

# Die dynamische Verweilzeit und ihre Beziehungen zum Wellenauflauf und -ablauf an einer Deichböschung 1:n = 1:6

VON ALFRED FÜHRBÖTER UND HANS-HEINRICH WITTE

## Zusammenfassung

Die dynamische Verweilzeit gibt in Form einer Dauerlinie an, in welchen Zeitabschnitten beim Wellenauflauf und Wellenablauf eine Böschung von Wasser bedeckt ist. Die Verweildauer  $D = 0\%$  gibt dabei den höchsten Wellenauflauf, die Verweildauer  $D = 100\%$  das tiefste Wellental einer Wellenfolge an, die sowohl in Form von regulären Wellen als auch in der Form eines Wellenspektrums vorliegen kann. Die dynamische Dauerlinie ist sehr gut für die Voraussage von Extremereignissen (höchster Wellenauflauf oder tiefstes Wellental) geeignet.

Es bestehen enge Beziehungen der dynamischen Dauerlinien zu den Wellenauflaufhöhen, dem Reflexionsverhalten und den Wellenauf- und Wellenablaufgeschwindigkeiten, die sämtlich als Funktionen der dimensionslosen Brecherkennzahl  $\xi$  dargestellt werden können. Dies gilt auch für rauhe Böschungen und für die Wellenspektren; abschließend wird die hohe Bedeutung der Böschungsneigung 1:n für die Wellenbelastung aufgezeigt.

## Summary

*The residence time shows in the form of a duration curve the time that an embankment is covered by water during wave run-up and run-down. The residence time  $D = 0\%$  is associated with the highest wave run-up level and  $D = 100\%$  with that of the lowest wave trough for a sequence of regular or irregular waves. The residence time duration curve is shown to provide a means for the prediction of extreme values (highest and lowest wave water levels).*

*There are strong links between the residence time duration curve and the wave run-up/run-down, reflexion processes and the run-up/run-down velocities, each of which can be described as functions of the dimensionless breaker number  $\xi$ . This includes also rough slopes and spectrally distributed waves. Attention is also drawn to the dominant influence of the slope ( $\tan\alpha = 1:n$ ) on the various kinds of wave loadings of embankments.*

## Inhalt

|   |    |
|---|----|
| 1. Einleitung und Aufgabenstellung . . . . .  | 2  |
| 2. Zur Definition der dynamischen Verweilzeit und der dynamischen Dauerlinie . . . . .  | 2  |
| 3. Wellenauflauf und Wellenablauf sowie das Reflexionsverhalten in Zusammenhang mit der dynamischen Dauerlinie . . . . .                      | 7  |
| 4. Wellenauf- und Wellenablaufgeschwindigkeiten sowie die Wellenauflaufhöhe $z_{98}$ in Zusammenhang mit der dynamischen Dauerlinie . . . . . | 8  |
| 5. Einflüsse verschiedener Rauheiten und von Wellenspektren auf die dynamischen Dauerlinien   | 18 |
| 5.1 Vorbemerkung . . . . .  | 18 |
| 5.2 Einfluß von Rauheiten . . . . .   | 18 |
| 5.3 Einfluß eines Wellenspektrums . . . . .   | 19 |
| 5.4 Zusammenfassung der Einflüsse von Rauheiten und Wellenspektren . . . . .  | 23 |
| 6. Einfluß der Böschungsneigung 1:n auf die Wellenbelastungen . . . . .   | 25 |
| 7. Schriftenverzeichnis . . . . .   | 27 |
| 8. Tafelanhang . . . . .  | 29 |

## 1. Einleitung und Aufgabenstellung

Es werden Auswertungen von Versuchen im Großen Wellenkanal (GWK) Hannover an Deichböschungen mit der Neigung  $\tan\alpha = 1:n = 1:6$  beschrieben; es handelt sich um die Böschungsneigung, die nach der Februar-Sturmflut 1962 vom KÜSTENAUS-SCHUSS NORD- und OSTSEE (1962) als Mindestneigung für scharliegende Seedeiche empfohlen wurde. Der Große Wellenkanal (GRÜNE und FÜHRBÖTER, 1975, und FÜHRBÖTER, 1982) stellt eine der größten Versuchsanlagen dieser Art auf der Erde dar und wurde von der DEUTSCHEN FORSCHUNGSGEMEINSCHAFT (DFG) finanziert, ebenso wie die vorliegenden Untersuchungen, die im Rahmen des SONDERFORSCHUNGSBEREICHES (SFB) 205 „KÜSTENINGENIEURWESEN“ gefördert wurden. Hierfür danken die Verfasser der DFG; ebenso gilt ihr Dank der Betriebsgruppe des GWK (Dr.-Ing. TAUTENHAIN, Dipl.-Ing. GRÜNE, Dipl.-Ing. SCHMIDT, Dipl.-Ing. BERGMANN und Herrn JUNGE) sowie den Herren Dr.-Ing. SPARBOOM, Dipl.-Ing. RAHLF, cand.-ing. RIEKMANN und cand.-ing. SCHÜTTRUMPF für die Durchführung der Untersuchungen.

Es werden Ergebnisse früherer Untersuchungen (FÜHRBÖTER/SPARBOOM/WITTE, 1989, und FÜHRBÖTER/WITTE, 1989) unter dem Gesichtspunkt der dynamischen Verweilzeiten zusammengefaßt, die in Form der dynamischen Dauerlinien analog zu den bekannten Dauerlinien der Hydrologie nicht nur Informationen über die Größe der Wellenbelastungen, sondern auch über die Dauer dieser dynamischen Belastungen in den einzelnen Höhenbereichen liefern; es sollen dabei besonders die maximalen Strömungsgeschwindigkeiten betrachtet werden, die mit den Wellenauf- und -ablaufbewegungen verbunden sind (vgl. ZITSCHER, 1962). Auf die Druckschlagbelastungen (FÜHRBÖTER, 1966) wird getrennt in Abschnitt 6 eingegangen.

Es wird außerdem zunächst nur eine glatte Böschung der Neigung 1:6 mit regulären Wellen betrachtet; der Einfluß verschiedener Rauheiten sowie der von Spektren wird in Abschnitt 5 behandelt. Die verwendeten Meßdaten sind in den Tafeln A bis C (Tafelanhang, Abschnitt 8) zusammengestellt.

## 2. Zur Definition der dynamischen Verweilzeit und der dynamischen Dauerlinie

Es ist bekannt (FÜHRBÖTER, 1981), daß außer der Scheitelhöhe einer Sturmflut für die Seegangsbelastungen auch die Verweilzeiten von großer Bedeutung sind, in denen sich der Ruhewasserstand als Funktion der Zeit innerhalb bestimmter Höhenstufen aufhält. Abb. 1 zeigt – für Höhenstufen von 0,5 m – die Verweilzeiten für einige bedeutende Sturmfluten an der Nord- und Ostsee. An der Nordsee fällt die hohe Verweilzeit der Februarsturmflut 1962 im Scheitelbereich auf, die durch eine „füllige“ Windstaukurve (HENSEN, 1962) bedingt ist und die bei der Sturmflut vom 3.1. 1976 fehlt; bei der Ostsee können im Gegensatz zur Nordsee die Verweilzeiten in den einzelnen Höhenstufen mehr als einen Tag betragen (Abb. 1).

Wird jetzt für die Dauer der Verweilzeit für jede Höhenstufe ein mittlerer Ruhewasserpiegel angenommen, so ist bei der Seegangsbelastung durch die Wellenauf- und Wellenablaufbewegungen ein ständiger dynamischer Wechsel der Wasserbedeckung der Böschung vorhanden. Meßtechnisch kann diese Wechselbelastung z. B. durch einen Stufenpegel (vgl. GRÜNE, 1982) erfaßt werden, mit dem der augenblickliche Wasserstand an der Deichböschung

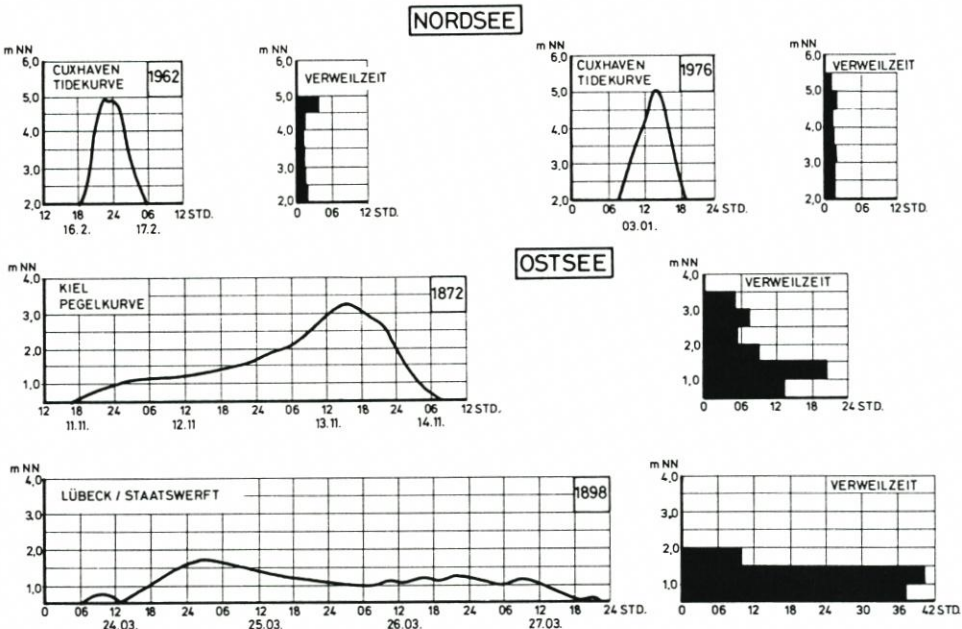


Abb. 1: Zum Begriff der Verweilzeiten bei Sturmfluten (FÜHRBÖTER, 1981): Verweilzeiten bei Sturmfluten an der Nord- und Ostsee (in Stufen von 0,5 m)

als Funktion der Zeit registriert wird. Als Wellenaufbauhöhe  $z$  wird die Wasserstandslage als vertikaler Abstand vom Ruhewasserspiegel gemessen.

Auch hier können wieder Verweilzeiten als die Zeitspanne angegeben werden, in denen sich der dynamisch wechselnde Wasserstand innerhalb bestimmter Höhenstufen aufhält; es ist hier aber zweckmäßig, diese dynamischen Verweilzeiten in Form einer dynamischen Dauerlinie, also in Integralform, darzustellen; es gibt dann die

$$\text{dynamische Dauerlinie } D = D(z)$$

den Anteil an der Gesamtzeit (die der Verweilzeit in der betrachteten Höhenstufe nach Abb. 1 entspricht) an, in der die entsprechende Höhenstufe  $z$  von dem Wellenaufbau erreicht oder überschritten wird. Es handelt sich bei den dynamischen Dauerlinien um Dauerlinien von Vorgängen, die sich mit den Wellenperioden in Zeitspannen von Sekunden abspielen, während es sich bei den hydrologischen Dauerlinien um Zeitskalen von Tagen, Wochen oder Monaten handelt.

Abb. 2 zeigt schematisch, wie die dynamische Dauerlinie aus einer Folge von Wellen gewonnen wird; Abb. 3 zeigt ein Beispiel für reguläre Wellen und Abb. 4 ein Beispiel für ein Wellenspektrum.

Für eine gegebene Wellenfolge ist mit dem Punkt A die höchste Wellenaufbauhöhe, mit dem Punkt B das tiefste Wellental an der Böschung gekennzeichnet, der Höhenbereich zwischen A ( $D = 0$ ) und B ( $D = 100\%$ ) ist zugleich der Wechselbereich, in dem die größten Strömungsgeschwindigkeiten durch die Wellenaufbau- und Wellenablaufbewegungen auftreten. Die Funktion  $D(z)$  zwischen diesen Punkten gibt außerdem ein Maß für die anteilige Dauer dieser Belastungen während der Gesamtzeit und drückt zugleich die Eigenschaften des angreifenden Seeganges aus. So hat ein Wellenspektrum (JONSWAP-Spektrum, Abb. 4) bei

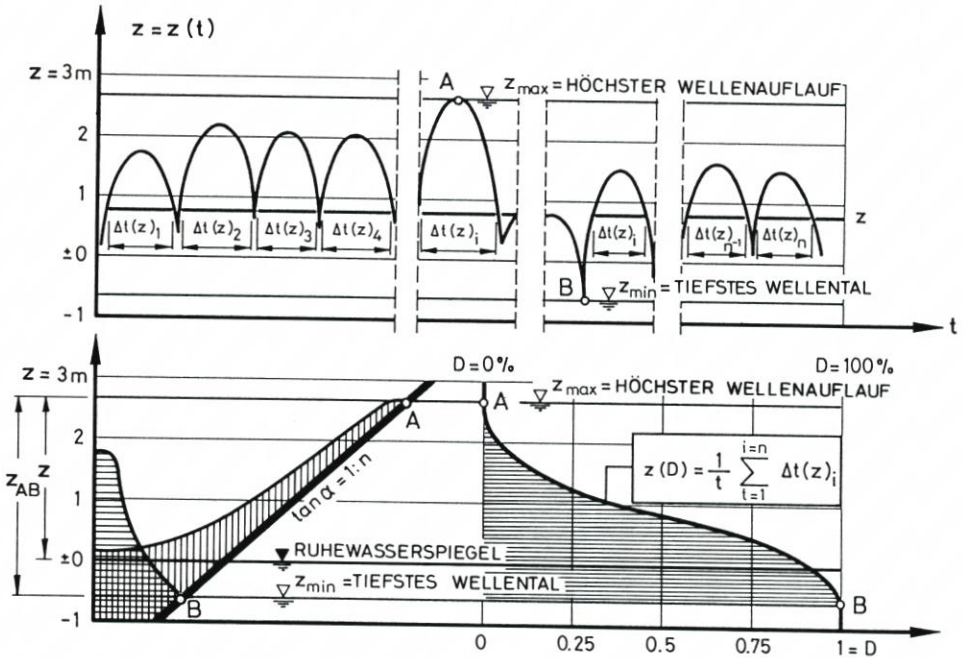


Abb. 2: Zur Definition der dynamischen Verweilzeit – oben: senkrechter Wellenauflauf  $z$  als Funktion der Zeit  $t$  – unten: die dynamische Verweilzeit als Wasserstandsdauerlinie

gleichen kennzeichnenden Wellenparametern  $H_s$  und  $T_p$  eine größere Bandbreite zwischen den Punkten A (höchster Wellenauflauf) und B (tiefstes Wellental) als eine Folge regulärer Wellen (Abb. 3).

Werden die dynamischen Dauerlinien – als  $D(z)$  oder  $z(D)$  – anstatt in linearer Darstellung (Abb. 3 und 4 oben) über die Dauer (= Abszisse) nach dem GAUSS'schen Wahrscheinlichkeitsintegral aufgetragen (Abb. 3 und 4 unten), so ergeben sich flachgestreckte Kurven, die Extrapolationen sowohl für die Wahrscheinlichkeiten extrem hoher Wellenaufläufe als auch extrem tiefer Wellentäler an der Böschung (auf Abb. 3 und 4: Neigung 1:n = 1:4) erlauben. Hierin besteht bereits eine wichtige Eigenschaft der dynamischen Dauerlinien; extreme Wellenauflaufhöhen sind für die Wahrscheinlichkeit des Wellenüberlaufes wichtig (wobei die Dauerlinie zugleich die anteilige Zeitspanne des Überlaufvorganges angibt), extrem tiefe Wellentäler können für dichte Deichbekleidungen (Beton, Asphaltbeton) den Bemessungsfall für den Auftrieb liefern, aber auch bei Schüttsteinwellenbrechern kann es bei hohem Porenwasserdruck im Kern zu gefährlichen dynamischen Strömungsbelastungen der Deckschicht von innen her kommen (vgl. MEISSNER et al., 1988), die bei dem tiefsten Wellental ihr Maximum erreichen können.

