

Großer Wellenkanal Hannover: Versuchsergebnisse über den Wellenauflauf auf glatten und rauhen Deichböschungen mit der Neigung 1:6

VON ALFRED FÜHRBÖTER, UWE SPARBOOM UND HANS-HEINRICH WITTE

Zusammenfassung

Ergebnisse von naturmaßstäblichen Untersuchungen im Großen Wellenkanal in Hannover zum Wellenauflauf an einer 1:6 geneigten Deichböschung werden vorgestellt und mit den bekannten Wellenaufformeln nach WASSING und HUNT verglichen.

Es werden sowohl reguläre Wellen als auch Wellenspektren untersucht. Bei Spektren ist der Wellenauflauf allgemein größer als bei regulären Wellen, wobei mit zunehmender Peakperiode T_p eine asymptotische Annäherung an die Auflaufhöhen infolge regulärer Wellen bei gleicher Periode T festzustellen war.

Die Untersuchungen wurden für eine glatte Böschung (Asphaltbeton), eine grasraue Böschung (Kunstgras) und eine Böschung mit einer Rauheit aus Betonblöcken durchgeführt.

Während bei regulären Wellen der Wellenauflauf im Vergleich zu glatten Böschungen (100%) im Mittel nur auf 95% (Gras) bzw. auf 88% (Betonblöcke) reduziert wird, ergaben sich bei Versuchen mit Spektren nennenswert höhere Reduzierungen, und zwar auf 87% bei Gras und auf 75% bei den Betonblöcken.

Für die Belange der Praxis werden in Anlehnung an die bekannten Formeln von WASSING und HUNT Empfehlungen für künftige Bemessungen aufgeführt.

Summary

Experiments at prototype scale 1 to 1 were carried out in the Large wave flume in Hannover with respect to wave run-up on a slope 1 to 6; the results are compared with the well known run-up formulas by WASSING and HUNT.

The tests were run with regular and irregular waves. Wave run-up due to irregular waves generally was higher than that due to regular waves; with increasing peak period T_p , however, the wave run-up decreased asymptotically towards wave run-up due to regular waves at the same wave period T .

The tests were carried out for three different slope covers; asphalt (smooth), grass (rough) and concrete blocks on top to asphalt cover (rough). In case of regular waves compared to run-up on the smooth slope (100%) the run-up was reduced to 95% with grass and to 88% with concrete blocks. In case of irregular waves the reduction was significantly higher and reached 87% for grass and 75% for concrete blocks.

For practical purpose and application a design diagram which – with corrections – is comparable to the formulas developed by WASSING and HUNT is presented.

Inhalt

Zusammenfassung	155
Summary	155
1. Einleitung und Aufgabenstellung	156
2. Allgemeine Bemerkung zum Wellenauflauf	157
3. Versuchsaufbau, Meßtechnik und Auswerteverfahren	161
4. Versuchsergebnisse für reguläre Wellen	166

4.1	Glatte Böschung (= Asphaltbeton)	166
4.2	Böschung mit Grasrauheit	172
4.3	Böschung mit Betonblöcken	175
4.4	Wirkung der Rauheiten bei regulären Wellen	178
5.	Versuchsergebnisse für Wellenspektren	181
5.1	Erzeugung und Auswertung der Wellenspektren	181
5.2	Wellenspektren auf glatter Böschung	182
5.3	Vergleich mit der Gras- und der Betonblockböschung	182
6.	Schlußbemerkung und Ausblick	185
7.	Schriftenverzeichnis	192
8.	Anhang: Meßergebnisse in Tafelform	193
8.1	Meßergebnisse der glatten Böschung (Asphaltbeton) für reguläre Wellen (zu Abschnitt 4.1)	193
8.2	Meßergebnisse der Böschungen mit Grasrauheit und mit Betonblöcken bei regulären Wellen (zu Abschnitt 4.2 und 4.3)	194
8.3	Meßergebnisse der Böschungen mit drei Rauheiten (glatt, Gras, Betonblöcke) bei Wellenspektren (zu Abschnitt 5.2 und 5.3)	195

1. Einleitung und Aufgabenstellung

Die vorliegenden Untersuchungen wurden im Grossen Wellenkanal (GWK) in Hannover-Marienwerder durchgeführt, der mit seiner Länge von 324 m, seiner Breite von 5 m und seiner Höhe von 7 m (mit 5 m maximaler Wassertiefe) zu den größten Versuchsanlagen seiner Art auf der Erde gehört (GRÜNE und FÜHRBÖTER, 1975 und FÜHRBÖTER, 1982). Die Wellenmaschine kann bei einer Antriebsleistung von rd. 900 kW Wellen bis zu 2 m Höhe sowohl als reguläre Wellen als auch als Wellenspektren erzeugen, die als Brecher auf Böschungen dann Höhen über 2,5 m erreichen; dies sind Wellen von derjenigen Größenordnung, wie sie bei Sturmfluten an der deutschen Nord- und Ostseeküste auftreten. Daher können die mit dieser Versuchsanlage gewonnenen Versuchsergebnisse als frei von Maßstabseffekten angesehen werden.

Diese Maßstabseffekte werden in der vorliegenden Arbeit nur am Rande erwähnt; ihre Untersuchung wie auch die Gegenüberstellung der neuen Ergebnisse mit dem umfangreichen Schrifttum sollen Gegenstand einer besonderen Arbeit sein. Ebenso sollen keine neuen theoretischen Überlegungen vorgelegt werden; die Aufgabe der vorliegenden Untersuchungen besteht allein in einer Dokumentation der neuen Untersuchungsergebnisse aus dem Grossen Wellenkanal, wobei auch insbesondere an die Belange der Praxis gedacht wird. Außerdem werden aber die Ergebnisse in einem Anhang in Tafelform mitgeteilt, damit sie auch von anderen Autoren für weitergehende wissenschaftliche Untersuchungen verwendet werden können (vgl. Abschnitt 8).

In bezug auf die beschränkte Verfügbarkeit des Kanals wurden die Versuche mit zunächst nur einer Böschungsneigung

$$\tan \alpha = 1 : n = 1 : 6$$

durchgeführt; es ist dies diejenige Böschungsneigung, die nach den Empfehlungen des Küstenausschusses Nord- und Ostsee (1962) nach den Erfahrungen aus der Februar-Sturmflut 1962 als Mindestneigung für scharliegende Deiche mit Wellenbelastung empfohlen wird. Ebenfalls unter Berücksichtigung der zur Verfügung stehenden Versuchszeit mußten die Untersuchungen auf nur drei kennzeichnende Rauheiten (Asphaltbeton, Gras und Betonblöcke als Bremsenlemente) beschränkt bleiben.

Die Untersuchungsergebnisse werden mit den gebräuchlichen Standardformeln für den Wellenaufbau von WASSING (1957) und HUNT (1959) verglichen.

Der Grosse Wellenkanal wurde von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) finanziert, wofür an dieser Stelle wiederum der Dank ausgesprochen werden soll. Außerdem danken aber die Autoren der DFG für die Förderung der vorliegenden Untersuchungen im Rahmen des Sonderforschungsbereiches (SFB) 205 („Küsteningenieurwesen - Seegang und Transportprozesse im Küstenschutz, See- und Hafenanbau“); ebenso gilt der Dank der Betriebsgruppe des GWK (Dr.-Ing. TAUTENHAIN, Dipl.-Ing. GRÜNE, Dipl.-Ing. SCHMIDT, Dipl.-Ing. BERGMANN und JUNGE) sowie den Herren Dipl.-Ing. SCHULZ, Dipl.-Ing. SCHÄFER und MALEWSKI für ihre Mitarbeit an der Durchführung und Auswertung der Untersuchungen.

2. Allgemeine Bemerkung zum Wellenauflauf

Die Definition des Wellenauflaufes geht aus Abb. 1 hervor; es wird darunter bei jeder Welle der senkrechte Abstand z zwischen dem höchsten Punkt der Wellenaufzunge (Punkt A auf Abb. 1) und dem Ruhewasserspiegel verstanden. Es sei ausdrücklich vermerkt, daß in diesem Betrag des Wellenauflaufes auch der Anteil enthalten ist, der als sog. Brandungsstau als Erhebung des Ruhewasserspiegels über der Böschung auftritt (vgl. ERCHINGER,

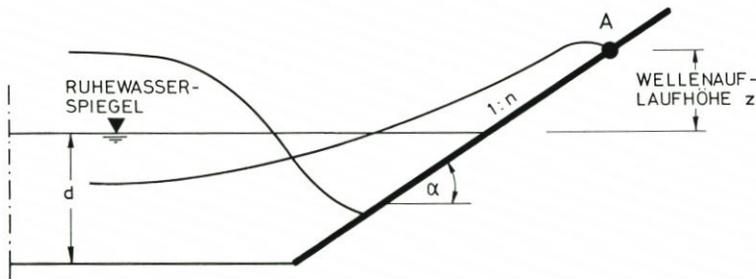


Abb. 1: Zur Definition des Wellenauflaufes z

1982, NIELSEN, 1989). Eine exakte mathematische Behandlung des Wellenauflaufes ist nicht möglich, weil die physikalischen Prozesse bei der Energieumwandlung der brechenden Welle nicht deterministisch beschrieben werden können; Zufallsprozesse werden insbesondere durch den Lufteintrag beim Brechen der Wellen bewirkt (FÜHRBÖTER, 1971). Eine eingehende Behandlung der physikalischen Fragen ist bei SCHIJF (1974) und BATTJES und ROOS (1975) zu finden.

Die meisten Berechnungsverfahren und Bemessungsformeln wurden aus experimentellen Untersuchungen in verkleinerten Versuchsmodellen gewonnen. Qualitativ stimmen alle Untersuchungen für den Wellenauflauf z wie folgt überein:

- z nimmt mit der Böschungsneigung $\tan \alpha = 1:n$ ab
- z nimmt mit der Wellenhöhe H zu
- z nimmt mit der Wellenperiode T zu
- z nimmt mit zunehmender Wassertiefe d vor der Böschung ab; für Werte $d/H \geq 3$ bleibt er dann annähernd konstant.

Eine umfassende allgemeine grafische Darstellung des Wellenauflaufes z in seinen Abhängigkeiten von der Böschungsneigung $\tan \alpha = 1:n$, der Wellenhöhe H und der Wellenperiode T (über den Steilheitsfaktor $H/g \cdot T^2$) geht auf SAVILLE (1957) zurück; diese Ergebnisse beruhen

auf Modellversuchen, zu denen später ein Korrekturfaktor für den Naturmaßstab hinzugefügt wurde (siehe z. B. *Shore Protection Manual*, 1984).

In Abb. 2 ist auch der verhältnismäßig kleine Bereich mit $\tan \alpha = 1:n = 1:6$ der vorliegenden Untersuchung eingetragen; er befindet sich bereits in dem Bereich der Kurvenscharen, wo der Wellenauflauf linear mit dem Zahlenwert $\tan \alpha = 1:n$ abnimmt und durch die Formel von HUNT (s. u.) wiedergegeben wird.

Bei streuenden Versuchsergebnissen für den Wellenauflauf – diese Streuung ist wegen der erwähnten Zufallsprozesse unvermeidlich – sowohl bei regulären Wellen als auch bei Wellenspektren ist es üblich, den Wert z_{98} als Bemessungswert zu verwenden; es ist dies diejenige Wellenaufbauhöhe, die von nur 2 % der Wellen überschritten wird. Weiterhin ist es üblich, als erzeugende Wellenhöhe von der einlaufenden Welle die signifikante Wellenhöhe H_s (als Mittelwert der 33 höchsten Wellen einer Folge von 100 Wellen) zu verwenden; wie im Abschnitt 3 gezeigt wird, fällt dieser Wert bei regulären Wellen mit dem Mittelwert H_m und dem Medianwert H_{50} zusammen.

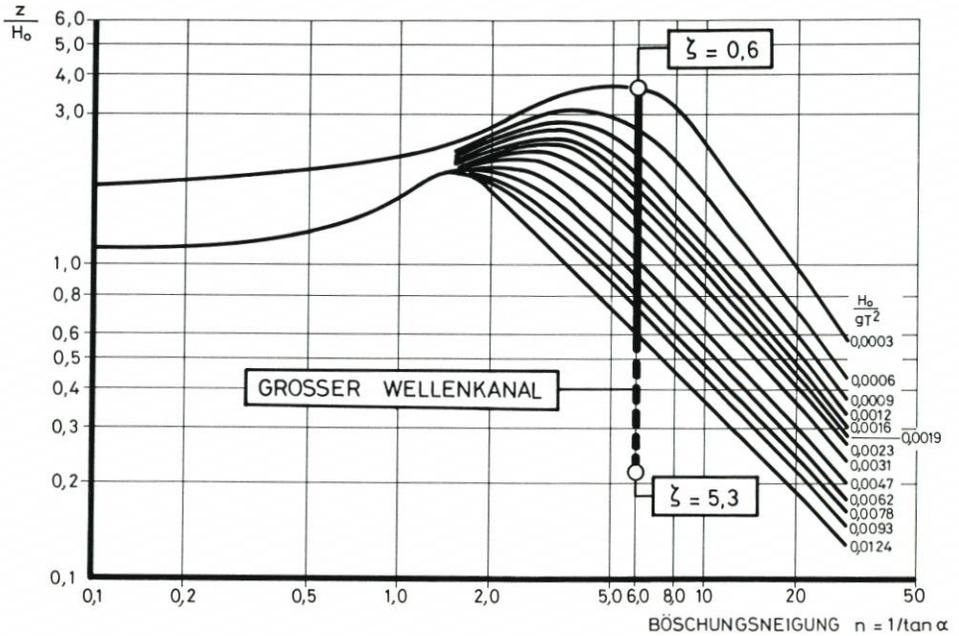


Abb. 2: Reguläre Wellen: Abhängigkeit des Wellenauflaufes von der Wellenhöhe H , der Wellenperiode T und der Böschungsneigung mit $\tan \alpha = 1:n$ nach SAVILLE (1958) aus *Shore Protection Manual* (1984)

Die Versuchsergebnisse werden den Standardformeln nach WASSING (1957) und HUNT (1959) gegenübergestellt. Die Übersichtsformel nach WASSING vernachlässigt den Einfluß der Wellenperiode; sie wird hier in der Form

$$z = 8 \cdot H \cdot \tan \alpha \quad \dots (1)$$

$$\text{mit } \tan \alpha = 1:n = 1/\cot \alpha \quad \dots (2)$$

verwendet und gilt wie die Formel von HUNT für annähernd glatte Böschungen. Die Formel von HUNT lautet:

$$z = \sqrt{H \cdot L_o} \cdot \tan \alpha \quad \dots (3)$$

wobei L_o die Wellenlänge im Tiefwasser bedeutet, die

$$L_o = \frac{g}{2\pi} \cdot T^2 \quad \dots (4)$$

beträgt; wird Gl. (4) in Gl. (3) eingesetzt, so lautet die Formel von HUNT

$$z = \sqrt{\frac{g}{2\pi}} \cdot \sqrt{H} \cdot T \cdot \tan \alpha \quad \dots (5)$$

Im Gegensatz zur Formel von WASSING, in der die Wellenhöhe linear eingeht, nimmt bei HUNT der Wellenaufbau mit der Quadratwurzel aus der Wellenhöhe zu; außerdem ist aber hier eine lineare Abhängigkeit von der Wellenperiode T vorhanden, während dieser Einfluß bei WASSING entfällt.

Eng mit der Formel von HUNT verbunden ist die dimensionslose Brecherkennzahl ζ , die nach einem Vorschlag von BATTJES (1974) als *Iribarren-Zahl* bezeichnet werden soll. Sie kann entweder in der Form

$$\zeta_o = \frac{1}{\sqrt{H_o/L_o}} \cdot \tan \alpha \quad \dots (6)$$

auf die Wellenhöhe im Tiefwasser H_o oder in der Form

$$\zeta = \frac{1}{\sqrt{H/L_o}} \cdot \tan \alpha \quad \dots (7)$$

auf die Höhe H der ankommenden Welle (in einem Bereich mit konstanter Wassertiefe d vor der Böschung) bezogen werden; in den folgenden Ausführungen wird stets die *Iribarren-Zahl* ζ für die Wellenhöhe auf dem Deichvorland verwendet (vgl. Abschnitt 3). Die Verbindung zwischen der *Iribarren-Zahl* ζ und der Formel von HUNT ist durch die einfache Beziehung

$$\frac{z}{H} = \zeta \quad \dots (8)$$

gegeben.

Nach BATTJES (1974) werden durch die *Iribarren-Zahl* = Brecherkennzahl ζ folgende Bereiche der Brecherformen unterschieden:

$\zeta \cong 0,5$	Schwallbrecher (spilling breaker)
$0,5 \cong \zeta \cong 3,3$	Sturzbrecher (plunging breaker)
$\zeta \cong 3,3$	Reflexionsbrecher (surging breaker)

Diese Grenzen sind nicht streng definiert, sondern es gibt Übergänge zwischen den Brecherformen; hier ist insbesondere als Übergangsform zwischen Sturz- und Reflexionsbrecher der sogenannte „collapsing breaker“ (GALVIN, 1968) zu nennen.

Auf Abb. 3 und 4 ist die Abhängigkeit der *Iribarren-Zahl* ζ von der Wellenhöhe H und der Wellenperiode T für die Böschungsneigung $\tan \alpha = 1 : n = 1 : 6$ dargestellt. Auf Abb. 3 sind dabei die Grenzen für die Brecherformen nach BATTJES (1974) eingetragen; außerdem aber auch noch der Bereich der Wellenhöhen zwischen 1 und 2 m sowie der Wellenperioden zwischen 5 und 8 s; dies ist etwa der Bereich der Wellenparameter, der an Seedeichen bei Sturmfluten an der Nord- und Ostseeküste auftritt. Dabei können z.B. an Deckwerksböschungen auf den Inseln der Nordsee durchaus noch höhere Wellenhöhen auftreten; an der Ostsee dagegen sind kleinere Wellenperioden als auf Abb. 3 zu erwarten.

