

Bemessungskriterien für Deiche bei Berücksichtigung von Wellenspektren

Von Suhan M. Gökcesu und Hans Kaldenhoff

Zusammenfassung

An einem Deich mit glatter Oberfläche wurden großmaßstäbliche Modellversuche (1:2 bis 1:5) mit verschiedenen Wellenspektren durchgeführt. Die Untersuchungen erfolgten bei verschiedenen Wassertiefen, Böschungsneigungen (1:3 bis 1:10) und gebrochenen Böschungen.

Als Hauptergebnis der Modellversuche konnte gezeigt werden, daß die Auflaufverteilung mit einer RAYLEIGH-Verteilung beschrieben und mit dem Wellenspektrum korreliert werden kann, und zwar mit Hilfe der Exponenten der jeweiligen Verteilungsfunktion. Diese Beziehung ermöglichte es, ein Bemessungsverfahren zu erarbeiten, mit dem die Wellenauflaufverteilung für verschiedene Deichformen in Abhängigkeit von Wellenspektren zu berechnen ist. Außerdem ist es möglich, die Häufigkeit des Überlaufs zu bestimmen.

Die Versuche wurden mit regulären Wellen der Höhe $H_{1/3}$ wiederholt. Der mittlere Auflauf ist etwa 1,5mal höher bei regulären Wellen; der höchste Auflauf tritt bei Wellenspektren ein.

Summary

A large scale model investigation (Scale 1:2 to 1:5) was carried out of a smooth surfaced sea dyke, using random wave conditions. The test programme was run with various spectra, water depths and embankment slopes (from 1:3 to 1:10) as well as with changing slopes.

The main result of the model tests was to show that the run-up distribution could be described by a Rayleigh distribution function and correlated with the wave spectra using only the exponents of the respective distribution function. This relationship made it possible to develop a design procedure for calculating the run-up distribution for various shapes of dyke taking account of the wave spectra. In addition it is also possible to calculate the frequency of overtopping. The tests were repeated using regular waves of $H_{1/3}$ height. The mean run-up was about 1.5 times higher with regular waves but the highest run-up occurred with wave spectra.

Inhalt

1. Einführung	21
2. Physikalische Voraussetzungen	22
3. Modellversuche und Ergebnisse	23
4. Schriftenverzeichnis	28

1. Einführung

Thema dieses Beitrages sind Modellversuche zum Wellenauflauf auf ebenen Böschungen bei natürlichen Seegangsbedingungen. Dieses Projekt wurde durchgeführt, um die bei der Deichbemessung auftretenden Fragen besser bearbeiten zu können (GÖKCESU, 1976).

Frühere Arbeiten auf diesem Gebiet wurden unter der grundlegenden Annahme durchgeführt, daß der natürliche Seegang durch reguläre Wellen mit einer signifikanten Wellenhöhe dargestellt werden kann. Tatsächlich aber ist der Seegang das Ergebnis von Überlagerungen

vieler Wellen mit unterschiedlichen Perioden, Längen und Amplituden, und sie haben sogar unterschiedliche Fortschrittsrichtungen. Die Größen dieser Parameter sind zufallsverteilt.

Man muß die Frage aufwerfen, ob die Ergebnisse früherer Forscher, die mit regulären Wellen gearbeitet haben, ausreichend sind, um die Vorgänge zwischen Wellen und Bauwerken hinreichend zu beschreiben. Eingetretene schwere Schäden an Bauwerken erfordern, bessere Bemessungskriterien zu erarbeiten.

2. Physikalische Voraussetzungen

Es ist nicht möglich, die komplexen Eigenschaften der Windwellen, die Nichtlinearität und die Irregularität ihrer Variablen ausschließlich durch hydrodynamische Gesetze zu beschreiben. Deshalb wird es erforderlich, auch statistische Gesetzmäßigkeiten, die Topographie und klimatische Bedingungen zu berücksichtigen.

Eine allgemein bekannte und zweckmäßige Methode hierfür ist die Betrachtung des Energiespektrums, also die Energiedichte als Funktion ihrer Frequenz. Eine zweite Methode beschreibt die Wahrscheinlichkeit der Wellenamplitude und Frequenz mit einer Verteilungsfunktion; damit ist es möglich, Wellenparameter für Bemessungsprozeduren direkt zu bestimmen. Das ist einer der Gründe, warum Ingenieure diese Methode vorziehen.

