

Zur Abschätzung des maximalen Wellenaufbaus an Seedeichen aus der Einmessung von Teekgrenzen

Von Hanz Dieter Niemeyer

Zusammenfassung

Die Bestimmung des Wellenaufbaus ist eine wesentliche Bemessungsgrundlage für Seedeiche. Zu ihrer Überprüfung werden von den Küstendienststellen der Niedersächsischen Wasserwirtschaftsverwaltung nach Sturmtiden die Teekgrenzen eingemessen. In dieser Arbeit wird eine Methode zur Abschätzung des maximalen Wellenaufbaus beim Eintritt des Bemessungswasserstandes dargelegt. Es wird retrospektiv ein fiktiver Seegang ermittelt, mit dem ein theoretischer Vergleichswellenaufbau für die gemessenen Werte berechnet wird. Abschließend wird eine fiktive Bemessungswelle für den Eintritt des Bemessungswasserstandes zur Abschätzung des korrespondierenden maximalen Wellenaufbaus ermittelt.

Summary

The prediction of wave run-up is fundamental for the design of sea dykes. Levelling of the markerline of flotsam after storm tides has been carried out by the coastal departments of the Lower Saxonian Water Administration in order to check the design parameters. In the following paper a method is developed which allows an estimation of the maximum wave run-up for the occurrence of the design water level. It is based on the hindcast of an fictitious design wave spectrum from measurements. This design wave spectrum is used to compute a theoretical wave run-up for comparison with measured data. Finally the parameters of the design wave are extrapolated on design conditions for the estimation of the corresponding wave run-up.

Die Bestickhöhe von Seedeichen wird durch den Bemessungswasserstand und den zugehörigen Wellenaufbau (Bemessungswellenaufbau) sowie die Berücksichtigung örtlicher Untergrundverhältnisse (Sack- und Setzmaß) bestimmt.

Die von der Arbeitsgruppe Küstenschutzwerke des Küstenausschusses Nord- und Ostsee (1962; LÜDERS, 1966) empfohlenen Verfahren zur Festlegung des Bemessungswasserstandes für Seedeiche haben sich in einer Weise bewährt, die sowohl dem Sicherheitsbedürfnis der Küstenbewohner als auch der Forderung nach volkswirtschaftlich vertretbarem Aufwand gerecht wird.

Trotz einer Reihe grundlegender Untersuchungen in der Natur (HUNDT, 1962) und im Modell (HENSEN, 1954 u. 1955; FRANZIUS, 1965) haben die Erfahrungen der Sturmtiden von 1962 (HENSEN, 1966; METZKES, 1966) und 1973 (ERCHINGER, 1974; NMFELF, 1976) gezeigt, daß die vorhandenen quantitativen Vorstellungen über den Wellenaufbau an Seedeichen zu überdenken sind.

Grundlage für die Bestimmung des Wellenaufbaus an den niedersächsischen Seedeichen waren die Modellversuche im Franzius-Institut der TU Hannover (HENSEN, 1954 u. 1955), deren Ergebnisse aber nach den Untersuchungen von SKLADNEV und POPOV (FÜHRBÖTER, 1971) auf Grund der bei der Reproduktion von Brandungserscheinungen auftretenden Maßstabeffekte als quantitativ nicht übertragbar angesehen werden können.

Die nach den Sturmtiden von 1973 eingemessenen Teekgrenzen ergaben bereits Werte in der Größenordnung des angenommenen örtlichen maximalen Wellenaufbaus, obwohl die eingetretenen Extremwasserstände erheblich unter dem Bemessungswasserstand lagen (ERCHINGER, 1974; NMfELF, 1976). Die nach den Sturmtiden vom Januar 1976 eingemessenen Teekgrenzen unterstreichen diese Beobachtungen deutlich und geben Anlaß, die Frage nach dem maximal möglichen Wellenaufbau neu aufzugreifen. Hierbei ist anzumerken, daß inzwischen durch die Einmessungen von Teekgrenzen nach verschiedenen Sturmtiden verbesserte Grundlagen zur Beurteilung dieses Problems gegeben sind.

