

# Topographische Parameter zur Bestimmung des küstennahen Seegangs

Von Winfried Siefert

## Inhalt

Summary .. .. .	28
I. Einleitung und Symbol-Verzeichnis .. .. .	28
II. Seegang am Strand .. .. .	29
A. Über die Messungen .. .. .	29
B. Ergebnisse .. .. .	31
III. Gebiete gleicher Seegangscharakteristik	
A. Repräsentative Seegangs-Parameter .. .. .	32
B. Zur Wellensteilheit .. .. .	34
C. Entwicklung topographischer Parameter .. .. .	34
IV. Seegang als Funktion der Topographie .. .. .	35
A. Höchstmögliche mittlere Wellenhöhen .. .. .	35
B. Höhen- und Periodenverteilungen .. .. .	37
V. Zusammenfassung .. .. .	38
VI. Schriftenverzeichnis .. .. .	38

## Summary

*Prototype data from 27 wave stations on and around the tidal flats south of the Elbe estuary enable us to elaborate special shallow water wave characteristics, concerning the variations and correlations of heights, periods, lengths and velocities. This paper deals with some interesting aspects from the engineer's point of view. It turns out that the mean wave height  ${}^mH$  represents the complete shallow water wave spectrum. This parameter depends on 3 local parameters, i.e. depth of water  $d$ , distance  $s$  to deep water area, and mean wave steepness  $\delta = \frac{{}^mH}{mL}$ .*

## I. Einleitung

Seegangsmessungen der FORSCHUNGS- UND VORARBEITENSTELLE NEUWERK mit Oberflächenschwimmern seit 1963 an insgesamt 27 Standorten haben es ermöglicht, in einem bisher nicht vorhanden gewesenen Umfange Daten über den küstennahen Flachwasserseegang zu analysieren. Die Standorte liegen in der Außenelbe und im Watt, in Brandungsbereichen und in geschützten Gebieten, in Wassertiefen zwischen 0 und 10 m (Abb. 1).

Es zeigte sich bald, daß die Darstellung der Seegangsparameter allein in Abhängigkeit vom Wind für jede Station andere Werte liefert und daß eine befriedigende Analyse nur über die Parametrisierung der Topographie möglich ist. Dazu boten nun die Meßergebnisse aus dem Elbmündungsgebiet günstige Voraussetzungen. Aus Gründen der Meßtechnik und der Statistik erwies es sich sogar als sinnvoll, zunächst Seegangsparameter allein mit topographischen Parametern zu korrelieren und die Windverhältnisse erst später in die Betrachtungen einzubeziehen (2,4).

## Symbolverzeichnis

$c$	Wellenlaufgeschwindigkeit in m/s
${}^m c$	mittlere Wellenlaufgeschwindigkeit im natürlichen Seegang
$d$	Wassertiefe in m
$d^*$	Ersatzwassertiefe; $d^* = d + 1$ in m
$g$	Erdbeschleunigung in $m/s^2$
$H$	Wellenhöhe in m
${}^m H$	mittlere Wellenhöhe im natürlichen Seegang
${}^m H_{\max}$	höchstmögliche mittlere Wellenhöhe
$H_{1/3}$	kennzeichnende Wellenhöhe, Mittel der 33 % höchsten Wellen im natürlichen Seegang
$L$	Wellenlänge in m
${}^m L$	mittlere Wellenlänge im natürlichen Seegang
$s$	Entfernung in km von der 10 m KN-Linie
$T$	Wellenperiode in sec
${}^m T$	mittlere Wellenperiode im natürlichen Seegang
$\delta$	mittlere Wellensteilheit; $\delta = {}^m H / {}^m L$
$\eta$	normierte Wellenhöhe; $\eta = H / {}^m H$
$\tau$	normierte Wellenperiode; $\tau = T / {}^m T$