Die RAYLEIGH-Verteilung wird hier oft angewendet, weil sie die normalisierte Amplituden- und Wellenhöhenverteilung sehr gut beschreibt, und zwar sowohl im tiefen wie im flachen Wasser. Diese Verteilungsfunktion ist stetig und eindimensional. Sie wird in folgender Form für die Beschreibung der normalisierten Wellenhöhe $\eta = H/\bar{H}$ und Wellenperiode $T = T/\bar{T}$ angesetzt:

$$F(\eta = H/\bar{H}) = 1 - \exp\left(-\frac{\pi}{4} \eta^2\right)$$

$$F(\Gamma = T/\bar{T}) = 1 - \exp\left(-\frac{\pi}{4} \Gamma^2\right)$$

Dieses sind fortschreitende Wellen, und zwar zur Küste oder zu anderen Hindernissen; sie werden reflektiert und/oder refraktiert, und sie verursachen sogar einen gewissen Massentransport. Die durch sie ausgelöste Bewegung auf Böschungen ist der sogenannte Auflauf einschließlich aller Vorgänge des Brechens. In Abhängigkeit der Wellen- und Böschungspara-

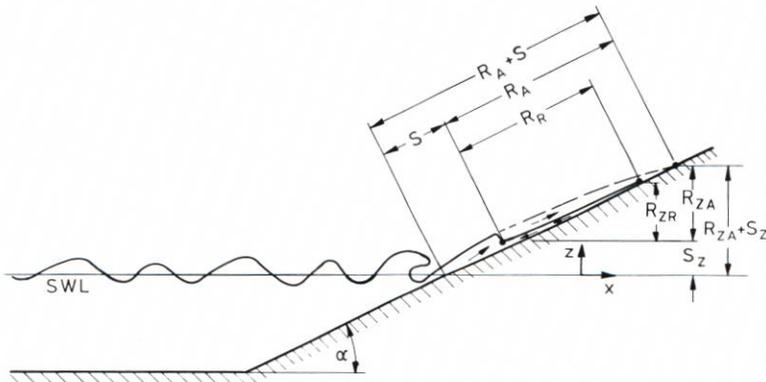


Abb. 1. Bezeichnungen zum Auflauf auf Böschungen

meter ergeben sich nun verschiedene Auflaufzustände; ihre Beschreibung erfolgt mit Abb. 1 durch

R_{ZR} = Höhe zwischen Auflauf (oberer Wendepunkt) und dem folgenden tiefsten Ablauf (unterer Wendepunkt),

R_{ZA} = Höhe zwischen Ablauf und folgendem Auflauf und

S_Z = Höhe zwischen Ruhewasserspiegel (SWL) und unterem Wendepunkt (positiv oder negativ zum SWL).

Der Auflauf ist die wichtigste Höhe, besonders bei Bemessungsvorgängen. Leider gibt es aber keine ausreichende physikalische Beschreibung zwischen Auflauf und Ablauf in Abhängigkeit von den jeweils ankommenden Wellen. Es scheint jedoch möglich, eine Beziehung zwischen den statistischen Kennwerten des Seeganges und der Auflaufschwingung herzustellen. Da der Seegang durch die statistische Verteilung seiner Parameter (z. B. mit der RAYLEIGH-Verteilung) beschrieben werden kann, wird postuliert, daß der Auflauf ebenfalls durch eine RAYLEIGH-Verteilung seiner Parameter festgelegt ist.