Aus Abb. 4 geht hervor, in welchen Bereichen der ζ -Zahlen die vorliegenden Untersu-

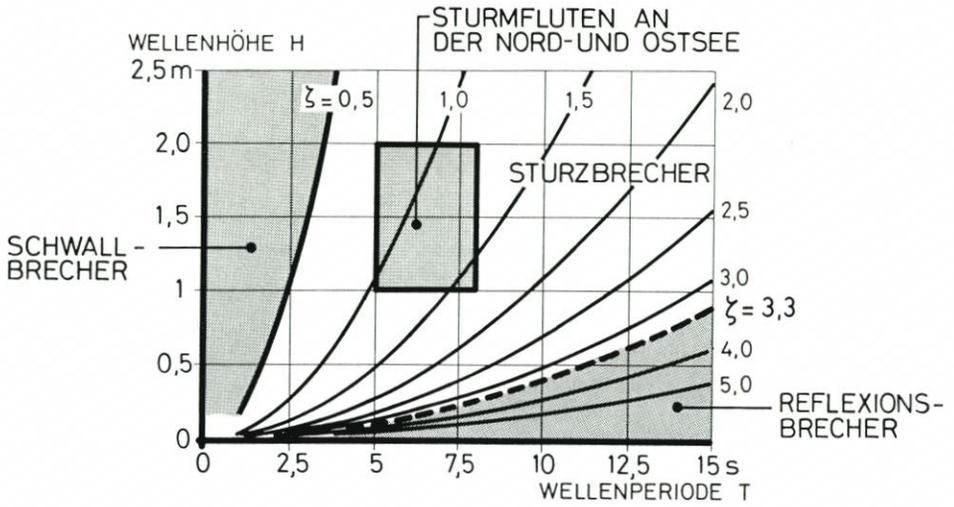


Abb. 3: Iribarren-Zahl ζ als f(H, T) für $\tan \alpha = 1:6$ mit den Bereichen der Brecherformen und mit dem Bereich der Wellenparameter bei Sturmfluten an Seedeichen der Nord- und Ostsee

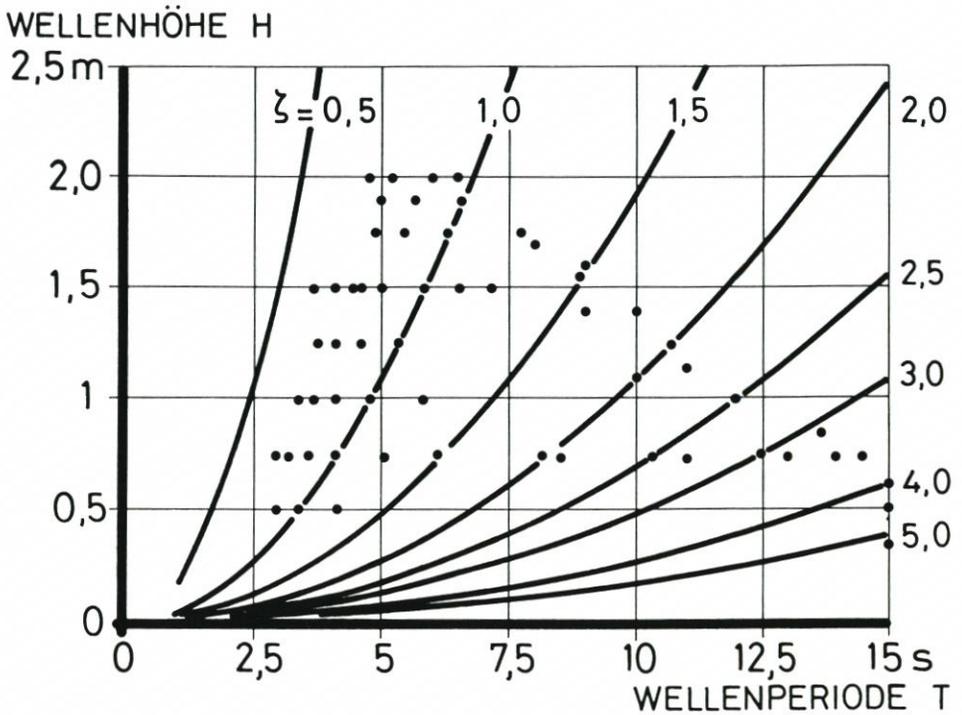


Abb. 4: Iribarren-Zahl ζ als f(H, T) mit Eintragung der Versuchswerte (reguläre Wellen bei glatter Böschung [= Asphaltböschung])

chungen durchgeführt werden; jeder Punkt entspricht einer Versuchsreihe mit mehr als 100 (meist 200) Wellen.

3. Versuchsaufbau, Meßtechnik und Auswerteverfahren

Die Testböschung im Grossen Wellenkanal wurde auf einem verdichteten Sandkern aus Asphaltbeton in einer Stärke von $d \cong 0,20$ m hergestellt; die Kronenhöhe lag 8,4 m über der Kanalsohle. In Abb. 5 ist der Versuchsaufbau zusammen mit den für die Untersuchungen zum Wellenauflauf relevanten Meßgeräten dargestellt; Abb. 6 zeigt die 1:6 geneigte Böschung zusammen mit dem Wellenauflaufpegel und einem Meßraster zur visuellen Kontrolle der Wellenaufbaumessungen. Eine ausführliche Beschreibung der Gesamtkonzeption zur Ermittlung der Wellenbelastung von Böschungen im Prototyp, die zusätzlich zur Erfassung des Wellenauflaufes auch die Erfassung der wellenerzeugten Druckbelastung (Druckschläge) und die Erfassung des Seegangsklimas beinhaltet, ist u. a. in FÜHRBÖTER (1986) und FÜHRBÖTER und SPARBOOM (1988) gegeben. Die Rauheiten der untersuchten rauen Böschungen (Kunstgras und Betonblöcke) werden in den Abschnitten 4.2 und 4.3 beschrieben.

Der eingesetzte Wellenauflaufpegel ist ein Stufenpegel, bei dem einzelne Elektrodenpaare in einem festen Abstand auf der Böschung angeordnet sind. Das Meßverfahren beruht auf der unterschiedlichen Leitfähigkeit der beiden Zustände: Elektrodenpaar an der Luft und Elektrodenpaar wasserbedeckt. Eine ausführliche Beschreibung des Wellenauflaufpegels ist in GRÜNE (1982) gegeben. Angeordnet wurden 70 Elektrodenpaare; bei einem Abstand der einzelnen

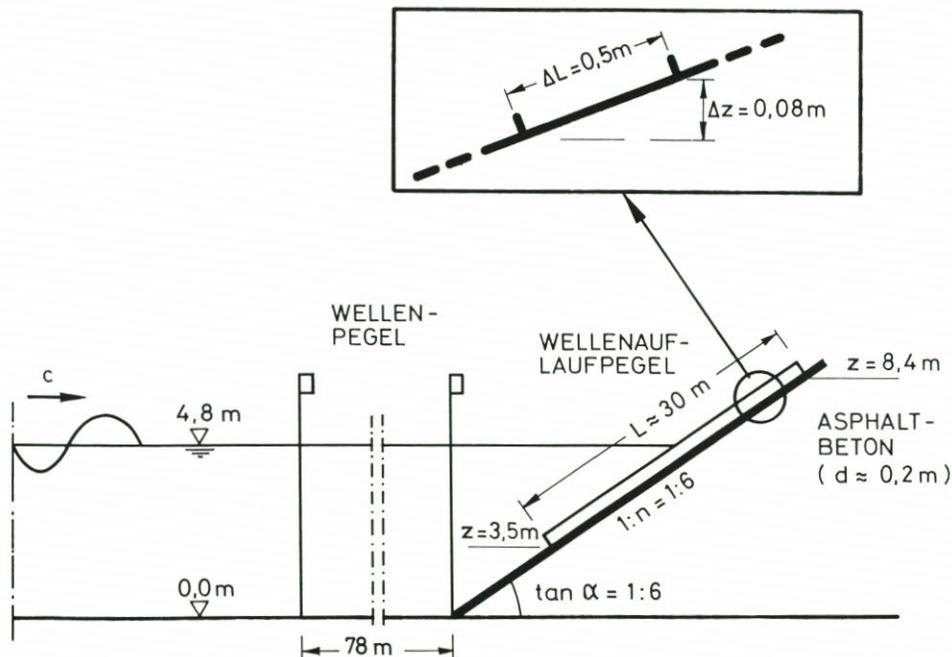


Abb. 5: Großer Wellenkanal mit Böschungseinbau $\tan \alpha = 1:6$: Anordnung der Meßgeräte für die Wellenhöhe und den Wellenauflauf



Abb. 6: Asphaltbetonböschung mit der Neigung $\tan \alpha = 1:6$ mit Wellenauflaufpegel und Meßraster

Paare von $\Delta L = 0,4 \text{ m}$ ($\triangleq \Delta z \approx 0,07 \text{ m}$) im unteren und $\Delta L = 0,5 \text{ m}$ ($\triangleq \Delta z \approx 0,08 \text{ m}$) im oberen Böschungsbereich wurde ein Höhenbereich des Wellenauflaufes von 5 m erfaßt.

Die Untersuchungen wurden bei einem mittleren Wasserstand von $d = 4,8 \text{ m}$ über der Kanalsole ausgeführt, das tiefste Elektrodenpaar lag 1,3 m unterhalb des Ruhewasserspiegels.

Die für die Untersuchungen eingesetzte Meßkette ist in Abb. 7 dargestellt. Es wurde eine digitale Datenerfassung unter Verwendung eines AT-Personal-Computers eingesetzt. Die analogen Signale der Wellenpegel wurden unter Einhaltung des Abtasttheorems vor der analog-digital Wandlung mit einer Grenzfrequenz von 3 Hz tiefpaßgefiltert. Begründet durch die bei dem Wellenauflaufpegel als Stufensignale anfallenden Daten wurden diese ungefiltert dem A/D-Wandler zugeführt. Abb. 8 zeigt einen Ausschnitt der zeitlich synchronen Regi-

strierungen eines Wellenpegels (Wellenpegel am Deichfuß, vgl. Abb. 5) und des Wellenauf-
 laufs für eine Versuchsreihe mit regulären Wellen ($H = 1,5 \text{ m}$; $T = 5,0 \text{ s}$; $\zeta = 0,85$).

Die rechnergestützte Analyse der Wellenaufsignale ist in WITTE und RIEKMANN
 (1987) beschrieben. In Anlehnung an das „crest to crest“-Verfahren zur Bestimmung von
 Wellenhöhen wird beim Wellenauf ein „trough to trough“-Verfahren verwendet, bei dem

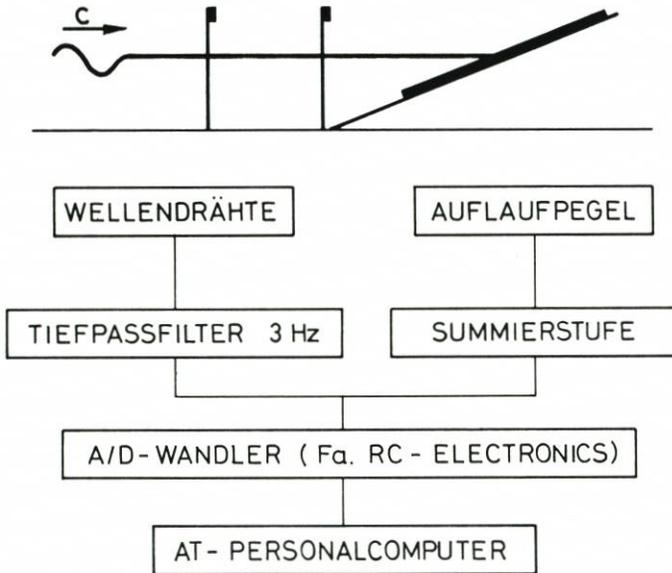


Abb. 7: Meßkette für Wellenhöhen und Wellenauf (schematisch)

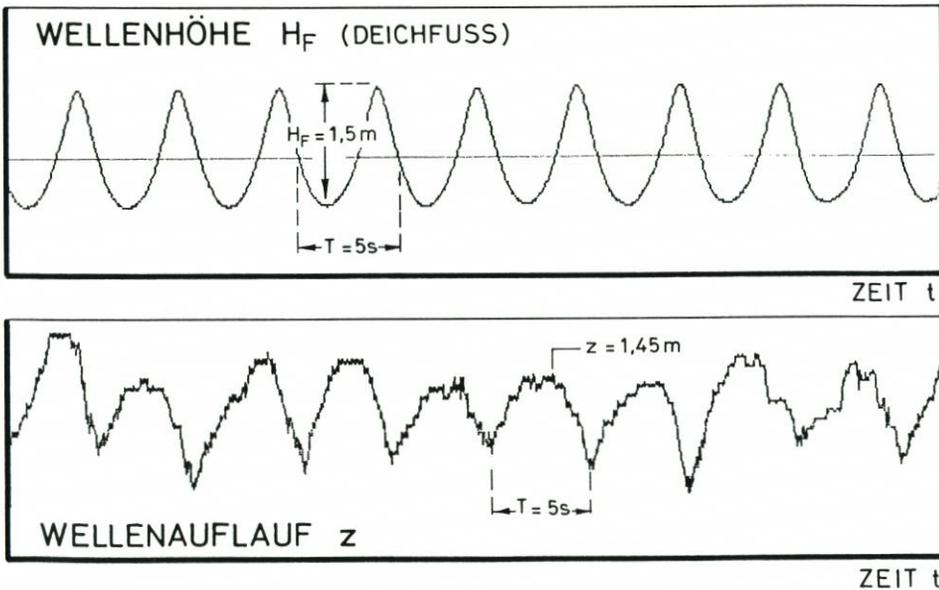


Abb. 8: Beispiel einer synchronen Analogaufzeichnung von Wellenhöhe und Wellenauf (reguläre
 Wellen)

ein Wellenauf- und ablauf die Zeit zwischen zwei aufeinanderfolgenden tiefsten Höhenkoten des Wellenablaufes umfaßt (vgl. Abb. 8 unten). Während bei den untersuchten regulären Wellen jede Welle einen Wellenaufbau bewirkt, kann es bei Wellenspektren zu einer Überlagerung einzelner Wellenaufläufe kommen, so daß die Zahl der Wellenaufläufe kleiner als die Zahl der angreifenden Wellen ist (vgl. Abschnitt 5.1).

Wie in Abschnitt 2 ausgeführt, ist der Wellenaufbau auch infolge regulärer Wellen eine zufällige Größe. Für die Beschreibung des Wellenaufbaues ist daher eine statistische Analyse erforderlich. Es werden hierzu die Aufbauhöhen jeder Versuchsreihe in ein Wahrscheinlichkeitspapier der Normal-Verteilung eingetragen (Abb. 9 rechts) und unter Verwendung einer Ausgleichsfunktion die Kenngrößen z_{98} und z_{50} ermittelt. Hierbei beschreibt z_{98} die Aufbauhöhe, die von 2% und z_{50} die Aufbauhöhe, die von 50% der Wellenaufläufe überschritten wird (vgl. Abschnitt 2). Als Maß für die Streuung der Aufbauhöhen wird der Verhältniswert z_{98}/z_{50} , der eng mit der Standardabweichung des Kollektivs verbunden ist, verwendet.

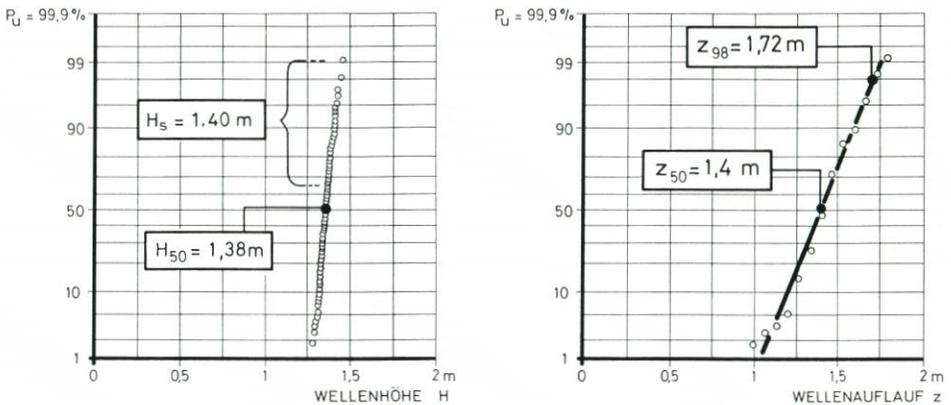


Abb. 9: Reguläre Wellen: Auswertung von H_{50} und H_s sowie von z_{50} und z_{98}

Bei der Ermittlung der vorgenannten Kenngrößen ist zu beachten, daß infolge des verwendeten Stufenpegels eine Klasseneinteilung der Aufbauhöhen vorgegeben ist, bei der die Klassenbreite dem vorhandenen vertikalen Stufenabstand entspricht. Eine mathematische Beschreibung der Ausgleichsfunktion und damit die Untersuchung unterschiedlicher Wahrscheinlichkeitsverteilungen zur Beschreibung der Wellenaufläufe muß weiteren Arbeiten vorbehalten bleiben.

Die Wellenhöhen wurden nach dem „zero crossing“-Verfahren ermittelt. Ein Beispiel der Verteilung der Wellenhöhen H_F , die am Deichfuß bei einer erzeugten Welle mit $H = 1,5 \text{ m}$ und $T = 5,0 \text{ s}$ gemessen wurden, zeigt Abb. 9 (links).

An der Wellenmaschine haben die erzeugten Wellen infolge der Steuerung der Wellenmaschine (Reabsorption) die konstante Höhe H . Abb. 9 links zeigt, daß auch bei den durch die Reflexion beeinflussten Wellenhöhen am Deichfuß H_F die signifikante Wellenhöhe ($H_{SF} = 1,4 \text{ m}$) ungefähr der medialen Wellenhöhe ($H_{50F} = 1,38 \text{ m}$) und der mittleren Wellenhöhe ($H_{mF} = 1,37 \text{ m}$) entspricht. Das Verhältnis von H_{SF}/H_{mF} der Wellenhöhen am Deichfuß für alle in Abb. 4 eingetragenen Parameter der untersuchten regulären Wellen beträgt im Mittel $H_{SF}/H_{mF} = 1,03$ bei einer Standardabweichung von 0,02, so daß für die weiteren Untersuchungen angesetzt werden kann:

$$H \cong H_s \cong H_{50} \cong H_m$$

Für eine quantitative Abschätzung der Wellenreflexion zeigt Abb. 10 (oben) das Verhältnis der Wellenhöhen am Deichfuß H_F und der generierten Wellenhöhen H der Wellenmaschine in Abhängigkeit von der Iribarren-Zahl ζ der generierten Wellenparameter; in Abb. 10 (unten) ist die Iribarren-Zahl am Deichfuß ζ_F der Iribarren-Zahl der generierten Wellen gegenübergestellt. Der Abbildung kann entnommen werden, daß das Verhältnis H_F/H im Bereich des reinen Sturzbrechers ($\zeta < 3$) durch den Mittelwert (1,0) und die Standardabweichung ($\pm 0,1$) ausreichend beschrieben ist, oberhalb von $\zeta = 3$ nimmt dann im Bereich des Reflexionsbrechers dieser Verhältniswert stark zu. Die gleiche Tendenz zeigt auch die Gegenüberstellung der Iribarren-Zahlen; bis zu $\zeta = 3$ sind beide Werte nahezu gleich, oberhalb von $\zeta = 3$ wird – infolge der Zunahme der Wellenhöhen am Deichfuß – ζ_F deutlich kleiner als die Iribarren-Zahl ζ der von der Reflexion unbeeinflussten Wellenhöhe H auf dem Deichvorland.

