

Über Folgen hoher Wellen in Küstengewässern und ihre Bedeutung für die Bemessung von Bauwerken

Von Winfried Siefert

Zusammenfassung

Das Problem der statistischen Behandlung von Wellenfolgen, insbesondere von Folgen hoher Wellen, ist bis heute noch nicht im Detail behandelt worden. Einige numerische Ergebnisse und Auswertungen von Naturdaten in Wassertiefen von 100 m bzw. 36 m wurden inzwischen publiziert. Ergebnisse von Messungen in küstennahen Gewässern – mit ungebrochenen, brechenden und gebrochenen Wellen –, die im Elbeästuar gewonnen wurden, werden in diesem Papier behandelt.

Summary

The problem of the statistical handling of consecutive high waves has not yet been treated in detail. Some numerical results and evaluations of prototype data in water depths of 100 m and 36 m respectively, have been published. Data from measurements in nearshore coastal waters – with unbroken, breaking, and broken waves – obtained in the Elbe estuary, are treated in this paper.

Inhalt

1. Einleitung	8
2. Analyse	9
3. Ergebnisse	14
4. Schriftenverzeichnis	14

1. Einleitung

Zur Bemessung von Küstenbauwerken wie auch zum Verständnis küstennaher Prozesse sind zahlreiche Messungen in der Natur erforderlich, insbesondere Seegangsmessungen. Während des letzten Jahrzehnts wurden die Untersuchungen überall auf der Welt intensiviert. Üblicherweise wird das Wellenklima an einer bestimmten Stelle charakterisiert durch repräsentative Wellenhöhen- und periodenangaben (\bar{H} , $H_{1/3}$, T , $T_{H1/3}$) sowie Energiespektren. Durch Korrelation mit Winddaten können Funktionen von Wellenhöhen, -perioden und Spektren einschließlich ihrer Eintrittswahrscheinlichkeit gegeben werden. Als Ergänzung dazu lassen sich Verteilungsfunktionen von Wellenhöhen und -perioden für jedes beliebige Seegangsstadium entwickeln. Dies ist durch die Auswertung von etwa 15 000 Seegangregistrierungen im Elbeästuar an der deutschen Nordseeküste geschehen (SIEFERT, 1974) (Abb. 1).

Bei Behandlung der Stabilitätsprobleme von Bauwerken, die dem Seegangsangriff ausgesetzt sind, ist ein weiteres Kriterium zu beachten: die Anzahl der Wellen in einer Folge, die einen bestimmten, vorgegebenen Wellenhöhenwert überschreiten. Bisher gibt

es keine Übertragungsfunktionen zwischen den Verteilungen der Wellenhöhen und Wellenperioden oder den Energiespektren auf der einen Seite und der Anzahl von aufeinanderfolgenden hohen Wellen auf der anderen Seite. Daher ist es erforderlich, dieses Problem getrennt zu analysieren, als zusätzliche Information zur Kenntnis des Wellenklimas.

Die statische Belastung einer Konstruktion wird üblicherweise dargestellt oder berechnet durch den Bemessungswasserstand + höchste Wellenhöhe. Die dynamische Angriffskraft – angenommen nach der einen oder anderen, mehr oder weniger brauchbaren Formel – wird hergeleitet von der kennzeichnenden Wellenhöhe $H_{1/3}$ oder von $H_{1/10}$ oder ähnlichen Angaben. Die Kraft, die durch eine Folge von Wellen einer bestimmten Höhe ausgelöst wird und die Vibration oder vielleicht sogar Resonanz erzeugen kann, wird bisher bei der Bemessung auf Seegangsbeanspruchung nicht berücksichtigt.

2. Analyse

Das Problem aufeinanderfolgender hoher Wellen wurde numerisch behandelt von GODA (1970), und zwar für breite Spektren. Weitere Ableitungen für ein schmales Spek-