3. Modellversuche und Ergebnisse

Um das zuvor aufgestellte Postulat zu verifizieren, wurden Modellversuche notwendig. Die Laborausüstung ermöglichte es, jeden beliebigen Seegang in einem Freispiegelkanal zu erzeugen und auf eine Böschung mit unterschiedlicher Neigung (1:3 bis 1:10) auflaufen zu

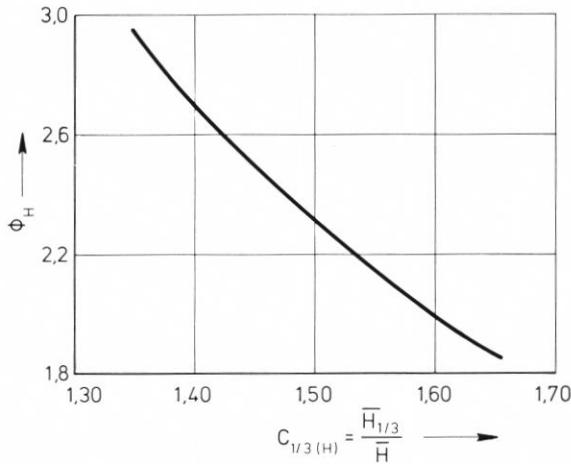


Abb. 2. Funktionsverlauf des Exponenten der Wellenamplituden-Verteilungsfunktion \varnothing gegen die normalisierte signifikante Amplitude $C_{1/3}$ (gerechnet)

lassen. Die Verteilungsfunktion der Wellenparameter ist grundsätzlich die der deutschen Nordseeküste. Sie wurden in einer über zehn Jahre andauernden Meßreihe von der Forschungs- und Vorarbeitenstelle Neuwerk aufgenommen und statistisch wie oben beschrieben analysiert (siehe SIEFERT und KALDENHOFF, 1975). Die Exponenten der Verteilungsfunktion der Wellenhöhen sind in Abb. 2 als Funktion der normalisierten signifikanten Höhe $C_{1/3}$ dargestellt.

Die physikalischen Versuche wurden unter Variation der folgenden Parameter durchgeführt:

- Exponenten der Verteilungsfunktion der normalisierten Wellenhöhe, mittlere Wellenhöhe und mittlere signifikante Wellenhöhe,
- Wassertiefe,
- konstante Böschungsneigung 1:3, 1:4, 1:6, 1:10,
- gebrochene Böschungsneigungen mit Bermen.

Das gesamte Versuchsprogramm wurde so aufgestellt, daß der Auflauf durch eine eindimensionale Verteilungsfunktion für verschiedene Parameter beschrieben werden konnte und sich auch für Bemessungsverfahren eignet.

Der Wellenkanal ist 90 m lang, 4 m breit und 2 m tief, und es können beliebige Wellen bis

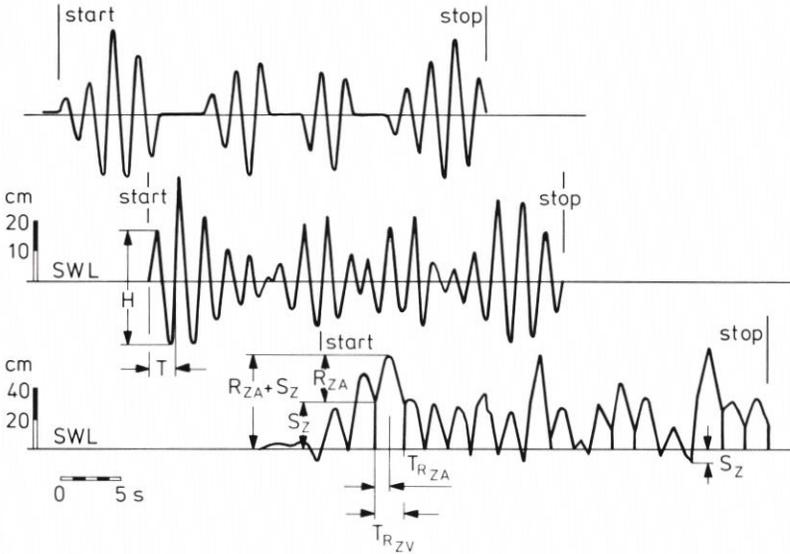


Abb. 3. Typisches Amplituden-Zeitdiagramm für obere Linie: Wellenerreger; mittlere Linie: Wasseroberfläche am Böschungfuß; untere Linie: Wellenauflauf

