Die Küste, 34 (1979), 53-70

Untersuchungen zum Seegangsklima im Bereich der Ostfriesischen Inseln und Küste

Von Hanz Dieter Niemeyer

Zusammenfassung

Die Forschungsstelle für Insel- und Küstenschutz Norderney der Niedersächsischen Wasserwirtschaftsverwaltung betreibt seit 1976 das Seegangsmeßprogramm Ostfriesische Inseln und Küste. Die bisher gewonnenen Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

1. Es besteht ein enger Zusammenhang zwischen den im seewärtigen Untersuchungsgebiet auftretenden Wellenhöhen und den während der vorausgehenden drei Stunden herrschenden mittleren Windgeschwindigkeiten.

2. Die Dämpfung des Seegangs durch Brandung auf dem Riffbogen vor dem Seegat und dem Nordweststrand der Insel kann quantitativ in Abhängigkeit von den morphologischen Randbedingungen dargestellt werden. Die dort stattfindende starke Energieumwandlung führt zu brandungsfreien Zonen zwischen Riffbogen und Inselstränden sowie Festlandsdeichen.

3. Der sich über die Watten vom Seegat zur Festlandsküste ausbreitende Seegang unterliegt einer fortschreitenden, quantifizierbaren Dämpfung, die auf Refraktion, Shoaling, Diffraktion, Perkolation und Sohlreibung zurückzuführen ist.

4. Die relativ geringere Seegangsbelastung von Vorlanddeichen gegenüber der von Schardeichen kann nicht als Folge des Brechens hoher Wellen auf den Vorländern angesehen werden. Vorländer bestehen nämlich insbesondere dort, wohin sich wegen der morphologischen Gegebenheiten ohnehin nur stark gedämpfter Seegang ausbreiten kann.

5. Es hat nach den bisherigen, noch abzusichernden Untersuchungen den Anschein, als ob die längeren, weniger hohen und nicht die höheren, aber kürzeren Wellen des Spektrums den höheren Wellenauflauf verursachen.

Summary

The Research Station for Island and Coast Protection Norderney has been operating the wave measurement program East Frisian Islands and Coast for two years. This study is supported by the German Federal Ministry for Research and Technology (BMFT) through the German Committee on Coastal Engineering Research. The first results can be summarized in the following manner:

1. There is a high correlation between the wind speed prevailing the last three hours and the heights of local waves subsequently occuring.

2. Wave energy dissipation on the bar enclosing the tidal inlet and the northwestern shore of the island situated eastward of the inlet can be described in a quantitative manner in respect of the different morphological features of the bar.

3. The intensive wave energy dissipation on the bar prevents the breaking of waves spreading out over the tidal flats due to limited water depth, which indicates in spite of that a wave height damping in a certain order of magnitude.

4. The continuous wave damping on the tidal flats leads to such a decreasement of heights that any wave breaking cannot occur there due to restricted water depth not even on dykeforelands during the duration of high storm tide water levels.

5. It seems to be that not the highest, but mainly the longer waves induce the heighest wave run-up on sea dykes.

Inhalt

1. Einleitung 54
2. Das Untersuchungsgebiet 54

Die Küste, 34 (1979), 53-70

3. Seegangserzeugende Kräfte 57
4. Seegangsdämpfung durch Riffbrandung 59
5. Seegangsdämpfung auf den Watten 64
6. Untersuchungen zum Wellenauflauf 67
7. Schriftenverzeichnis 69
8. Symbole 69

1. Einleitung

Das Seegangsklima im Küstenvorfeld der südlichen Nordsee ist insbesondere durch die Steilheit und Kurzkämmigkeit der hier auftretenden Windsee gekennzeichnet. Da wegen der geringen Wassertiefen bereits bei einer Windwirkung von wenigen Stunden der Seegang voll ausgereift ist, überlagern sich im allgemeinen verschiedene Systeme. Diese Besonderheiten erschweren seine Abschätzung mit Hilfe konventioneller, in anderen Seegebieten entwickelter Wellenvorhersageverfahren erheblich. Das gilt insbesondere in den morphologisch stark gegliederten Gebieten des Küstenvorfeldes. Ebenso ist eine naturähnliche Beschreibung derart unregelmäßigen Seegangs mit Hilfe deterministischer Wellentheorien nicht möglich.

Um trotz dieser Schwierigkeiten eingehendere Kenntnisse über das Seegangsgeschehen zu gewinnen, wurde nach Schaffung der meßtechnischen Voraussetzungen mit umfangreichen Naturmessungen im Bereich der deutschen Nordseeküste begonnen. Die ersten Untersuchungsprogramme wurden auf den zur See offen liegenden Watten des südlichen Elbmündungsgebietes (Siefert, 1974) und in der Brandungszone vor Sylt (Führböter, 1974) vorgenommen.

Seit 1976 betreibt die Forschungsstelle für Insel- und Küstenschutz Norderney ein umfangreiches Seegangsmeßprogramm im Bereich der Ostfriesischen Inseln und Küste, das aus Mitteln des Bundesministers für Forschung und Technologie über das Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen gefördert wird. Hierdurch werden im Bereich der deutschen Nordseeküste erstmals Untersuchungen des Seegangsklimas an einer inselgeschützten Wattküste möglich. Wissenschaftliche Zielsetzung, Konzeption des Meßnetzes und gerätetechnische Ausstattung dieses Seegangsmeßprogramms sind bereits an anderer Stelle eingehend beschrieben worden (Luck u. Niemeyer, 1976, 1977).

Im folgenden werden erste Ergebnisse des Programms mitgeteilt, die auf der Grundlage der während der Meßperioden 1976/77 und 1977/78 aufgezeichneten Daten erarbeitet wurden. Im Rahmen dieser Arbeit wird auf eine Diskussion der meßtechnischen Probleme, die bei den Untersuchungen aufgetreten sind, verzichtet.

2. Das Untersuchungsgebiet

Das Gebiet der Ostfriesischen Inseln und Küste (Abb. 1) ist charakterisiert durch eine Kette seewärts vorgelagerter Düneninseln, die vom Festland durch einen breiten Saum von Watten getrennt sind. Die Füllung und Entleerung dieser Wattgebiete erfolgt im Tiderhythmus durch die zwischen den Inseln liegenden Seegaten mit ihren schmalen, tiefen Rinnen, in welchen sich starke Strömungen ausbilden. Seewärts werden die Seegaten von Ketten wandernder Platen – den Riffbögen – umlagert, in denen der Sand vom Ostende einer Insel zur östlich benachbarten bewegt wird.

Dieses morphologische Formeninventar wird zum einen von der gestaltenden Kraft des