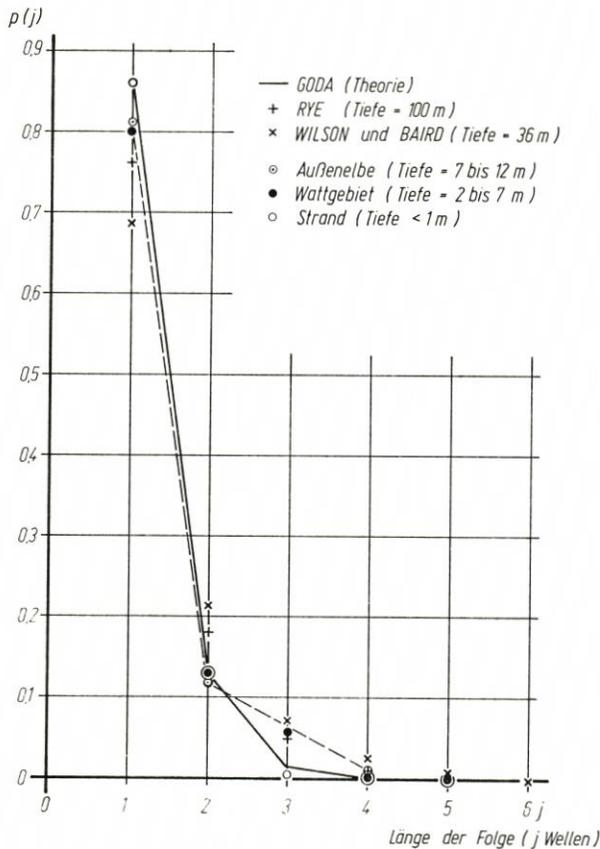


Abb. 2. Eintrittswahrscheinlichkeit von Wellenfolgen mit Wellen höher als $H_{1/3}$. Probability of wave group formation, waves greater than $H_{1/3}$

trum wurden von EWING (1973) vorgelegt. Naturmeßdaten wurden veröffentlicht von RYE (1975) für Wassertiefen von etwa 100 m und von WILSON und BAIRD (1973) für Wassertiefen von etwa 36 m. Diese Ergebnisse sind zusammen mit einigen Ergebnissen aus dem Elbeästuar in linearem Maßstab dargestellt auf Abb. 2. Dabei wurden die Wellen berücksichtigt, deren Höhe $> H_{1/3}$ ist. Die Darstellungen zeigen weitgehende Übereinstimmung, obwohl einige spezielle Differenzen vorhanden zu sein scheinen. Darauf wird später zurückzukommen sein.

Die meisten der „Folgen“ mit Wellen $> H_{1/3}$ treten auf in „Folgen“ von nur einer Welle, d. h., vor und hinter diesen Wellen laufen kleinere Wellen ein (70 bis 85 %). Etwa 10 bis 20 % der Folgen bestehen aus 2 Wellen, bis zu 7 % aus 3 Wellen, bis zu 2,5 % aus 4 Wellen. Mehr als 5 Wellen $> H_{1/3}$ in einer Folge wurden bis jetzt nicht festgestellt.

Zur weiteren Bearbeitung wird die Darstellung auf Abb. 2 im halblogarithmischen Maßstab gebracht. Zuvor scheint es jedoch sinnvoll zu sein, einige Bemerkungen über die Art der Auswertung und der Definition einer Wellengruppe oder „Folge“ zu machen. Tab. 1 zeigt die Höhen von aufeinanderfolgenden Wellen in einer Registrierung mit der Kennzeichnung der Wellen $> H_{1/3}$ und der Anzahl von Wellenfolgen. Allgemein wird ein „Ereignis“ angesehen als eine „Folge“ von aufeinanderfolgenden Wellen, deren Höhe über einer gewählten Grenzhöhe liegt, wobei eine „Folge“ bestehen kann aus einer oder mehr Wellen hintereinander. Als Grenzhöhe wird hier zunächst $H_{1/3}$ vorgegeben.

Tabelle 1:
Beispiel für die Auswertung von Wellenfolgen

Wellenhöhen in cm	Wellen höher als $H_{1/3}$	Wellenfolge Nr.	
23			
73	×	1	
12			
40			
66	×		
66	×	2	
84	×		
30			
30			
47			
50			
50			
18			Mittelwerte der vollständigen Registrierung
19			\bar{H} = 40 cm
14			$H_{1/3}$ = 61 cm
68	×		T = 3,3 s
65	×	3	\bar{H} = mittl. Wellenhöhe
45			T = mittl. Wellenperiode
50			$H_{1/3}$ = kennzeichnende Wellenhöhe = Mittel der
36			33 % höchsten Wellen einer Registrierung

Auf der linken Seite von Abb. 3 sind die Ergebnisse von Abb. 2 dargestellt. Dabei zeigt sich, daß die Theorie zu kleine Wahrscheinlichkeiten für das Auftreten von 3 und mehr Wellen $> H_{1/3}$ in einer Folge gibt. Die Ergebnisse aus der Außenelbe und in größten Wassertiefen stimmen dagegen gut überein.