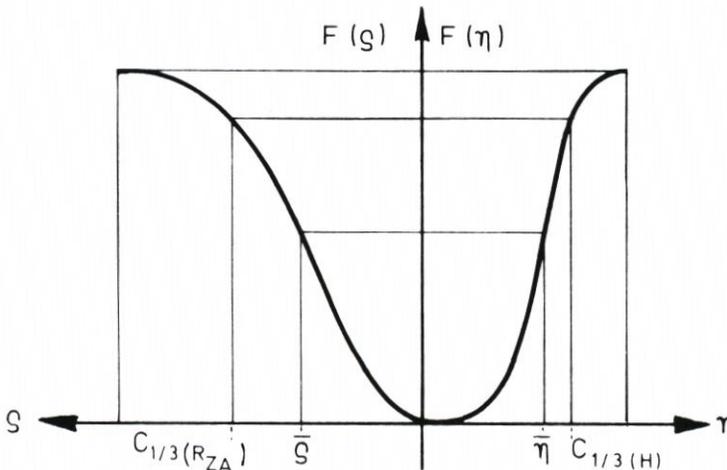


Abb. 4. Funktionsverläufe der $C_{1/3}$ -Werte des Seeganges und des Auflaufs

zu 0,6 m Amplitude erzeugt werden. Die Wellenpegel arbeiten nach dem Prinzip der Wasserwiderstandsmessung, und ihr linearisiertes Signal konnte durch einen Prozeßrechner direkt (on-line) weiterverarbeitet werden.

Es wurde ein besonderes Verfahren zur Seegangserzeugung ermittelt. Dieses Verfahren basiert auf der Erzeugung verschiedener Wellengruppen, die so geändert werden konnten, daß verschiedene Wellenzüge entstanden. Alle diese Wellenzüge hatten die gleiche Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion, und ihre Parameter stimmten ganz ausgezeichnet mit den Naturbedingungen überein. Zusätzlich wurde auch die normalisierte Wellenhöhe variiert. Von allen diesen möglichen Wellenzügen wurden sechs für die Modellversuche ausgewählt. Die Wassertiefe im Modell wurde von 1,0 m über 1,25 m auf 1,50 m geändert.

Abb. 3 gibt einen Eindruck der Oszillationen des Wellengenerators (obere Kurve), der Wasseroberfläche vor der Böschung (mittlere Kurve) und des Auflaufes (untere Kurve). Die in Abb. 3 angegebenen Parameter wurden durch den Rechner ausgewertet, wobei die folgenden Annahmen und Gleichungen angesetzt wurden:

- a) Der normalisierte Auflauf ρ ist RAYLEIGH-verteilt, falls die normalisierte Wellenhöhe der gleichen Funktion folgt.

$$F(\eta = H/\bar{H}) = 1 - \exp\left(-\frac{\pi}{4} \eta^{\phi_H}\right)$$

$$F(\rho = \frac{R_{ZA} + S_Z}{R_{ZA} + S_Z}) = 1 - \exp\left(-\frac{\pi}{4} \rho^{\phi_{\rho}} (R_{ZA} + S_Z)\right)$$

- b) Entsprechend der Wellenstatistik wird angenommen, daß die Exponenten der Auflaufverteilung Funktionen ihrer $C_{1/3}$ -Werte sind.

$$\phi_{(R_{ZA} + S_Z)} = f(C_{1/3}(R_{ZA} + S_Z)) = \frac{(R_{ZA} + S_Z)^{1/3}}{R_{ZA} + S_Z}$$

- c) Die Verteilungsfunktionen des normalisierten Auflaufes und der Wellenparameter haben jeweils den gleichen Funktionswert, wenn ihre $C_{1/3}$ -Werte betrachtet werden, auch wenn ihre Exponenten unterschiedlich sind (s. Abb. 4).

Unter der Voraussetzung von a) bis c) wird es möglich, den ϕ -Exponenten der RAYLEIGH-Gleichung für die Auflauf-Variablen auszurechnen, und zwar unter Verwendung des $C_{1/3}$ -Wertes des Seeganges und des $C_{1/3}$ -Wertes der Auflaufversuche.

$$\phi_{(R_{ZA} + S_Z)} = \phi_H \left(\frac{\ln C_{1/3}(H)}{\ln C_{1/3}(R_{ZA} + S_Z)} \right)$$

- d) Es wurde weiterhin angenommen, daß die Mittelwerte der Auflaufhöhen eine Funktion der mittleren Wellenhöhen, der Parameter des Bauwerkes und der Wassertiefe sind.
- e) Schließlich wurde die Annahme getroffen, daß es zulässig ist, die mittleren Wellenhöhen und die Auflaufhöhen mit den mittleren $C_{1/3}$ -Werten bei konstanter Wassertiefe zu korrelieren.

