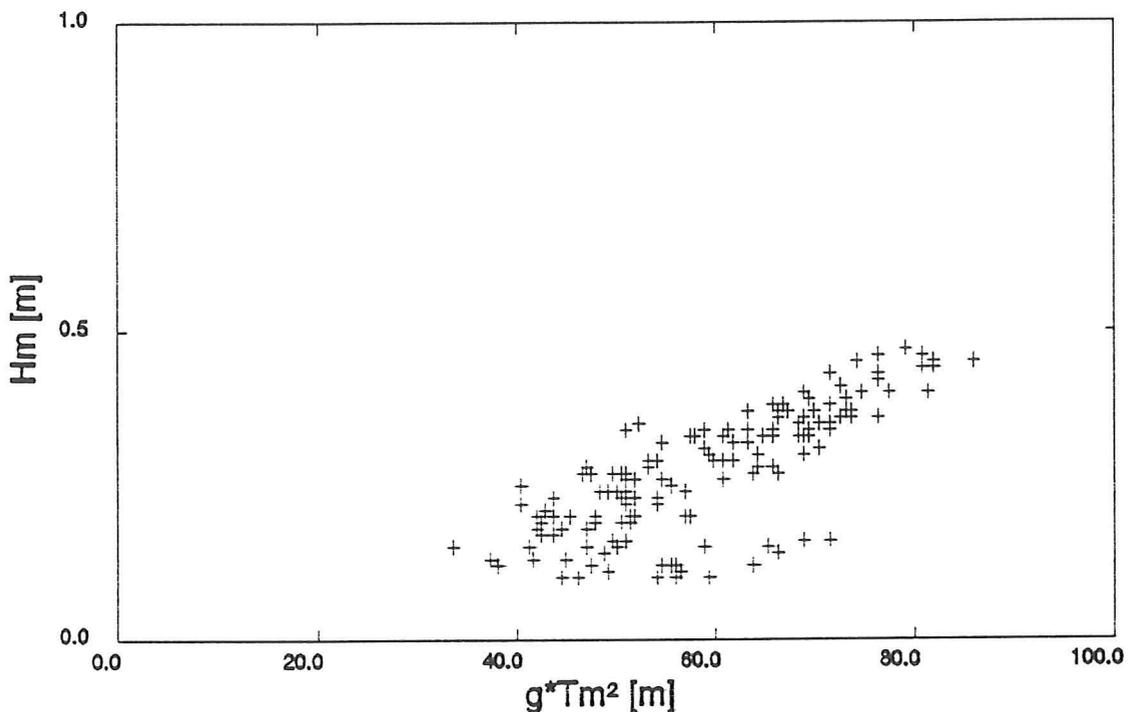


Abb. 35: Mittlere Wellensteilheiten; Cappelier Heller

und -perioden an der Station Holmer Siel, der - ebenso wie die Verhältniswerte von signifikanter und mittlerer Periode - auf einheitlich sich entwickelnden ortsständigen Seegang schließen läßt.

Die mittleren Wellensteilheiten im Tidebecken des Norderneyer Seegats (Tab. 3) weisen einige Meßorte, darunter hinsichtlich der Lage zum Seegat exponierte wie Norddeich oder Osterwarf (Abb. 4, 10 u. 33), nach der Klassifikation von SIEFERT [1974] als Übergangsbereich zwischen brandungsfreien und Randwatten aus. Aus der Kenntnis der Gegebenheiten sind alle diese Watten ebenso brandungsfrei wie der Meßort Osterwarf, der nach der Klassifikation einen Kennwert hat, der eine Einordnung zwischen brandungsfreiem Watt und Wattstrom beinhaltet.

Plausibel einzuordnen sind hingegen die Kennwerte für die Meßorte an der Wurster Küste (Tab. 3, Abb. 34 u. 35), wenn die Gegebenheit berücksichtigt wird, daß auf angrenzenden Deichvorländern die gleiche Seegangscharakteristik herrscht wie auf dem vorgelagerten Watt. Beide Meßorte sind als brandungsfreies Watt und sinngemäß als brandungsfreies Deichvorland zu klassifizieren. Hieraus ist abzuleiten, daß der Seegang vom Watt ungebrochen auf den Heller einschwingen

kann, was sicherlich auch durch den geringen Geländesprung zwischen Watt und dem Lahnungs-Vorland-Bereich begünstigt wird.

Die Bewertung der Wellensteilheiten als Merkmal für die Wechselwirkungen zwischen Seegang und Morphologie hat insgesamt gezeigt, daß damit wohl Interpretationshilfen gegeben sind, aber keine Prognosemöglichkeiten. Insbesondere bei inselgeschützten Watten, aber zum Teil auch für das Eiderästuar hätte eine ungeprüfte Anwendung der Kennwerte nach SIEFERT [1974] zu Fehlinterpretationen geführt. Es hat sich aber für die Meßorte im Nachbarbereich des Untersuchungsgebietes von SIEFERT [1974] gezeigt, daß die Zuordnungen dort zutreffend sind. Allerdings zeigt sich für diese Meßorte auch, daß die signifikante Wellensteilheit offenbar eine sensitivere Parametrisierung als die mittlere darstellt und weitergehendere Differenzierungen ermöglicht. Hieraus ist insgesamt zu schließen, daß die Einordnung morphologischer Wattcharakteristiken in der quantitativen Zuordnung von SIEFERT [1974] örtlich zuverlässig ist, aber nicht auf andere Gebiete übertragbar. Es bleibt aber festzuhalten, daß der Parameter Wellensteilheit eine wertvolle Interpretationshilfe für regionale Wechselwirkungen von Seegang und Morphologie darstellt. Möglicherweise lassen die zu erwartenden zuverlässigen flächenhaften Informationen aus durch Naturmessungen verifizierten mathematischen Modellen es zu, auf dieser Grundlage einfach zu handhabende Kennwerte für Prognosezwecke zukünftig festzulegen.

4.4 Windeinwirkungen

Die Ergebnisse des KFKI-Seegangsmeßprogramms Ostfriesische Inseln und Küste haben deutlich gemacht, daß - die bis dahin bestehende Auffassung - Wattseegang sei im wesentlichen ortsständige Windsee, nicht aufrecht zu erhalten ist [NIEMEYER 1983, 1984, 1987a, 1987b, 1991]. Diese Gegebenheit läßt sich mittelbar auch aus den Arbeiten von KRÜGER [1911, 1913, 1922] und SIEFERT [1974] ableiten. Es bleibt aber festzuhalten, daß keine endgültige Klarheit darüber besteht, welche Bedeutung die unterschiedlichen Erscheinungsformen des Seegangs - insbesondere in Wattgebieten mit längeren Windwirkwegen als die der ostfriesischen Watten - letztendlich haben. Die hier verfügbaren, umfangreichen Datensätze aus verschiedenartig strukturierten Wattgebieten der deutschen Nordseeküste bieten eine Grundlage, um dieser Fragestellung nachzugehen. Primäre Zielsetzung ist dabei nicht formale Zusammenhänge zu ermitteln, sondern aus der Korrelation von Parametern vertiefte Einblicke in die Physik der Vorgänge zu gewinnen.

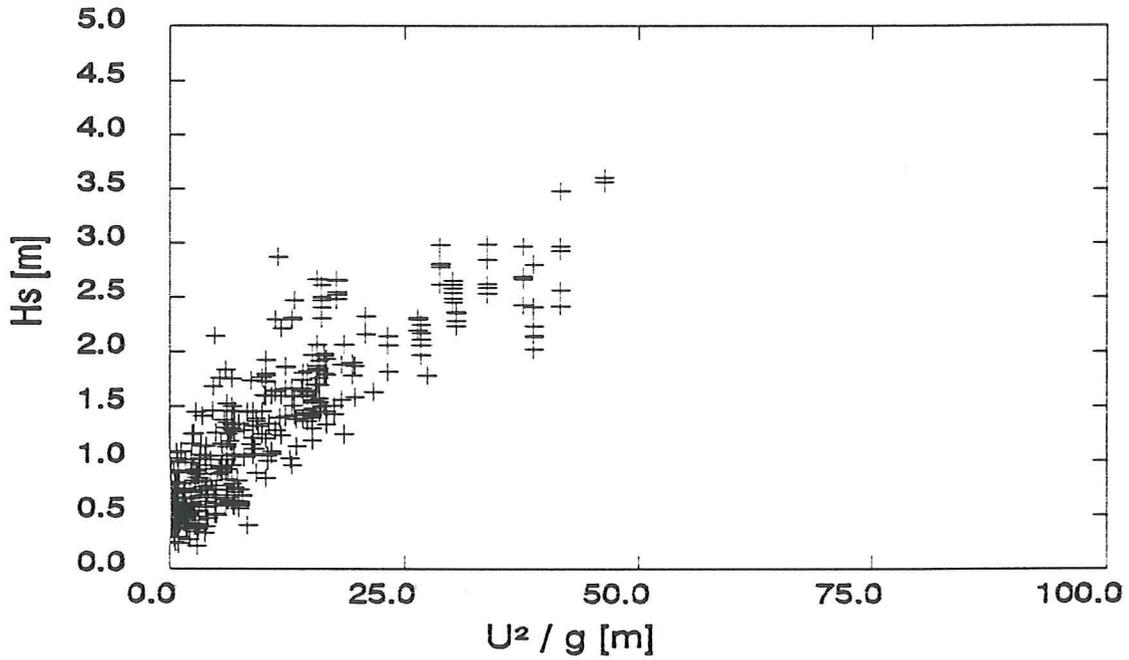


Abb. 36: Zusammenhang von signifikanten Wellenhöhen und Windgeschwindigkeiten; Süderhever

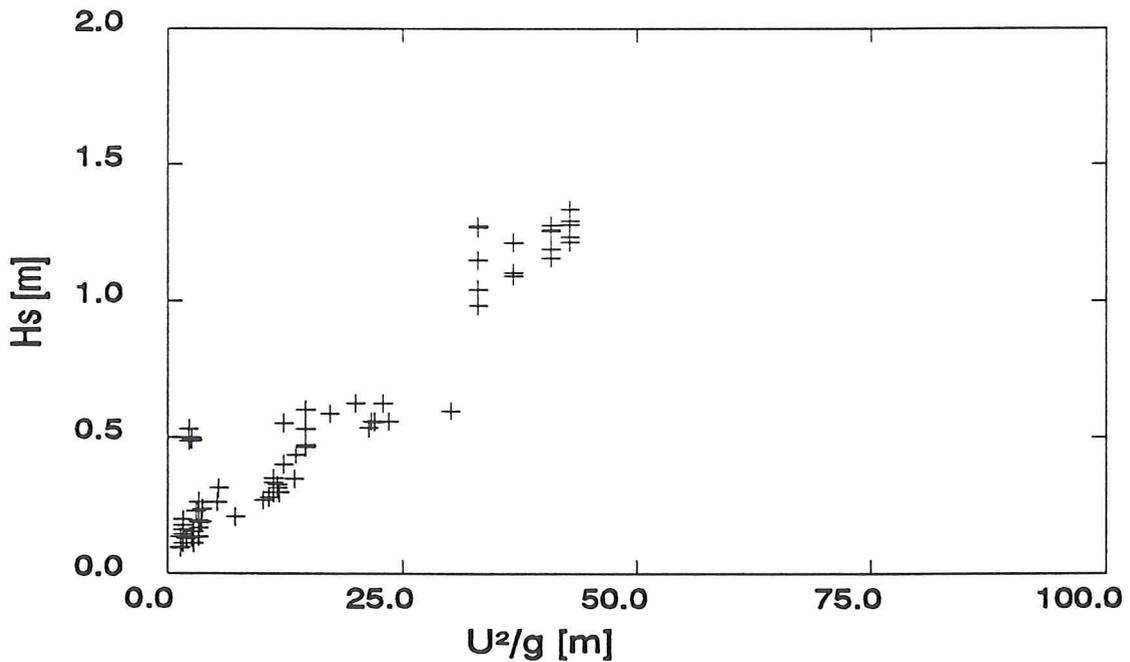


Abb. 37: Zusammenhang von signifikanten Wellenhöhen und Windgeschwindigkeiten; Purrenstrom

Die Bewertung der Ergebnisse ist allerdings mit einer enormen Schwierigkeit behaftet: Die Daten lassen nicht ohne weiteres den Schluß zu, in welchem Bereich, See- oder Wattengebiet, der gemessene Seegang angefacht worden ist. Insbesondere bei ausgeprägten Starkwind- und Sturmweatherlagen ist die Tendenz der Windentwicklung im See- und im Küstengebiet oft so gleichartig, daß die gemessenen Winddaten keine Differenzierungshilfe darstellen. Wattseegang weist in diesen Fällen einen Zusammenhang mit dem Küstengebiet gemessenen Wind auf, unabhängig davon, ob er im vorgelagerten Seegebiet oder ortsständig auf den Wattten angefacht worden ist. Eine Zuordnung von Perioden zur örtlichen Windentwicklung ist wegen des bei Dünung möglichen hohen Alters und entsprechender Laufstrecken und -zeiten ohnehin nicht sinnvoll. Zusammenhänge von örtlichem, quasi-synchronem Wind lassen sich sinnvoll nur für die höheren Anteile des Seegangsspektrums vornehmen [NIEMEYER 1983].

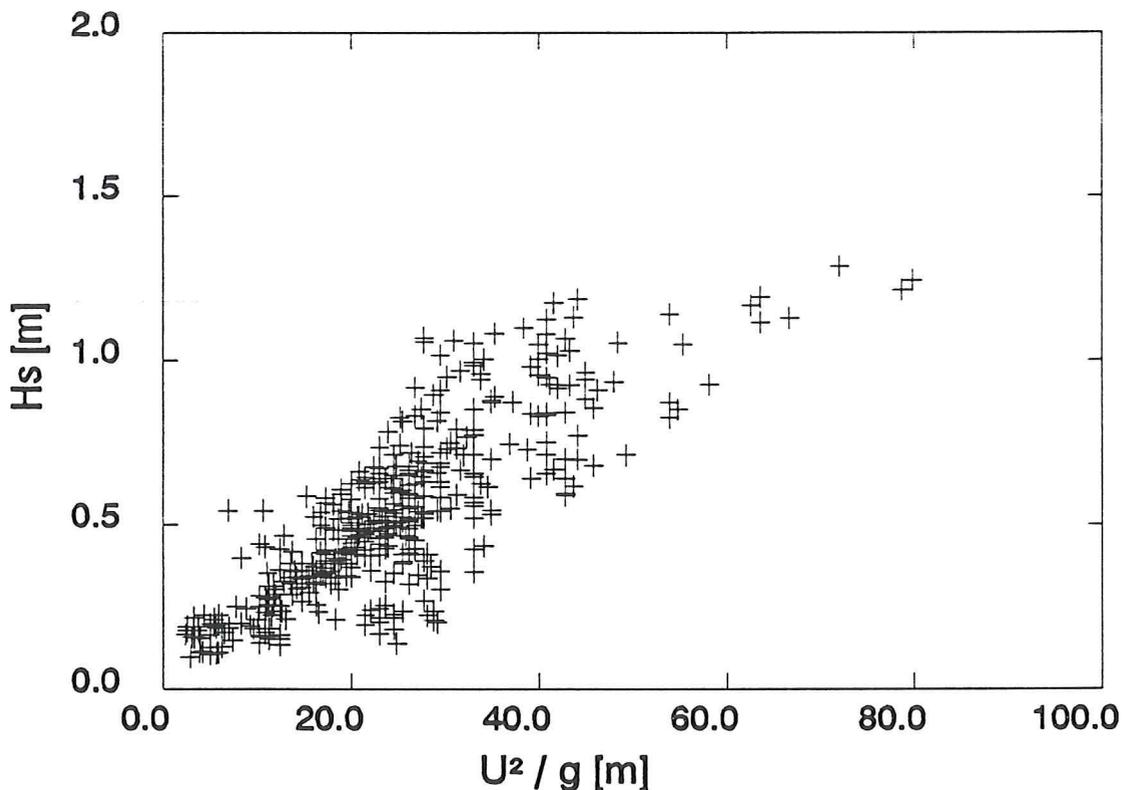


Abb. 38: Zusammenhang von signifikanten Wellenhöhen und Windgeschwindigkeiten; Eiderdamm

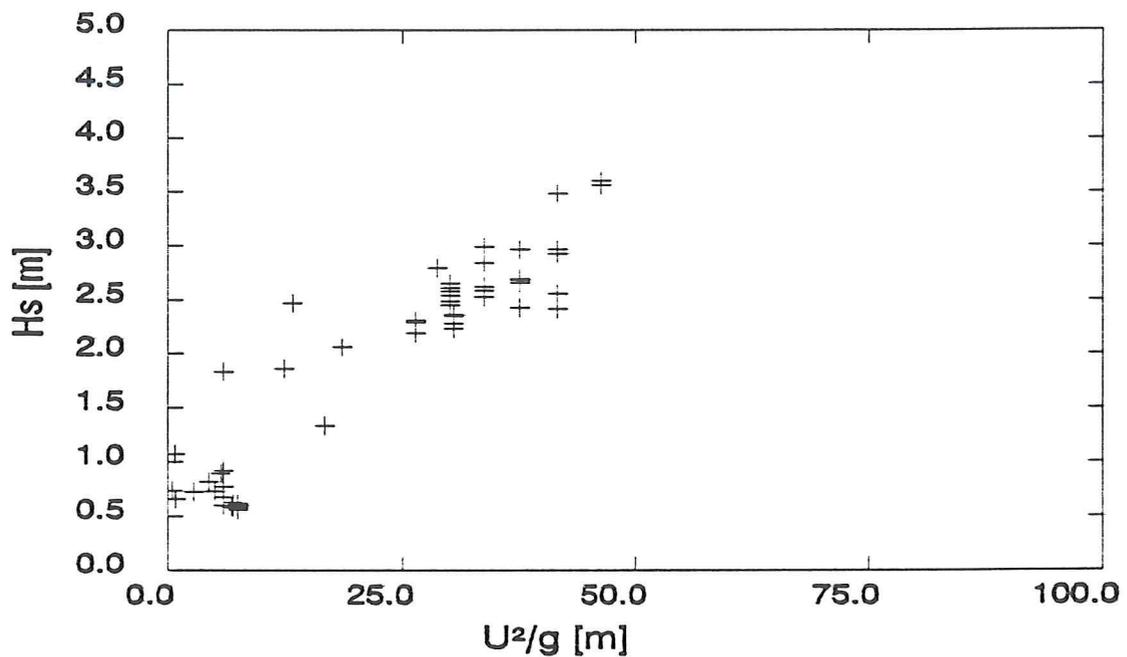


Abb. 39: Zusammensetzung von signifikanten Wellenhöhen und Windgeschwindigkeiten; Eiderdamm (Sektor der Windrichtungen 265 - 275 Grad)

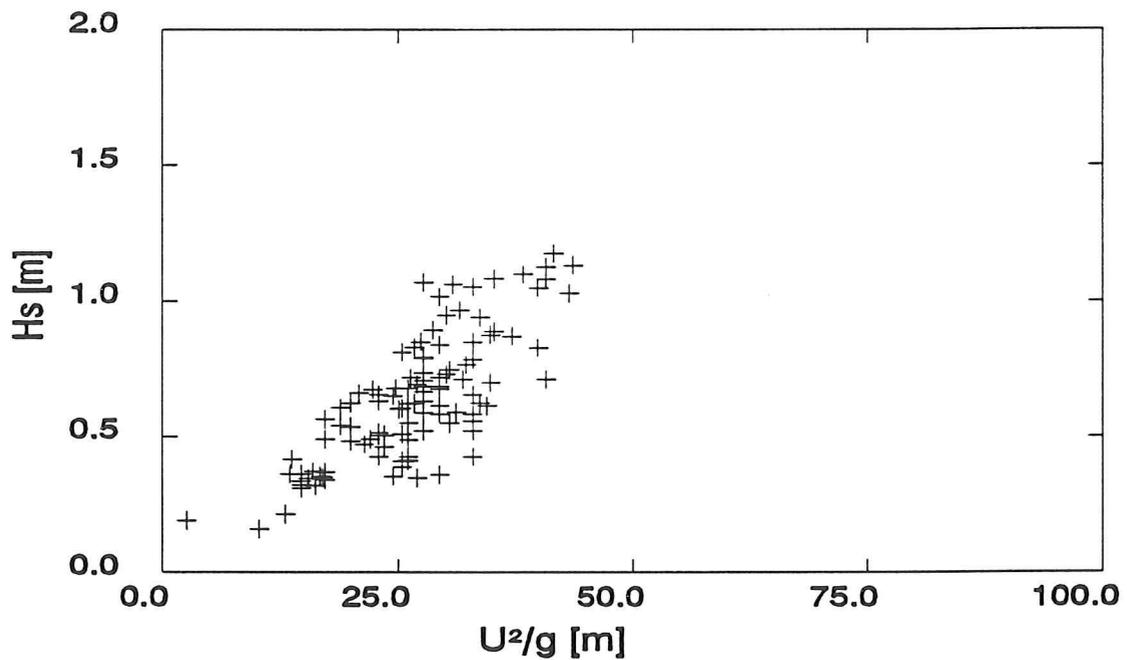


Abb. 40: Zusammensetzung von signifikanten Wellenhöhen und Windgeschwindigkeiten; Eiderdamm-Süd (Sektor der Windrichtungen 265 - 275 Grad)

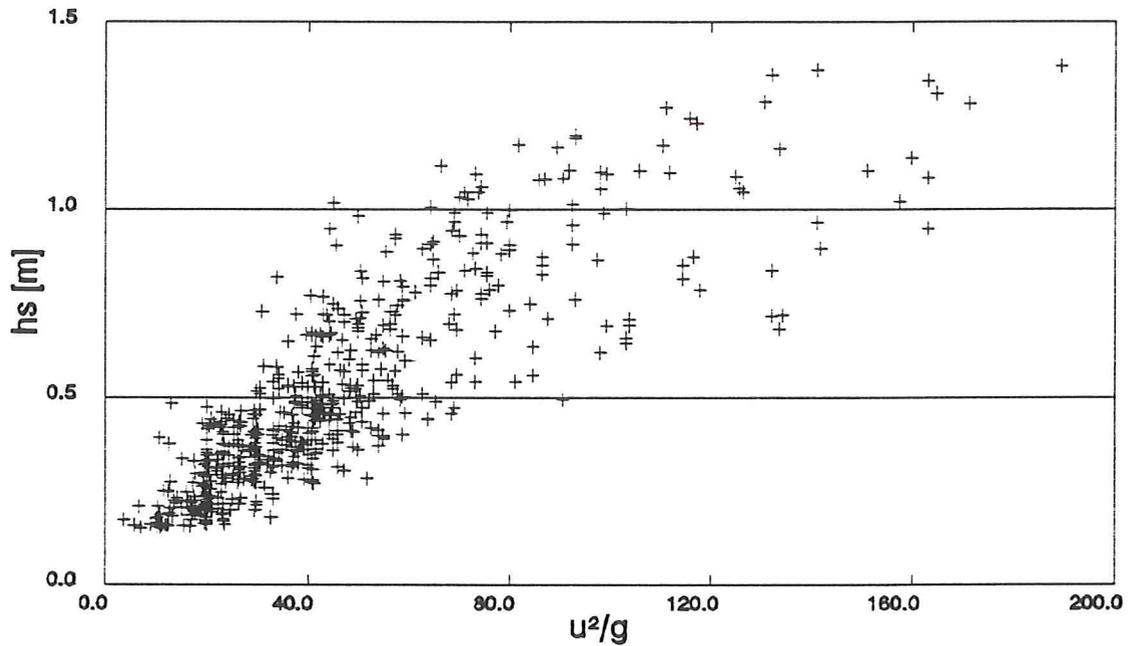


Abb. 41: Zusammenhang von signifikanten Wellenhöhen und Windgeschwindigkeiten; Struklahnungshörn

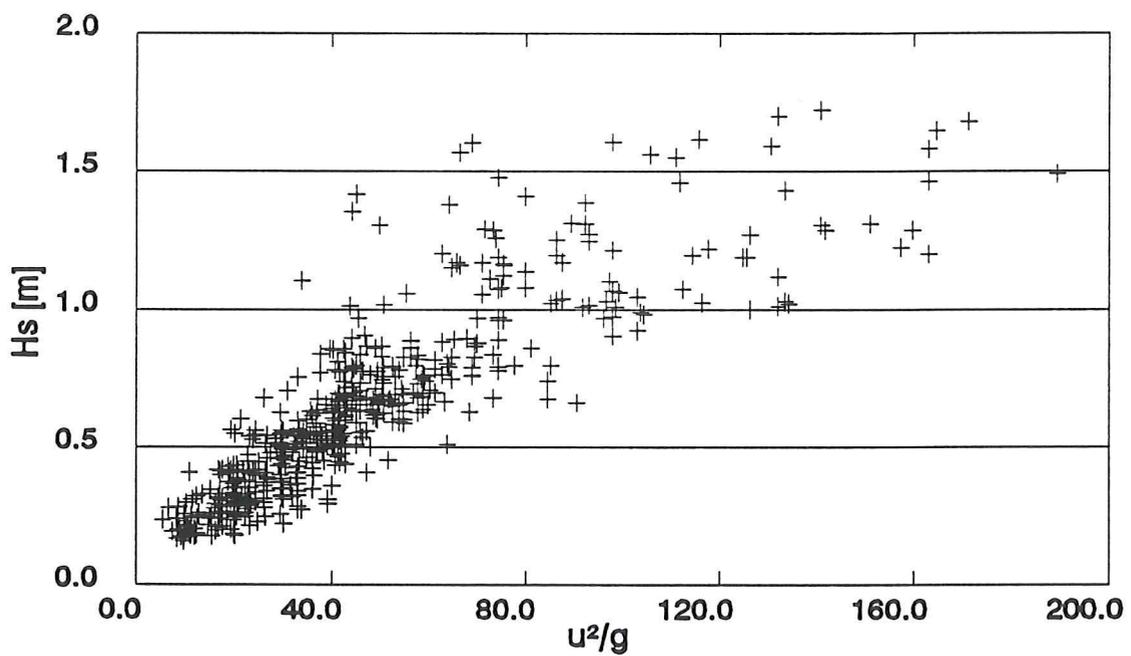


Abb. 42: Zusammenhang von signifikanten Wellenhöhen und Windgeschwindigkeiten; Holmersiel

Von daher erschien eine Orientierung an der Gesamtheit der Daten nicht unbedingt erfolgversprechend. Für die Stationen des Eiderästuars zeigt sich ein klarer tendenzieller Zusammenhang zwischen Wellenhöhen und Windgeschwindigkeiten (Abb. 36 - 38), wobei hinsichtlich der statistischen Qualität eine von außen nach binnen abnehmende Tendenz besteht. Es bleibt aber festzuhalten, daß auch für die Stationen Purrenstrom und Eiderdamm der tendenzielle Zusammenhang von Wellenhöhen und Windgeschwindigkeiten ausgeprägt ist. Auch aus der isolierten Betrachtung der Daten für Windrichtungen eines engen Sektors von 10° (Abb. 39 u. 40) lassen sich keine weitergehenden Erkenntnisse gewinnen. Da für einen so engen Windrichtungssektor gleichartige Entwicklungs- und Ausbreitungsbedingungen des Seegangs sowohl im Küstenvorfeld als auch im Küstengebiet selbst vorliegen, wäre ein engerer Zusammenhang zwischen Wellenhöhen und Windgeschwindigkeiten zu vermuten gewesen. Für die Station Süderhever ist ein Teil der Abweichungen eindeutig auf hohe Dünung zurückzuführen (Abb. 39). Weiterhin bleibt fraglich, ob der am Festland gemessene Wind hinreichend repräsentativ für das Seegebiet ist. Am Eiderdamm sind für gleiche Größenordnungen der Windgeschwindigkeiten Schwankungsbreiten der signifikanten Wellenhöhen bis zu etwa 0,7 m möglich (Abb. 40), was auf den Einfluß der Wasserstandsunterschiede auf den Seegang zurückzuführen ist.

Ähnliche Zusammenhänge ergeben sich für die Stationen Strucklahnungshörn und Holmer Siel im Einzugsgebiet der Hever (Abb. 41 u. 42), wobei die Streuungen mit wachsenden Windgeschwindigkeiten zunehmen. Es hat allerdings den Anschein, daß bei Erreichen bestimmter Grenzbereiche der signifikanten Wellenhöhen die zusätzliche Wirksamkeit höherer Windgeschwindigkeiten vernachlässigbar wird.

An der Station Everschopsiel-Ost und insbesondere an der Station Everschopsiel-West stellen sich die Verhältnisse hingegen noch anders dar (Abb. 43 u. 44): Ein tendenzieller Zusammenhang zwischen Windgeschwindigkeiten und Seegang besteht naturgemäß auch hier, wenngleich mit sehr schwacher Ausprägung. Wellenhöhen gleicher Größenordnung lassen sich Geschwindigkeitsbereichen zuordnen, deren Minimum und Maximum eine Differenz von etwa 20 m/s aufweisen. Im Bereich dieser Meßorte wird die Höhenentwicklung des Seegangs offensichtlich dominant von den Wassertiefen auf den vorgelagerten Watten und am Ort selbst bestimmt. Auch die isolierte Betrachtung von Datensätzen für einen engen Windsektor von 10° , die hier beispielhaft für die Meßorte Everschopsiel-Ost und Strucklahnungshörn wiedergegeben wird (Abb. 45 u. 46), läßt keine anderen Schlüsse zu.

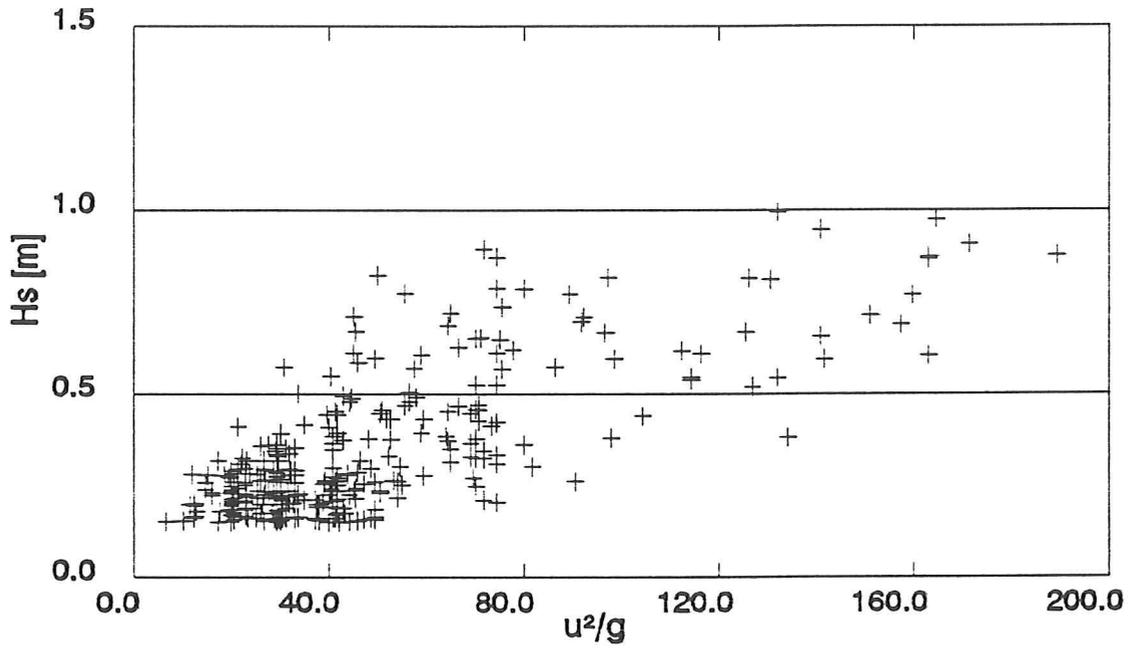


Abb. 43: Zusammenhang von signifikanten Wellenhöhen und Windgeschwindigkeiten; Everschopsiel Ost

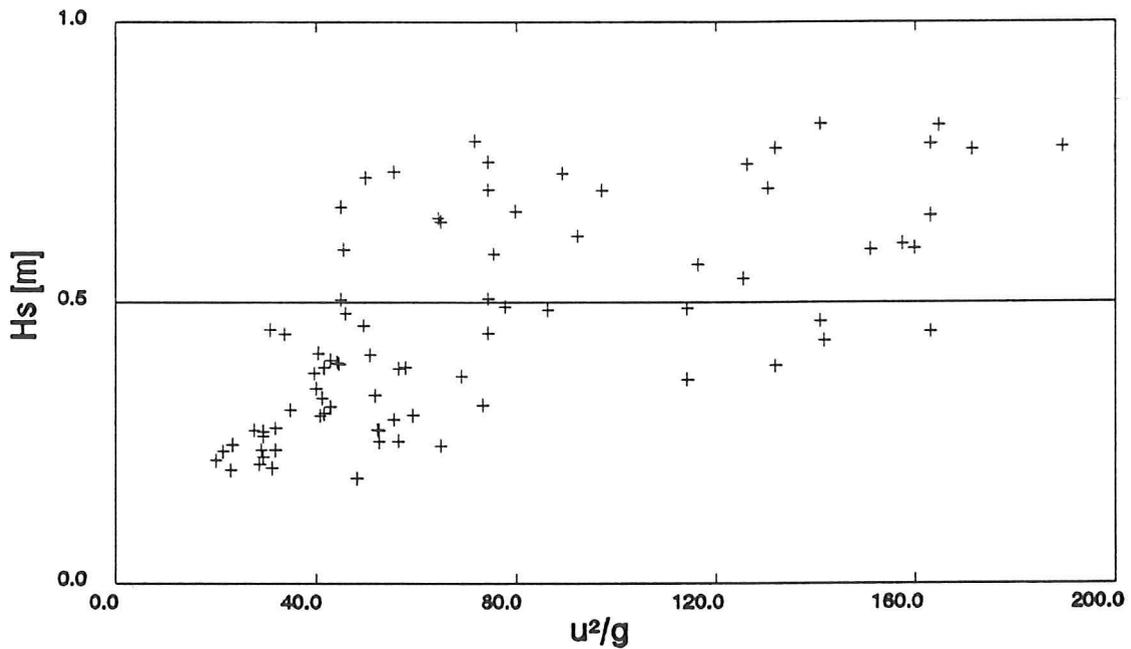


Abb. 44: Zusammenhang von signifikanten Wellenhöhen und Windgeschwindigkeiten; Everschopsiel West