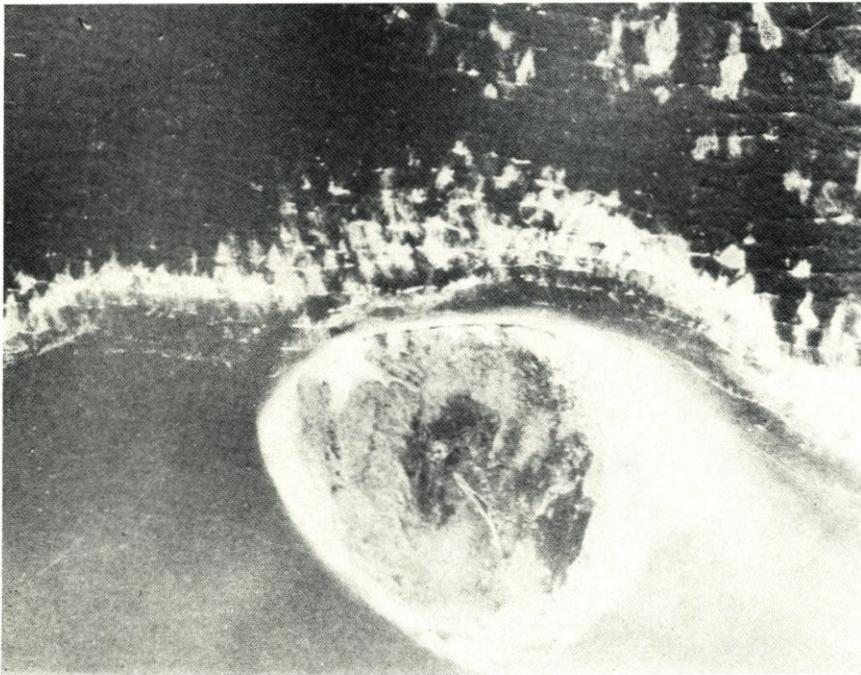


Abb. 2. Brandung am Strand von Scharhörn

## II. Seegang am Strand

## A. Über die Messungen

In den Jahren 1969 bis 1971 wurde Seegang am Strand analysiert, und zwar am Nordrand der Düne Scharhörn, an dem sich bei starkem Wind ein ausgeprägter Brandungstreifen bildet (Abb. 2), sowie am Nord- und am Westufer der großenteils im Schutz

des hohen Wattes liegenden Insel Neuwerk. Die Strandmessungen können nur dann wirklich wertvolles Material liefern, wenn gleichzeitig der Seegang außerhalb des Strandes gemessen wird. Das war bei den hier zitierten Untersuchungen gegeben. Zu den Messungen am Strand konnten Daten von 9 synchron laufenden Wellenmeßgeräten in tieferem Wasser mit herangezogen werden.



Abb. 3  
Aufbau der Stationen  
S 1 und S 2 am Strand  
von Scharhörn



Abb. 4  
Seegangs-Meßstationen  
am Strand von Schar-  
hörn bei einer leichten  
Sturmflut

An Pricken wurden 1970 am Strand in Abständen von 5 Min. jeweils über 1 Min. die sichtbaren Wellen gemessen. Die Messungen umfaßten im einzelnen:

- a)  $mT$  an 7 Punkten vor Scharhörn und Neuwerk
- b)  $mT$  und  $m_c$  sowie Schätzung  $mL$  an 2 Punkten vor Scharhörn
- c) Periodenverteilungen an 2 Punkten vor Scharhörn.

In einem Sonderprogramm wurden 1971 Synchronmessungen des Strandseegangs bei Scharhörn mit zwei 20 m auseinanderstehenden Geräten (S 1 und S 2) durchgeführt. Abbildung 3 zeigt den Aufbau der Meßstrecke, Abb. 4 wurde während einer Messung aufgenommen und Abbildung 5 zeigt das Strandprofil in der Meßstrecke.

Die Messungen am Strand vor Scharhörn geben mit den gleichzeitigen Registrierungen an den festen Stationen auf und vor dem Scharhörnriff (Abb. 1) Aufschluß über die

Entwicklung der Wellenperioden in verschiedenen Wassertiefen. Wie bisher zu beobachten, treten mehrere Wellensysteme gleichzeitig im Tiefwasserbereich auf, die kleine  $mT$  liefern. Auf dem Brandungswatt brandet nur das Hauptsystem, das hier eine größere mittlere Periode aufweist (3). Nach der Energieumwandlung durch Brandung und Bodenreibung mit extrem hoher Turbulenz im Wasser läuft die im Seegang verbleibende Energie am Strand in sehr gleichmäßigem Rhythmus relativ langperiodischer Wellen aus. Die Perioden dieser Wellen, die nur noch dem bestimmenden der gleichzeitig im Tiefwasser vorhandenen Systeme angehören, sind etwa doppelt so groß wie das Mittel der im Tiefwasserbereich gemessenen Periode des komplexen Seegangsgefüges (2).

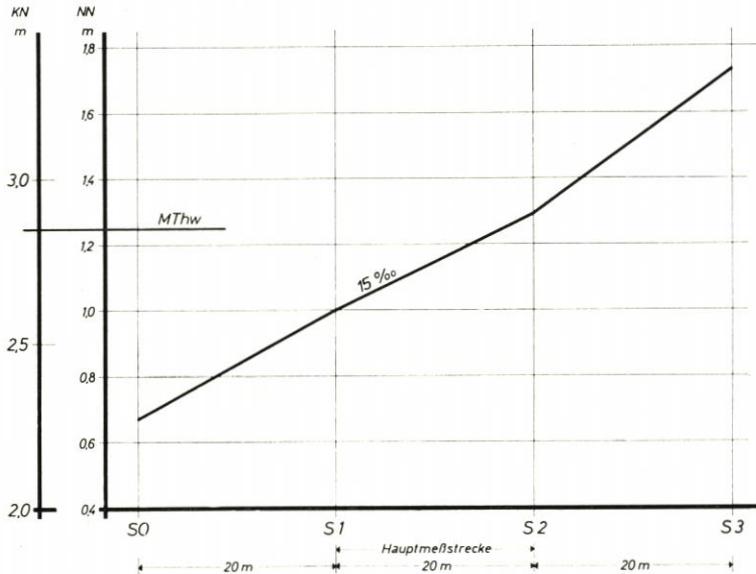


Abb. 5. Strandprofil während der Messungen bei Scharhörn 1971

Die Messungen und Beobachtungen bei Scharhörn während zweier leichter Sturmflutperioden führten zur Bestimmung der Seegangsentwicklung in Abhängigkeit von der Wassertiefe auf Abbildung 6, wobei die Höhen, die Perioden und die Laufgeschwindigkeiten gemessen und die Längen geschätzt wurden.