Abgesehen von diesen Extremwerten können aber auch aus den dynamischen Dauerlinien – speziell in der Darstellung nach dem GAUSS'schen Wahrscheinlichkeitsintegral nach Abb. 3 und 4 unten – analog zu der bekannten Wellenauflaufhöhe  $z_{98}$ , die nur von 2 % der Wellen erreicht oder überschritten wird, ebenfalls Werte von  $z(D = 2\%)$  und umgekehrt von  $z(D = 98\%)$  definiert werden, wobei  $z(D = 2\%)$  ein Maß für die Wellenauflaufhöhe,  $z(D = 98\%)$  ein Maß für die Lage des Wellentales mit je 2 % Über- bzw. Unterschreitungsdauer ist. Damit kann zugleich ein

$$\text{Wellenhub } z_{AB} = z(D = 2\%) - z(D = 98\%) \quad (1)$$

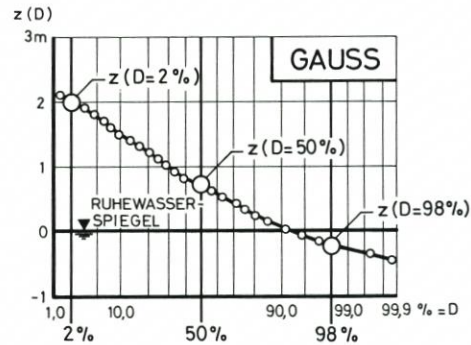
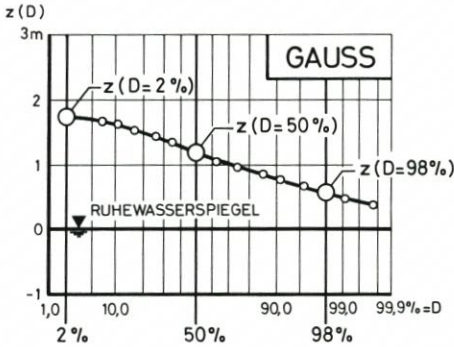
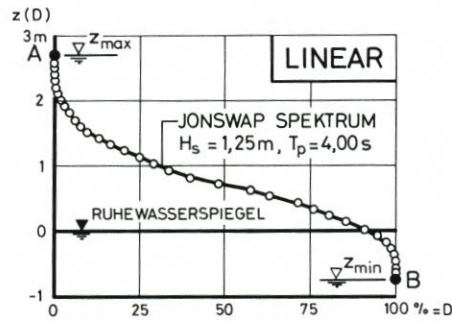
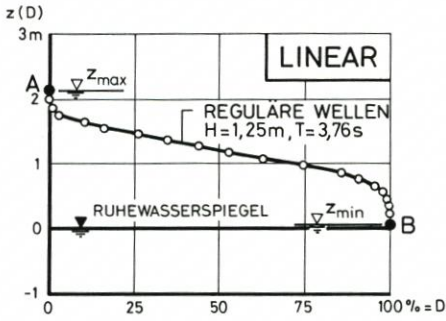


Abb. 3: Reguläre Wellen, Böschung glatt,  
1 : n = 1 : 4:  
oben: Dynamische Dauerlinie in linearer  
Darstellung  
unten: Darstellung mit dem GAUSS'schen  
Wahrscheinlichkeitsintegral

Abb. 4: JONSWAP-Spektrum, Böschung glatt.  
1 : n = 1 : 4:  
oben: Dynamische Dauerlinie in linearer  
Darstellung  
unten: Darstellung mit dem GAUSS'schen  
Wahrscheinlichkeitsintegral

definiert werden, der im Gegensatz zu einem Tidehub, der großräumig vorhanden ist, hier allerdings nur unmittelbar an der Böschung auftritt, dafür aber an dieser Stelle quantitativ den Höhenbereich der dynamischen Belastungen durch die Auflauf- und Ablaufströmungen angibt. Ebenso kann der Wert  $z(D = 50\%)$ , der während der Gesamtzeit ebenso oft überwiegt unterschritten wird, als der uferseitige Grenzwert des Brandungstaus angesehen werden.

Es kann gezeigt werden, daß diese kennzeichnenden Parameter der dynamischen Dauerlinien –  $z(D = 2\%)$ ,  $z(D = 98\%)$ ,  $z_{AB}$  und  $z(D = 50\%)$  – in einem engen Zusammenhang mit der dimensionslosen Brecherkennzahl  $\xi$  stehen, die auf IRIBARREN (1949) zurückgeht und die deshalb nach BATTJES (1974) auch als IRIBARREN-Zahl bezeichnet wird. Sie wird hier in der Form

$$\xi = \frac{1}{\sqrt{H/L_o}} \cdot \tan\alpha \text{ oder } \frac{1}{\sqrt{H/L_o}} \cdot \frac{1}{n} \quad (2)$$

mit  $H$  = Höhe der ankommenden Wellen vor der Böschung unter der Voraussetzung, daß die Wassertiefe  $d \geq 3 H$  ist (SAVILLE, 1957)

$L_o$  = Länge der Welle im Tiefwasser ( $d \geq L/2$ )

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

verwendet, was mit der Tiefwasserlänge  $L_o$

$$L_o = \frac{g}{2\pi} \cdot T^2 \quad (3)$$

$T$  = Wellenperiode

den Wert

$$\xi = \sqrt{\frac{g}{2\pi}} \cdot \frac{1}{\sqrt{H}} \cdot T \cdot \frac{1}{n} \quad (4)$$

ergibt. Die Hauptarten der Brecher ergeben sich dann in Anlehnung an GALVIN (1968) nach BATTJES (1974) mit folgenden Grenzen von  $\xi$ :

- $\xi < 0,5$  : Schwallbrecher (spilling breaker); Energieabgabe auf großer Länge; sehr kleiner Reflexionsanteil
- $0,5 < \xi < 3,3$  : Sturzbrecher (plunging breaker); Energieabgabe auf kurzer Strecke, Brecherzunge mit Druckschlagwirkung; kleiner Reflexionsanteil, mäßiger Wellenauflauf
- $\xi > 3,3$  : Reflexionsbrecher (surging breaker); keine Ausbildung einer Brecherzunge, großer Reflexionsanteil und hoher Wellenauflauf

Die Hauptparameter der dynamischen Dauerlinien – Wellenauflauf entsprechend  $z(D = 2 \%)$ , mittlerer Wasserstand entsprechend  $z(D = 50 \%)$  und Wellental entsprechend  $z(D = 98 \%)$  – sind auf Abb. 5 als Funktion der Brecherkennzahl  $\xi$  dargestellt; es handelt sich um Auswertungen von Versuchen an einer glatten Asphaltbetonböschung mit der Neigung 1:n=1:6 (vgl. FÜHRBÖTER/SPARBOOM/WITTE, 1989). Abb. 6 zeigt dazu die Beziehung zwischen der gebräuchlichen Wellenauflaufhöhe  $z_{98}$  (Abb. 6 oben in dimensionsloser Darstellung) und dem Wert  $z(D = 2 \%)$ ; es geht aus Abb. 6 hervor, daß zwischen beiden Werten über den ganzen Bereich der untersuchten Brecherkennzahlen eine lineare Beziehung besteht; es liegt der Wert

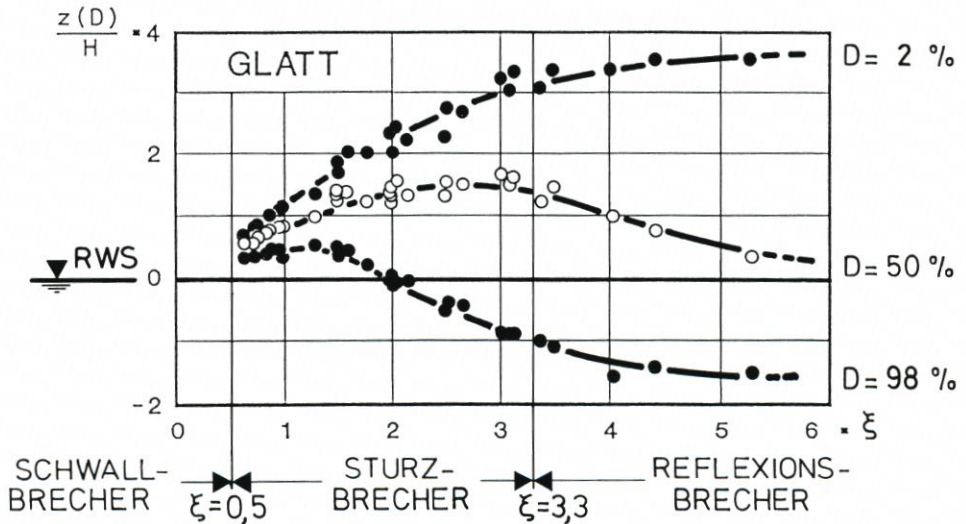


Abb.5: Reguläre Wellen, Böschung glatt, 1:n = 1:6: Wellenauflaufhöhe als  $z(D = 2 \%)$ , mittlerer Wasserstand als  $z(D = 50 \%)$  und Wellental als  $z(D = 98 \%)$  in Abhängigkeit von der Brecherkennzahl  $\xi$

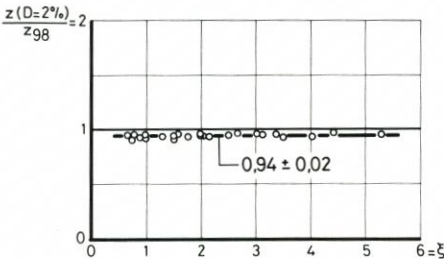
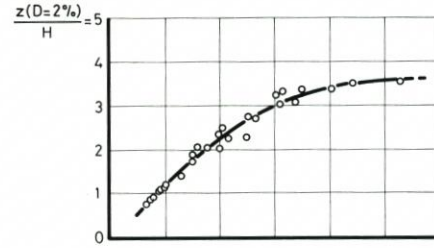
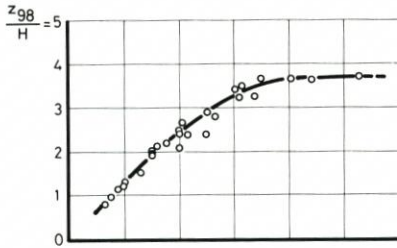


Abb.6: Reguläre Wellen, Böschung glatt,  
1 : n = 1 : 6:  
Linearer Zusammenhang zwischen der Wellenauf-  
laufhöhe  $z_{98}$  und dem Wert  $z(D = 2\%)$

$z(D = 2\%)$  rd. 6% niedriger als der Wert  $z_{98}$  (Abb. 6 unten). Damit kann der Wert  $z(D = 2\%)$  unmittelbar auf die Wellenaufhöhe  $z_{98}$  umgerechnet werden.

Bei Wellenspektren besteht aber ein Vorteil der dynamischen Dauerlinie darin, daß der Wert  $z(D = 2\%)$  auch dann definiert werden kann, wenn die Zahl der individuellen Wellenaufläufe nicht mit der Zahl der ankommenden Wellen übereinstimmt; besonders bei flachen Böschungen geht die Zahl der Wellenaufläufe gegenüber der Zahl der ankommenden Wellen mit abnehmender Brecherkennzahl stark zurück (MASE, 1988).

Die Funktionen  $z(D)$  auf Abb. 5 stellen die Abhängigkeiten der kennzeichnenden Parameter der dynamischen Dauerlinien von der Brecherart dar und geben zugleich die Höhenbereiche der Deichböschung an, in denen (mit Ausnahme des Druckschlages, vgl. Abschnitt 6) die hauptsächlichsten Wellenbelastungen stattfinden. Sehr deutlich wird, daß die kleinsten Belastungsbereiche bei den kleinen Brecherkennzahlen im Übergangsbereich zum Schwallbrecher auftreten. Außerdem geht aus Abb. 5 hervor, daß erst bei Brecherkennzahlen  $\xi > 2$  der Wechselbereich den Ruhewasserspiegel unterschreitet; der mittlere Wasserstand entsprechend  $z(D = 50\%)$  erreicht ein Maximum bei Brecherkennzahlen um  $\xi = 3$ . Besonders tritt die starke Zunahme des Wellenhubes nach Gleichung (1) im Sturzbrecherbereich ( $0,5 < \xi < 3,3$ ) hervor.

### 3. Wellenauflauf und Wellenablauf sowie das Reflexionsverhalten in Zusammenhang mit der dynamischen Dauerlinie

Auf Abb. 7 sind die Werte von  $z(D = 2\%)$  (Wellenauflauf) und  $z(D = 98\%)$  (Wellenablauf) nach Abb. 5 den Ergebnissen von Modellversuchen von BRUUN und GÜNBAK (1977)

gegenübergestellt, die an glatten Böschungen mit Wassertiefen von 50 cm und Wellenhöhen bis 15 cm mit sehr steilen Böschungen ( $1:n = 1:1,5, 1:2$  und  $1:3$ ) durchgeführt wurden; die größeren Streuungen dieser Meßergebnisse sind auf den kleinen Modellmaßstab zurückzuführen. Dennoch ist im Bereich der Brecherkennzahlen bis etwa  $\xi = 3$  bei dem Wellenauflauf eine gute Übereinstimmung mit den Werten für den GWK ( $1:n = 1:6$ ) festzustellen; beide Meßergebnisse liegen nahe der Geraden, die durch die bekannte Wellenaufformel nach HUNT (1959)

$$z_{\text{HUNT}} = \xi \cdot H \quad (5)$$

oder mit  $\xi$  nach Gleichung (4)

$$z_{\text{HUNT}} = \sqrt{\frac{g}{2\pi}} \cdot \sqrt{H} \cdot T \cdot \frac{1}{n} \quad (6)$$

ausgedrückt wird; die Werte aus dem GWK liegen dabei etwas höher als nach der Formel von HUNT (FÜHRBÖTER/SPARBOOM/WITTE, 1989). Eine deutliche Abweichung tritt dagegen im Bereich des Reflexionsbrechers ( $\xi > 3,3$ ) auf; während die Werte aus dem GWK für die Böschungsneigung  $1:6$  bis zu Brecherkennzahlen über  $\xi = 5$  nahezu konstant zwischen  $3 < z/H < 3,5$  bleiben, fallen die Werte von BRUUN und GÜNBAK hier auf Werte um  $z/H \sim 2$ . Das starke Maximum, das sich durch den Resonanzeffekt (BRUUN und JOHANNESSEN, 1977) bei den steilen Böschungen ( $1:n$  zwischen  $1:1,5$  und  $1:3$ ) für den Wellenauflauf ergibt, tritt bei der Böschungsneigung  $1:n = 1:6$  im Bereich der untersuchten Brecherkennzahlen nicht hervor.

Beim Wellenablauf dagegen ist im gesamten Bereich der Brecherkennzahlen  $0,6 < \xi < 6$  eine gute Übereinstimmung zwischen den Ergebnissen von BRUUN und GÜNBAK (1977) und den Werten ( $D = 98\%$ ) nach Abb. 5 festzustellen; geringe Abweichungen können hier auch auf Maßstabeffekte zurückzuführen sein (Wellenhöhen im GWK bis zu 2 m).

Nach Modellversuchen mit glatten Böschungen mit  $1:n$  zwischen  $1:3,3$  und  $1:10$  von MORAES (1970) hat BATTJES (1974) den Reflexionskoeffizienten  $K_R$  (= Verhältnis der Höhe der reflektierten zu der ankommenden Welle) in Abhängigkeit von der Brecherkennzahl  $\xi$  dargestellt; Abb. 8 zeigt die Ergebnisse für die verschiedenen Böschungsneigungen, bei denen die steilste Böschung ( $1:3,3$ ) die höchste und die flachste Böschung ( $1:10$ ) die niedrigsten Meßwerte liefert; dies tritt besonders bei den Brecherkennzahlen  $\xi > 2,5$  in Erscheinung. Werden nur die Meßwerte für die Böschungsneigungen  $1:6,7$  und  $1:5$  ausgesucht und diese dem dimensionslosen Wellenhub  $z_{AB}/H$  nach Gleichung (1) und Abb. 5 (für  $1:6$ ) gegenübergestellt, so ergeben sich nahezu gleiche Kurvenverläufe für den Reflexionsfaktor  $K_R$  und für den Wellenhub  $z_{AB}/H$  (Abb. 9). Daraus geht hervor, daß der Wellenhub  $z_{AB}$  aus der dynamischen Dauerlinie auch als ein Maß für das Reflexionsverhalten betrachtet werden kann.