Der Vergleich auf der rechten Seite von Abb. 3 zeigt, daß die Eintrittswahrscheinlichkeit von Wellenfolgen offenbar durch die Topographie beeinflusst wird. Deutlich

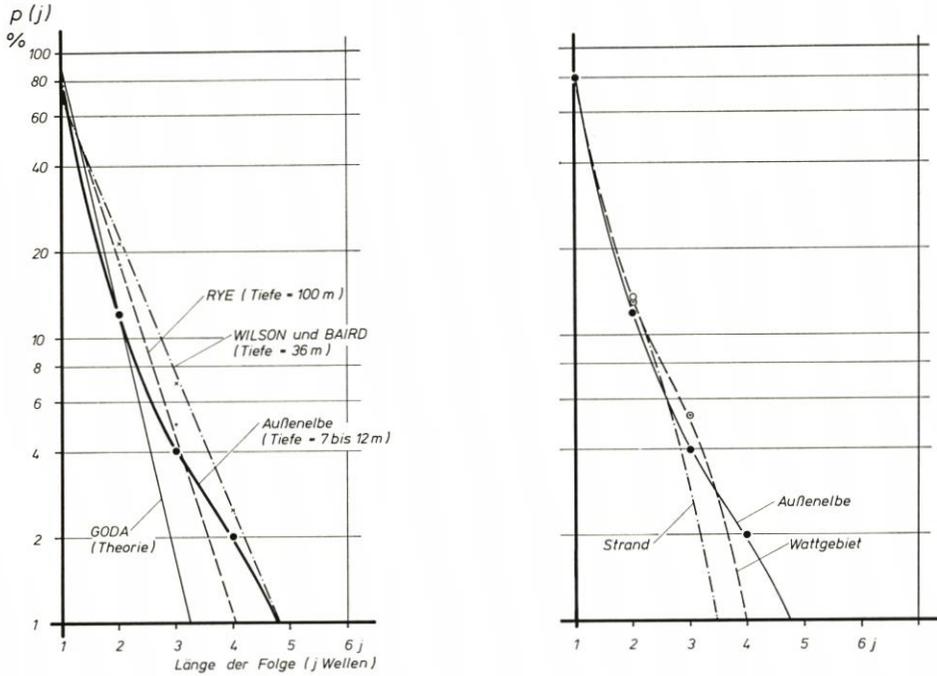


Abb. 3 Eintrittswahrscheinlichkeit von Wellenfolgen mit Wellen höher als $H_{1/3}$. Probability of wave group formation, waves greater than $H_{1/3}$