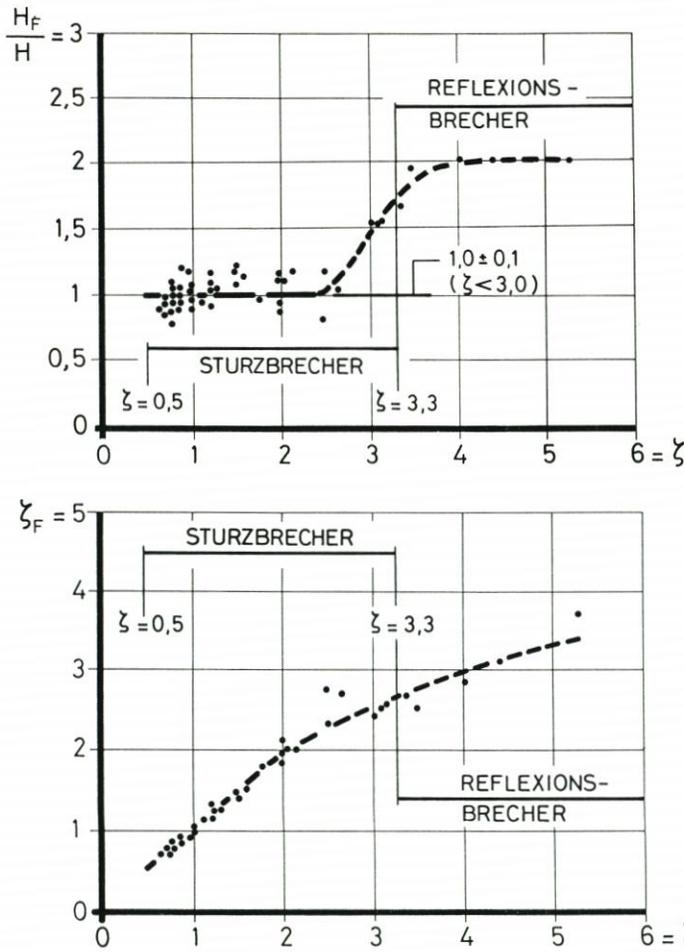


Abb. 10: oben: Verhältnis der Wellenhöhen am Böschungsfuß H_F zur erzeugten Wellenhöhe H
 unten: ζ -Wert mit Wellenhöhe H_F am Böschungsfuß ($= \zeta_F$) als Funktion des ζ -wertes der erzeugten Wellenhöhe H ($= \zeta$)

Die starke Streuung der Verhältniswerte H_F/H in dem Bereich $\zeta < 3$ ist ein Hinweis darauf, daß der Ort der größten Höhe der aus Ausgangs- und reflektierter Welle überlagerten Welle im Nahbereich des Bauwerkes von der Wellenlänge der ankommenden Wellen abhängig und damit bei gleicher Wassertiefe eine direkte Funktion der Wellenperiode ist, so daß die Wellenhöhe am Deichfuß allein das tatsächliche Seegangsklima nicht ausreichend beschreibt.

Für die nachfolgenden Auswertungen, die auch in Abhängigkeit von der *Iribarren*-Zahl vorgenommen werden, wird daher – sofern nicht besonders angegeben – die Ausgangswellenhöhe auf dem Deichvorland, die durch die Parameter der Maschinenwelle beschrieben ist, verwendet.

4. Versuchsergebnisse für reguläre Wellen

4.1 Glatte Böschung (= Asphaltbeton)

Bei dieser Versuchsreihe wurde eine durchgehende Asphaltbetonböschung verwendet, bei der die Rauheitserhebungen in der Größenordnung eines Millimeters liegen, wie aus Abb. 11 hervorgeht. Wird diese Rauheitserhebung mit den (zeitlich und örtlich wechselnden)

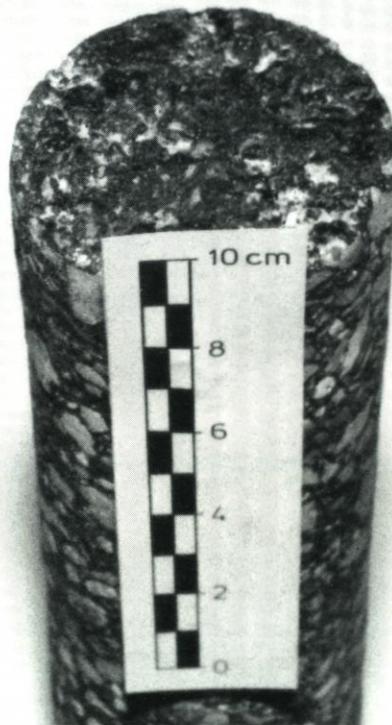


Abb. 11: Oberfläche der Asphaltbetonböschung

Stärken der Wellenauflauf- und Wellenablaufzungen verglichen (die auch im obersten Bereich noch in der Größenordnung von 10 cm liegen), so ergibt sich ein Verhältnis von ungefähr 1 : 1000; im Vergleich zu den anderen untersuchten Rauheiten (Kunstgras und Betonblöcke) kann dieses als hydraulisch glatt gewertet werden, so daß diese Asphaltbetonböschung im Folgenden als „glatte“ Böschung bezeichnet wird.

Abb. 12 zeigt die Asphaltbetonböschung unter Wellenbelastung; es ist in der Wellenaufzunge deutlich der hohe Luftanteil zu erkennen.

Bei den Auswertungen der Wellenaufläufe wird nach Abschnitt 3 und Abb. 9 durchweg der Wert z_{98} als der Wert, der von nur 2 % der Wellenaufläufe überschritten wird, verwendet; ebenso wurde nach Abschnitt 3 als Wellenhöhe die Wellenhöhe H_s der erzeugten Welle verwendet, für die bei den regulären Wellen die Näherungsbeziehung $H \sim H_s \sim H_{50} \sim H_m$ gilt (vgl. Abschnitt 3); diese gemessene Wellenhöhe wird im Folgenden vereinfacht mit H bezeichnet.



Abb. 12: Asphaltbetonböschung mit $\tan \alpha = 1 : 6$ unter Wellenbelastung

Die Versuchsergebnisse sind auf Abb. 13 und 14 den Ergebnissen der Formel von WASSING

$$z = 8 \cdot H \cdot \tan \alpha \quad \dots (1)$$

und auf Abb. 15 und 16 den Ergebnissen der Formel von HUNT

$$z = \sqrt{H \cdot L_o} \cdot \tan \alpha \quad \dots (3)$$

gegenübergestellt, wobei sie sowohl als Funktion der Iribarren-Zahl ζ (Abb. 13 und 15) als auch der Wellenperiode T (Abb. 14 und 16) dargestellt sind.

Das Verhältnis der Meßwerte z_{98} zum errechneten Wert $z_{WASSING}$ in Abhängigkeit von der Brecherkennzahl ζ zeigt nur im Bereich der ζ -Zahlen > 3 einen annähernd konstanten Wert, im unteren Bereich der ζ -Zahlen dagegen ergibt sich aus den Versuchswerten eine monoton ansteigende Funktion, die bereits bei ζ -Zahlen über 1 den Wert 1, also den rechnerischen Wert nach der Formel von WASSING, überschreitet (Abb. 13). Auffällig ist dabei, daß der Bereich der monoton steigenden Funktion annähernd mit der Brecherform des Sturzbrechers, der

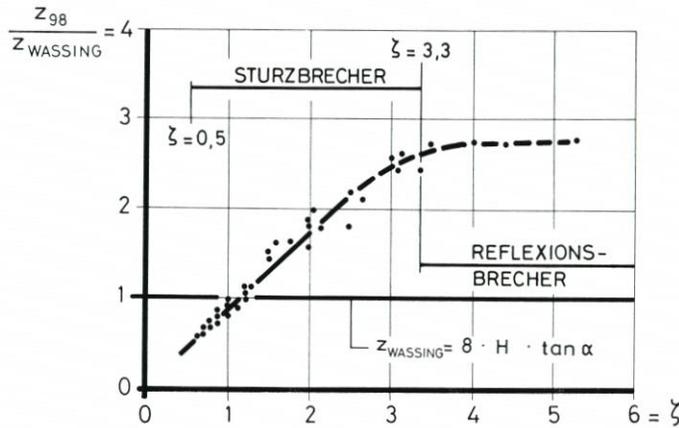


Abb. 13: Reguläre Wellen, Böschung glatt (=Asphaltbeton) mit $\tan \alpha = 1 : 6$: Verhältniswert $z_{98}/z_{WASSING}$ als Funktion der Iribarren-Zahl ζ

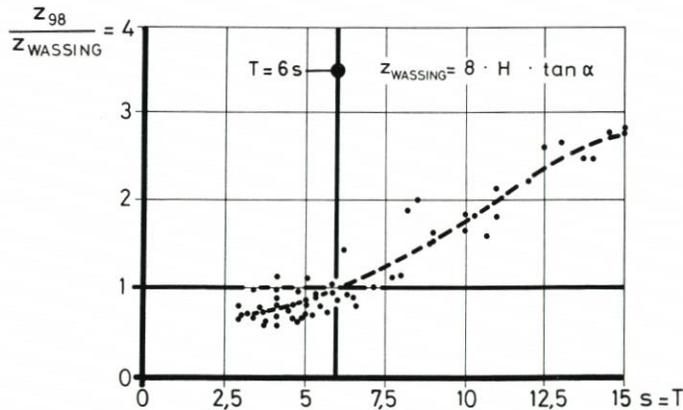


Abb. 14: Reguläre Wellen, Böschung glatt (= Asphaltbeton) mit $\tan \alpha = 1 : 6$: Verhältniswert $z_{98}/z_{WASSING}$ als Funktion der Wellenperiode T

Bereich der nahezu konstanten Werte mit der des Reflexionsbrechers übereinstimmt (Abb. 13). Diese starke Abhängigkeit der Funktion $z_{98}/z_{WASSING}$ von der Brecherkennzahl ζ ist durch die Vernachlässigung der Wellenperiode T in der Formel von WASSING bedingt.

Dies wird durch die Auftragung der Werte $z_{98}/z_{WASSING}$ über die Wellenperiode T bestätigt, wo sich eine ebenfalls monoton steigende Funktion ergibt (Abb. 14). Auffällig ist hier aber, daß im Bereich der Wellenperioden unter rd. $T = 6$ s die Werte fast sämtlich – mit einer gewissen Streuung – unter dem Wert $z_{98}/z_{WASSING} = 1$ liegen, so daß also für die Wellenperiode $T < 6$ s die Formel von WASSING fast durchweg auf der sicheren Seite liegt und annähernd die obere Grenze des Streubereiches der Meßwerte wiedergibt; hierauf wird noch im Zusammenhang mit den Versuchsergebnissen für die Böschungseignung $\tan \alpha = 1:4$ eingegangen.

Im Gegensatz zu der Funktion $z_{98}/z_{WASSING}$ auf Abb. 13 zeigen die Werte z_{98}/z_{HUNT} als $f(\zeta)$ auf Abb. 15 eine wesentlich geringere Abhängigkeit von ζ ; die Funktion fällt von einem Mittelwert um 1,25 für $\zeta \leq 1$ monoton auf Werte unter 1 bei etwa $\zeta = 3,5$ bis etwa 0,7 bei $\zeta \approx 5,3$. Hieraus geht hervor, daß, wenn der gesamte Wertebereich von $0,6 \leq \zeta \leq 5,3$ betrachtet

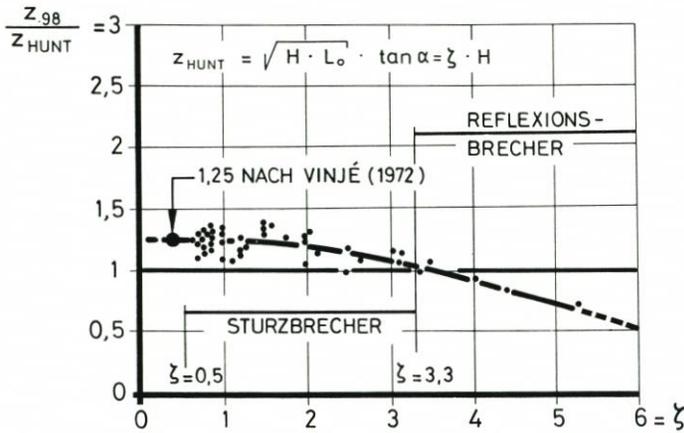


Abb. 15: Reguläre Wellen, Böschung glatt (= Asphaltbeton) mit $\tan \alpha = 1:6$: Verhältniswert z_{98}/z_{HUNT} als Funktion der Iribarren-Zahl ζ

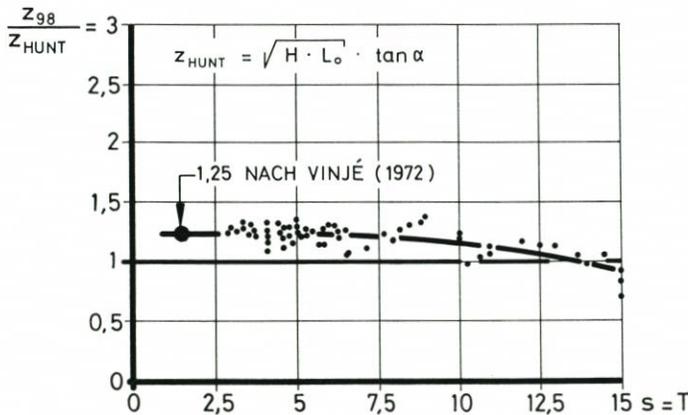


Abb. 16: Reguläre Wellen, Böschung glatt (= Asphaltbeton) mit $\tan \alpha = 1:6$: Verhältniswert z_{98}/z_{HUNT} als Funktion der Wellenperiode T

wird, die Formel von HUNT eine bessere Näherung als die Formel von WASSING darstellt; im Bereich der kleinen ζ -Werte fällt dagegen eine starke Streuung (zwischen 1,1 und 1,4 im Bereich $0,6 \leq \zeta \leq 2$) auf; hier liegen die Ergebnisse der Formel von HUNT auf der unsicheren Seite (niedriger als die Meßwerte). Aus Abb. 15 geht weiterhin hervor, daß die Korrektur von VINJÉ (1972) mit einem Faktor 1,25

$$z_{98} = 1,25 \cdot \sqrt{H \cdot L_0} \cdot \tan \alpha$$

gegenüber der ursprünglichen Formel von HUNT (1959)

$$z = \sqrt{H \cdot L_0} \cdot \tan \alpha$$

auch bei Wellen im Naturmaßstab eine gute Näherung für das Verhalten des Wellenauflaufes im Bereich der kleinen ζ -Zahlen darstellt. Die Funktion z_{98}/z_{HUNT} bleibt im Bereich des Sturzbrechers oberhalb des Wertes 1, um im Bereich des Reflexionsbrechers stärker zu fallen; dies ist auf die Zunahme der Reflexionsenergie in diesem Bereich zurückzuführen (TAUTENHAIN, 1981, vgl. auch Abschnitt 6).

Einen ähnlichen Verlauf wie in der Abhängigkeit von der Zahl ζ zeigt auch die Funktion z_{98}/z_{HUNT} von der Wellenperiode T (Abb. 16). Die fallende Tendenz mit zunehmender Wellenperiode weist darauf hin, daß die in der Formel von HUNT geforderte lineare Abhängigkeit der Auflaufhöhe von der Wellenperiode nicht streng erfüllt ist, die gemessenen Werte zeigen eine Abhängigkeit von der Wellenperiode mit einer Potenz < 1 .

Von Interesse ist eine Gegenüberstellung dieser Versuchsergebnisse mit denen einer Asphaltbetonböschung der Neigung $\tan \alpha = 1:4$, die ebenfalls im Grossen Wellenkanal untersucht wurde (FÜHRBÖTER, 1986); hier liegen allerdings nur Werte im Bereich der kleinen ζ -Werte vor, wie sie bei Sturmfluten an der Nord- und Ostseeküste vorkommen. Es geht aus Abb. 17 oben hervor, daß auch hier die Meßwerte $z_{98}/z_{WASSING}$ durchweg unter dem

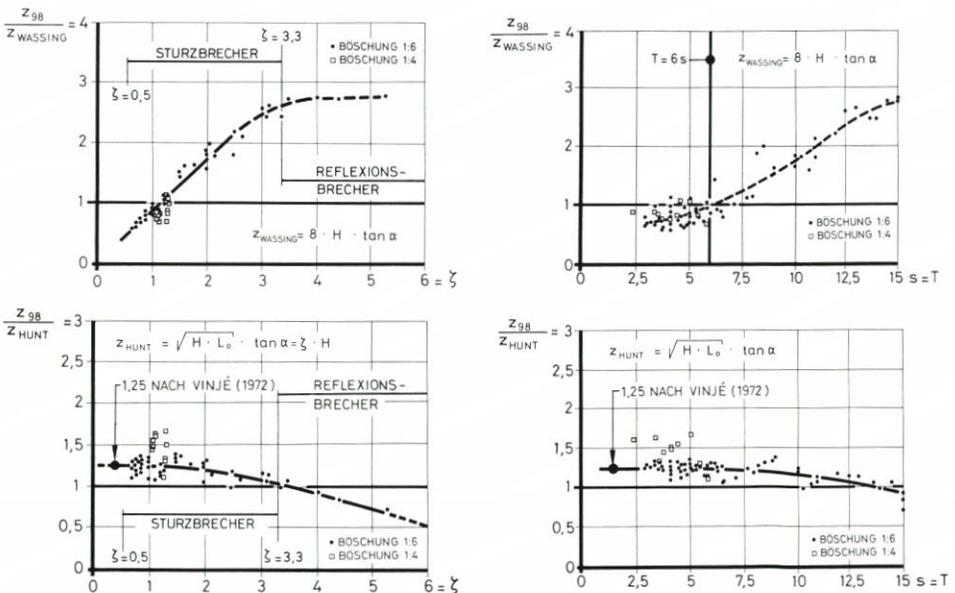


Abb. 17: Reguläre Wellen, Böschung glatt (= Asphaltbeton) mit $\tan \alpha = 1:6$: Gegenüberstellung der gemessenen Wellenauflaufwerte z_{98} bei der Versuchsböschung $\tan \alpha = 1:6$ mit den Werten bei der Versuchsböschung $\tan \alpha = 1:4$

Wert 1 liegen, so daß auch hier die Formel von WASSING zur sicheren Seite hin den oberen Grenzwert des Streubereiches liefert; dagegen zeigen die Auftragungen der Werte z_{98}/z_{HUNT} sowohl über der I r i b a r r e n - Zahl ζ als auch über der Wellenperiode T, daß die Meßwerte für $\tan \alpha = 1:4$ hier noch deutlich über denen der Böschungsneigung $\tan \alpha = 1:6$ liegen; dies bedeutet, daß die einfache Reziproktfunktion z prop $\tan \alpha$ oder z prop $1:n$ hier nicht mehr streng erfüllt wird; hiermit werden Ergebnisse niederländischer Modellversuche bestätigt (SCHIJF, 1974, vgl. Abschnitt 6).

Auf Abb. 18 ist noch einmal hervorgehoben, daß im Bereich der Wellenperioden unter $T = 6$ s die Formel von WASSING fast immer Werte liefert, die an der oberen Grenze des Streubereiches sowohl der Meßwerte für $\tan \alpha = 1:4$ als auch $\tan \alpha = 1:6$ und damit auf der sicheren Seite liegen, während die Formel nach HUNT, auch mit der Korrektur von VINJÉ (1972), hier zu kleine Werte liefert. Die Anwendung der Formel von WASSING hat also in diesem Bereich eine gewisse Berechtigung (vgl. FÜHRBÖTER, 1986 und Abschnitt 6).