Die Küste, 34 (1979), 53-70

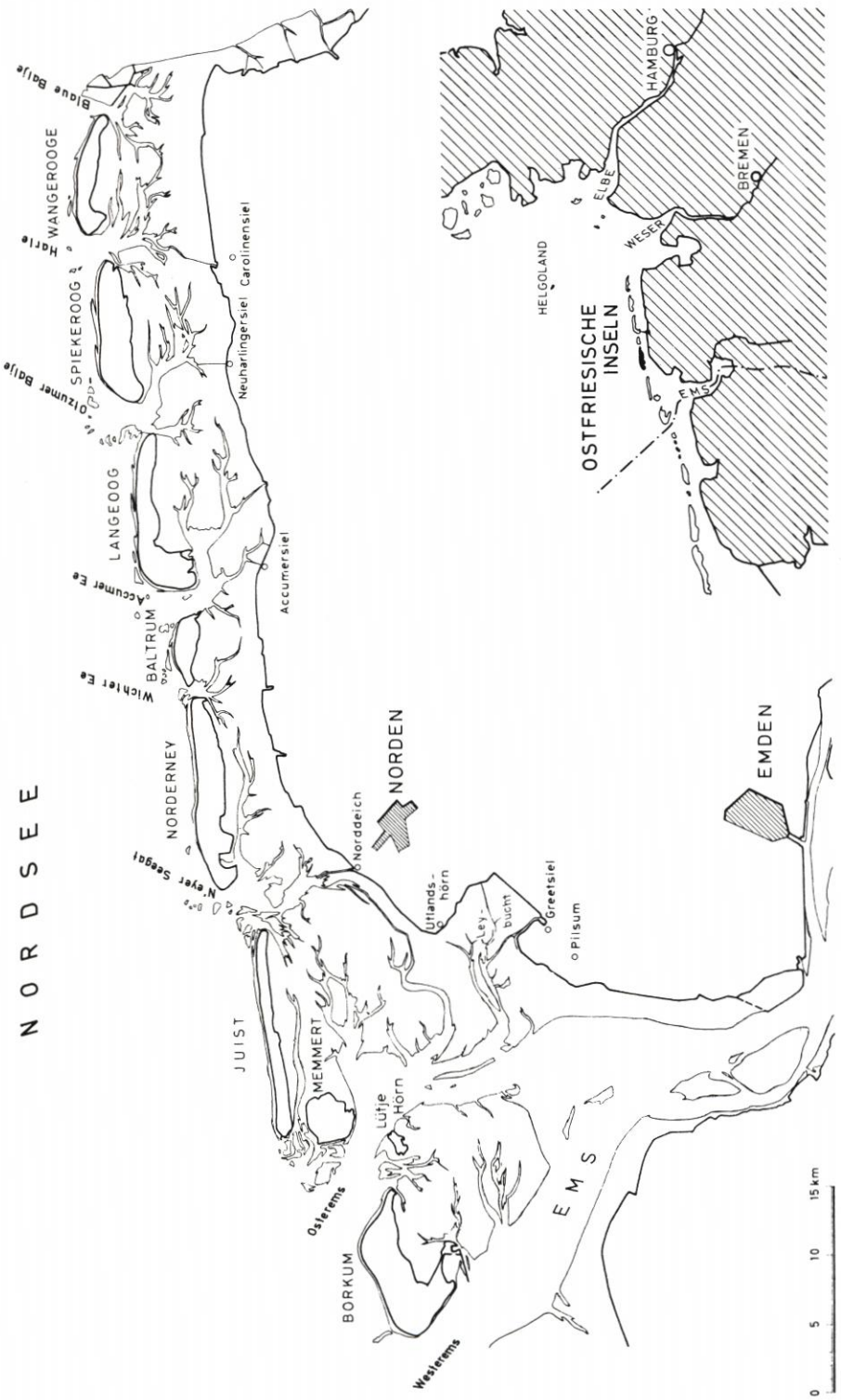

Abb. 1. Ostfriesische Inseln und Küste

Die Küste, 34 (1979), 53-70

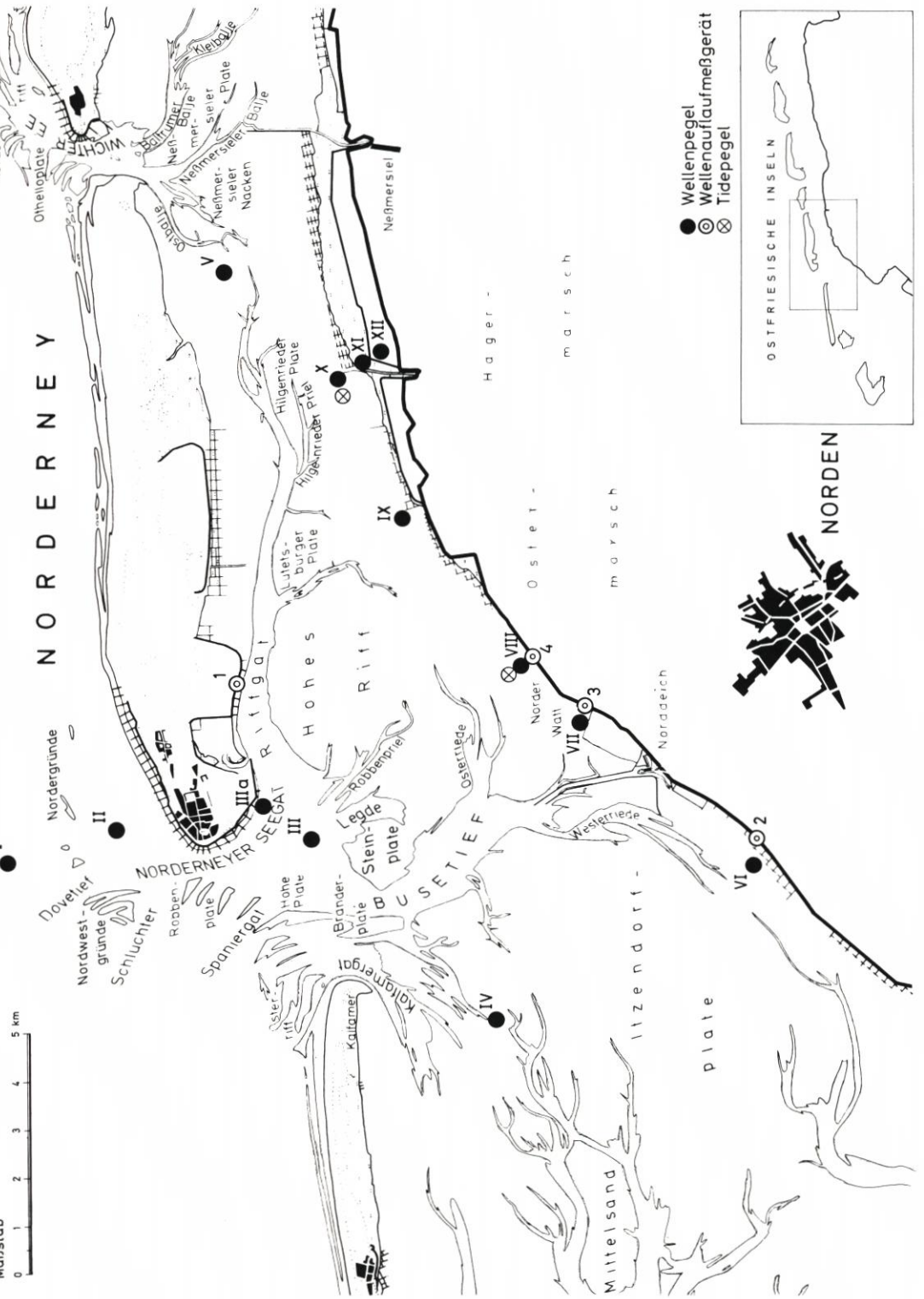

Abb. 2. Meßnetz des Seegangsmeßprogramms Ostfriesische Inseln und Küste

Die Küste, 34 (1979), 53-70

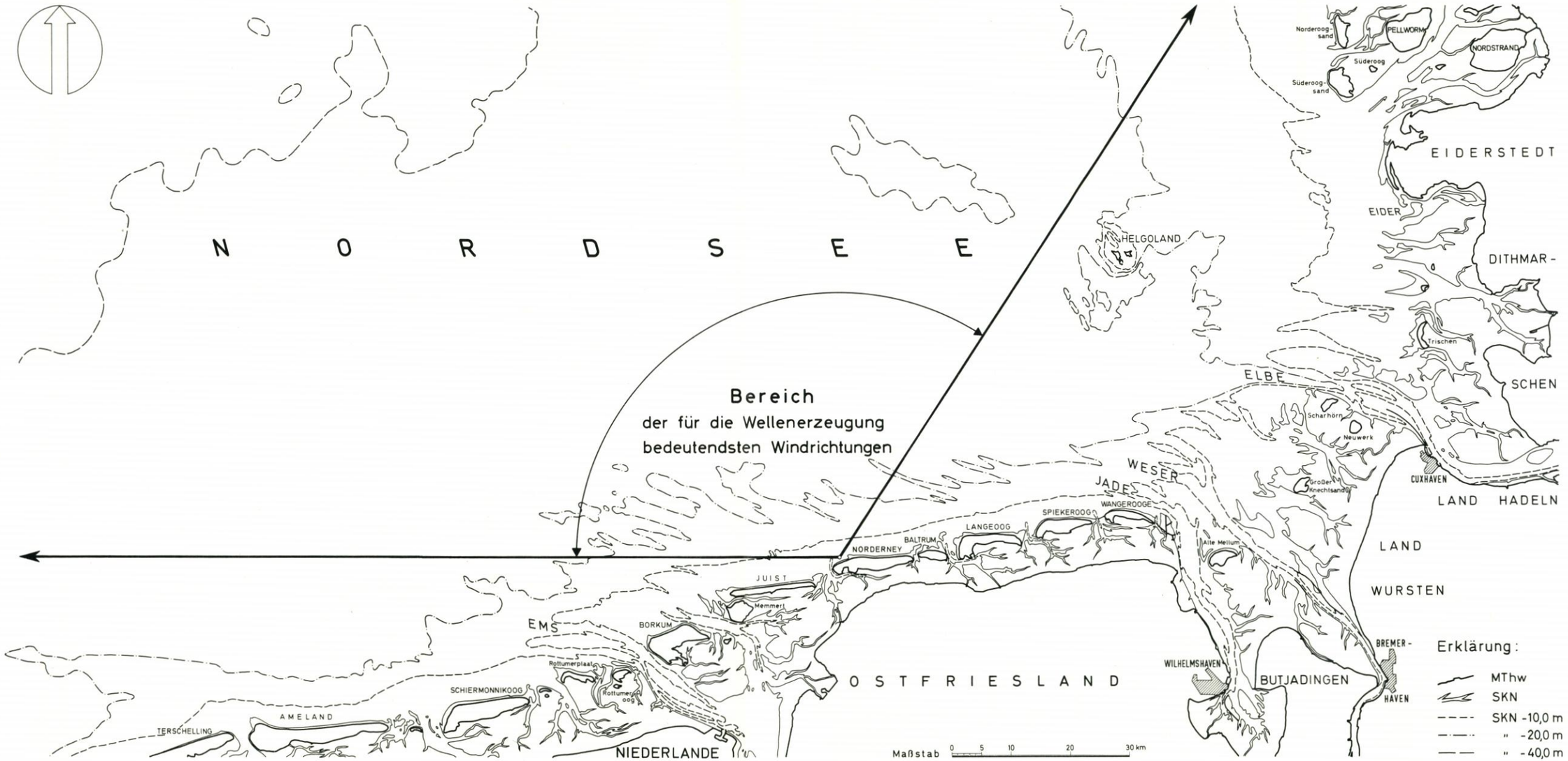

Abb. 3. Sektor der für die Seegangsentwicklung effektivsten Windrichtungen

Die Küste, 34 (1979), 53-70

Seegangs mitgeprägt, hat aber zum anderen einen erheblichen Einfluß auf den Seegang bei seiner Fortpflanzung von der offenen See bis an die Inselstrände und Festlandsküste.