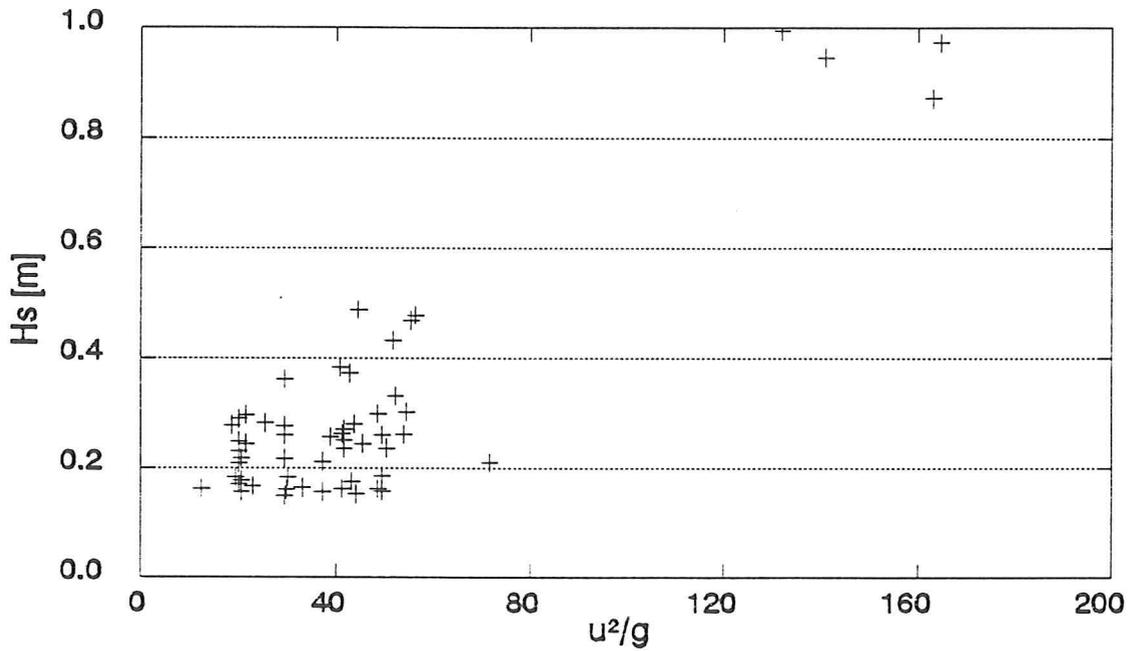


Abb. 45: Zusammenhang von signifikanten Wellenhöhen und Windgeschwindigkeiten; Everschopsiel Ost (Sektor der Windgeschwindigkeiten 265-275°)

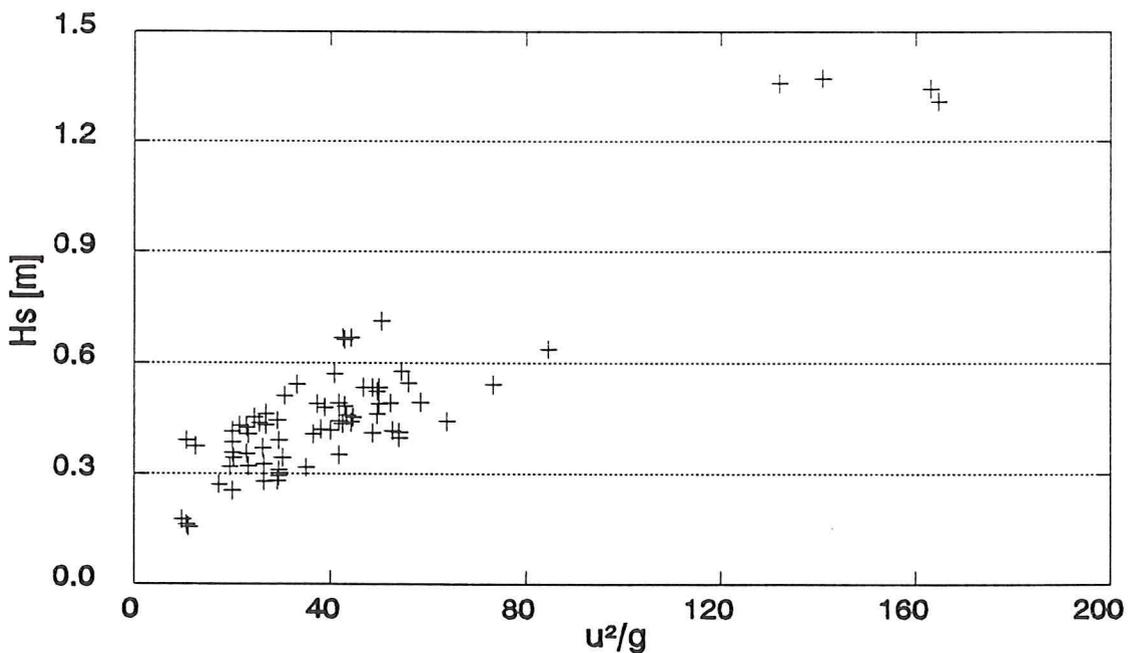


Abb. 46: Zusammenhang von signifikanten Wellenhöhen und Windgeschwindigkeiten; Strucklahnungshörn (Sektor der Windgeschwindigkeiten 265 - 275°)

Die Ergebnisse lassen insgesamt erkennen, daß die Entwicklungs- und Ausbreitungsbedingungen im Tidebecken der Hever uneinheitlich sind. Es muß daher davon ausgegangen werden, daß innerhalb dieses Untersuchungsgebietes der örtlich maßgebliche Seegang durch unterschiedliche Erscheinungsformen gekennzeichnet ist. Auf jeden Fall sind die Untersuchungsergebnisse von FÜHRBÖTER [1988] zur Herleitung eines Bemessungsseegangs für Teilbereiche des Tidebeckens der Hever als nicht zutreffend anzusehen, da hierbei von einem wesentlich stärkeren Anwachsen der Wellenhöhen mit der Windgeschwindigkeit ausgegangen worden ist.

Windgeschwindigkeiten und Wellenhöhen sind auf dem Capper Watt noch weniger korreliert als im Tidebecken der Hever (Abb. 47). Selbst hohen Windgeschwindigkeiten ist eine erhebliche Bandbreite signifikanter Wellenhöhen zuzuordnen und selbst relativ geringen Windgeschwindigkeiten relativ hohe Wellenhöhen. Aus der letztgenannten Gegebenheit kann geschlossen werden, daß auf dem Wurster Watt nicht nur örtliche Windsee von Bedeutung ist, sondern daß hierhin - bei entsprechenden Wasserständen - durchaus auch hohe Dünung gelangen kann.

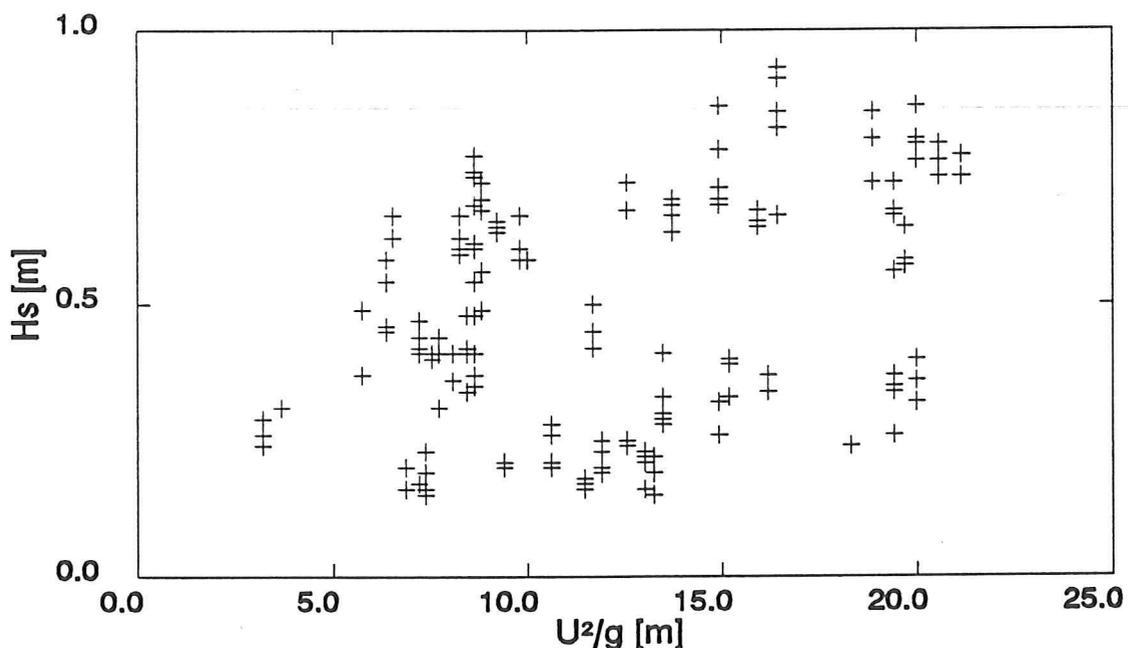


Abb. 47: Zusammenhang von signifikanten Wellenhöhen und Windgeschwindigkeiten; Capper Watt

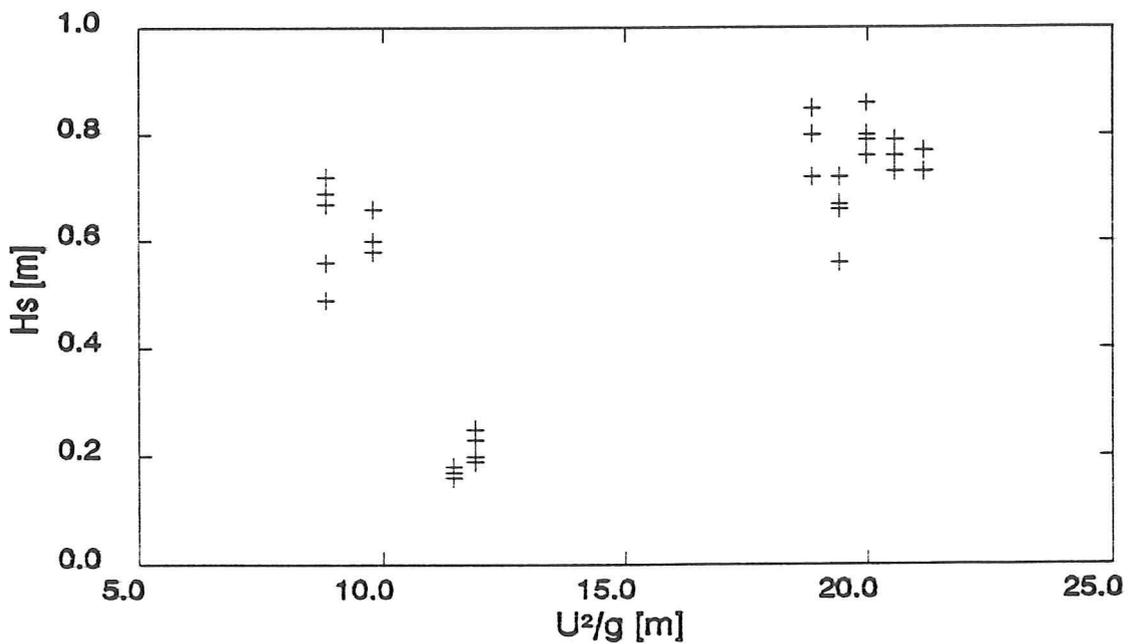


Abb. 48: Zusammenhang von signifikanten Wellenhöhen und Windgeschwindigkeiten; Capper Tief Kan1 (245 - 255°)

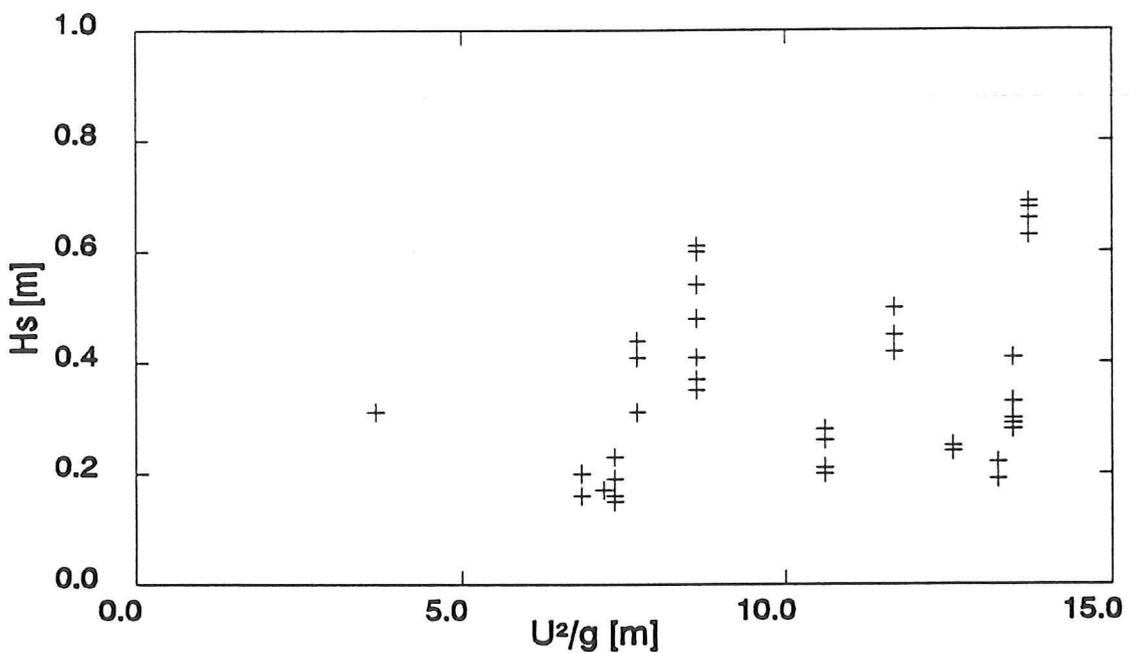


Abb. 49: Zusammenhang von signifikanten Wellenhöhen und Windgeschw. Capper Tief Kan1 (280 - 293°)

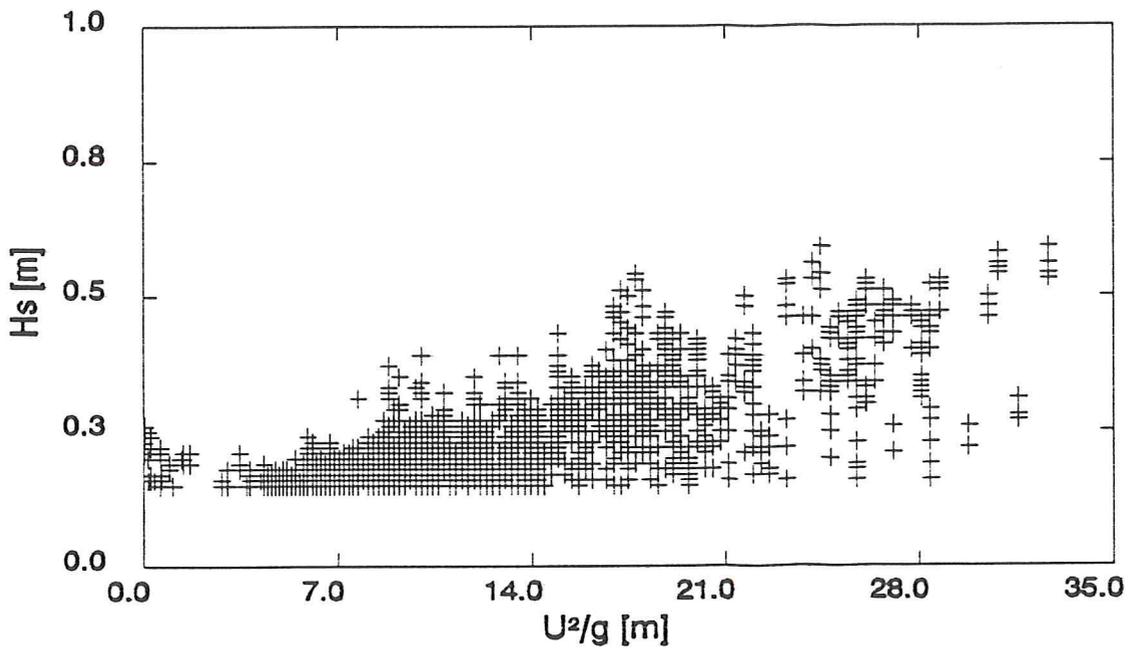


Abb. 50: Zusammenhang von signifikanten Wellenhöhen und Windgeschwindigkeiten; Grohde Deich

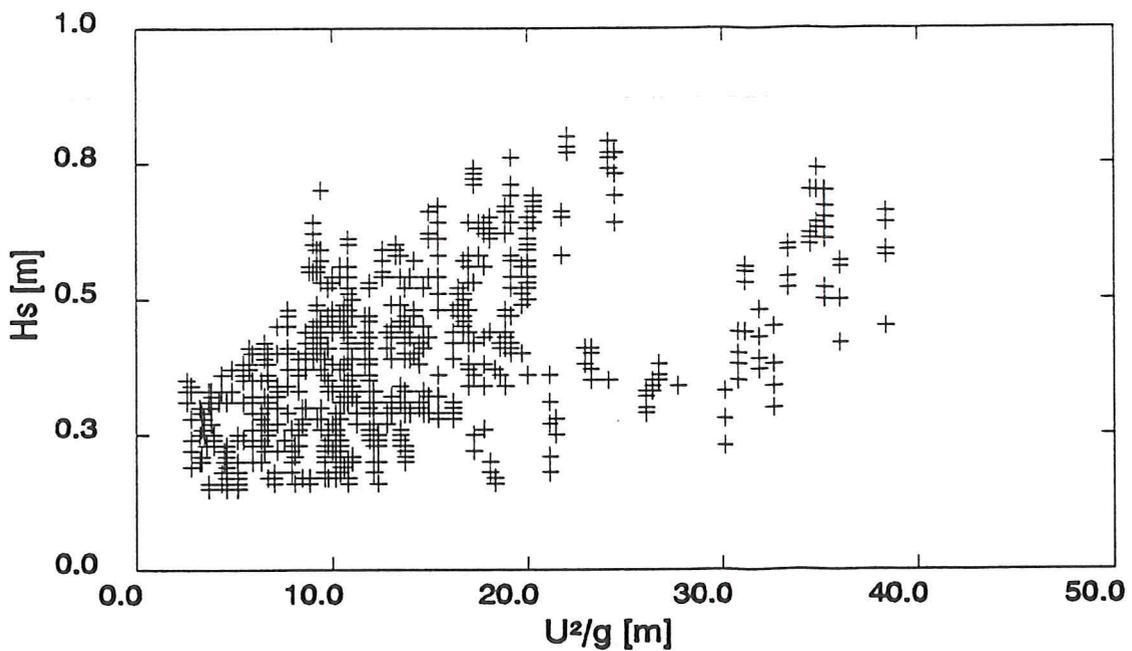


Abb. 51: Zusammenhang von signifikanten Wellenhöhen und Windgeschwindigkeiten; Osterwarf

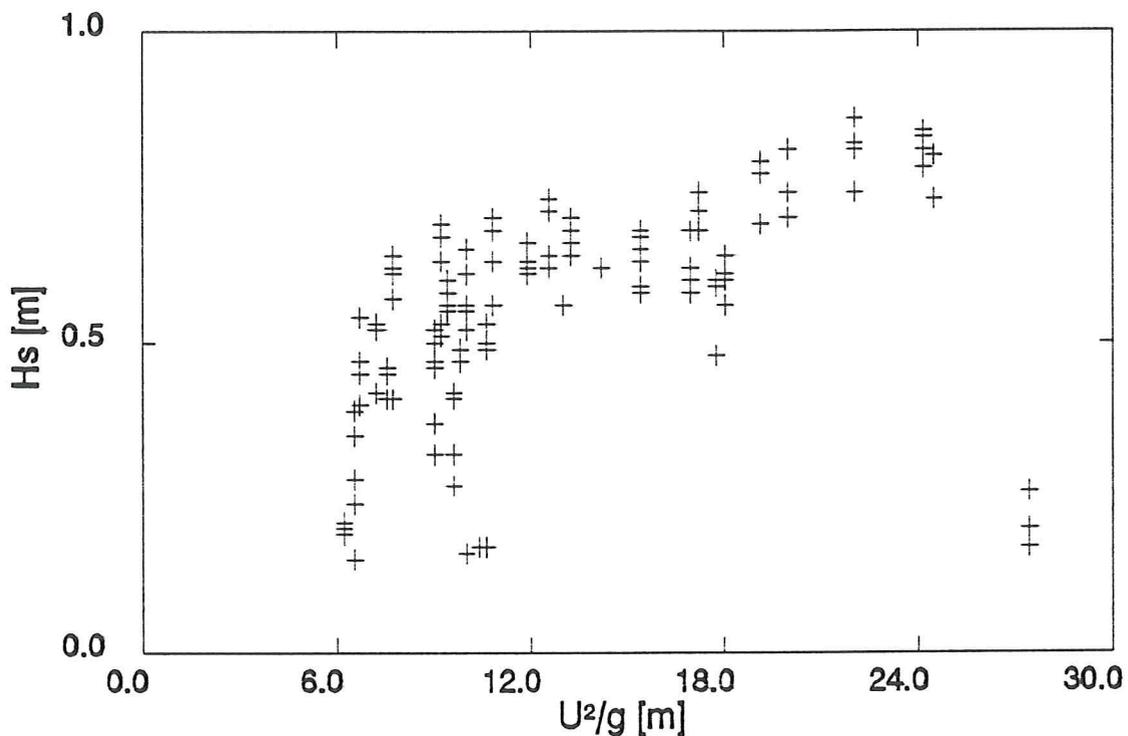


Abb. 52: Zusammenhang von signifikanten Wellenhöhen und Windgeschwindigkeiten; Norddeich

Um hinsichtlich der Wirksamkeit des Windes zu näheren Erkenntnissen zu gelangen, wurden die Daten separiert, die jeweils einem engen Sektor von 10° und 13° der aufländiger Windrichtungen zuzuordnen sind (Abb. 48 u. 49). Für beide untersuchte Fälle zeigte sich, daß die Wellenhöhenentwicklung an der Wurster Küste kaum Zusammenhänge mit der Höhe der Windgeschwindigkeiten aufweist. Hieraus kann geschlossen werden, daß der den Seegang erzeugende Wind zwar im seewärtigen Vorfeld der Meßorte für dessen Höhenentwicklung bestimmend ist, nicht aber im Fortpflanzungsbereich bis zum Meßort. Hier ist offensichtlich eine andere Randbedingung primär bestimmend.

Die unmittelbaren Zusammenhänge zwischen Windgeschwindigkeiten und signifikanten Wellenhöhen weisen im Einzugsgebiet des Norderneyer Seegats erhebliche Unterschiede in Abhängigkeit von der Lage des Meßortes auf. Für die bei aufländigem Wind in Insellee von Norderney liegende Station Grohde läßt sich zwar eine grundsätzliche Tendenz zu mit der Windgeschwindigkeit wachsenden Wellenhöhen erkennen, doch die - im Bereich hoher Geschwindigkeiten zunehmende - hohe Bandbreite möglicher Wellenhöhen für gleich hohe Geschwindigkeiten zeigt an (Abb. 50), daß hier sehr unterschiedliche Randbedingungen für die Entwicklung und Ausbreitung von Seegang bestehen. Ein strukturiertes Bild bieten dieselben

Parameter für die Station Osterwarf (Abb. 51), für die im Bereich unterer und mittlerer Windgeschwindigkeiten ein tendenzieller Zusammenhang mit den signifikanten Wellenhöhen erkennbar wird, der allerdings durch starke Streuungen überlagert wird. An der Station Norddeich ist hingegen oberhalb eines Schwellenwertes von etwa 10 m/s eine - allerdings uneinheitliche - Tendenz zunehmender Wellenhöhen mit wachsenden Windgeschwindigkeiten feststellbar (Abb. 52). Auch an der Meßstation Ostfriesisches Wattenmeer, die zentral im Seegat am Rande von Großformen des Flutdeltas liegt (Abb. 4 u. 10), ist ein - wenngleich stark uneinheitlicher - tendenzieller Zusammenhang zwischen Windstärken und Wellenhöhen erkennbar (Abb. 53). Die Streuungen sind aber sowohl aufgrund der wesentlichen Unterschiede in der Länge der Windwirkwege als auch der erheblichen Wirkung der örtlichen Wasserstandsveränderungen erklärbar.

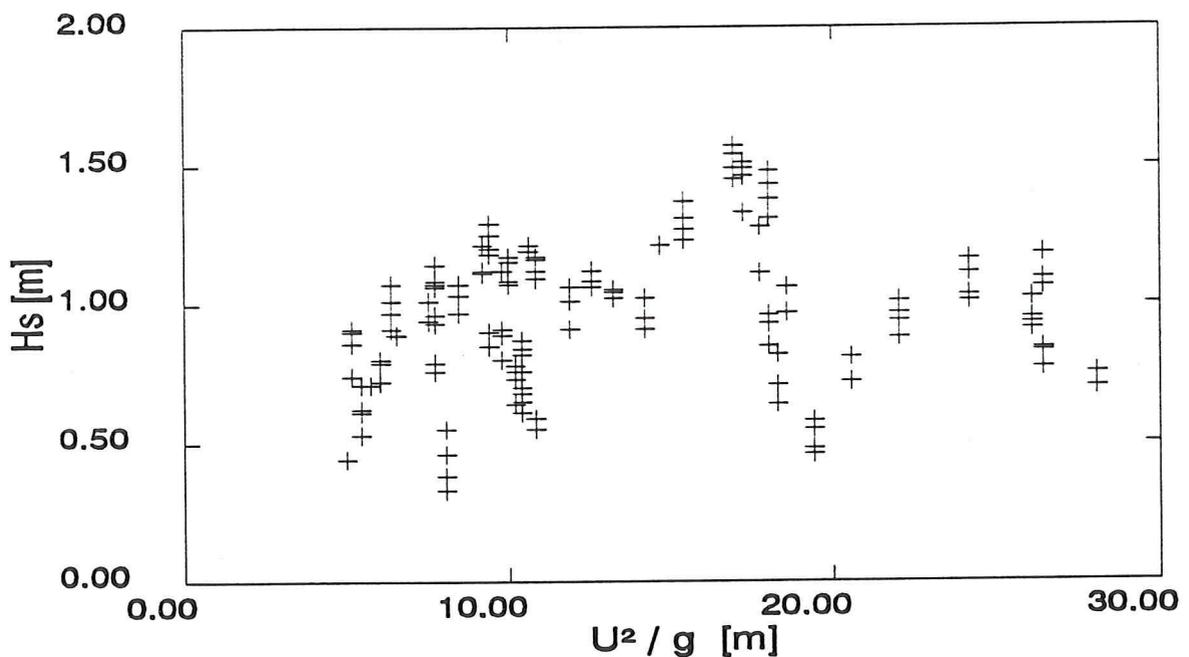


Abb. 53: Zusammenhang von signifikanten Wellenhöhen und Windgeschwindigkeiten; Meß-Station O.W.

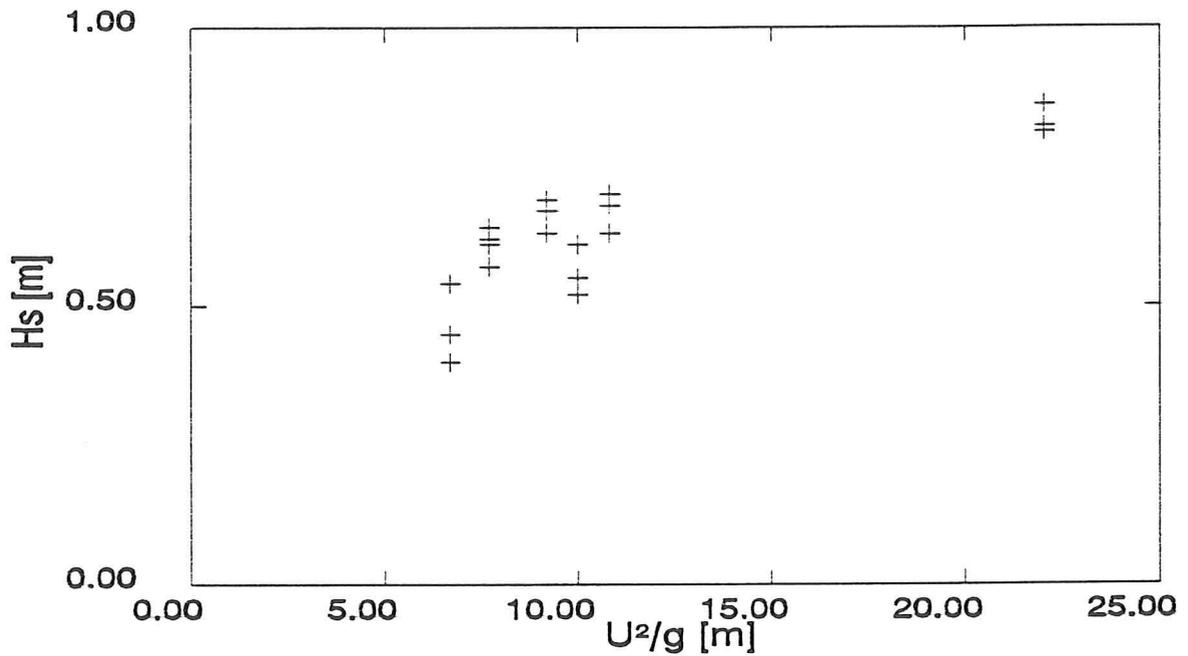


Abb. 54: Zusammenhang von signifikanten Wellenhöhen und Windgeschwindigkeiten; Norddeich (Sektor der Windrichtungen 290 - 297°)

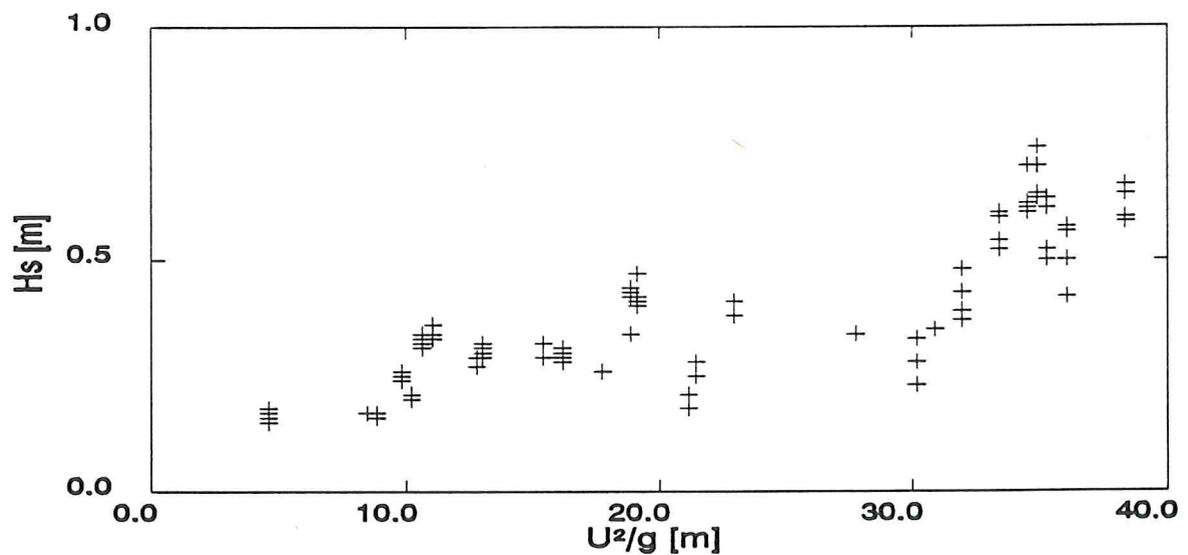


Abb. 55: Zusammenhang von signifikanten Wellenhöhen und Windgeschwindigkeiten; Osterwarf (Sektor der Windrichtungen 240 - 250°)

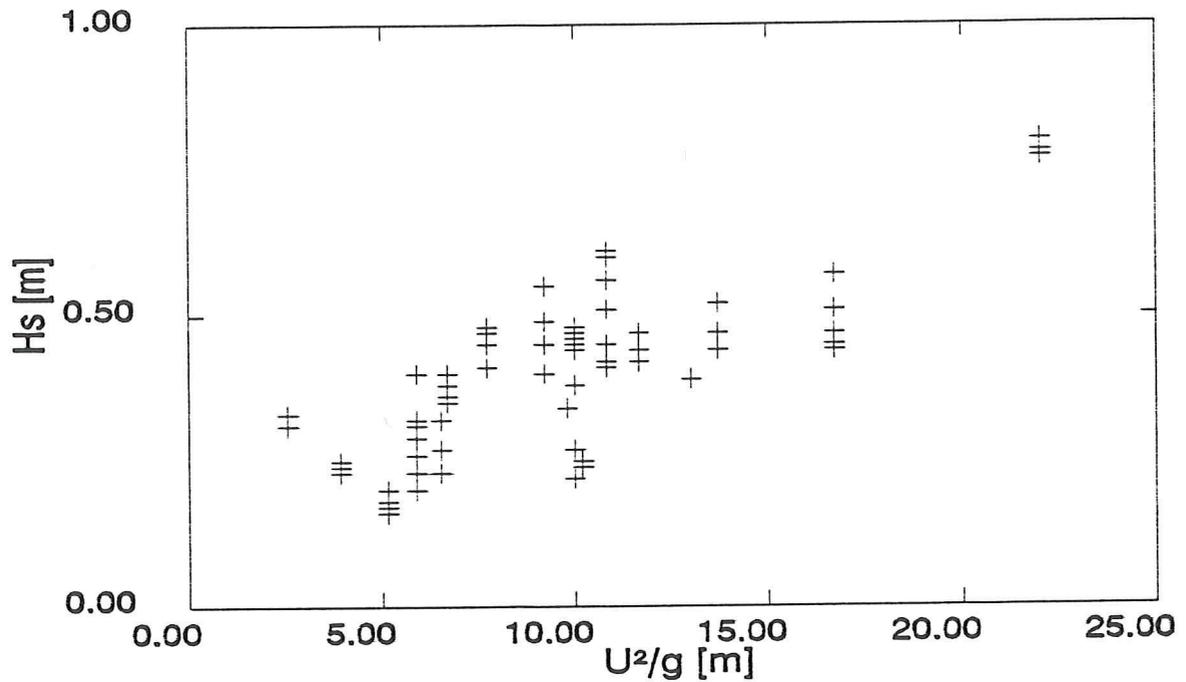


Abb. 56: Zusammenhang von signifikanten Wellenhöhen und Windgeschwindigkeiten; Osterwarf (Sektor der Windrichtungen 290 - 298°)

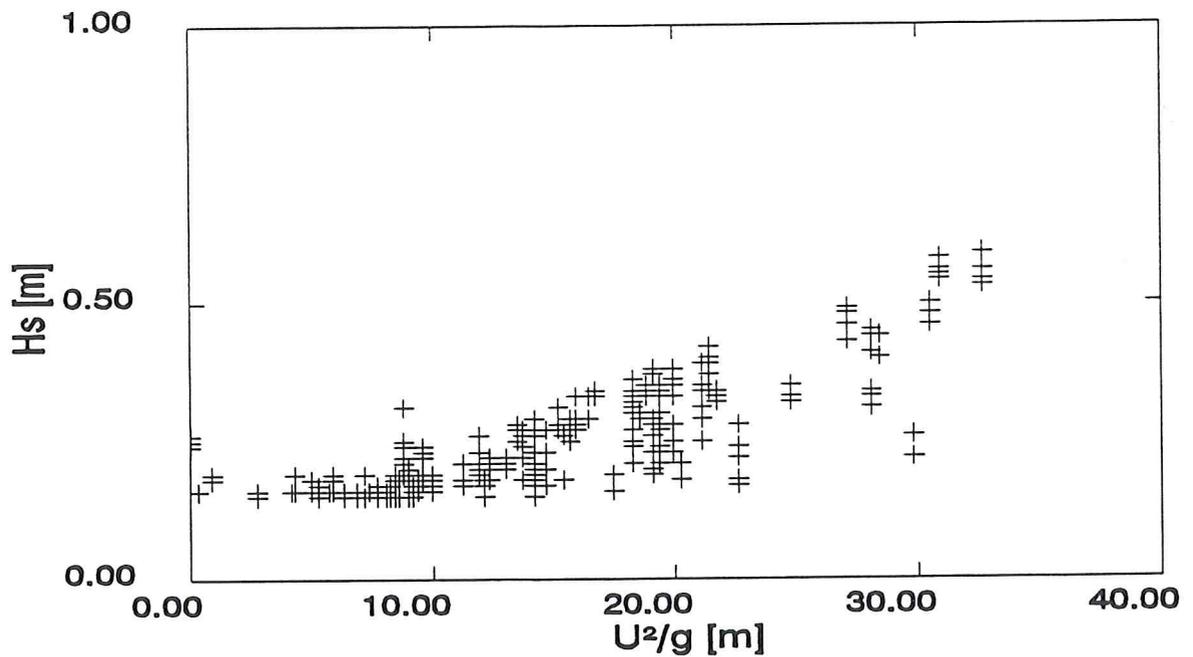


Abb. 57: Zusammenhang von signifikanten Wellenhöhen und Windgeschwindigkeiten; Grohde Deich (Sektor der Windrichtungen 237 - 247°)

Eine separate Betrachtung des Zusammenhangs von Wellenhöhen und Windgeschwindigkeiten für einen engen Sektor mit gleichen Entwicklungsbedingungen für den Seegang erbringt für die Station Norddeich eine Verdeutlichung des Zusammenhangs (Abb. 54), obwohl der Meßort bei diesem Sektor in Lee der Leitdämme des Hafens Norddeich liegt. Eine Reststreuung der signifikanten Wellenhöhen bleibt aber für alle gemessenen Windgeschwindigkeiten erhalten. Auch für die Station Osterwarf ist eine Separierung von Daten für zwei Sektoren vorgenommen worden (Abb. 55 u. 56). In einem Fall für den nahezu deichparallelen Sektor von 240° bis 250° und im anderen für den aufländig gerichteten von 290° bis 298° . Entgegen den Erwartungen lassen sich aber auch hieraus keine endgültigen Schlußfolgerungen ziehen, da selbst die grundsätzliche Tendenz wachsender Wellenhöhen bei zunehmender Windgeschwindigkeit uneinheitlich ist und von erheblichen Streuungen überlagert wird. Überraschenderweise sind die Ergebnisse für die Station Grohde Polder aussagekräftiger (Abb. 57): Bei Windrichtungen aus dem Sektor 237° bis 247° , einer typischen Randbedingung für ortsständige Windsee, lassen sich oberhalb eines Schwellenwertes von

$$u \geq 10 \text{ m/s}$$

die Grenzwerte der signifikanten Wellenhöhe eindeutig dem auf die Konstante der Erdbeschleunigung bezogenen Quadrat der Windgeschwindigkeit zuordnen. Hiermit ist für diesen Bereich eine klare Bestimmung maximal möglicher signifikanter Wellenhöhen für örtliche Windsee möglich, zumal davon ausgegangen werden kann, daß für diese Randbedingungen staubedingte Wasserstandserhöhungen und Seegangsbildung den gleichen Entwicklungsbedingungen unterliegen. Hinsichtlich der Bemessung wattseitiger Seedeiche bleibt unklar, ob bei Sturmfluten aus der Nordsee einschwingender Seegang höhere Werte annehmen kann.