## B. Ergebnisse

Auf Abbildung 6 sind einige Seegangskennwerte in sehr flachem Wasser nach den Strandmessungen zusammengestellt:

Die mittleren Wellenhöhen  $mH$  steigen im Mittel etwa proportional zur Wassertiefe mit

$$mH = 0,31 d$$

an. Die höchsten  $mH$  erreichen hier, in der zweiten Brandungslinie (Abb. 2), nicht mehr die Höchstwerte, die in der primären Brandungszone mit  $mH_{\max} = 0,5 d^{0,6}$  und selbst im brandungsfreien Watt mit  $mH_{\max} = 0,375 d^{0,6}$  gemessen wurden. Zum Vergleich wurden die nach KISHI (1) höchstmöglichen Höhen nichtbrechender Wellen angegeben.

Die mittleren Perioden des Strandseegangs liegen nach Abbildung 6 etwa bei  $3 \text{ s} \leq mT \leq 6 \text{ s}$  für  $d > 0,6 \text{ m}$ . In geringeren Wassertiefen liegt  $mT$  höher und geht theoretisch für  $d \rightarrow 0$  auf  $mT \rightarrow \infty$ , da bei sehr kleinen Tiefen nicht mehr alle Wellen einen Meßpunkt erreichen. Hierbei gewinnen Brandungstau und Brandungsschwingung an Bedeutung, die bereits mehrfach im Elbmündungsgebiet gemessen wurden, u. a. auch im Oktober 1971 bei Scharhörn. Die Schwingungen haben Perioden um 90 s und Höhen um 10 cm, so daß im seichten Wasser am Strand eine periodische Zu- und Abnahme des Seegangs festzustellen ist, besonders für  $d < 0,6 \text{ m}$ . (Entsprechend ihrer Schwingungsdauer werden Wellen mit Perioden zwischen 30 s und 5 Min. als Infra-Schwerewellen bezeichnet.)

Obwohl das Verhältnis  $\frac{mH}{d}$  beim Strandseegang im Mittel etwa konstant ist, hat sich ein systematischer Unterschied zwischen den Werten an den Stationen S 1 und S 2 vor Scharhörn ergeben. Um Thw liegt das Mittel mit nur geringen Schwankungen bei S 1 um  $\frac{mH}{d} = 0,27$  und im 30 cm flacheren Wasser bei S 2 um  $\frac{mH}{d} = 0,34$  als Zeichen für die Aufsteilung der Wellen im unmittelbaren Strandbereich (Abb. 5). Diese Tendenz kommt wegen des o. g. Einflusses von  $d$  auf  $mT$  für  $d < 0,6 \text{ m}$  bei der mittleren Wellensteilheit  $\frac{mH}{gmT^2}$  nicht zum Ausdruck, wie Abbildung 6 zeigt: Da für  $d < 0,6 \text{ m}$  die Perioden sehr groß werden, erhalten wir sehr geringe Steilheiten, die bei  $d = 15 \text{ cm}$  praktisch 0 sind. Sie steigen von da an etwa linear mit  $d$  und erreichen  $\frac{mH}{gmT^2} = 0,002$  bei  $d = 1 \text{ m}$  Wassertiefe.

Nach der klassischen Theorie gilt für die Wellenlaufgeschwindigkeit im Flachwasser ( $d < \frac{L}{20}$ )

$$c = \sqrt{g \cdot d},$$

so daß  $c$  allein von  $d$  abhängt. Bei aufgestellten (Brandungs-)Wellen hat nach WIEGEL (5) jedoch auch die Wellenhöhe einen Einfluß. Zur Prüfung dieser Beziehung macht der Vergleich der Meßwerte auf Abbildung 6 mit der in Anlehnung an WIEGEL nach den Mittelwerten  $mH = f(d)$  bestimmten Kurve

$$mc = \sqrt{g \cdot \left(d + \frac{3}{4}mH\right)}$$

deutlich, daß diese Beziehung tatsächlich im natürlichen Seegang gilt und somit die Möglichkeit besteht, aus den gemessenen Höhen auf die mittlere Laufgeschwindigkeit zu schließen. Ergänzende Untersuchungen in (4) unterstützen diese Aussage.

### III. Gebiete gleicher Seegangscharakteristik

#### A. Repräsentative Seegangs-Parameter

Natürlicher Seegang besteht nicht, wie in Theorien vielfach vereinfachend angenommen wird, aus monochromatischen Wellen. Es handelt sich hier vielmehr um ein stochastisches Phänomen mit Wellen unterschiedlicher Höhen, Perioden, Längen und Laufrichtungen. Bei genauerem Studium stellt sich jedoch heraus, daß die Beschreibung zumindest des küstennahen Seegangs weitgehend vereinfacht und im Grunde genommen auf einen einzigen Parameter, nämlich die mittlere Wellenhöhe  $mH$ , zurückgeführt werden kann:

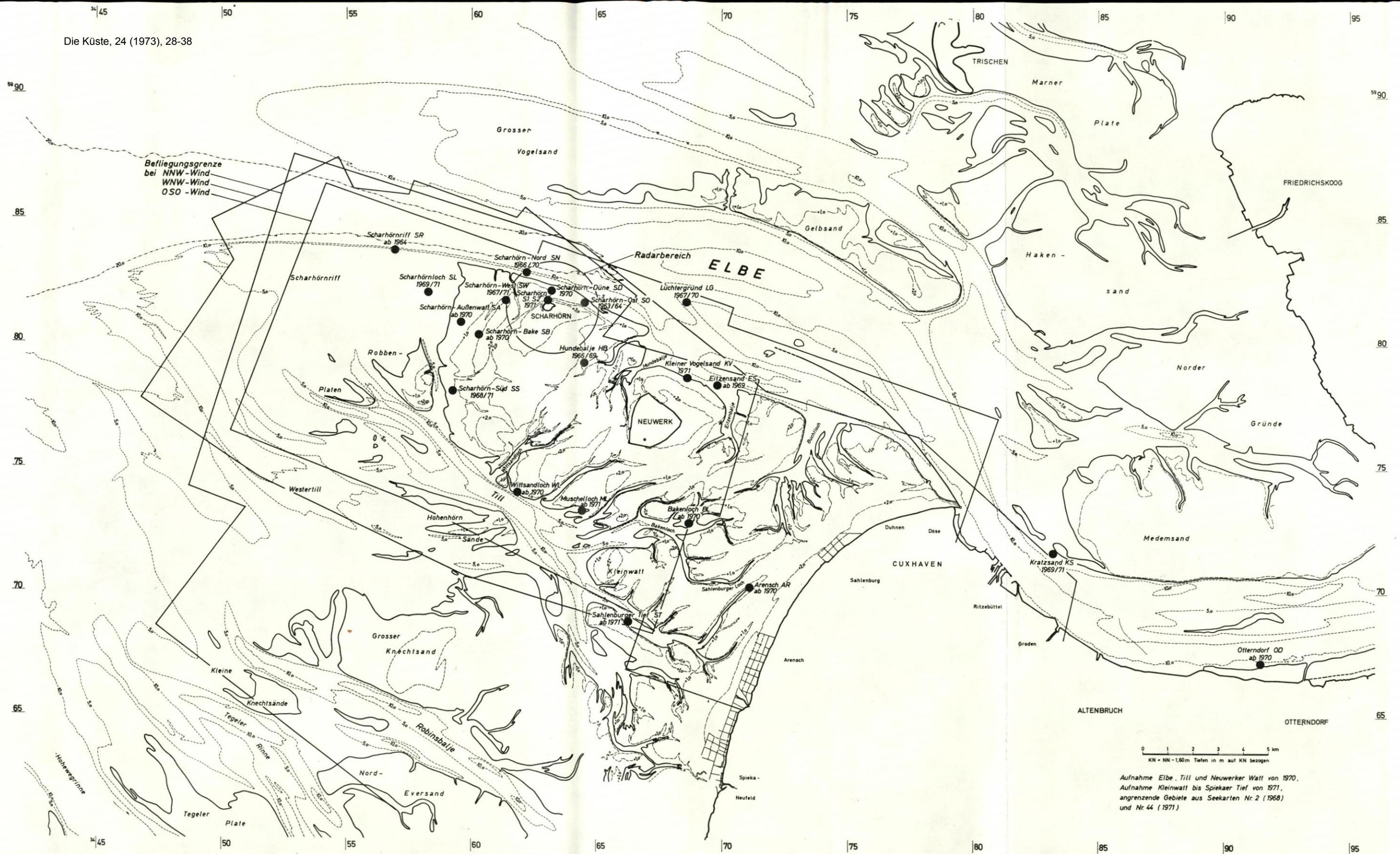


Abb. 1. Seegangsmessungen der FORSCHUNGS- UND VORARBEITENSTELLE NEUWERK im Elbmündungsgebiet von 1963 bis 1971 an festen Stationen, mit Luftbildern und mit Radar