Modellversuche zu Brandungsvorgängen, wozu auch der Wellenaufbau gezählt werden muß, können nur dann quantitativ übertragbare Ergebnisse liefern, wenn sie im Naturmaßstab vorgenommen werden (GRÜNE und FÜHRBÖTER, 1975). Ergänzende Naturmessungen wären aber selbst beim Vorhandensein einer derartigen Anlage unumgänglich, um aus dem örtlich wirkenden Seegang die Bemessungswelle zu ermitteln und räumliche Vorgänge, die in einem Wellenkanal nicht untersucht werden können, wie z. B. schrägen Wellenangriff, zu analysieren.

Die zur Zeit zur Verfügung stehenden Naturmessungen zur Abschätzung des Wellenaufbaus an Seedeichen sind im wesentlichen Einmessungen von Teekgrenzen nach Sturmtiden, wie sie von den Küstendienststellen der Niedersächsischen Wasserwirtschaftsverwaltung ausgeführt werden.

Der wesentlichste Mangel dieser Messungen besteht darin, daß keine korrespondierenden Seegangs- und Wasserstandsregistrierungen vor den Deichen stattgefunden haben, um so einen Bezug zwischen Wassertiefe, Seegang, Deichform und Wellenaufbau herstellen zu können. Weiterhin ist bei der Heranziehung dieser Aussagen zu bedenken, daß die Teekgrenze den maximalen Wellenaufbau angibt (ERCHINGER, 1974). Ebenso können eventuelle Einflüsse des Windes auf die Lage der Teekgrenze nicht erfaßt werden.

Im folgenden soll der Versuch gemacht werden, unbeschadet der bekannten Problematik der Ermittlung des Wellenaufbaus aus der Einmessung von Teekgrenzen nach Sturmtiden, mit Hilfe der so gewonnenen Daten den maximalen Wellenaufbau beim Eintreten des Bemessungswasserstandes abzuschätzen. Dabei wird die – nicht unbedingt zutreffende – Voraussetzung gemacht, der durch die Teekgrenze ermittelte Wellenaufbau sei beim Thw der Sturmflut aufgetreten.

Im Rahmen des hier entwickelten Verfahrens ist das langfristige Höhenwachstum der Vorländer und Watten unberücksichtigt geblieben. Bei einer Anwendung des Verfahrens sollten diese örtlich unterschiedlichen Verhältnisse jedoch in Betracht gezogen werden.

Um die aus der Einmessung der Teekgrenzen gewonnenen Werte übertragbar und vergleichsfähig zu machen, wird ein zugehöriger *fiktiver Seegang* ermittelt. Eine Reihe von Formeln für den Wellenaufbau benutzt als einziges variables Seegangselement die Wellenhöhe H (FRANZIUS, 1965); mit Hilfe einer derartigen Beziehung soll hier eine theoretische Wellenhöhe aus den gemessenen Wellenaufbauhöhen ermittelt werden. Um Fehler aus der Abschätzung schrägen Wellenangriffs zu vermeiden, wird zu jeder gemessenen Wellenaufbauhöhe die für senkrechten Wellenangriff zugehörige Bemessungswelle ermittelt.

Ausgehend von der *Delfter Formel* für den Wellenaufbau wird aus den Meßwerten eine zugehörige Wellenhöhe H ermittelt:

$$H = \frac{A}{8} \cdot n \quad (1)$$

WASSING (1957) hat diese Beziehung als das Ergebnis langjähriger Modellversuche publiziert und dabei die Wellenhöhe H als signifikante Wellenhöhe $H_{1/3}$ angegeben. Da die zugrundeliegenden Modellversuche aber mit quasi-monochromatischen Wellen ausgeführt wurden (TECHNICAL ADVISORY COMMITTEE, 1974), soll die so gewonnene Wellenhöhe H hier für spektrale Wellenhöhenverteilungen als maximale Wellenhöhe H_{\max} und für die Ermittlung der zugehörigen Wellenperiode T als mittlere Wellenhöhe H_m betrachtet werden.