4.5 Seegang, Stau und Sunk

Der Zusammenhang von Wasserständen und Wattseegang ist elementar und trivial. Die Ausbreitung von Seegang in den amphibischen Bereichen ist nur in den Phasen der vom Tidezyklus bestimmten Überflutungen möglich. Ebenso trivial erscheint bei erster Prüfung der Zusammenhang von Stau oder Sunk mit der Ausbildung von Wattseegang. Stau und Sunk werden zumeist durch denselben Wind bewirkt, der auch den Seegang anfacht. Insofern würde der Zusammenhang zwischen zwei verschiedenen Effekten derselben Ursache geprüft. Hierzu ist aber anzumerken, daß Stau und Sunk in vielen Fällen teilweise oder in seltenen vollständig [GAYE & WALTHER 1934] durch Luftdruckschwankungen bewirkt werden können. Ebenso ist hier das Phänomen der Fernwellen [KOOPMANN 1962] als Ursache von Wasserstandserhöhungen einzubeziehen, die unabhängig vom regionalen Windfeld auftreten können. Auch hinsichtlich der Windeinwirkungen können Unterschiede bestehen, da für die Ausbildung von Stau und Sunk andere Windfelder erforderlich sind als für die von Seegang und insbesondere von örtlicher Windsee. Von daher erscheint sinnvoll die hier verfügbaren Datensätze exemplarisch darauf zu überprüfen, ob Stau und Sunk die Ausbreitung des Seegangs auf Watten besonders beeinflussen.

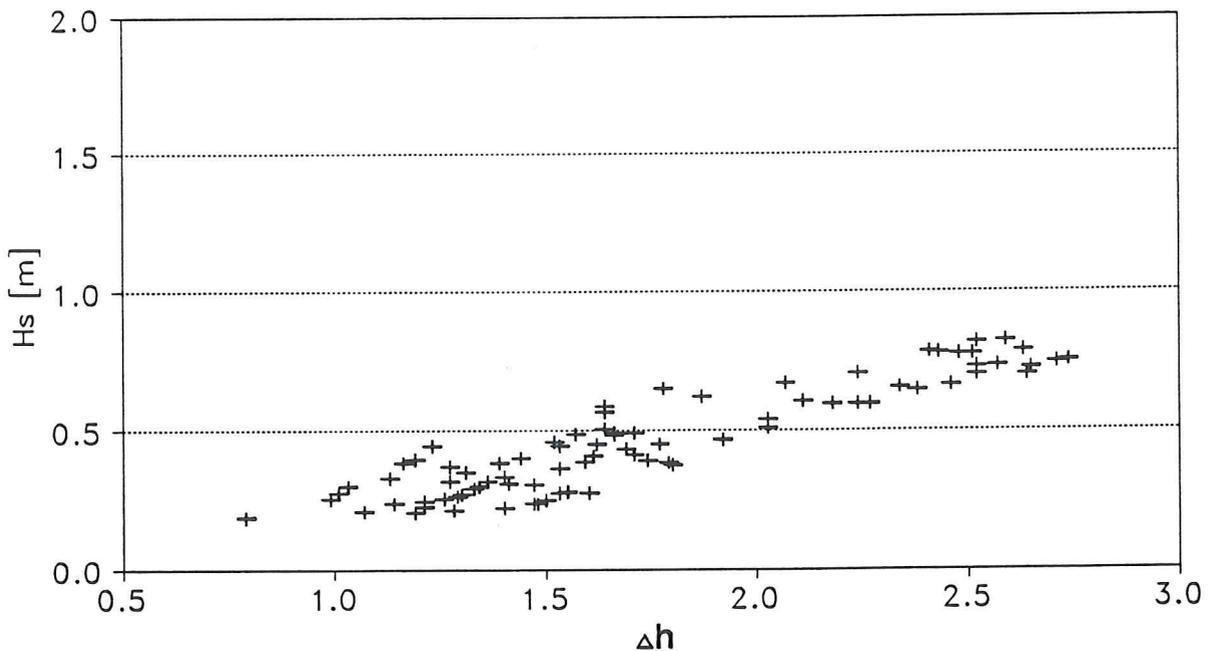


Abb. 58: Zusammenhang von signifikanten Wellenhöhen mit Sunk und Stau; Everschopsiel West

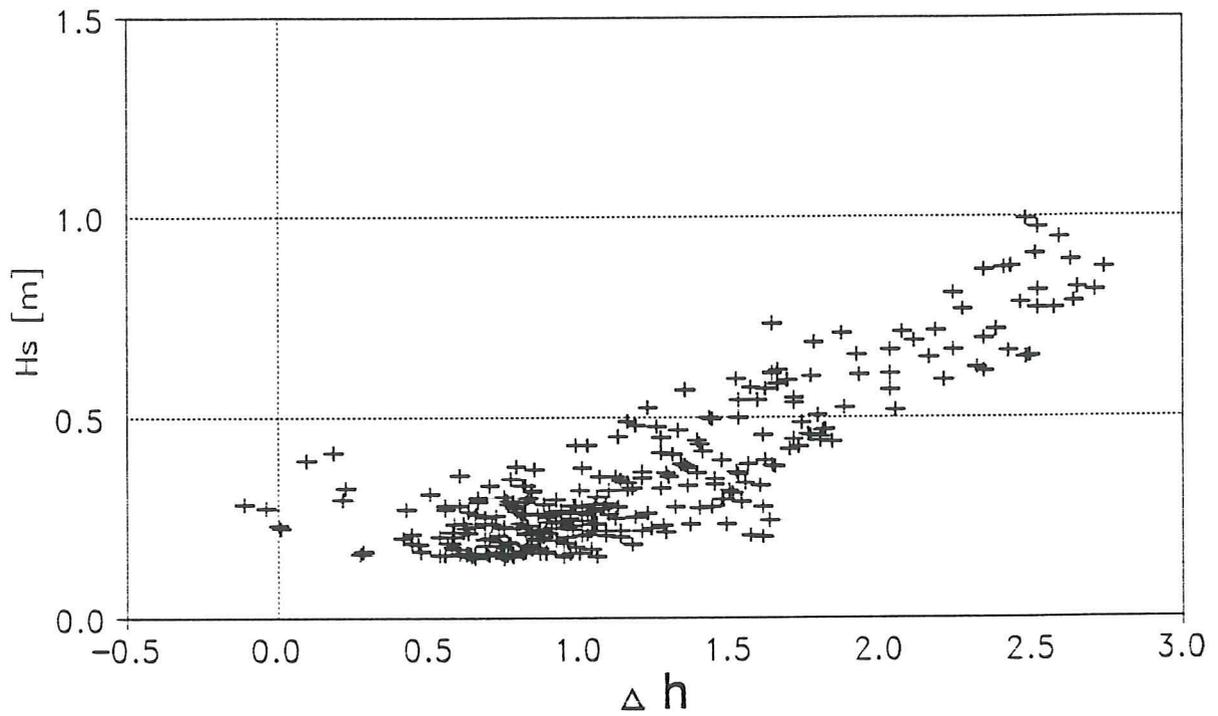


Abb. 59: Zusammenhang von signifikanten Wellenhöhen mit Sunk und Stau; Everschopsiel Ost

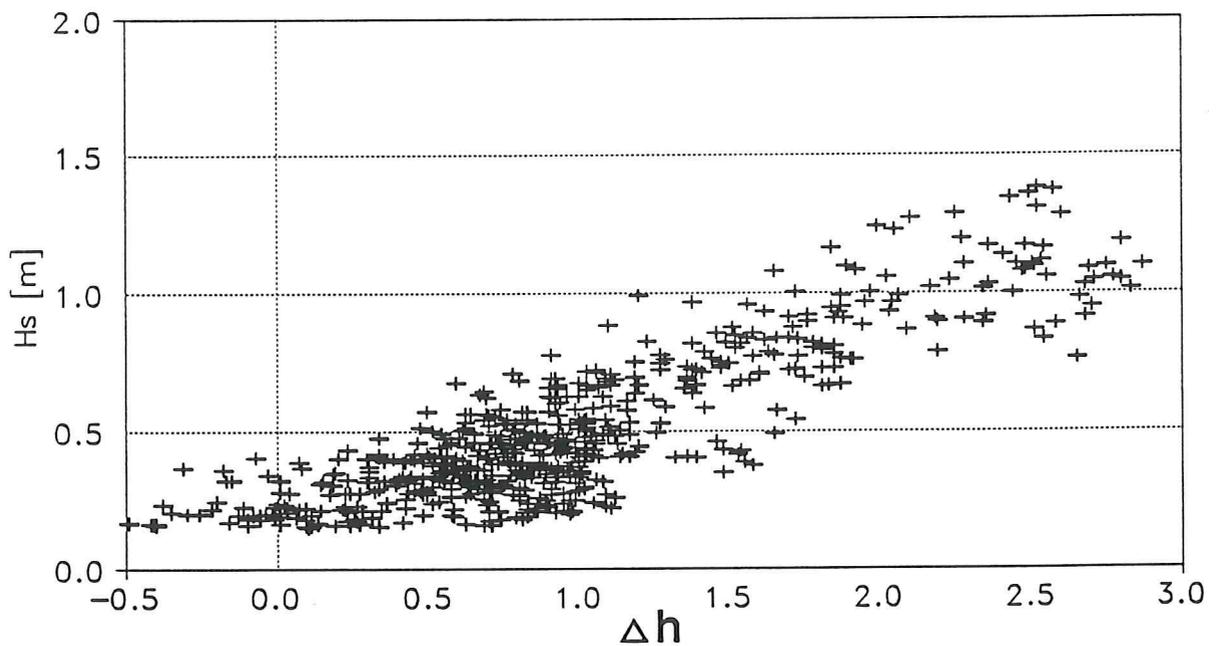


Abb. 60: Zusammenhang von signifikanten Wellenhöhen mit Sunk und Stau; Struklahnungshörn

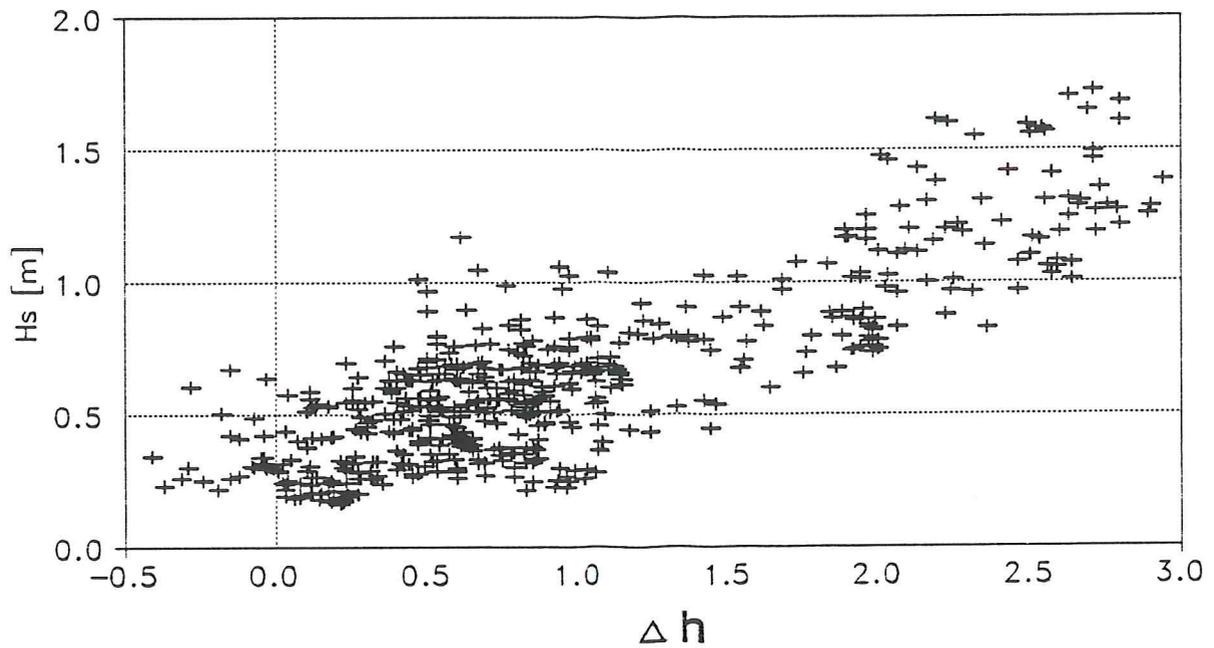


Abb. 61: Zusammenhang von signifikanten Wellenhöhen mit Sunk und Stau; Holmersiel

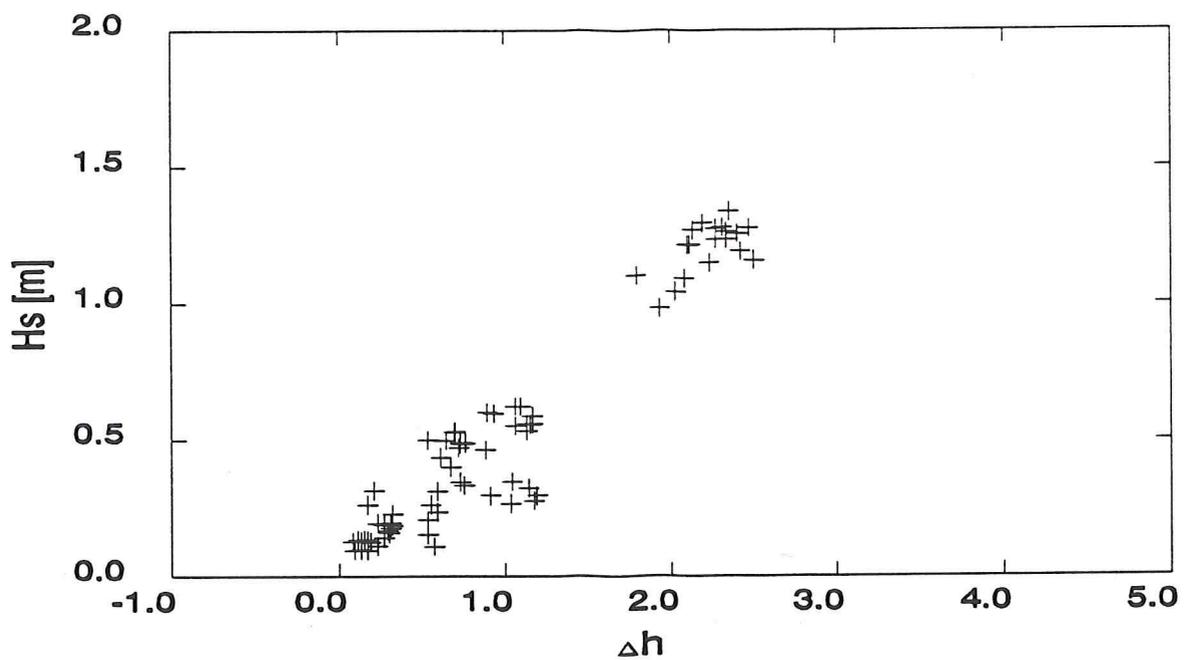


Abb. 62: Zusammenhang von signifikanten Wellenhöhen mit Sunk und Stau; Purrenstrom

Die vorhandenen Datensätze für das Einzugsgebiet der Hever weisen für alle Meßorte einen eindeutigen Zusammenhang zwischen Wellenhöhen und Stau aus (Abb. 58 - 61). Hierbei treten allerdings bemerkenswerte örtliche Unterschiede auf: An den Stationen Everschopsiel-Ost und Strucklahnungshörn haben Sunk und geringe Stauhöhen keinen Effekt auf die Höhenentwicklung des Wattseegangs. Erst bei bestimmten, örtlich unterschiedlichen Schwellenwerten Stauhöhen setzt eine tendenziell gleichartige Entwicklung von Stau- und Wellenhöhen ein, die durch ein allmähliches Anwachsen der Wellenhöhen mit zunehmenden Stau gekennzeichnet ist (Abb. 58 u. 60). Dieser örtlichen Schwellenwerte für das Anwachsen der Wellenhöhen mit dem Stau können mit Sicherheit auf die unterschiedlichen Entwicklungs- und Ausbreitungsbedingungen des Wattseegangs im Vorfeld der Meßorte zurückgeführt werden.

Wie angesichts der geringen Zusammenhänge von Windgeschwindigkeiten und Wellenhöhen an der Station Everschopsiel-West zu erwarten war, besteht hier ein enger linearer Zusammenhang zwischen Stau und Wellenhöhen (Abb. 59). Da hier wegen der Lage der Station auf einem Deichvorland erst bei höheren Wasserständen eine Überflutung einsetzt, ist diese stets mit einer Seegangsausbreitung verbunden, da die für das Vorfeld Schwellenwerte für das Wachsen der Wellenhöhen mit dem Stau bereits überschritten sind. Es kann davon ausgegangen werden, daß auf den Deichvorländern des Nordstrander Damm wegen der vergleichbaren hydrodynamisch-morphologischen Randbedingungen ähnliche Zusammenhänge für die Seegangsentwicklung prägend sind. Von daher ist eine Revision der von FÜHRBÖTER [1988] ermittelten Bemessungswerte unumgänglich, da diese auf einem Vorhersageverfahren beruhen, bei dem die Höhenentwicklung des Seegangs von der Windgeschwindigkeit dominiert wird.

Außergewöhnlich stellen sich die Zusammenhänge von Wellenhöhen und Stau für den Meßort Holmer Siel dar (Abb. 61): Im Gegensatz zu den Meßorten Everschopsiel-Ost und Strucklahnungshörn ist ein vergleichbarer Schwellenwert für das Einsetzen einer tendenziell gleichläufigen Höhenentwicklung von Stau und Wellenhöhen nicht vorhanden. Diese Tendenz ist trotz erheblicher Streuung im untersten Staubereich klar erkennbar, endet aber bei Stauhöhen von etwa einem Meter. Bei weiter steigendem Stau tritt keine tendenziell gleichsinnige Wellenhöhenentwicklung auf. Mit einer Streubreite von etwa 0,5 m zeigen die signifikanten Wellenhöhen für die Staumentwicklung im Höhenbereich von etwa

$$1,0\text{m} \leq \Delta h \leq 2,0 \text{ m}$$

keine signifikanten Abhängigkeiten von der Stauentwicklung. Nach Überschreiten des oberen Schwellenwertes tritt dann - wenngleich auch mit starker Streuung - erneut eine in der Tendenz gleichgerichtete Höhenentwicklung von Stau und signifikanten Wellenhöhen auf, wobei der relative Anstieg der signifikanten Wellenhöhen in Abhängigkeit von der Stauhöhe stärker ist als im unteren Bereich (Abb. 61).

Hierin ist ein klares Indiz dafür zu sehen, daß den jeweiligen Höhenbereichen des Staus unterschiedliche Erscheinungsformen des Seegangs zuzuordnen sind. Angesichts der festgestellten Tatsache, daß bei großen Windgeschwindigkeiten deren Wirksamkeit für das weitere Wachstum des Seegangs vernachlässigbar wird, läßt sich im Fall von Holmer Siel folgende These ableiten: Der Seegang wird im unteren Staubereich durch den örtlichen Seegang angefacht bis ein Grenzwert in Abhängigkeit von der Streichlänge erreicht wird, der auch bei höheren Windgeschwindigkeiten und größeren Wassertiefen keinen Höhenzuwachs des ortsständigen Seegangs mehr erlaubt. Erst bei Überschreiten des zweiten Schwellenwertes kann mit steigenden Wasserständen von der Nordsee einschwingender Seegang bis an den Meßort vordringen.

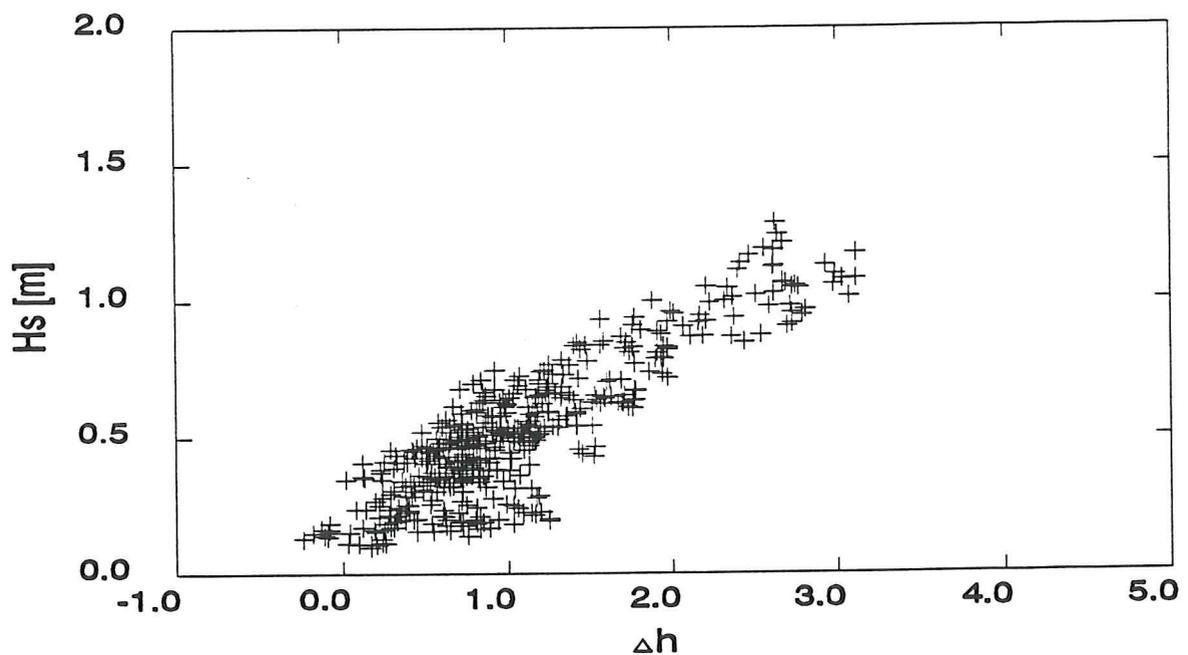


Abb. 63: Zusammenhang signifikanten Wellenhöhen mit Sunk und Stau; Eiderdamm-Süd

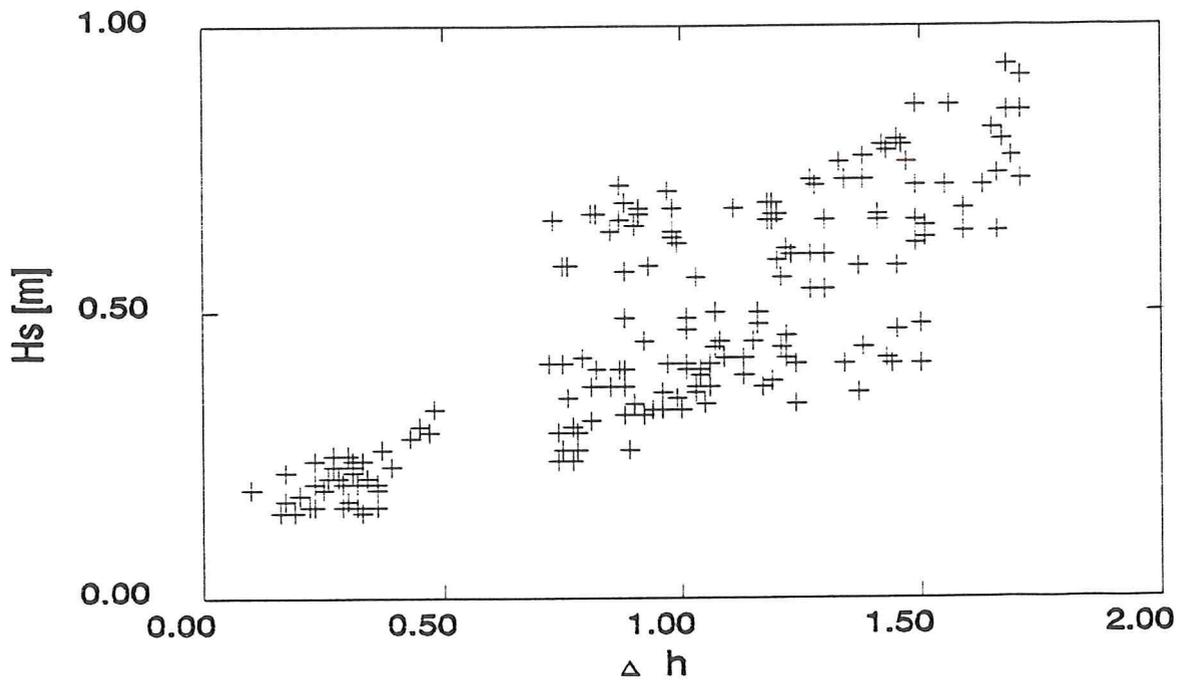


Abb. 64: Zusammenhang von signifikanten Wellenhöhen mit Sunk und Stau;
Cappelertief 1

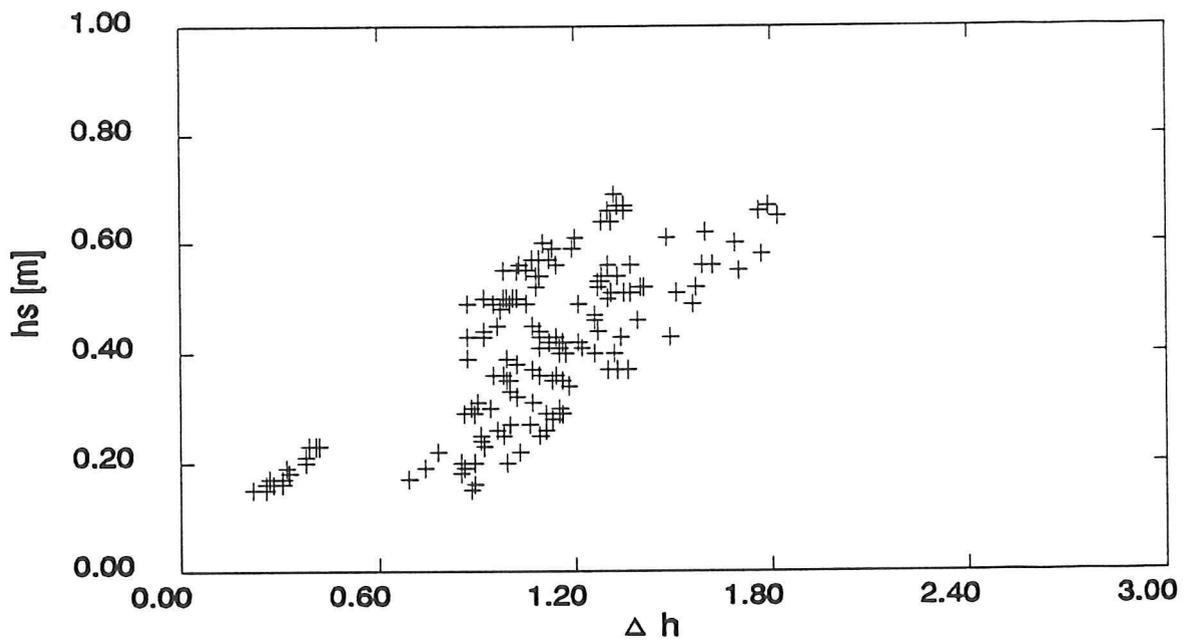


Abb. 65: Zusammenhang von signifikanten Wellenhöhen mit Sunk und Stau;
Cappelertief 2

Von den Stationen im Eiderästuar sind hinsichtlich eines Zusammenhangs von Stau und Sunk mit der Seegangsentwicklung nur die Wattstationen Purrenstrom und Eiderdamm-Süd untersucht worden (Abb. 62 u. 63), da für die seewärts gelegenen Bereiche kein abgesicherte Wasserstandswerte zur Verfügung stehen. An beiden Meßorten ist für Staubereiche oberhalb eines schätzungsweise bei

$$\Delta h \geq 1,2 \text{ m}$$

liegenden Schwellenwertes ein tendenzieller Zusammenhang zwischen Stauentwicklung und Höhenzunahme des Seegangs erkennbar. Allerdings wachsen die signifikanten Wellenhöhen am Purrenstrom stärker mit zunehmenden Stau als am Eiderdamm-Süd, wobei auch die Zusammenhänge zwischen beiden Parametern enger sind, während am Eiderdamm-Süd auch im höheren Staubereich eine ausgeprägte Reststreuung der signifikanten Wellenhöhen bleibt.

Für die Meßorte an der Wurster Küste zeigt sich ein tendenzieller Zusammenhang zwischen signifikanten Wellenhöhen und Stau, der allerdings - vor allem auf dem Watt - durch enorme Streuungen gekennzeichnet ist (Abb. 64 u. 65). An beiden Stationen, insbesondere aber auf dem Heller, sind aus den Daten die Strukturen von zwei verschiedenen Seegangssystemen erkennbar, die beide zwar tendenziell mit dem Stau wachsen, aber ab unterschiedlich hoher Schwellenwerte des Staus einsetzen. Während auf dem Heller beide Systeme etwa die gleichen Maximalwerte der signifikanten Wellenhöhen aufweisen, besitzt auf dem Watt das höheren Stauwerten zuzuordnende System deutlich höhere Maximalwerte. Insbesondere für die letztgenannten Werte wird im Zusammenhang mit den Untersuchungen zur Windeinwirkung für ausgewählte Sektoren (Abb. 48) deutlich, daß dieses System ortständigen Seegang repräsentiert. Die Gesamtheit der Messungen läßt keine endgültige Schlußfolgerung darüber zu, welche Erscheinungsform letztendlich hinsichtlich der Bemessung von Küstenschutzwerken als maßgebend anzusehen ist. Für Windrichtungen, bei denen auf der Nordsee erzeugter Seegang einschwingen kann, ist zwar kein höherer Seegang gemessen worden. Es kann aber nicht ausgeschlossen werden, daß die sich Verhältnisse der Seegangsentwicklung und -ausbreitung für größere Windstärken grundsätzlich ändern. Für die hier erfaßten Bereiche von Windgeschwindigkeiten bleibt festzuhalten, daß aus dem Küstenvorfeld einschwingender Seegang für die Ausbildung gleicher Höhen geringerer Wassertiefen benötigt als örtliche Windsee.