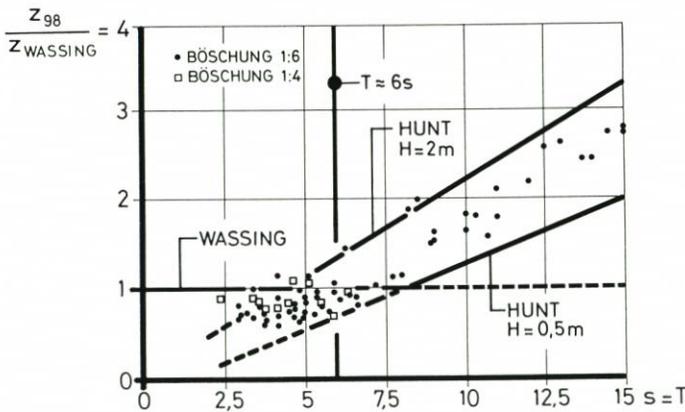


Abb. 18: Reguläre Wellen, Böschung glatt (= Asphaltbeton) mit $\tan \alpha = 1:6$: Gegenüberstellung der Wellenauflaufhöhen z_{98} bei den Böschungsneigungen 1:6 und 1:4 in Abhängigkeit von der Wellenperiode T im Vergleich zu den Ergebnissen der Formeln von WASSING und HUNT

Es wurde bereits erwähnt, daß auch bei einer Folge streng regulärer Wellen eine gewisse Streuung in den Auflaufhöhen vorhanden ist, die durch Zufallsprozesse beim Brechen der Wellen und insbesondere bei der damit verbundenen Luftaufnahme bedingt sind; als ein anschauliches Maß für die Streuung kann der Wert z_{98}/z_{50} angesehen werden (vgl. die Auswertung der Wahrscheinlichkeitsfunktion für die Wellenauflaufhöhen auf Abb. 9). Dieses Streumaß ist auf Abb. 19 in Abhängigkeit von der I r i b a r r e n - Zahl ζ aufgetragen und zeigt im Bereich der ζ -Werte oberhalb $\zeta=3$ ein nahezu konstantes Verhalten mit dem Mittelwert $z_{98}/z_{50} = 1,05 \pm 0,02$; diese verhältnismäßig geringe Streuung gehört in den Bereich des Reflexionsbrechers, wo die stochastischen Vorgänge gegenüber den deterministischen zurücktreten. Dagegen erhöht sich im Bereich des Sturzbrechers das Streumaß auf Werte bis 1,3 bei ζ -Zahlen unter 1, wobei zugleich das Streumaß selbst eine stärkere Streuung annimmt; dieses deutet auf die Zunahme der Stärke der Zufallsprozesse hin, ein Vorgang, der durch den visuellen (und auch akustischen) Eindruck dieser Brecherformen bestätigt wird.

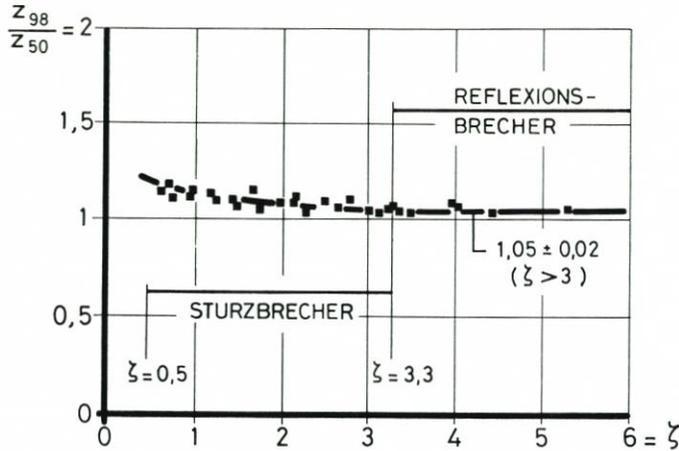


Abb. 19: Reguläre Wellen, Böschung glatt (= Asphaltbeton) mit $\tan \alpha = 1:6$; Streumaß z_{98}/z_{50} in Abhängigkeit von der Iribarren-Zahl ζ

4.2 Böschung mit Grasrauheit

Bei verkleinerten Versuchsmodellen ist es sehr schwierig, die Rauheit einer natürlichen Grasnarbe in einem verkleinerten Modell naturgerecht zu simulieren; hinzu kommen noch die hier besonders wirksamen Maßstabeffekte. Da aber die Frage von großer Wichtigkeit ist, wieweit sich ein Deich mit Grasnarbe („Grüner Deich“) in seinem Wellenauflaufverhalten von einem nahezu glatten Deich (Beton oder Asphaltbeton) unterscheidet und weil im Schrifttum hierüber widersprüchliche Angaben vorliegen, wurde in einer besonderen Versuchsreihe die Böschung mit einer Grasrauheit versehen. Aus verschiedenen und naheliegenden Gründen konnte hierzu eine natürliche Grasnarbe nicht verwendet werden; es mußte deshalb auf einen handelsüblichen Kunstrasen zurückgegriffen werden, der nach seiner Struktur und Steifigkeit etwa einem natürlichen, durch Beweidung (Schafe) kurzgeschorenen Deichbewuchs entspricht. Die Wahl fiel auf einen Kunstrasen mit einer mittleren Halmlänge von 28 mm, dessen weitere Daten aus Abb. 20 hervorgehen; es wurde dabei bewußt die Halmlänge eher zu lang als zu kurz gegenüber der Natur (wo ohnehin nur Mittelwerte vorhanden sind) gewählt.

Abb. 21 zeigt die mit Kunstrasen bedeckte Böschung mit Brecher und Wellenauflauf; ein wesentlicher äußerer Unterschied gegenüber der glatten Böschung kann nicht festgestellt werden.

Die Ergebnisse gegenüber der glatten Böschung (= Asphaltbeton) gehen aus der Auftragung z_{98}/z_{HUNT} als $f(\zeta)$ auf Abb. 22 hervor, die zwar deutlich zeigt, daß die Wellenauflaufhöhen bei allen ζ -Zahlen niedriger als bei der glatten Böschung liegen, aber zugleich auch darauf hinweist, daß die Wirkung der Grasrauheit in Grenzen bleibt. Dies wird durch die Bildung des bekannten Reduktionsfaktors r

$$\text{Reduktionsfaktor } r = \frac{z_{98}(\text{Gras})}{z_{98}(\text{glatt})}$$

bestätigt, der ebenfalls in der Abhängigkeit von ζ auf Abb. 23 aufgetragen ist. Eine systematische Abhängigkeit der r -Werte von der Kennzahl ζ ist dabei nicht feststellbar, sie können daher durch den

SCHNITT A-A

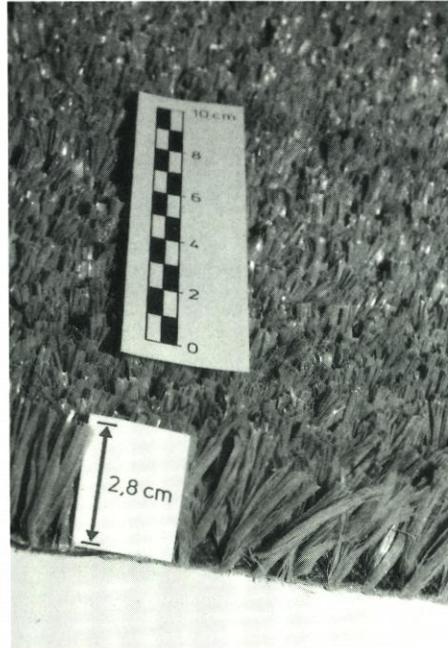
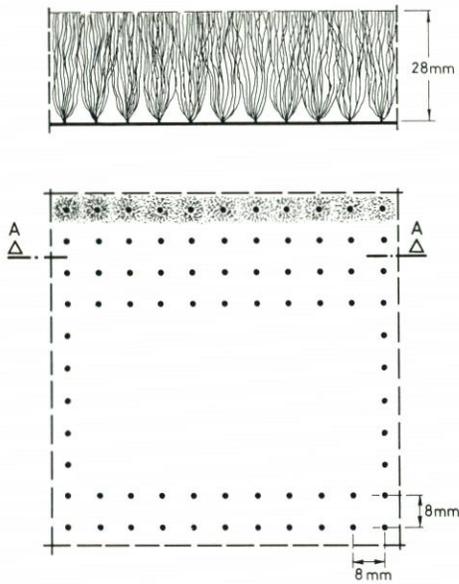


Abb. 20: Rauheit aus Kunstgras $h_g = 28 \text{ mm}$

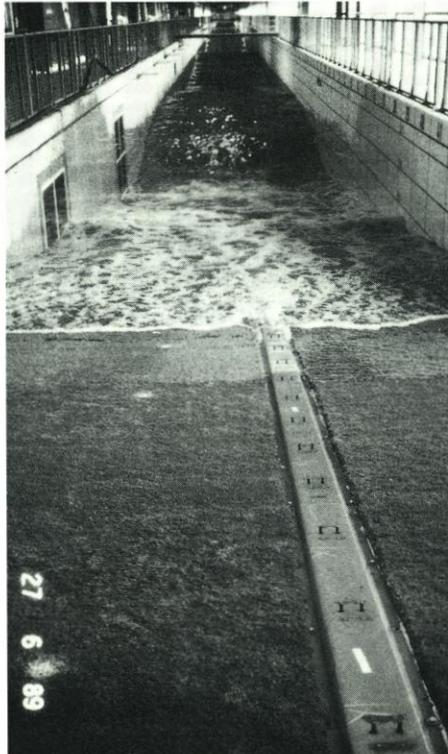


Abb. 21: Böschung $\tan \alpha = 1:6$ mit Kunstgras unter Wellenbelastung

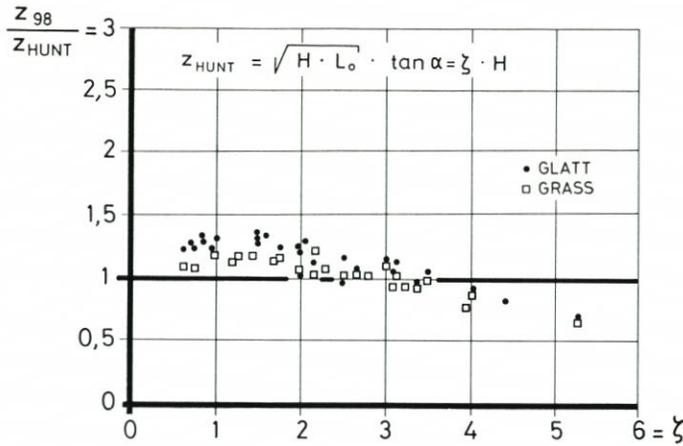


Abb. 22: Reguläre Wellen, Böschungsneigung $\tan \alpha = 1:6$: Wirkung der Grasrauheit: Gegenüberstellung der Verhältniszerte z_{98}/z_{HUNT} als Funktion der Iribarren-Zahl ζ bei glatter und bei grasrauer Böschung

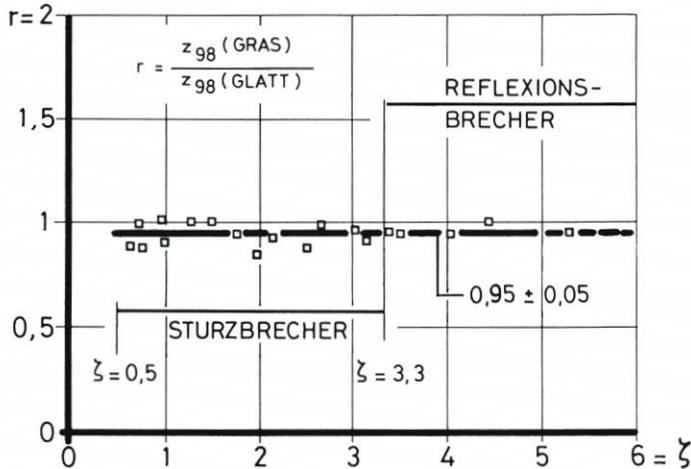


Abb. 23: Reguläre Wellen, Böschungsneigung $\tan \alpha = 1:6$: Reduktionsfaktor $r = z_{98}(\text{Gras})/z_{98}(\text{glatt})$ in Abhängigkeit von der Iribarren-Zahl ζ

Mittelwert $r = 0,95 \pm 0,05$

mit 0,05 als Standardabweichung genähert werden.

Bereits bei SCHIFF (1974) war geäußert worden, daß sich eine durch Beweidung kurzgeschorene Grasnarbe in ihrem hydromechanischen Verhalten nicht wesentlich von der einer glatten Beton- oder Asphaltbetonböschung unterscheiden wird; dies wird durch die hier vorgelegten Versuchsergebnisse für einen großen Bereich der Brecherkennzahlen bestätigt; mit $r = 0,95 \pm 0,05$ schließt die obere Grenze der Streuung unmittelbar an den Wert $r = 1$ entsprechend der glatten Böschung an. Dieser Versuch zeigt zugleich, daß weitere Versuche mit kürzerer Halmlänge unnötig sind, weil der r -Wert hier nur noch näher an $r = 1$ heranrücken würde; aber auch bei längeren Halmlängen sind keine wesentlichen Veränderun-

gen der Wellenauflaufhöhen zu erwarten. Mit Rücksicht auf diese Streuungen nach Abb. 23 kann für die Praxis gefolgert werden, daß die Wellenauflaufwerte für eine glatte Böschung ebenso – mit einer gewissen Sicherheit nach Abb. 23 – für eine grasraue Böschung verwendet werden können; betont werden muß, daß dieses nur für eine Wellenbelastung gilt, die vorwiegend durch reguläre Wellen beschrieben werden kann (vgl. Abschnitt 5).

Auf Abb. 24 ist das Streumaß z_{98}/z_{50} als $f(\zeta)$ aufgetragen; die Meßwerte folgen einer Funktion, die mit der für die glatte Böschung auf Abb. 19 nahezu übereinstimmt; der Mittelwert für die ζ -Werte > 3 (Reflexionsbrecher) liegt hier bei $z_{98}/z_{50} = 1,04 \pm 0,02$ und ist damit mit dem für eine glatte Böschung (1,05 nach Abb. 19) nahezu identisch.

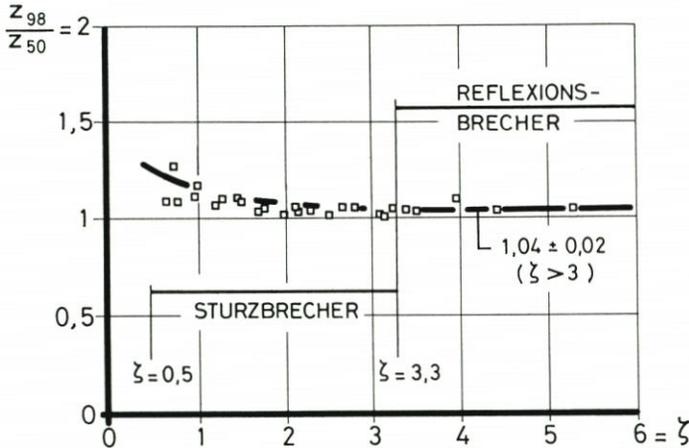


Abb. 24: Reguläre Wellen, Grasböschung mit $\tan \alpha = 1:6$; Streumaß z_{98}/z_{50} in Abhängigkeit von der Iribarren-Zahl ζ

4.3 Böschung mit Betonblöcken

Mit Rücksicht auf die beschränkte zeitliche Verfügbarkeit des Grossen Wellenkanals konnten die Versuche mit künstlichen Rauheiten mit nur einer Rauheit aus Betonblöcken durchgeführt werden, deren Abmessungen und Anordnungen aus Abb. 25 hervorgehen; diese Blöcke wurden unmittelbar auf die Asphaltbetonböschung (Abb. 11 und 12) aufgeklebt. Die Wahl der Höhe der Blöcke mit $b = 14$ cm folgt aus den Modellversuchen (Wellen bis zu 30 cm Höhe) von FRANZIUS (1965), nach denen Blockhöhen von mehr als $0,1 H$ keine wesentlichen Verminderungen der Wellenauflaufhöhen ergeben; der gegenseitige Kantenabstand von $4 a$ ($a =$ Blocklänge und -breite = 16 cm) liegt im Optimalbereich nach Jelgershuis Swildens (bei SCHIJF, 1974); es handelt sich um Blockgrößen und -anordnungen, wie sie mit ähnlichen Abmessungen vielfach an Deckwerken und Deichen der deutschen Nord- und Ostseeküste anzutreffen sind. Die Blöcke wurden auf der Versuchsböschung nur oberhalb des Ruhewasserspiegels eingebaut (vgl. FRANZIUS, 1965).

Abb. 26 zeigt diese Böschung mit brechenden und auflaufenden Wellen. Sowohl beim Wellenauflauf als auch besonders beim Wellenablauf konnte ein deutlicher Unterschied gegenüber den beiden Böschungen mit Asphaltbeton und Kunstgras festgestellt werden, weil die Schwallbewegungen hier deutlich mit Spritzeffekten und augenblicklichem Wechsel

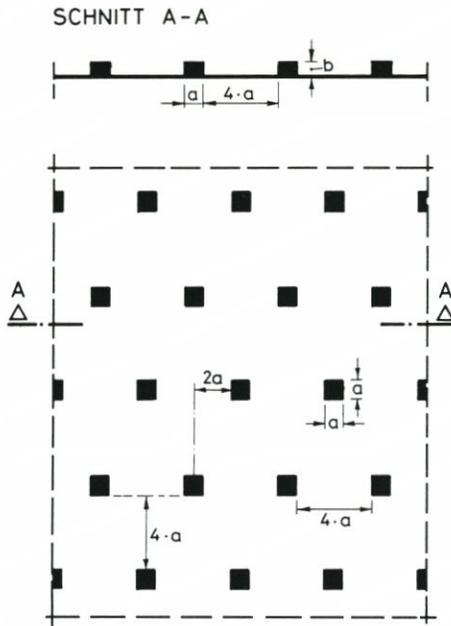


Abb. 25: Rauheit aus Betonblöcken (Kantenlänge $a = 16$ cm, Höhe $b = 14$ cm, Kantenabstand $4 a = 64$ cm)



Abb. 26: Böschung $\tan \alpha = 1 : 6$ mit Betonblöcken unter Wellenbelastung

zwischen Strömen und Schießen durch die Blöcke gestört wurden (Detail beim Wellenablauf siehe Abb. 26 oben).

Trotz dieser deutlichen optischen Unterschiede ist die Wirkung dieser Blockrauheit nur als mäßig zu bezeichnen, wie Abb. 27 (z_{98}/z_{HUNT} als $f(\zeta)$ für glatte und blockraue Böschung) und insbesondere Abb. 28 zeigen, wo der Reduktionsfaktor r hier als $z_{98}(\text{Betonblöcke})/z_{98}(\text{glatt})$ über die Iribarren-Zahl ζ aufgetragen ist. Es zeichnet sich hier zwar eine leichte Abnahme des Reduktionsfaktors bei größeren ζ -Zahlen ab, was bei dem hier vorherrschenden Reflexionsbrecher durch die Zunahme der Reibungslänge verständlich ist; dennoch können auch hier alle ζ -Werte mit genügender Genauigkeit die Meßergebnisse durch einen Mittelwert

$$r = 0,88 \pm 0,06$$

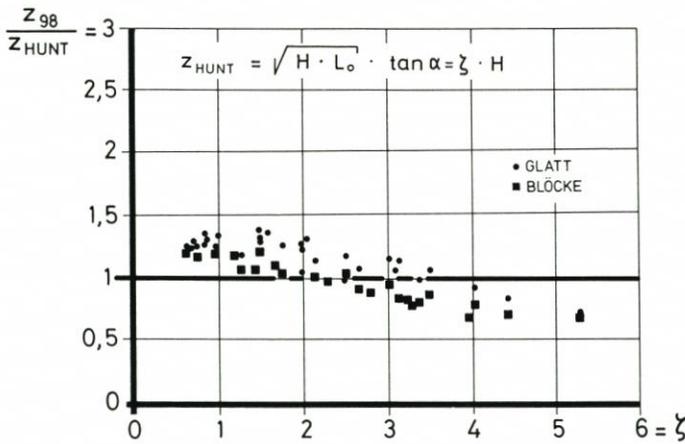


Abb. 27: Reguläre Wellen, Böschungsneigung $\tan \alpha = 1:6$: Wirkung der Betonblöcke: Gegenüberstellung der Verhältniszerte z_{98}/z_{HUNT} als Funktion der Iribarren-Zahl ζ bei glatter Böschung und bei der Böschung mit Betonblöcken

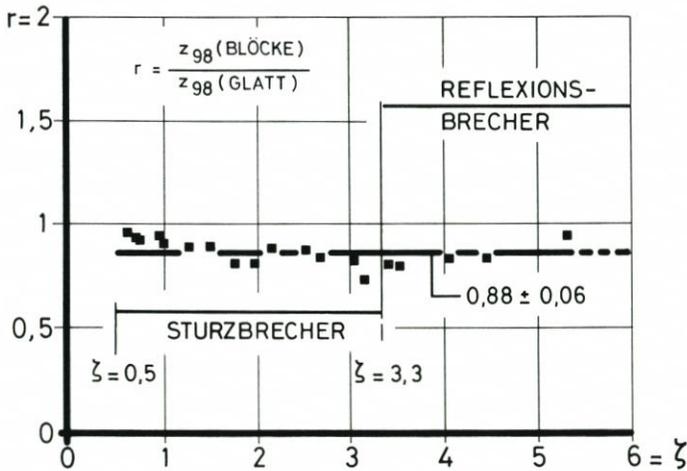


Abb. 28: Reguläre Wellen, Böschungsneigung $\tan \alpha = 1:6$: Reduktionsfaktor $r = z_{98}(\text{Betonblöcke})/z_{98}(\text{glatt})$ in Abhängigkeit von der Iribarren-Zahl ζ

genähert werden, was einer mittleren Abnahme der Wellenauflaufhöhen in einer Größenordnung von nur rd. 10 % entspricht.