Das für Nordseeverhältnisse entwickelte Jonswap-Spektrum läßt die Ermittlung von Wellenhöhen nur aus dem Energiespektrum selbst zu. Die Periode wird daher mit Hilfe des PIERSON-MOSKOWITZ-Spektrums aus der Wellenhöhe bestimmt, weil hierfür eine direkte Beziehung von Wellenhöhe und Periode existiert.

Da für die betrachteten monochromatischen Wellen die spektralen Verteilungen näherungsweise als vernachlässigbar angesehen werden können, wird die Wellenperiode T aus folgender einfacher Beziehung gewonnen:

$$T = \sqrt{\frac{1000}{4.078} \cdot \frac{H}{g}} \quad (2)$$

Mit Hilfe der in den Gleichungen (1) und (2) ermittelten kennzeichnenden Seegangselemente Wellenhöhe und -periode läßt sich ein fiktiver theoretischer Vergleichswellenauflauf nach einem verfeinerten Verfahren berechnen, das sowohl den Einfluß der Wellenhöhe als auch denjenigen der Wellenperiode berücksichtigt. Hier soll die Formel von HUNT (1959) benutzt werden, erweitert um den von VINJE (FÜHRBÖTER, 1975) vorgeschlagenen Sicherheitsbeiwert von 1,25.

$$A_{th} = 0,5 \sqrt{g \cdot H} \cdot \frac{T}{n} \quad (3)$$

In Tabelle 1 sind die Werte eines so ermittelten theoretischen Vergleichswellenaufbaus für Seedeiche an der Butjadinger Küste aufgeführt und mit dem aus der Einmessung von Teekgrenzen ermittelten maximalen Wellenaufbau der Sturmflut vom 3./4. 1. 1976 (WASSERWIRTSCHAFTSAMT BRAKE, 1976) verglichen. Die dabei zutage tretende, gleichmäßig gute Übereinstimmung zwischen Vergleichsrechnung und Messung ermutigt zu dem Versuch, auf dieser Grundlage aufbauend den maximalen Wellenaufbau beim Eintritt des Bemessungswasserstandes abzuschätzen.

Weiterhin soll ein zweiter theoretischer Vergleichswellenaufbau unter Berücksichtigung spektraler Größen bestimmt werden: VAN OORSCHOT und D'ANGREMOND (1968) haben in Analogie zur Formel von HUNT den Wellenaufbau als Funktion der signifikanten Wellenhöhe $H_{1/3}$, der mit dem Maximum der Energiedichte korrespondierenden Wellenperiode T_{\max} , der spektralen Breite ε und der Böschungneigung n beschrieben:

$$A_{th} = C\varepsilon \sqrt{g \cdot H_{1/3}} \cdot \frac{T_{\max}}{n} \quad (4)$$

Für den bei einer Sturmflut zu erwartenden voll ausgereiften Seegang gibt SYLVESTER (1974) eine spektrale Breite von $\varepsilon = 0,6 \div 0,8$ an; der zugehörige Beiwert $C\varepsilon$ aus Gleichung (4) wird hierfür mit

$$C\varepsilon = 0,75$$

nach den Ergebnissen von Modellversuchen mit Spektren angenommen (TECHNICAL ADVISORY COMMITTEE, 1974). Nach den Untersuchungen von VAN OORSCHOT und D'ANGREMOND (1968) ist für diese Form des Wellenspektrums der höchste Wellenaufbau zu erwarten.