Die Untersuchung dieser Vorgänge mußte aus ökonomischen Gründen auf ein Gebiet begrenzt werden, dessen morphologisches Formeninventar als repräsentativ für den gesamten Bereich der Ostfriesischen Inseln und Küste angesehen werden kann. Es wurde daher im Einzugsbereich des Norderneyer Seegats ein von der offenen See bis zur Festlandsküste reichendes Meßnetz mit 13 Wellen-, 4 Wellenauflauf- und 2 Langzeitpegeln errichtet (Abb. 2). Die räumliche Anordnung der Geräte ist an den im folgenden angeführten Hauptuntersuchungszielen des Programms orientiert:

1. Entwicklung von Beziehungen für die Seegangsvorhersage an Hand von Winddaten im seewärtigen Bereich der Ostfriesischen Inseln und Küste,
2. quantitative Erfassung der Energieumwandlung des Seegangs durch die Brandung auf den Riffbögen unter Berücksichtigung des unterschiedlichen morphologischen Formeninventars,
3. Erfassung der Seegangsdämpfung bei Ausbreitung über die Watten,
4. Ermittlung von Bemessungsgrößen im Hinblick auf die Seegangsbelastung von Küstenschutzwerken unter Berücksichtigung der hydrologisch-morphologischen und konstruktiven Randbedingungen.

3. Seegangserzeugende Kräfte

Für die Seegangsentwicklung seewärts der Untersuchungsgebiete sind Windbewegungen aus westlichen bis nordnordöstlichen Richtungen von besonderer Bedeutung, da in diesem Richtungsbereich die längsten Windwirkwege über verhältnismäßig große Wassertiefen vorhanden sind (Abb. 3). Bei Winden aus diesen Richtungen tritt im Untersuchungsgebiet der stärkste Seegang auf, und zur Ausbildung voll ausgereiften Seegangs ist selbst bei hohen Windgeschwindigkeiten nur eine Wirkdauer von wenigen Stunden erforderlich (Niemeyer, 1976). Die hydrographischen Merkmale dieses Gebietes lassen für gleiche Windbedingungen die Entstehung eines in seiner Größenordnung fast einheitlichen Seegangs erwarten. Daher wurden erste Untersuchungen zur Überprüfung von Zusammenhängen zwischen Windgeschwindigkeiten und Wellenhöhen im Küstenvorfeld an Hand des in der Station I gemessenen Seegangs und der Windregistrierungen der Wetterwarte Norderney vorgenommen. Als kennzeichnende Größen wurden die signifikante und die maximale Wellenhöhe einer Meßreihe sowie die mittlere Windgeschwindigkeit für die letzten drei oder sechs Stunden vor Beginn der Wellenmessungen ausgewählt. Die Tests wurden dabei vorab lediglich mit der signifikanten Wellenhöhe $H_{1/3}$ ausgeführt, da hierfür eine geringere Streuung als bei der Verwendung von H_{max} zu erwarten war.

An Hand einer linearen Regression konnte dann für das gesamte Datenkollektiv eine recht gute Übereinstimmung zwischen dem Quadrat der mittleren Windgeschwindigkeit, die in den letzten sechs Stunden vor Beginn der jeweiligen Wellenmessung herrschte, und der signifikanten Wellenhöhe erzielt werden (Abb. 4). Um zu dimensionsechten Gleichungen zu gelangen, ist dabei die Wellenhöhe dem Verhältnis von quadrierter Windgeschwindigkeit und Erdbeschleunigung gegenübergestellt worden.

Alternativuntersuchungen mit demselben Datenkollektiv ergaben die beste Übereinstimmung für einen Potenzansatz (Abb. 5). Auch physikalisch entspricht der hier gefundene Ansatz eher den wirklichen Gegebenheiten, da er sich besser dem Ausreifeprozeß des Seegangs anpaßt als ein lineares Gesetz.

Die Küste, 34 (1979), 53-70

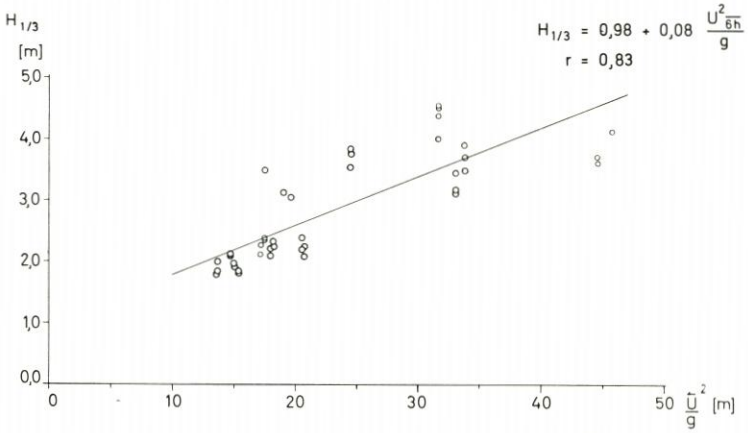

Abb. 4. Lineare Regression für $H_{1/3}$ und $\frac{\overline{u}^2_{(\overline{6h})}}{g}$

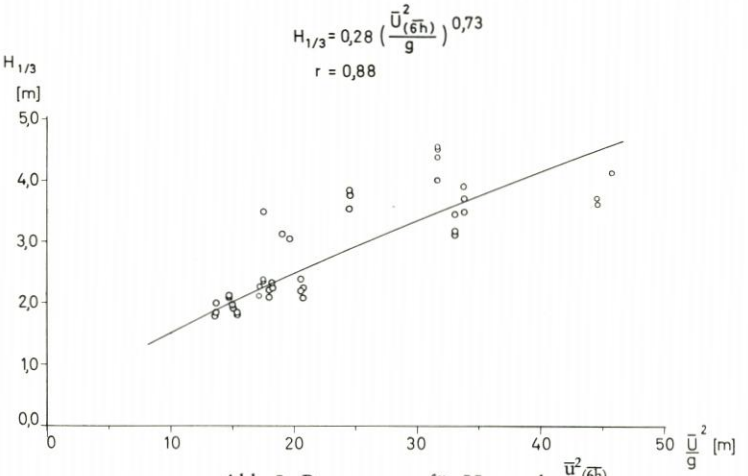

Abb. 5. Potenzansatz für $H_{1/3}$ und $\frac{\overline{u}^2_{(\overline{6h})}}{g}$

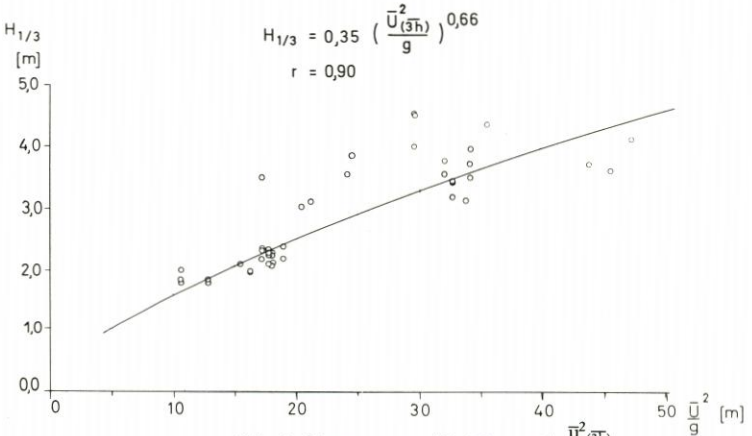

Abb. 6. Potenzansatz für $H_{1/3}$ und $\frac{\overline{u}^2_{(\overline{3h})}}{g}$