#### 4. Wellenauflauf- und Wellenablaufgeschwindigkeiten sowie die Wellenauflaufhöhe $z_{98}$ in Zusammenhang mit der dynamischen Dauerlinie

Die Wellenauflauf- und Wellenablaufgeschwindigkeiten ergeben sich aus der kinetischen Energie der brechenden Wellen, sie werden um so größer, je kleiner der Energieumsatz beim Brechen der Wellen und je größer der Reflexionsfaktor (Abb. 8 und 9) wird. Da beim Brechen hochturbulente Zweiphasenströmungen aus Wasser-Luft-Gemischen auftreten, die zudem von Zufallsprozessen begleitet werden, ist eine analytische Behandlung der instationären Auf- und Ablaufströmungen schwierig; sie werden am besten durch experimentelle Untersuchungen in möglichst großem Maßstab erfaßt. Von größter Bedeutung sind dabei die



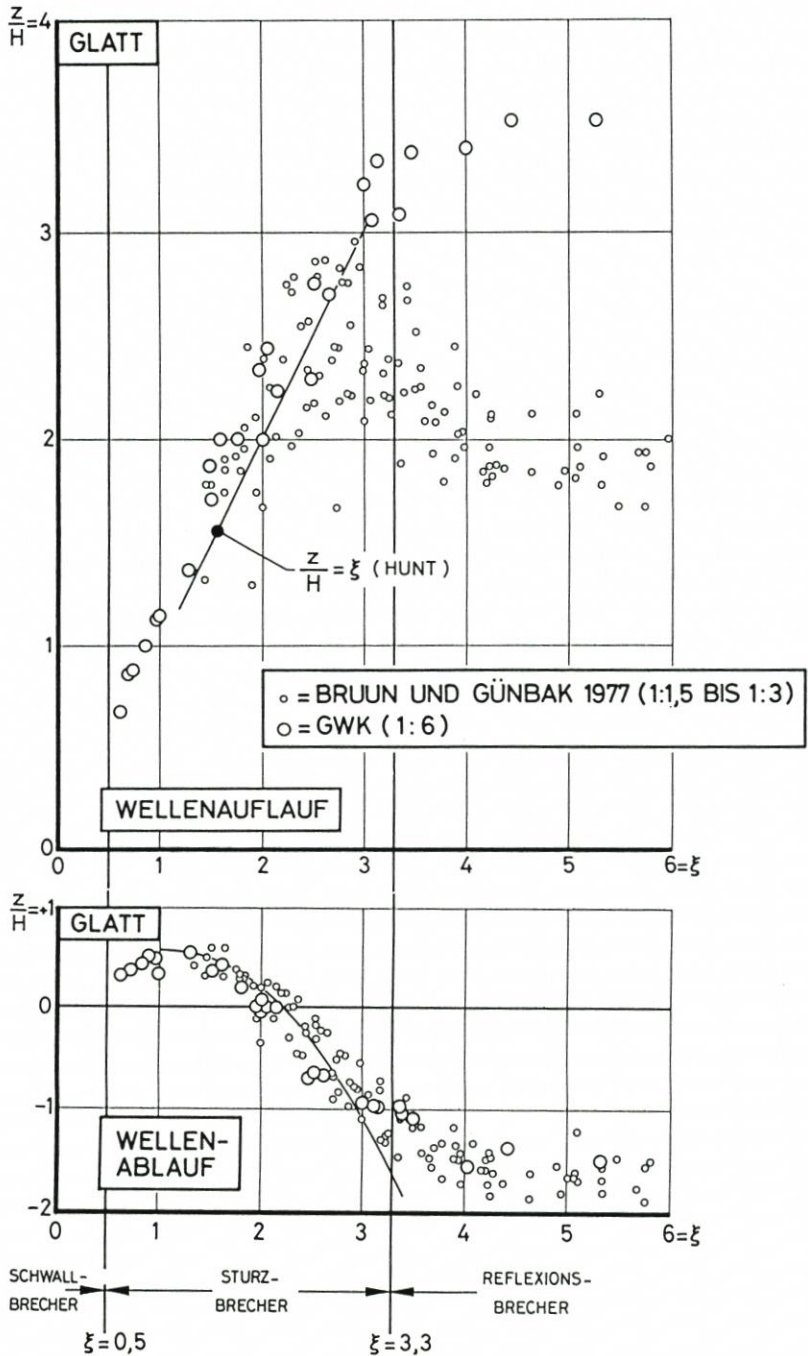


Abb.7: Vergleich der Werte  $z(D = 2\%)$  und  $z(D = 98\%)$  (GWK) mit den Versuchsergebnissen von BRUUN und GÜNBAK (1977) für die Wellenaufhöhung (oben) und das Wellental (unten)

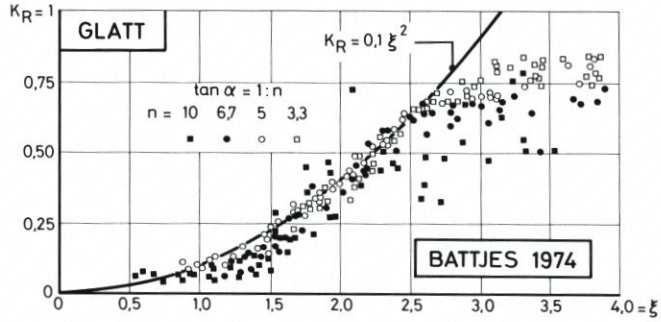


Abb.8: Reguläre Wellen, Böschung glatt, 1:n von 3,3 ≤ n ≤ 10: Reflexionskoeffizient  $K_R$  als Funktion der Brecherkennzahl  $\xi$  nach BATTJES (1974)

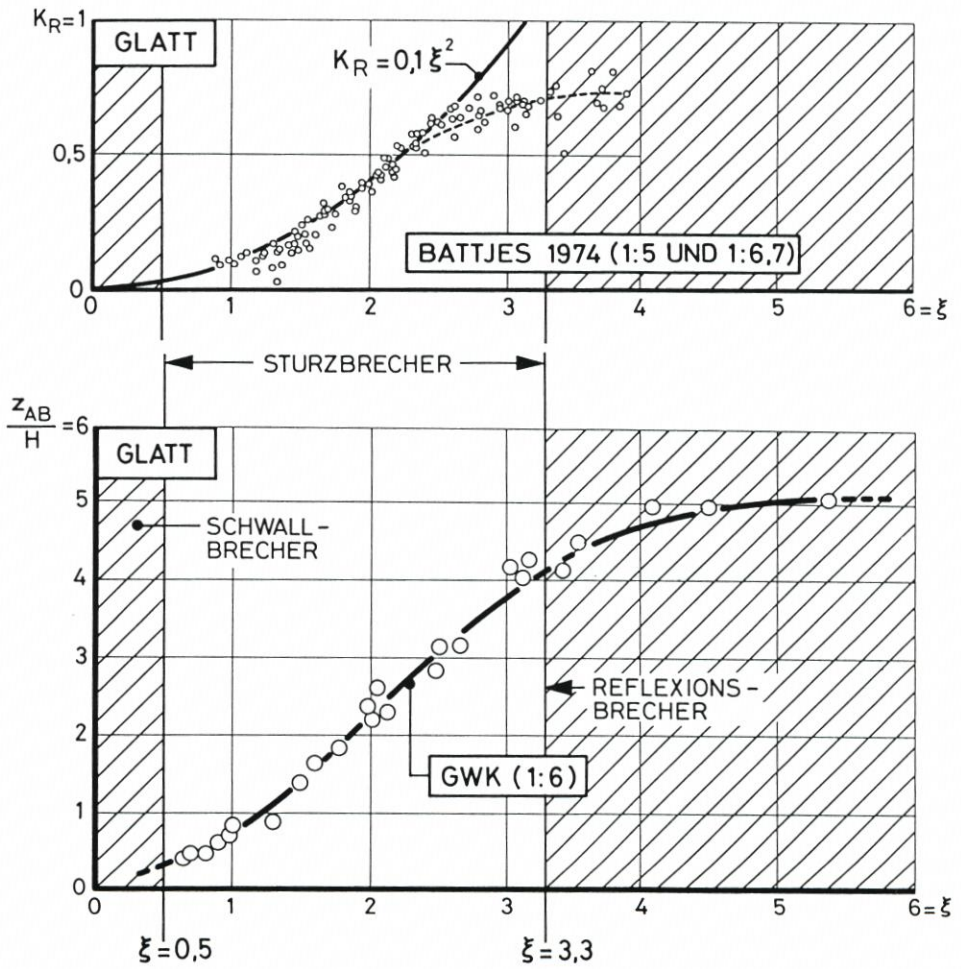


Abb.9: Reguläre Wellen, Böschungen glatt, 1:n = 1:6: Vergleich des Reflexionskoeffizienten  $K_R$  nach BATTJES (1974) mit dem Wellenhub  $z_{AB}$  aus der dynamischen Dauerlinie ( $z_{AB} = z[D = 2\%] - z[D = 98\%]$ )

örtlichen und zeitlichen Maximalgeschwindigkeiten  $v_{\max}$ ; eine physikalisch sinnvolle Erfassung dieser Maximalgeschwindigkeiten kann dadurch erfolgen, daß sie nach den Regeln der Ähnlichkeitsmechanik auf eine einfach definierbare mittlere Geschwindigkeit bezogen werden.

Dafür eignet sich eine mittlere Strömungsgeschwindigkeit, bei der aus der Wellenaufbauhöhe  $z$  nach der Formel von HUNT (Gleichung [5] oder [6]) zunächst die Wellenaufbauhöhe  $s$  auf der Böschung nach der einfachen Beziehung

$$s_{\text{HUNT}} = \frac{z_{\text{HUNT}}}{\sin\alpha} \quad (7)$$

berechnet wird und weiterhin die vereinfachende Annahme getroffen wird, daß dieser Weg  $s_{\text{HUNT}}$  beim Wellenaufbau in der Zeit der halben Wellenperiode  $T/2$  zurückgelegt wird; diese formale mittlere Geschwindigkeit soll als  $v_{\text{HUNT}}$  bezeichnet werden (FÜHRBÖTER/WITTE, 1989) und ergibt sich mit Gleichung (6) und (7) zu

$$v_{\text{HUNT}} = \frac{s_{\text{HUNT}}}{T/2} = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot \frac{1}{\cos\alpha} \cdot \sqrt{g \cdot H} \quad (8)$$

Wird angenommen, daß von der Ähnlichkeitsmechanik her allein die Brecherkennzahl  $\xi$  die Größe der maximalen Strömungsgeschwindigkeit – hier sowohl für den Wellenaufbau als auch für den Wellenablauf – bestimmt, so kann als dimensionsloser Ausdruck eine Funktion

$$\frac{v_{\max}}{v_{\text{HUNT}}} = f(\xi) \quad (9)$$

definiert werden; diese kann mit Gleichung (8) aber auch in der Form

$$\frac{v_{\max}}{\sqrt{g \cdot H}} = f_1(\xi) \quad (10)$$

mit

$$f_1(\xi) = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{1}{\cos\alpha} \cdot f(\xi) \quad (11)$$

geschrieben werden, wobei die Strömungsgeschwindigkeit wie bei BATTJES und ROOS (1975) auf die Schnelligkeit einer Flachwasserwelle bei der Wassertiefe  $H$  nach LANGRANGE bezogen wird. Eine weitere dimensionslose Form kann über Gleichung (5) und (7) als

$$v_{\text{HUNT}} = \frac{\xi \cdot H / \sin\alpha}{T/2} \quad (12)$$

mit Gleichung (9) und mit einer Erweiterung mit dem Faktor  $1/\pi$  zu

$$\frac{v_{\max}}{H \cdot \pi / T} = f_2(\xi) \quad (13)$$

mit

$$f_2(\xi) = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{1}{\sin\alpha} \cdot \xi \cdot f(\xi) \quad (14)$$

gewonnen werden, die den Vorteil hat, daß durch die Orbitalgeschwindigkeit  $H \cdot \pi/T$ , die einer Tiefwasserwelle der Höhe  $H$  entspricht, alle Wellenparameter in diesem Ausdruck zusammengefaßt sind.

Es muß dabei aber beachtet werden, daß nur die Funktion  $f(\xi)$  nach Gleichung (9) frei von weiteren Einflüssen der Böschungsneigung  $\alpha$  entsprechend  $\tan\alpha = 1:n$  ist; bei der

Funktion  $f_1(\xi)$  (Gleichung [11]) ist mit  $\cos\alpha$  eine schwache, bei der Funktion  $f_2(\xi)$  (Gleichung [14]) mit  $\sin\alpha$  eine starke zusätzliche Abhängigkeit von der Böschungneigung vorhanden.

Die Verteilung der – außerdem zeitlich veränderlichen – Strömungsgeschwindigkeiten auf der Böschung wird zweckmäßigerweise wieder auf die vertikalen Abstände  $z$  zum Ruhewas-

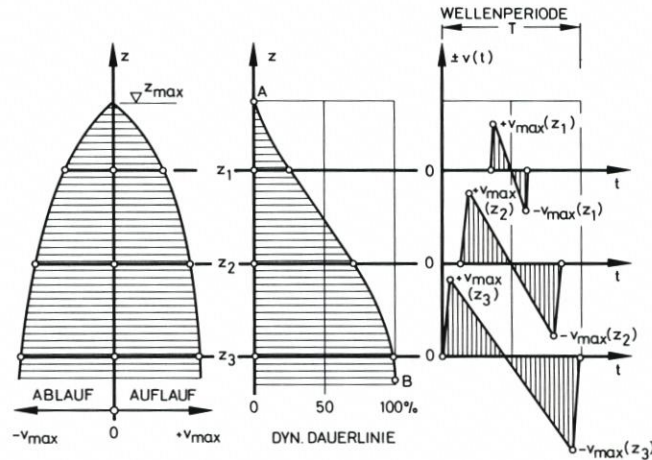


Abb.10: Beziehungen zwischen den Strömungsgeschwindigkeiten beim Wellenauf- und -ablauf (links), der dynamischen Dauerlinie (Mitte) und dem zeitlichen Verlauf sowie der Dauer der Strömungsbelastung (rechts) als Funktion der Höhe  $z$  über dem Ruhewasserspiegel (schematisch)

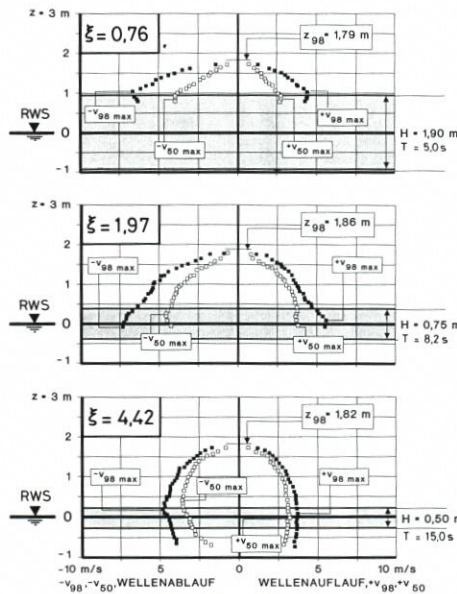


Abb.11: Reguläre Wellen, Böschung glatt,  $1:n = 1:6$

Wellenauf- und -ablaufgeschwindigkeiten als  $v_{50}$  und  $v_{98}$  in Abhängigkeit von der Höhe  $z$  über dem Ruhewasserspiegel bei verschiedenen Brecherkennzahlen  $\xi$  (nach FÜHRBÖTER/WITTE, 1989)

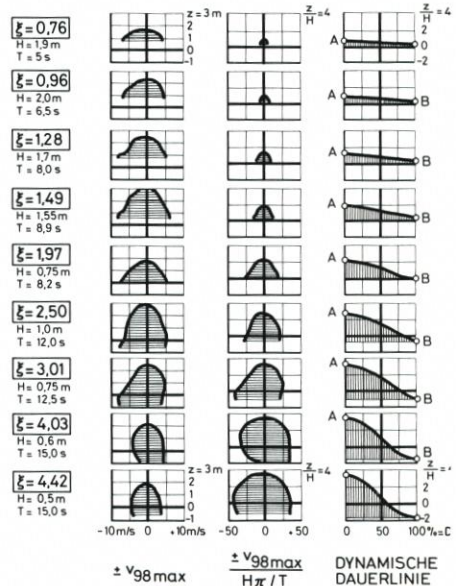


Abb.12: Reguläre Wellen, Böschung glatt,  $1:n = 1:6$

Vergleich zwischen den Wellenauf- und -ablaufgeschwindigkeiten (links und Mitte) und den dynamischen Dauerlinien (Daten nach FÜHRBÖTER/WITTE, 1989)

serspiegel bezogen, wie es auf Abb. 10 bis 12 dargestellt ist. Abb. 10 (rechts) zeigt zunächst in schematischer Form die zeitlichen Verläufe der Strömungsgeschwindigkeiten in verschiedenen Höhen  $z$ ; die größten Strömungsgeschwindigkeiten treten dabei sowohl beim Wellenauflauf als auch beim -ablauf als sog. Frontgeschwindigkeiten bei den Durchgängen des Auflaufschwalles als  $+v_{\max}(z)$  bzw. des Ablaufschwalles als  $-v_{\max}(z)$  auf. Zwischen Auflauf und Ablauf tritt mit  $v = 0$  eine Bewegungsumkehr ein. Der Vergleich mit der dynamischen Dauerlinie (Abb. 10 Mitte) ergibt die wichtige Beziehung, daß die anteilige Zeit, während der die Böschung auf der Höhenstufe  $z$  durch die Strömungen belastet wird, genau dem Wert  $D(z)$  der Dauerlinie auf dieser Stufe  $z$  entspricht. Die Einhüllenden der örtlichen Maximalgeschwindigkeiten  $\pm v_{\max}(z)$  weisen dabei in den meisten Fällen ebenfalls eine Zunahme dieser Maximalgeschwindigkeiten mit zunehmenden Dauerwerten auf (Abb. 10 links), so daß hier über die dynamische Dauerlinie eine enge Beziehung zwischen der Höhe und der Dauer der Strömungsbelastungen besteht.