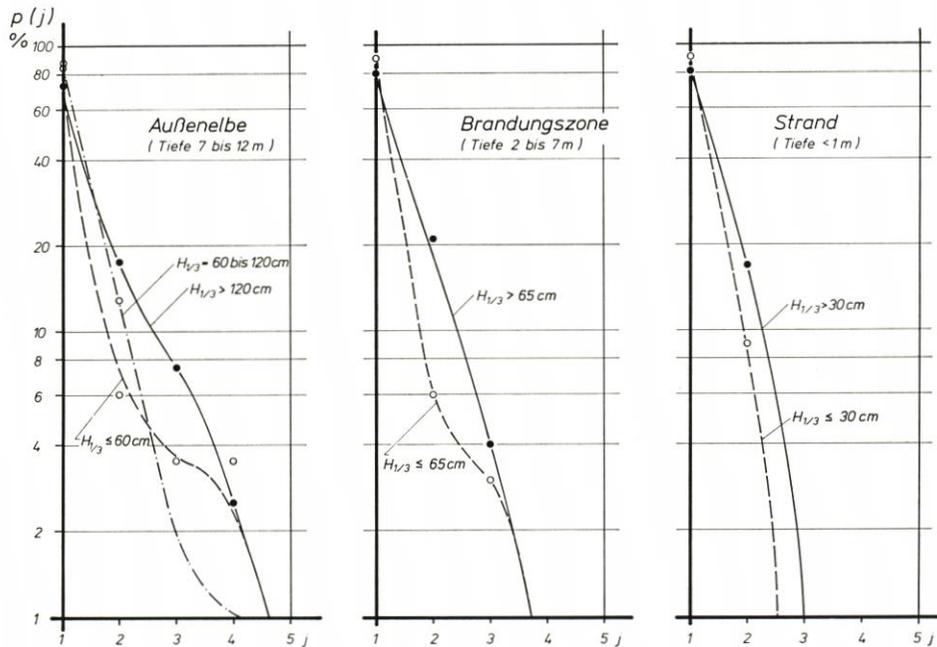


Abb. 4 Eintrittswahrscheinlichkeit von Wellenfolgen mit Wellen höher als $H_{1/3}$ für verschieden hohe H . Probability of wave group formation, waves greater than $H_{1/3}$, for different mean wave heights H

wird, daß in sehr flachem Wasser (Strand) die Wahrscheinlichkeit langer Folgen geringer ist als in tieferem Wasser und daß sie mit GODAS Theorie etwa übereinstimmt.

Einige Hinweise auf Veränderungen bei der Bildung von Wellenfolgen in Abhängigkeit von der mittleren Wellenhöhe werden auf Abb. 4 gegeben. Aus den Messungen in drei unterschiedlichen topographischen Gebieten mit verschiedenen Wassertiefen geht hervor, daß die Wahrscheinlichkeit von längeren Folgen mit Wellenhöhen $H > H_{1/3}$ zunimmt mit der Zunahme von $H_{1/3}$. Da die mögliche Wellenhöhe mit der Wassertiefe ansteigt, ist diese Tendenz dieselbe wie auf Abb. 3: Zunahme der Wahrscheinlichkeit langer Folgen mit hohen Wellen bei zunehmender Wassertiefe.

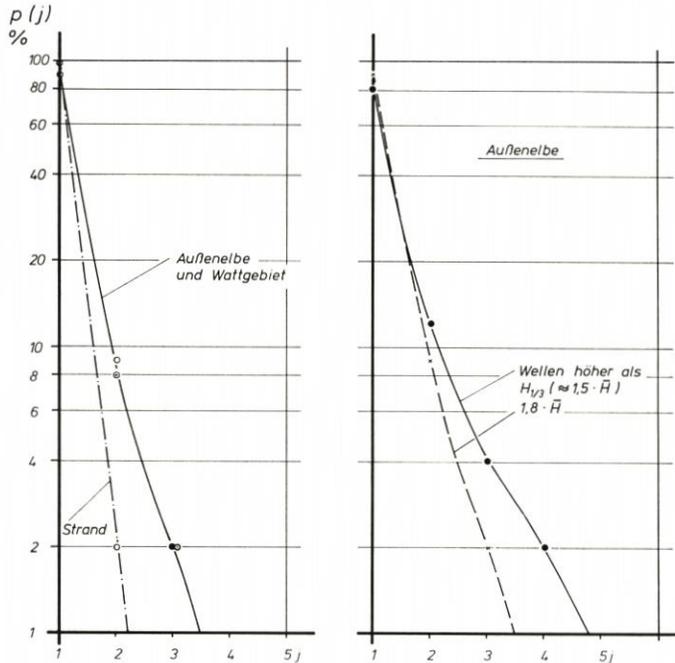


Abb. 5. Eintrittswahrscheinlichkeit von Wellenfolgen mit Wellen höher als $1,8 \cdot H$. Probability of wave group formation, waves greater than $1,8 \cdot H$

Die Untersuchung von Wellengruppen über einem höheren Grenzwert, nämlich $1,8 \cdot \bar{H}$, zeigt auf der linken Seite von Abb. 5 dieselbe Tendenz, die schon bei den Wellenfolgen mit $H > H_{1/3}$ gefunden wurde: In flacherem Wasser wird die Wahrscheinlichkeit langer Folgen hoher Wellen kleiner. Auf der rechten Seite ist zu erkennen, daß die Wahrscheinlichkeit langer Folgen abnimmt mit steigender Grenzwellenhöhe. Dieser Aspekt wird auf Abb. 6 noch gesondert untersucht.