Auf den Watten im Einzugsgebiet des Norderneyer Seegats sind die Zusammenhänge von signifikanten Wellenhöhen und Stau in deutlicher Form von der Lage des

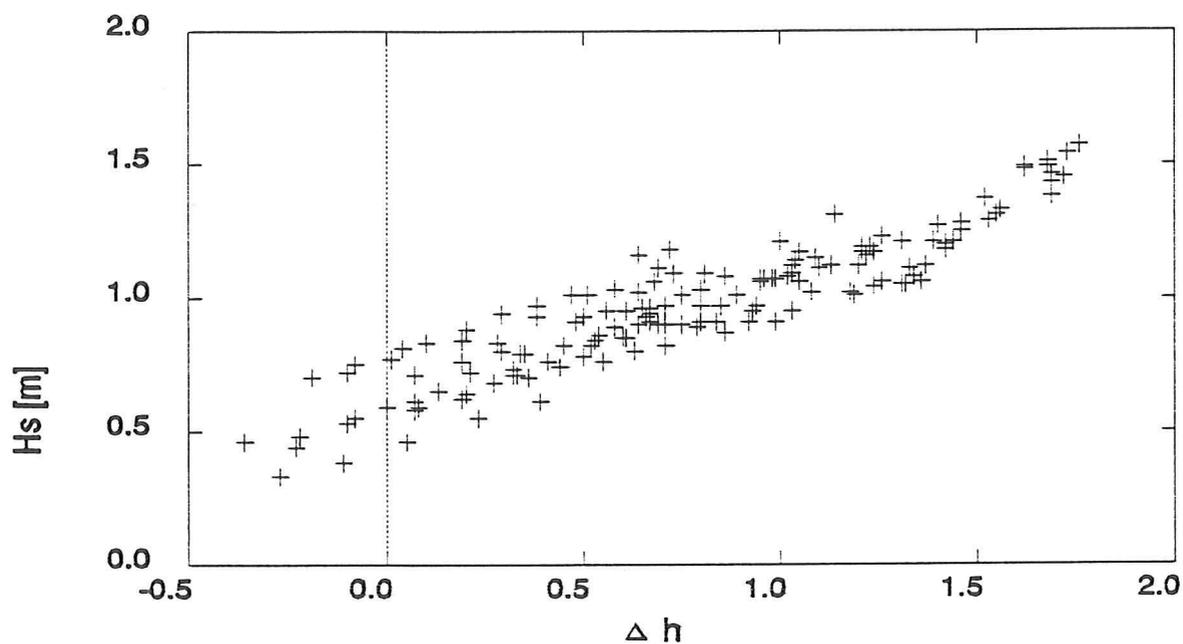


Abb. 66: Zusammenhang von signifikanten Wellenhöhen mit Sunk und Stau; Meß-Station O.W.

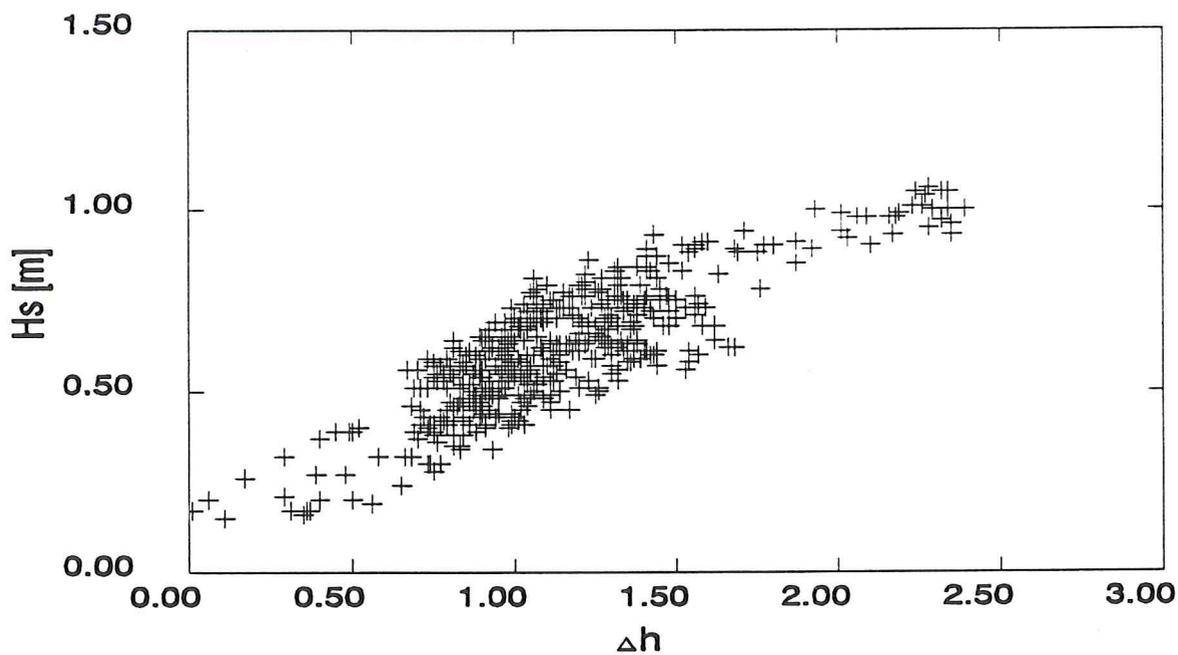


Abb. 67: Zusammenhang von signifikanten Wellenhöhen mit Sunk und Stau; Norddeich

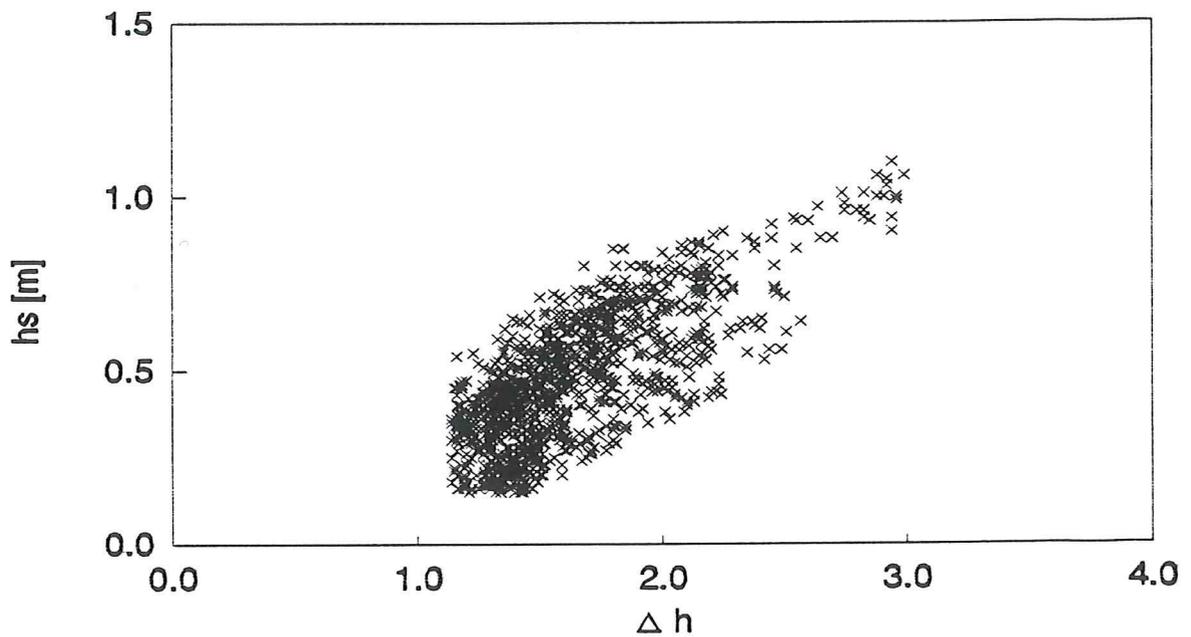


Abb. 68: Zusammenhang von signifikanten Wellenhöhen mit Sunk und Stau; Osterwarf

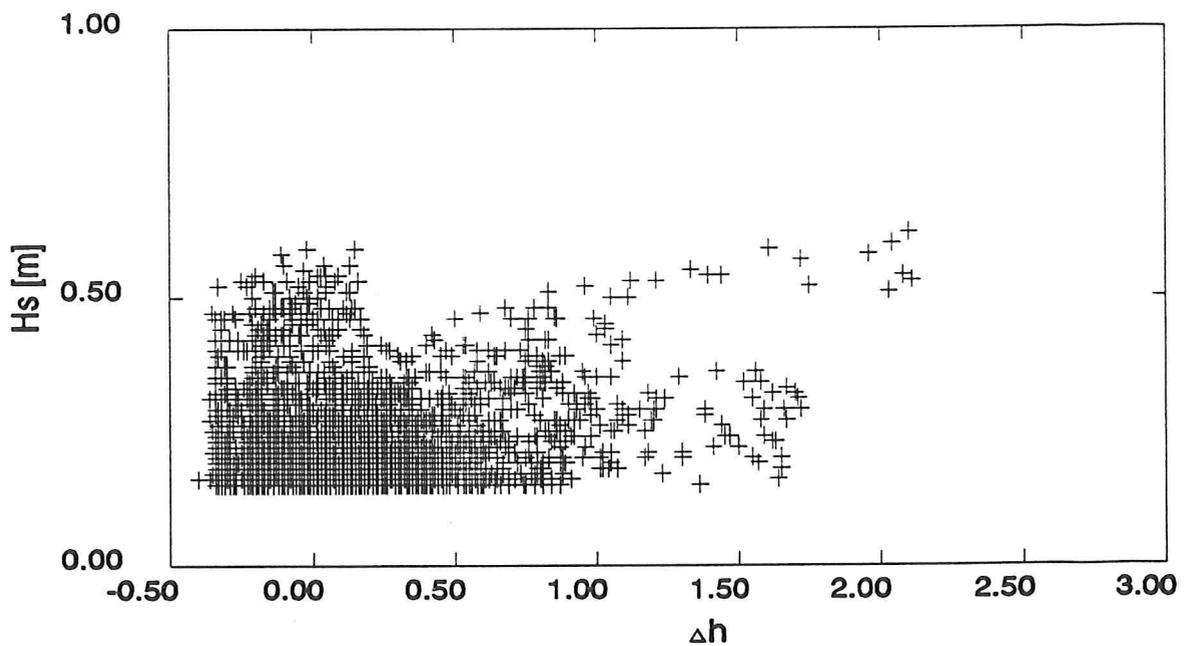


Abb. 69: Zusammenhang von signifikanten Wellenhöhen mit Sunk und Stau; Grohde Polder

jeweiligen Meßortes zum Seegat ab (Abb. 66 - 69). Bei der Meßstation Ostfriesisches Wattenmeer ist der Zusammenhang zwischen Stauentwicklung und signifikanten Wellenhöhen klar ausgeprägt, wobei etwa ab einem Schwellenwert von etwa

$$\Delta h \geq 1,5 \text{ m}$$

der Trend steiler und enger wird (Abb. 66). Auch an der Station Norddeich folgen die Wellenhöhen bei vergleichsweise geringer Streuung tendenziell der Stauentwicklung, wobei der Trend mit wachsenden Stauhöhen eine Abschwächung erfährt (Abb. 67). Auch am Meßort Osterwarf ist dieser Trend ausgeprägt; die Streubreite ist allerdings im mittleren Staubereich wesentlich stärker als an der Station Norddeich (Abb. 68). Offensichtlich hängt dies zum einen mit der größeren Entfernung von der Wirkungslinie der tiefen Seegatrinne [NIEMEYER 1990] und zum anderen mit der offenen Lage zum Tidebecken der Osterems mit günstigeren Randbedingungen für die Ausbildung örtlicher Windsee, die unterschiedlich einschwingenden Seegang überlagert, ab (Abb. 68). Für die sowohl in größerer Entfernung vom Seegat als auch im Wellenschatten der Insel Norderney liegende Station Grohde Polder läßt sich kaum noch ein Zusammenhang zwischen Stau- und Wellenhöhenentwicklung erkennen. Es kann aber - auf der vorliegenden Datengrundlage - nicht ausgeschlossen werden, ob ein bei höheren Stauwerten sich abzeichnender leichter Trend eines Grenzwertes bei höher auflaufenden Sturmfluten stärkere Ausprägung erfährt (Abb. 69).

4.6 Energiespektren

Wie bereits an anderer Stelle erwähnt, sind nahezu alle Bemessungsverfahren für Bauwerke des Insel- und Küstenschutzes für Parameter formuliert, die mit Hilfe der Bestimmung individueller Wellen im Zeitbereich ermittelt wurden. Ebenso sind alle Parametrisierungen zur Kennzeichnung seegangsbedingter hydrodynamisch-morphologischer Wechselwirkungen in Wattgebieten - soweit bekannt - auf gleicher Grundlage formuliert worden. Hinsichtlich des Anwendungszwecks der Ergebnisse von Seeganguntersuchungen in Wattgebieten erscheint daher die Spektralanalyse obsolet. Zudem erlaubt die gänzlich andere Form der Spektren in Gebieten mit starken Wechselwirkungen zwischen Seegang und Morphologie nicht eine gleichartige Nutzung spektral ermittelter Parameter zur physikalischen Interpretation wie im Seegebiet [NIEMEYER 1983], wo der Seegang durch schwache Wechselwirkungen geprägt wird. Dennoch sollen hier exemplarisch die Energiespektren einiger charakteristischer Zeitreihen diskutiert werden, um hierdurch vertiefte Einsichten hinsichtlich des Auftretens und der Bedeutung unterschiedlicher Erscheinungsformen des Wattseegangs gewinnen zu können. Ziel ist hierbei nicht nur zu einem verbesserten physikalischen Verständnis der Vorgänge zu gelangen. Es wird erhofft, mit Hilfe derartiger Erkenntnisse auch die Strategien für künftige Modellentwicklungen und -anwendungen, sowie für die zu deren Verifikation unentbehrlichen Naturmeßprogramme optimieren zu können.

Ersten Aufschluß über die dominante Erscheinungsform des gemessenen Seegangs erlaubt neben der gesamten Energieverteilung über die Frequenzen die Peakperiode, Kehrwert der dem Maximum der Energieverteilung zugehörigen Frequenz. Der Rückschluß ist dabei um so sicherer, je ausgeprägter die Energiekonzentration um die Peakfrequenz ist. Erkenntnisse über im Seegang enthaltene, relativ energiereiche Anteile anderer Erscheinungsformen in anderen Frequenzbereichen kann die Peakperiode per Definition nicht liefern. Wegen der bekannten Multippeakstruktur der Spektren aus der Nordsee in das Küstenvorfeld einschwingenden Seegangs wird auf diese überschlägliche Betrachtungsweise verzichtet, da hiermit für einen bedeutenden Anteil der Datensätze möglicherweise eine gravierende Fehlinterpretation verbunden wäre. Aus diesem Grund wird versucht, für einige ausgewählte Spektren die regionalen Charakteristiken des Wattseegangs zu verdeutlichen.

Aufgrund ihrer exponierten Lage zur offenen See ist an der Meßstation Ostfriesisches Wattenmeer das Seegangsklima der Nordsee unmittelbar spürbar als an den anderen Meßorten im Einzugsgebiet des Norderneyer Seegats. Zwar erfolgt

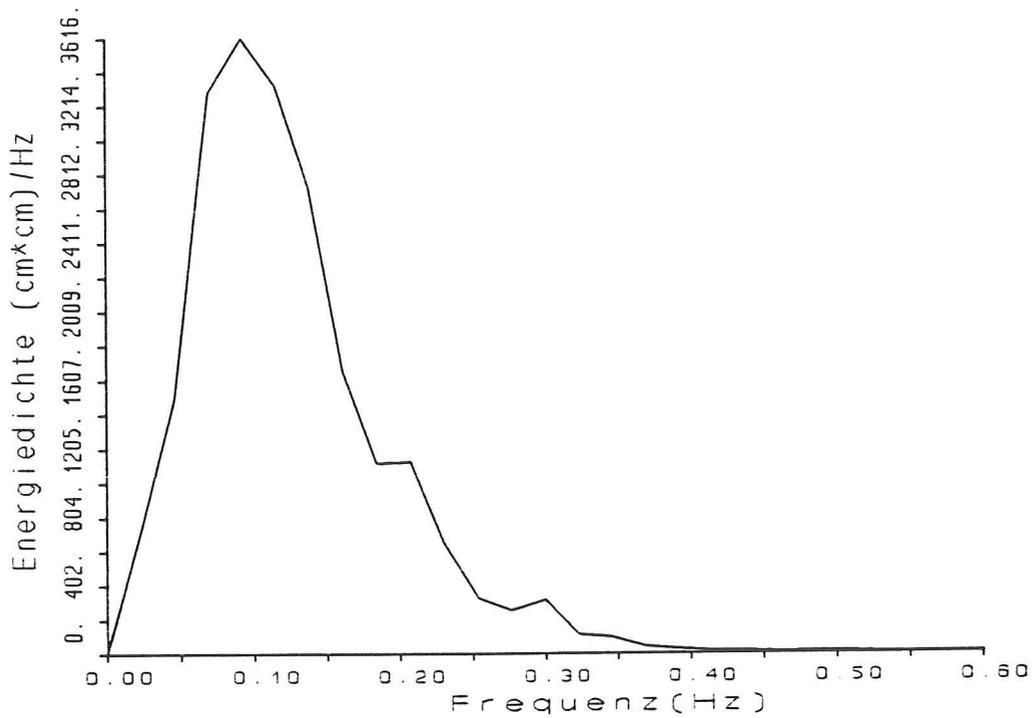


Abb. 70: Spektrum der Meßreihe 41; Meßstation Ostfriesisches Wattenmeer

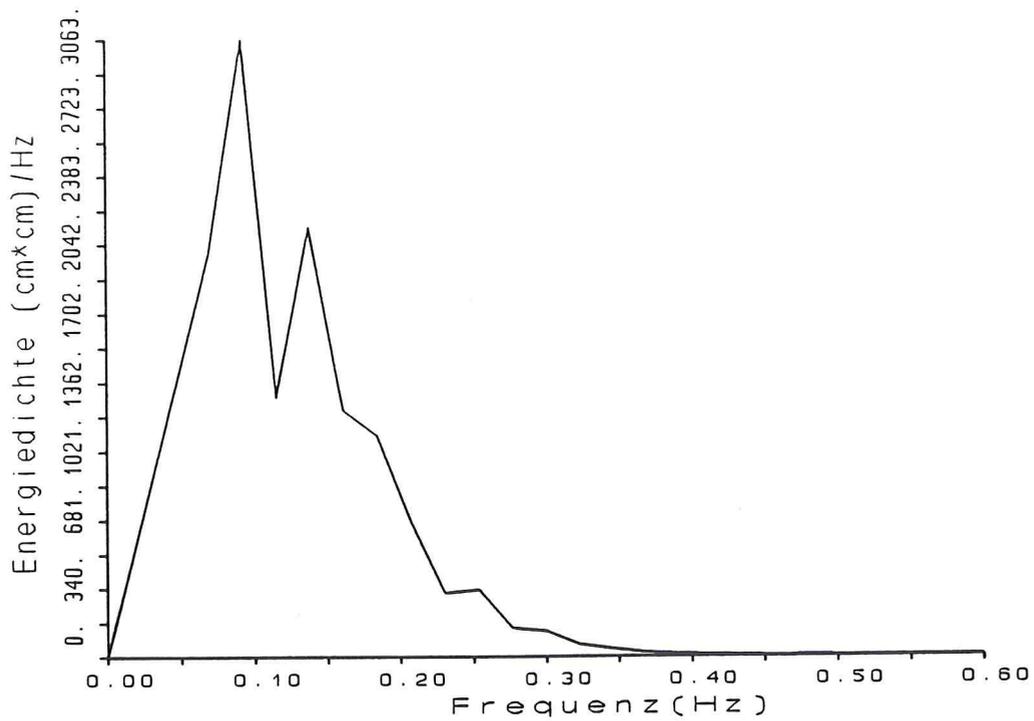


Abb. 71: Spektrum der Meßreihe 60; Meßstation Ostfriesisches Wattenmeer

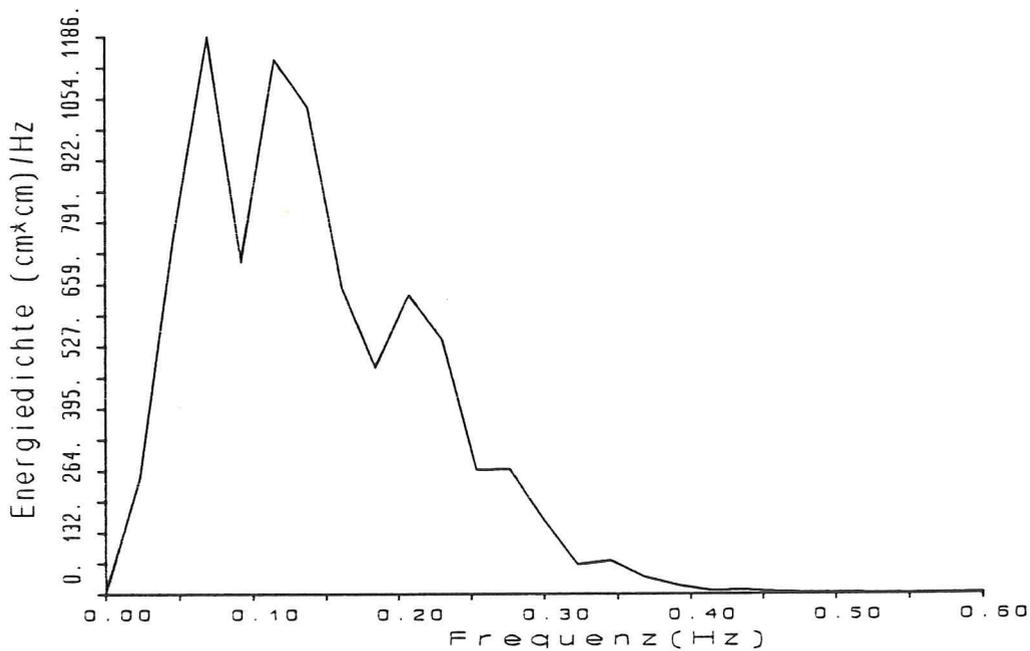


Abb. 72: Spektrum der Meßreihe 131; Meßstation Ostfriesisches Wattenmeer

- insbesondere bei entwickeltem Seegang - eine intensive Transformation durch die Riffbrandung auf den Platen des Ebbdeltas vor dem Norderneyer Seegat [NIEMEYER 1983, 1987c], doch die Prägung durch das Seegangsklima des Küstenvorfeldes ist zunehmend mit den Tidewasserständen gegeben, wobei Überlagerungen alter und neuer Systeme in vielfältiger Art möglich sind. Als Beispiel hierfür werden die im Tidezyklus aufeinanderfolgenden Spektren 41 und 60 dargestellt (Abb. 70 u. 71). Bei westlichem Wind mit Beaufort 6 läuft langperiodischer Seegang, der als junge, vom Wind aber energetisch konservierte Dünung anzusprechen ist, mit einer Peakperiode von etwa 11 Sekunden ein (Tab. 4b, Abb. 70), der offensichtlich keine so durchgreifenden Modifikationen durch die Riffbrandung erfahren hat, wie sie bei stärker entwickeltem Seegang im Küstenvorfeld auftreten [NIEMEYER 1983, 1987c]. Eine Tidephase später tritt bei rechtdrehendem und abgeschwächten Wind ein Spektrum mit gleicher Peakperiode, aber geringerer Gesamtenergie und niedrigerem Peak auf, das aber entsprechend den veränderten Windverhältnissen einen zweiten höherfrequenten Peak mit geringerer Energiekonzentration aufweist (Abb. 71). Die Überlagerung von außen einschwingender Systeme erfährt mit sich verstärkender Riffbrandung selbst bei relativ moderaten Randbedingungen weitere Modifikationen (Abb. 72): Neben dem niederfrequenten maximalen Peak hat sich eine Reihe weiterer mit abnehmenden Energiedichten bei wachsenden Frequenzen ausgebildet.

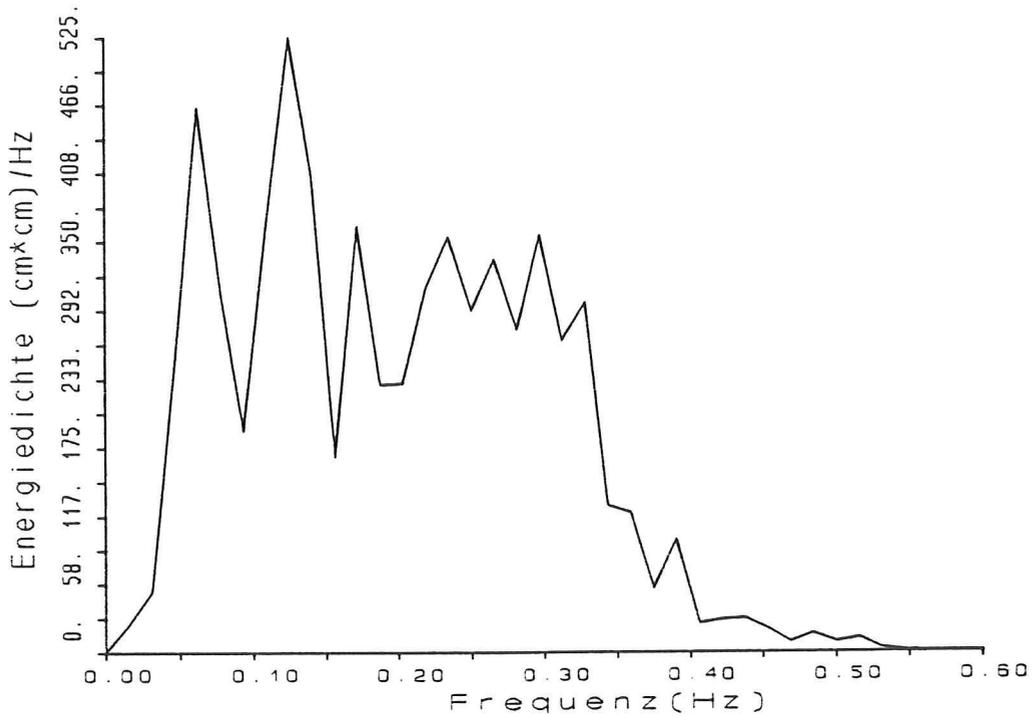


Abb. 73: Spektrum der Meßreihe 107; Norddeich

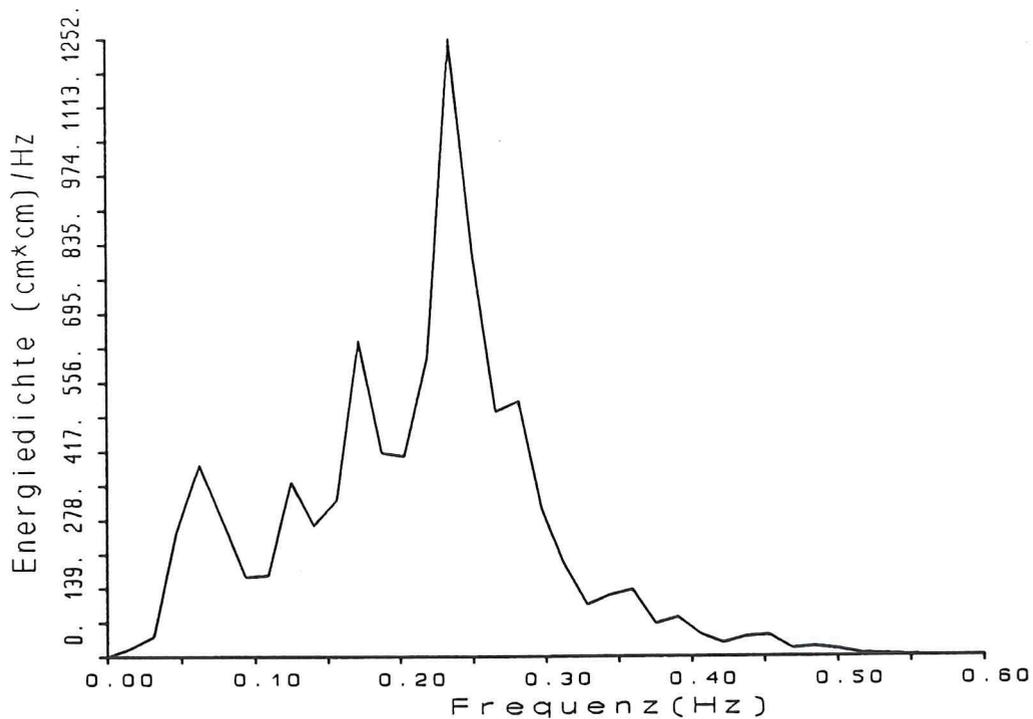


Abb. 74: Spektrum der Meßreihe 43; Norddeich

Station	Nr.	u m/s	R °	Wst. PN + cm
Meßstation O.W.	1176	13,2	265,3	7,69
	41	12,9	264,3	7,86
	60	9,6	280,0	7,63
	131	10,3	294,0	6,02
Norddeich	107	11,1	335,7	7,54
	43	14,7	293,3	7,49
	49	18,7	276,7	8,58
Osterwarf	259	18,5	244,3	7,46
	947	15,5	270,3	7,58
	41	18,2	276,6	8,61
Grohde Polder	419	0,7	242,3	6,29
	709	15,5	270,3	7,44
	830	17,9	239,3	6,93
Cappeler Watt	12	14,0	250,0	7,90
	28	11,6	283,3	7,55
Holmer Siel	114	23,0	280,0	8,80
	83	34,0	250,0	9,28
Everschopsiel-Ost	51	34,0	250,0	9,28

Tab. 4a: Randbedingungen für Spektralanalysen ausgewählter Meßreihen

Station	Nr.	H_s m	T_m s	T_p s	E_{ges} cm^2	E_{max} cm^2/Hz
Meßstation O.W.	1176	0,46	3,31	3,76	130,40	282,42
	41	1,76	5,91	10,85	1945,61	3616,01
	60	1,46	6,32	10,85	1345,62	3063,38
	131	1,10	5,48	14,47	766,55	1186,06
Norddeich	107	0,81	4,42	8,00	412,95	524,74
	43	0,93	4,28	4,27	539,78	1251,88
	49	1,14	4,78	4,27	815,99	1265,72
Osterwarf	259	0,79	3,65	4,00	392,36	1149,47
	947	0,80	3,56	4,57	394,83	752,85
	41	0,97	4,31	4,92	589,39	1268,19
Grode Polder	419	0,24	2,44	2,56	37,34	98,357
	709	0,48	2,92	3,56	144,62	228,03
	830	0,56	3,27	4,00	197,71	437,30
Cappeler Watt	12	0,86	3,88	4,27	464,93	1407,05
	28	0,71	3,79	4,27	318,30	983,61
Holmer Siel	114	1,42	3,55	5,12	1255,90	3602,30
	83	1,40	3,96	6,40	1225,16	2629,59
Everschopsiel-Ost	51	0,94	3,54	5,12	549,00	772,86

Tab. 4b: Parameter von Spektralanalysen ausgewählter Meßreihen

Als Ursache dieser stärkere Modifikation des Spektrums ist aber weniger der einschwingende Seegang anzusehen, sondern der niedrigere Wasserstand (Tab. 4a), der eine stärkere Energieumwandlung bewirkt.

Für die Station Norddeich im Einzugsgebiet des Norderneyer Seegats werden beispielhaft die Spektren 43 und 107 verglichen, die etwa die gleich große signifikante Wellenhöhen und mittlere Periode aufweisen (Tab. 4b, Abb. 73 u. 74). Auch die Wasserstände während der Messung sind nahezu gleich hoch, lediglich der Wind differiert in Richtung und Geschwindigkeit (Tab. 4a). Dieser Unterschied bewirkt aber erhebliche Auswirkungen für die Energieverteilung über die Frequenzen: Beim Spektrum 107 ist eine Vielzahl von Peaks vorhanden, die sich über den Periodenbereich von etwa 3 bis 15 Sekunden erstrecken, wobei die energiereicheren niederfrequenter sind (Abb. 73). Die höhere Windgeschwindigkeit bewirkt beim Spektrum 43 eine erheblich stärkere Energiekonzentration im Peakbereich (Abb. 74) als im ersten Beispiel, wobei die Gesamtenergie weit weniger differiert (Tab. 4b). Von der Windrichtung her bieten Streichlänge und Wassertiefe auf dem Windwirkweg beim Spektrum 107 bessere Voraussetzungen für örtliche Windsee als bei 43 und die Anfachung hochfrequenter Anteile ist hier auch ausgeprägter. Berücksichtigt man die bekannte Verschiebung relativer Energieanteile beim Einschwingen des Seegangs in das ostfriesische Wattenmeer [NIEMEYER 1987c], so ist zu vermuten, daß der ausgeprägt Peak des Spektrums 43 von der Nordsee her einschwingendem Seegang zuzuordnen ist. Für diese Interpretation spricht - insbesondere angesichts der Kürze des Windwirkweges im Wattengebiet - auch die Länge der mittleren Periode. Steigende Wasserstände und höhere Windgeschwindigkeiten haben hinsichtlich der Zunahme der Wellenhöhen keinen proportionalen Einfluß, wie am Spektrum 49 erkennbar wird (Tab. 4a u. b, Abb. 75). Auch hieran wird erkennbar, daß örtliche Windsee nicht die dominante Erscheinungsform ist: eine Zunahme der Wassertiefen auf dem Windwirkweg um etwa einen Meter ist im Wattenmeer relativ zur Gesamttiefe als ebenso erheblich einzustufen, wie die Zunahme der mittleren Windgeschwindigkeiten um etwa 4 m/s. Die Brandung auf dem Riffbogen des Norderneyer Seegats ist offensichtlich die bestimmende Randbedingung für den auf das Watt einschwingenden Seegang, wie bereits in früheren Untersuchungen festgestellt [NIEMEYER 1983, 1987c]. Bemerkenswert erscheint aber der hohe Energieanteil, der sich in einem ausgeprägten Sekundärpeak im Periodenbereich um 14 Sekunden manifestiert (Abb. 75). Die hohen Wasserstände ermöglichen offensichtlich das Durchschwingen energiereicher junger Dünung bis an die Festlandsküste.