Die Küste, 34 (1979), 53-70

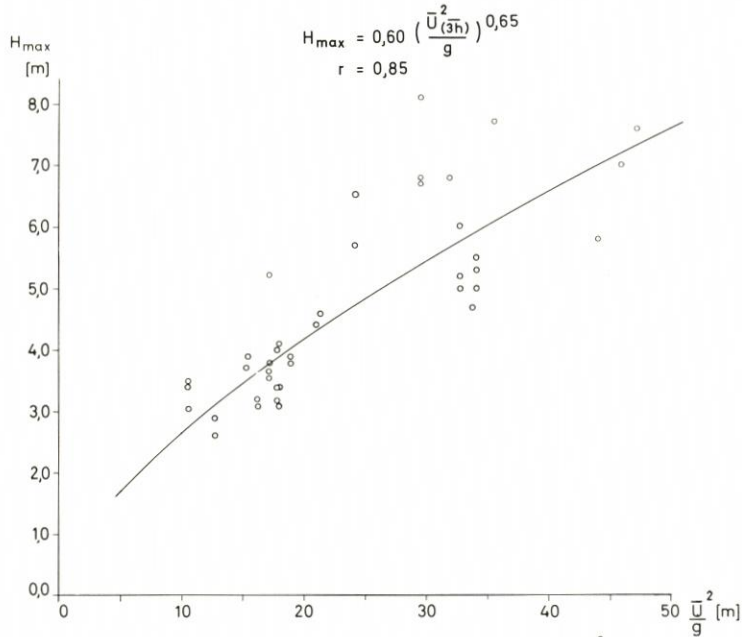

Abb. 7. Potenzansatz für H_{max} und $\frac{\bar{u}^2_{(3h)}}{g}$

Vergleiche des Einflusses der Windwirkdauer zeigen weiterhin, daß eine bessere Übereinstimmung zwischen den Daten und der Anpassungsfunktion erreicht werden kann, wenn für die Windgeschwindigkeit nur das Mittel der letzten drei Stunden berücksichtigt wird (Abb. 6). Ebenso wie für die signifikante Wellenhöhe läßt sich auch für die maximale Wellenhöhe eine derartige Beziehung mit hoher statistischer Absicherung finden (Abb. 7). Diese Ergebnisse zeigen, daß für die Windsee im Untersuchungsgebiet die in den letzten drei Stunden vor ihrem Auftreten herrschenden Windgeschwindigkeiten maßgebend für ihre Höhenentwicklung sind.

Ein Vergleich dieser Ergebnisse mit denen der Untersuchungen von SCHÜTTRUMPF (1973) in bezug auf die Gültigkeit der Wellenvorhersageverfahren von BRETSCHNEIDER (1954, 1957) für den Bereich der südlichen Nordsee ergibt allerdings, daß ein Einfluß einer länger als dreistündigen Windwirkdauer auf die Höhenentwicklung des Seegangs – bei höheren Windgeschwindigkeiten als den hier bisher erfaßten – nicht ausgeschlossen werden kann. Ebenso wird bei höheren Windgeschwindigkeiten der Einfluß der verschiedenen Windrichtungen erkennbar werden, da dann die längeren Wirkwege mit größeren Wassertiefen wirksam werden.

Allerdings können die hier gefundenen Beziehungen als eine hinreichend genaue Grundlage für die Abschätzung der Wellenhöhen im Küstenvorfeld der Ostfriesischen Inseln und Küste für Zwecke der Wellennach- und -vorhersage angesehen werden.

4. Seegangsdämpfung durch Riffbrandung

Die in das Untersuchungsgebiet von See her einlaufenden Wellen treffen seewärts des Norderneyer Seegats und des Nordweststrandes von Norderney auf den Riffbogen, wo höhere Wellen wegen der geringen Wassertiefen brechen. Bei stark entwickeltem Seegang

Die Küste, 34 (1979), 53-70

branden beinahe alle Wellen auf dem Riffbogen, der dann als ein vom Ostende Juists bis an den Nordstrand von Norderney reichender weißer Ring zu erkennen ist.

Mit zur Niedrigwasserzeit aufgenommenen Luftbildern lassen sich im morphologischen Formeninventar des Riffbogens von Westen nach Osten deutliche Unterschiede erkennen: Die im westlichen Teil dem Seegat vorgelagerten Platen sind wesentlich höher und haben eine erheblich größere räumliche Ausdehnung als die im östlichen vor dem Norderneyer Nordweststrand gelegenen Bereiche (Abb. 8).

Abb. 8. Luftaufnahme des Riffbogens zwischen Juist und Norderney (Blickrichtung von Westen nach Osten)

Die Analyse der in den Stationen I, II und III gemessenen Daten läßt dann auch deutlich erkennen, daß die verschiedenen morphologischen Formen der Platen des Riffbogens entsprechend unterschiedliche Einflüsse auf die dortigen Brandungsvorgänge ausüben. Dies zeigt sich sowohl qualitativ als auch quantitativ: Der Seegang in Lee des östlichen vor dem Norderneyer Nordweststrand gelegenen Teils des Riffbogens ist merklich höher als der landseitig des westlichen Bereichs.

Die Höhe der in Station II gemessenen Wellen zwischen dem östlichen Bereich des Riffbogens und dem Norderneyer Nordweststrand wird stark durch die jeweils zugehörige Wassertiefe beeinflußt. Mit Hilfe der linearen Regression ist ein – wenn auch nicht sehr enger – Zusammenhang zwischen signifikanter Wellenhöhe und Wassertiefe festzustellen (Abb. 9). Allerdings ist der Korrelationskoeffizient zu niedrig, um andere bedeutende Einflüsse auszuschließen. Dies wird auch an der graphischen Darstellung (Abb. 9) deutlich, aus der zu ersehen ist, daß bei einer vorgegebenen Wassertiefe recht unterschiedliche Wellenhöhen auftreten können.

Somit wurden eingehendere Untersuchungen unter Berücksichtigung der seewärts des

Die Küste, 34 (1979), 53-70

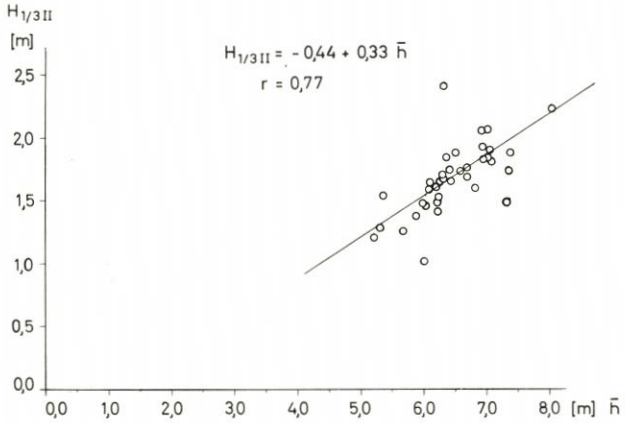

Abb. 9. Lineare Regression für die signifikante Wellenhöhe und die Wassertiefe nach den Meßdaten an der Station II

Riffbogens in der Station I gemessenen Wellenhöhen vorgenommen. Die Wassertiefe über dem Riffbogen wird dabei durch den mittleren Tidewasserstand während einer Meßperiode repräsentiert, da deren Messung in diesem Bereich beinahe unmöglich ist.

Die Seegangsdämpfung im östlichen Bereich des Riffbogens vor dem Nordweststrand von Norderney wird als das Verhältnis der in Lee und Luv des Riffbogens in den Stationen II

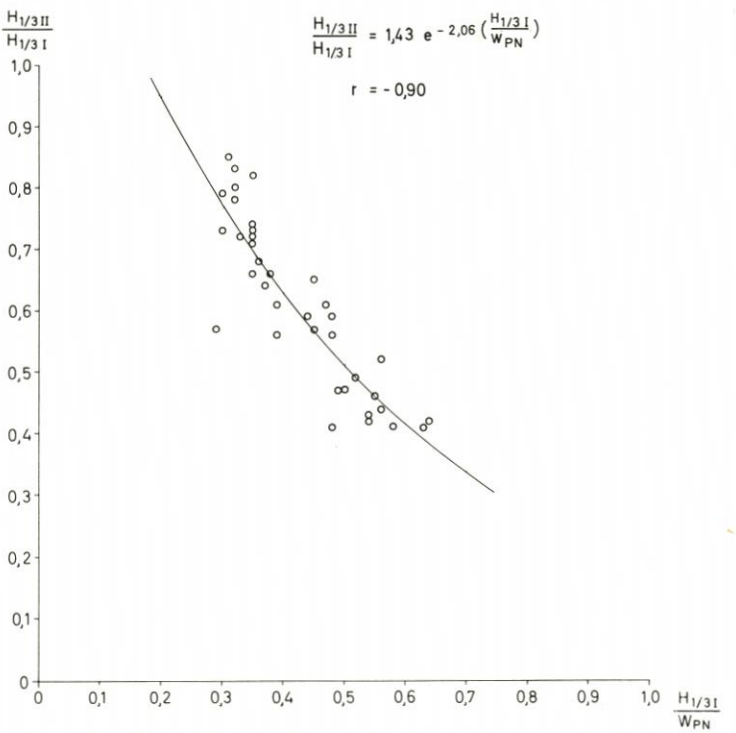

Abb. 10. Dämpfung der signifikanten Wellenhöhe durch die Brandung im östlichen Bereich des Riffbogens