Wie Abb. 29 zeigt, verhält sich auch das Streumaß z_{98}/z_{50} in seiner Abhängigkeit von den ζ -Werten sowohl qualitativ als auch quantitativ nicht anders als bei glatter (Abb. 19) oder grasrauer Böschung (Abb. 24), der Mittelwert für $\zeta > 3$ liegt hier bei $z_{98}/z_{50} = 1,05 \pm 0,02$ (Abb. 29).

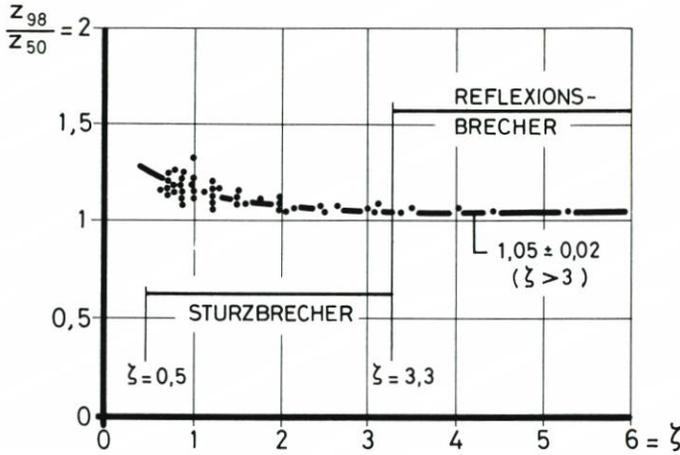


Abb. 29: Reguläre Wellen, Böschung $\tan \alpha = 1:6$ mit Betonblöcken: Streumaß z_{98}/z_{50} in Abhängigkeit von der Iribarren-Zahl ζ

4.4 Wirkung der Rauheiten bei regulären Wellen

In Gegenüberstellung zu Abb. 9 sind auf Abb. 30 für eine Versuchsreihe ($H = 1,15 \text{ m}$, $T = 11,0 \text{ s}$, $\zeta = 2,14$) die Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Wellenauflaufhöhen bei den drei verschiedenen Böschungsrauheiten der erzeugten Welle gegenübergestellt. Es geht aus Abb. 30 hervor, daß im ganzen Bereich der Wahrscheinlichkeiten – mit einzelnen Abweichungen –

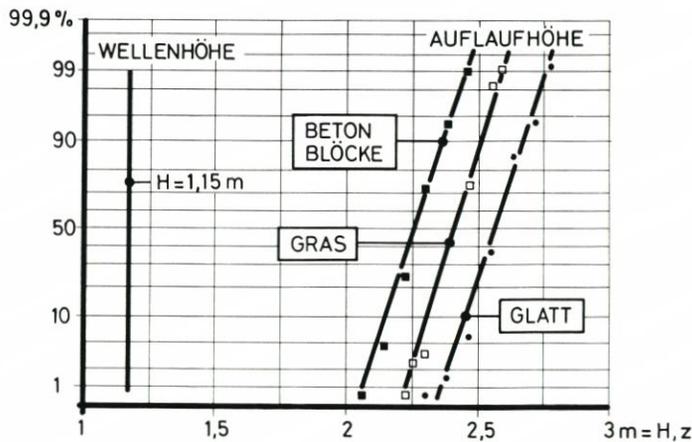


Abb. 30: Reguläre Wellen, Böschungsneigung $\tan \alpha = 1:6$: Gegenüberstellung der Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Wellenaufläufe z bei glatter Böschung (= Asphaltbeton), grasrauer Böschung und bei der Böschung mit Betonblöcken (links: Erzeugte Wellenhöhen)

überall die Wirkung der Rauheiten annähernd gleichmäßig ist; auch im Bereich der seltenen Ereignisse (in dem z_{98} liegt) ist die Wirkung der Rauheit von ungefähr gleicher Größe wie im übrigen Bereich.

Abb. 31 zeigt noch einmal zusammenfassend (vgl. Abb. 23 und Abb. 28) die Abhängigkeit der Reduktionsfaktoren r von der Brecherkennzahl ζ (Abb. 31 oben) und von der Wellenperiode T (Abb. 31 unten); wie bereits erwähnt, können die Reduktionsfaktoren im

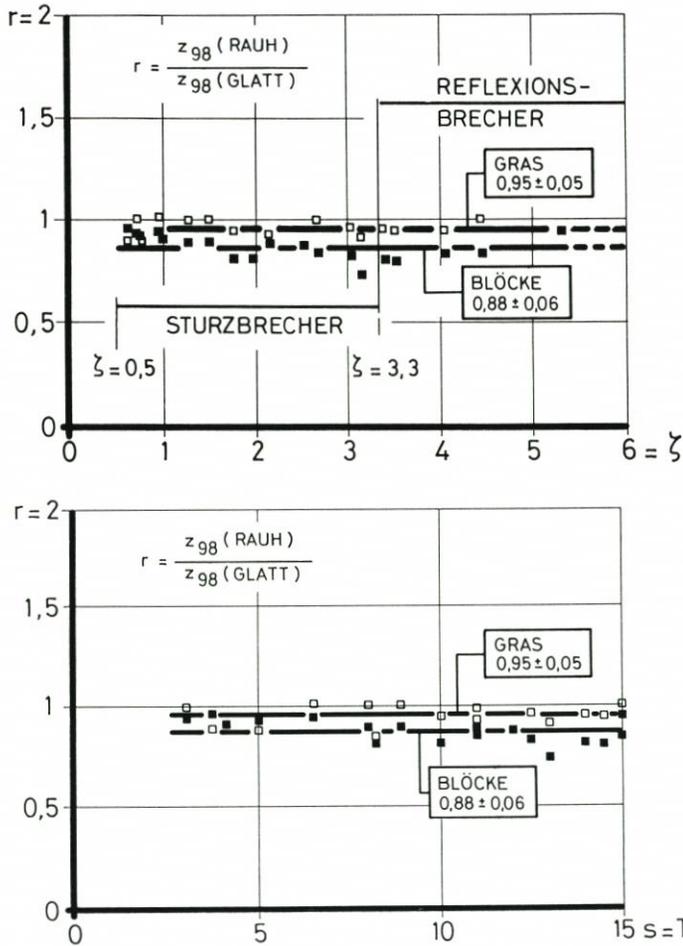


Abb. 31: Reguläre Wellen, Böschungsneigung $\tan \alpha = 1 : 6$: Gegenüberstellung der Reduktionsfaktoren r bei grasrauer Böschung und bei der Böschung mit Betonblöcken (oben: r als $f(\zeta)$, unten: r als $f(T)$)

Bereich der untersuchten ζ -Werte als annähernd konstant bewertet werden; nur bei genauerer Hinsicht kann bei den Betonblöcken eine leichte Zunahme des Reduktionsfaktors r mit der Wellenperiode bemerkt werden. Dabei bleiben die Streumaße z_{98}/z_{50} bei allen drei Rauheiten annähernd gleich in ihrer Abhängigkeit von der Brecherkennzahl, wie es zusammenfassend (aus Abb. 19, 24 und 29) Abb. 32 zeigt; im Sturzbrecherbereich ist eine gewisse Zunahme festzustellen, während im Bereich der Reflexionsbrecher die Werte asymptotisch auf einen konstanten Wert um 1,05 fallen.

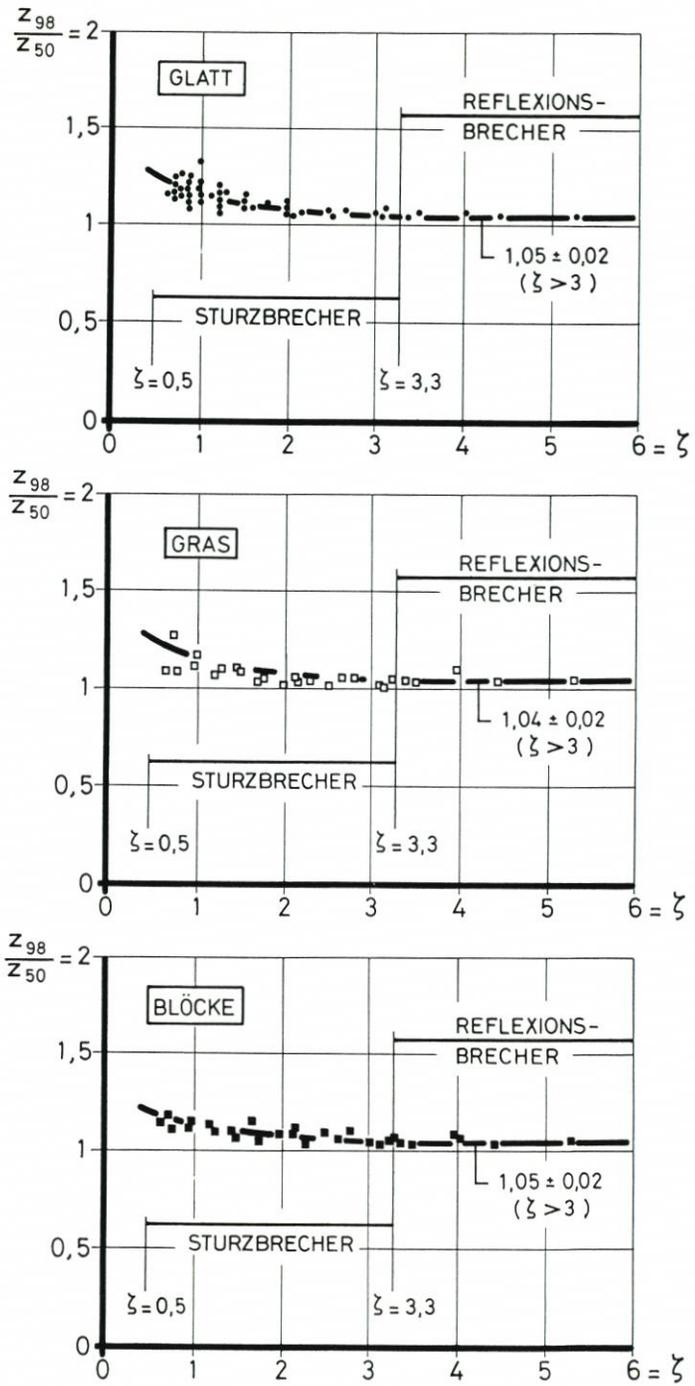


Abb. 32: Reguläre Wellen, Böschungsneigung $\tan \alpha = 1 : 6$: Gegenüberstellung der Streumaße z_{98}/z_{50} in Abhängigkeit von der Iribarren-Zahl ζ
 oben: Glatte Böschung (Asphaltbeton nach Abb. 11). Mitte: Grasböschung (Kunstgras nach Abb. 20). Unten: Böschung mit Betonblöcken nach Abb. 25

5. Versuchsergebnisse für Wellenspektren

5.1 Erzeugung und Auswertung der Wellenspektren

Für eine erste Untersuchung des Einflusses der spektralen Eigenschaften des natürlichen Seeganges auf den Wellenaufbau wurden aus der Vielzahl der bekannten theoretischen Wellenspektren Pierson-Moskowitz-Spektren verwendet. Die der Steuerung der Wellenmaschine zugrunde liegende Energiedichtefunktion in dimensionsloser Form

$$S/S_{\max} = f(\omega/\omega_p)$$

mit S = Energiedichte in $m^2 \cdot s$
 ω = Frequenz in $1/s$
 ω_p = Peakfrequenz ($\omega_p = 1/T_p$)
 mit T_p = Peakperiode

ist auf Abb. 33 eingetragen. Die große Anzahl natürlicher Seegangsspektren im Küstenvorfeld (vgl. z. B. NIEMEYER, 1985) kann nur idealisiert wiedergegeben werden.

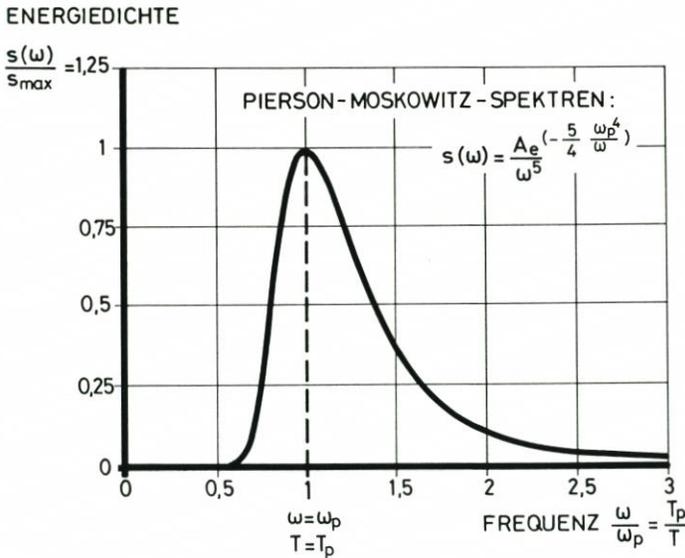


Abb. 33: Pierson-Moskowitz-Spektren, Böschung $\tan \alpha = 1:6$

Als Wellenparameter werden, wie bei den regulären Wellen, die Parameter der erzeugten Maschinenwelle verwendet. Die Iribarren-Zahl ζ_p wird dabei aus der Peakperiode T_p und der zugehörigen signifikanten Wellenhöhe H_s berechnet. Bei Peakperioden von $T_p = 5$ s bis $T_p = 10$ s wurden an der 1:6 geneigten Deichböschung durch die entsprechende Wahl von H_s Iribarren-Zahlen von $\zeta_p = 1$ bis $\zeta_p = 2,5$ untersucht.

Das Verhältnis der erzeugten Wellenhöhen H_s und der aus der Zeitreihe ermittelten signifikanten Wellenhöhe H_{sF} am Deichfuß beträgt für die untersuchten 11 Pierson-Moskowitz-Spektren:

$$H_s/H_{sF} = 1,02 \pm 0,03$$

und liegt damit in dem Bereich des Verhältnisses von H/H_F bei regulären Wellen (vgl. Abb. 10 oben).

Die Wellenauflaufhöhen z wurden, wie in Abschnitt 3 beschrieben, auf der Grundlage des "trough to trough"-Verfahrens ermittelt. Anders als bei regulären Wellen ist bei Wellenspektren infolge der Überlagerung einzelner Wellenaufläufe die Zahl der Aufläufe im allgemeinen geringer als die Wellenzahl. Das Verhältnis aus der Anzahl der Aufläufe und der Anzahl der Wellen nimmt hierbei mit größer werdender *Iribarren*-Zahl ebenfalls zu (vgl. auch MASE, 1988).

Auf Abb. 34 ist ein Beispiel der Verteilung der Wellenhöhen am Deichfuß (links) und der Verteilung der Wellenaufläufe (rechts) für ein *Pierson-Moskowitz*-Spektrum mit $H_s = 1,2$ m und $T_p = 8,0$ s eingetragen (vgl. Abb. 9).

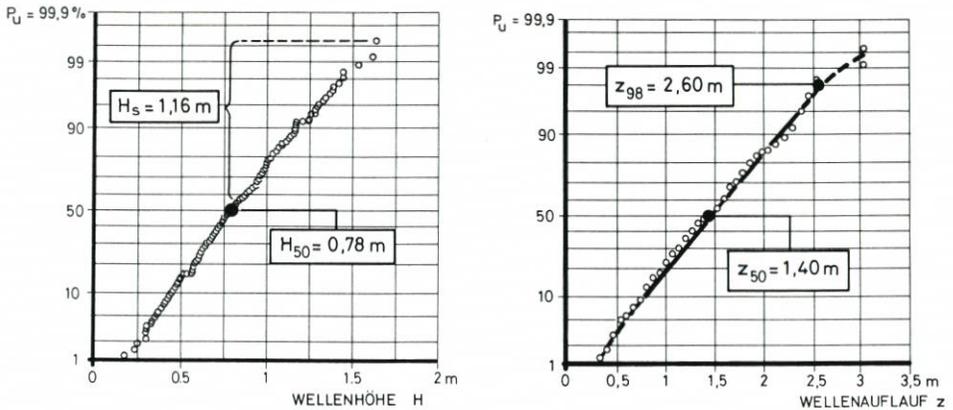


Abb. 34: *Pierson-Moskowitz*-Spektrum, Böschung $\tan \alpha = 1:6$: Auswertung von H_{50} und H_s sowie von z_{50} und z_{98}

5.2 Wellenspektren auf glatter Böschung

Entsprechend Abb. 13 bis 16 sind auf Abb. 35 bis 38 die gemessenen Wellenauflaufhöhen z_{98} der 11 Spektren denen der Werte bei regulären Wellen gegenübergestellt. Auf Abb. 35 ist $z_{98}/z_{WASSING}$ in Abhängigkeit von der *Iribarren*-Zahl ζ bzw. ζ_p auf Abb. 36 von der Wellenperiode T dargestellt, entsprechend zeigen Abb. 37 die Werte z_{98}/z_{HUNT} in Abhängigkeit von ζ bzw. ζ_p auf Abb. 38 diejenige von der Wellenperiode T . Wie es auch theoretisch begründet ist (vgl. z. B. BATTJES, 1971), liegen die Meßwerte der Spektren durchweg höher als die der regulären Wellen. Sehr deutlich geht aber dabei aus Abb. 37 und Abb. 38 hervor, daß mit zunehmenden ζ -Werten bzw. Wellenperioden diese Differenz deutlich abnimmt. Die größeren Abweichungen treten bei $\zeta_p \approx 1$ auf, wo der Meßwert das 1,7fache des nach HUNT berechneten Wertes annimmt (Abb. 37).