Die Gültigkeit der obigen Annahmen konnte mit Methoden der mathematischen Statistik, wie dem X^2 - und KOLMOGOROV-Test mit verschiedenen Signifikanzniveaus für den Nachweis der Grundgesamtheit sowie der Korrelations- und Regressionsanalyse zum Auffinden der Funktionswerte, nachgewiesen werden. Die Fehlerwahrscheinlichkeit war geringer als 5 %. Der enorme Aufwand an Berechnungen konnte nur mit einem Rechner bewältigt werden; für den praktischen Gebrauch wurden Diagramme mit dimensionsfreien Parametern entwickelt.

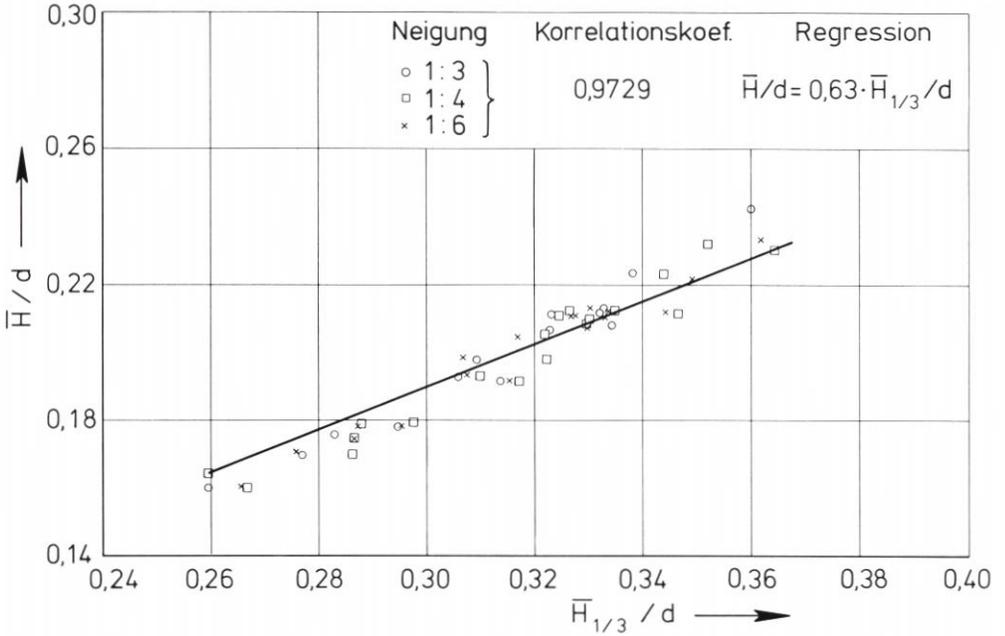


Abb. 5. Regression zwischen signifikanter und mittlerer Wellenhöhe (dimensionslos)