Die erwähnten stochastischen Effekte beim Brechen der Wellen, die auch bei streng regulären Wellen vorhanden sind, können in einer statistischen Auswertung dahingehend berücksichtigt werden, daß wie bei der Wellenauflaufhöhe hier für jede Höhenstufe und für eine entsprechende Zahl von Wellen die Werte  $v_{98}$  und  $v_{50}$  als diejenigen Werte definiert werden, die bei 2 % bzw. bei 50 % der Wellen erreicht oder überschritten werden (FÜHRBÖTER/WITTE, 1989). Für drei Brecherkennzahlen sind auf Abb. 11 die Verteilungen dieser Werte  $v_{98}$  und  $v_{50}$  in bezug auf den Ruhewasserspiegel (RWS) angegeben, wobei die beiden oberen Verteilungen ( $\xi = 0,76$  und  $\xi = 1,97$ ) zu Sturzbrechern, die untere Verteilung ( $\xi = 4,42$ ) zu einem Reflexionsbrecher gehören; der Unterschied zwischen  $v_{98}$  und  $v_{50}$  drückt den Einfluß der stochastischen Prozesse beim Brechen der Wellen aus.

Die Veränderungen der örtlichen Geschwindigkeitsverteilungen (hier nur für  $v_{98}$ ) mit der Brecherkennzahl in Verbindung mit den zugehörigen dynamischen Dauerlinien gehen deutlich aus Abb. 12 hervor; besonders die nach Gleichung (13) in dimensionsloser Form dargestellten Geschwindigkeitsverteilungen zeigen, wie mit zunehmender Brecherkennzahl  $\xi$  sowohl der Belastungsbereich als auch die Belastungshöhe durch die Strömungsgeschwindigkeiten zunimmt, die größten Werte treten im Bereich des Reflexionsbrechers ( $\xi > 3,3$ ) auf.

Für die Böschungsbelastung interessieren besonders die maximalen Strömungsgeschwindigkeiten und die Orte ihres Auftretens auf der Böschung bzw. zum Ruhewasserspiegel. Die Maxima  $v_{98\max}$  der Einhüllenden für  $v_{98}$  (vgl. Abb. 11) sind getrennt für den Wellenauflauf ( $+v_{98\max}$ ) und den Wellenablauf ( $-v_{98\max}$ ) in doppellogarithmischer Darstellung in den dimensionslosen Funktionen nach den Gleichungen (9), (10) und (13) auf Abb. 13 in ihren Abhängigkeiten von den Brecherkennzahlen dargestellt.

Aus der Gegenüberstellung der maximalen Auflauf- und Ablaufgeschwindigkeiten geht zunächst hervor (Abb. 13, vgl. auch Abb. 11 und 12), daß die Ablaufgeschwindigkeiten durchweg größer als die Auflaufgeschwindigkeiten sind; dies ist physikalisch dadurch begründet, daß die Schichtdichten des abströmenden Wassers beim Wellenablauf geringer als die des Wellenauflaufes sind. Alle dimensionslosen Funktionen zeigen weiterhin im Sturzbrecherbereich bis  $\xi \sim 3,3$  einen monoton steigenden Verlauf, der durch Potenzfunktionen genähert werden kann (nach FÜHRBÖTER/WITTE, 1989, jedoch mit vereinfachten Anpassungsfunktionen):

$$\text{Abb. 13a) } \frac{v_{\max}}{v_{\text{HUNT}}} = f(\xi) \quad (9)$$

$$+ v_{98\max}: f(\xi) = 1,7 \cdot \xi^{0,4} \quad (9a)$$

$$- v_{98\max}: f(\xi) = 2,2 \cdot \xi^{0,4} \quad (9b)$$

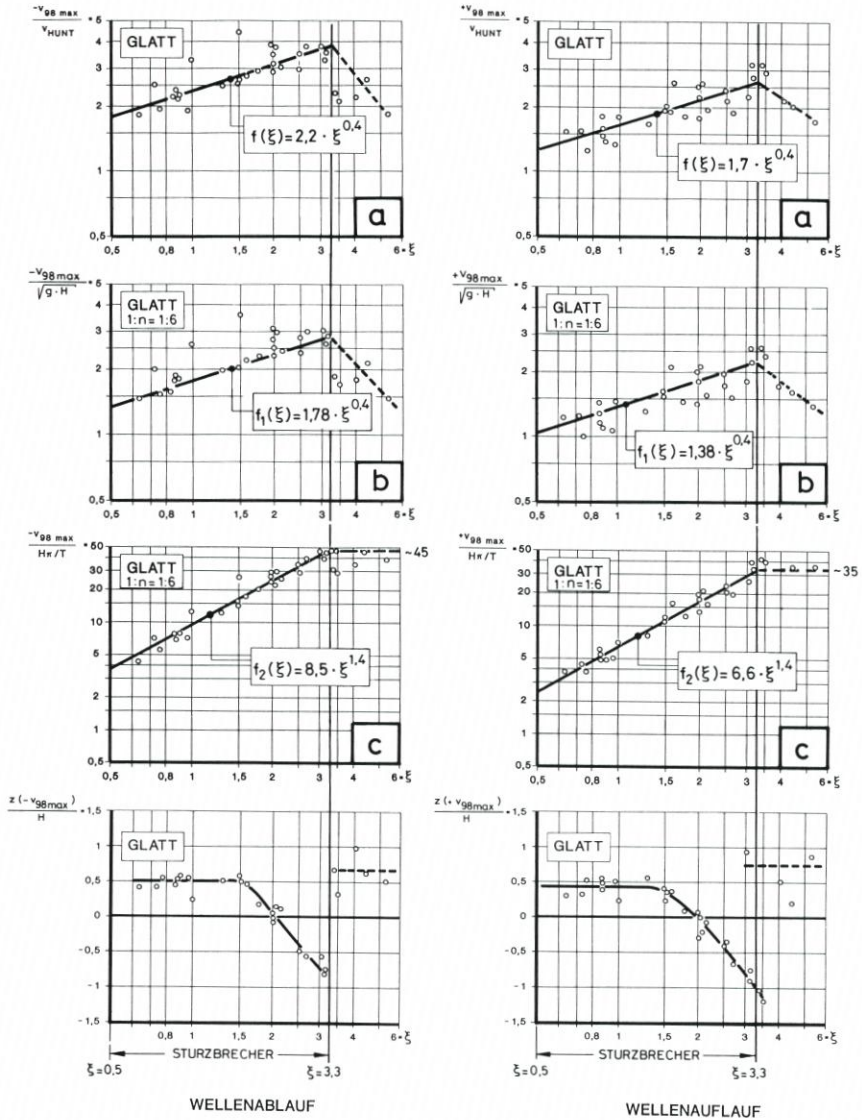


Abb.13: Reguläre Wellen, Böschung glatt, 1 : n = 1 : 6:

Maximale Strömungsgeschwindigkeiten  $\pm v_{98max}$  für Wellenauflauf und -ablauf in dimensionslosen Darstellungen:

a) Auftragung als  $f(\xi) = \frac{\pm v_{98max}}{V_{HUNT}}$

b) Auftragung als  $f_1(\xi) = \frac{\pm v_{98max}}{\sqrt{gH}}$

c) Auftragung als  $f_2(\xi) = \frac{\pm v_{98max}}{H \cdot \pi/T}$

unten: Geometrischer Ort des Auftretens von  $\pm v_{98max}$  über dem Ruhewasserspiegel ( $z = 0$ )

$$\text{Abb. 13b) } \frac{v_{\max}}{\sqrt{gH}} = f_1(\xi) \quad (10)$$

$$+ v_{98\max}: f_1(\xi) = 1,38 \cdot \xi^{0,4} \quad (10a)$$

$$- v_{98\max}: f_1(\xi) = 1,78 \cdot \xi^{0,4} \quad (10b)$$

$$\text{Abb. 13c) } \frac{v_{\max}}{H\pi/T} = f_2(\xi) \quad (13)$$

$$+ v_{98\max}: f_2(\xi) = 6,6 \cdot \xi^{1,4} \quad (13a)$$

$$- v_{98\max}: f_2(\xi) = 8,5 \cdot \xi^{1,4} \quad (13b)$$

Ein scharfer Übergang tritt überall an der Grenze zwischen dem Bereich des Sturzbrechers und dem des Reflexionsbrechers bei  $\xi \sim 3,3$  auf; die (verwandten) Funktionen  $f(\xi)$  und  $f_1(\xi)$  (Abb. 13a und b) weisen sämtlich für  $\xi > 3,3$  eine fallende Tendenz auf, während die Funktionen  $f_2(\xi)$  in diesem Bereich mit  $f_2(\xi) \sim 35$  für den Wellenauflauf und  $f_2(\xi) \sim 45$  für den Wellenablauf nahezu konstant bleiben (Abb. 13c).

BATTJES und ROOS (1975) erhielten bei ihren Auswertungen nach der dimensionslosen Funktion  $f_1(\xi)$  eine Potenz von 0,5 anstatt 0,4; allerdings wurde hier eine andere Definition der mittleren Geschwindigkeit verwendet. Von Interesse ist jedoch, daß bei diesen Untersuchungen mit drei Böschungsneigungen zwischen  $n = 3,5$  und 7 eine einzige Funktion  $f_1(\xi)$  erhalten wurde. Dies weist (abgesehen von der schwachen Abhängigkeit von  $\cos \alpha$  in  $f_1(\xi)$  nach Gleichung [11]) darauf hin, daß in diesen Grenzen eine Übertragung der Geschwindigkeitswerte auf andere Böschungsneigungen möglich ist, was dann auch für die Funktion  $f(\xi)$  gültig ist.

Die von GALVIN (1968) definierte Übergangsform zwischen dem Sturz- und Reflexionsbrecher als „collapsing breaker“ tritt bei den Funktionen für die maximalen Strömungsgeschwindigkeiten  $v_{98\max}$  auf Abb. 13 nicht in Erscheinung, dagegen ist bei den Höhenstufen, auf denen diese maximalen Strömungsgeschwindigkeiten auftreten (vgl. auch Abb. 12) im Bereich der Brecherkennzahlen zwischen  $\xi \sim 1,5$  und  $\xi \sim 3,3$  hier ein kennzeichnender Abfall der Werte  $z(\pm v_{98\max})/H$  festzustellen (Abb. 13 unten). Für Brecherkennzahlen  $\xi < 1,5$  liegen diese Werte für den Wellenauflauf wie für den Wellenablauf konstant auf  $\sim 0,5 H$ ; sie fallen dann bis auf Werte um  $-H$  bei  $\xi \sim 3,3$ , um dann im Reflexionsbrecherbereich wieder sprunghaft auf Streuwerte um  $+0,5 H$  anzusteigen (Abb. 13 unten). Allgemein kann ausgesagt werden, daß der Bereich der maximalen Strömungsgeschwindigkeiten eng auf die Höhen um den Ruhewasserspiegel beschränkt ist.

Abb. 14 weist nochmals auf die engen Beziehungen zwischen der dynamischen Dauerlinie (hier durch den Wellenhub  $z_{AB}/H$  repräsentiert) und den Strömungsparametern (hier in der dimensionslosen Form nach  $f_2[\xi]$  auf  $H\pi/T$  bezogen) hin; außerdem ist in Abb. 14 auch die dimensionslose Wellenauflaufhöhe  $z_{98}/H$  (nach FÜHRBÖTER/SPARBOOM/WITTE, 1989) einbezogen. Aus der doppellogarithmischen Darstellung geht der monotone Anstieg aller Funktionen bis zu dem Knickpunkt bei  $\xi \sim 3,3$  hervor, der den Sturzbrecher- von dem Reflexionsbrecherbereich trennt; bis zu  $\xi$ -Werten um 5 zeigen dann alle Funktionen ein nahezu konstantes Verhalten. Wieder zeigt Abb. 14, daß mit zunehmender Brecherkennzahl nicht nur die relative Wellenauflaufhöhe, sondern in starkem Maße auch die Höhe der Strömungsgeschwindigkeiten und die anteilige Dauer der Strömungsbelastungen zunehmen.

Zur Abschätzung der Wellenauflaufhöhen  $z_{98}$  sowie der maximalen Strömungsgeschwindigkeiten  $+v_{98\max}$  (Auflauf) und  $-v_{98\max}$  (Abfall) sind für eine glatte Böschung mit  $1:n = 1:6$  auf Abb. 15 für reguläre Wellen deren Abhängigkeiten von der Wellenhöhe  $H$  und der

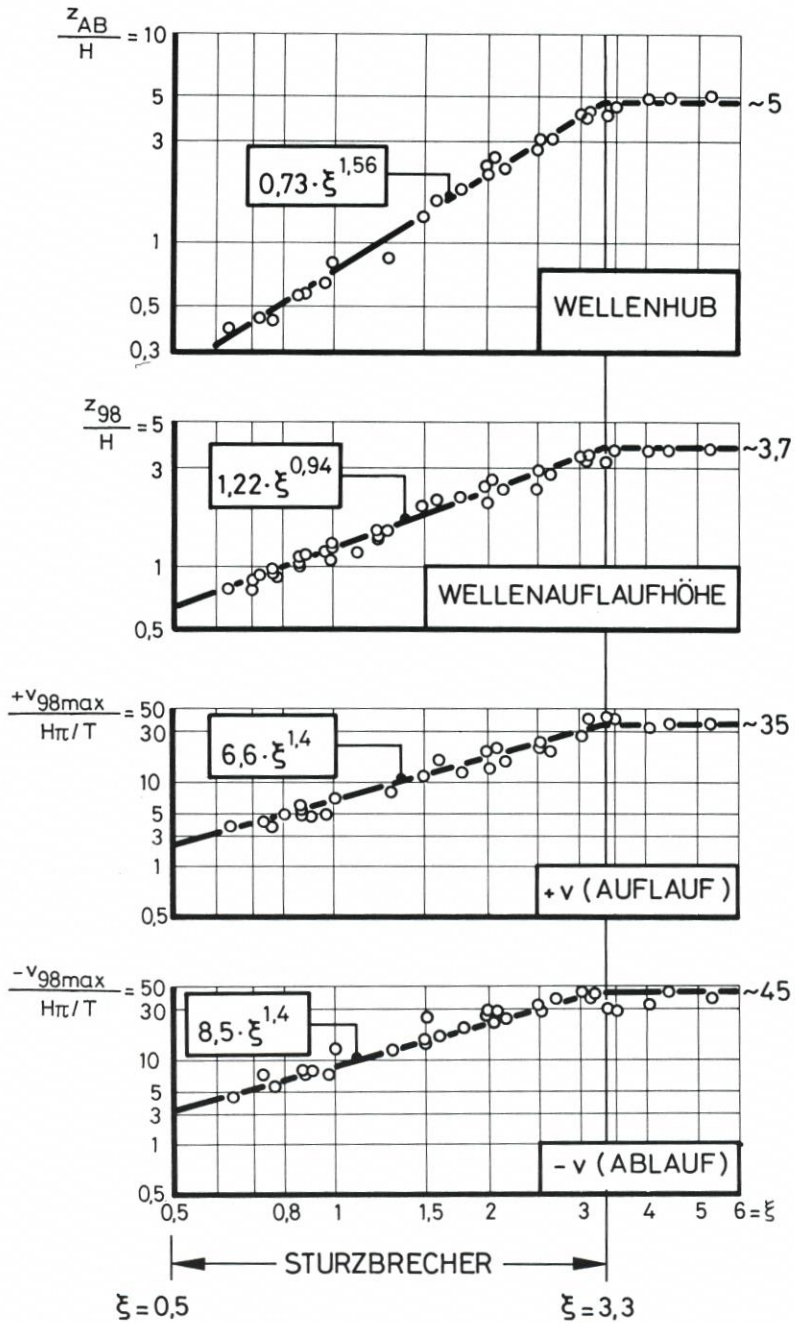


Abb.14: Reguläre Wellen, Böschung glatt, 1:n = 1:6:  
 Vergleich des Wellenhubes  $z_{AB}$  (aus der dynamischen Dauerlinie), der Wellenauflaufhöhe  $z_{98}$  und der Wellenauf- und -ablaufgeschwindigkeiten  $\pm v_{98max}$  in dimensionslosen Auftragungen als Funktionen der Brecherkennzahl  $\xi$