Bei hinreichend langen Windwirkwegen ist aber auch auf ostfriesischen Watten ausgeprägte Windsee möglich. Diese Randbedingung ist an der Station Oster-

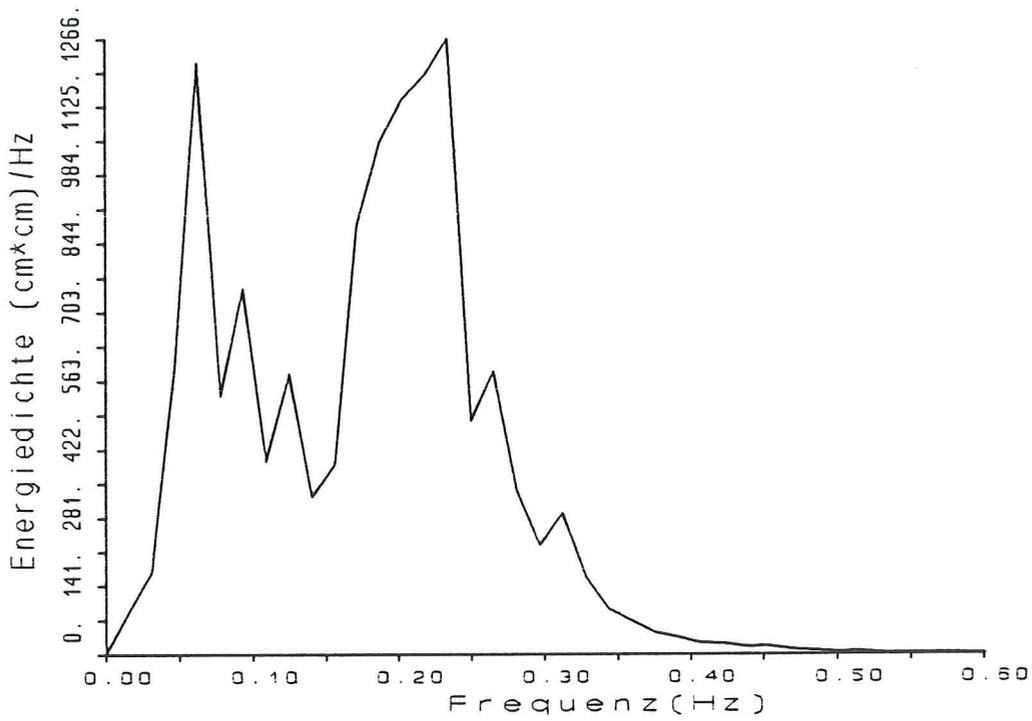


Abb. 75: Spektrum der Meßreihe 49; Norddeich

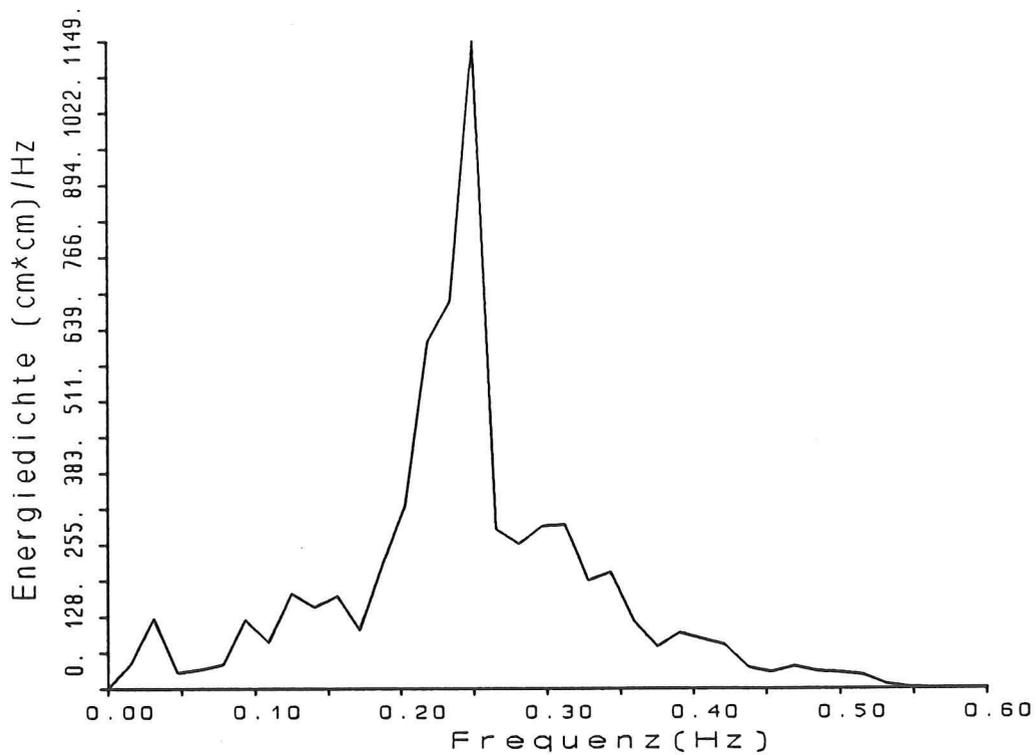


Abb. 76: Spektrum der Meßreihe 259; Osterwarf

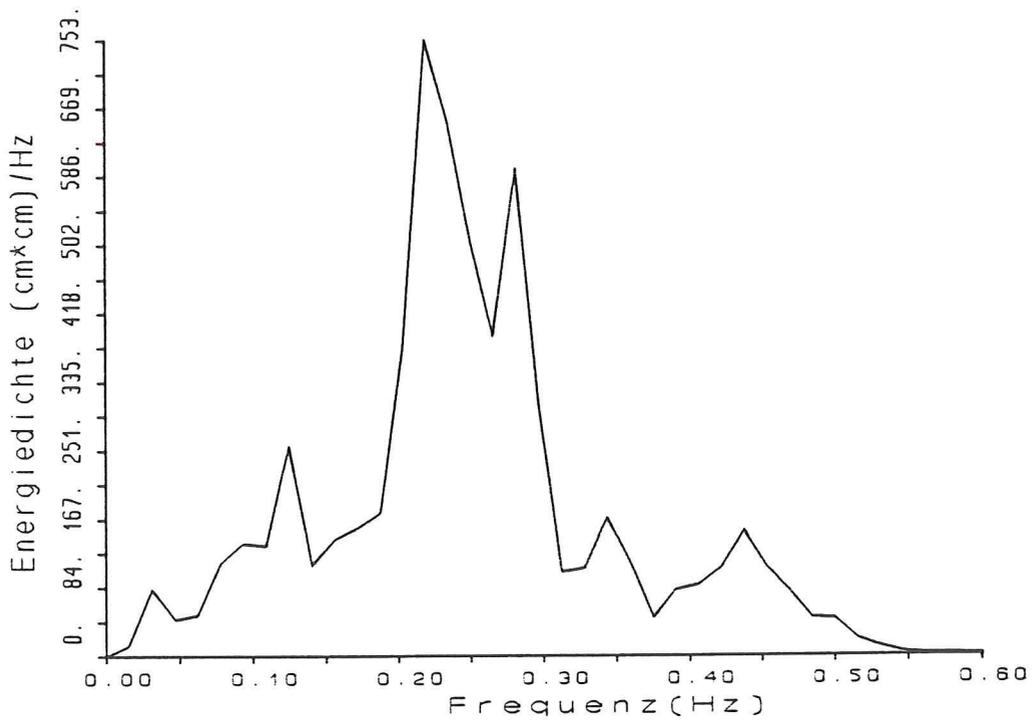


Abb. 77: Spektrum der Meßreihe 947; Osterwarf

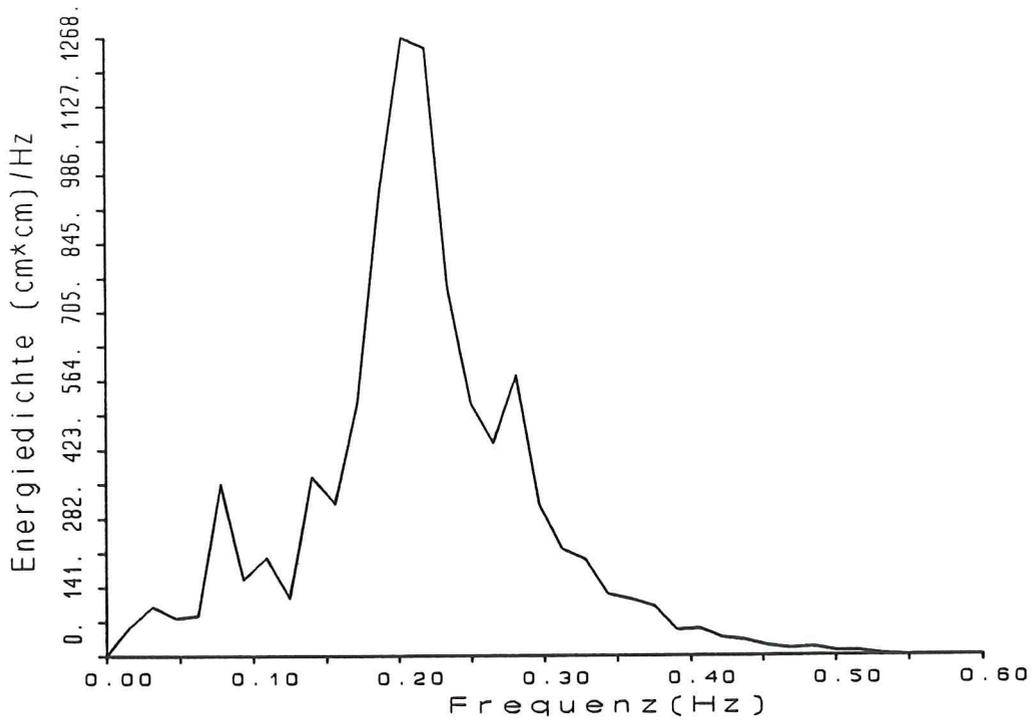


Abb. 78: Spektrum der Meßreihe 41; Osterwarf

warf erfüllt, die offen zum ausgedehnten benachbarten Tidebecken der Osterems (Abb. 4 u. 10). Bei einer Windrichtung von 244° stehen hier bis zur Osterems Streichlängen von etwa 15 und bis zur Westerems von etwa 25 km zur Verfügung. Das Spektrum 259 ist hierfür ein typisches Beispiel (Tab. 4a u. b, Abb. 76). Bei weiter linksdrehenden Windrichtungen verkürzt sich die Streichlänge merklich. Dennoch weist bei nahezu gleich hohem Wasserstand das Spektrum 947 bei einer Windrichtung von 276° und um etwa 3 m/s geringerer Windgeschwindigkeit etwa gleiche signifikante Wellenhöhe und mittlere Periode wie das Spektrum 259 (Tab. 4a u. b, Abb. 77). Bemerkenswert ist allerdings die Verlagerung des Peaks in einen niedrigeren Frequenzbereich. Hieraus und in Anbetracht der von allen Randbedingungen her ungünstigeren Entwicklungsbedingungen für die Ausbildung von örtlicher Windsee, ist zu schließen, daß die dominante Erscheinungsform des Seegangs des Spektrums 947 von der Nordsee einschwingender Seegang ist. Eine Überlagerung durch ortsständigen Seegang wird an einem ausgeprägten Sekundärpeak mit geringerer Energie im Periodenbereich um drei Sekunden deutlich (Abb. 77). Der Anteil vieler kurzer Wellen der örtlichen Windsee erklärt auch die im Vergleich zur Energieverteilung über die Frequenzen geringe mittlere Periode. Auch am Meßort Osterwarf (Tab. 4a u. b, Abb. 78) führen deutlich höhere Wasserstände - wie anhand des Vergleichs der Spektren 43 und 947 deutlich wird - primär zu höherer Gesamtenergie bei stärkerer Energiekonzentration im Peakbereich und dessen weitere Verlagerung in den niederfrequenten Bereich, während die Zunahme der signifikanten Wellenhöhe im Vergleich dazu unterproportional ist (Tab. 4a u. b, Abb. 77 u. 78). Ursache hierfür dürfte - wie bereits am Spektrum 49 für die Station Norddeich erläutert - die Riffbrandung vor dem Nordeyner Seegat [NIEMEYER 1983, 1987c] sein.

Die erfahren - bezogen auf die zur Verfügung stehenden Datensätze - bei aufländigen Windrichtungen und Sturmfluten eine geringere Seegangsbelastung als bei der Ausbildung örtlicher Windsee. Selbst bei aufländigem Wind setzt offensichtlich keine energiereiche Dünung aus der Nordsee auf die Watten im Wellenschatten von Düneninseln durch: Am Beispiel des Spektrums 419, das einer Meßreihe bei Windstille entstammt, wird aber deutlich, daß die Ursache hierfür nicht die weitgehende Dämpfung von der Nordsee einschwingenden Seegangs ist, sondern ein Energietransfer in höherfrequente Bereiche (Abb. 79). Dieser Fakt ist bereits bei früheren Untersuchungen [NIEMEYER 1987c] bei der Energiedissipation durch Riffbrandung festgestellt worden. Es ist aber zu vermuten, daß sich dieser Prozeß auch ohne intensive Brandung einstellt und auf der Laufstrecke vom Seegat noch fortsetzt. Ein weiteres Indiz für einschwingenden Seegang an diesem Meßort stellt das Spektrum der Meßreihe 709 dar, das in seiner Aufsplitterung in eine Vielzahl von nahezu gleichhohen Peaks die typischen Merkmale intensiver Riffbrandung

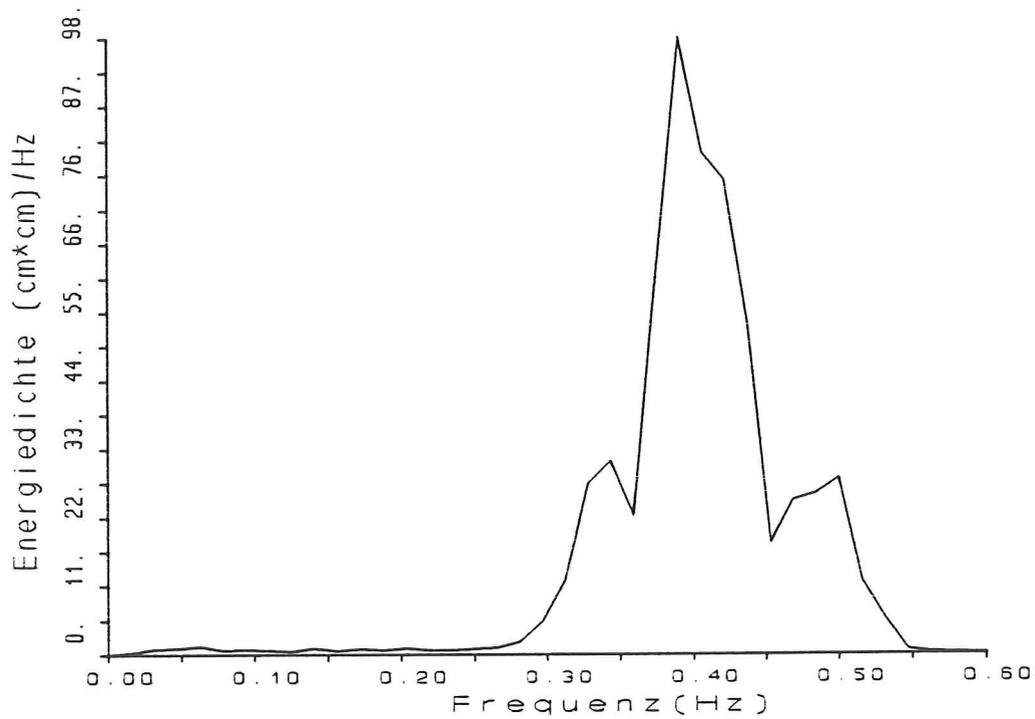


Abb. 79: Spektrum der Meßreihe 419; Grohde Polder

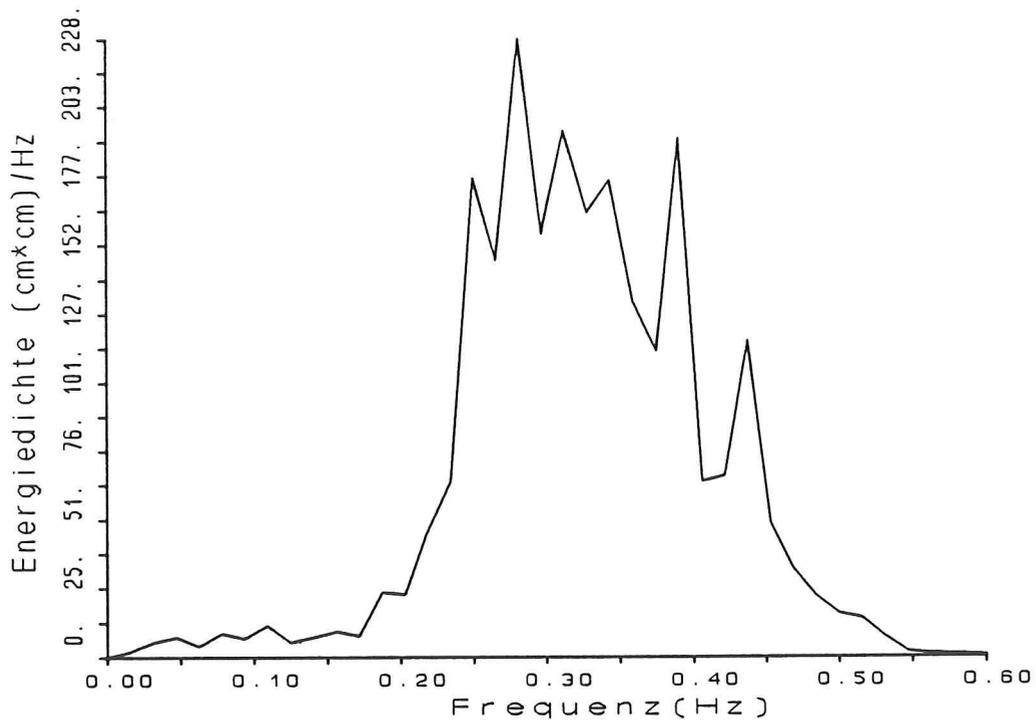


Abb. 80: Spektrum der Meßreihe 709; Grohde Polder

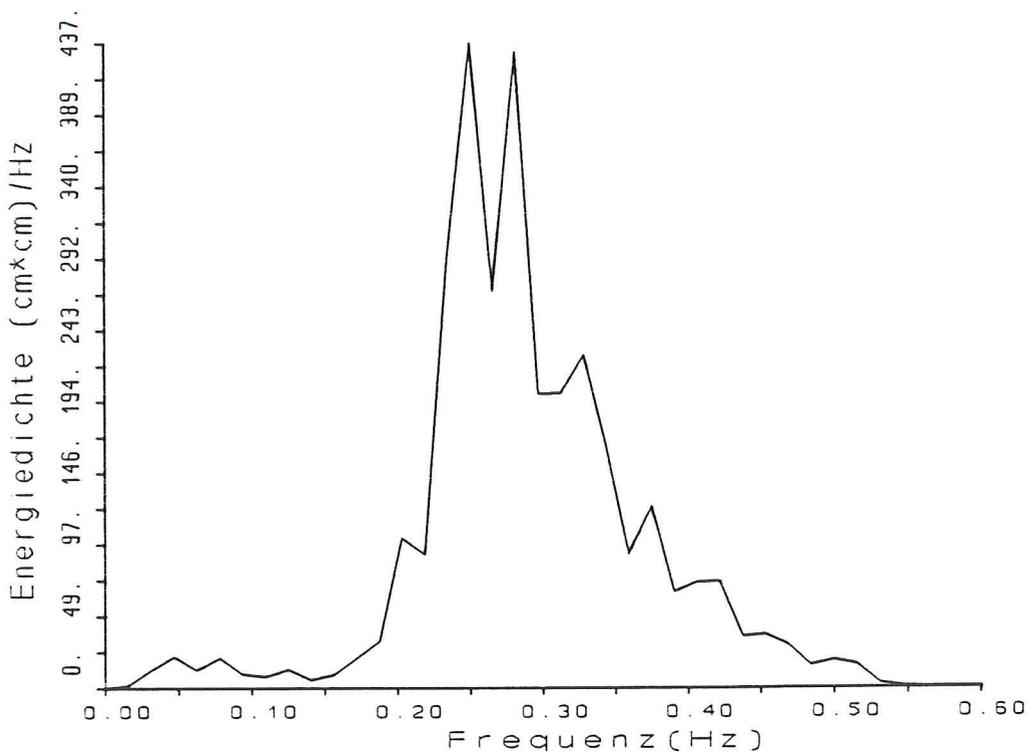


Abb.81: Spektrum der Meßreihe 830; Grohde Polder

[NIEMEYER 1986, 1987c] aufweist (Ab.80). Typische örtliche Windsee ist hingegen auch hier durch Energiekonzentration im Peakbereich gekennzeichnet, wie am Beispiel des Spektrums deutlich wird (Tab.4a u. b, Abb. 81). Die Aufspaltung in zwei Teilpeaks spricht nicht dagegen, zumal die Frequenzen eng beieinander liegen. Sie tritt auch im bei Windsee im Seegebiet auf [NIEMEYER 1983].

Bei Windrichtungen, die an der Wurster Küste die Ausbildung ortsständigen Seegangs erwarten lassen, ist das Spektrum 12 an der Station Cappeler Watt erfaßt worden (Tab. 4a u. b, Abb. 82). Bei der Windrichtung von 250° steht für die Seegangsentwicklung eine Streichlänge von bis zu knapp 20 km zur Verfügung, wobei möglicherweise am Beginn des Windwirkweges eine Überlagerung mit aus der Weser diffrangierender Dünung stattfindet. Im Vergleich wird hierzu das Spektrum 28 herangezogen (Abb. 83), das bei einer Windrichtung von 283° gemessen wurde (Tab. 4a u. b). Abgesehen von den aus den Unterschieden der Windgeschwindigkeiten erklärbaren Differenzen in Gesamtenergie, Peakhöhe und signifikanter Wellenhöhe ist die Übereinstimmung bei Peak- und mittlerer Periode auffallend. Eine physikalische Erklärung ist hierfür nicht eindeutig herleitbar. Es kann aber vermutet werden, daß auch bei ortsständigem Seegang die Windwirkwege hinreichend lang sind, um entsprechende Perioden erzeugen zu können. Es erscheint jedenfalls unwahrscheinlich, daß das Spektrum 28 örtlicher Windsee

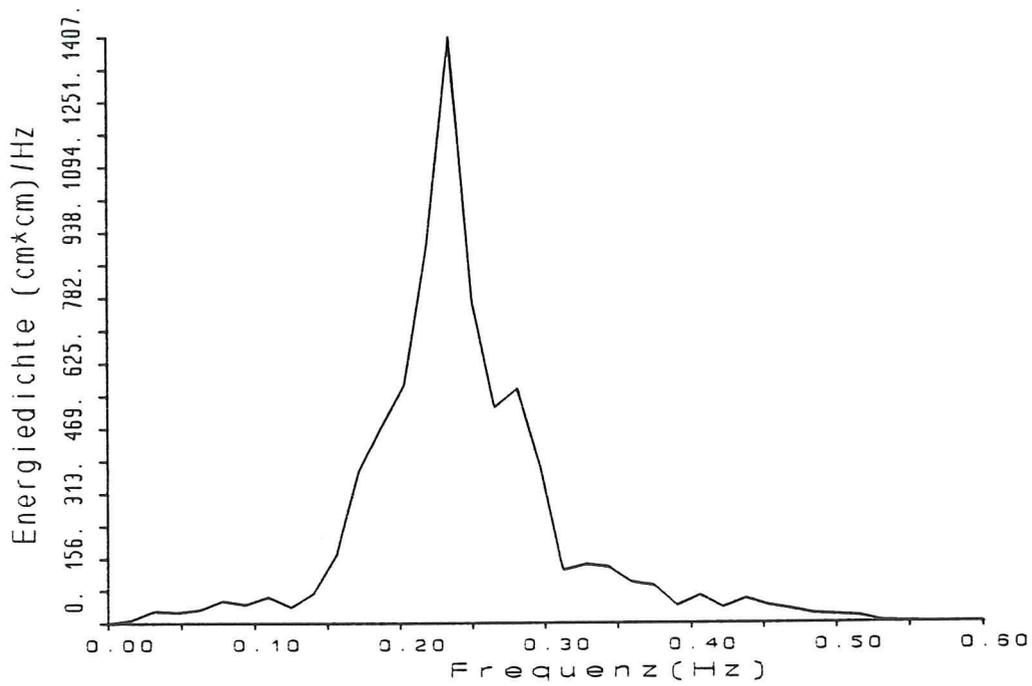


Abb. 82: Spektrum der Meßreihe 12; Cappeler Watt

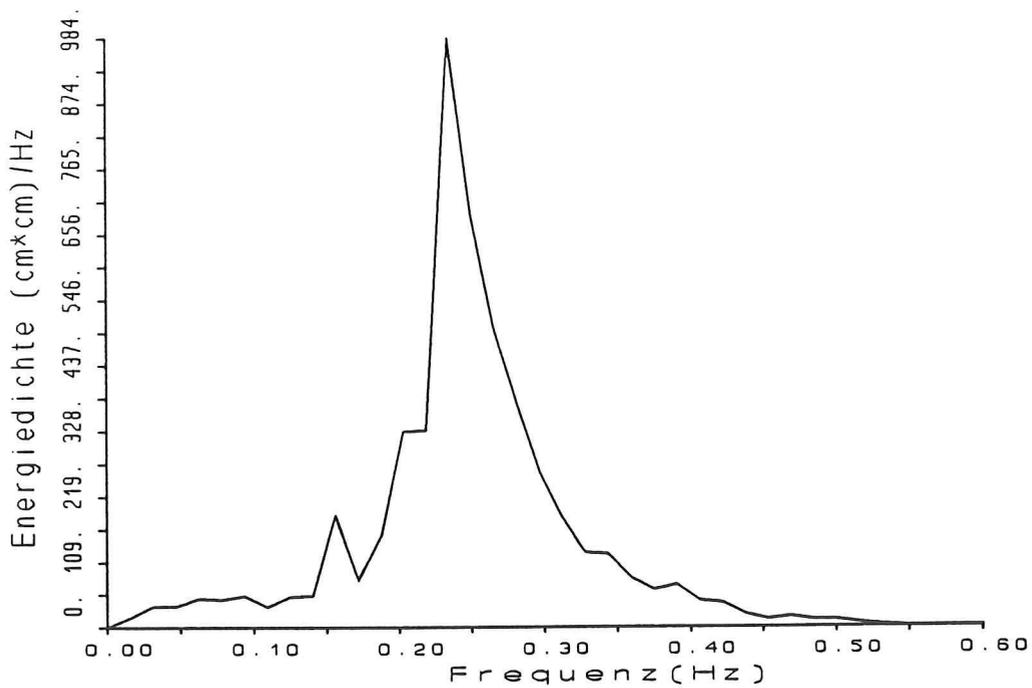


Abb. 83: Spektrum der Meßreihe 28; Cappeler Watt

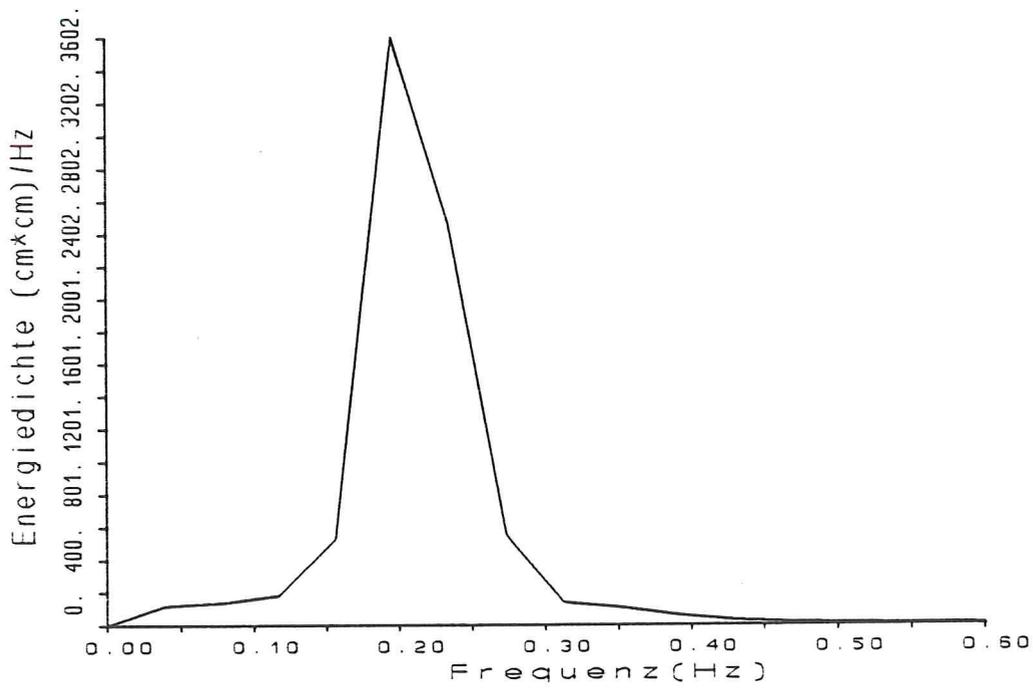


Abb. 84: Spektrum der Meßung 114; Holmer Siel

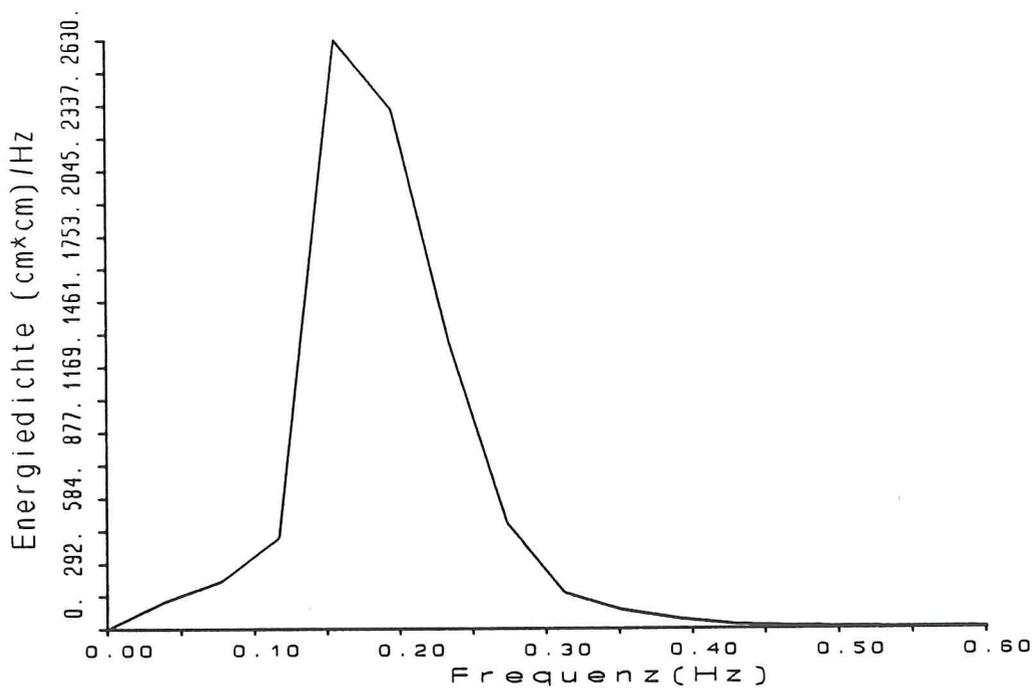


Abb. 85: Spektrum der Meßung 83; Holmer Siel

zuzuordnen ist. Der enthaltene längerperiodische Anteil (Abb. 83) ist sowohl nach Energiedichte als nach Frequenz als Dünung einzustufen. Für den Meßort Holmer Siel sind die Spektren der Meßreihen 83 und 114 untersucht worden, bei denen trotz erheblicher Unterschiede in den Windgeschwindigkeiten gleich hohe signifikante Wellenhöhen aufweisen. Darüber hinaus ist bei der Meßreihe 114 neben der um 11 m/s geringeren Windgeschwindigkeit auch der Wasserstand um 0,48 m niedriger (Tab. 4a). Auch die Gesamtenergie beider Spektren differiert nur geringfügig, während bei der Meßreihe 114 der Peak sogar höher und niederfrequenter ist (Tab. 4b), obwohl die Randbedingungen für die Seegangsentwicklung hinsichtlich Windgeschwindigkeit und Wassertiefen wesentlich ungünstiger sind. Die mittlere und insbesondere die Peakperiode sind hingegen - in Übereinstimmung mit den Randbedingungen der Seegangsentwicklung - beim Spektrum 83 länger und die höheren Windgeschwindigkeiten und größeren Wassertiefen bedingen erwartungsgemäß eine Energiekonzentration in einem längerperiodischen Bereich. (Tab. 4a u. b). Entgegen den Erfahrungen aus dem Seegebiet ist aber die Energiekonzentration um die Peakfrequenz bei den hohen Windgeschwindigkeiten schwächer ausgebildet (Abb. 84 u. 85), ohne daß ein Zerfall in mehrere Peaks eintritt, wie beispielsweise bei Spektren im Einzugsbereich des Norderneyer Seegats (Abb. 72 - 75). Hieraus kann geschlossen werden, daß der Seegang keine intensive Energieumwandlung durch Brandung erfahren hat, wie sie beispielsweise durch Platen von Ebbdeltas bewirkt wird [NIEMEYER 1987c, 1990]. Im ersten Analogieschluß erscheint es daher wenig wahrscheinlich, daß der Seegang im Einzugsgebiet der Hever durch deren Barrensysteem limitiert wird.