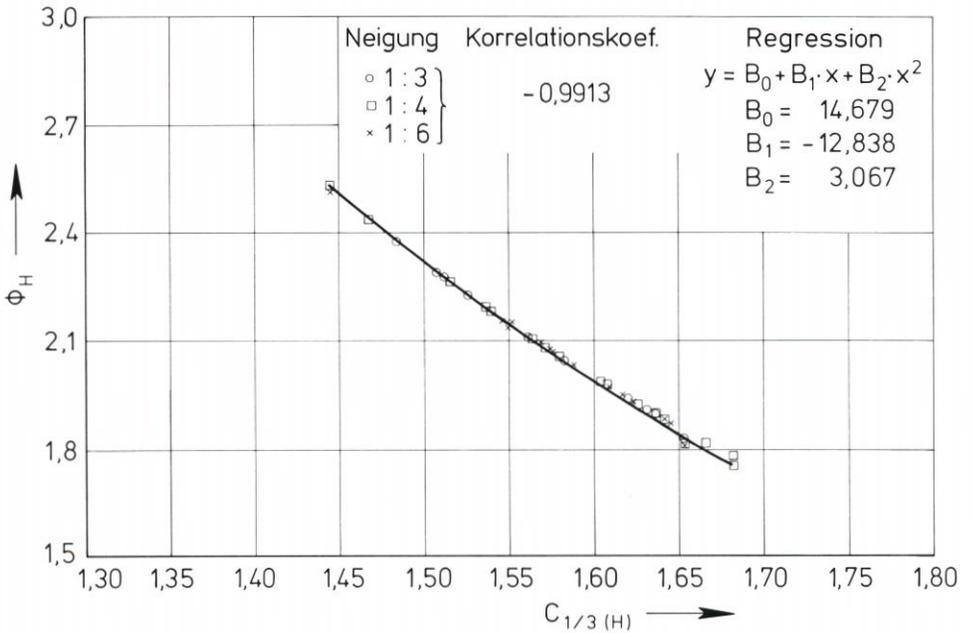


Abb. 6. Regression zwischen dem Exponenten der Amplitudenverteilungsfunktion ϕ und der normalisierten signifikanten Amplitude $C_{1/3}$ für sechs Wellenzüge

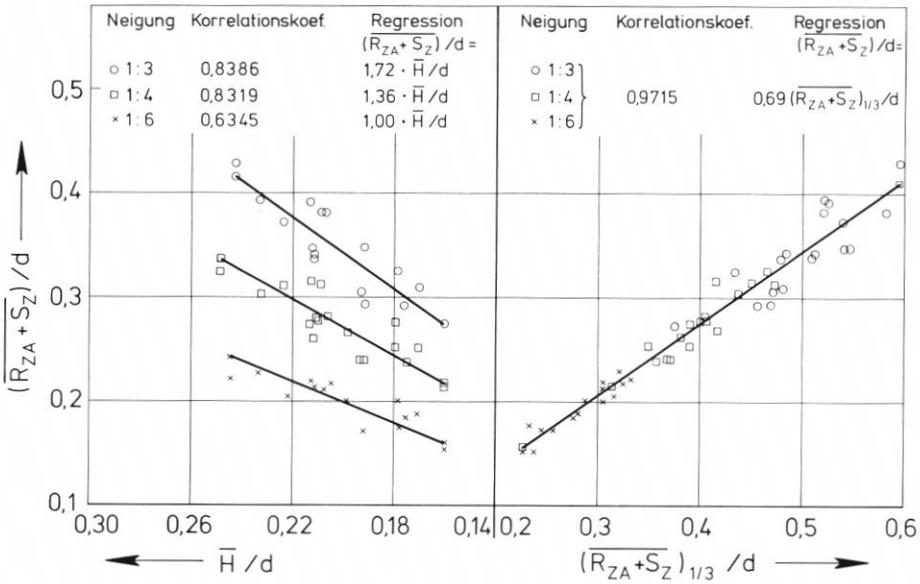


Abb. 7. Regression zwischen mittlerer Wellenhöhe und mittlerem Auflauf (dimensionslos)