Tabelle 1

Deichstrecke/km		Wassertiefe Sturmtide 3./4. 1. 76 [m]	Neigung Deich- außen- böschung	Gemessener Wellen- auflauf 3./4. 1. 76 [m]	Errechnete Wellenhöhe [m]
1		2	3	4	5
Ruhwarderdeich	77,900	3,71	5,2	3,57	2,32
	78,600	3,96	5,2	3,64	2,37
	79,690	3,91	5,2	3,45	2,24
Tossenserdeich	80,400	3,71	5,5	3,70	2,54
	80,700	4,11	5,5	3,56	2,45
	80,900	4,21	5,5	3,60	2,48
	Tossenser Einlagegrodien	81,300	2,31	5,0	1,11
Eckwarderdeich	82,200	4,01	5,0	3,31	2,06
	83,510	4,11	5,0	3,05	1,91
Eckwarder Altendeich	84,560	3,91	5,0	2,95	1,84
	84,950	4,01	5,0	2,90	1,81
Mundahn	86,030	4,71	5,0	2,79	1,74
	86,430	4,61	6,5	3,03	2,46
	86,900	4,56	6,5	3,34	2,71
Großwürden	86,900	4,56	6,5	3,34	2,71
	87,350	4,51	6,5	2,85	2,32
	87,710	4,31	6,5	2,94	2,39
Eckwarderhörne	87,930	4,21	6,5	2,13	1,73

Zur Ermittlung der spektralen Wellenhöhe $H_{1/3}$ wird die von BRETSCHNEIDER (1954) ermittelte Beziehung von maximaler zu signifikanter Wellenhöhe im Flachwasser

$$\frac{H_{\max}}{H_{1/3}} = \sqrt[10]{145 \frac{g \cdot h}{U^2}} \quad (5)$$

herangezogen, die nach Untersuchungen von SCHÜTTRUMPF (1973) für den Bereich der südlichen Nordsee brauchbare Ergebnisse liefert.

Die Wellenperiode T_{\max} wird aus dem PIERSON-MOSKOWITZ-Spektrum in Abhängigkeit von der signifikanten Wellenhöhe $H_{1/3}$ gewonnen:

$$T_{\max} = 13,94 \sqrt{\frac{H_{1/3}}{g}} \quad (6)$$

Die mit Berücksichtigung spektraler Verteilungen arbeitende Beziehung von VAN OORSCHOT und D'ANGREMOND (1968) liefert den Meßwerten ebenso gut und zum Teil noch besser entsprechende theoretische Wellenauflaufhöhen als die Beziehung von HUNT (1959). Die Abweichungen von dem eingemessenen Wellenauflauf sind so gering, daß praktisch von einer vollständigen Übereinstimmung von Meßwerten und errechneten Vergleichswerten gesprochen werden kann (Tabelle 2).

Weiterhin zeigt der Vergleich der Verfahren von HUNT (1959) und von VAN OORSCHOT und D'ANGREMOND (1968) deutlich, daß die im Schrifttum häufig zu findende Gleichsetzung der mittleren Wellenhöhe H_m aus Modellversuchen mit monochromatischen

Tabelle 1

Errechnete Wellen- periode	Vergleichs- Wellen- auflaufhöhe	Allgemeiner Dämpfungs- koeffizient	Wassertiefe beim Be- messungs- wasserstand	Fiktive Wellenhöhe beim Be- messungs- wasserstand	Fiktive Wellen- periode beim Be- messungs- wasserstand	Fiktiver Wellen- auflauf beim Be- messungs- wasserstand
[s]	[m]	K _{GD}	[m]	[m]	[s]	[m]
6	7	8	9	10	11	12
7,6	3,47	1,60	4,95	3,10	8,8	4,62
7,7	3,55	1,67	5,20	3,11	8,8	4,66
7,5	3,37	1,75	5,15	2,94	8,6	4,42
8,0	3,61	1,46	4,96	3,40	9,2	4,81
7,8	3,46	1,68	5,36	3,19	8,9	4,51
7,9	3,53	1,70	5,46	3,21	9,0	4,57
4,2	1,09	3,34	3,57	1,07	5,2	1,68
7,2	3,22	1,95	5,27	2,70	8,2	4,20
6,9	2,98	2,15	5,38	2,50	7,9	3,90
6,8	2,88	2,13	5,18	2,43	7,8	3,79
6,7	2,81	2,22	5,29	2,38	7,7	3,71
6,6	2,72	2,71	5,80	2,14	7,3	3,33
7,8	2,94	1,87	5,70	3,05	8,7	3,65
8,2	3,24	1,68	5,86	3,49	9,3	4,17
7,6	2,78	1,94	5,81	2,99	8,6	3,57
7,7	2,86	1,80	5,61	3,12	8,8	3,73
6,6	2,08	1,98	5,52	2,79	8,4	3,37