Die Küste, 34 (1979), 53-70

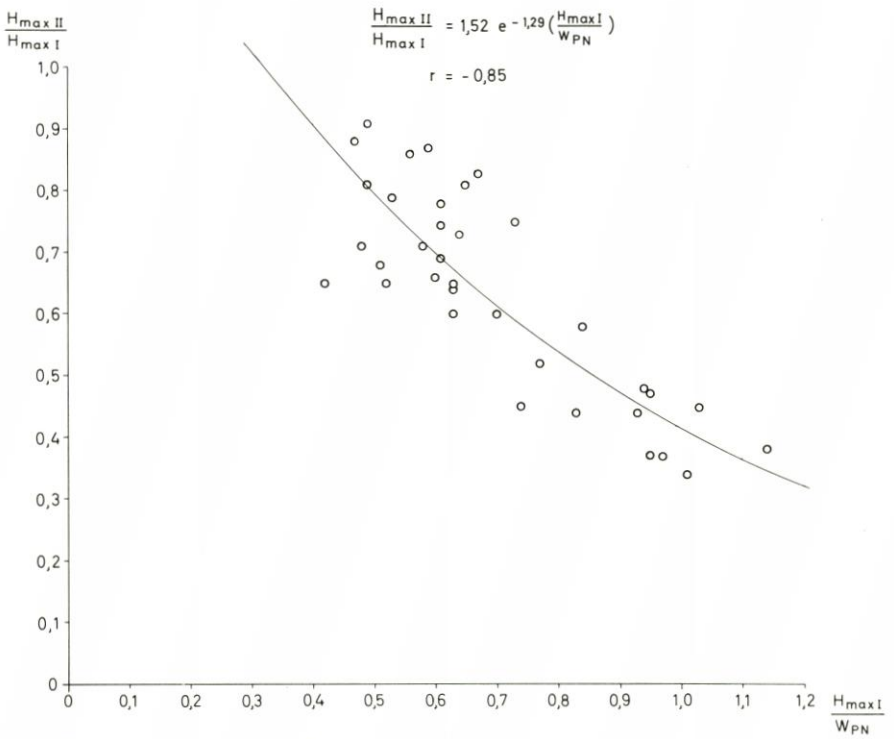

Abb. 11. Dämpfung der maximalen Wellenhöhe durch die Brandung im östlichen Bereich des Riffbogens

und I gemessenen Wellenhöhen und als Funktion der seewärts in Station I anlaufenden Wellen, bezogen auf den zur Meßreihe gehörenden mittleren Tidewasserstand, dargestellt:

$$\frac{H_{II}}{H_{I}} = f \left(\frac{H_{I}}{W_{PN}}\right) \qquad (1)$$

In den Abbildungen 10 und 11 sind als Beispiele für die quantitative Beschreibung der Seegangsdämpfung in diesem Bereich des Riffbogens die Datenkollektive für die signifikanten und maximalen Wellenhöhen entsprechend der Funktionsgleichung (1) aufgetragen. Die Dämpfung der Wellenhöhen läßt sich mit Hilfe eines Exponentialgesetzes darstellen, was durch die hohen Betragswerte von r zum Ausdruck kommt (Abb. 10 u. 11).

Diese Ergebnisse bestätigen in quantitativer Hinsicht eindeutig die bisherige qualitative Erkenntnis, daß der Riffbogen für den strukturell unterversorgten Nordweststrand von Norderney eine bedeutende Schutzfunktion wahrnimmt. Da die Wellenhöhen im Küstenvorfeld bei Sturmtiden wesentlich stärker wachsen als der Wasserstand steigt, nimmt dann die Dämpfung des Seegangs auf dem Riffbogen stark zu. Diese Beobachtung gilt ebenso für die Riffbögen im Bereich der anderen Ostfriesischen Inseln.

Auf den Platen im westlichen Teil des Riffbogens vor dem Norderneyer Seegat sind die Wassertiefen im Verhältnis zu den Höhen des einschwingenden Seegangs wesentlich geringer als im östlichen Bereich. Da hier zudem die flächenmäßige Ausdehnung der Platen erheblich größer ist als dort, findet auch eine viel intensivere Energieumwandlung statt. Die Dämpfung des Seegangs in diesem Bereich des Riffbogens unterliegt somit auch anderen Einflüssen: Für alle vorliegenden Messungen gilt übereinstimmend, daß die jeweilige Wassertiefe auf den

Die Küste, 34 (1979), 53-70

Platen keinen erkennbaren Einfluß auf die Stärke der Seegangsdämpfung hat, die sich als Differenz der in den Stationen I und III gemessenen Wellenhöhen see- und landwärts des Riffbogens allein in Abhängigkeit vom seewärtigen Seegangsgeschehen darstellen läßt:

$$\Delta H_{I/III} = f(H_I) \tag{2}$$

Ebenso wie für den östlichen Bereich kann die Seegangsdämpfung im westlichen Bereich des Riffbogens durch quantitative Beziehungen beschrieben werden. Für die signifikanten und maximalen Wellenhöhen aller Meßreihen der Stationen I und III sind entsprechende graphische Auftragungen vorgenommen worden (Abb. 12 u. 13). Statistische Untersuchungen ergaben hierbei einen sehr strengen linearen Zusammenhang zwischen der Seegangsdämpfung auf dem Riffbogen und der seeseitigen Ausgangswellenhöhe, was besonders durch die außerordentlich hohen Korrelationskoeffizienten deutlich wird (Abb. 12 u. 13).

Die Abnahme der Wellenhöhe im Bereich des Seegats ist von erheblicher Bedeutung für die Seegangsverhältnisse auf den Watten und die Wellenbelastung der Seedeiche in den leeseitigen Bereichen der Inseln und an der Festlandsküste. Im Hinblick hierauf haben die Riffbögen der ostfriesischen Seegaten nicht nur eine wesentliche Schutzfunktion für die westlichen und südlichen Bereiche der Inseln, sondern gleichzeitig auch für die Festlandsküste.

Die Stärke der Seegangsdämpfung kann weiterhin sehr deutlich mit Hilfe der an den Stationen II und III in Lee vom Riffbogen gemessenen maximalen Wellenhöhen und Wassertiefen aufgezeigt werden. Das Verhältnis hat als Brecherkriterium für den Flachwasserbereich nach den Naturmessungen von FÜHRBÖTER (1974) und SIEFERT (1974) den Wert:

$$\frac{H_b}{h_b} = 1 \tag{3}$$

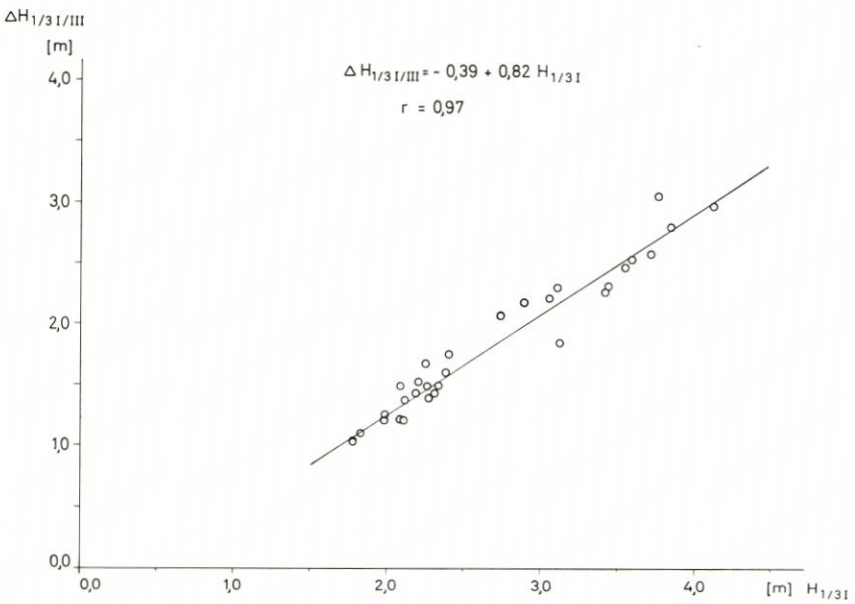

Abb. 12. Dämpfung der signifikanten Wellenhöhe durch Brandung im westlichen Bereich des Riffbogens