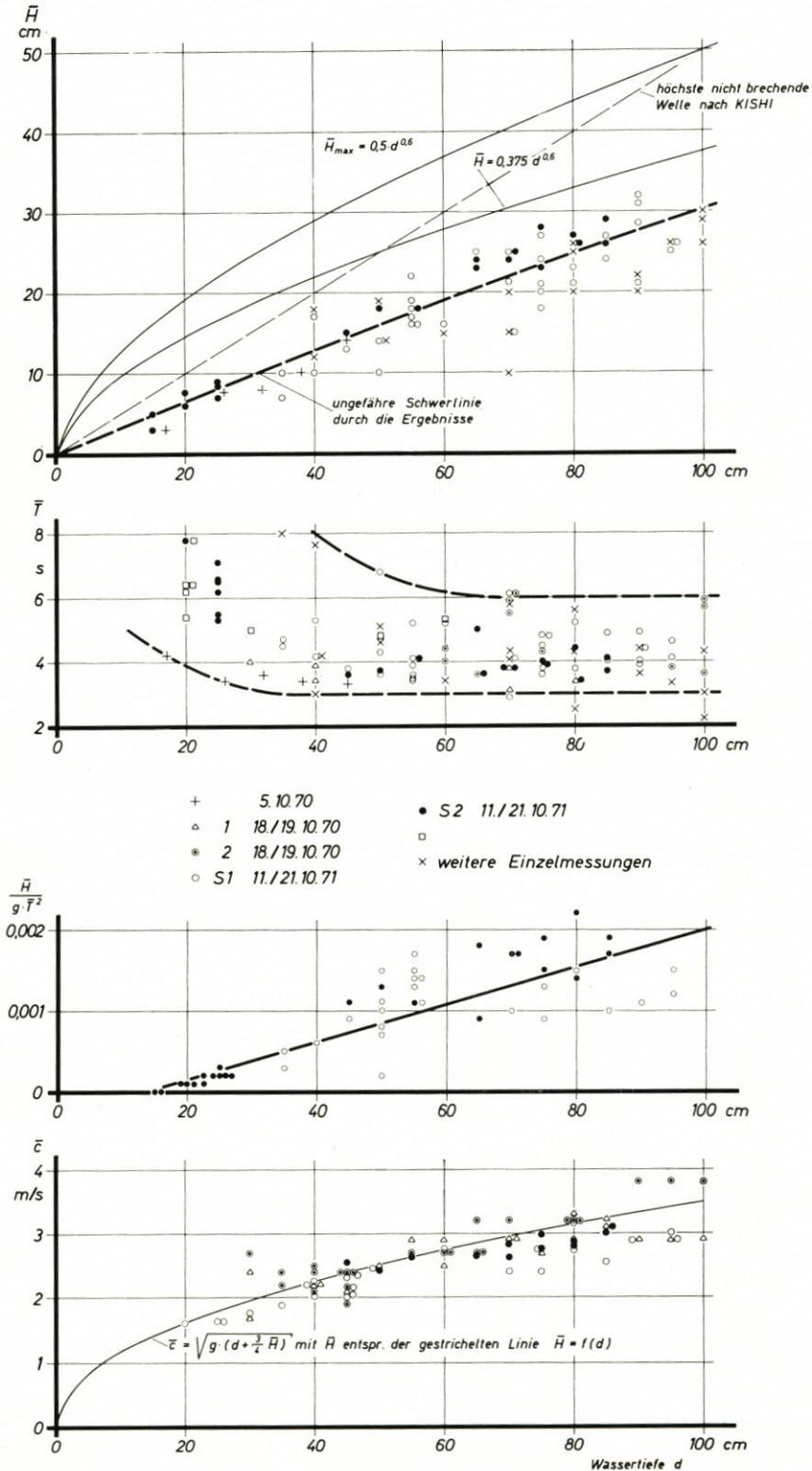


Abb. 6. Entwicklung des Seegangs mit steigender Wassertiefe nach Messungen am Strand von Scharhorn

- a) Die Laufrichtung der Wellen wird dominierend durch die Topographie beeinflusst, so daß Hauptrichtungen weitgehend unabhängig von den Windverhältnissen ermittelt werden können (3).
- b) Wegen des in (3) bestätigten Zusammenhangs zwischen Längen und Perioden mit

$$mL = mT^2$$

im natürlichen Seegang kann ein Parameter entfallen. Aus verschiedenen Gründen (2,4) sei dies  $mL$ .

- c) Es besteht kein brauchbarer Zusammenhang zwischen  $T$  und  $H$  einzelner Wellen. Bildet man jedoch Mittelwerte  $mT$  und  $mH$  über bestimmte Zeiträume, so ergeben sich je nach Topographie und Seegangscharakter kennzeichnende Beziehungen zwischen  $mT$  und  $mH$  (2,4). Da es sich beim Seegang um stochastische Zusammenhänge handelt, ist allein dies zu erwarten.

Damit reicht die Bestimmung von  $mH$  aus, um bei Kenntnis der Topographie  $mT$ ,  $mL$  und die Laufrichtung zu ermitteln.

## B. Zur Wellensteilheit

Allgemein wird die mittlere Wellensteilheit  $\frac{mH}{gmT^2}$  gern als dimensionsloser Seegangsparameter verwendet. Nach den Untersuchungen im Elbmündungsgebiet haben sich in der Tat für einzelne Gebiete unterschiedliche, für Wellenhöhen  $mH \geq 50$  cm auch etwa konstante mittlere Steilheiten ergeben, die offensichtlich Ausdruck des Seegangscharakters sind. So wird z. B. deutlich, ob es sich um Brandung handelt oder nicht und ob gleichzeitig mehrere Seegangssysteme auftreten oder nicht. Nur kommt in der Größe der Steilheiten die Umwandlung des Seegangs im Flachwasser anders zum Ausdruck, als man zunächst glauben sollte: Da im Brandungsgebiet die Perioden deutlich länger sind als im und vor dem geschützten Watt und da  $mT$  als Quadrat im Nenner steht, ist die durch  $\frac{mH}{gmT^2}$  ausgedrückte Steilheit in der Brandungszone erheblich geringer als in brandungsfreien Gebieten (4). Die höchsten Werte werden in Wattströmen (Prielmündungen) erreicht, wo gebeugte Wellen in besonders starkem Maße durcheinanderlaufen und somit nur kurze  $mT$  auftreten.