5.3 Vergleich mit der Gras- und der Betonblockböschung

Auf Abb. 39 sind für einen speziellen Versuch ($H_s = 0,75$ m, $T_p = 9,0$ s, $\zeta_p = 2,16$) die Wellenauflaufspektren wie auf Abb. 30 dem Spektrum der erzeugten Wellenhöhen gegenübergestellt. Die drei Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Wellenauflaufhöhen für die drei Rau-

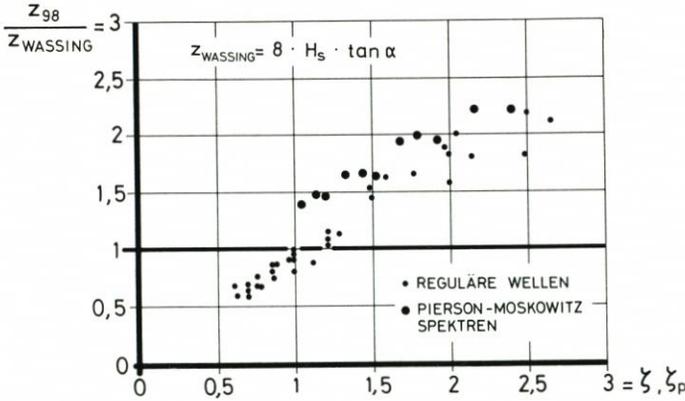


Abb. 35: Pierson-Moskowitz-Spektren, Böschung glatt (= Asphaltbeton) mit $\tan \alpha = 1:6$: Gegenüberstellung der Verhältniswerte $z_{98}/z_{WASSING}$ von Spektren und regulären Wellen; Abhängigkeit von der Iribarren-Zahl ζ bzw. ζ_p

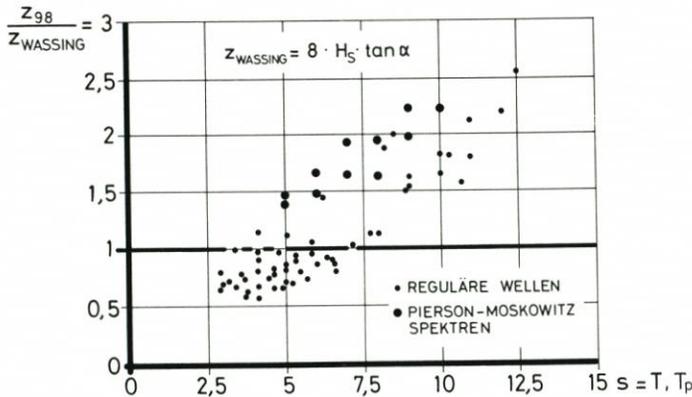


Abb. 36: Pierson-Moskowitz-Spektren, Böschung glatt (= Asphaltbeton) mit $\tan \alpha = 1:6$: Gegenüberstellung der Verhältniswerte $z_{98}/z_{WASSING}$ von Spektren und regulären Wellen; Abhängigkeit von der Wellenperiode T bzw. T_p

heiten zeigen hier gegenüber den regulären Wellen (vgl. Abb. 30) einen abweichenden Verlauf insofern, als hier die größten Unterschiede im Bereich der seltenen Ereignisse (oder kleinen Wahrscheinlichkeiten) auftreten, was sich stark auf den Bemessungswert z_{98} auswirkt.

In den folgenden Abb. 40 bis 43 sind die Meßwerte für die Böschungsrauheiten den rechnerischen Werten von WASSING (Abb. 40 und 41) und denen von HUNT (Abb. 42 und 43) einmal in Abhängigkeit von der Brecherkennzahl ζ_p und zum anderen von der Wellenperiode T_p dargestellt. Bei der Gegenüberstellung der Meßwerte mit den Formeln von WASSING ergeben sich dabei immer monoton steigende, bei der Gegenüberstellung mit HUNT monoton fallende Kurven, wobei die Abhängigkeit bei HUNT nicht so stark wie bei WASSING ist. Auch hier können die Reduktionsfaktoren $z_{98}(\text{Gras})/z_{98}(\text{glatt})$ bzw. $z_{98}(\text{Betonblöcke})/z_{98}(\text{glatt})$ in Abhängigkeit von den ζ_p -Werten angegeben werden; sie sind als Funktion von ζ_p auf Abb. 44 aufgetragen. Wie bei den regulären Wellen ist hier ebenfalls keine systematische Abhängigkeit der Reduktionsfaktoren von der ζ -Zahl vorhanden; die Gegenüberstellung mit den entsprechenden r -Werten der regulären Wellen zeigt aber, daß hier bei den Wellenspektren eine

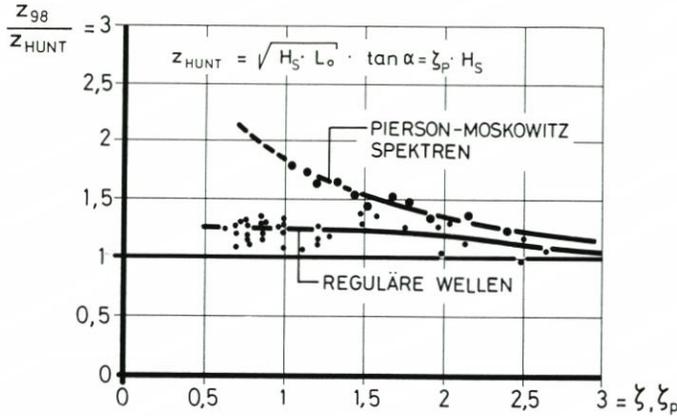


Abb. 37: Pierson-Moskowitz-Spektren, Böschung glatt (= Asphaltbeton) mit $\tan \alpha = 1:6$: Gegenüberstellung der Verhältnismerte z_{98}/z_{HUNT} von Spektren und regulären Wellen; Abhängigkeit von der Iribarren-Zahl ζ bzw. ζ_p

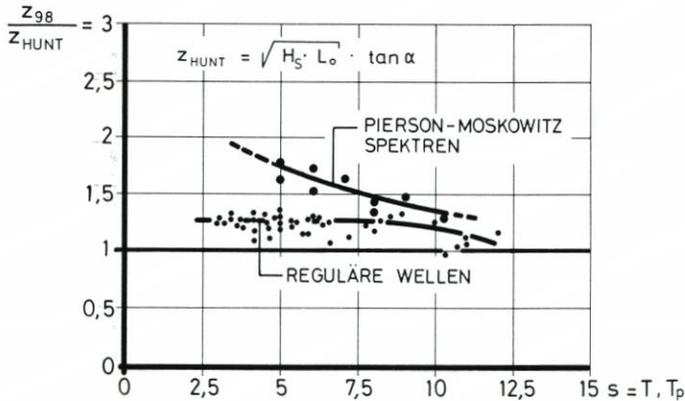


Abb. 38: Pierson-Moskowitz-Spektren, Böschung glatt (= Asphaltbeton) mit $\tan \alpha = 1:6$: Gegenüberstellung der Verhältnismerte z_{98}/z_{HUNT} ; Abhängigkeit von der Wellenperiode T bzw. t_p

wesentlich stärkere Wirkung der Rauheiten festgestellt werden kann (Gras $r = 0,95$ bei regulären Wellen gegen $0,87$ bei Wellenspektren, Betonblöcke $r = 0,88$ bei regulären Wellen gegen $0,75$ bei Spektren). Dies ist dadurch bedingt, daß, wie Abb. 39 zeigt, gerade im Bereich der hohen Wellenaufbauhöhen die Unterschiede der Aufbauhöhen am deutlichsten werden. Wie erwähnt, ist dieses auch physikalisch durchaus erklärbar: mit den Aufbauhöhen nehmen auch die Auflängungen auf der Böschung und damit die Reibungswirkungen der Rauheiten zu.

Auf Abb. 45 sind die Streumaße der drei Rauheiten bei den Spektren denen der regulären Wellen gegenübergestellt. Innerhalb der untersuchten ζ -Zahlen kann hier keine systematische Abhängigkeit der Streumaße z_{98}/z_{50} von der Brecherkennzahl ζ festgestellt werden; sie liegen bei der glatten Böschung um z_{98}/z_{50} ungefähr bei $1,90$, bei Gras bei etwa $1,65$ und bei den Betonblöcken um etwa $1,66$.

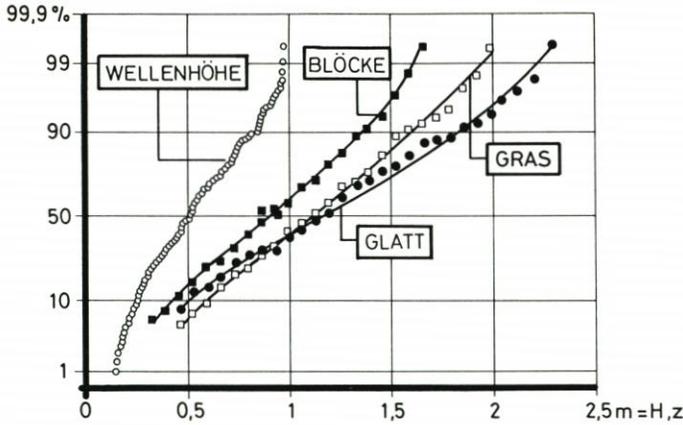


Abb. 39: Pierson-Moskowitz-Spektren, Böschungsneigung $\tan \alpha = 1:6$: Gegenüberstellung der Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Wellenaufläufe z bei glatter Böschung (= Asphaltbeton), grasrauer Böschung und der Böschung mit Betonblöcken (links: erzeugtes Wellenspektrum mit $H_s = 0,75$ m und $T_p = 9,0$ s)

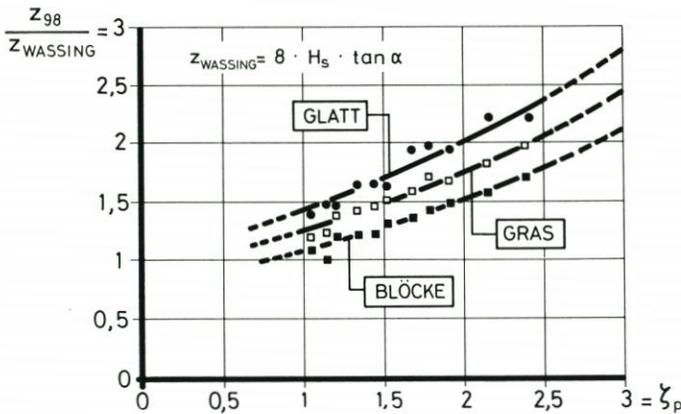


Abb. 40: Pierson-Moskowitz-Spektren, Böschungsneigung $\tan \alpha = 1:6$: Verhältniswerte $z_{98}/z_{WASSING}$ bei den drei Böschungsrauheiten (glatt, Gras und Betonblöcke); Abhängigkeit von der Iribarren-Zahl ζ_p

6. Schlußbemerkung und Ausblick

Die Maßstabeffekte bei verkleinerten Modellen, die bei flachen Böschungs- und insbesondere bei Strandneigungen bekannt sind (vgl. z.B. STIVE, 1985), konnten wie bei den Asphaltbetonböschungen mit der Neigung 1:4 (FÜHRBÖTER, 1986) auch hier bei der glatten Böschung mit $\tan \alpha = 1:6$ nicht festgestellt werden. Dies zeigt der Vergleich mit den umfangreichen Modelluntersuchungen von TAUTENHAIN (1981) auf Abb. 46; hier wurde entsprechend TAUTENHAIN (1981) die Welle am Deichfuß H_F für die Berechnung von z_{HUNT} und von $\zeta = \zeta_F$ verwendet (vgl. Abb. 10). Die Versuchsböschung von TAUTENHAIN bestand aus Aluminium und kann daher auch bei kleinen Wellenhöhen (5 bis 40 cm) als hydraulisch glatt angesehen werden; aus Abb. 46 geht im Konstanzbereich für $\zeta_F \leq 2$ eine nahezu

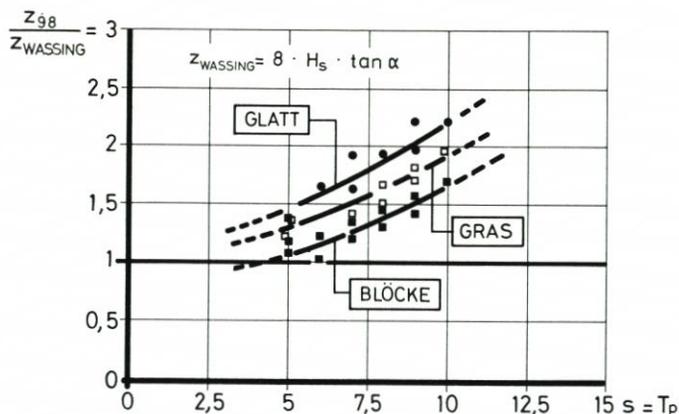


Abb. 41: Pierson-Moskowitz-Spektren, Böschungsneigung $\tan \alpha = 1:6$: Verhältniswerte $z_{98}/z_{WASSING}$ bei den drei Böschungsrauheiten (glatt, Gras und Betonblöcke); Abhängigkeit von der Wellenperiode T_p

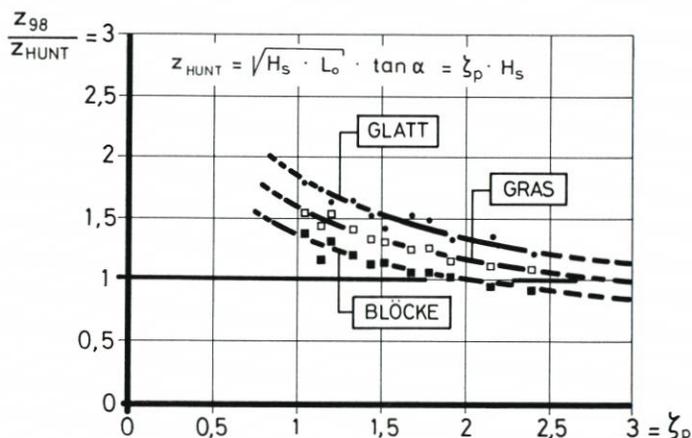


Abb. 42: Pierson-Moskowitz-Spektren, Böschungsneigung $\tan \alpha = 1:6$: Verhältniswerte z_{98}/z_{HUNT} bei den drei Böschungsrauheiten (glatt, Gras und Betonblöcke); Abhängigkeit von der Iribarren-Zahl ζ_p

vollständige Übereinstimmung der Mittelwerte für z_{98}/z_{HUNT} von 1,25 (GWK, vgl. auch VINJÉ, 1972) gegenüber dem Wert von 1,22 hervor, der sich bei TAUTENHAIN (1981) aus dem Wert 1,1 für z_{50} und dem Streumaß von z_{98}/z_{50} von 1,11 ergibt. Nur im Bereich größerer ζ_p -Zahlen liegen die Ergebnisse des GWK etwas niedriger; dies geht auch aus einer Gegenüberstellung der Werte von BRUUN und GÜNBAK (1977) mit denen von TAUTENHAIN (1981) hervor.

Für die Praxis bedeutet dies, daß für den Wellenauflauf bei glatten oder nahezu glatten Deichböschungen Modellversuche in nicht zu kleinem Maßstab (mit Wellenhöhen um 30 cm) durchaus verwendbare Ergebnisse liefern können (vgl. auch FÜHRBÖTER, 1986). Zu gleichen Ergebnissen kommt WITTE (1989) bei einem Vergleich der CERC-Empfehlungen (Shore Protection Manual 1984) mit den Ergebnissen für die glatte Böschung $\tan \alpha = 1:6$ (Abschnitt 4.1) des Grossen Wellenkanals.

Bei der Grasrauheit können Maßstabeffekte mangels vergleichbarer Modelluntersuchun-

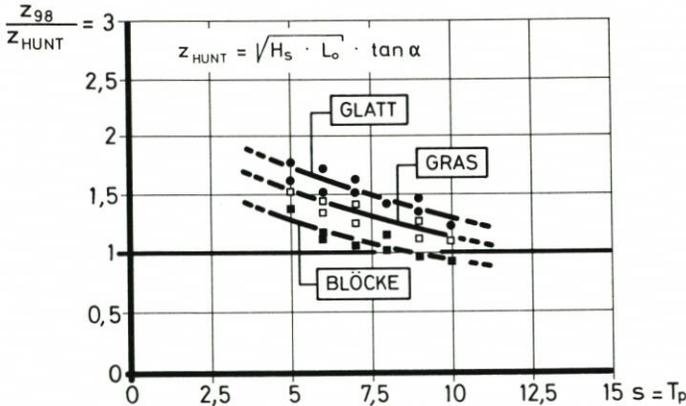


Abb. 43: Pierson-Moskowitz-Spektren, Böschungsneigung $\tan \alpha = 1:6$: Verhältniswerte z_{98}/z_{HUNT} bei den drei Böschungsrauheiten (glatt, Gras und Betonblöcke); Abhängigkeit von der Wellenperiode T_p

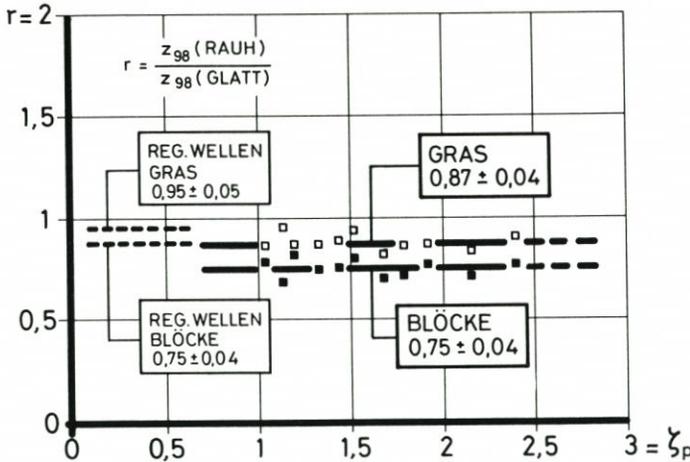


Abb. 44: Pierson-Moskowitz-Spektren, Böschungsneigung $\tan \alpha = 1:6$: Reduktionsfaktoren $r = z_{98}(\text{Gras})/z_{98}(\text{glatt})$ und $r = z_{98}(\text{Betonblöcke})/z_{98}(\text{glatt})$ als Funktion der Iribarren-Zahl ζ_p

gen nicht untersucht werden; bei den Betonblöcken hat es aber den Anschein, daß im Naturmaßstab bei regulären Wellen eine geringere Wirksamkeit als im verkleinerten Modell vorhanden ist, wie aus einem Vergleich mit den Modelluntersuchungen von FRANZIUS (1965) hervorgeht. Hier müssen noch eingehende weitere Untersuchungen über diese für die Praxis wichtige Fragen durchgeführt werden, die hier mitgeteilten Ergebnisse können daher nur als erster Schritt gewertet werden.

Immerhin kann allgemein festgestellt werden, daß die Wirksamkeit der Rauheiten bei Spektren durchweg größer als bei regulären Wellen ist, was durch die Abnahme der Reduktionsfaktoren auf Abb. 44 ausgedrückt ist (reguläre Wellen: $r(\text{Gras}) = 0,95$ und $r(\text{Betonblöcke}) = 0,88$, Spektren: $r(\text{Gras}) = 0,87$ und $r(\text{Betonblöcke}) = 0,75$).