Die Küste, 34 (1979), 53-70

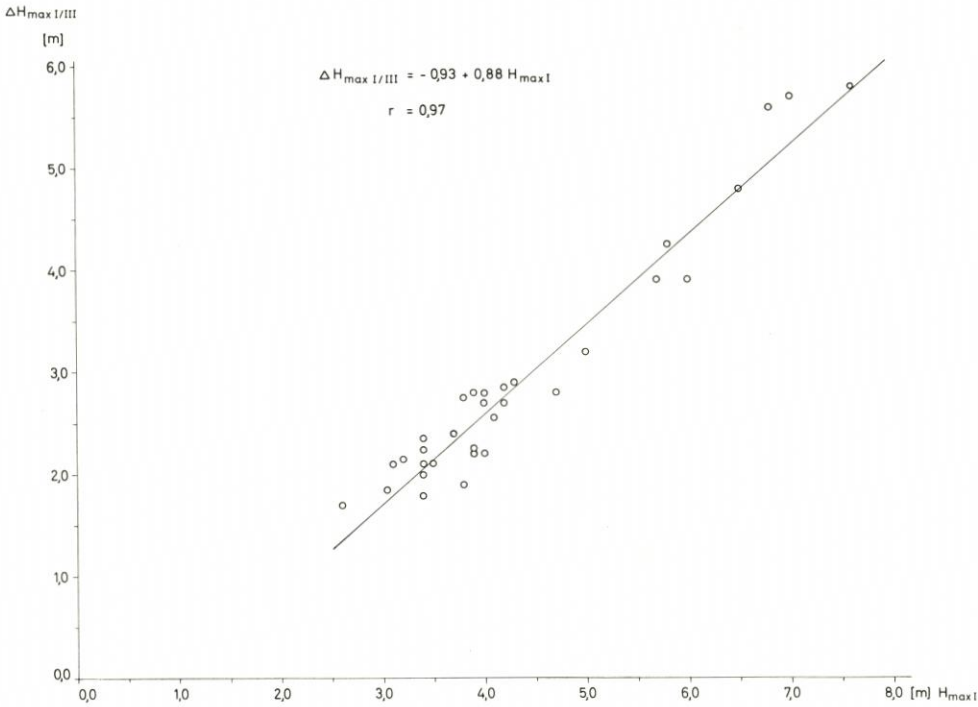

Abb. 13. Dämpfung der maximalen Wellenhöhe durch Brandung im westlichen Bereich des Riffbogens

In diesem Fall ergeben sich für das Verhältnis nach den Messungen an den Stationen II und III folgende Werte:

$$\frac{H_{max\,II}}{h} \leq 0,57 \tag{4a}$$

$$\frac{H_{max\,III}}{h} \leq 0,39 \tag{4b}$$

In Lee des Riffbogens tritt daher keine Flachwasserbrandung im Vorfeld der Inseln und Festlandsküste auf. Erst auf den Inselstränden und an den Deichen selbst bricht der Seegang dann wieder infolge der dort stark abnehmenden Wassertiefen, nachdem er die beruhigten Gebiete durchlaufen hat. In Abb. 14 – aufgenommen vom Nordweststrand der Insel Norderney – ist im Hintergrund die Brandung auf dem Riffbogen als weißer Ring ebenso zu erkennen, wie im Vordergrund das brandungsfreie Gebiet zwischen Riffbogen und Brandungsbereich am Strand.

5. Seegangsdämpfung auf den Watten

Während der Seegang in Lee des östlichen Riffbogenbereiches auf den Nordweststrand von Norderney einschwingt und dort ausbrandet, durchlaufen die nach dem Branden im westlichen Teil regenerierten Wellen das Seegat und breiten sich dann über die Watten bis an die Festlandsküste aus. Obwohl sich infolge der starken Dämpfung im Riffbogenbereich auf den Watten keine Flachwasserbrandung ausbilden kann, ist doch ein bestimmtes Maß an

Die Küste, 34 (1979), 53-70

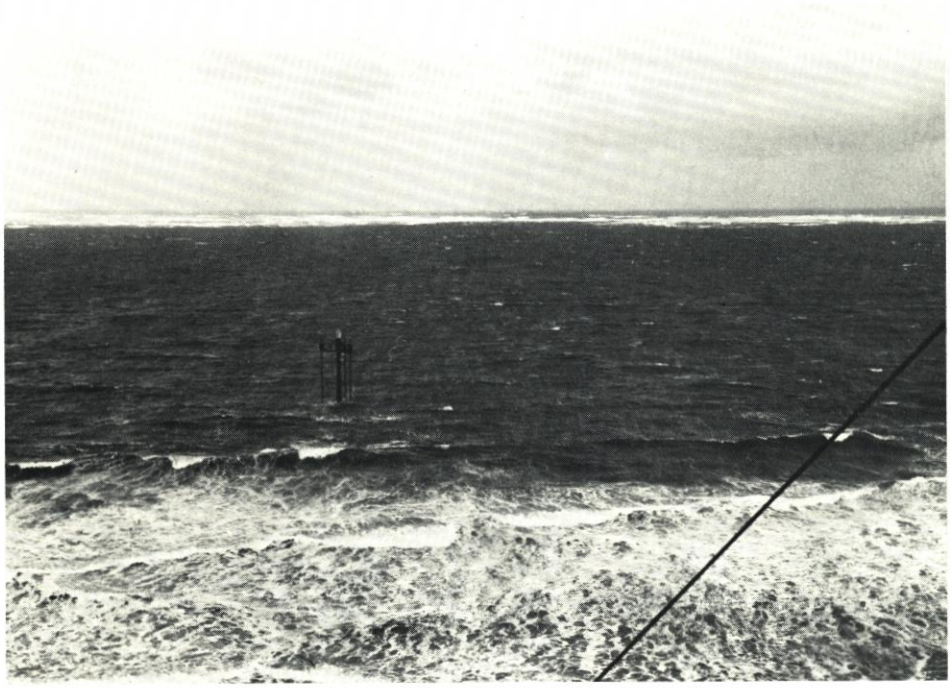

Abb. 14. Riffbrandung vor dem Nordweststrand von Norderney

Dämpfung des Seegangs zwischen dem Seegat und der Festlandsküste festzustellen. Dieser Effekt ist auf eine sich überlagernde Wirkung von Refraktion, Diffraktion, Shoaling, Sohlreibung und Perkolation zurückzuführen, ohne daß die Anteile der einzelnen Einflüsse größenordnungsmäßig abschätzbar sind.

Bei der statistischen Überprüfung des Datenmaterials stellte sich heraus, daß sich die Dämpfung auf den Watten innerhalb des Höhenspektrums unterschiedlich auswirkt. Auf der Grundlage des bisher allerdings noch wenig umfangreichen Datenmaterials lassen sich dabei

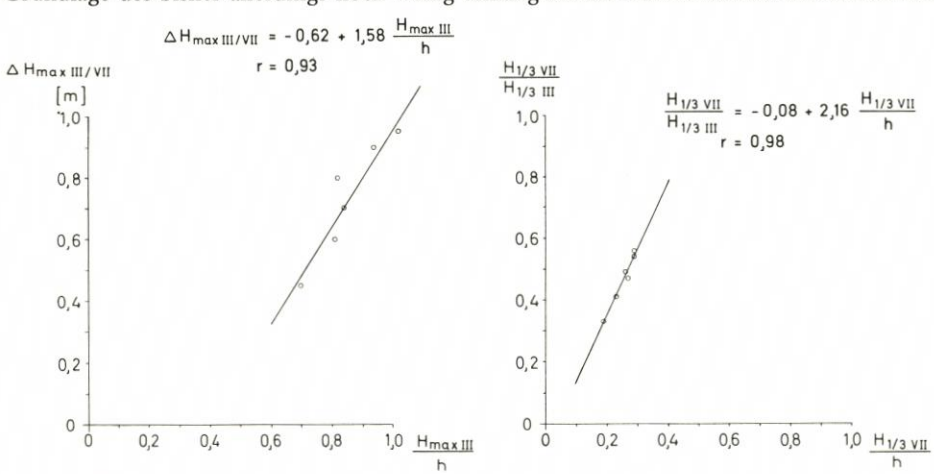

Abb. 15. Dämpfung der maximalen und signifikanten Wellenhöhen bei Ausbreitung auf den Watten (nach Messungen in den Stationen III und VII)

Die Küste, 34 (1979), 53-70

folgende Unterschiede feststellen: Die Dämpfung der hier als Beispiel herangezogenen, in den Stationen III und VII gemessenen maximalen Wellenhöhen am südlichen Ausgang des Norderneyer Seegats und vor einem Schardeich an der Festlandsküste bei Norddeich läßt sich als deren Differenz in Abhängigkeit vom Verhältnis der maximalen Wellenhöhe zur Wassertiefe am Ausgang des Seegats darstellen:

$$\Delta H_{III/VII} = f\left(\frac{H_{III}}{h}\right) \tag{5}$$

Die Meßdaten sind entsprechend dieser Funktionsgleichung in Abb. 15a aufgetragen, wobei sich an Hand des sehr hohen Korrelationskoeffizienten ein strenger linearer Zusammenhang für das Datenkollektiv nachweisen läßt.