Mit dem für natürlichen Seegang geltenden Ansatz  $mL = mT^2$  können die Steilheitswerte auch als mittlere Verhältnisse zwischen  $mH$  und  $mL$  definiert und zur Identifizierung der Seegangscharakteristik herangezogen werden. Dabei wird weitgehend von der Gebietsabgrenzung in (2) ausgegangen, die in (4) weiter verfeinert werden konnte. Es gilt im

Gebiet	$\delta = \frac{mH}{mL}$
tiefere Wasser ( $d > 10$ m)	$\delta_T = 0,055$
Wattströme	$\delta_P = 0,060$
brandungsfreies Watt	$\delta_W = 0,050$
Randwatt	$\delta_R = 0,040$
Brandungswatt	$\delta_B = 0,025$

## C. Entwicklung topographischer Parameter

Der wichtigste topographische Parameter ist zweifellos die Wassertiefe. Sie kann jedoch in den morphologisch stark gegliederten Wattgebieten nicht ausreichend repräsentativ

sein für die Tiefenverhältnisse auf dem Weg der Wellen bis an den betrachteten Punkt und kann damit auch über die Auswirkungen auf den Seegang und dessen daraus resultierende Seegangscharakteristik nur wenig aussagen. Als einfacher Ergänzungsparameter bietet sich die Entfernung zum (für die hier vorherrschenden Wellengrößen) „tiefen“ Wasser an, die aus Wattkarten etwa in Wellenlaufrichtung zu entnehmen ist. Sie liefert einen Anhalt über die Strecke, auf der der Seegang Grundberührung hatte. Gewählt wurde als „tiefe“ Ausgangswassertiefe die Linie 10 m unter Kartennull (KN).

Da auch dieser Parameter noch nicht ausreichend den Seegangscharakter erfaßt, wurde schließlich die mittlere Steilheit  $\delta$  hinzugenommen. Bei der (ohne vorliegende Messungen notwendigen) Wahl von  $\delta$  (s. o.) bleibt natürlich ein Ermessensspielraum. Nach Analysen in (4) kann der mögliche Fehler bei sinnvoller Anwendung jedoch nicht über  $\pm 10\%$  betragen.

Damit bieten sich als topographische Parameter an:

1. die Wassertiefe  $d$  in Metern
2. die Entfernung  $s$  vom tiefen Wasser (10 m KN) in Kilometern
3. die mittlere Wellensteilheit  $\delta = \frac{mH}{mL}$

#### IV. Seegang als Funktion der Topographie

##### A. Höchstmögliche mittlere Wellenhöhen

Nach der Reduktion der Seegangsparameter auf die mittlere Wellenhöhe ist es ein erster Schritt, diesen Parameter in Abhängigkeit von der Topographie zu bestimmen. Aus statistischen und auch bautechnischen Überlegungen wird hierbei stets die höchstmögliche mittlere Wellenhöhe  $mH_{\max}$  betrachtet, also die obere Einhüllende der Kurven  $mH = f(d, s, \delta)$ . Somit wurde eine Funktion

$$mH_{\max} = f(d, s, \delta)$$

erarbeitet. Höchstwertbestimmungen von rd. 15 000 Registrierungen an 27 Stationen ergaben folgende Zusammenhänge:

1. Um rationale Randwerte zu erhalten, wird statt  $d$  die „Ersatzwassertiefe“

$$d^* = d + 1 \text{ in Metern}$$

verwendet.

2. Die mittlere Wellensteilheit beeinflusst die Wellenhöhe mit

$$mH(\delta) = \frac{1}{1 - \frac{\delta_0 - \delta}{3\delta_0}}$$

wobei als Ausgangssteilheit der Mittelwert für brandungsfreies Watt mit

$$\delta_W = 0,05 = \delta_0$$

gewählt wurde (4).