Ein Vergleich mit der Neigung $\tan \alpha = 1:4$ ist nur für die glatte Böschung (=Asphaltbeton) im Bereich der kleineren ζ -Werte möglich; hier zeigt sich eine Zunahme der Wellenaufbauhöhe z_{98} , die größer als das Verhältnis $z_{98}(\tan \alpha = 1:4)/z_{98}(\tan \alpha = 1:6)$ ist, das aus den

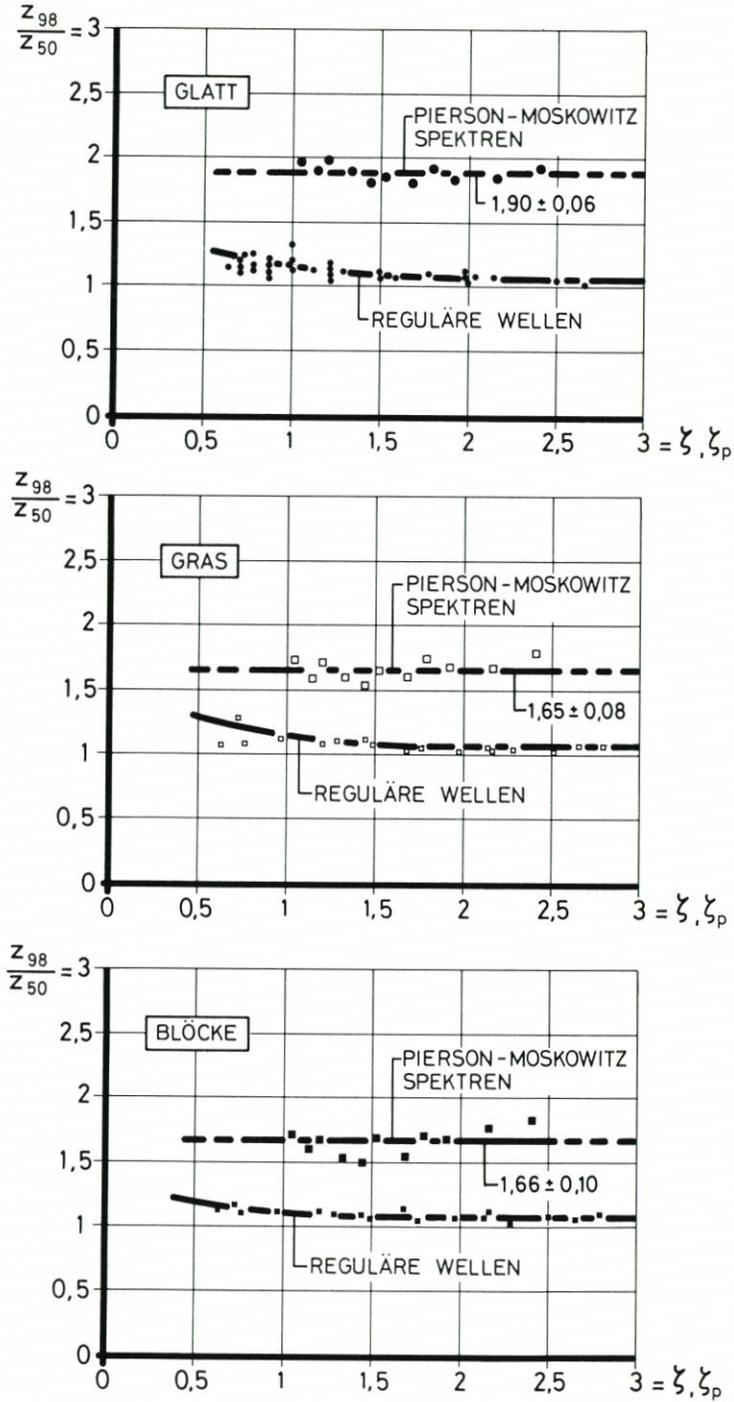


Abb. 45: Pierson-Moskowitz-Spektren, Böschungsneigung $\tan \alpha = 1:6$; Gegenüberstellung der Streumaße z_{98}/z_{50} der Wellenspektren und der regulären Wellen bei den drei Böschungsrauheiten (glatt, Gras und Betonblöcke); Abhängigkeit von der Iribarren-Zahl ζ bzw. ζ_p

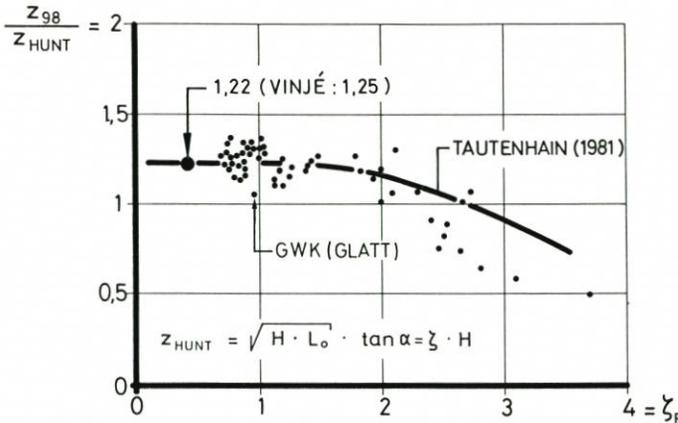


Abb. 46: Reguläre Wellen, Asphaltböschung mit $\tan \alpha = 1:6$: Vergleich der Wellenauflaufhöhen im Großen Wellenkanal mit den Ergebnissen der Modelluntersuchungen von TAUTENHAIN (1981)

Formeln sowohl von WASSING (1957) als auch von HUNT (1959) hervorgeht. Dies wurde auch in früheren niederländischen Modellversuchen festgestellt (bei SCHIJF, 1974), deren Ergebnisse auf Abb. 47 dargestellt sind; sie liegen hier um 8% (Faktor 1,08) höher, als es dem einfachen Verhältnis der $\tan \alpha$ -Werte entspricht; ähnliches gilt für die GWK-Versuche, wie die entsprechenden Streuungen auf Abb. 18 zeigen. Hier liegen die Ergebnisse der Formel von WASSING auf der sicheren Seite, solange die Wellenperioden unter $T \approx 6$ s liegen; für die Praxis wird hier empfohlen, sowohl nach der Formel von WASSING als auch nach der (von VINJÉ mit dem Faktor 1,25 korrigierten) Formel von HUNT zu rechnen und den jeweils größeren Wert für die Bemessung zu verwenden. Dies gilt sowohl für glatte Böschungen als auch für Böschungen mit Grasrauheiten; für Betonblöcke in einer Anordnung wie nach Abb. 25 kann ein Reduktionsfaktor von 0,88 oder rd. 0,9 verwendet werden.

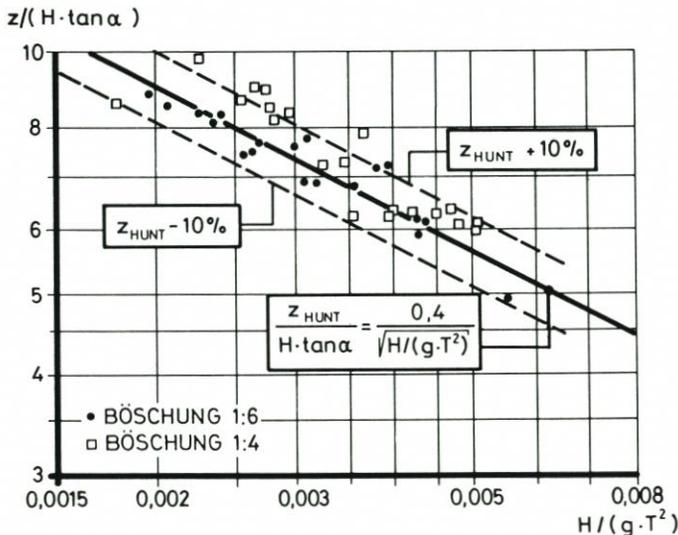


Abb. 47: Ergebnisse niederländischer Modellversuche (aus SCHIJF 1974) für glatte Böschungen mit $\tan \alpha = 1:4$ und $1:6$ bei regulären Wellen

Für reguläre Wellen und glatte oder grasraue Böschungen können die Versuchsergebnisse bei der hier untersuchten Böschungsneigung $\tan \alpha = 1 : n = 1 : 6$ in einem Bemessungsdiagramm zusammengefaßt werden (Abb. 48), in dem sowohl die Formel von WASSING

$$z_{98} = 8 \cdot H \cdot \tan \alpha$$

als auch die Formel von HUNT in einer korrigierten Fassung

$$z_{98} = k(\zeta) \cdot \sqrt{H \cdot L_o} \cdot \tan \alpha$$

verwendet wird, wobei die Korrekturfunktion

$$k(\zeta) = \frac{z_{98}}{z_{\text{HUNT}}}$$

unmittelbar aus der Ausgleichskurve der Versuchsergebnisse aus dem Grossen Wellenkanal auf Abb. 15 (als $f(\zeta)$) hervorgeht; für Werte von $\zeta \leq 1$ erreicht diese Funktion als Größtwert den konstanten Korrekturfaktor $k = 1,25$ nach VINJÉ (1972). Auf Abb. 48 ist der Wellenauflauf z_{98} als Funktion der Wellenperiode T mit der Wellenhöhe H als Parameter dargestellt; es hängt dabei von der Wellenhöhe H ab, in welchem Bereich die Formel von WASSING höhere Werte als die korrigierte Formel von HUNT ergibt; mit Hinblick auf die auf Abb. 18 dargestellten Versuchsergebnisse wird jeweils die auf der sicheren Seite liegende Bemessungsformel empfohlen.

Die Werte auf Abb. 48 können wiederum für eine Böschung mit Betonblöcken gemäß Abb. 25 mit dem Reduktionsfaktor $0,88 \sim 0,9$ nach Abb. 28 ermäßigt werden.

Bei den Wellenspektren sind die Unterschiede der Wellenaufbauhöhen bei den drei Rauheiten (glatt = Asphaltbeton, Gras und Betonblöcke) so groß, daß sie bei der Anwendung berücksichtigt werden sollten (vgl. Abb. 40 bis 43). Da bei den vorliegenden Untersuchungen die untersten Wellenperioden als Peakperioden T_p bei rd. 5 s liegen (Abb. 41 und 43), ist hier

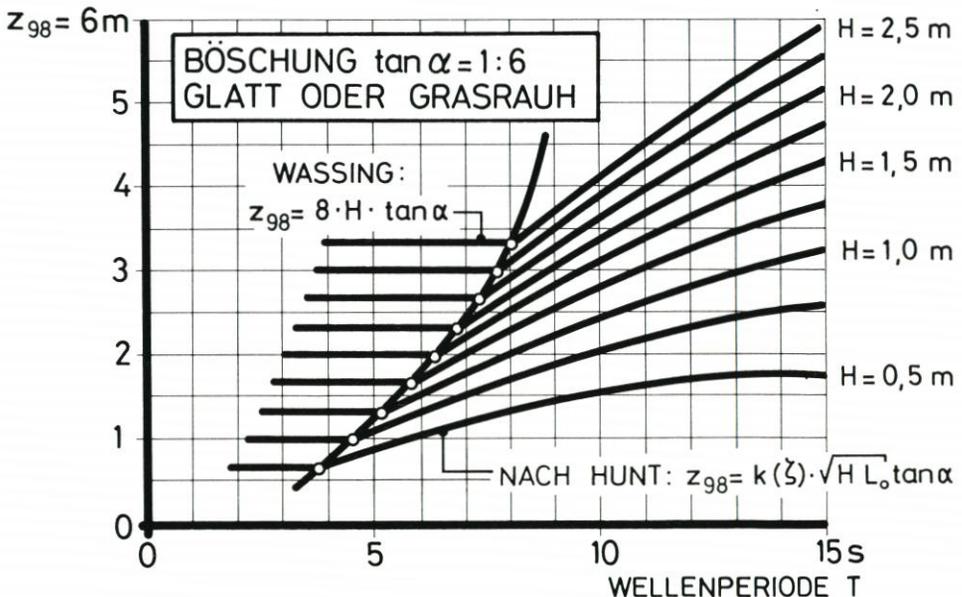


Abb. 48: Reguläre Wellen, Böschung glatt oder grasrauh mit $\tan \alpha = 1 : n = 1 : 6$: Zusammenfassung der Versuchsergebnisse: Wellenaufbau z_{98} in Abhängigkeit von der Wellenperiode T und der Wellenhöhe H

ein Vergleich mit dem Konstanzbereich nach WASSING wie auf Abb. 48 nicht möglich. Für die Praxis kann aber empfohlen werden, entsprechend Abschnitt 5 mit der signifikanten Wellenhöhe H_s und der Peakperiode T_p wie folgt zu rechnen:

$$z_{98} \text{ nach HUNT} = k(\zeta_p) \cdot \sqrt{H_s \cdot L_o} \cdot \tan \alpha$$

$$\text{mit } L_o = \frac{g}{2\pi} \cdot T_p^2$$

und Brecherkennzahl

$$\zeta_p = \frac{1}{\sqrt{H_s/L_o}} \cdot \tan \alpha$$

ebenfalls mit

$$L_o = \frac{g}{2\pi} \cdot T_p^2$$

wobei die

Korrekturfunktionen $k(\zeta_p)$

für die drei Rauheiten unmittelbar aus Abb. 42 entnommen werden können; Abb. 42 vermittelt zugleich einen Eindruck von der Streuung der Meßwerte.

Für die glatte Böschung (=Asphaltbeton) ist diese Korrekturfunktion eine monoton fallende Kurve, die von $\approx 1,7$ bei $\zeta_p = 1$ auf $\approx 1,3$ bei $\zeta_p = 2,5$ fällt. Nach GRÜNE (1982) sind auf der folgenden Tafel Korrekturwerte aus Untersuchungen anderer Autoren zusammengestellt; der Wertevorrat der Messungen im Großen Wellenkanal deckt sich ungefähr mit dem von VAN OORSCHOOT und D'ANGREMOND sowie mit denen von BATTJES, während die Untersuchungen von TAUTENHAIN und GRÜNE höhere Werte ergeben. Es sei aber nochmals betont, daß die hier untersuchten Spektren nur einen kleinen Ausschnitt aus der Zahl der möglichen Spektren darstellen können und daß daher weitere Untersuchungen notwendig sind.

Korrekturwerte k für die Formel von HUNT von verschiedenen Autoren (nach GRÜNE, 1982)

Autor	Korrekturwert k für HUNT $z_{98} = k \cdot \sqrt{H \cdot L_o} \cdot \tan \alpha$
VAN OORSCHOOT und D'ANGREMOND (bei SCHIJF, 1974)	1,50 bis 1,93
BATTJES (1974)	1,49 bis 1,85
TAUTENHAIN (1981)	1,75 bis 2,16
GRÜNE (1982)	1,33 bis 2,86
G W K 1989	1,3 bis 1,7

Die wichtigsten Ergebnisse der Spektrenversuche können aber dahingehend zusammengefaßt werden, daß

- die Rauheit bei Spektren einen wesentlich größeren Einfluß auf die Wellenaufbauhöhe hat als bei regulären Wellen und
- daß mit zunehmender Peakperiode T_p die Wellenaufbauhöhen bei Spektren sich denen von regulären Wellen gleicher Perioden T nähern.

Es kann angenommen werden, daß diese Gesetzmäßigkeiten auch bei anderen Spektrentypen auftreten, jedoch muß auch diese Annahme in weiteren Untersuchungen geprüft werden.

7. Schriftenverzeichnis

- BATTJES, J. A.: Run-up Distributions of Waves Breaking on Slopes. Proc. ASCE, Vol. 97, No. WW1, 1971.
- BATTJES, J. A.: Surf Similarity. Proc. 14th Coastal Eng. Conf. Copenhagen, 1974.
- BATTJES, J. A. u. ROOS, A.: Characteristics of Flow in Run-up of Periodic Waves. Report No. 75-3, Delft University of Technology, 1975.
- BRUUN, P. u. GÜNBAK, A. R.: Stability of sloping structures in relation to $\zeta = \tan \alpha / \sqrt{H/L_0}$ risk criteria in design. Coastal Engineering, Vol. 1, No. 4, 1977.
- CERC: Shore Protection Manual. Coastal Engineering Research Center, Vicksburg, 1984.
- ERCHINGER, H.-F.: Küsteningenieurwesen. In: BRETSCHNEIDER, H., LECHER, K. und SCHMIDT, M. Taschenbuch der Wasserwirtschaft, Verlag Paul Parey, Hamburg und Berlin, 1982.
- FRANZIUS, L.: Wirkung und Wirtschaftlichkeit von Rauhdeckwerken im Hinblick auf den Wellenauflauf. Mitt. Franzius-Institut der Techn. Universität Hannover, H. 25, 1965.
- FÜHRBÖTER, A.: Über die Bedeutung des Lufteinschlages für die Energieumwandlung in Brandungszonen. Die Küste, H. 21, 1971.
- FÜHRBÖTER, A.: Die Forschungseinrichtung „Großer Wellenkanal“ (Hannover) und ihre Aufgaben. Intermaritec '82 Hamburg, 1982.
- FÜHRBÖTER, A.: Model and Prototype Tests for Wave Impact and Run-up on an Uniform 1:4 Slope. Coastal Engineering, Elsevier Science Vol. 10, 1986.
- FÜHRBÖTER, A. u. SPARBOOM, U.: Full-Scale Wave Attack of Uniformly Sloping Sea Dykes. Proc. 21st Coastal Eng. Conf. Torremolinos, 1988.
- GALVIN, C. J.: Breaker Type Classification on Three Laboratory Beaches. Journal Geoph. Res. Vol. 73, No. 12, 1968.
- GRÜNE, J.: Wave Run-up Caused by Natural Storm Surge Waves. Proc. 18th Coastal Eng. Conf., Kapstadt, 1982.
- GRÜNE, J. und FÜHRBÖTER, A.: A Large Wave Channel for Full Scale-Modeling of Wave Dynamics in Surf Zones. Proc. Intern. Symposium on Modeling Techniques, Vol. I, San Francisco, 1975.
- HUNT, I. A.: Design for Seawalls and Breakwaters. Proc. ASCE, Vol. 85, No. WW3, 1959.
- Küstenausschuß Nord- und Ostsee: Empfehlungen für den Deichschutz nach der Februar-Sturmflut 1962. Die Küste, Jahrgang 10, H. 1, 1962.
- MASE, H.: Spectral characteristics of random wave run-up. Coastal Engineering, Vol. 12, No. 2, 1988.
- NIELSEN, P.: Wave setup and runup: An integrated approach. Coastal Engineering, Vol. 13, 1989.
- NIEMEYER, H. D.: Ausbreitung und Dämpfung des Seegangs im See- und Wattgebiet von Norderney. Niedersächsisches Landesamt für Wasserwirtschaft, Forschungsstelle Küste, Jahresbericht 1985, Band 37, 1986.
- OORSCHOT, J. H. van u. D'ARGREMONT, K.: The Effect of Wave Spectra on Wave Run-up. Proc. 10th Coastal Eng. Conf., London, 1968.
- SAVILLE, T. J. R.: Wave Run-up on Composite Slopes. Proc. 6th Coastal Eng. Conf., 1957.
- SCHIJF, J. B. (Ed.): Wave Run-up and Overtopping. Technical advisory committee on protection against inundation, The Hague, 1974.
- STIVE, M. J. F.: A Scale Comparison of Waves Breaking on a Beach. Coastal Engineering, Vol. 9, 1985.
- TAUTENHAIN, E.: Der Wellenüberlauf an Seedeichen unter Berücksichtigung des Wellenaufbaus. Mitt. Franzius-Institut der Techn. Univ. Hannover, H. 53, 1981.
- VINJÉ, J. J.: Investigations for Coastal Protection with concrete Mats. North Sea Coastal Engineering Group, 1972.
- WASSING, F.: Model investigations of wave Run-up carried out in the Netherlands during the last twenty years. Proc. 6th Conf. on Coastal Eng., Gainesville, Florida, USA, 1957.
- WITTE, H.-H.: Vergleich der Ergebnisse großmaßstäblicher Untersuchungen zum Wellenauflauf mit den Empfehlungen des Shore Protection Manuals. Mitt. des Leichtweiß-Instituts für Wasserbau der Technischen Univ. Braunschweig, 1989.
- WITTE, H.-H. u. RIEKMANN, U.: Ein Verfahren zur Ermittlung der Wellenauflaufgeschwindigkeiten an Böschungen. Mitt. des Leichtweiß-Instituts für Wasserbau der Technischen Univ. Braunschweig, H. 98, 1987.