Die Dämpfung der anderen kennzeichnenden Wellenhöhen des Spektrums genügt dagegen einer anders aufgebauten Funktionsgleichung, in der die in der Station VII gemessene Wellenhöhe sowohl von der in der Station III registrierten als auch von deren Verhältnis zur Wassertiefe abhängig ist:

$$H_{VII} = f\left(H_{III}, \frac{H_{III}}{h}\right) \tag{6}$$

Als repräsentativ für alle Untersuchungen sind die Ergebnisse für die signifikante Wellenhöhe in Abb. 15b aufgetragen, wobei die Funktionsgleichung für diese Darstellung umgeformt wurde.

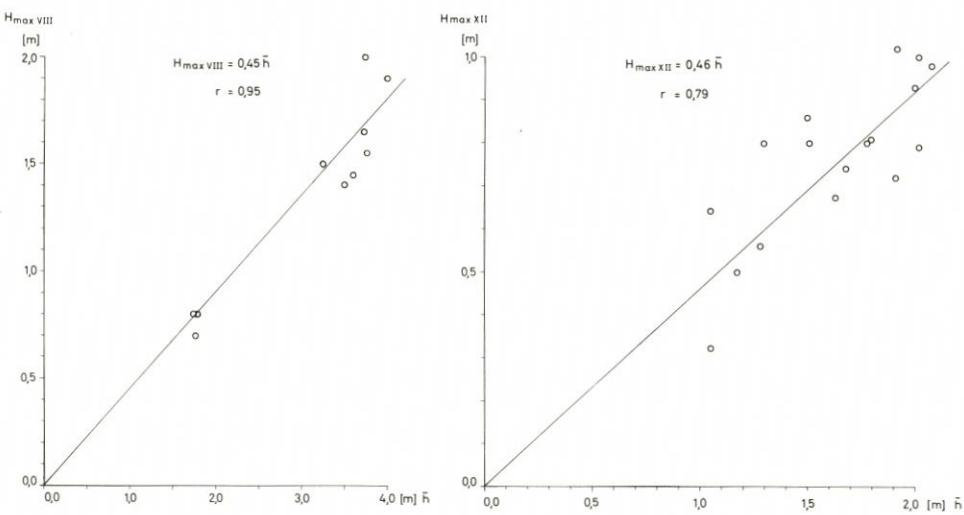

Abb. 16. Verhältnis von maximalen Wellenhöhen und Wassertiefen an den Stationen VIII vor einem Schardeich und XII auf einem Deichvorland

Die fortschreitende Seegangsdämpfung auf den Watten läßt sich weiterhin durch Vergleich des Verhältnisses von maximaler Wellenhöhe und Wassertiefe an zwei verschiedenen Stationen vor den Deichen der Festlandsküste nachweisen (Abb. 16). Die Station VIII liegt vor einem Schardeich östlich von Norddeich in 8 km Entfernung vom Seegat, die Station XII auf einem Deichvorland in Lee der Insel Norderney, 14 km vom Seegat entfernt. Der Vergleich zeigt, daß sich für beide Bereiche ein gleichbleibendes Verhältnis von maximaler Wellenhöhe und Wassertiefe ergibt. Werden weiterhin die Höhenzunahme der Watten und das Wachsen

Die Küste, 34 (1979), 53-70

der Vorländer bei zunehmendem Abstand vom Seegat als ein charakteristisches morphologisches Merkmal des Untersuchungsgebietes in diesen Vergleich einbezogen, so ergibt sich zwischen örtlichen Watthöhen und örtlichem Seegangsklima ein kausaler Zusammenhang: Wattmorphologie und Seegang stehen in einem ausgewogenen dynamischen Gleichgewichtszustand. Mit zunehmender Entfernung vom Seegat nimmt die Intensität des Seegangs ab und damit auch die Turbulenz, wodurch ein stärkeres Höhenwachstum der Watten bis zur Ausbildung von Vorländern bei Ablagerung auch feinerer Sedimente möglich wird.

Die in den Stationen VIII und XII festgestellten Verhältniswerte unterstützen ebenfalls die These, daß zwischen dem Riffbogen und den Festlandsdeichen eine Zone ohne Flachwasserbrandung liegt. SIEFERT (1974) hat bei seinen Naturmessungen im südlichen Elbmündungsgebiet Verhältniswerte in der gleichen Größenordnung für brandungsfreie Watten festgestellt.

Aus der Gesamtheit dieser Ergebnisse muß weiterhin geschlossen werden, daß die zu beobachtende geringere Seegangsbelastung von Vorlanddeichen gegenüber Schardeichen bei Orkanfluten nicht primär eine Folge der Seegangsdämpfung auf den Vorländern ist. Vielmehr wird der Seegang bereits vor dem Einschwingen auf die Vorländer im vorgelagerten Wattbereich stärker gedämpft als auf den Watten vor Schardeichen, was auf die längere Laufstrecke des Seegangs vom Ausgang des Seegats und der dabei fortschreitenden Dämpfungswirkung der Watten zurückzuführen ist. Erst diese starke Seegangsdämpfung und die damit verbundene Abminderung der Turbulenz erlaubt in entsprechend geschützt gelegenen Wattgebieten das natürliche Wachstum der Vorländer. Die bei Orkanfluten auf den Vorländern vorhandenen, im Verhältnis zu den bereits auf den Watten stark abgeminderten Wellenhöhen, großen Wassertiefen ermöglichen es dem Seegang, ungebrochen bis an die Deiche durchzuschwingen. Eine besondere Dämpfungswirkung auf den Seegang durch Brandung auf den Vorländern ist daher bei Orkanfluten nicht zu erwarten (NIEMEYER, 1977b).

6. Untersuchungen zum Wellenauflauf

Die Untersuchungen zum Seegangsklima im Bereich der Ostfriesischen Inseln und Küste sind mit synchronen Naturmessungen des Wellenauflaufs an Seedeichen verbunden. Für diese Zwecke sind mittlerweile vier Wellenauflaufmeßgeräte an Deichen eingebaut worden. Ungestörte Messungen des Wellenauflaufs können allerdings nur bei sehr hohen Sturmtidewasserständen ausgeführt werden, da die konstruktive Ausbildung der Deiche im unteren Bereich mit ihren breiten, sehr flach geneigten Außenbermen den Wellenauflauf so stark beeinflussen, daß eine Extrapolation der hier gemessenen Werte für den Eintritt höherer Wasserstände als unzulässig angesehen werden muß. Da derart hohe Wasserstände seit dem Einbau der neuentwickelten Wellenauflaufmeßgeräte noch nicht eingetreten sind, liegen auch keine direkten Messungen des Wellenauflaufs vor, die zu neuen Ergebnissen hätten führen können. Allerdings wurden bereits mit Daten von Naturmessungen (NIEMEYER, 1977b) Untersuchungen über den Zusammenhang von Seegangsparametern und Wellenauflauf vorgenommen und deren Einfluß auf die Höhe des Wellenauflaufs nach den Ergebnissen von HUNT (1959) für monochromatische Wellen sowie denen von VAN OORSCHOT und D'ANGREMOND (1968) für Spektren bestimmt. Die allgemein anerkannten Untersuchungsergebnisse zeigen, daß die Höhe des Wellenauflaufs eine Funktion der Periode und der Quadratwurzel der Wellenhöhe ist:

$$R = f\,(T,\ \sqrt{H}) \qquad (7)$$

Die Küste, 34 (1979), 53-70

Entsprechend wird der Einfluß des Seegangs auf die Höhe des Wellenauflaufs hier durch ein Auflaufpotential der Wellen beschrieben, wobei nur die Seegangsparameter berücksichtigt und alle anderen Einflüsse ausgeklammert sind (NIEMEYER, 1977a).

Die Daten von 17 an der Station XII auf einem Deichvorland während der Orkanflut vom 20./21. Januar 1976 aufgezeichneten Meßreihen (NIEMEYER, 1977b) wurden zur Berechnung des Auflaufpotentials unter besonderer Berücksichtigung höherer und längerer Wellen ausgewertet. Hierbei war festzustellen, daß etwa die höchsten fünf Prozent des Wellenauflaufs durch den Seegang erzeugt wurden, der innerhalb des Spektrums zu den höchsten oder längsten zehn Prozent gehörte. Der maximale Wellenauflauf wird dabei fast ausschließlich von der höchsten oder längsten Welle hervorgerufen.