Wellen mit der signifikanten Wellenhöhe $H_{1/3}$, wie z. B. bei WASSING (1957) und FÜHRBÖTER (1975), nicht nur als qualitativ unzulässig angesehen werden muß, sondern auch in quantitativer Hinsicht zu nicht überzeugenden Ergebnissen führen würde.

Die mit den Gleichungen (3) und (4) ermittelten Werte sollten im wesentlichen Aussagen über die Brauchbarkeit des hier angewandten Verfahrens geben. Die nachgewiesene annähernde Übereinstimmung von Meßwerten und errechneten Vergleichswerten läßt eine Abschätzung des maximalen Wellenaufbaus beim Eintreten des Bemessungswasserstandes auf dieser Grundlage als gangbaren Weg erscheinen.

Hierfür muß zuerst ein dem Bemessungswasserstand zuzuordnender fiktiver Seegang ermittelt werden und hieraus die für den maximalen Wellenaufbau maßgebende theoretische Bemessungswelle. Dabei wird die Annahme getroffen, der Seegang vor dem Deich sei der für den beobachteten Sturmzeiten-Wasserstand maximal mögliche, um so ein Maß für die Dämpfung des Seegangs zu gewinnen.

FÜHRBÖTER (1974) und SIEFERT (1974) haben aus Naturmessungen im Flachwasserbereich übereinstimmend die Brecherbedingung

$$\frac{H}{h} \approx 1 \quad (7)$$

ermittelt. Die maximal überhaupt mögliche Wellenhöhe im Flachwasser beträgt somit

$$H_{\max} \approx h \quad (8)$$

Treten in einem Gebiet bei extremen Seegangsbedingungen geringere Wellenhöhen auf als nach der in Gleichung (8) dargelegten Beziehung möglich, so ist dies auf die topogra-

phisch und morphologisch bedingte Dämpfung des Seegangs zurückzuführen. Die maximale Wellenhöhe H_{\max} an einem Ort ist eine Funktion der örtlichen Wassertiefe und der auf der Laufstrecke zu diesem Ort erfolgten Dämpfung aus Refraktion, Shoaling, Diffraktion, Perkolation, Reibung und Brandung, die hier durch einen allgemeinen Dämpfungskoeffizienten K_{GD} erfaßt wird:

$$h = K_{GD} \cdot H_{\max} \quad (9)$$

Aus Gleichung (9) wird der für jeden Meßpunkt maßgebende allgemeine Dämpfungskoeffizient ermittelt und anschließend durch Einsetzen der örtlichen Wassertiefe beim Eintreten des Bemessungswasserstandes die dazugehörige maximale Wellenhöhe bestimmt. Mit dieser beim Eintritt des Bemessungswasserstandes zu erwartenden fiktiven Wellenhöhe können jeweils die örtliche theoretische Bemessungswelle oder die örtlichen theoretischen spektralen Bemessungswerte – wie vorgehend beschrieben – bestimmt werden. Mit Hilfe der Gleichungen (3) und (4) ergibt sich daraus der theoretische maximale Wellenlauf (Tab. 1 u. 2).

Die hier aus der Einmessung von Teekgrenzen nach einer Sturmflut hochgerechneten maximalen Auflaufhöhen beim Eintreten des Bemessungswasserstandes bedürfen einiger ergänzender Erläuterungen:

1. Aus Naturmessungen wurde retrospektiv ein fiktiver Seegang in monochromatischer und spektraler Form ermittelt, der mit dem den Wellenaufwurf verursachenden wirklichen Seegang nicht identisch sein muß und wohl auch nicht sein wird.
2. Ebenso wie bei den zugrunde liegenden Einmessungen der Teekgrenzen wurde der maximale Wellenaufwurf ermittelt, nämlich jeweils die höchste Zunge des gesamten Aufwurfspektrums. Bei der Dimensionierung würde dieser Wert allerdings im Hinblick auf die relative Überlaufsicherheit moderner Seedeiche zu unwirtschaftlichen Höhen führen.