Ein Vergleich mit dem Spektrum 51 des Meßortes Everschopsiel-Ost (Abb. 86), das einer Meßreihe entstammt, die etwa zeitgleich unter vergleichbaren Randbedingungen erfaßt wurde (Tab. 4a), liefert aber deutliche Hinweise darauf, daß Wassertiefen im Untersuchungsgebiet bestimmende Randbedingung für den Seegang unter Sturmbedingungen sind. An diesem Meßort mit geringeren Wassertiefen als Holmer Siel sind mit Ausnahme der mittleren Periode alle kennzeichnenden Parameter erheblich kleiner als dort (Tab. 4b). Die übereinstimmende Peakperiode läßt ebenso wie die Form des Spektrums den Schluß zu, daß an beiden Meßorten im Tidebecken der Hever Seegang gleicher Entstehungs- und Erscheinungsform dominant ist. Von Bedeutung ist hierbei zum einen, daß Holmer Siel in unmittelbarer Wirkungslinie des Winds liegt, Everschopsiel aber nicht (Abb. 9). Zum anderen ist wesentlich, daß angesichts der Unterschiede in den meteorologischen Randbedingungen und der örtlichen Wassertiefen eine Verlagerung energiereicher Teile in andere Frequenzbereiche nicht erfolgt. In Zusammenhang mit den Zusammenhängen zwischen Stau und Windentwicklung mit der Seegangsausbildung ist demgemäß davon auszugehen, daß Sturmflut-Seegang im Einzugsgebiet der Hever primär von den Wassertiefen bestimmt wird. Gleiche Wellenhöhen für

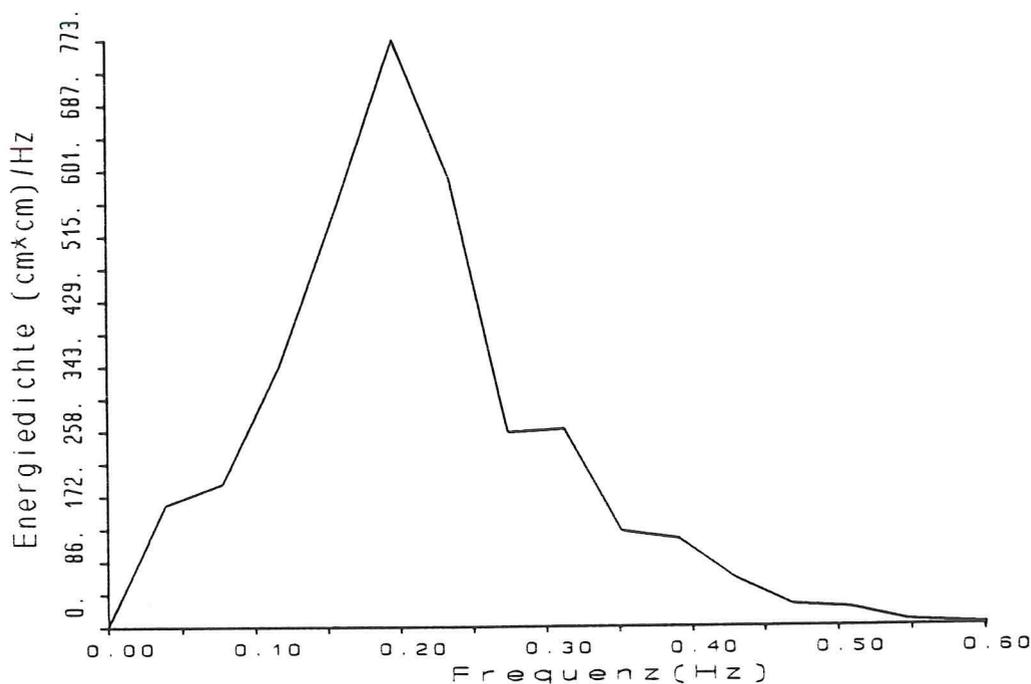


Abb. 86: Spektrum der Messung 51; Everschopsiel-Ost

verschiedenartige Randbedingungen, wie sie beispielsweise für die Spektren 83 und 114 am Meßort Holmsiel auftreten, lassen auf unterschiedliche Wellenhöhen-Wassertiefen-Verhältnisse im seewärts vorgelagerten Gebiet mit veränderten Dissipationsbedingungen schließen. Die Energieumwandlung erfolgt offenbar mit geringerer Intensität als beispielsweise auf den Riffbögen der ostfriesischen Seegaten. Die graduelle Veränderung der Spektren entspricht aber tendenziell der im ostfriesischen Watt, wofür auch die Verlagerung des Energiepeaks in höherfrequente Bereiche und die Verformung des Spektrums mit dem Ansatz zur Ausbildung von Nebenpeaks am Meßort Everschopsiel sprechen. Die im Vergleich zu den Spektren vom ostfriesischen Watt weniger ausgeprägte Transformation der Spektren ist wahrscheinlich auf die für die Seegangfortpflanzung günstigeren morphologischen Verhältnisse im Tidebecken der Hever zurückzuführen.

4.7 Flachwassereffekte

Für die Wechselwirkungen von Seegang und Sohle ist in den deterministischen Wellentheorien als physikalischer Grenzwert die relative Wassertiefe eingeführt, der Quotient von örtlicher Wassertiefe und der nach der Theorie zu der jeweiligen Periode gehörende Tiefwasserwellenlänge. Bei Unterschreiten des Grenzwertes

$$h/L_0 \leq 0,5$$

gilt, daß wellenerzeugten Strömungsfelder bis zur Sohle wirken, was für Seegang in Wattgebieten außerhalb der Rinnen der Regelfall ist. Hieraus resultieren mit abnehmenden Wassertiefen an Intensität zunehmende Wechselwirkungen, die physikalisch als Reibung, Refraktion, Shoaling und Perkolation differenziert werden können. Perkolation ist aber bei kohäsiven Sedimenten, die auf Watten das dominante Substrat bilden, vernachlässigbar. Shoaling und gegebenenfalls auch Refraktion bedingen eine soweit gehende Verformung des Seegangs, die letztendlich zur Instabilität führt, dem Brechen. Hierfür sind in verschiedenartiger Form Kriterien entwickelt worden, die zumeist auf die Formulierungen von MC COWAN [1894]

$$H/h \geq 0,78$$

und MICHE [1944]

$$H/L \geq 0,14 \cdot \tanh [(2\pi \cdot h)/L]$$

zurückgehen und nur in der Quantifizierung zumeist aber nicht im physikalischen Ansatz oder der Parametrisierung variieren. So hat SIEFERT [1974] das Brecherkriterium nach MC COWAN [1984] für Watten in

$$H/h \geq 1,0$$

modifiziert. Unter Zugrundelegung dieses Wertes und des Steilheitskriteriums nach MICHE [1944] ist bei früheren Untersuchungen [NIEMEYER 1983, 1984, 1991] festgestellt worden, daß auf den ostfriesischen Watten landseitig der Flutdeltas keine ausgeprägte Flachwasserbrandung zu erwarten ist, sondern lediglich Schaumkronenbrechen infolge übersteilter Wellen. Die hier untersuchten Steilheiten haben klar gezeigt, daß die Meßorte brandungsfrei sind. Dennoch ist die Wassertiefe parametrisch ein limitierender Faktor für den Seegang, wenngleich der funktionale Zusammenhang physikalisch als Wechselwirkungseffekt anzusehen ist, bei dem der Seegang als exogene Größe primär wirkt. Für die Watten im Einzugsgebiet des Norderneyer Seegats und der Leybucht an der ostfriesischen Küste sowie für das Uithuizer Watt an der westfriesischen Küste konnte dieser Wechselwirkungseffekt über die Parametrisierung der Wellenhöhen/Wassertiefen-Relation in einfacher Form dargestellt und quantifiziert werden (Abb. 3). In diesem Verhältnis spiegeln sich integral alle dämpfenden Wechselwirkungseffekte wieder, durch deren Einwirkungen der Wattseegang maßgeblich geprägt wird [NIEMEYER 1983, 1984, 1991]. Ein wesentliches Ziel dieser Naturuntersuchungen war, auch für andere Bereiche des Wattenmeeres an der deutschen Nordseeküste zu prüfen, ob dort vergleichbare Wechselwirkungen zwischen Seegang und Morphologie existieren und inwieweit daraus gegebenenfalls Ansätze für Bemessungszwecke abgeleitet werden können. Aufbauend auf bestehenden Erfahrungen wurden daher die kennzeichnenden Wellenhöhen H_{max} , H_s , H_m und die örtlichen Wassertiefen für alle Datensätze aller Meßorte - mit Ausnahme der drei Stationen im äußeren Eiderästur - zueinander in Relation gesetzt (Tab. 5).

Im Einzugsgebiet des Norderneyer Seegats konnten die seinerzeit für ein kleineres Datenkollektive gefundenen Zusammenhänge insoweit größenordnungsmäßig bestätigt werden, wie die Meßstationen an denselben Meßorten wie bei den damaligen Untersuchungen [LUCK & NIEMEYER 1976, 1977] oder in deren Nähe lagen (Abb. 10, Tab. 5). Die Abweichungen sind insgesamt nicht relevant, zumal - im Gegensatz zu den früheren Messungen - in den neueren Datensätzen ein wesentlicher Anteil von Daten enthalten ist, die bei Normaltiden und während Tidephasen in längeren zeitlichen Abständen vor und nach dem Hochwasserscheitel aufgezeichnet worden sind. Von daher ist es möglich, daß verschiedenartige Erscheinungsformen des Seegangs den jeweils dominanten Anteil in den erfaßten Zeitreihen bilden. Dabei können die Abhängigkeiten von den Wassertiefen stärker variieren als bei höheren Wasserständen und sturmgeprägtem Seegang. Deutlich wird dieser Zusammenhang auch an den wesentlich größeren Bandbreiten gemessener Wellenhöhen für bestimmte Wassertiefen (Abb. 87 - 89) im Bereich geringerer Wassertiefen, während diese Streuungen für größere Wassertiefen abnehmen.

Gebiet/Meßort	Parametrisierung		
	H_{\max}/h	H_g/h	H_m/h
Einzugsgebiet des Norderneyer Seegats			
Meßstation O.W.	0,37	0,25	1,15
Osterwarf	0,48	0,29	0,18
Norddeich	0,56	0,34	0,21
Roo Paal I	0,43	0,26	0,16
Roo Paal II	0,48	0,28	0,17
Grohde Polder	0,36	0,22	0,14
Wurster Watt	H_{\max}/h	H_g/h	H_m/h
Cappeler Watt	0,47	0,29	0,19
Cappeler Heller	0,47	0,31	0,21
Eiderästuar	H_{\max}/h	H_g/h	H_m/h
Süderhever	—	—	—
Außeneider I	—	—	—
Außeneider II	—	—	—
Purrenstrom	0,32	0,19	0,13
Eiderdamm – Süd	0,34	0,22	0,16
Einzugsgebiet der Hever	H_{\max}/h	H_g/h	H_m/h
Everschopsiel – West	0,59	0,38	0,24
Everschopsiel – Ost	0,33	0,20	0,13
Strucklahnungshörn	0,27	0,16	0,10
Holmer Siel	0,35	0,21	0,14

Tab. 5: Verhältnis kennzeichnender Wellenhöhen und Wassertiefen

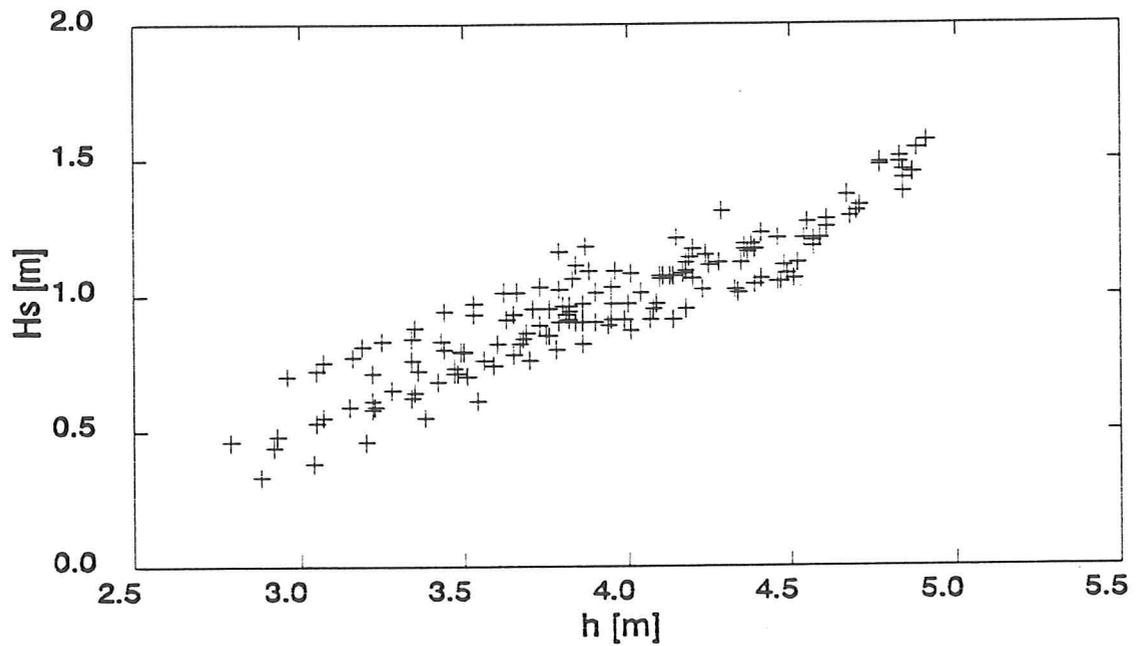


Abb. 87: Zusammenhang von signifikanten Wellenhöhen und örtlichen Wassertiefen; Meß-Station O.W

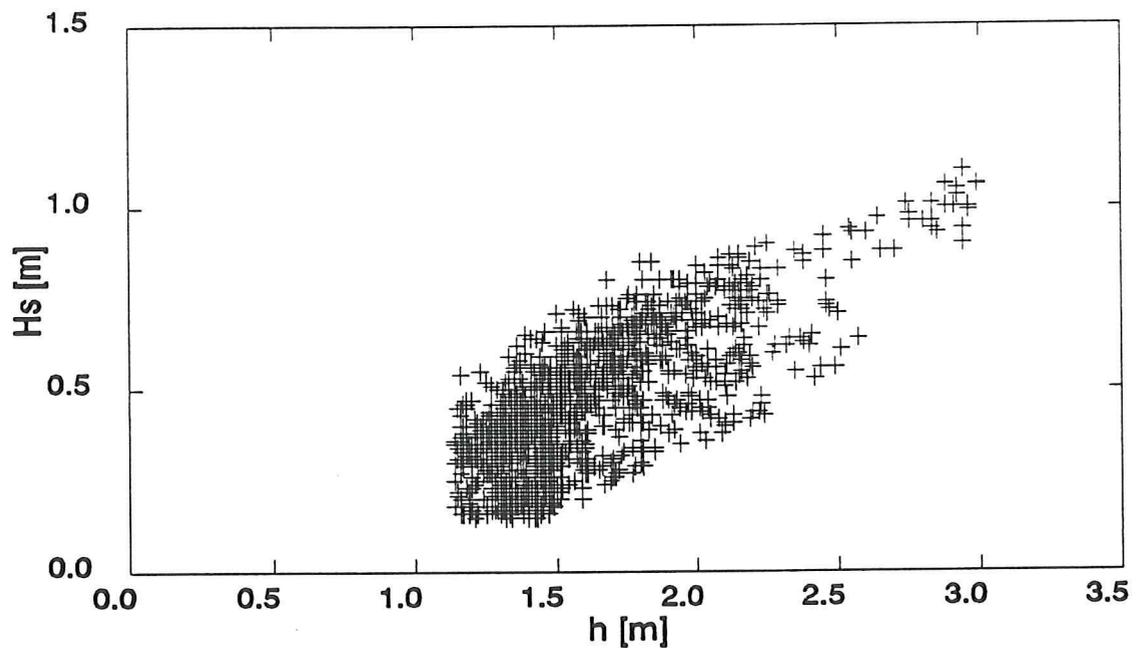


Abb. 88: Zusammenhang von signifikanten Wellenhöhen und örtlichen Wassertiefen; Osterwarf

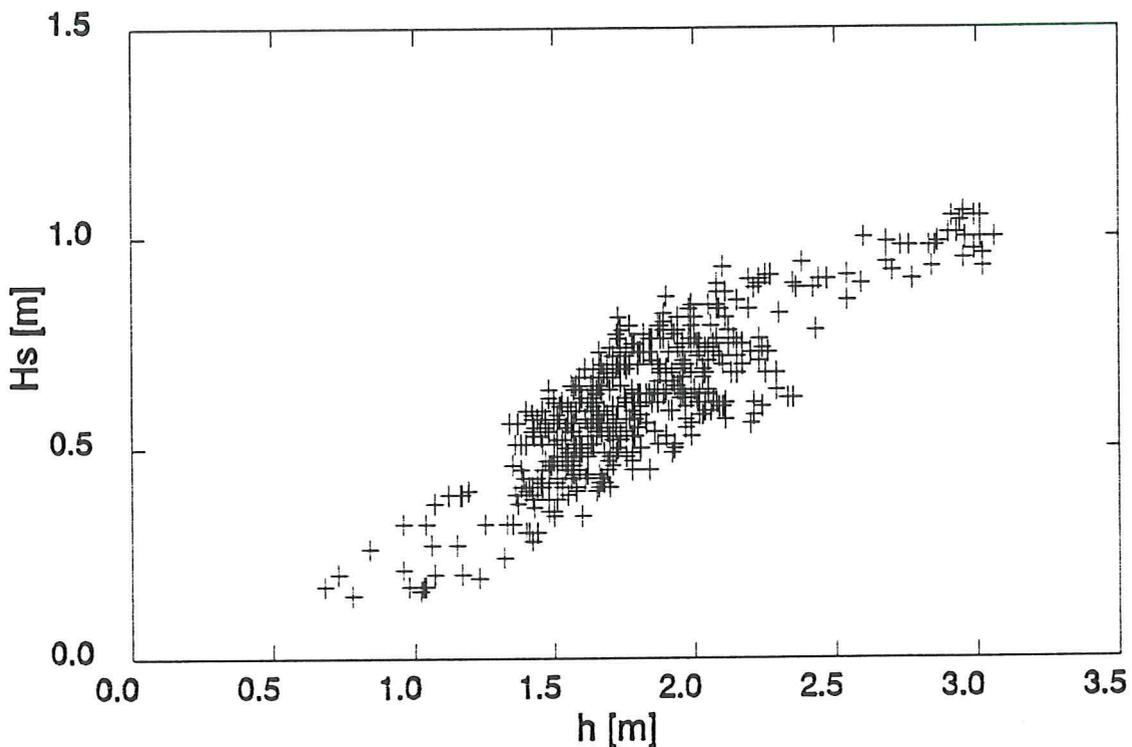


Abb. 89: Zusammenhang von signifikanten Wellenhöhen und örtlichen Wassertiefen; Norddeich

Um hierüber näheren Aufschluß zu erhalten, wurden an der Station Osterwarf Datensätze ausgewählt, bei denen die Randbedingungen Windgeschwindigkeiten und -richtungen nur wenig variieren. Beim Richtungssektor $240^\circ - 250^\circ$, bei dem örtliche Windsee zu erwarten ist, wachsen bei Windgeschwindigkeiten im unteren Bereich von Beaufort 8 die signifikante Wellenhöhen tendenziell mit den Wassertiefen (Abb. 90). Ab einem Schwellenwert von etwa

$$h \approx 1,75 \text{ m}$$

tritt eine Streuung ein. Der erkennbare tendenzielle Zusammenhang hat bei den größeren Wassertiefen die Funktion eines Grenzwertes, der mehrfach deutlich unterschritten wird. Als ursächliche Erklärung läßt sich eine These finden, die aber nicht mit hinreichender Sicherheit bestätigt oder verworfen werden kann. Möglicherweise bildet sich bei größeren Wassertiefen über den ausgedehnten Flachwasserbereichen im Einzugsgebiet der Osterems ortsständiger Seegang auch soweit aus, daß er zum Teil beim Einschwingen auf die Watten brandet. Bei auflandigem Wind aus dem Sektor $290^\circ - 298^\circ$ und Windgeschwindigkeiten im oberen Bereich von Beaufort 5 tritt bis zu einem unteren und ab einem oberen

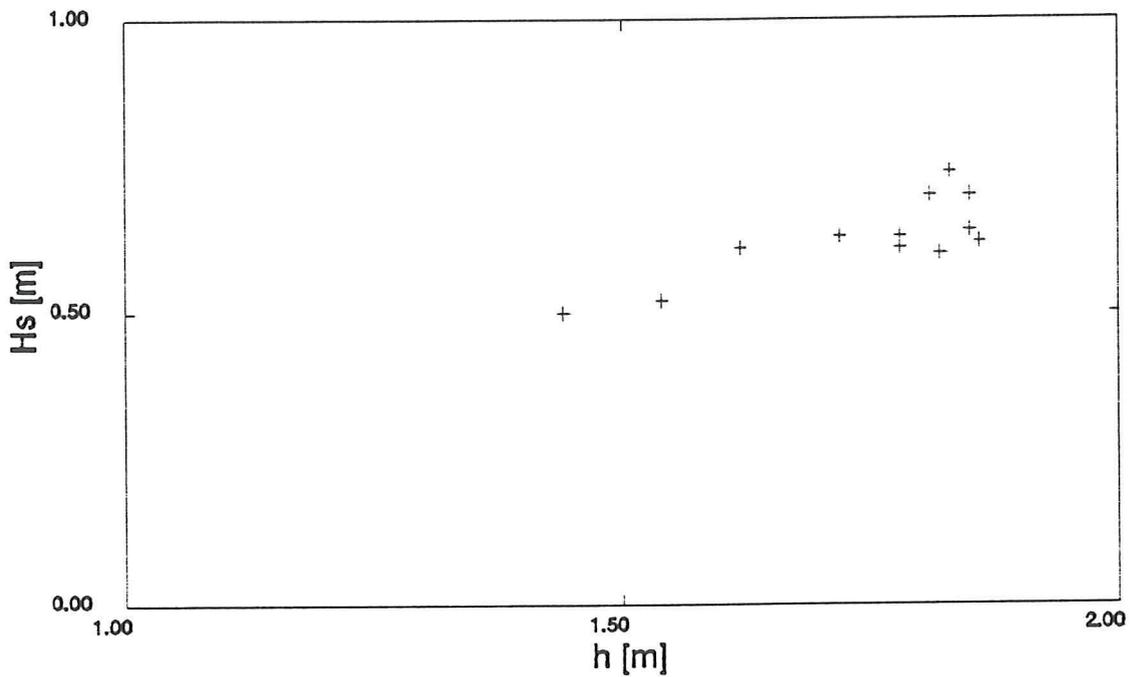


Abb. 90: Zusammenhang von signifikanten Wellenhöhen und örtlichen Wassertiefen; Osterwarf (Sektor der Windrichtung 240-250°)

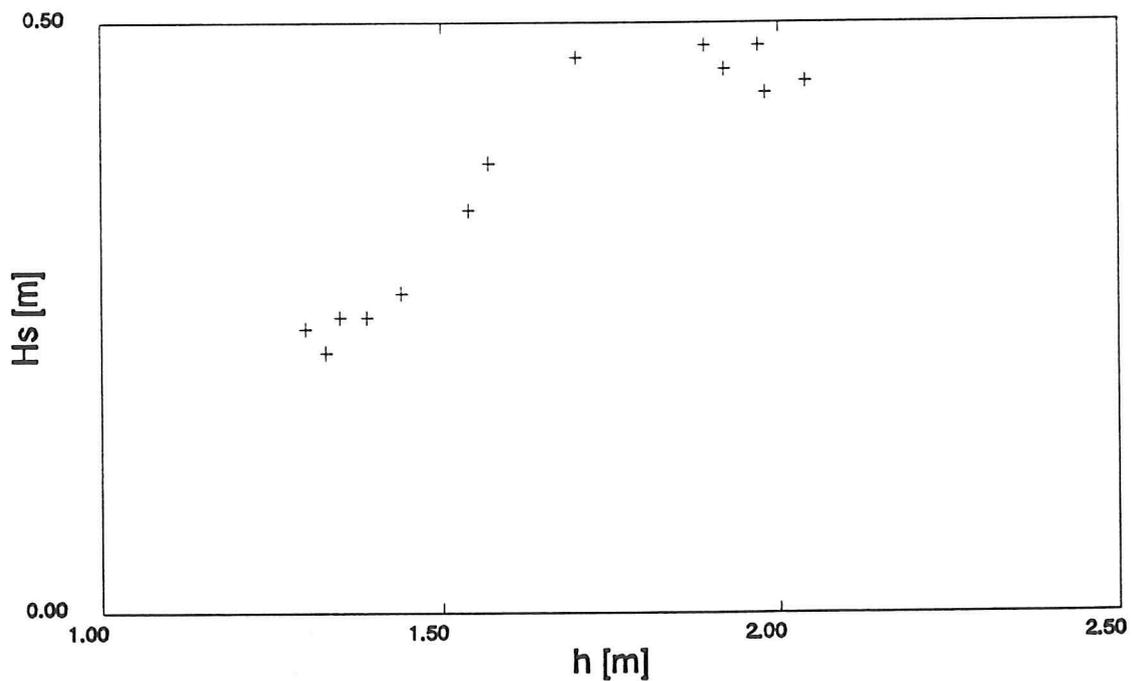


Abb. 91: Zusammenhang von signifikanten Wellenhöhen und örtlichen Wassertiefen; Osterwarf (Sektor der Windrichtungen 290-298°)

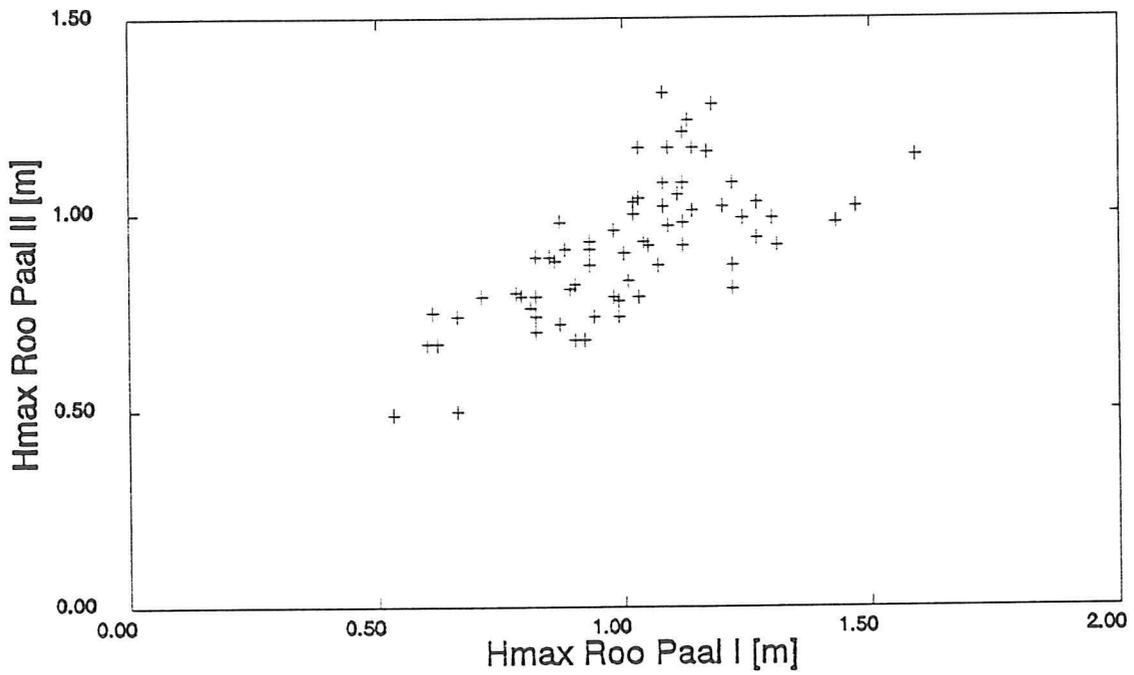


Abb. 92: Verhältnis der maximalen Wellenhöhen see- und landseitig einer Lahnung; Roo Paal II und Roo Paal I

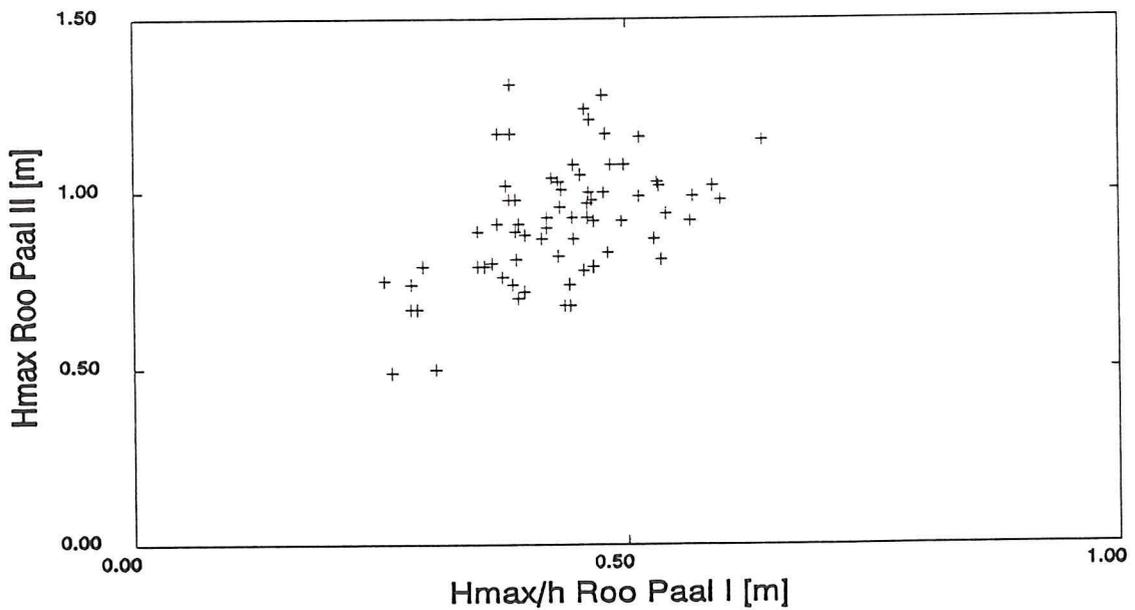


Abb. 93: Zusammenhang der max. Wellenhöhen landseitig einer Lahnung mit dem Verhältnis max. Wellenhöhen und örtlichen Wassertiefen see-seitig der Lahnung; Roo Paal II und Roo Paal I

Schwellenwert keine Zunahme der signifikanten Wellenhöhen bei wachsenden Wassertiefen ein; diese beschränkt sich auf den Höhenbereich

$$1,4 \leq h \leq 1,7 \text{ m}$$

(Abb. 91). Offensichtlich wird der bei diesen meteorologischen Randbedingungen aus der Nordsee einschwingende Seegang bei geringeren Wassertiefen bereits im Vorfeld des Meßortes soweit gedämpft, das er dort nicht signifikant in Erscheinung tritt. Oberhalb einer bestimmten Wassertiefe erfolgt offensichtlich kein Import energiereicheren Seegangs mehr, der die günstigeren Ausbreitungsbedingungen weitgehender nutzen kann.

Einer gesonderten Betrachtung sollen hier noch die Daten der Stationen Roo Paal I und II unterzogen werden, da sie Hinweise zur hydrodynamischen Wirksamkeit von Lahnungen in Wattbereichen liefern, die außerhalb der Bereiche mit Sedimentationstendenz liegen und somit erheblich stärkere Niveausprünge zur natürlichen Umgebung aufweisen als Lahnungen in typischen aquatischen Verlandungsbereichen. Eine Gegenüberstellung der maximalen Wellenhöhen (Abb. 92), für die naturgemäß die intensivste Dämpfung zu erwarten ist, zeigt an, daß in der Tendenz Wellen oberhalb eines Schwellenwertes landseitig der Lahnungen nicht mehr auftreten. Die Differenz entspricht aber in etwa derjenigen der örtlichen Watt Höhen see- und landwärts der Lahnungen. Zur Objektivierung werden daher die im Lahnungsfeld gemessenen maximalen Wellenhöhen der Wellenhöhen-Wassertiefen-Relation gegenübergestellt, die seewärts der Lahnung gemessen wurde (Abb. 93). Eine Systematik, die etwa mit dem Brecherkriterium nach MC COWAN [18-94] in Einklang zu bringen wäre, läßt sich aber auch hieraus nicht ableiten. Als einzig abgesichertes Ergebnis kann daher nur festgehalten werden, daß die Wellenhöhen landwärts der Lahnung sowohl höher als auch niedriger sind als see-seitig und daß oberhalb eines Schwellenwertes von etwa

$$h \approx 2,55 \text{ m}$$

eine nennenswerte Dämpfung nicht stattfindet (Abb. 94), sondern innerhalb des Lahnungsfeldes höhere Wellen auftreten als seeseitig davon. Möglicherweise überlagern Reflektionen die Vorgänge in zufallsgeprägter Form und erschweren somit die Analyse. Hier wird für die nächste Zukunft vermehrter Bedarf an Naturmessungen gesehen.

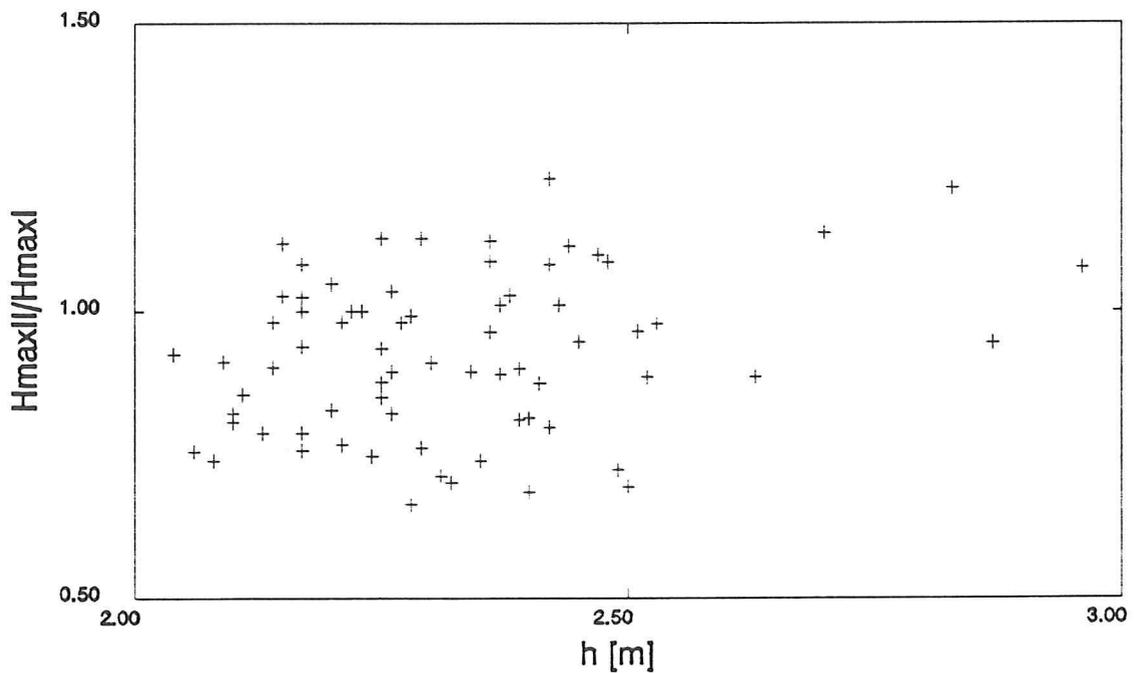


Abb. 94: Transformationsfaktor der max. Wellenhöhen land- und seeseitig einer Lahnung; Roo Paal II und Roo Paal I

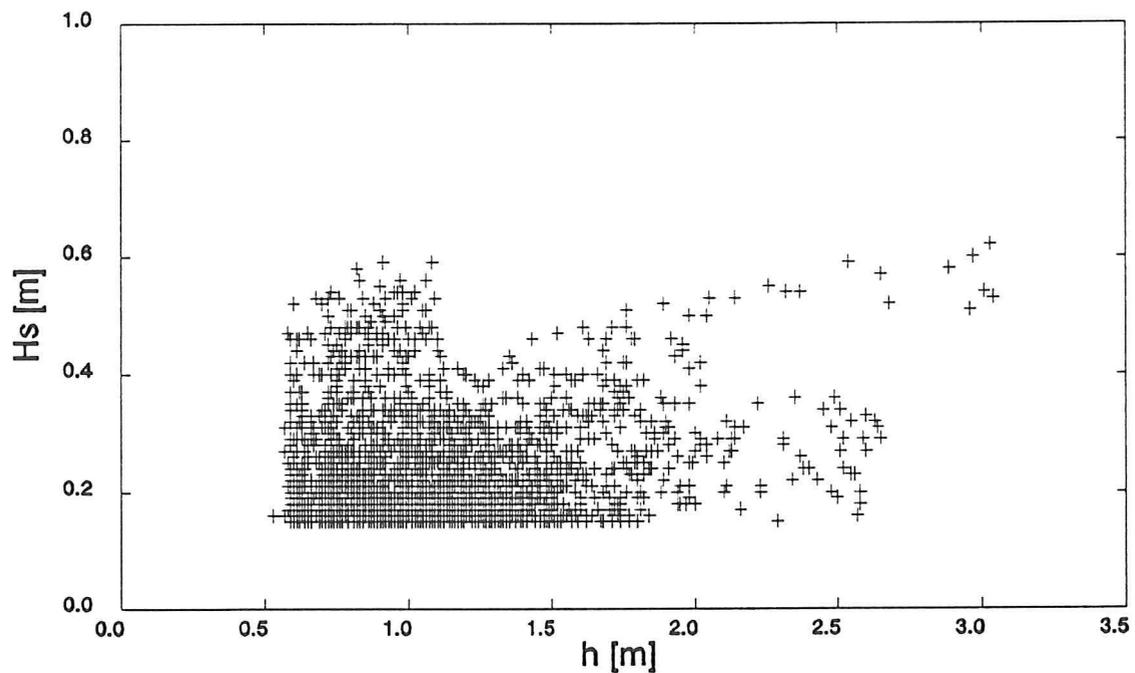


Abb. 95: Zusammenhang von signifikanten Wellenhöhen und örtlichen Wassertiefen; Grohde Polder

Im Rahmen dieses Meßprogramms wurde erstmals Seegang an der Wattenküste von Norderney und - soweit bekannt - damit erstmals an der Binnenseite einer Insel im Wattenmeer der deutschen Nordseeküste gemessen. Die Verhältniswerte für die Station Grohde Polder (Tab. 5 u. Abb. 95) weichen deutlich von denen an den anderen Stationen im Einzugsbereich des Norderneyer Seegats ab. Ein vergleichbar enger Zusammenhang zwischen Wellenhöhen und Wassertiefen wie für die Bereiche festlandsnaher Watten existiert - auch für den Bereich größerer Wassertiefen - nicht. Hinsichtlich der Verhältniswerte ist aber anzumerken, daß diese Station in Zusammenhang mit ökologischen Untersuchungen [DAMM-BÖCKER, KAISER & NIEMEYER 1992] auch im Sommer bei ruhigen Wetterlagen betrieben worden ist.