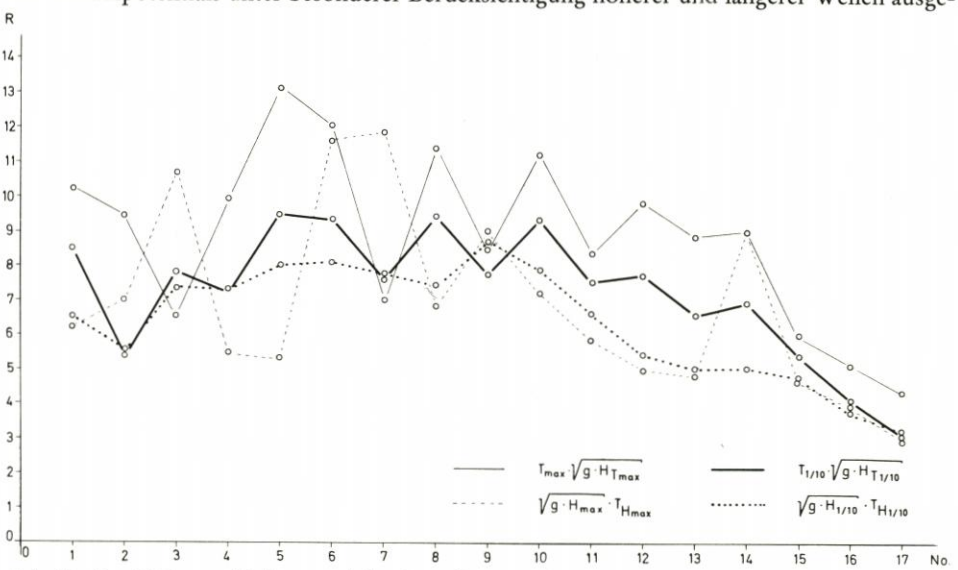

Abb. 17. Vergleich verschiedener, auf der Grundlage von Naturmessungen berechneter Wellenauflaufpotentiale

In Abb. 17 ist zum Vergleich das Wellenauflaufpotential für alle 17 Meßreihen aufgetragen, wobei wie folgt unterschieden wurde:

1. das Wellenauflaufpotential R_{Tmax} der längsten Welle des jeweiligen Spektrums mit der Periode T_{max} und der Höhe H_{Tmax},
2. das Wellenauflaufpotential R_{Hmax} der höchsten Welle des jeweiligen Spektrums mit der Höhe H_{max} und der Periode T_{Hmax},
3. das Wellenauflaufpotential $R_{T\,1/10}$ einer Welle mit der mittleren Periode $T_{1/10}$ und mittleren Höhe $H_{T\,1/10}$ der 10 Prozent längsten Wellen des jeweiligen Spektrums,
4. das Wellenauflaufpotential $R_{H\,1/10}$ einer Welle mit der mittleren Höhe $H_{1/10}$ und mittleren Periode $T_{H\,1/10}$ der 10 Prozent höchsten Wellen des jeweiligen Spektrums.

Das höchste Wellenauflaufpotential wird zumeist bei den längsten Wellen der jeweiligen Meßreihe hervorgerufen (Abb. 17). Die einzelnen berechneten Wellenauflaufpotentiale stehen zueinander in folgender Beziehung:

$$R_{T\,1/10} = 0{,}82\ R_{Tmax} \tag{8a}$$
$$R_{Hmax} = 0{,}78\ R_{Tmax} \tag{8b}$$
$$R_{H\,1/10} = 0{,}72\ R_{Tmax} \tag{8c}$$
$$R_{H\,1/10} = 0{,}92\ R_{Hmax} \tag{8d}$$

Die Küste, 34 (1979), 53-70

Nach den bisher erzielten Ergebnissen, die noch durch synchrone Messungen von Seegang und Wellenauflauf abzusichern sind, kann bei einer Überlaufsicherheit von bis zu 5 Prozent der zu erwartende maximale Wellenauflauf nach Gleichung (8a) für Bemessungszwecke um 18 % reduziert werden (NIEMEYER, 1977a).

7. Schriftenverzeichnis

BRETSCHNEIDER, C. L.: Generation of Wind Waves over a Shallow Bottom. Beach Erosion Board, T. M. 51. 1954.

BRETSCHNEIDER, C. L.: Hurricane Design Wave Practise. Proc. ASCE, Vol. 83, WW 2, 1957.

FÜHRBÖTER, A.: Einige Ergebnisse aus Naturuntersuchungen in Brandungszonen. Mitt. Leichtweiß-Inst. d. TU Braunschweig, H. 40, 1974.

HUNT, I. A.: Design of Seawalls and Breakers. Proc. ASCE, Vol. 85, WW 3, 1959.

LUCK, G. u. NIEMEYER, H. D.: Seegangsmessungen im Bereich der Ostfriesischen Inseln und Watten. Meerestechnik, Bd. 7, H. 4, 1976.

LUCK, G. u. NIEMEYER, H. D.: Das Seegangsmeßprogramm Ostfriesische Inseln und Küste. Dt. Gewässerkdl. Mitt., H. 6, 1977.

NIEMEYER, H. D.: Der Verlauf der Sturmtiden vom Januar 1976 im Bereich der Ostfriesischen Inseln. Jber. 1975, Forsch.-Stelle f. Insel- u. Küstenschutz Norderney, Bd. XXVII, 1976.

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

NIEMEYER, H. D.: Seegangsmessungen auf Deichvorländern. Jber. 1976, Forsch.-Stelle f. Insel- u. Küstenschutz Norderney, Bd. XXVIII, 1977 (b).

NIEMEYER, H. D.: Wave Climate Study in the Region of the East Frisian Islands and Coast. Proc. 16th Intern. Conf. on Coastal Eng., 1979.

SCHÜTTRUMPF, R.: Über die Bestimmung von Bemessungswellen für den Seebau am Beispiel der südlichen Nordsee. Mitt. Franzius-Inst. d. TU Hannover, H. 39, 1973.

SIEFERT, W.: Über den Seegang in Flachwassergebieten. Mitt. Leichtweiß-Inst. d. TU Braunschweig, H. 40, 1974.

VAN OORSCHOT, J. H. u. D'ANGREMOND, K.: The Effect of Wave Energy Spectra on Wave Run-up. Proc. 11th Intern. Conf. on Coastal Eng., 1968.

8. Symbole

g	Erdbeschleunigung
h	Wassertiefe
h_b	Wassertiefe im Brechpunkt
H	Wellenhöhe
H_b	Brecherhöhe
$H_{1/3}$	signifikante Wellenhöhe: arithmetisches Mittel der 33 % höchsten Wellen einer Meßreihe
$H_{1/10}$	arithmetisches Mittel der 10 % höchsten Wellen einer Meßreihe
H_{max}	maximale Wellenhöhe einer Meßreihe
H_{Tmax}	Wellenhöhe der längsten Welle einer Meßreihe
$H_{T\ 1/10}$	mittlere Wellenhöhe der 10 % längsten Wellen einer Meßreihe
$H_I, H_{II}, \ldots H_{XII}$	an den Stationen I, II, ... XII gemessene Wellenhöhen
r	Korrelationskoeffizient bzw. Quadratwurzel des Bestimmtheitsmaßes
R	Wellenauflauf
$R_{H\ 1/10}$	Auflaufpotential einer Welle mit der mittleren Höhe und Periode der 10 % höchsten Wellen einer Meßreihe
R_{Hmax}	Auflaufpotential der höchsten Welle einer Meßreihe
$R_{T\ 1/10}$	Auflaufpotential einer Welle mit der mittleren Periode und Höhe der 10 % längsten Wellen einer Meßreihe

Die Küste, 34 (1979), 53-70

R_{Tmax}	Auflaufpotential der längsten Welle einer Meßreihe
T	Wellenperiode
$T_{1/10}$	arithmetisches Mittel der 10 % längsten Perioden einer Meßreihe
T_{max}	längste Periode einer Meßreihe
$T_{H\ 1/10}$	mittlere Periode der 10 % höchsten Wellen einer Meßreihe
T_{Hmax}	Periode der höchsten Welle einer Meßreihe
u	Windgeschwindigkeit
$\bar{u}_{(3h)}$	mittlere Windgeschwindigkeit in den letzten drei Stunden vor Beginn der Seegangsmessung
$\bar{u}_{(6h)}$	mittlere Windgeschwindigkeit in den letzten sechs Stunden vor Beginn der Seegangsmessung
W_{PN}	mittlerer Tidewasserstand während der Dauer einer Meßreihe
$H_{I/III}$	Differenz der an den Stationen I und III gemessenen Wellenhöhen