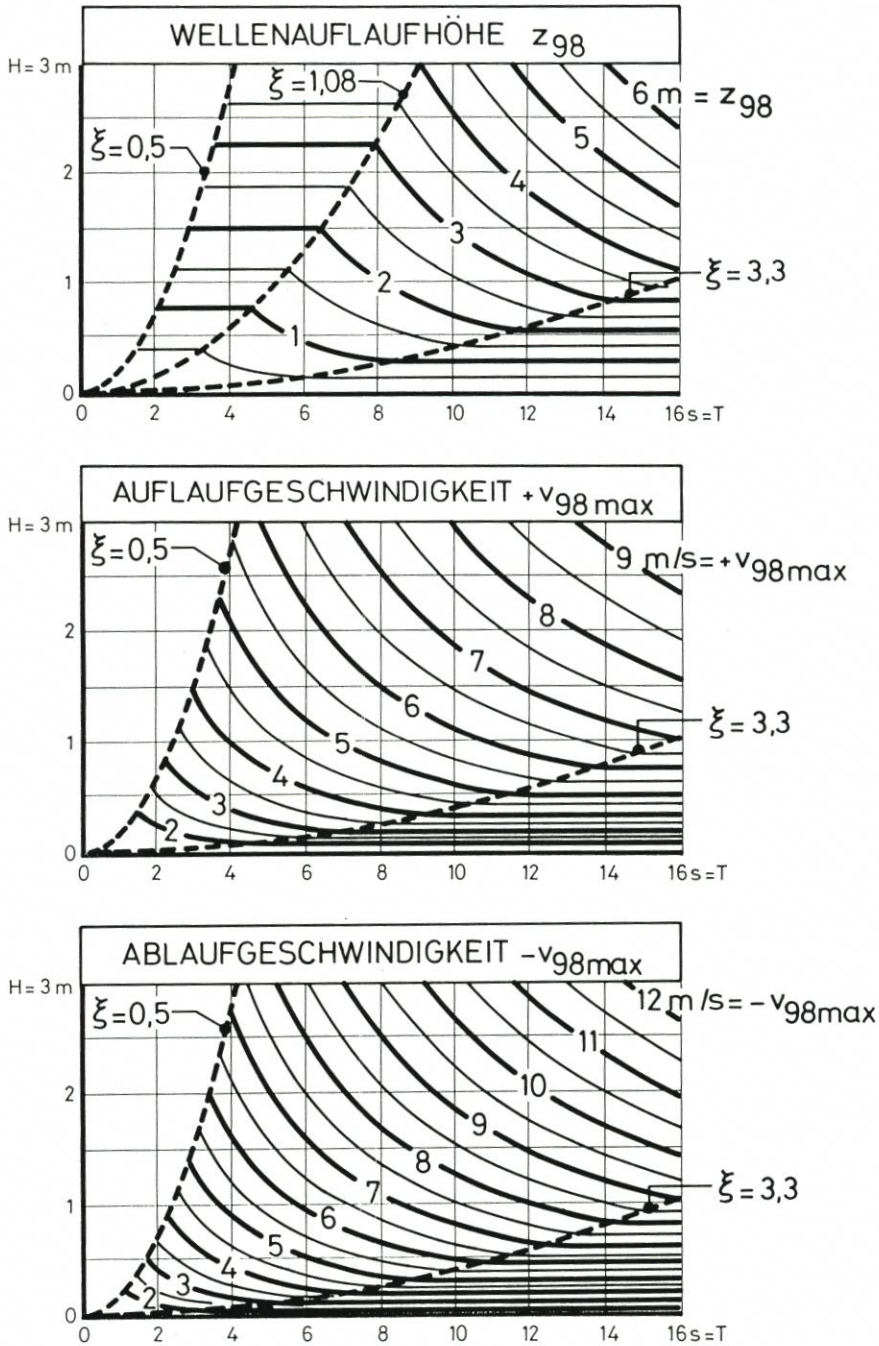


Abb. 15: Reguläre Wellen, Böschung glatt,  $1:n = 1:6$ :  
 Wellenaufbrauchhöhe  $z_{98}$  (oben), Wellenaufbrauchgeschwindigkeit  $+v_{98\text{max}}$  (Mitte) und Wellenablaufgeschwindigkeit  $-v_{98\text{max}}$  (unten) als Funktionen der Wellenhöhe  $H$  und der Wellenperiode  $T$

Wellenperiode  $T$  aufgetragen. Bei der Wellenaufbauhöhe  $z_{98}$  wurde berücksichtigt, daß im Bereich kleiner Brecherkennzahlen (hier:  $\xi < 1,08$ ) die Formel von WASSING (1957)

$$z_{98} = 8 \cdot \frac{H}{n} \quad (15)$$

eine gute Näherung bietet (FÜHRBÖTER/SPARBOOM/WITTE, 1989); bei den Auf- und Ablaufgeschwindigkeiten ergeben sich durch die Verwendung vereinfachender Anpassungsfunktionen (vgl. Abb. 13) besonders im Extrapolationsbereich gewisse Änderungen gegenüber den Werten bei FÜHRBÖTER und WITTE (1989).

## 5. Einflüsse verschiedener Rauheiten und von Wellenspektren auf die dynamischen Dauerlinien

### 5.1 Vorbemerkung

Es wurden hier die Ergebnisse von Versuchsreihen im Großen Wellenkanal (GWK) ausgewertet, die eingehend von FÜHRBÖTER/SPARBOOM/WITTE (1989) beschrieben werden; es sollen hier nur kurz die wichtigsten Versuchsparameter angegeben werden:

Die Asphaltböschung kann in ihrer Wirkung als hydraulisch glatt angesehen werden. Als Rauheiten werden Kunstgras (als „Gras“ bezeichnet) und Betonblöcke auf der Asphaltdecke (als „Blöcke“ bezeichnet) verwendet. Das Kunstgras mit einer Halmlänge von 28 mm entspricht etwa der Rauheit eines beweideten Grasdeiches und ist auf ganzer Länge der Böschung von der Kanalsohle (etwa 5 m unter dem Ruhewasserspiegel) bis zur Deichkrone vorhanden; die Betonblöcke dagegen werden nach den Versuchsergebnissen von FRANZIUS (1965) nur oberhalb des Ruhewasserspiegels angebracht. Es handelt sich um Blöcke mit einem quadratischen Grundriß mit der Kantenlänge  $a = 14$  cm und einer Höhe von  $b = 16$  cm, die in versetzten Reihen mit allseitigen Kantenabständen von  $a = 56$  cm angeordnet sind.

Aus der Vielzahl der möglichen Wellenspektren (vgl. NIEMEYER, 1986) wurden Spektren des PIERSON-MOSKOWITZ-Typen ausgewählt, deren Hauptparameter durch die bekannte signifikante Wellenhöhe  $H_s$  als das arithmetische Mittel der 33 höchsten Wellen aus einer Folge von 100 Wellen und aus der zum Energiemaximum gehörigen Peakperiode  $T_p$  gegeben sind; mit  $H_s$  und  $T_p$  anstatt  $H$  und  $T$  ergibt sich dazu nach Gleichung (4) die zugehörige Brecherkennzahl  $\xi_p$ .

### 5.2 Einfluß von Rauheiten

Für drei verschiedene Brecherkennzahlen –  $\xi = 0,96$  und  $\xi = 2,50$  im Sturzbrecherbereich,  $\xi = 4,42$  im Bereich des Reflexionsbrechers – sind auf Abb. 16 für reguläre Wellen die dynamischen Dauerlinien für die glatte Böschung denen bei Gras- und Blockrauheiten gegenübergestellt; es geht aus Abb. 16 hervor, daß die Brecherkennzahl einen wesentlich größeren Einfluß auf die Form der Dauerlinien als die Rauheit hat. Dieses wird auch durch Abb. 17 bestätigt, in der die Hauptparameter der Dauerlinie als  $z(D = 2\%)$  für den Wellenaufbau,  $z(D = 50\%)$  für die mittlere Wasserspiegellage und  $z(D = 98\%)$  für das Wellental in Abhängigkeit von der Brecherkennzahl  $\xi$  aufgetragen sind; der kennzeichnende Verlauf der Funktionen nach Abb. 5 (glatt) bleibt auch bei den rauhen Böschungen erhalten. Auffällig ist bei der Grasböschung, daß hier durch den Rauheitseinfluß bis zu Brecherkenn-

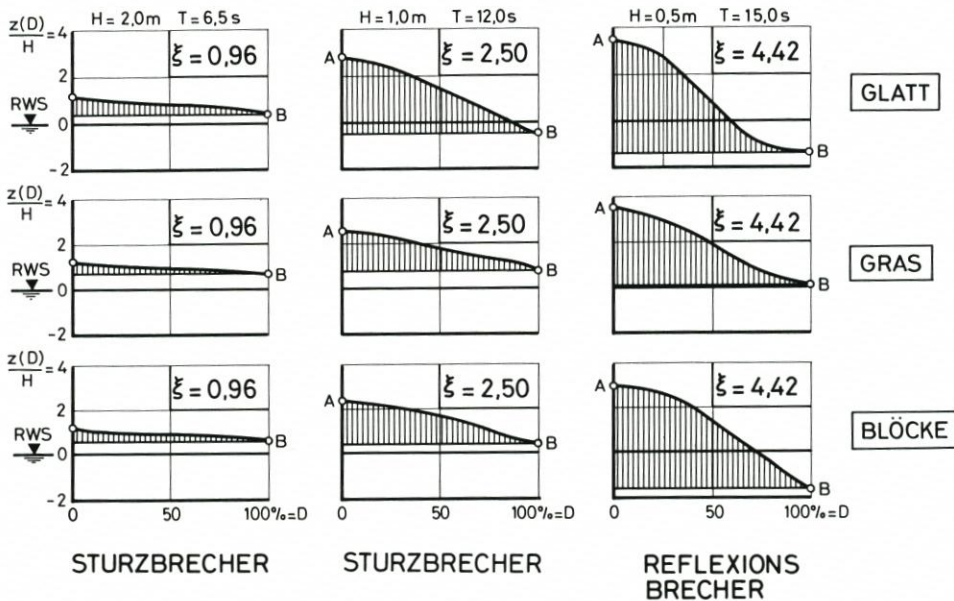


Abb.16: Reguläre Wellen, Böschungen 1:n = 1:6:  
Dynamische Dauerlinien bei verschiedenen Rauheiten und Brecherkennzahlen  $\xi$

zahlen über  $\xi = 4$  die Wechselzone oberhalb des Ruhewasserspiegels bleibt. Daß bei der Blockböschung das Wellental ( $z[D = 98\%]$ ) nur wenig gegenüber der glatten Böschung geändert ist, ist darauf zurückzuführen, daß die Blockrauheiten nur oberhalb des Ruhewasserspiegels vorhanden sind.

Die Veränderungen des Wellenhubes durch die Rauheiten sind auf Abb. 18 dargestellt; die stärkste Verminderung des Wellenhubes tritt bei der Grاسبöschung und bei den größeren Brecherkennzahlen (Übergang zum Reflexionsbrecher) ein.

Auch bei rauen Böschungen besteht wie bei der glatten Böschung (vgl. Abb. 6) im gesamten Bereich der untersuchten Brecherkennzahlen ein linearer Zusammenhang zwischen der Funktion für  $z(D = 2\%)$  und der Wellenauflaufhöhe  $z_{98}$ . Bei der glatten Böschung liegen die Werte für  $z(D = 2\%)$  rd. 6% niedriger als die für  $z_{98}$ ; bei der Grاسبöschung sind es rd. 4% und bei der Böschung mit den Betonblöcken rd. 7% (Abb. 19).

Die quantitativen Einflüsse der Rauheiten auf die Wellenauflaufhöhen und auf die Strömungsgeschwindigkeiten sind in Abschnitt 5.4 zusammengestellt.

### 5.3 Einfluß eines Wellenspektrums

Bei den Versuchen mit Spektren des PIERSON-MOSKOWITZ-Types muß beachtet werden, daß hier nur Brecherkennzahlen  $\xi_p$  zwischen 1 und 2,5 erreicht werden.

Die dynamischen Dauerlinien auf Abb. 20 zeigen wie bei den regulären Wellen (vgl. Abb. 16) eine wesentlich stärkere Abhängigkeit von der Brecherkennzahl  $\xi_p$  als von der Rauheit der Böschung; die Darstellung der Parameter  $z(D = 2\%)$ ,  $z(D = 50\%)$  und  $z(D = 98\%)$  als Funktionen von  $\xi_p$  führt zu dem gleichen Ergebnis (Abb. 21). Immerhin sind hier aber die Wirkungen der Rauheiten gegenüber denen bei regulären Wellen stärker ausgeprägt,

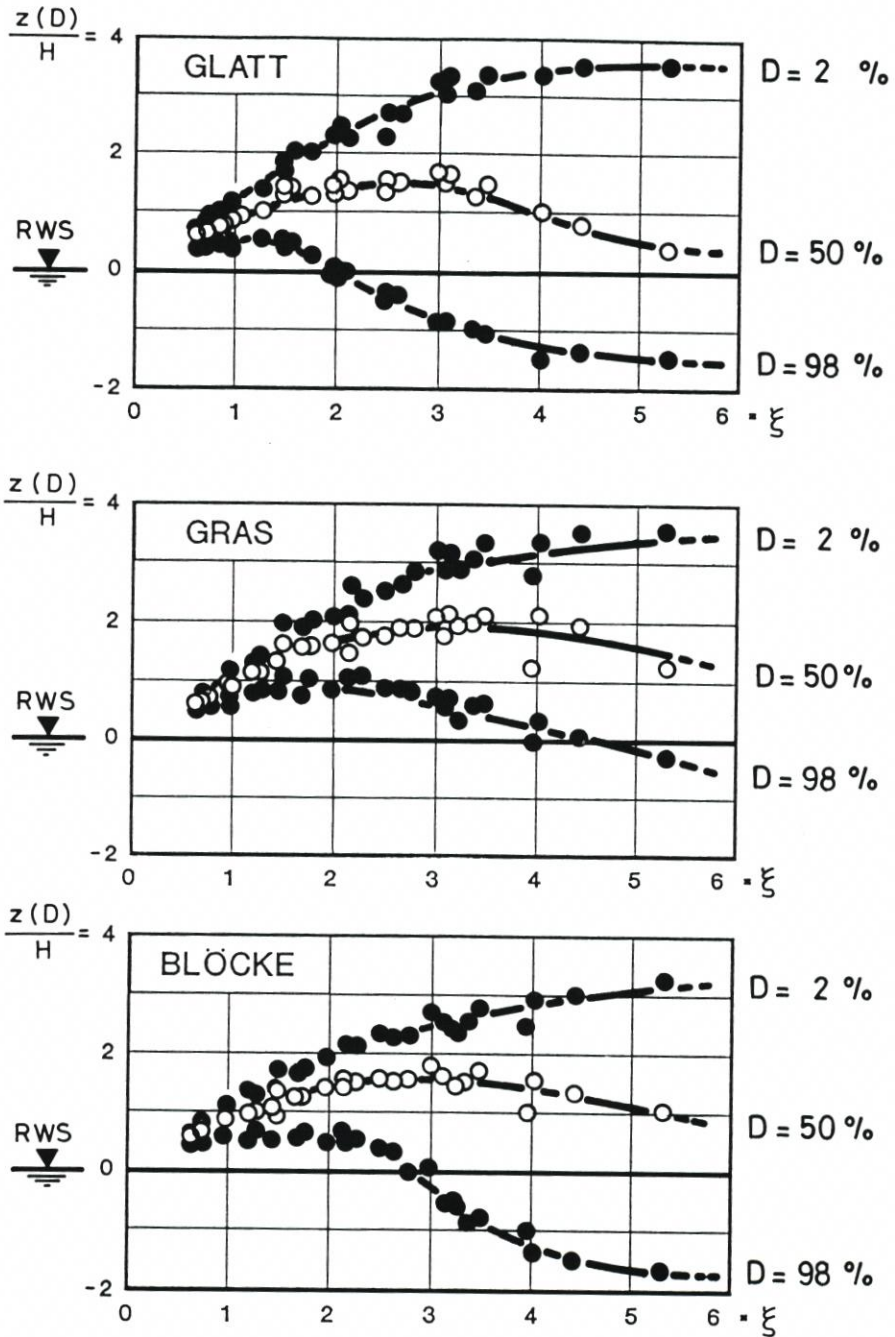


Abb. 17: Reguläre Wellen, Böschungen 1:n = 1:6:  
Wellenaufhöhen als  $z(D = 2\%)$ , mittlere Wasserstände als  $z(D = 50\%)$  und Wellentäler als  $z(D = 96\%)$  bei verschiedenen Rauheiten

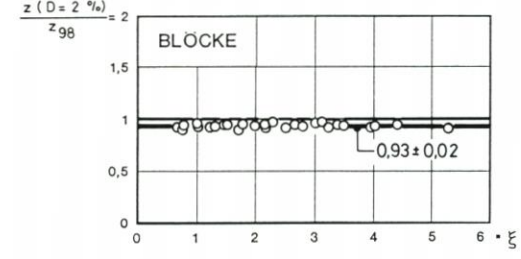
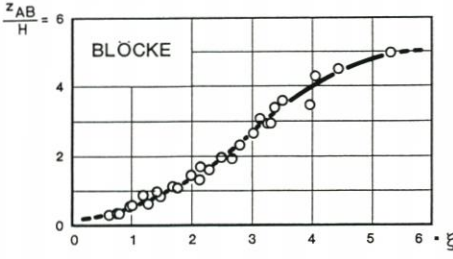
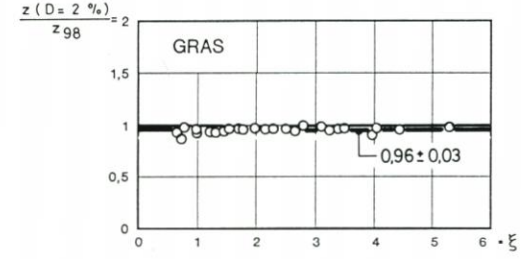
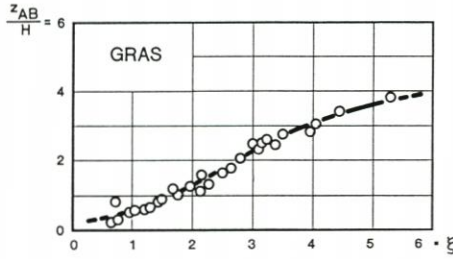
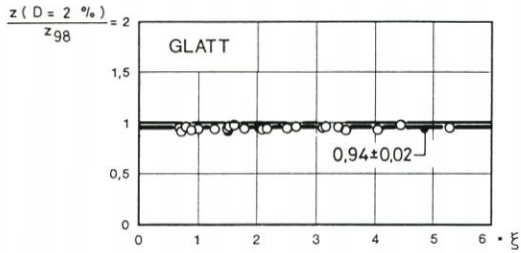
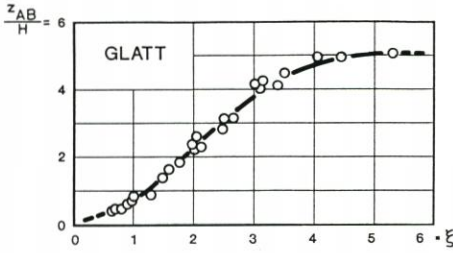