Die in einem schmalen Datenband liegenden Werte

$$\frac{mH_{\max}}{s} \left(1 - \frac{\delta_0 - \delta}{3\delta_0}\right)$$

auf Abbildung 7 werden nach oben durch eine Funktion der Form

$$y = A \cdot x^B + C \ln x$$

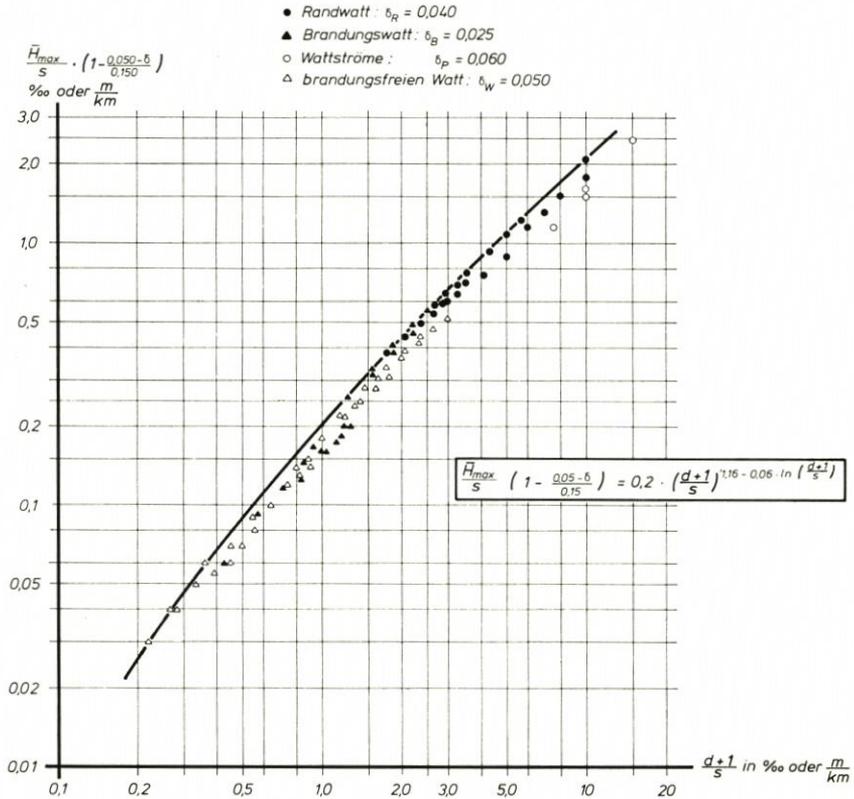


Abb. 7. Bestimmung der höchstmöglichen mittleren Wellenhöhen  $mH_{max}$  nach Naturmessungen in Abhängigkeit von der Wassertiefe  $d$ , der Entfernung  $s$  vom tiefen Wasser und der Wellensteilheit  $\delta$

begrenzt (4). Das führt zu dem Ansatz für die höchstmöglichen mittleren Wellenhöhen im Flachwasser in Abhängigkeit von der Topographie:

$$\frac{mH_{max}}{s} \left(1 - \frac{0,05 - \delta}{0,15}\right) = 0,2 \cdot \left(\frac{d+1}{s}\right)^{1,16 - 0,06 \ln\left(\frac{d+1}{s}\right)}$$

Mit  $d^* = d + 1$  und unter Verwendung der Zahl  $e$  kann die Gleichung umgeschrieben werden zu

$$\frac{mH_{max}}{s} = 0,2 \cdot \frac{1}{1 - \frac{0,05 - \delta}{0,15}} \cdot e^{1,16 \ln \frac{d^*}{s} - 0,06 \ln^2 \frac{d^*}{s}}$$

Zur einfacheren Bestimmung der Werte  $mH_{max} = f(d, s, \delta)$  ist auf Abbildung 8  $mH_{max}$  über  $s$  dargestellt für verschiedene  $d$ . Das Bild zeigt ein sehr interessantes Ergebnis: Es ist offensichtlich, daß die Wellenhöhe im Flachwasser nicht stetig mit der Entfernung  $s$  vom Tiefwasser abnimmt, sondern daß das Verhältnis  $\frac{mH}{d}$  in einem bestimmten Abstand vom Tiefwasser ein Maximum erreicht, dessen Größe und Lage allein von der Wassertiefe abhängt: Mit zunehmender Wassertiefe verschiebt sich das Maximum küstenwärts. Die Lage dieses Maximums ist ein wesentlicher Hinweis auf die Energieumwandlung beim Laufe der Wellen in flachem Wasser. Grundberührung bewirkt zunächst eine Zunahme der relativen Wellenhöhe bis zu einem Maximum. Von da an führt die Energieumwand-