Die Darstellungen der Abb. 6 zeigen die Wahrscheinlichkeit der Bildung von Wellenfolgen über dem Verhältnis

$$\eta = \frac{H^*}{\bar{H}}$$

der vorgegebenen Grenzwellenhöhe H^* und der mittleren Wellenhöhe \bar{H} . Dazu wurde eine bestimmte Anzahl von Registrierungen folgendermaßen ausgewertet: Die Anzahl aller Wellen, die höher als H^* sind, wird zu 100 % angesetzt. Dann enthält jede Folge

Außenelbe
 29 Registrierungen
 $d = 5,8$ bis $9,9$ m
 $\bar{H} = 18$ bis 152 cm
 $\bar{T} = 2,1$ bis $5,9$ s

Brandungszone
 29 Registrierungen
 $d = 1,5$ bis $6,7$ m
 $\bar{H} = 23$ bis 71 cm
 $\bar{T} = 2,6$ bis $5,3$ s

Wattgebiet
 20 Registrierungen
 $d = 1,6$ bis $4,4$ m
 $\bar{H} = 19$ bis 71 cm
 $\bar{T} = 1,5$ bis $4,1$ s

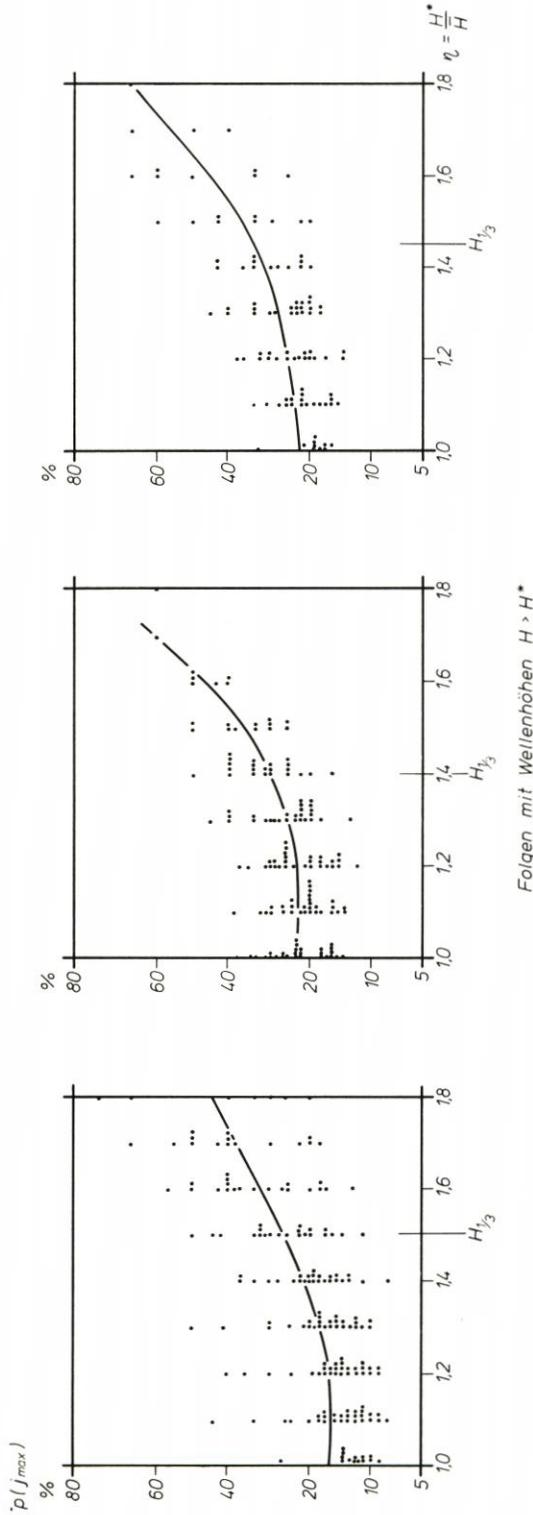


Abb. 6. Prozentzahl der Wellen $H > H^*$ in der längsten Folge einer Registrierung. Longest run of each record with j_{max} consecutive waves $H > H^*$

einen bestimmten Teil dieser 100 %. Nun zeigen die Punkte auf Abb. 6 die Prozentzahl von Wellen mit $H > H^*$, die in der längsten Folge der jeweiligen Registrierung festgestellt werden konnte. Dieser Prozeß wurde für $H^* = \bar{H}$, also alle Wellen, die höher als \bar{H} sind, bis hin zu $H^* = 1,8 \cdot \bar{H}$ durchgeführt.