Abb. 18: Reguläre Wellen, Böschungen 1 : n = 1 : 6: Wellenhub  $z_{AB} = z(D = 2\%) - z(D = 98\%)$  bei verschiedenen Rauheiten

Abb. 19: Reguläre Wellen, Böschungen 1 : n = 1 : 6: Verhältniswerte  $z(D = 2\%) / z_{98}$  bei verschiedenen Rauheiten

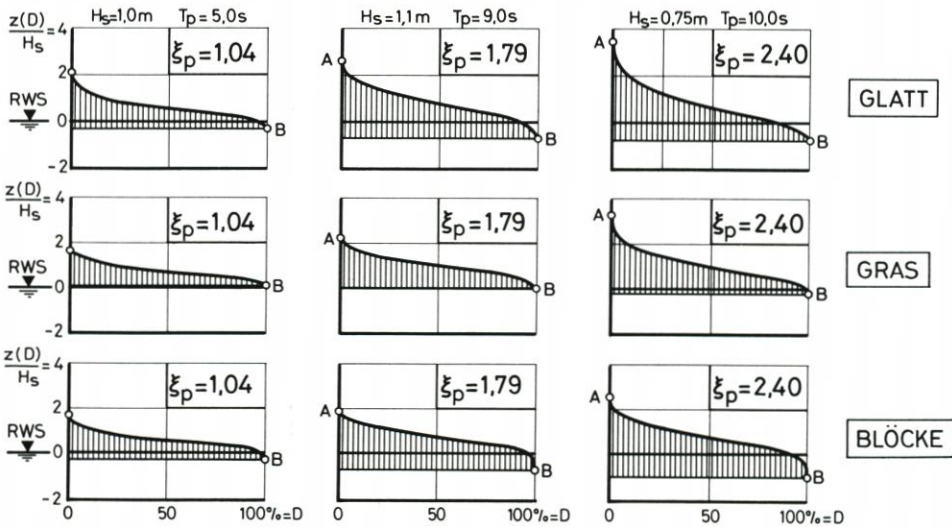


Abb. 20: PIERSON-MOSKOWITZ-Spektrum, Böschungen 1 : n = 1 : 6: Dynamische Dauerlinien bei verschiedenen Rauheiten und Brecherkennzahlen  $\xi$

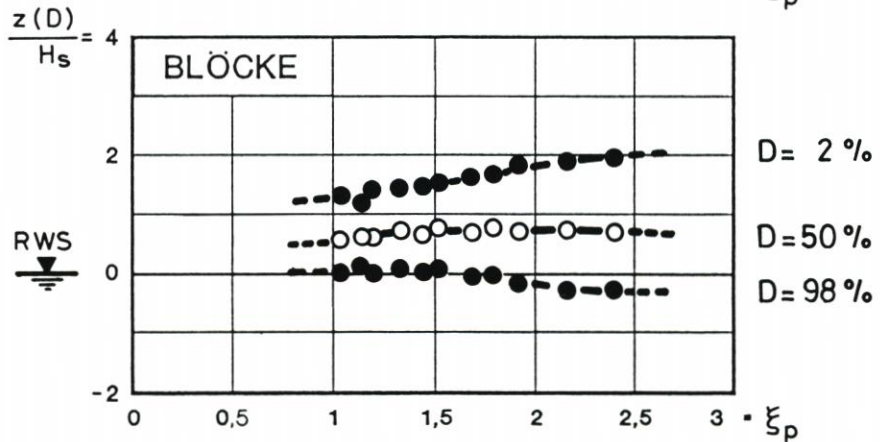
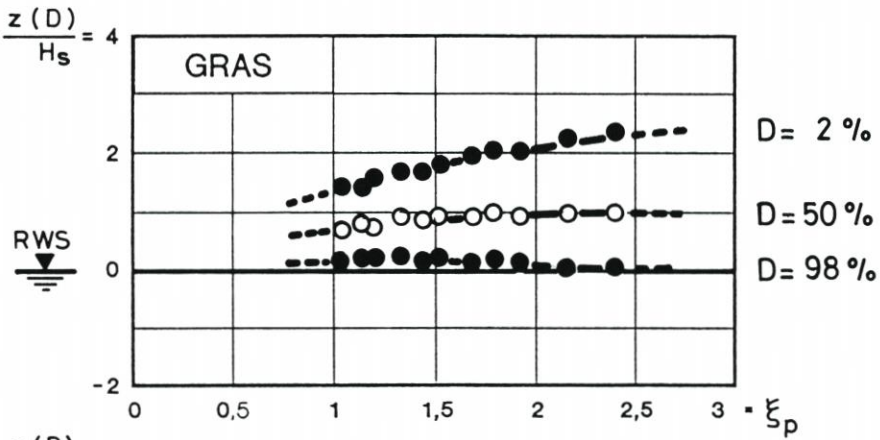
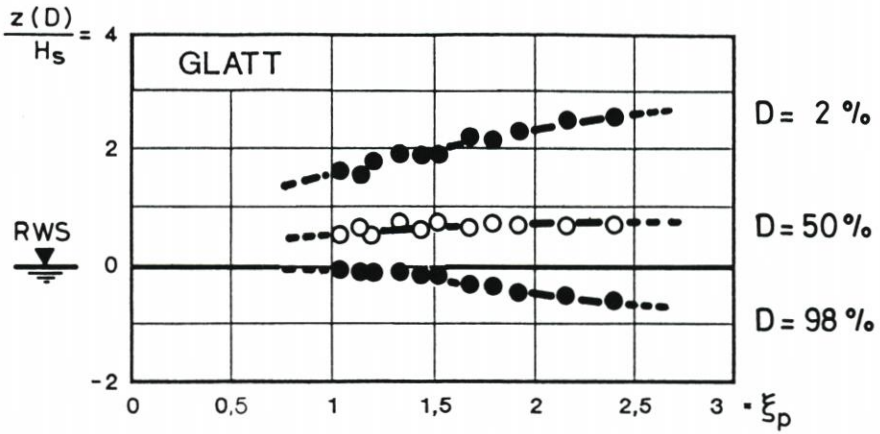


Abb.21: PIERSON-MOSKOWITZ-Spektrum, Böschungen 1:n = 1:6: Wellenauflaufhöhen als  $z(D = 2\%)$ , mittlere Wasserstände als  $z(D = 50\%)$  und Wellentäler als  $z(D = 98\%)$  bei verschiedenen Rauheiten

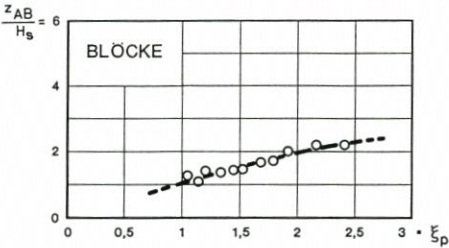
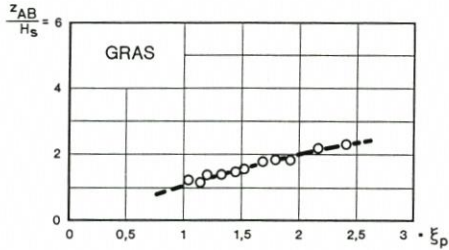
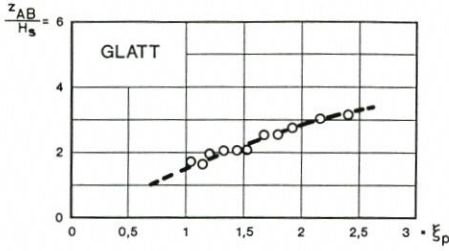


Abb. 22: PIERSON-MOSKOWITZ-SPEKTREN, Böschungen 1:n = 1:6: Wellenhub  $z_{AB} = z(D = 2\%) - z(D = 98\%)$  bei verschiedenen Rauheiten

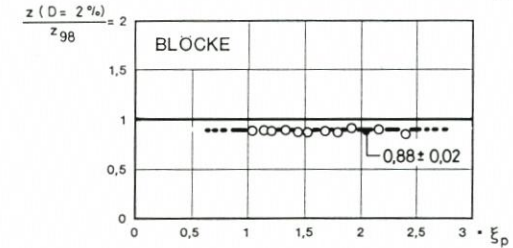
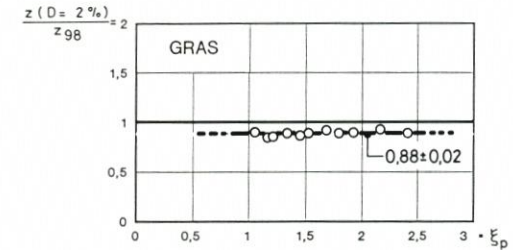
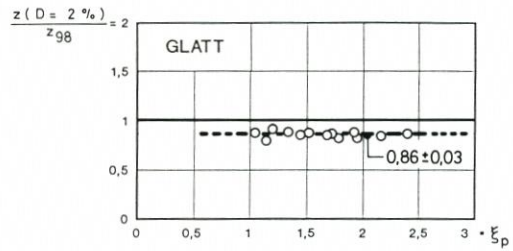


Abb. 23: PIERSON-MOSKOWITZ-SPEKTREN, Böschungen 1:n = 1:6: Verhältniswerte  $z(D = 2\%)/z_{98}$  bei verschiedenen Rauheiten

wie aus dem Vergleich der Wellenhübe für die verschiedenen Rauheiten auf Abb. 22 zu erkennen ist. Bei den Spektren sind auch die Unterschiede zwischen den Werten für  $z(D = 2\%)$  und den Wellenaufauhöhen  $z_{98}$  stärker ausgeprägt; bei der glatten Böschung liegen die Werte von  $z(D = 2\%)$  um rd. 14 %, bei den Böschungen mit Rauheiten aus Gras und Blöcken um rd. 12 % niedriger als die der Wellenaufauhöhen  $z_{98}$  (Abb. 23).

#### 5.4 Zusammenfassung der Einflüsse von Rauheiten und Wellenspektren

Die Wirkung einer Rauheit auf die Wellenaufauhöhe  $z_{98}$  im Vergleich zu einer hydraulisch glatten Böschung kann durch den

$$\text{Reduktionsfaktor } r = \frac{z_{98(\text{rauh})}}{z_{98(\text{glatt})}} \quad (16)$$

beschrieben werden; in ähnlicher Form kann bei einem Wellenspektrum die Vergrößerung der Wellenaufauhöhe durch einen

$$\text{Verstärkungsfaktor } a = \frac{z_{98(\text{Spektrum})}}{z_{98(\text{regulär})}} \quad (17)$$

ausgedrückt werden.

Bei den Strömungsgeschwindigkeiten können gleiche Verhältniswerte gebildet werden, es müssen hier aber die Auflauf- und Ablaufgeschwindigkeiten als  $+v_{98\max}$  und  $-v_{98\max}$  getrennt betrachtet werden. Es ist hier der

$$\text{Reduktionsfaktor } r = \frac{\pm v_{98\max(\text{rauh})}}{\pm v_{98\max(\text{glatt})}} \quad (18)$$

und der Verstärkungsfaktor bei Wellenspektren

$$\text{Verstärkungsfaktor } a = \frac{\pm v_{98\max(\text{Spektrum})}}{\pm v_{98\max(\text{regulär})}} \quad (19)$$

Wie die Versuche gezeigt haben, können in fast allen Fällen die Reduktions- und Verstärkungsfaktoren im Bereich der untersuchten Brecherkennzahlen als konstant angesehen werden. Auf Tafel 1 sind diese Faktoren für die Wellenauflaufhöhe (nach FÜHRBÖTER/SPARBOOM/WITTE, 1989), auf Tafel 2 für die maximalen Auflauf- und Ablaufgeschwindigkeiten (nach FÜHRBÖTER/WITTE, 1989) zusammengestellt. Aus Tafel 1 und 2 geht hervor, daß – sowohl bei den Wellenauflaufhöhen als auch bei den Strömungsgeschwindigkeiten die Rauheitswirkung stärker bei den Wellenspektren als bei den regulären Wellen in Erscheinung tritt und – die Rauheitswirkung den Wellenablauf wesentlich stärker als den Wellenauflauf beeinflußt.

Tafel 1:  
Wellenauflaufhöhe  $z_{98}$ ; Reduktionsfaktoren  $r$  und Verstärkungsfaktoren  $a$  (Böschung  $1:n = 1:6$ )

|  |                  |   |
|--|------------------|---|
| Reguläre Wellen<br>( $0,6 \leq \xi \leq 5$ )   | Gras:<br>Blöcke: | $r \sim 0,95$ ( $0,95 \pm 0,05$ )<br>$r \sim 0,9$ ( $0,88 \pm 0,06$ ) |
| P-M-Spektrum/Reguläre Wellen (glatt):<br>$a \sim 1,5$ ( $\xi_p = 1$ ) bis $a \sim 1,1$ ( $\xi_p = 2,5$ ) |                  |   |
| P-M-Spektrum<br>( $1 \leq \xi_p \leq 2,5$ )  | Gras:<br>Blöcke: | $r \sim 0,9$ ( $0,87 \pm 0,04$ )<br>$r \sim 0,75$ ( $0,75 \pm 0,04$ ) |

Tafel 2:  
Wellenauflauf- ( $+v_{98\max}$ ) und Ablaufgeschwindigkeiten ( $-v_{98\max}$ ); Reduktionsfaktoren  $r$  und Verstärkungsfaktoren  $a$  (Böschung  $1:n = 1:6$ )

|   |                  |  |
|---|------------------|--|
| Reguläre Wellen<br>( $0,6 \leq \xi \leq 3,3$ )  | Gras:<br>Blöcke: | $+v_{98\max}$ $r \sim 0,8$ ( $0,83 \pm 0,12$ )<br>$-v_{98\max}$ $r \sim 0,4$ ( $0,44 \pm 0,09$ )<br>$+v_{98\max}$ $r \sim 1,0$ ( $1,02 \pm 0,10$ )<br>$-v_{98\max}$ $r \sim 0,6$ ( $0,63 \pm 0,14$ ) |
| P-M-Spektrum/Reguläre Wellen (glatt):<br>$+v_{98\max}$ : $a \sim 1,5$ ( $1,50 \pm 0,09$ )<br>$-v_{98\max}$ : $a \sim 1,2$ ( $1,21 \pm 0,12$ ) |                  |  |
| P-M-Spektrum<br>( $1 \leq \xi_p \leq 2,5$ )   | Gras:<br>Blöcke: | $+v_{98\max}$ $r \sim 0,8$ ( $0,81 \pm 0,09$ )<br>$-v_{98\max}$ $r \sim 0,5$ ( $0,52 \pm 0,04$ )<br>$+v_{98\max}$ $r \sim 1,0$ ( $0,96 \pm 0,10$ )<br>$-v_{98\max}$ $r \sim 0,6$ ( $0,58 \pm 0,14$ ) |



Letztere Wirkung kann wieder dadurch erklärt werden, daß beim Wellenablauf geringere Schichtdicken des ablaufenden Wassers als beim Wellenauflauf vorhanden sind. Da die Rauheit als relative Rauheitshöhe im Verhältnis zum hydraulischen Radius (hier: Schichtdicke des Wassers) wirksam ist, ist die Wirkung beim Wellenablauf entsprechend größer.

## 6. Einfluß der Böschungsneigung 1 : n auf die Wellenbelastungen

Wird angenommen, daß die Funktion  $f(\xi)$  nach den Gleichungen 9, 9a und 9b auch für sehr flache Böschungen Gültigkeit hat – nach den Untersuchungen von BATTJES und ROOS ist dies bis Böschungsneigungen von 1 : n = 1 : 7 der Fall –, so können die nach Abb. 13a bis 13b ermittelten maximalen Strömungsgeschwindigkeiten für die Neigung 1 : n = 1 : 6 (für glatte Böschungen und reguläre Wellen) als Funktion der Brecherkennzahl  $\xi$  auch auf andere Böschungsneigungen 1 : n umgerechnet werden; Abb. 24 zeigt diese Umrechnungsfunktion als Funktion von n:

$$\frac{v_{98\max(n)}}{v_{98\max(n=6)}} = (n) \quad (20)$$

Diese Funktion, die der Potenz  $n^{0,4}$  entspricht, ist sowohl für die Auflauf- (+  $v_{98\max}$ ) als auch für die Ablaufgeschwindigkeiten (-  $v_{98\max}$ ) gültig.