Allerdings wird möglicherweise bei höheren Sturmfluten als den hier gemessenen ein Effekt auftreten, bei dem die Wassertiefen nicht als Randbedingung für zu erwartenden Seegang anzusehen sind, sondern als oberer Grenzwert. Diese These ist für zwei enge Bereiche von Windgeschwindigkeiten aus einem schmalen Sektor von Windrichtungen, bei denen ortsständiger Seegang zu erwarten ist, geprüft worden (Abb. 96 u. 97): Für den Unteren der beiden Geschwindigkeitsbereiche im Übergang von Beaufort 7 auf 8 ist der tendenzielle Zusammenhang zwischen Wassertiefen und signifikanten Wellenhöhen - bei Streuungen im unteren Bereich und einer Abschwächung im oberen - eindeutig (Abb. 96). Für den Zweiten, im oberen Bereich von Beaufort 8 liegenden Geschwindigkeitsbereich tritt ein Paradoxon auf: mit wachsenden Wassertiefen nehmen am Meßort die Wellenhöhen ab (Abb. 97). Eine abschließende Erklärung kann hier nicht geliefert werden, aber eine These: Bei sehr hohen Windgeschwindigkeiten und zunehmenden Wassertiefen bildet sich in den relativ zum Meßort tieferliegenden Wattgebieten im Wurzelbereich des Seegats so hoher Seegang aus, der auf den Übergang von den Rinnen zum hochgelegenen Inselwatt bricht.

Insgesamt ist aber aus den Ergebnissen der Schluß zu ziehen, daß selbst bei hohen Sturmfluten auf ostfriesischen Inselwatten keine stärkere Seegangsbelastung zu erwarten ist als bei örtlicher Windsee möglich. Die Gegebenheit, daß der auf die Inselwatten einschwingende Seegang sich unter diesen Randbedingungen zum Teil gegen den Wind ausbreiten muß, erhärtet diese Folgerung. Ebenso lassen die Ergebnisse, die mit dem mathematischen Seegangsmodell HISWA für das Einzugsgebiet des Norderneyer Seegats ermittelt worden sind [NIEMEYER, KAISER & DEN ADEL 1992], den Schluß zu, daß bisherige Annahmen zur Seegangsbelastung wattseitiger Inseldeiche zu hoch waren.

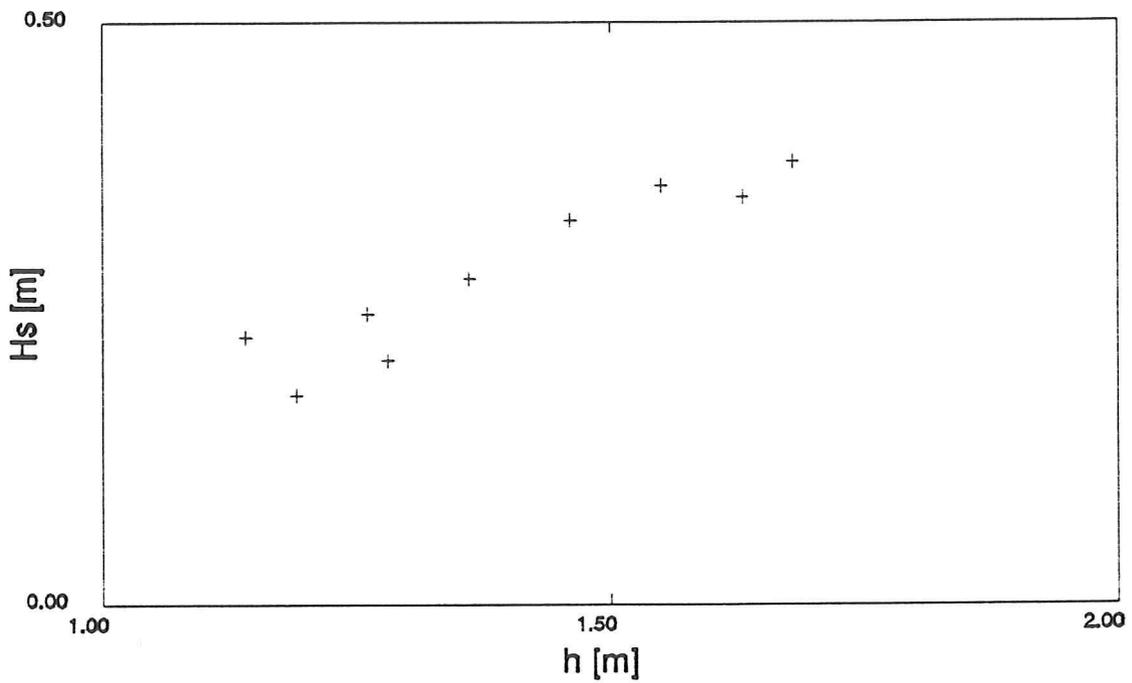


Abb. 96: Zusammenhang von signifikanten Wellenhöhen und örtlichen Wassertiefen; Grohde Deich (Sektor der Windrichtungen 237-247°)

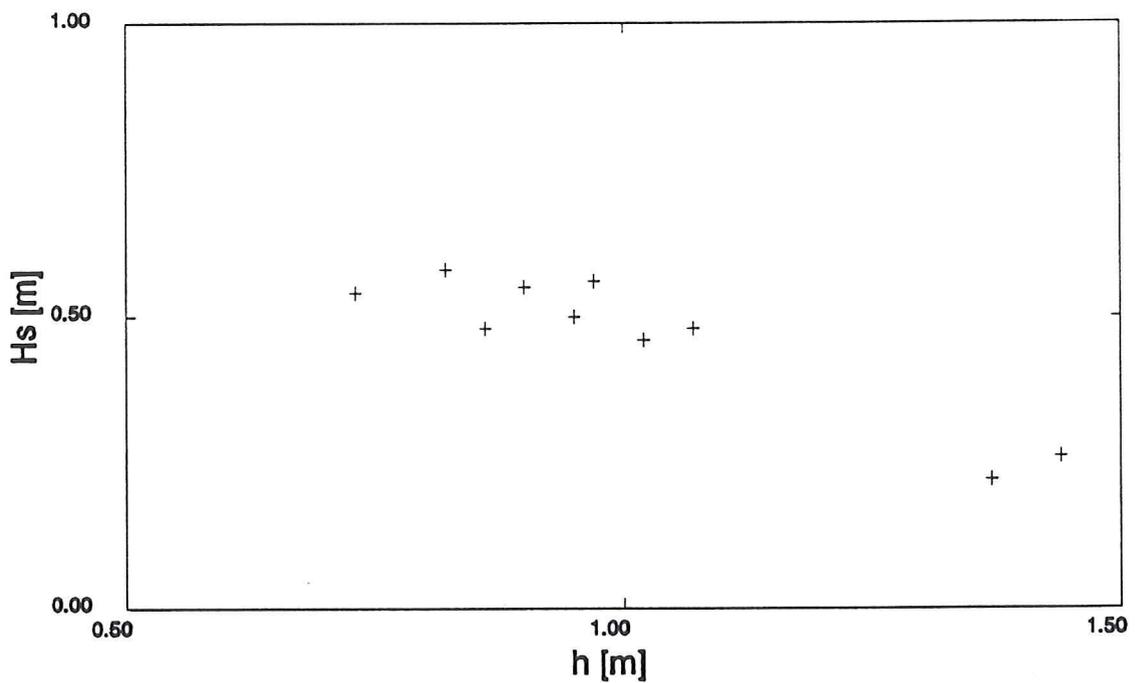


Abb. 97: Zusammenhang von signifikanten Wellenhöhen und örtlichen Wassertiefen; Grohde Deich (Sektor der Windrichtungen 237-247°)

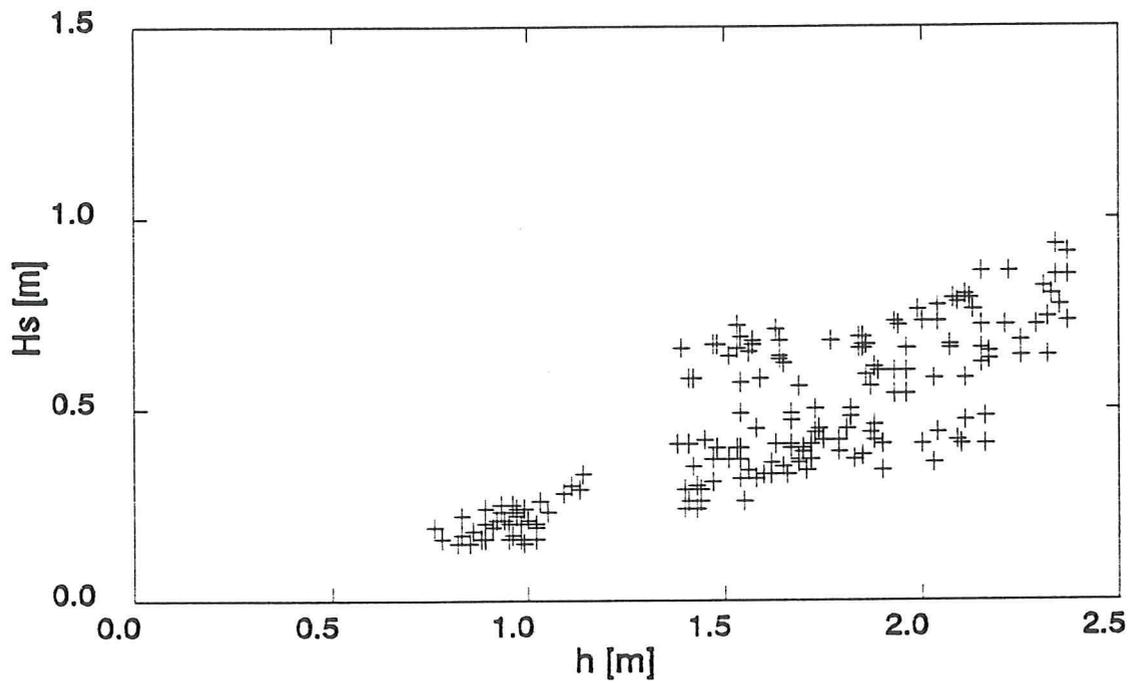


Abb. 98: Zusammenhang von signifikanten Wellenhöhen und örtlichen Wassertiefen; Cappel Tief 1

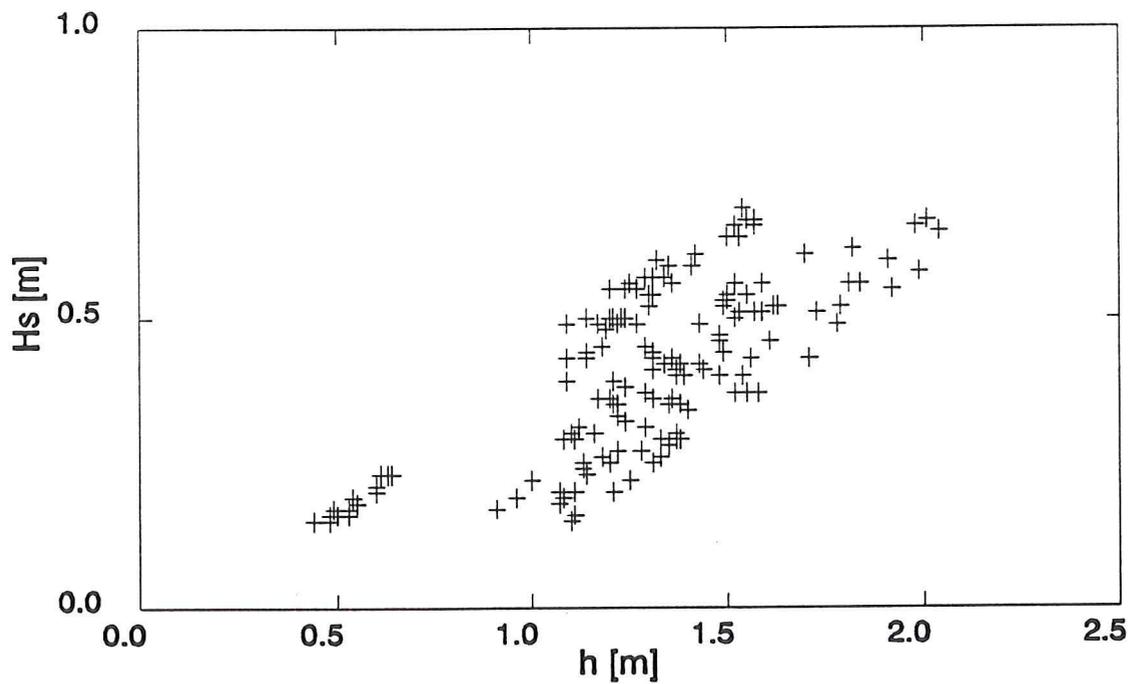


Abb. 99: Zusammenhang von signifikanten Wellenhöhen und örtlichen Wassertiefen; Cappel Tief 2

Die Daten für das Wurster Watt weisen deutliche Analogien zu den Stationen auf den festlandsnahen Watten im Einzugsgebiet des Norderneyer Seegats auf (Tab. 5): Die Verhältniswerte weisen die gleiche Größenordnung auf und ebenso sind zwei sich überlagernde, parallele Tendenzen für Bereiche niedrigerer und höherer Wasserstände und eine Abnahme der Streubreite der Wellenhöhen für größere Wassertiefen zu erkennen (Abb. 98), wobei die relativ zur Wassertiefe höheren Wellen erst ab Überschreiten einer bestimmten Wassertiefe auftreten. Zum einen lassen diese Daten eindeutig den Schluß zu, daß beide Tendenzen jeweils einer unterschiedlichen Erscheinungsform des Seegangs zuzuordnen ist, was in Übereinstimmung mit den Untersuchungsergebnissen zur Abhängigkeit der Wellenentwicklung vom Stau und vor allem mit den Erkenntnissen aus der Spektralanalyse steht. Zum anderen wird hieran deutlich, daß die Wechselwirkung von Seegang und Wattmorphologie quantitativ in Abhängigkeit von der jeweiligen Erscheinungsform variiert, ohne das hieraus aber morphologische Folgewirkungen abgeleitet werden können. Die Übereinstimmung der Kennwerte an beiden Stationen bestätigt, daß auch für diesen ästuarinen Wattbereich Zusammenhänge hinsichtlich eines dynamischen Gleichgewichts gelten, wie sie für inselgeschützte Watten in den Einzugsgebieten verschiedener Seegaten im west- und ostfriesischen Wattenmeer gefunden worden sind [NIEMEYER 1983, 1984, 1987a, 1987b, 1991]: Ebenso wie auf den vorgelagerten Watten stellt sich über Wechselwirkungen in den aquatischen Verlandungsbereichen und auf den Salzwiesen ein gleichartiger Zusammenhang ein, der durch ein im Mittel konstantes Verhältnis von Wellenhöhen und Wassertiefen gekennzeichnet ist (Abb. 98 u. 99).

Die auf den Watten des Eiderästuars gelegenen Stationen Purrenstrom und Eiderdamm-Süd weisen analog zu den Meßorten im Tidebecken des Norderneyer Seegats und des Wurster Wattes Wellenhöhen-Wassertiefen-Relationen auf, die deutlich unterhalb des Grenzwertes für Flachwasserbrandung liegen (Tab. 5, Abb. 100 u. 101). Aber die Schwellenwerte für das Durchsetzen von Seegang aus dem äußeren Ästuar liegen hier deutlich höher als in den anderen Untersuchungsgebieten, insbesondere an der Station Purrenstrom (Abb. 100). Hier wachsen die Wellenhöhen aber stärker bei wachsenden Wassertiefen als an der Station Eiderdamm-Süd (Abb. 101). Stärkere Streuungen sind bei Wassertiefen bis etwa

$$h \leq 2,5 \text{ m}$$

an der Station Eiderdamm-Süd erkennbar, die wegen der geringen Wellenhöhen auf Dünung zurückzuführen sind. Insgesamt stehen die Wellenhöhen auf den Watten des Eiderästuars in einem engeren Zusammenhang mit den Wassertiefen

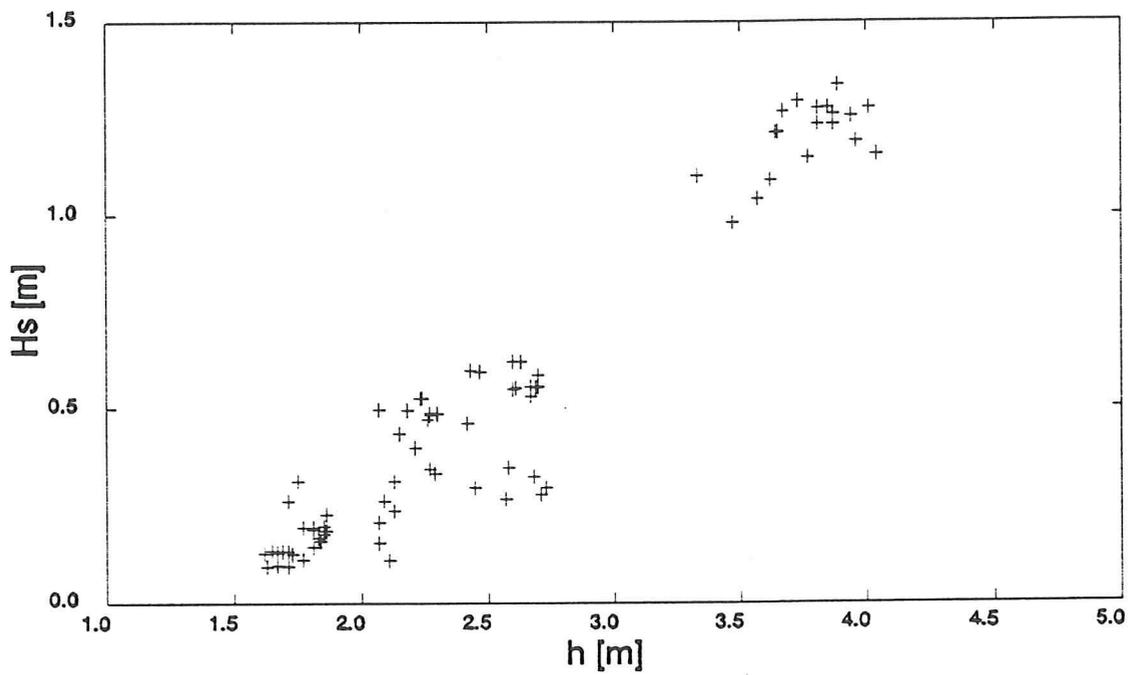


Abb. 100: Zusammenhang von signifikanten Wellenhöhen und örtlichen Wassertiefen; Purrenstrom

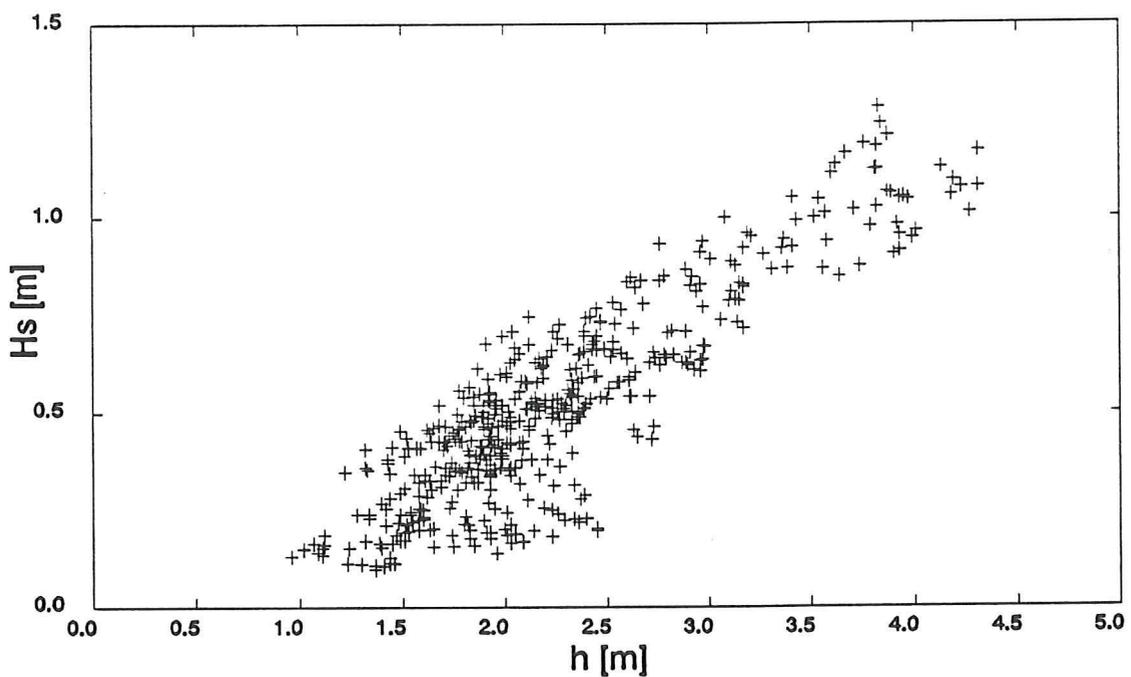


Abb. 101: Zusammenhang von signifikanten Wellenhöhen und örtlichen Wassertiefen; Eiderdamm-Süd

als mit den Windgeschwindigkeiten, wengleich auch dieser Zusammenhang deutlich ist (Abb. 39 u. 40).

Auch im Einzugsgebiet der Hever stehen Wassertiefen und Wellenhöhen grundsätzlich in einem ähnlich engen Zusammenhang (Tab. 5, Abb. 102 - 105) wie in den anderen Untersuchungsgebieten. Wesentlicher Unterschied ist aber, daß dieser Zusammenhang an den Meßorten Everschopsiel-Ost und -West, die nicht immer in unmittelbarer Wirkungsrichtung des Windes liegen, insbesondere bei höheren Wasserständen enger sind als an den Stationen Strucklahnungshörn und Holmer Siel. Insbesondere die Daten der im supratidalen Bereich gelegenen Station Everschopsiel-West (Abb. 103) lassen erkennen, daß die Streuungen an den anderen Stationen auf unmittelbare Windeinwirkungen zurückzuführen sind. Insgesamt ist festzuhalten, daß mit variabler Toleranz an allen Meßorten im Tidebecken der Hever der Wattseegang primär durch die Wassertiefen bestimmbar ist. In Zusammenhang mit den Untersuchungsergebnissen zu den Zusammenhängen von Seegang mit Stau- und Windentwicklung kann festgestellt werden, daß die Ableitung von Bemessungswerten aus Wellenhöhen-Wassertiefen-Relationen auch in diesem Untersuchungsgebiet derzeit das beste verfügbare Verfahren darstellt, wenn - wie seinerzeit für die ostfriesischen Watten [NIEMEYER 1983] - die örtliche Variabilität durch eine Sicherheitsmarge berücksichtigt wird. Bisher für Teilbereiche des Einzugsgebietes der Hever aufgestellte Bemessungswerte [FÜHRBÖTER 1988], die von einem proportionalen Wachsen des Seegangs in Abhängigkeit vom Wind ausgingen, sollten im Lichte dieser Erkenntnisse neu bestimmt werden. Evident wird die Richtigkeit dieser Aussage bei Berücksichtigung der quantitativen Unterschiede in den Wellenhöhen-Wassertiefen-Relationen (Tab. 5), die über die Windeinwirkung nicht erfaßbar sind. Im Grundsatz sind die Verhältnisse hier mit den im Tidebecken des Norderneyer Seegats gefundenen Unterschieden der Werte für die in unmittelbarer Wirkrichtung des Segats und im Inselschatten liegenden Meßorten vergleichbar.

Die Wellenhöhen-Wassertiefen-Relationen der Stationen im Tidebecken der Hever lassen darüber hinaus Schlußfolgerungen hinsichtlich seegangsbedingter hydrodynamisch-morphologischer Wechselwirkungen zu. Die für den Wattbereich beim Holmer Siel erwartete Verlandung [WL 1989] wird nur dann eintreten, wenn morphologische Änderungen im seeseitigen Vorfeld zu einer Dämpfung des örtlichen Seegangs führen. Ein Vergleich mit dem Meßort Strucklahnungshörn (Tab. 5, Abb. 104 u. 105), der in einem morphologisch stabilen Bereich liegt, macht deutlich, daß bei Holmer Siel keine seegangsbedingte Verlandung [NIEMEYER 1991] zu erwarten ist.

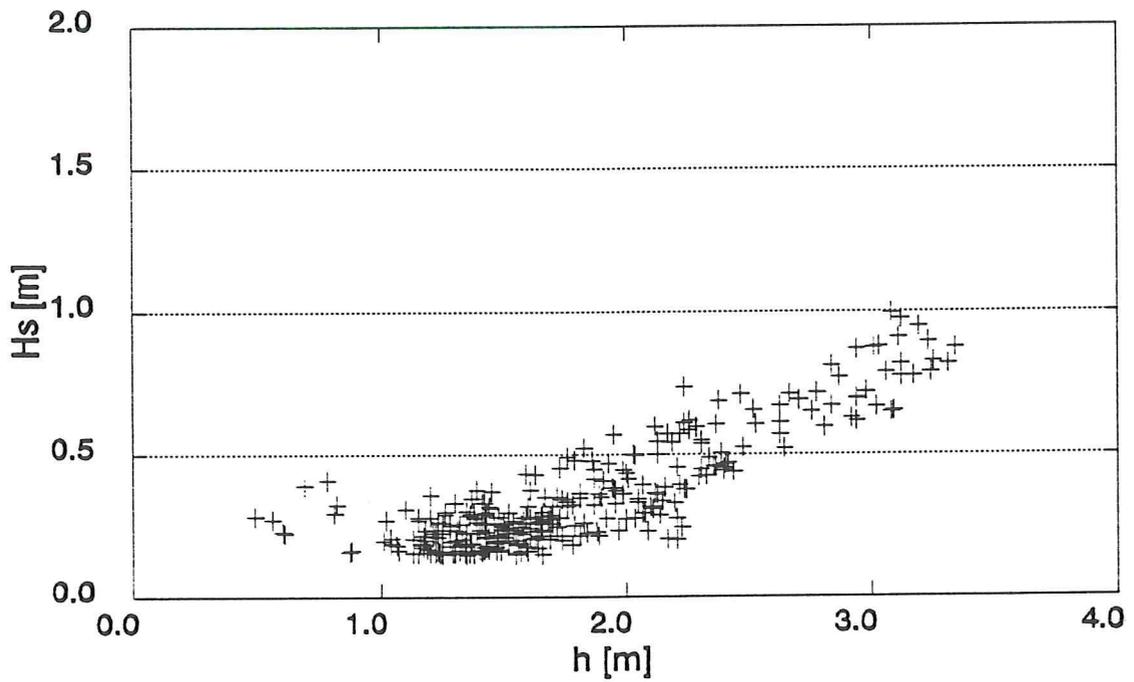


Abb. 102: Zusammenhang von signifikanten Wellenhöhen und örtlichen Wassertiefen; Everschopsiel Ost

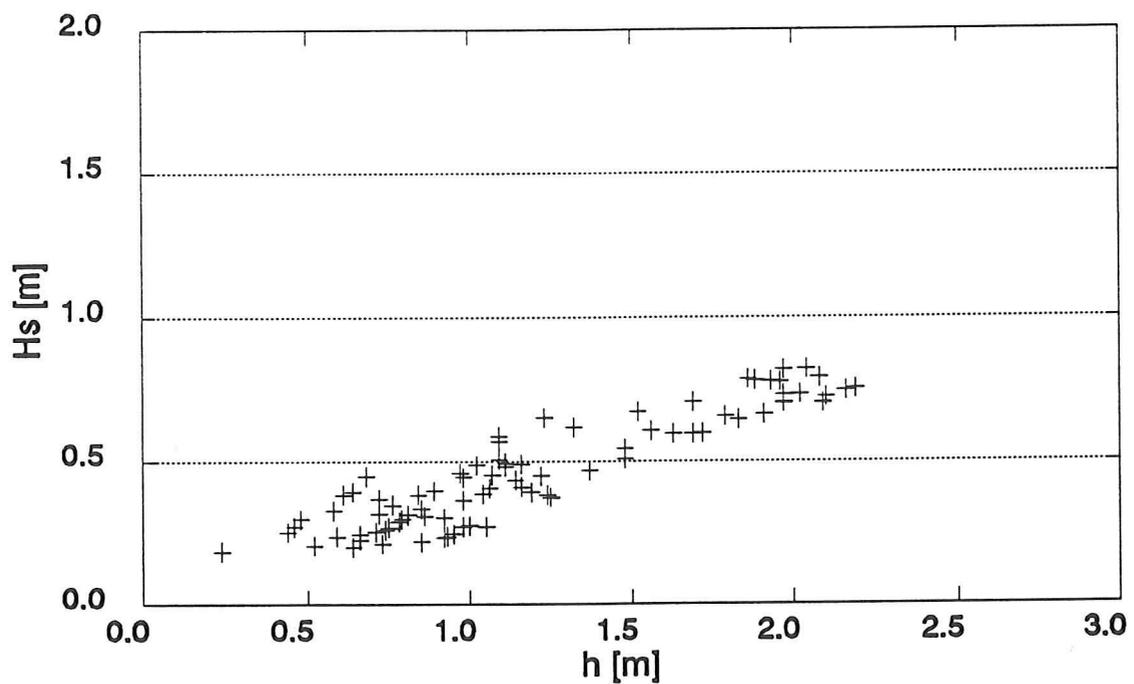


Abb. 103: Zusammenhang von signifikanten Wellenhöhen und örtlichen Wassertiefen; Everschopsiel West

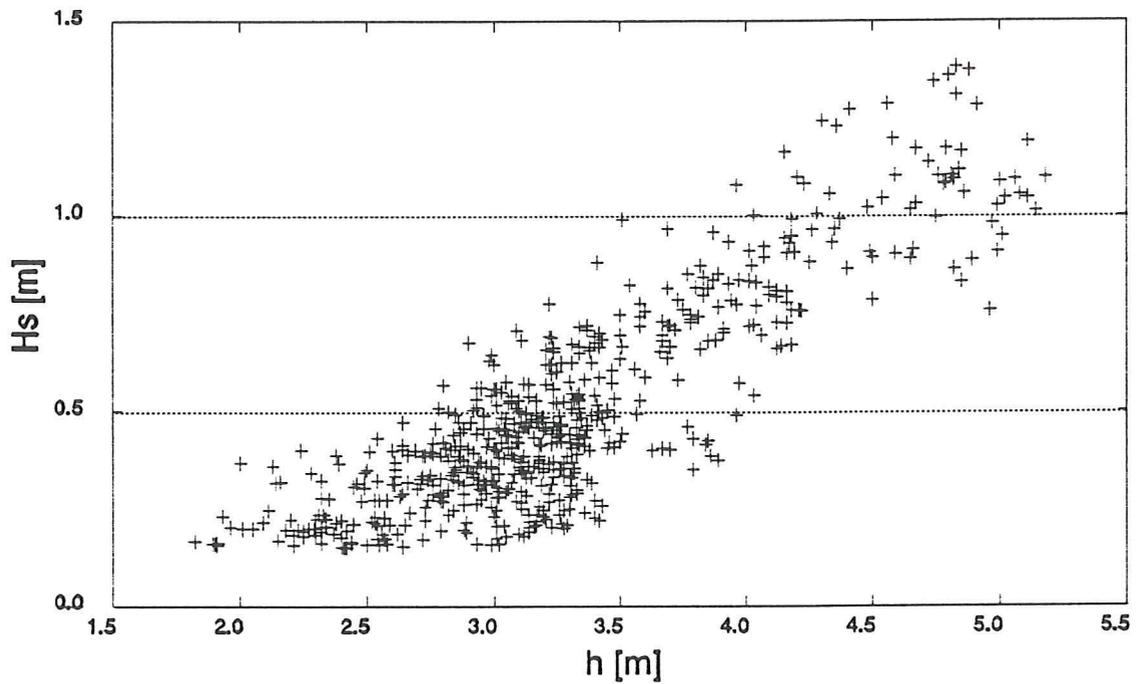


Abb. 104: Zusammenhang von signifikanten Wellenhöhen und örtlichen Wassertiefen; Strucklahnungshörn