Bei der Beurteilung der geschilderten, teilweise sehr überraschenden Eigenschaften und ihrer weiteren Verarbeitung bei der Bemessung von Bauwerken muß die Veränderung der Wellenperioden mit berücksichtigt werden. Die Zunahme der Wellenperioden mit den Wellenhöhen geht aus Tab. 2 hervor:

Tabelle 2:
Beziehungen zwischen Wellenperioden unterschiedlicher Wellenhöhengruppen

Südliche Nordsee	Brandungszone	Wattgebiet
$T_{H_{1/3}} = 1.25 T$	$T_{H_{1/10}} = 1.19 T$	$T_{H_{max}} = 1.15 T$
$T_{H_{1/3}} = 1.33 T$	$T_{H_{1/10}} = 1.30 T$	$T_{H_{max}} = 1.22 T$
$T_{H_{1/3}} = 1.46 T$	$T_{H_{1/10}} = 1.30 T$	$T_{H_{max}} = 1.28 T$

Darüber hinaus beeinflusst die Bildung von Wellengruppen Schwingungen im Brandungstau, denen bisher zu wenig Bedeutung geschenkt wurde (GÖKCESU, 1977). Außerdem scheint die Möglichkeit zu bestehen, mit dieser Art Seegangsanalyse einige Hinweise über die Brauchbarkeit von Labormessungen mit monochromatischen Wellen zu erhalten (SIEFERT und KALDENHOFF, 1975).

Im vorliegenden Bericht wurde die Untersuchung der Anzahl kleiner Wellen zwischen Folgen hoher Wellen nicht behandelt. Einige Informationen über dieses Problem werden von EWING (1973) gegeben.

3. Ergebnisse

Die Ergebnisse von Abb. 3 bis 6 können folgendermaßen zusammengefaßt werden:

1. Je höher die Grenzwellenhöhe H^* – der untere Grenzwert von Wellenhöhen in einer Folge – ist, desto kleiner ist die Anzahl von Wellen mit Höhen über H^* .
2. Je höher H^* ist, desto größer ist die Wahrscheinlichkeit, daß ein beträchtlicher Teil der Wellen, deren Höhe $> H^*$ ist, innerhalb einer Folge auftreten: Wellen, die höher als $1,6 \bar{H}$ sind, erscheinen in Folgen von 2 oder 3 Wellen genauso oft wie in „Folgen“ von einer Welle. Es wurden Gruppen von 2 oder 3 Wellen hintereinander mit einer Höhe oberhalb von $1,7$ oder $1,8 \cdot \bar{H}$ registriert.
3. Je höher die Bemessungswellenhöhe über der mittleren Wellenhöhe liegt, desto bedeutender wird die dynamische Belastung durch mehrere aufeinanderfolgende Wellen, deren Höhe im Bereich der Bemessungswellenhöhe liegt. Diesem Aspekt sollte in Zukunft bei der Bemessung bestimmter Bauwerke Beachtung geschenkt werden.

4. Schriftenverzeichnis

- EWING, J. A.: Mean Length of Runs of High Waves. J. of Geoph. Res., Vol. 78, No. 12, 1973.
- GODA, Y.: Numerical Experiments of Wave Statistics with Spectral Simulation. Report of the Port and Harbour Research Institute, Vol. 9, Nr. 3, Japan 1970.

- GÖKCESU, S.: Beitrag zum Auflaufvorgang des natürlichen Seegangs im Flachwassergebiet auf glatten Böschungen. Mitt. des Inst. für Wasserbau und Wasserwirtschaft der TU Berlin, H. 87, 1976.
- RYE, H.: Wave Group Formation Among Storm Waves. Proc. 14th Int. Conf. on Coast. Eng., Copenhagen, 1974.
- SIEFERT, W.: Über den Seegang in Flachwassergebieten. Mitt. Leichtweiß-Inst. der Techn. Univ. Braunschweig, H. 40, 1974.
- SIEFERT, W. u. KALDENHOFF, H.: Analysis of Random Waves in Shallow Water and Laboratory Reproduction. Proc. 16th Congr. of the IAHR, Vol. 1, Sao Paulo, 1975.
- WILSON, J. R. u. BAIRD, W. F.: A Discussion of Some Measured Wave Data. Proc. 13th Int. Conf. on Coast. Eng., Vancouver, 1972.