Zum ersten Punkt ist ergänzend zu sagen, daß hier nur umfangreiche Naturmessungen des Seegangs im Küstenvorfeld vom tieferen Wasser bis vor die Deiche seiner Verformung und des zugehörigen Wellenaufwurfs Abhilfe schaffen. Ein derartiges Programm wird zur Zeit mit Unterstützung des Bundesministers für Forschung und Technologie über das Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen von der Forschungsstelle für Insel- und Küstenschutz Norderney der Niedersächsischen Wasserwirtschaftsverwaltung im Bereich der ostfriesischen Küste in Angriff genommen. Wesentliche Ergänzung könnten derartige räumliche Naturmessungen durch Grundsatzversuche im Naturmaßstab in einem Wellenkanal erfahren. Solange Ergebnisse solcher Untersuchungen nicht zur Verfügung stehen, muß man sich allerdings mit Methoden begnügen, wie sie hier dargelegt wurden.

Die Ermittlung der Bemessungswerte aus der Kenntnis von Seegang und Wellenaufwurf unter Berücksichtigung der relativen Überlaufsicherheit kann nach den Empfehlungen des Technisch-Wissenschaftlichen Beirats des KÜSTEN-AUSSCHUSSES NORD- UND OSTSEE (1969) erfolgen: Als Bemessungsaufwurfhöhe wird die Höhe vorgegeben, die beim Angriff von hundert Wellen nur dreimal überschritten wird.

Der Einfluß der spektralen Verteilung für so durchgeführte Bemessungen ist eindeutig. Tendenziell zeigt er sich bereits bei den hier vorgenommenen Beispielrechnungen; die Aufwurfformel von VAN OORSCHOT und D'ANGREMOND (1968) liefert für den Vergleichswellenaufwurf mit den Teekmessungen höhere Werte als die Formel von HUNT (1959). Für höhere Wasserstände und eine damit verbundene zunehmende Spreizung der Höhenverteilung ergeben sich jedoch geringere Werte. Diese Tatsache ist u. a. dadurch zu erklären, daß die Beziehung von VAN OORSCHOT und D'ANGREMOND (1968) eine relative Überlaufsicherheit von 2 % berücksichtigt.

Tabelle 2

Deichstrecke		H_{\max}^*	$H_{1/3}$	T_{\max}	A_{th}	H_{\max}^*	$H_{1/3}$	T_{\max}	A_{th}
		$H_{1/3}$	[m]	[s]	[m]	$H_{1/3}$	[m]	[s]	[m]
Ruhwarderdeich	77,900	1,32	1,76	5,9	3,54	1,37	2,26	6,7	4,55
	78,600	1,33	1,78	5,9	3,56	1,38	2,25	6,7	4,54
	79,690	1,32	1,70	5,8	3,42	1,38	2,13	6,5	4,29
Tossenserdeich	80,400	1,32	1,92	6,2	3,67	1,37	2,48	7,0	4,71
	80,700	1,33	1,84	6,0	3,48	1,38	2,31	6,8	4,41
	80,900	1,34	1,85	6,0	3,49	1,38	2,33	6,8	4,43
Tossenser									
Einlagegroden	81,300	1,28	0,54	3,3	1,04	1,31	0,82	4,0	1,70
	82,200	1,33	1,55	5,5	3,22	1,38	1,96	6,2	4,07
Eckwarderdeich	83,510	1,33	1,44	5,3	2,99	1,38	1,81	6,0	3,79
	84,560	1,32	1,39	5,2	2,88	1,38	1,76	5,9	3,68
Eckwarder									
Altendeich	84,950	1,33	1,36	5,2	2,85	1,38	1,72	5,8	3,57
Mundahn	86,030	1,35	1,29	5,1	2,72	1,39	1,54	5,5	3,21
	86,430	1,35	1,82	6,0	2,93	1,39	2,19	6,6	3,53
	86,900	1,35	2,01	6,3	3,23	1,39	2,51	7,1	4,07
Großwürden	87,350	1,35	1,72	5,8	2,75	1,39	2,15	6,5	3,44
	87,710	1,34	1,78	5,9	2,84	1,39	2,24	6,7	3,62
Eckwarderhörne	87,930	1,34	1,29	5,1	2,09	1,39	2,01	6,3	3,23
			fiktive Größen für die Sturmflut vom 3./4. 1. 1976				fiktive Größen beim Eintreten des Bemessungswasserstandes		