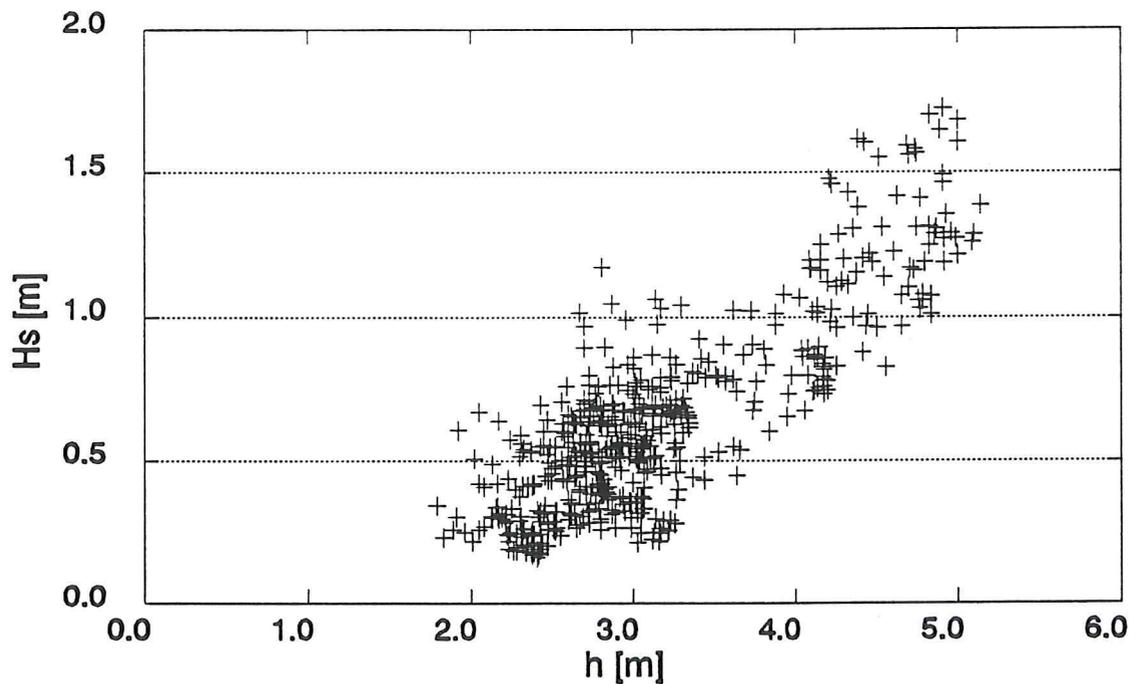


Abb. 105: Zusammenhang von signifikanten Wellenhöhen und örtlichen Wassertiefen; Holmersiel

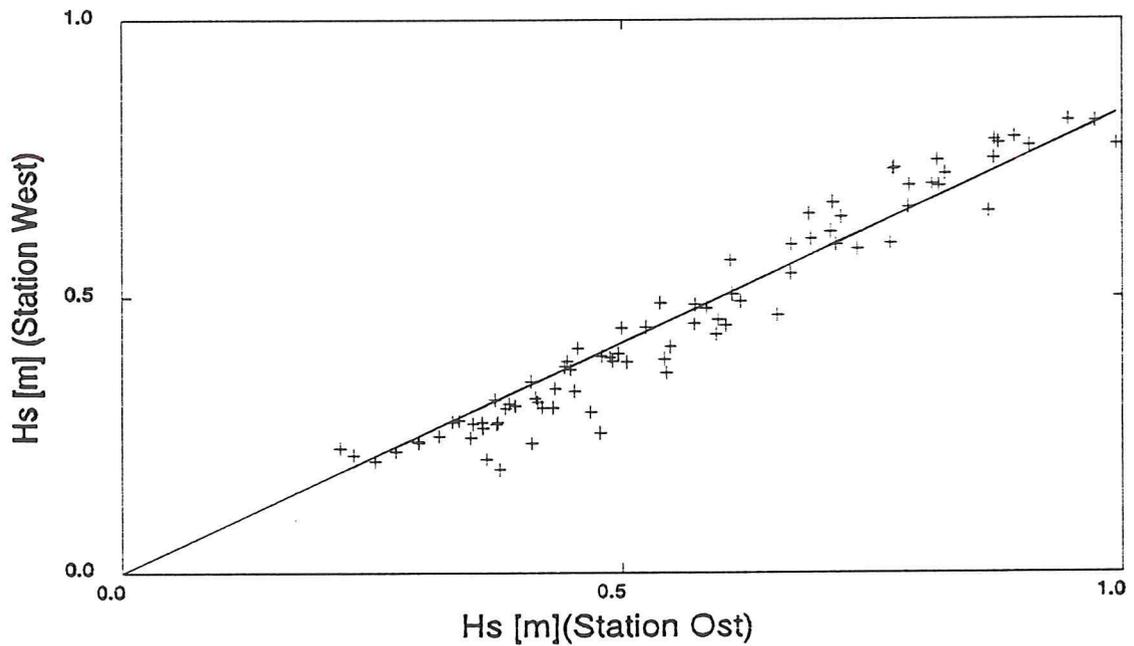


Abb. 106: Zusammenhang von signifikanten Wellenhöhen auf dem Deichvorland im Watt; Everschopsiel West und Everschopsiel Ost

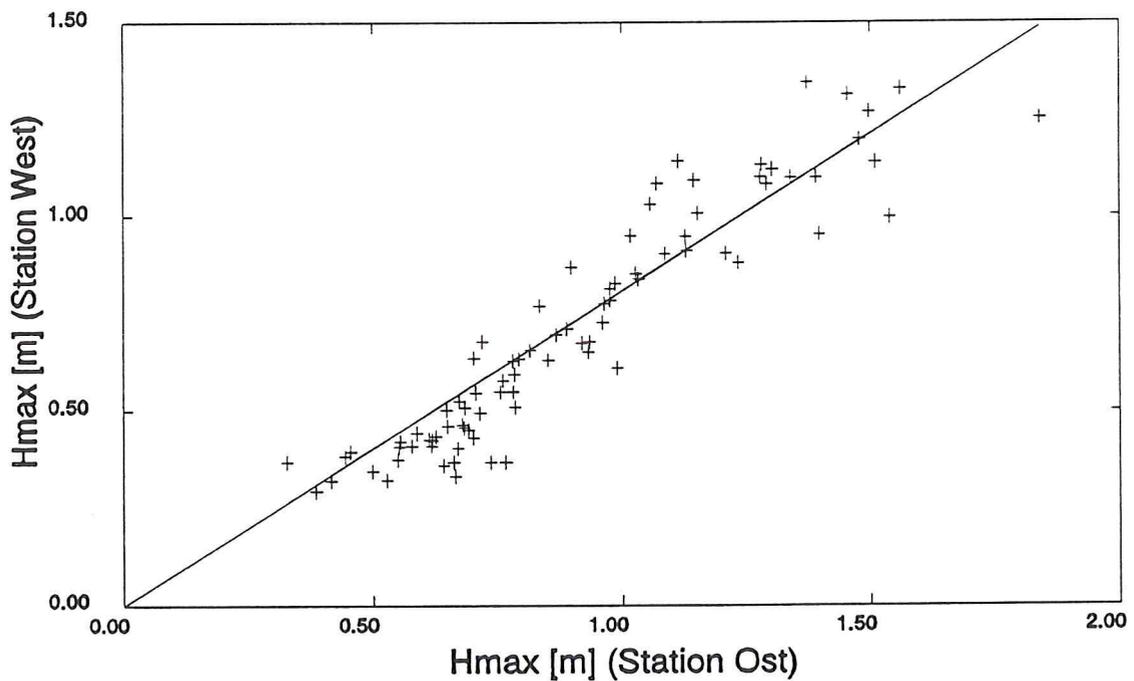


Abb. 107: Zusammenhang von signifikanten maximalen Wellenhöhen auf dem Deichvorland und im Watt; Everschopsiel West und Everschopsiel Ost

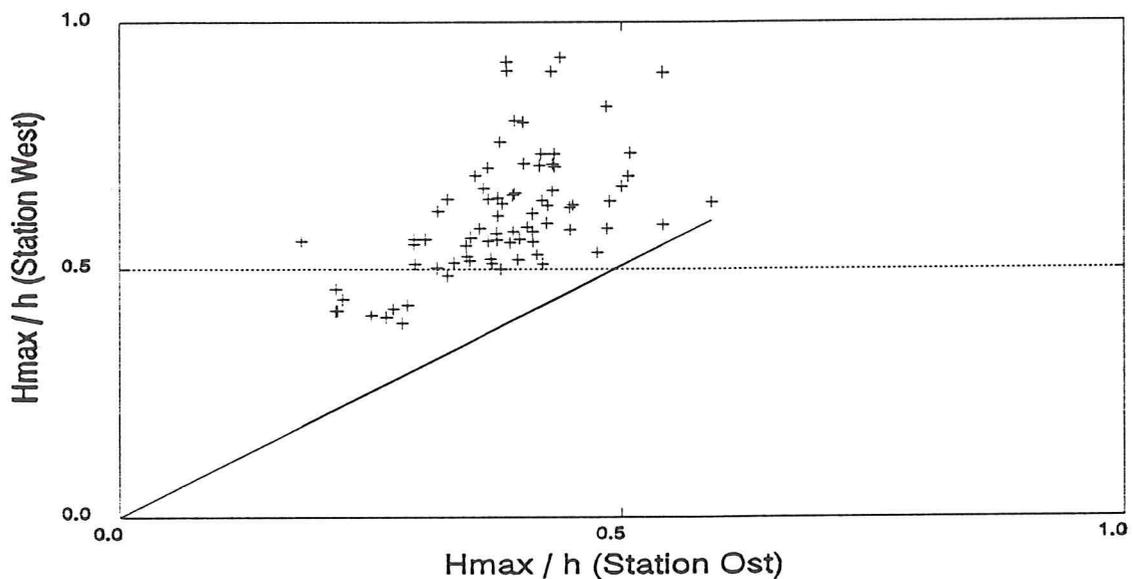


Abb. 108: Zusammenhang der Relationen von maximalen Wellenhöhen und örtlichen Wassertiefen auf dem Deichvorland und im Watt; Everschopsiel West und Everschopsiel Ost

Ein Vergleich zwischen den Werten für die Stationen Strucklahnungshörn und Everschopsiel-Ost (Tab. 5, Abb. 102 u. 104) führt zu der Schlußfolgerung, daß die Ausbildung von Salzwiesen nur dort erfolgen kann, wo der Seegang bereits eine hierfür hinreichende Dämpfung erfahren hat. Diese Gegebenheiten stimmen mit denen im Bereich der Ostfriesischen Inseln und Küste überein [NIEMEYER 1979a, 1979b, 1983, 1984, 1987a, 1987b, 1990].

Ebenso wie an der Wurster Küste gestatten die Datensätze der Stationen Everschopsiel-Ost und -West einen Einblick in die Wechselwirkungen zwischen Seegang und Deichvorländern. Die Höhen auf dem Heller sind in fast allen Fällen niedriger als auf dem Watt (Abb. 106 u. 107), aber eine wesentliche Höhenänderungsgrad nicht stattgefunden. Wie die Wellenhöhen-Wassertiefen-Relationen widerspiegeln (Tab. 5), ist diese Reduktion des Seegangs eine Anpassung an die geringeren Wassertiefen auf dem Deichvorland zu sehen, die aber am Meßort insbesondere für die maximalen Wellenhöhen noch nicht vollständig abgeschlossen ist (Tab. 5, Abb. 108). Aber selbst für die maximalen Wellenhöhen wird hier am wattseitigen Rand des Deichvorlandes der Grenzwert des Brecherkriteriums für Flachwasserbrandung in einem Fall erreicht. Die Erhöhung der Werte (Tab. 5, Abb. 108) läßt aber klar erkennen, daß zwischen Watt und dem Meßort auf dem Vorland keine Brandung stattgefunden hat. Von daher zeigen sich hier Übereinstimmungen zu früher erarbeiteten Untersuchungsergebnissen für ostfriesische Watten und Heller [NIEMEYER 1979a, 1979b, 1983, 1984].

5. ZUSAMMENFASSUNG, SCHLUßFOLGERUNGEN UND AUSBLICK

Das Resume dieser umfangreichen Untersuchung läßt sich zutreffend mit der Feststellung ziehen, im Ergebnis sind zumindest ebenso viele neue Fragen aufgeworfen worden, wie alte gelöst werden konnten. Oder positiver formuliert, es sind gestellte Fragen beantwortet worden, die damit verbundenen Einsichten haben aber zu neuen, weitergehenden Fragestellungen geführt. Festzuhalten ist hierbei, daß sich die Relevanz einiger neuer Fragen erst auf Grundlage dieser Untersuchungen ergeben hat.

Die Ergebnisse lassen klar erkennen, daß Seegang in Wattgebieten eine starke regionale Prägung hat, die sich in unterschiedlichen Wechselwirkungsprozessen widerspiegelt, die analytisch über die Dominanz verschiedener Randbedingungen für den Beobachter erhellt werden können. Erst diese Transparenz erlaubt es, die Richtigkeit bisheriger Annahmen zu überprüfen. Ein hervorzuhebendes Beispiel sind hierfür die Erkenntnisse zur Seegangsentwicklung im Einzugsgebiet der Herver, wo offenbar oberhalb örtlich unterschiedlicher Schwellenwerte Steigerungen der Windgeschwindigkeiten kaum noch weiteres Höhenwachstum des Seegangs bewirken. Abschätzungen des Bemessungsseegangs auf der Grundlage von Vorhersageverfahren führen hier offensichtlich zu irrigen Aussagen im Sinne von zu hohen Belastungsannahmen.

Die Watten im Wellenschatten der ostfriesischen Düneninseln erfahren - bezogen auf die zur Verfügung stehenden Datensätze - bei auflandigen Windrichtungen und Sturmfluten eine wesentlich geringere Seegangsbelastung als die auf der Festlandsseite des Wattenmeeres. Selbst bei auflandigem Starkwind- und Sturm-lagen wird der Seegang bei seiner Fortpflanzung in Wattrinnen und auf Watten so stark gedämpft, daß kein stärkerer Seegang als bei örtlicher Windsee zu erwarten ist. Von Bedeutung ist hierbei auch, daß bei auflandigem Sturm die sich vom Seegat ausbreitenden Wellen sich nicht mit, aber teilweise gegen den Wind fortplanzen. Hier zeigt sich eine weitgehende Übereinstimmung mit Ergebnissen eines mathematischen Seegangsmodells für eine Sturmflut. Hinsichtlich der Bemessung von wattseitigen Inseldeichen kann daher von einer deutlich geringeren Seegangsbelastung ausgegangen werden als bisher angenommen.

Das seinerzeit für ostfriesische Watten erarbeitete Verfahren zur Ableitung von Extremwerten zur Bemessung auf Seegang aus Wassertiefen-Wellenhöhen-Relationen ist grundsätzlich auf alle hier untersuchten Gebiete übertragbar. Erforderlich bleibt aber eine regionale Differenzierung, insbesondere bei der Festlegung der Sicherheitsmarge zur Abdeckung möglicher Streuungen. Das hier zur Verfügung

stehende, wesentlich umfangreiche Datenmaterial erlaubt aber weitgehendere Differenzierungen im Sinne einer Verfeinerung als bisher möglich.

Ebenso konnten seinerzeit für ostfriesische Watten entwickelten Vorstellungen zu seegangsbedingten hydrodynamisch-morphologischen Wechselwirkungen im Übergangsbereich von Watten und Deichvorländern auch für die Wurster Küste und das Tidebecken der Hever nachgewiesen werden. Auch dort sind Salzwiesen offensichtlich nur in den Bereichen entstanden, in denen der Seegang hinreichend gedämpft ist. Eine seegangsdämpfende Wirkung der Deichvorländer konnte bei den Messungen nicht festgestellt werden und ist auch für höhere Wasserstände aufgrund der Ergebnisse auszuschließen.

Auch ist die Erhärtung bisheriger Vorstellungen auf einer wesentlich breiteren Datenbasis möglich gewesen. Der Parametrisierung hydrodynamisch-morphologischer Wechselwirkungen sind aber Grenzen gesetzt, da geodätisches Datenmaterial nicht in hinreichender zeitlicher Auflösung zur Verfügung steht. Möglicherweise werden projektierte kleinräumig angelegte Forschungsvorhaben neue Grundlagen für weitergehende Erkenntnisse liefern, wie beispielsweise Untersuchungen zur hydrodynamischen Wirksamkeit von Lahnungen. Darüber hinaus ist zu erwarten, daß in absehbarer Zeit die Werkzeuge der Fernerkundung auch eine großräumige Behandlung dieser Fragestellungen ermöglichen.

Die hier diskutierten Meßreihen stellen - soweit bekannt - die umfangreichsten Datensätze dar, die bisher für Wattseegang gewonnen werden konnten. Der Wert dieser Daten ist damit auch keinesfalls mit dem Ergebnis dieses Berichtes erschöpfend genutzt. Die nachbleibende Datenbank wird zum einen in der Praxis der im Küsteningenieurwesen tätigen Verwaltungen noch oft die Grundlage für Lösung spezifischer Fragestellungen sein. Zum anderen ist hier für die Fortentwicklung und Verifikation von mathematischen Modellen ein - auch für die benachbarten Wattenanrainer - unvergleich vielfältiger Fundus an Daten zur Reproduktion verschiedenartiger Wechselwirkungen geschaffen worden. Es ist darüber hinaus zu erwarten, daß hierbei auch noch durch den Dialog von Naturdaten und hierauf gezielt aufbauender Modelltests weitergehende Erkenntnisse zur Physik der Naturvorgänge gewonnen werden können. Insgesamt zeigen die hier gewonnenen Ergebnisse Grenzen des Erkenntnisfortschritts auf, der bei alleinigem Betreiben von Naturmessungen erreichbar ist. Zugleich setzen sie - heute noch nicht erreichte - Maßstäbe für Modelluntersuchungen.

6. DANKSAGUNG

Naturmessungen des Seegangs sind eine Aufgabe, welche die koordinierte Zusammenarbeit vieler erfordert, um zum Erfolg zu gelangen. Diese vielen unverzichtbaren Mitwirkenden bleiben zumeist im Hintergrund, während das Ergebnis gemeinsamer Arbeit in wissenschaftlicher Form präsentiert wird. Deshalb soll an dieser Stelle - wenn auch nur in kurzer Form - an die Arbeiten erinnert werden, die aus der Darstellung von Daten, Analysen und Ergebnissen nicht mehr erkennbar sind. Der Aufbau von Meßstationen im amphibischen Watt oder gar in der aquatischen Verlandungszone ist härteste körperliche Arbeit, die dennoch hohe Umsicht erfordert, um die Funktion der einzubauenden Sensoren zu gewährleisten. Die Kontrolle der Meßgeräte und des Datentransfers während der Sturmsaison muß trotz unwirtlicher Bedingungen mit Akribie vorgenommen werden, damit zuverlässige Auswertegrundlagen zur Verfügung stehen und möglicherweise ist zur Erhaltung der Sensoren deren Ab- und Wiederaufbau im Winter erforderlich, weil eine Eisperiode eintrat. Die Plausibilitätskontrolle ist nicht nur ermüdende Routine, die ungeachtet des Anscheins korrekter Daten hohe Aufmerksamkeit erfordert, um den Endverwerter aller Messungen vor Fehlurteilen zu bewahren. Sie erweitert sich oft in detektivisches Suchen und Tüfteln, um durch die Rekonstruktion verlorengegangener Randbedingungen einen wertvollen Datensatz für die Analyse zu erhalten. Ohne die verantwortungsbewußten und engagierten Kollegen, welche diese Aufgaben im Rahmen des Forschungsvorhabens hervorragend gemeistert haben, wäre den Autoren die Abfassung dieses Berichtes nicht möglich gewesen. Ihr nachhaltiger Dank gilt daher allen am Programm Beteiligten, vor allem aber den Herren Heino Hansen und Dipl.-Ing. Frerk Jensen vom Dezernat Gewässerkunde des ALW HUSUM, den Herren Günter Brandt, Detlef Glaser, Holger Karow, Dipl.-Ing. Ralf Kaiser und Georg Münkewarf vom Dezernat Hydrographie des Küstengebietes der FORSCHUNGSSTELLE KÜSTE des NLWA. Dank gebührt auch Frau Helga Meyer und den Herren Heiner Alberts, Jochen Fleßner und Thomas Hartkens für die mit außerordentlicher Sorgfalt vorgenommenen Aufbereitung von Text und Grafiken.

7. LITERATUR

ADEL, J. D. DEN; NIEMEYER, H. D.; FRANKEN, A. F.; BOOIJ, N.; DEKKER, J. & VOGEL, J. A. [1991]: Wave model application in a Wadden Sea area. Proc. 22nd Int. Conf. o. Coast. Eng. Delft, ASCE, New York

AG STFL (Küstenausschuß Nord- und Ostsee, Arbeitsgruppe „Sturmfluten“) [1962]: Der maßgebende Sturmflutseegang und Wellenauflauf an den Deichen. Ergebnisbericht 1. Die Küste, Jg. 10, H. 2

BARTHEL, V. [1981]: Über den Seegang in einem Ästuar am Beispiel der Außenweser. Die Küste, H. 35

BATTJES, J. [1988]: Surf-zone dynamics. Ann. Rev. Fluid Mech. 1988, 20

BLANKENSTEIN, H.; BRANDT, G.; GLASER, D. & NIEMEYER, H. D. [1980]: Zur Auswertung von Seegangsschrieben. Forsch.-Stelle f. Insel- u. Küstenschutz, (unveröff.)

BRAHMS, A. [1754/1757]: Anfangs-Gründe der Deich- und Wasser-Baukunst. Erster und Anderer Theil. Hermann Tapper, Aurich

BRETSCHNEIDER, C. L. [1959]: Wave variability and wave spectra for wind-generated gravity waves. Beach Eros. Board, Tech. Memor. 118

CERC (Coastal Engineering Research Center) [1977]: Shore Protection Manual. Vol. II, Dep. o. t. Army, Corps o. Eng., Washington D.C.

COLDEWEY, H.-G. [1982]: Naturmessungen zur Erfassung des Wattseegangs und des Wellenaufbaus auf Seedeiche. Intermaritec '82, Ber. 416, Hamburg

DAMM-BÖCKER, S.; KAISER, R. & NIEMEYER, H. D. [1992]: Determination of benthic Wadden Sea habitats by hydrodynamics. Proc. Int. Coast. Congr. 1992, Kiel

DANISH HYDRAULIC INSTITUTE [1986]: Wave refraction study for the Eider barrier. Fachgutachten für das Leichtweiß-Inst. f. Wasserbau (unveröff.)

DRESKE, G. [1964]: Der Wellenschreiber WES-63 der Forschungsstelle Norderney. Jber. 1963 Forsch.-Stelle f. Insel- u. Küstenschutz, Bd. 15

- FÜHRBÖTER, A. [1966]: Der Druckschlag durch Brecher auf Deichböschungen. Mitt. d. Franzius-Inst. f. Grund- u. Wasserb., H. 28
- FÜHRBÖTER, A. [1988]: Vorschläge zur Verstärkung des Nordstrander Dammes. Gutachten f. ALW Husum (unveröff.)
- GALVIN, C. J. [1969]: Breaker Travel and Choice of Design Wave Height. Proc. ASCE, WW 2, Vol. 95.
- GAYE, J. & WALTHER, F. [1934]: Der „Seebär“ vom 19. August 1932 in der Deutschen Bucht der Nordsee. Ann. d. Hydrogr., 62. Jg., H. VIII
- GÖHREN, H. [1970]: Entwicklung eines integrierenden Wellenmeßgerätes. Hamb. Küstenforsch., H. 13
- GÖHREN, H. [1974]: Das Meßwesen in der deutschen Küstenforschung. Jb. Hafenbautech. Ges. 1972/73, 33. Bd.
- GRÜNE, J. [1983]: Wave run-up caused by natural storm surge waves. Proc. 18th Int. Conf. o. Coast. Eng. Capetown, ASCE, New York
- GRÜNE, J. [1989]: Wave induced shock pressures under real sea state conditions. Proc. 21st Int. Conf. o. Coast. Eng. Malaga, ASCE, New York
- GRÜNE, J. [1991]: Nearshore wave climate under real sea state conditions. Proc. 3rd Conf. o. Coast. & Port Eng. i. Develop. Countr., Mombasa/Kenya
- HANSEN, U. A. [1976]: Brandungsstau und Bemessungswasserstand. Mitt. d. Leichtweiß-Inst. TU Braunschweig, H. 52.
- HAYES, M. O. [1975]: Morphology and sand accumulation in estuaries. in: L. E. Cronin: Estuarine Research, Vol. 2., Academic Press, New York
- HENSEN, W. [1966]: Bericht der Arbeitsgruppe „Sturmfluten“ im Küstenausschuß Nord- und Ostsee. Die Küste, Jg. 14, H. 1
- HOMEIER, H. [1969]: Das Wurster Watt - Eine historisch-morphologische Untersuchung des Küsten- und Wattgebietes von der Weser- bis zur Elbmündung. Jber. 1967 Forsch.-Stelle f. Insel- u. Küstenschutz, Bd. 19
- HUNDT, C. [1962]: Beitrag zur Frage des maßgebenden Sturmflutseegangs vor einem Deich am Watt. Beispiel Büsum. Die Küste, Jg. 10, H. 2
- HUNT, I. A. [1959]: Design of Seawalls and Breakers. Proc. ASCE, WW 3, Vol. 89

INGENIEURKOMMISSION des Niedersächsischen Ministers für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten [1979]: Erfahrungen und Folgerungen aus den Januar--Sturmfluten 1976 für den Küstenschutz in Niedersachsen. Die Küste, H. 33.

KAISER, R. [1991]: Hydrodynamik als ökosystemarer Faktor in Wattgebieten. II. Symposium zur Ökosystemforschung im Wattenmeer, Büsum

KOOPMANN, G. [1962]: Die Sturmflut vom 16./17. Februar 1962 in ozeanographischer Sicht. Die Küste, Jg. 10, H. 2

KRÜGER, W. [1911]: Meer und Küste bei Wangeroog und die Kräfte die auf ihre Gestaltung einwirken. Zeitschr. f. Bauwesen, Jg. 1911

KRÜGER, W. [1913]: Das Seegebiet Oldenburgs. in: W. Schwecke, W. von den Busch, W. Schütte: Heimatkunde des Herzogtums Oldenburg. Niedersachs.-Verl. C. Schönemann, Bremen

KRÜGER, W. [1922]: Die Jade, das Fahrwasser Wilhelmshavens, ihre Entstehung und ihr Zustand. Jb. Hafenbautechn. Gesellsch., Bd. 4

LASSEN, H. & SIEFERT, W. [1991]: Mittlere Tidewasserstände in der südöstlichen Nordsee - säkularer Trend und Verhältnisse um 1980. Die Küste, H. 52

LONGUETT-HIGGINS, M. S. [1953]: On the statistical distribution of the heights of sea waves. Journ. o. Marine Res., Vol. XI, No. 3

LUCK, G. & NIEMEYER, H. D. [1976]: Seegangsmessungen im Bereich der Ostfriesischen Inseln und Watten. Meerestech., Bd. 7, Nr. 4

LUCK, G. & NIEMEYER, H. D. [1977]: Das Seegangmeßprogramm Ostfriesische Inseln und Küste. Dt. Gewässerkundl. Mitt., 21. Jg., H. 6

LUCK, G. & NIEMEYER, H. D. [1980]: Albert Brahms und die Orkanflut von 1717. Die Küste, H. 35

LÜDERS, K. [1966]: Bericht der Arbeitsgruppe „Küstenschutzwerke“. Die Küste, Jg.14, H. 1

MC CAMY, R. C. & FUCHS, R. A. [1954]: Wave forces on piles: a diffraction theory. Beach Eros. Board, TM-69, U. S. Army, corps o. Eng.

MC COWAN, J. [1894]: On the highest wave of permanent type. Phil. Mag., Ser. 5, 38

MICHE, R. [1944]: Mouvement ondulatoires de la mer en profondeur constante ou décroissante. Ann. Ponts Chaussées, 114

MICHELL, J. H. [1893]: On the highest waves in water. Phil. Mag., Ser. 5, 36

MINIKIN, R. R. [1963]: Winds, waves and maritime structures: studies in harbour making and the protection of coasts. 2nd rev. ed., Griffin, London

MORISON, J. R. [1953]: Experimental studies of forces on piles. 4th Conf. o. Coast. Eng. Washington D. C., ASCE, New York

NIEMEYER, H. D. [1976]: Zur Abschätzung des maximalen Wellenaufbaus an Seedeichen aus der Einmessung von Teekgrenzen. Die Küste, H. 29.

NIEMEYER, H. D. [1977a]: The Estimation of Design Wave Run-Up on Sea Dykes in Consideration of Overtopping Security. Proc. 17th IAHR-Congress, Baden-Baden

NIEMEYER, H. D. [1977b]: Seegangsmessungen auf Deichvorländern. Jber. 1976 Forsch.-Stelle f. Insel- u. Küstenschutz, Bd. 27

NIEMEYER, H. D. [1979a]: Wave climate study in the region of the East Frisian islands and coast. Proc. 16th Int. Conf. o. Coast. Eng. Hamburg, ASCE, New York

NIEMEYER, H. D. [1979b]: Untersuchungen zum Seegangsklima im Bereich der Ostfriesischen Inseln und Küste. Die Küste, H. 34

NIEMEYER, H. D. [1983]: Über den Seegang an einer inselgeschützten Wattküste. BMFT-Forschungsber. MF 203

NIEMEYER, H. D. [1984]: Hydrographische Untersuchungen in der Leybucht zum Bauvorhaben Leyhörn. Jber. 1983 Forsch.-Stelle f. Insel- u. Küstenschutz, Bd. 35

NIEMEYER, H. D. [1985]: Meßstation Ostfriesisches Wattenmeer. Jber. 1984 Forsch.-Stelle Küste, Bd. 36

NIEMEYER, H. D. [1986]: Ausbreitung und Dämpfung des Seegangs im See- und Wattengebiet von Norderney. Jber. 1985 Forsch.-Stelle Küste, Bd. 37

NIEMEYER, H. D. [1987a]: Seegang und Biotopzonierung in Wattgebieten. in: Niedersächsischer Umweltminister: Umweltvorsorge Nordsee -Belastungen - Gütesituation - Maßnahmen-. Hildesheim

NIEMEYER, H. D. [1987b]: Seegang und Strömungen als ökologische Randbedingungen in Wattgebieten. in: Niedersächsisches Landesamt für Wasserwirtschaft: Grundlagen zur Reinhaltung der Küstengewässer. Aus- und Fortbildung in der niedersächsischen Wasserwirtschaft. Hildesheim

NIEMEYER, H. D. [1987c]: Changing of wave climate due to breaking on a tidal inlet bar. Proc. 20th Intern. Conf. o. Coastal Eng. Taipei, ASCE, New York

NIEMEYER, H. D. [1990]: Morphodynamics of tidal inlets. CEEC (Civil Eng. Europ. Cours. - Progr. o. Contin. Educat.1990), Delft Univ. o. Techn. Intern. - Intern. Civ. Eng.

- NIEMEYER, H. D. [1991]: Case study Ley Bay: an alternative to traditional enclosure. Proc. 3rd Conf. o. Coast. & Port Eng. i. Develop. Countr., Mombasa/Kenya
- NIEMEYER, H. D.; KAISER, R. & ADEL, J. D. DEN [1992] : Anwendung des mathematischen Seegangmodells HISWA auf Wattenmeerbereiche. Schlußber. KFKI-Forschungsvorhaben MTK 464 - Teil III, Bundesmin. f. Forsch. u. Techn. - Meerestech. -
- OORSCHOT, J. H. VAN & ANGREMOND, K. D' [1966]: The Effect of Wave Energy Spectra on Wave Run-up. Proc. 11th Int. Conf. o. Coast. Eng. London, ASCE, New York
- PIERSON, W. J. [1954]: An interpretation of the observable properties of "sea" waves in terms of the energy spectrum of the Gaussian record. Trans. Am. Geophys. Un., Vol. 35, No. 5
- PUTZ, R. R. [1952]: Statistical distribution for ocean waves. Trans. Am. Geophys. Un., Vol. 33, No. 5
- RYE, H. [1977]: The stability of some currently used wave parameters. Coast. Eng., Vol. 1, No. 1
- SAINFLOU, G. [1928]: Essai sur les digues maritimes verticales. Ann. Ponts Chaussées, 98, No. 4
- SCHÄFER, W. [1941]: Dangast und die Ufersäume des Jadebusens. Abh. Senckenberg. naturforsch. Ges., 457
- SCHRADER, J. P. [1968]: Kennzeichnende Seegangsgößen für drei Meßpunkte in der Elbmündung. Hamb. Küstenforsch., H. 4
- SCHÜTTRUMPF, R. [1973]: Über die Bestimmung von Bemessungswellen für den Seebau am Beispiel der südlichen Nordsee. Mitt. d. Franzius-Inst. f. Wasserbau u. Küsteningenieurw., H. 39
- SIEFERT, W. [1971]: Die Seegangsverhältnisse im Elbmündungsgebiet (Untersuchungen von 1963 bis 1970). Hamb. Küstenforsch., H. 18
- SIEFERT, W. [1974]: Über den Seegang in Flachwassergebieten. Mitt. d. Leichtweiß-Inst., H. 40
- STIVE, M. J. F. & EYSINK, W. [1989]: Dynamisch model van het Nederlandse kustsystem. Waterloopkundig Laboratorium, Rapport M 825-IV
- TAW (Technische Adviescomissie voor de Waterkeringen) [1984a]: Leidraad Cementbetonnen Dijkverkleidingen. Stichting CUR-VB, rapp. 119
- TAW (Technische Adviescomissie voor de Waterkeringen) [1984b]: Leidraad voor de toepassing van asfalt in de waterbouw. Staatsuitgeverij, 's-Gravenhage

TWB (Küstenausschuß Nord- und Ostsee, Technisch-Wissenschaftlicher Beirat [1969]: Zusammenfassung der Untersuchungsergebnisse der ehemaligen Arbeitsgruppe „Sturmfluten“ und Empfehlungen für ihre Nutzanwendung beim Seedeichbau. Die Küste, H. 17

WASSING, F. [1957]: Model Investigations on Wave Run-up on Dikes Carried out in the Netherlands during the Past Twenty Years. Proc. 6th Conf. o. Coast. Eng. Gainesville, ASCE, New York

WL (Waterloopkundig Laboratorium) [1989]: Sicherungsdamm Pellworm-Festland. Morphologische Veränderungen als Folge der Vordeichung, des Sicherungsdammes und einer Großbuhne. Teil V, Untersuchungsber. f. ALW Husum (unveröff.)