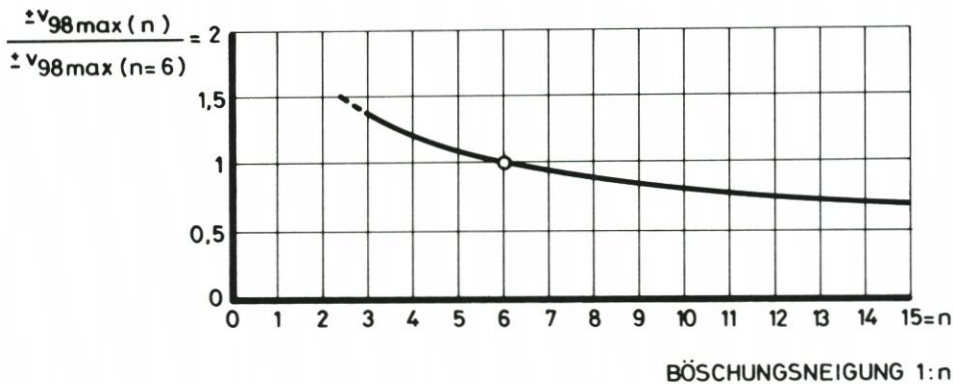


Abb.24: Reguläre Wellen und glatte Böschungen:

Zur Umrechnung der maximalen Strömungsgeschwindigkeiten  $\pm v_{98\max}$  für 1 : n = 1 : 6 auf andere Böschungsneigungen 1 : n

Für die Wellenaufbauhöhe  $z_{98}$  geht sowohl aus der Formel von HUNT (Gleichung [6]) als auch aus der Formel von WASSING (Gleichung [15]) hervor, daß die Wellenaufbauhöhe linear proportional  $\tan\alpha = 1 : n$  ist; auch hier ist aber fraglich, ob dieses auch für sehr flache Böschungen der Fall ist; aus den Ergebnissen für den Reflexionsfaktor  $K_R$  nach BATTJES (1974) (vgl. Abb. 8) ist zu erwarten, daß hier die Wellenaufbauhöhe (und auch die Strömungsgeschwindigkeiten) eher kleiner als nach der Funktion  $\tan\alpha = 1 : n$  werden.

In die Wellenbelastung muß an dieser Stelle auch die Druckschlagbelastung einbezogen werden. Sie tritt bei Böschungsneigungen flacher als 1 : n = 1 : 3 immer unterhalb des Ruhewasserspiegels mit einem Maximum bei etwa -0,5 H auf; nach FÜHRBÖTER (1986) und FÜHRBÖTER und SPARBOOM (1988) sind außerdem die Druckschlagbelastungen auf einen engen Bereich der Brecherkennzahlen ( $1 < \xi < 2$ ; voll entwickelter Sturzbrecher) beschränkt.

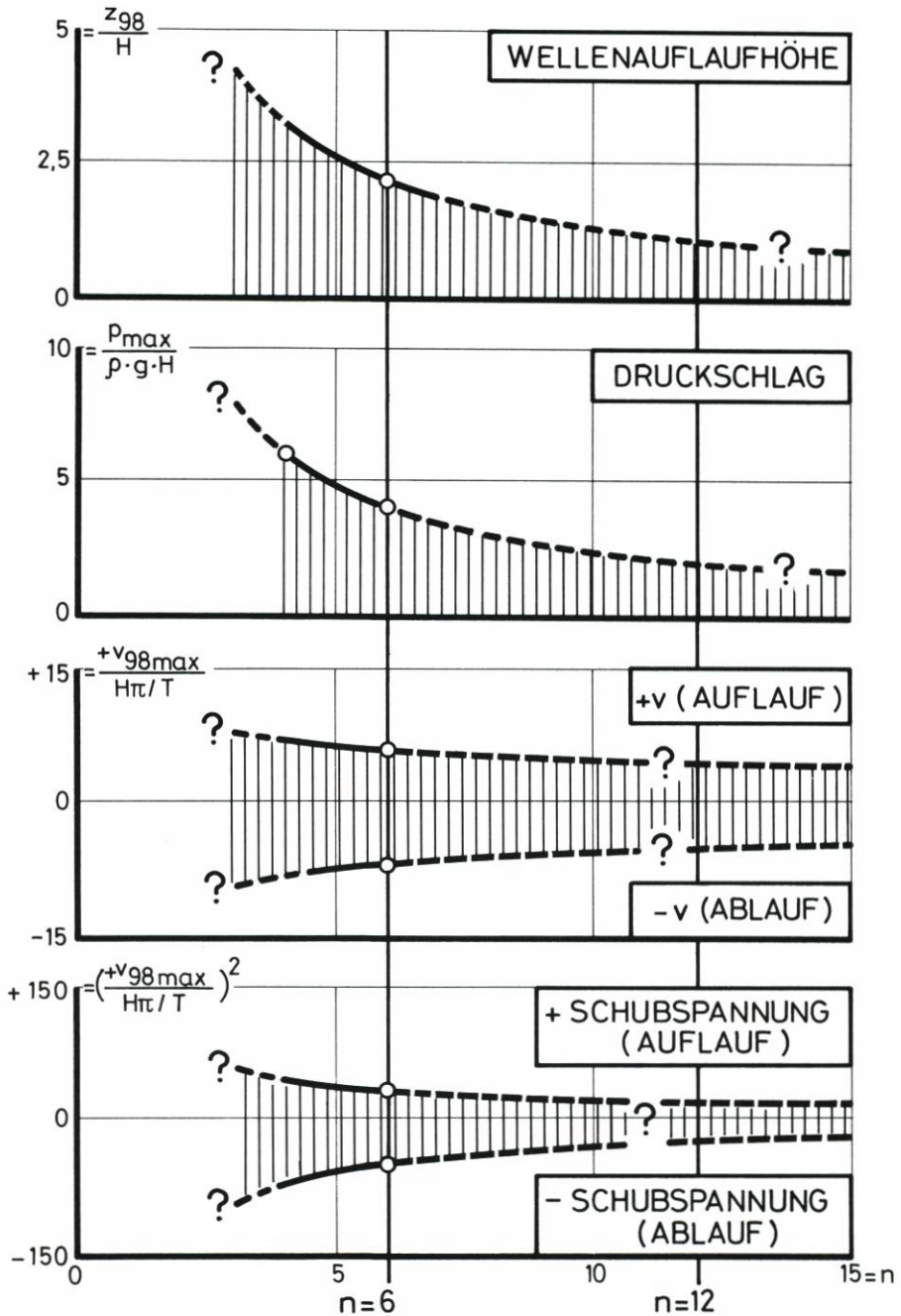


Abb. 25: Reguläre Wellen und glatte Böschungen:  
 Abhängigkeiten der Wellenaufhülle  $z_{98}$ , der Druckschlaghöhe  $p_{max}$  sowie der Wellenauf- und -ablaufgeschwindigkeiten  $\pm v_{98max}$  und der zugehörigen Schubspannungen von der Böschungsneigung  $\tan \alpha = 1 : n$  (für  $H = 2 \text{ m}$  und  $T = 6 \text{ s}$ )

Bei flacher werdenden Böschungen tritt durch die dämpfende Wirkung des Wasserpollsters auf der Böschung eine Reduktion der Druckschlaghöhen ein. Die Druckschlaghöhen sind besonders stark von stochastischen Einflüssen abhängig (FÜHRBÖTER, 1966); für eine Druckschlaghöhe  $p_{\max}$ , die etwa der Wahrscheinlichkeit von einmal bei 1000 Wellen entspricht, kann für die Abhängigkeit von der Böschungsneigung aus Versuchen mit Böschungsneigungen von 1:4 und 1:6 eine Näherungsgleichung

$$\frac{p_{\max}}{\rho \cdot g \cdot H} \sim \frac{24}{n} \quad (21)$$

abgeleitet werden (FÜHRBÖTER und SPARBOOM, 1988), die aber mit Sicherheit für sehr flache Böschungen zu große Werte liefert; dieses soll in weiteren Versuchen überprüft werden.

Damit können nach Abb. 25 in dimensionsloser Form die Abhängigkeiten aller Belastungsarten von der Böschungsneigung zusammenfassend dargestellt werden, wobei mit dem Quadrat der maximalen Strömungsgeschwindigkeiten (Abb. 25 unten) auch noch ein Maß für die erzeugten Schubspannungen erhalten wird. Für die Strömungsgeschwindigkeiten wurde dabei eine Welle von  $H = 2$  m und  $T = 6$  s verwendet.

Abb. 25 soll zeigen, daß alle Belastungsgrößen in deutlichem Maße zurückgehen, wenn eine flachere Deichböschung gewählt wird (vgl. RODLOFF, 1963).

Dieser Vorteil wird noch deutlicher, wenn zugleich die dynamischen Verweilzeiten betrachtet werden; insbesondere Abb. 5 zeigt, wie mit abnehmenden  $\xi$ -Werten – das bedeutet bei gleichbleibenden Wellenparametern eine Zunahme von  $n$  – der Bereich des Wellenhubes immer kleiner wird und sich immer mehr dem Ruhewasserspiegel nähert; dies gilt besonders für den Bereich von  $\xi < 0,5$ , in dem der Übergang vom Sturzbrecher zum Schwallbrecher stattfindet.

Bei Deichen, bei denen zugleich Druckschlag- und Strömungsbelastungen auftreten – dies ist nach den vorliegenden Untersuchungen auch noch bei einer Böschungsneigung von 1:n = 1:6 der Fall –, ist insbesondere der Böschungsbereich unmittelbar unterhalb des Scheitelwasserstandes einer Sturmflut gefährdet. Einmal, weil bereits aus der Tidekurve her hier hohe Verweilzeiten auftreten können wie z.B. bei der Februarsturmflut 1962 (vgl. Abb. 1), zum anderen aber durch die Belastungsfolge während der Sturmflut, bei der dieser Bereich

- vor dem Erreichen des Sturmflutscheitels durch die maximalen Auf- und Ablaufgeschwindigkeiten,
- während des Scheitelwasserstandes durch Druckschläge und
- bei fallendem Wasserstand nochmals mit den maximalen Strömungsgeschwindigkeiten des Wellenauflaufes und -ablaufes belastet wird.

Dieser ungünstige Überlagerungseffekt tritt um so stärker zurück, je flacher die Deichböschung wird.

Die Untersuchung sehr flacher Deichböschungen (zunächst 1:n = 1:12) soll daher die Aufgabe der nächsten Versuchsreihen im Großen Wellenkanal (GWK) sein.

## 7. Schriftenverzeichnis

- 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. JOHANNESSON, P.: Parameters affecting Stability of Rubble Mounds, Closure,

- ASCE, Journal Waterways, Port, Coastal and Ocean Division, Vol. 103. No. WW 4, 1977.
- BRUUN, P. u. GÜNBAK, A. R.: Stability of Sloping Structures in Relation to  $\xi = \tan\alpha/\sqrt{H/L_0}$ . Risk Criteria in Design. Coastal Engineering, Vol. 1, No. 4, 1977.
- FRANZIUS, L.: Wirkung und Wirtschaftlichkeit von Reibwehrwerken im Hinblick auf den Wellenauflauf. Mitt. Franzius-Institut der Techn. Universität Hannover, H. 25, 1965.
- FÜHRBÖTER, A.: Der Druckschlag durch Brecher auf Deichböschungen. Mitt. Franzius-Institut der TU Hannover, 28, 1977.
- FÜHRBÖTER, A.: Über Wellenzeiten und Wellenenergien bei Sturmfluten. Jahrbuch der Hafenbautechnischen Gesellschaft, 38. Band, 1981.
- FÜHRBÖTER, A.: Die Forschungseinrichtung „Großer Wellenkanal“ (Hannover) und ihre Aufgaben. Inter maritime '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, Malaga, Spain, 1988.
- FÜHRBÖTER, A., SPARBOOM, U. u. WITTE, H.-H.: Großer Wellenkanal Hannover: Versuchsergebnisse über den Wellenauflauf auf glatten und rauhen Deichböschungen mit der Neigung 1:6. Die Küste, H. 50, 1989.
- FÜHRBÖTER, A. u. WITTE, H.-H.: Wellenbelastung an Seedeichen. Strömungsgeschwindigkeiten beim Wellenauflauf auf einer Böschung der Neigung 1:n = 1:6. Jahrbuch der Hafenbautechnischen Gesellschaft, 44. Band, 1989.
- 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 Wave. Proc. 18th Coastal Eng. Conf. Kapstadt, 1982.
- GRÜNE, J. u. FÜHRBÖTER, A.: A Large Wave Channel for Full Scale-Modelling of Wave Dynamics in Surf Zones. Proc. Intern. Symposium on Modelling Techniques, Vol. 1, San Francisco, 1975.
- HENSEN, W.: Die Sturmflut in der Elbe vom 16./17. Februar 1962. VDI-Zeitschrift, Bd. 104, Nr. 32, 1962.
- HUNT, I. A.: Design for Seawalls and Breakwaters. Proc. ASCE, Vol. 85, No. WW3, 1959.
- IRIBARREN, C. R. u. NOGALES, C.: Protection des Ports. Section II, Comm. 4, XVIIth Int. Nav. Congress, Lisbon, 1949.
- 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.
- MEISSNER, U., HARTMANN, Th. u. HELLER, M.: Finite Elements Models for Seepage Flow Analysis in Dikes and Rubble Mound Breakwaters. Computational and Methods in Flow Analysis. Proc. Intern. Conference on Computational and Methods in Flow Analysis, Okajama, Japan, 1988.
- MORAES, C. d. C.: Experiments of Wave Reflexion on Impermeable Slopes. Proc. 12th Conf. Coastal Eng., Washington, D. C., Vol. I, 1970.
- 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.
- RODLOFF, W.: Über die Form von Seedeichen mit Grasdecke. Wasser und Boden, H. 2, 1963.
- SAVILLE, T. J. R.: Wave Run-up on Composite Slopes. Proc. 6th Coastal Eng., Conf. Gainesville, USA, 1957.
- 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, USA, 1957.
- ZITSCHER, F.-F.: Analyse zur Bemessung von Außenböschungen scharfliegender Seedeiche gegen Wellenbeanspruchung. Wasser und Boden, H. 10, 1962.