* für $U = 25 \text{ m/s}$

Die hier ermittelten fiktiven maximalen Wellenauflaufhöhen sind als überschlägliche Rechenwerte anzusehen, die lediglich einen Anhalt für die Überprüfung der Deichhöhen geben können.

Dabei ist weiterhin zu berücksichtigen, daß der hier retrospektiv ermittelte fiktive Seegang nicht so steil ist wie unter Sturmflutbedingungen. Für derartige Bedingungen empfiehlt HUNT (1959) jedoch die Abminderung des Wellenaufbaus um 10–20 %, die bei der Heranziehung von maximalen Auflaufhöhen nach den hier beschriebenen Verfahren zur Überprüfung der Bestickhöhe im Hinblick auf die relative Überlaufsicherheit der Seedeiche angebracht erscheint.

Bedeutung der verwendeten Symbole

A	Wellenauflauf
A_{th}	fiktiver Wellenauflauf (theoretisch ermittelt)
C_E	Auflaufbeiwert zur Berücksichtigung der spektralen Breite
g	Erdbeschleunigung: $9,81 \text{ m/s}^2$
h	Wassertiefe
H	Wellenhöhe
H_m	mittlere Wellenhöhe
H_{\max}	maximale Wellenhöhe
$H_{1/3}$	signifikante Wellenhöhe; mittlere Höhe der 33 % höchsten Wellen eines Seegangsspektrums
K_{GD}	allgemeiner Dämpfungskoeffizient

n	Böschungsneigung
T	Wellenperiode
T _{max}	korrespondierende Wellenperiode zum Maximum der Energiedichte eines Seegangsspektrums
ε	spektrale Breite des Seegangsspektrums