8. Anhang: Meßergebnisse in Tafelform

8.1 Meßergebnisse der glatten Böschung (Asphaltbeton) für reguläre Wellen (zu Abschnitt 4.1)

Versuchsparameter				Auflaufhöhen			WASSING		HUNT	
ζ	H	T	N	Z ₅₀	Z ₉₈	$\frac{Z_{98}}{Z_{50}}$	Z _{WASSING}	$\frac{Z_{98}}{Z_{WASSING}}$	Z _{HUNT}	$\frac{Z_{98}}{Z_{HUNT}}$
-	m	s	-	m	m	-	m	-	m	-
0.63	1.50	3.70	112	1.02	1.17	1.15	2.00	0.59	0.94	1.24
0.70	0.75	2.91	211	0.56	0.65	1.16	1.00	0.65	0.52	1.24
0.70	1.25	3.76	212	0.94	1.05	1.12	1.67	0.63	0.88	1.20
0.70	1.25	3.76	208	0.92	1.05	1.14	1.67	0.63	0.88	1.20
0.70	1.50	4.12	227	0.99	1.15	1.16	2.00	0.58	1.05	1.09
0.70	2.00	4.76	211	1.42	1.70	1.20	2.67	0.64	1.40	1.21
0.70	1.00	3.37	222	0.79	0.89	1.13	1.33	0.67	0.70	1.27
0.72	0.75	3.00	118	0.56	0.70	1.25	1.00	0.70	0.54	1.29
0.76	1.90	5.00	108	1.56	1.79	1.15	2.53	0.71	1.44	1.25
0.76	1.50	4.45	214	1.20	1.49	1.24	2.00	0.75	1.14	1.31
0.77	0.75	3.19	212	0.62	0.72	1.16	1.00	0.72	0.58	1.25
0.77	2.00	5.21	219	1.58	1.86	1.18	2.67	0.70	1.53	1.21
0.77	1.25	4.12	203	0.90	1.13	1.26	1.67	0.68	0.96	1.18
0.77	1.25	4.12	233	0.99	1.13	1.14	1.67	0.68	0.96	1.18
0.77	1.75	4.88	216	1.36	1.55	1.14	2.33	0.66	1.34	1.15
0.77	1.00	3.69	223	0.83	0.98	1.18	1.33	0.74	0.77	1.28
0.77	1.50	4.52	213	1.20	1.42	1.18	2.00	0.71	1.15	1.23
0.78	1.50	4.61	246	1.11	1.31	1.18	2.00	0.66	1.18	1.11
0.85	1.50	5.00	110	1.40	1.72	1.23	2.00	0.86	1.28	1.35
0.85	1.50	5.00	109	1.41	1.66	1.18	2.00	0.83	1.28	1.30
0.85	1.00	4.10	116	0.97	1.08	1.11	1.33	0.81	0.85	1.26
0.86	0.50	2.91	203	0.49	0.53	1.08	0.67	0.80	0.43	1.24
0.86	1.75	5.45	218	1.58	1.87	1.18	2.33	0.80	1.50	1.25
0.86	1.00	4.12	215	0.95	1.07	1.13	1.33	0.80	0.86	1.25
0.86	1.90	5.68	195	1.63	1.87	1.15	2.53	0.74	1.63	1.15
0.86	0.75	3.57	211	0.68	0.79	1.16	1.00	0.79	0.64	1.23
0.86	1.50	5.05	210	1.41	1.65	1.17	2.00	0.83	1.29	1.28
0.86	1.25	4.61	206	1.05	1.29	1.23	1.67	0.77	1.07	1.20
0.86	1.25	4.61	200	1.12	1.36	1.21	1.67	0.82	1.07	1.27
0.88	2.00	6.00	107	1.98	2.29	1.16	2.67	0.86	1.77	1.30
0.96	2.00	6.50	107	2.06	2.40	1.17	2.67	0.90	1.91	1.25
0.99	0.75	4.10	114	0.84	0.98	1.17	1.00	0.98	0.74	1.33
0.99	0.75	4.12	214	0.76	0.90	1.18	1.00	0.90	0.74	1.21
0.99	1.25	5.32	187	1.37	1.56	1.14	1.67	0.94	1.24	1.26
0.99	1.25	5.32	211	1.30	1.50	1.15	1.67	0.90	1.24	1.21
0.99	1.90	6.56	86	1.83	2.03	1.11	2.53	0.80	1.88	1.08
0.99	1.00	4.76	213	1.06	1.28	1.21	1.33	0.96	0.99	1.29
0.99	1.50	5.83	213	1.68	1.90	1.13	2.00	0.95	1.49	1.28
0.99	1.75	6.30	183	1.86	2.17	1.17	2.33	0.93	1.74	1.25
0.99	0.50	3.37	223	0.50	0.66	1.32	0.67	0.99	0.50	1.33
1.11	1.50	6.52	213	1.55	1.76	1.14	2.00	0.88	1.66	1.06
1.21	0.50	4.12	245	0.64	0.76	1.19	0.67	1.14	0.61	1.25
1.21	1.75	7.71	210	2.35	2.62	1.11	2.33	1.12	2.12	1.23
1.21	1.50	7.14	208	1.87	2.03	1.09	2.00	1.02	1.82	1.11
1.21	1.00	5.83	216	1.21	1.40	1.16	1.33	1.05	1.21	1.15
1.21	0.75	5.05	211	0.97	1.11	1.14	1.00	1.11	0.91	1.22
1.28	1.70	8.00	110	2.26	2.56	1.13	2.27	1.13	2.17	1.18
1.48	1.60	9.00	111	2.94	3.25	1.11	2.13	1.52	2.37	1.37
1.49	1.55	8.90	114	2.83	3.08	1.09	2.07	1.49	2.31	1.33
1.49	0.75	6.20	111	1.27	1.44	1.13	1.00	1.44	1.12	1.29
1.58	1.40	9.00	111	2.78	3.00	1.08	1.87	1.61	2.22	1.35
1.76	1.40	10.00	111	2.77	3.07	1.11	1.87	1.64	2.46	1.25
1.97	0.75	8.20	109	1.67	1.87	1.12	1.00	1.87	1.48	1.26
1.97	0.75	8.20	120	1.74	1.86	1.07	1.00	1.86	1.48	1.26
1.99	1.10	10.00	107	2.50	2.65	1.06	1.47	1.81	2.18	1.21
1.99	1.25	10.70	111	2.50	2.60	1.04	1.67	1.56	2.49	1.04
2.04	0.75	8.50	117	1.82	1.99	1.09	1.00	1.99	1.53	1.30
2.14	1.15	11.00	109	2.55	2.75	1.08	1.53	1.79	2.46	1.12
2.48	0.75	10.30	115	1.70	1.80	1.06	1.00	1.80	1.86	0.97
2.50	1.00	12.00	111	2.75	2.90	1.05	1.33	2.18	2.50	1.16
2.65	0.75	11.00	109	2.04	2.10	1.03	1.00	2.10	1.98	1.06
3.01	0.75	12.50	111	2.48	2.56	1.03	1.00	2.56	2.25	1.14
3.09	0.85	13.70	111	2.60	2.75	1.06	1.13	2.43	2.63	1.05
3.13	0.75	13.00	110	2.51	2.62	1.04	1.00	2.62	2.34	1.12
3.37	0.75	14.00	109	2.26	2.44	1.08	1.00	2.44	2.52	0.97
3.49	0.75	14.50	105	2.56	2.74	1.07	1.00	2.74	2.62	1.05
4.03	0.60	15.00	112	2.07	2.20	1.06	0.80	2.75	2.42	0.91
4.42	0.50	15.00	110	1.75	1.82	1.04	0.67	2.73	2.21	0.82
5.28	0.35	15.00	110	1.25	1.30	1.04	0.47	2.79	1.85	0.70

8.2 Meßergebnisse der Böschungen mit Grasrauheit und mit Betonblöcken bei regulären Wellen (zu Abschnitt 4.2 und 4.3)

Grasraue Böschung (=Kunstgras)

Versuchsparameter				Auflaufhöhen			rel. Auflaufhöhen		Reduktionsfaktor
ζ	H	T	N	Z ₅₀	Z ₉₈	$\frac{Z_{98}}{Z_{50}}$	$\frac{Z_{98}}{Z_{WASSING}}$	$\frac{Z_{98}}{Z_{HUNT}}$	$r = \frac{Z_{98} \text{ (GRAS)}}{Z_{98} \text{ (GLATT)}}$
-	m	s	-	m	m	-	m	-	-
0.63	1.50	3.70	109	0.96	1.04	1.08	0.52	1.10	0.89
0.72	0.75	3.00	115	0.55	0.70	1.27	0.70	1.29	1.00
0.76	1.90	5.00	112	1.45	1.57	1.08	0.62	1.09	0.88
0.96	2.00	6.50	111	2.21	2.45	1.11	0.92	1.28	1.02
0.99	0.75	4.10	109	0.76	0.89	1.17	0.89	1.20	0.91
1.20	0.75	5.00	111	0.96	1.03	1.07	1.03	1.14	-
1.28	1.70	8.00	110	2.35	2.58	1.10	1.14	1.19	1.01
1.44	0.75	6.00	111	1.16	1.29	1.11	1.29	1.19	-
1.49	1.55	8.90	109	2.89	3.12	1.08	1.51	1.35	1.01
1.68	0.75	7.00	111	1.41	1.45	1.03	1.45	1.15	-
1.76	1.40	10.00	108	2.78	2.91	1.05	1.56	1.18	0.95
1.97	0.75	8.20	110	1.56	1.59	1.02	1.59	1.08	0.85
2.14	1.15	11.00	110	2.43	2.55	1.05	1.66	1.04	0.93
2.16	0.75	9.00	110	1.92	2.00	1.04	2.00	1.23	-
2.28	1.20	12.00	110	2.83	2.93	1.04	1.83	1.07	-
2.50	1.00	12.00	36	2.50	2.56	1.02	1.92	1.02	0.88
2.65	0.75	11.00	114	1.97	2.08	1.06	2.08	1.05	0.99
2.79	0.80	12.00	110	2.16	2.28	1.06	2.14	1.02	-
3.01	0.75	12.50	110	2.43	2.48	1.02	2.48	1.10	0.97
3.09	0.85	13.70	110	2.42	2.48	1.02	2.19	0.94	-
3.13	0.75	13.00	111	2.38	2.41	1.01	2.41	1.03	0.92
3.23	0.60	12.00	110	1.73	1.82	1.05	2.28	0.94	-
3.37	0.75	14.00	110	2.26	2.34	1.04	2.34	0.93	0.96
3.49	0.75	14.50	110	2.52	2.59	1.03	2.59	0.99	0.95
3.95	0.40	12.00	110	1.12	1.23	1.10	2.31	0.78	-
4.03	0.60	15.00	109	2.05	2.10	1.02	2.63	0.87	0.95
4.42	0.50	15.00	109	1.77	1.84	1.04	2.76	0.83	1.01
5.28	0.35	15.00	108	1.19	1.25	1.05	2.68	0.68	0.96

Böschung mit Betonblöcken

Versuchsparameter				Auflaufhöhen			rel. Auflaufhöhen		Reduktionsfaktor
ζ	H	T	N	Z ₅₀	Z ₉₈	$\frac{Z_{98}}{Z_{50}}$	$\frac{Z_{98}}{Z_{WASSING}}$	$\frac{Z_{98}}{Z_{HUNT}}$	$r = \frac{Z_{98} \text{ (BLÖCKE)}}{Z_{98} \text{ (GLATT)}}$
-	m	s	-	m	m	-	m	-	-
0.63	1.50	3.70	112	0.99	1.13	1.14	1.20	0.57	0.97
0.72	0.75	3.00	109	0.56	0.66	1.18	1.22	0.66	0.94
0.76	1.90	5.00	118	1.50	1.67	1.11	1.16	0.66	0.93
0.96	2.00	6.50	110	2.03	2.27	1.12	1.19	0.85	0.95
0.99	0.75	4.10	115	0.78	0.90	1.15	1.22	0.90	0.92
1.20	0.75	5.00	108	0.94	1.06	1.13	1.18	1.06	-
1.28	1.70	8.00	110	2.10	2.30	1.10	1.06	1.01	0.90
1.44	0.75	6.00	111	1.05	1.15	1.10	1.06	1.15	-
1.49	1.55	8.90	110	2.58	2.77	1.07	1.20	1.34	0.90
1.68	0.75	7.00	110	1.19	1.37	1.15	1.09	1.37	-
1.76	1.40	10.00	110	2.39	2.52	1.05	1.02	1.35	0.82
1.97	0.75	8.20	111	1.42	1.53	1.08	1.03	1.53	0.82
2.14	1.15	11.00	110	2.26	2.45	1.08	1.00	1.60	0.89
2.16	0.75	9.00	110	1.56	1.75	1.12	1.08	1.75	-
2.28	1.20	12.00	110	2.56	2.64	1.03	0.96	1.65	-
2.50	1.00	12.00	110	2.35	2.55	1.09	1.02	1.91	0.88
2.65	0.75	11.00	114	1.69	1.79	1.06	0.90	1.79	0.85
2.79	0.80	12.00	102	1.77	1.95	1.10	0.87	1.83	-
3.01	0.75	12.50	109	2.03	2.12	1.04	0.94	2.12	0.83
3.13	0.75	13.00	110	1.89	1.95	1.03	0.83	1.95	-
3.23	0.60	12.00	110	1.49	1.56	1.05	0.81	1.95	0.74
3.28	0.85	14.50	110	2.00	2.13	1.07	0.77	1.88	-
3.37	0.75	14.00	111	1.92	2.00	1.04	0.79	2.00	0.82
3.49	0.75	14.50	111	2.14	2.21	1.03	0.85	2.21	0.81
3.95	0.40	12.00	109	0.98	1.06	1.08	0.67	1.99	-
4.03	0.60	15.00	109	1.76	1.87	1.06	0.77	2.34	0.85
4.42	0.50	15.00	109	1.50	1.55	1.03	0.70	2.33	0.85
5.28	0.35	15.00	108	1.19	1.25	1.05	0.68	2.68	0.96

N = Wellenzahl

8.3 Meßergebnisse der Böschungen mit drei Rauheiten (glatt, Gras, Betonblöcke) bei Wellenspektren (zu Abschnitt 5.2 und 5.3)

Glatte Böschung (=Asphaltbeton)

Versuchsparameter				Auflaufhöhen			WASSING		HUNT	
ζ_p	H_s	T_p	N	Z_{50}	Z_{98}	$\frac{Z_{98}}{Z_{50}}$	$\frac{Z_{98}}{Z_{50}}$	$\frac{Z_{98}}{Z_{50}}$	$\frac{Z_{98}}{Z_{50}}$	
-	m	s	-	m	m	-	m	-	m	
1.04	1.00	5.00	377	0.93	1.85	1.99	1.33	1.39	1.04	1.78
1.14	1.20	6.00	275	1.23	2.35	1.91	1.60	1.47	1.37	1.72
1.20	0.75	5.00	377	0.73	1.46	2.00	1.00	1.46	0.90	1.62
1.33	1.20	7.00	284	1.37	2.62	1.91	1.60	1.64	1.60	1.64
1.44	0.75	6.00	284	0.90	1.65	1.83	1.00	1.65	1.08	1.52
1.52	1.20	8.00	258	1.39	2.60	1.88	1.60	1.63	1.83	1.43
1.68	0.75	7.00	277	1.06	1.93	1.82	1.00	1.93	1.26	1.53
1.79	1.10	9.00	210	1.50	2.91	1.94	1.47	1.98	1.97	1.48
1.92	0.75	8.00	260	1.05	1.94	1.85	1.00	1.94	1.44	1.34
2.16	0.75	9.00	214	1.19	2.21	1.86	1.00	2.21	1.62	1.36
2.40	0.75	10.00	209	1.14	2.21	1.94	1.00	2.21	1.80	1.23

Grasraue Böschung (=Kunstgras)

Versuchsparameter				Auflaufhöhen			rel. Auflaufhöhen		Reduktionsfaktor
ζ_p	H_s	T_p	N	Z_{50}	Z_{98}	$\frac{Z_{98}}{Z_{50}}$	$\frac{Z_{98}}{Z_{50}}$	$\frac{Z_{98}}{Z_{50}}$	
-	m	s	-	m	m	-	m	-	
1.04	1.00	5.00	382	0.93	1.60	1.72	1.20	1.54	0.86
1.14	1.20	6.00	285	1.26	1.99	1.58	1.24	1.45	0.95
1.20	0.75	5.00	387	0.82	1.39	1.70	1.39	1.54	0.87
1.33	1.20	7.00	293	1.43	2.27	1.59	1.42	1.42	0.87
1.44	0.75	6.00	288	0.96	1.46	1.52	1.46	1.35	0.88
1.52	1.20	8.00	257	1.48	2.42	1.64	1.51	1.33	0.93
1.68	0.75	7.00	276	1.00	1.59	1.59	1.59	1.26	0.82
1.79	1.10	9.00	213	1.45	2.51	1.73	1.71	1.28	0.86
1.92	0.75	8.00	259	1.01	1.68	1.66	1.68	1.16	0.87
2.16	0.75	9.00	222	1.11	1.83	1.65	1.83	1.13	0.83
2.40	0.75	10.00	209	1.12	1.98	1.77	1.98	1.10	0.90

Böschung mit Betonblöcken

Versuchsparameter				Auflaufhöhen			rel. Auflaufhöhen		Reduktionsfaktor
ζ_p	H_s	T_p	N	Z_{50}	Z_{98}	$\frac{Z_{98}}{Z_{50}}$	$\frac{Z_{98}}{Z_{50}}$	$\frac{Z_{98}}{Z_{50}}$	
-	m	s	-	m	m	-	m	-	
1.04	1.00	5.00	384	0.85	1.45	1.71	1.09	1.39	0.78
1.14	1.20	6.00	280	1.00	1.60	1.60	1.00	1.17	0.68
1.20	0.75	5.00	388	0.72	1.20	1.67	1.20	1.33	0.82
1.33	1.20	7.00	279	1.25	1.93	1.54	1.21	1.21	0.74
1.44	0.75	6.00	283	0.82	1.23	1.50	1.23	1.14	0.75
1.52	1.20	8.00	261	1.24	2.09	1.69	1.31	1.15	0.80
1.68	0.75	7.00	280	0.87	1.36	1.56	1.36	1.08	0.70
1.79	1.10	9.00	221	1.23	2.10	1.71	1.43	1.07	0.72
1.92	0.75	8.00	260	0.89	1.49	1.67	1.49	1.03	0.77
2.16	0.75	9.00	226	0.89	1.57	1.76	1.57	0.97	0.71
2.40	0.75	10.00	202	0.93	1.70	1.82	1.70	0.94	0.77

N = Wellenzahl