## 8. Tafelanhang

Tafel A: Versuchswerte für die glatte Böschung (1:n = 1:6) und reguläre Wellen

| $\xi$ | H    | T     | Z         | Z          | Z          | Z <sub>AB</sub> | Z <sub>98</sub> | +V <sub>98 max</sub> | -V <sub>98 max</sub> | Z(+V <sub>98 max</sub> ) | Z(-V <sub>98 max</sub> ) |
|-------|------|-------|-----------|------------|------------|-----------------|-----------------|----------------------|----------------------|--------------------------|--------------------------|
| -     | m    | s     | (D = 2 %) | (D = 50 %) | (D = 98 %) | m               | m               | m/s                  | m/s                  | m                        | m                        |
| 0,63  | 1,50 | 3,70  | 1,10      | 0,88       | 0,52       | 0,58            | 1,17            | 4,75                 | 5,65                 | 0,43                     | 0,57                     |
| 0,72  | 0,75 | 3,00  | 0,63      | 0,44       | 0,30       | 0,33            | 0,70            | 3,40                 | 5,48                 | 0,23                     | 0,30                     |
| 0,76  | 1,90 | 5,00  | 1,70      | 1,30       | 0,88       | 0,82            | 1,79            | 4,37                 | 6,70                 | 0,97                     | 1,03                     |
| 0,85  | 1,50 | 5,00  | 1,54      | 1,16       | 0,72       | 0,82            | 1,66            | 4,55                 | 5,61                 | 0,55                     | 0,64                     |
| 0,85  | 1,50 | 5,00  | 1,57      | 1,15       | 0,70       | 0,87            | 1,72            | 4,98                 | 7,24                 | 0,70                     | 0,77                     |
| 0,85  | 1,00 | 4,10  | 1,00      | 0,76       | 0,43       | 0,57            | 1,08            | 4,48                 | 6,80                 | 0,51                     | 0,42                     |
| 0,88  | 2,00 | 6,00  | 2,14      | 1,62       | 1,00       | 1,14            | 2,29            | 4,93                 | 8,05                 | 0,90                     | 1,10                     |
| 0,96  | 2,00 | 6,50  | 2,25      | 1,69       | 0,95       | 1,30            | 2,40            | 4,78                 | 6,84                 | 0,97                     | 1,03                     |
| 0,99  | 0,75 | 4,10  | 0,89      | 0,65       | 0,28       | 0,61            | 0,98            | 4,00                 | 7,14                 | 0,17                     | 0,17                     |
| 1,28  | 1,70 | 8,00  | 2,37      | 1,74       | 0,92       | 1,45            | 2,56            | 5,46                 | 8,14                 | 0,90                     | 0,83                     |
| 1,48  | 1,60 | 9,00  | 3,01      | 2,28       | 0,87       | 2,14            | 3,25            | 6,15                 | 8,14                 | 0,63                     | 0,90                     |
| 1,49  | 1,55 | 8,90  | 2,92      | 2,13       | 0,81       | 2,11            | 3,08            | 6,40                 | 8,36                 | 0,57                     | 0,77                     |
| 1,49  | 0,75 | 6,20  | 1,29      | 0,95       | 0,28       | 1,01            | 1,44            | 4,18                 | 9,69                 | 0,17                     | 0,37                     |
| 1,58  | 1,40 | 9,00  | 2,87      | 1,98       | 0,64       | 2,23            | 3,00            | 7,83                 | 8,21                 | 0,50                     | 0,63                     |
| 1,76  | 1,40 | 10,00 | 2,85      | 1,75       | 0,34       | 2,51            | 3,07            | 5,45                 | 8,63                 | 0,10                     | 0,23                     |
| 1,97  | 0,75 | 8,20  | 1,74      | 1,08       | -0,04      | 1,78            | 1,87            | 5,48                 | 7,53                 | 0,75                     | -0,07                    |
| 1,97  | 0,75 | 8,20  | 1,77      | 1,09       | 0,02       | 1,75            | 1,86            | 5,47                 | 8,41                 | 0,03                     | -0,03                    |
| 1,99  | 1,10 | 10,00 | 2,53      | 1,54       | 0,08       | 2,45            | 2,65            | 4,73                 | 8,33                 | 0,04                     | 0,04                     |
| 1,99  | 1,25 | 10,70 | 2,50      | 1,56       | -0,13      | 2,63            | 2,60            | 6,37                 | 8,16                 | -0,37                    | -0,10                    |
| 2,04  | 0,75 | 8,50  | 1,85      | 1,18       | -0,08      | 1,93            | 1,99            | 5,71                 | 8,16                 | -0,17                    | 0,10                     |
| 2,14  | 1,15 | 11,00 | 2,56      | 1,55       | -0,03      | 2,59            | 2,75            | 5,28                 | 8,17                 | -0,10                    | 0,10                     |
| 2,48  | 0,75 | 10,30 | 1,70      | 1,00       | -0,39      | 2,09            | 1,80            | 5,29                 | 7,64                 | -0,30                    | -0,37                    |
| 2,50  | 1,00 | 12,00 | 2,74      | 1,56       | -0,39      | 3,13            | 2,90            | 5,44                 | 7,50                 | -0,37                    | -0,50                    |
| 2,65  | 0,75 | 11,00 | 2,02      | 1,14       | -0,33      | 2,35            | 2,10            | 4,18                 | 8,17                 | -0,50                    | -0,43                    |
| 3,01  | 0,75 | 12,50 | 2,43      | 1,27       | -0,65      | 3,08            | 2,56            | 4,94                 | 8,24                 | 0,70                     | -0,43                    |
| 3,09  | 0,85 | 13,70 | 2,58      | 1,27       | -0,76      | 3,34            | 2,75            | 7,48                 | 7,62                 | -0,77                    | -0,70                    |
| 3,13  | 0,75 | 13,00 | 2,50      | 1,22       | -0,67      | 3,17            | 2,62            | 6,05                 | 7,76                 | -0,57                    | -0,57                    |
| 3,37  | 0,75 | 14,00 | 2,31      | 0,93       | -0,75      | 3,06            | 2,44            | 7,00                 | 5,02                 | -0,77                    | 0,50                     |
| 3,49  | 0,75 | 14,50 | 2,53      | 1,10       | -0,82      | 3,35            | 2,74            | 6,38                 | 4,62                 | -0,90                    | 0,23                     |
| 4,03  | 0,60 | 15,00 | 2,03      | 0,60       | -0,91      | 2,94            | 2,20            | 4,24                 | 4,35                 | 0,30                     | 0,57                     |
| 4,42  | 0,50 | 15,00 | 1,76      | 0,39       | -0,70      | 2,46            | 1,82            | 3,64                 | 4,77                 | 0,10                     | 0,30                     |
| 5,28  | 0,35 | 15,00 | 1,24      | 0,13       | -0,52      | 1,76            | 1,30            | 2,62                 | 2,75                 | 0,30                     | 0,17                     |

Tafel B: Versuchswerte für rauhe Böschungen (1:n = 1:6) und reguläre Wellen

| $\xi$ | Wellenparameter |       |   | Grasrauhe Böschung (= Kunstgras) |      |       |                 |                 |          | Böschung mit Betonblöcken |           |          |           |                 |                 |
|-------|-----------------|-------|---|----------------------------------|------|-------|-----------------|-----------------|----------|---------------------------|-----------|----------|-----------|-----------------|-----------------|
|       | H               | T     | s | Z                                | Z    | Z     | Z <sub>AB</sub> | Z <sub>98</sub> | Z        | Z                         | Z         | Z        | Z         | Z <sub>AB</sub> | Z <sub>98</sub> |
|       | m               |       |   | m                                | m    | m     | m               | m               | (D = 2%) | (D = 50%)                 | (D = 98%) | (D = 2%) | (D = 50%) | (D = 98%)       | m               |
| 0,63  | 1,50            | 3,70  |   | 0,97                             | 0,84 | 0,70  | 0,27            | 1,04            | 1,03     | 0,84                      | 0,61      | 0,42     | 1,13      |                 |                 |
| 0,72  | 0,75            | 3,00  |   | 0,61                             | 0,84 | 0,01  | 0,60            | 0,70            | 0,59     | 0,47                      | 0,33      | 0,26     | 0,66      |                 |                 |
| 0,76  | 1,90            | 5,00  |   | 1,56                             | 1,29 | 1,02  | 0,54            | 1,57            | 1,56     | 1,27                      | 0,97      | 0,59     | 1,67      |                 |                 |
| 0,96  | 2,00            | 6,50  |   | 2,33                             | 1,85 | 1,40  | 0,93            | 2,45            | 2,16     | 1,70                      | 1,16      | 1,00     | 2,27      |                 |                 |
| 0,99  | 0,75            | 4,10  |   | 0,82                             | 0,64 | 0,42  | 0,40            | 0,89            | 0,83     | 0,64                      | 0,41      | 0,42     | 0,90      |                 |                 |
| 1,20  | 0,75            | 5,00  |   | 0,97                             | 0,83 | 0,56  | 0,41            | 1,03            | 0,98     | 0,73                      | 0,36      | 0,62     | 1,06      |                 |                 |
| 1,28  | 1,70            | 8,00  |   | 2,41                             | 1,91 | 1,38  | 1,03            | 2,58            | 2,14     | 1,70                      | 1,14      | 1,00     | 2,30      |                 |                 |
| 1,44  | 0,75            | 6,00  |   | 1,21                             | 0,99 | 0,61  | 0,60            | 1,29            | 1,08     | 0,81                      | 0,38      | 0,70     | 1,15      |                 |                 |
| 1,49  | 1,55            | 8,90  |   | 2,98                             | 2,47 | 1,68  | 1,30            | 3,12            | 2,62     | 2,08                      | 1,43      | 1,19     | 2,77      |                 |                 |
| 1,68  | 0,75            | 7,00  |   | 1,41                             | 1,16 | 0,55  | 0,86            | 1,45            | 1,21     | 0,93                      | 0,38      | 0,83     | 1,37      |                 |                 |
| 1,76  | 1,40            | 10,00 |   | 2,79                             | 2,15 | 1,42  | 1,37            | 2,91            | 2,40     | 1,74                      | 0,93      | 1,47     | 2,52      |                 |                 |
| 1,97  | 0,75            | 8,20  |   | 1,54                             | 1,21 | 0,62  | 0,92            | 1,59            | 1,43     | 1,05                      | 0,35      | 1,08     | 1,53      |                 |                 |
| 2,14  | 1,15            | 11,00 |   | 2,45                             | 1,68 | 1,21  | 1,24            | 2,55            | 2,27     | 1,58                      | 0,76      | 1,51     | 2,45      |                 |                 |
| 2,16  | 0,75            | 9,00  |   | 1,94                             | 1,47 | 0,77  | 1,17            | 2,00            | 1,60     | 1,17                      | 0,34      | 1,26     | 1,75      |                 |                 |
| 2,28  | 1,20            | 12,00 |   | 2,83                             | 2,06 | 1,28  | 1,55            | 2,93            | 2,56     | 1,80                      | 0,64      | 1,92     | 2,64      |                 |                 |
| 2,50  | 1,00            | 12,00 |   | 2,49                             | 1,74 | 0,87  | 1,62            | 2,56            | 2,32     | 1,56                      | 0,37      | 1,95     | 2,55      |                 |                 |
| 2,65  | 0,75            | 11,00 |   | 1,96                             | 1,40 | 0,64  | 1,32            | 2,08            | 1,68     | 1,13                      | 0,24      | 1,44     | 1,79      |                 |                 |
| 2,79  | 0,80            | 12,00 |   | 2,26                             | 1,47 | 0,63  | 1,63            | 2,28            | 1,82     | 1,21                      | -0,02     | 1,84     | 1,95      |                 |                 |
| 3,01  | 0,75            | 12,50 |   | 2,41                             | 1,56 | 0,55  | 1,86            | 2,48            | 2,02     | 1,33                      | 0,03      | 1,99     | 2,12      |                 |                 |
| 3,09  | 0,85            | 13,70 |   | 2,42                             | 1,50 | 0,47  | 1,95            | 2,48            | -        | -                         | -         | -        | -         |                 |                 |
| 3,13  | 0,75            | 13,00 |   | 2,37                             | 1,58 | 0,53  | 1,84            | 2,41            | 1,89     | 1,18                      | -0,42     | 2,31     | 1,95      |                 |                 |
| 3,23  | 0,60            | 12,00 |   | 1,73                             | 1,15 | 0,18  | 1,55            | 1,82            | 1,44     | 0,84                      | -0,33     | 1,77     | 1,56      |                 |                 |
| 3,28  | 0,85            | 14,50 |   | -                                | -    | -     | -               | -               | 1,98     | 1,20                      | -0,54     | 2,52     | 2,13      |                 |                 |
| 3,37  | 0,75            | 14,00 |   | 2,26                             | 1,47 | 0,42  | 1,84            | 2,34            | 1,90     | 1,11                      | -0,66     | 2,56     | 2,00      |                 |                 |
| 3,49  | 0,75            | 14,50 |   | 2,50                             | 1,55 | 0,44  | 2,06            | 2,59            | 2,08     | 1,27                      | -0,61     | 2,69     | 2,21      |                 |                 |
| 3,95  | 0,40            | 12,00 |   | 1,11                             | 0,49 | -0,02 | 1,13            | 1,23            | 0,97     | 0,38                      | -0,42     | 1,39     | 1,06      |                 |                 |
| 4,03  | 0,60            | 15,00 |   | 2,01                             | 1,26 | 0,19  | 1,82            | 2,10            | 1,74     | 0,92                      | -0,82     | 2,56     | 1,87      |                 |                 |
| 4,42  | 0,50            | 15,00 |   | 1,75                             | 0,95 | 0,04  | 1,71            | 1,84            | 1,48     | 0,65                      | -0,76     | 2,24     | 1,55      |                 |                 |
| 5,28  | 0,35            | 15,00 |   | 1,23                             | 0,43 | -0,10 | 1,33            | 1,25            | 1,14     | 0,34                      | -0,59     | 1,73     | 1,25      |                 |                 |

Tafel C: Versuchswerte für glatte und rauhe Böschungen (1 : n = 1 : 6) mit PIERSON-MOSKOWITZ-Spektren

Glatte Böschung (= Asphaltbeton)

| $\zeta_p$ | $H_s$ | $T_p$ | z         |            |            | $Z_{AB}$ | $Z_{98}$ |
|-----------|-------|-------|-----------|------------|------------|----------|----------|
|           |       |       | (D = 2 %) | (D = 50 %) | (D = 98 %) |          |          |
| -         | m     | s     | m         | m          | m          | m        | m        |
| 1,04      | 1,00  | 5,00  | 1,61      | 0,53       | -0,08      | 1,69     | 1,85     |
| 1,14      | 1,20  | 6,00  | 1,86      | 0,78       | -0,10      | 1,96     | 2,35     |
| 1,20      | 0,75  | 5,00  | 1,33      | 0,40       | -0,12      | 1,45     | 1,46     |
| 1,33      | 1,20  | 7,00  | 2,30      | 0,88       | -0,15      | 2,45     | 2,62     |
| 1,44      | 0,75  | 6,00  | 1,40      | 0,46       | -0,13      | 1,53     | 1,65     |
| 1,52      | 1,20  | 8,00  | 2,25      | 0,88       | -0,23      | 2,48     | 2,60     |
| 1,68      | 0,75  | 7,00  | 1,65      | 0,49       | -0,24      | 1,89     | 1,93     |
| 1,79      | 1,10  | 9,00  | 2,37      | 0,79       | -0,40      | 2,77     | 2,91     |
| 1,92      | 0,75  | 8,00  | 1,70      | 0,50       | -0,36      | 2,06     | 1,94     |
| 2,16      | 0,75  | 9,00  | 1,86      | 0,50       | -0,40      | 2,26     | 2,21     |
| 2,40      | 0,75  | 10,00 | 1,90      | 0,50       | -0,47      | 2,37     | 2,21     |

Grasraue Böschung (= Kunstgras)

| $\zeta_p$ | $H_s$ | $T_p$ | z         |            |            | $Z_{AB}$ | $Z_{98}$ |
|-----------|-------|-------|-----------|------------|------------|----------|----------|
|           |       |       | (D = 2 %) | (D = 50 %) | (D = 98 %) |          |          |
| -         | m     | s     | m         | m          | m          | m        | m        |
| 1,04      | 1,00  | 5,00  | 1,43      | 0,69       | 0,19       | 1,24     | 1,60     |
| 1,14      | 1,20  | 6,00  | 1,68      | 0,95       | 0,26       | 1,42     | 1,99     |
| 1,20      | 0,75  | 5,00  | 1,18      | 0,55       | 0,14       | 1,04     | 1,39     |
| 1,33      | 1,20  | 7,00  | 2,00      | 1,09       | 0,30       | 1,70     | 2,27     |
| 1,44      | 0,75  | 6,00  | 1,25      | 0,64       | 0,13       | 1,12     | 1,46     |
| 1,52      | 1,20  | 8,00  | 2,12      | 1,09       | 0,27       | 1,85     | 2,42     |
| 1,68      | 0,75  | 7,00  | 1,44      | 0,68       | 0,10       | 1,34     | 1,59     |
| 1,79      | 1,10  | 9,00  | 2,22      | 1,08       | 0,19       | 2,03     | 2,51     |
| 1,92      | 0,75  | 8,00  | 1,49      | 0,69       | 0,09       | 1,40     | 1,68     |
| 2,16      | 0,75  | 9,00  | 1,68      | 0,71       | 0,02       | 1,66     | 1,83     |
| 2,40      | 0,75  | 10,00 | 1,75      | 0,71       | 0,02       | 1,73     | 1,98     |

Böschung mit Betonblöcken

| $\zeta_p$ | $H_s$ | $T_p$ | z         |            |            | $Z_{AB}$ | $Z_{98}$ |
|-----------|-------|-------|-----------|------------|------------|----------|----------|
|           |       |       | (D = 2 %) | (D = 50 %) | (D = 98 %) |          |          |
| -         | m     | s     | m         | m          | m          | m        | m        |
| 1,04      | 1,00  | 5,00  | 1,28      | 0,54       | 0,02       | 1,26     | 1,45     |
| 1,14      | 1,20  | 6,00  | 1,42      | 0,73       | 0,13       | 1,29     | 1,60     |
| 1,20      | 0,75  | 5,00  | 1,05      | 0,44       | -0,01      | 1,06     | 1,20     |
| 1,33      | 1,20  | 7,00  | 1,71      | 0,85       | 0,09       | 1,62     | 1,93     |
| 1,44      | 0,75  | 6,00  | 1,07      | 0,48       | -0,01      | 1,08     | 1,23     |
| 1,52      | 1,20  | 8,00  | 1,81      | 0,87       | 0,06       | 1,75     | 2,09     |
| 1,68      | 0,75  | 7,00  | 1,20      | 0,50       | -0,07      | 1,27     | 1,36     |
| 1,79      | 1,10  | 9,00  | 1,83      | 0,82       | -0,07      | 1,90     | 2,10     |
| 1,92      | 0,75  | 8,00  | 1,36      | 0,52       | -0,14      | 1,50     | 1,49     |
| 2,16      | 0,75  | 9,00  | 1,41      | 0,53       | -0,24      | 1,65     | 1,57     |
| 2,40      | 0,75  | 10,00 | 1,45      | 0,52       | -0,22      | 1,67     | 1,70     |