Schriftenverzeichnis

- ARBEITSGRUPPE KÜSTENSCHUTZWERKE DES KÜSTENAUSSCHUSSES NORD- UND OSTSEE. (LÜDERS, LORENZEN, FREISTADT, TRAEGER, KRAMER): Empfehlungen für den Deichschutz nach der Februar-Sturmflut 1962. Die Küste, Jahrgang 10, Heft 1, 1962.
- BRETSCHNEIDER, C. L.: Field Investigations of Wave Energy Loss in Shallow Water Ocean Waves. Beach Erosion Board, T.M. 46, 1954.
- ERCHINGER, H. F.: Wellenauflauf an Seedeichen – Naturmessungen an der ostfriesischen Küste. Mitt. Leichtweiß-Inst., H. 41, 1974.
- FRANZIUS, L.: Wirkung und Wirtschaftlichkeit von Rauheckwerken im Hinblick auf den Wellenauflauf. Mitt. Franzius-Inst., H. 25, 1965.
- FÜHRBÖTER, A.: Über die Bedeutung des Lufternschlages für die Energieumwandlung in Brecherzonen. Mitt. Franzius-Inst., H. 36, 1971.
- FÜHRBÖTER, A.: Einige Ergebnisse aus Naturuntersuchungen in Brandungszonen. Mitt. Leichtweiß-Inst., H. 40, 1974.
- FÜHRBÖTER, A.: Äußere Belastungen von Seedeichen und Deckwerken. Vorabdruck aus „Seedeichbau, Theorie und Praxis“ (in Vorbereitung), 1975.
- GRÜNE, J. u. A. FÜHRBÖTER: Large Wave Channel for Full Scale – Modelling of Wave Dynamics in Surf Zones. Proc. Symp. on Modell. Techn., San Francisco, 1975.
- HASSELMANN, K., et al.: Measurements of Wind – Wave Growth and Swell Decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP). Erg.-H. Dtsch. Hydrogr. Ztschr., Reihe A, Nr. 12, 1973.
- HENSEN, W.: Modellversuche über den Wellenauflauf an Seedeichen im Wattengebiet. Mitt. Franzius-Inst., H. 5, 1954.
- HENSEN, W.: Modellversuche zur Bestimmung des Einflusses der Form eines Seedeiches auf die Höhe des Wellenauflaufes. Mitt. Franzius-Inst., H. 7, 1955.
- HENSEN, W.: Bericht der Arbeitsgruppe „Sturmfluten“ im Küstenausschuß Nord- und Ostsee. Die Küste, Jg. 14, H. 1, 1966.
- HUNDT, C.: Der maßgebende Sturmflutseegang und Wellenauflauf für das Deichbestick der deutschen Nordseeküste auf Grund der Sturmflut vom 16. Februar 1962. Die Küste, Jg. 10, H. 2, 1962.
- HUNT, I. A.: Design of Seawalls and Breakwaters. Proc. ASCE, J. Waterw. a. Harb. Div. Vol. 85, WW 3, 1959.
- LÜDERS, K.: Bericht der Arbeitsgruppe „Küstenschutzwerke“ im Küstenausschuß Nord- und Ostsee. Die Küste, Jg. 14, H. 1, 1966.
- METZKES, E.: Bericht über den Deichbau und den Küstenschutz in Niedersachsen nach der Sturmflut vom 16./17. 2. 1962. Die Küste, Jg. 14, H. 1, 1966.
- NMFELF (Niedersächsischer Minister für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten): Erfahrungen aus den Sturmfluten vom November/Dezember 1973 und Folgerungen für die niedersächsischen Küstenschutzwerke. (Beitrag in diesem Heft.) 1976.
- PIERSON, W. J. u. L. MOSKOWITZ: A Proposed Spectral Form for Fully Developed Wind Seas Based on the Similarity Theory of S. A. Kitaigorodski. J. of Geoph. Res., Vol. 69, Nr. 24, 1964.
- SCHÜTTRUPF, R.: Über die Bestimmung von Bemessungswellen für den Seebau am Beispiel der südlichen Nordsee. Mitt. Franzius-Inst., H. 39, 1973.
- SIEFERT, W.: Über den Seegang in Flachwassergebieten. Mitt. Leichtweiß-Inst., H. 40, 1974.
- SYLVESTER, R.: Coastal Engineering. Elsevier Publishing Company, Amsterdam, 1974.

- TECHNICAL ADVISORY COMMITTEE ON PROTECTION AGAINST INUNDATION: Wave Run-Up and Overtopping. Government Publishing Office, Den Haag, 1974.
- TECHNISCH-WISSENSCHAFTLICHER BEIRAT DES KÜSTENAUSSCHUSSES NORD- UND OSTSEE (W. Hensen, C. Hensen, Lüders, Petersen): Zusammenfassung der Untersuchungsergebnisse der ehemaligen Arbeitsgruppe „Sturmfluten“ und Empfehlungen für ihre Nutzenanwendung beim Seedeichbau. Die Küste, H. 17, 1969.
- VAN OORSCHOT, J. H. u. K. D'ANGREMOND: The Effect of Wave Energy Spectra on Wave Run-Up. Proc. 11th Conf. on Coast. Eng., 1968.
- WASSERWIRTSCHAFTSAMT BRAKE: Vorläufiger Bericht über die Sturmflut vom 3. u. 4. 1. 1976. (Unveröffentlicht), 1976.
- WASSING, F.: Model Investigations of Wave Run-up on Dikes Carried out in the Netherlands during the Past Twenty Years. Proc. 6th Conf. on Coast. Eng., 1957.