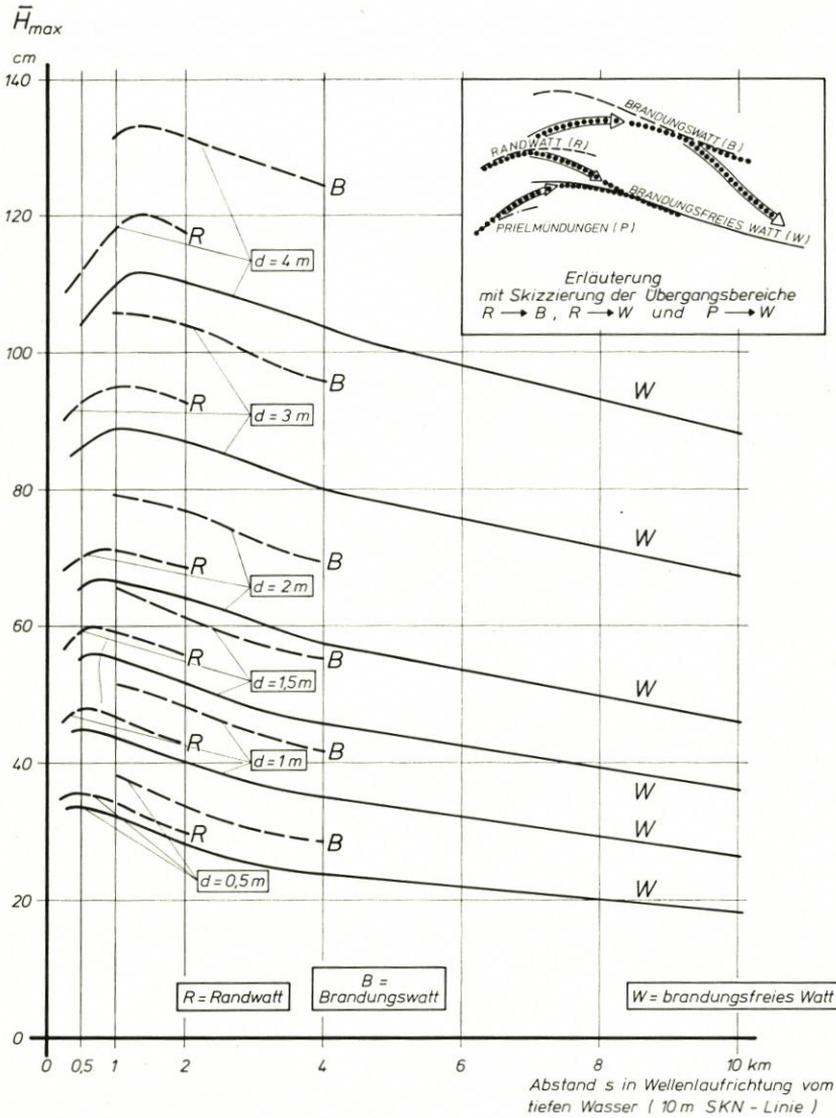


Abb. 8. Höchstmögliche mittlere Wellenhöhen  $\bar{H}_{max}$  im Watt in Abhängigkeit von der Wassertiefe  $d$  und der Entfernung  $s$  vom tiefen Wasser für einzelne Gebiete gleicher Seegangscharakteristik

lung beim Weiterlaufen der Wellen zu einer allmählichen Höhenabnahme. Die Kenntnis der Lage dieses bisher unbekanntes Maximums kann bei Bauwerksplanungen von erheblicher Bedeutung sein, da man versuchen sollte, aus dem Bereich der Maxima herauszubleiben.

### B. Höhen- und Periodenverteilungen

Die Untersuchungen im Elbmündungsgebiet führten zu festen Zusammenhängen zwischen der mittleren Wellenhöhe und der Gesamtverteilung

$$p(\eta) = 1 - e^{-\frac{\pi}{4} \cdot \eta^\varphi}$$

wobei  $\varphi$  eine Funktion von  $H_{1/3}$  ist und  $H_{1/3}$  wiederum vom Seegangscharakter und von  $mH$  abhängig ist (2). Damit kann die gesamte quasimomentane Verteilung der Wellenhöhen bestimmt werden, wenn  $mH$  (bzw.  $mH_{\max}$ ) nach den beschriebenen Gleichungen ermittelt wird. Somit ist

$$p(\eta) = f(d, s, \delta)$$

bestimmbar.

Die quasimomentanen Periodenverteilungen

$$p(\tau) = 1 - e^{-\frac{\pi}{4} \cdot \tau^\psi}$$

sind bestimmbar, wenn  $mT$  und  $\psi$  bekannt sind. Der Exponent  $\psi$  hängt allein von topographischen Parametern ab (2), während  $mT$  über

$$mT = f(mH)$$

für einzelne Gebiete gleicher Seegangscharakteristik nach (4) ermittelt wird.

So sind bei Kenntnis der mittleren Wellenhöhe  $mH$  und unter richtiger Einschätzung der vorherrschenden Seegangscharakteristik die quasimomentan eintretenden Wellenhöhen und -perioden bestimmbar. Damit ist der küstennahe Seegang in seiner Gesamtheit bekannt.

## V. Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit enthält den ergänzten Inhalt des Vortrages, den der Verfasser auf der 13th Coastal Engineering Conference in Vancouver, Canada, hielt\*. Er enthält die Problematik der Deutung und Bestimmung repräsentativer Parameter für den küstennahen Seegang. Es wird nachgewiesen, daß das gesamte Seegangsgeschehen durch die mittlere Wellenhöhe  $mH$  repräsentiert werden kann. Zu deren Bestimmung sind Umgebungsparameter erforderlich, die den Einfluß des topographisch stark gegliederten Küstenvorfeldes erfassen. Die höchstmögliche mittlere Wellenhöhe  $mH_{\max}$  kann als Funktion

der Wassertiefe  $d$ ,  
der Entfernung  $s$  zum tiefen Wasser und  
der mittleren Wellensteilheit  $\delta$

bestimmt und als Grundlage bei Bauwerksbemessungen verwendet werden.

## VI. Schriftenverzeichnis

1. KISHI, T.: The Possible Highest Gravity Waves in Shallow Water. Coastal Eng. in Japan, Jap. Soc. of Civil Eng., Tokyo 1959.
2. SIEFERT, W.: Die Seegangsverhältnisse im Elbmündungsgebiet (Untersuchungen 1963 bis 1970). Hamburger Küstenforschung, Heft 18, 1971.
3. SIEFERT, W.: Über Formen, Längen und Fortschrittsrichtungen von Wellen in küstennahen Flachwassergebieten. Hamburger Küstenforschung, Heft 24, 1972.
4. SIEFERT, W.: Über den Seegang in Flachwassergebieten. Mitt. des Leichtweiß-Instituts der Techn. Universität Braunschweig (in Vorbereitung).
5. WIEGEL, R. L.: Oceanographical Engineering. Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, N.J. 1964.

\*) Veröffentlicht als „Shallow Water Wave Characteristics“ in: Proceedings of the 13th Coastal Eng. Conf., Vol. 1, ASCE, New York 1973.