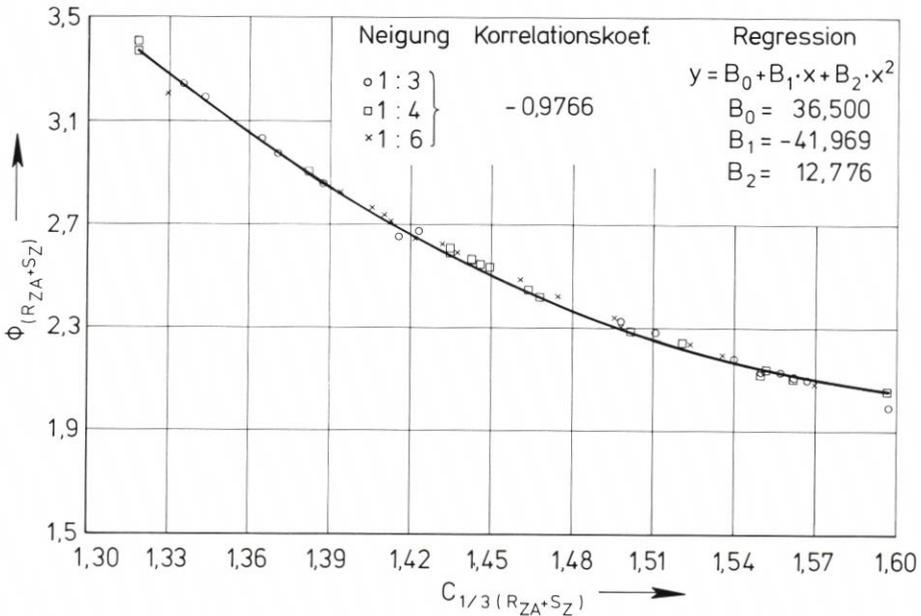


Abb. 8. Regression zwischen dem Exponenten der Auflaufverteilungsfunktion ϕ und dem normalisierten signifikanten Auflauf für sechs Wellenzüge

Die ersten Ergebnisse bestätigten die Richtigkeit und Brauchbarkeit der Annahmen. Die Abhängigkeit zwischen dimensionsloser signifikanter Wellenhöhe und dimensionsloser mittlerer Wellenhöhe zeigt Abb. 5. Der Korrelationskoeffizient von 0,9729 bestätigt die lineare Korrelation zwischen diesen Parametern aus den ausgewählten sechs Grundgesamtheiten. Die Regressionsgerade geht durch den Ursprung und beweist die physikalische Richtigkeit dieser Beziehung. Der Quotient aus $\overline{H}_{1/3}/\overline{H} = 1,587$ weicht nur wenig von dem theoretischen Wert von 1,598 ab, der von LONGUET-HIGGINS 1952 angegeben wurde.

Abb. 6 zeigt die Beziehung zwischen dem Exponenten der Wellenhöhenverteilungsfunktion und dem $C_{1/3}$ -Wert der sechs Wellenzüge. Die Korrelation ist nicht linear, aber der Koeffizient von 0,9913 zeigt wieder die ausgezeichnete Korrelation der Exponenten an und unterstreicht, daß der Verteilungsexponent \varnothing eine Funktion des $C_{1/3}$ -Wertes ist.

Die Beziehung zwischen der mittleren dimensionslosen Wellenhöhe und ihrer mittleren dimensionslosen Auflauhöhe zeigt Abb. 7. Das Ergebnis bestätigt die Annahme, daß die mittlere Auflauhöhe mit der mittleren Wellenhöhe korreliert, und zwar in Abhängigkeit von der Böschungsneigung. Außerdem zeigt das Diagramm, daß die von WEBBER und BULLOCK 1968 vorhergesagte Tendenz zwar stimmt, aber daß die absoluten Zahlenwerte doch erheblich abweichen. Die lineare Abhängigkeit zwischen Auflauf und kennzeichnendem Auflauf mit einem Korrelationskoeffizienten von 0,9795 ist auch aus Abb. 7 zu entnehmen.

Abb. 8 zeigt nun die Abhängigkeit des Exponenten der Verteilungsfunktion von dem Auflauf und die zugehörigen $C_{1/3}$ -Werte. Die Meßpunkte liegen auf einer Parabel mit einem Korrelationskoeffizienten von 0,9766.

Es kann abschließend festgestellt werden, daß die Gültigkeit der Eingangsvoraussetzung nachgewiesen und eine Beziehung zwischen der Wellenhöhe und dem Auflauf gefunden wurde.

Diagramme für die praktische Handhabung unter Berücksichtigung weiterer Parameter und gebrochener Neigungen werden veröffentlicht.

4. S c h r i f t e n v e r z e i c h n i s

- GÖKCESU, S.: Beitrag zum Auflaufvorgang des natürlichen Seeganges im Flachwassergebiet auf glatten Böschungen. Inst. für Wasserbau und Wasserwirtschaft, TU Berlin, Mitt. Nr. 87, Berlin, 1976.
- LONGUET-HIGGINS: On the statistical distribution of the heights of sea waves. J. Mar. Res. Vol. 11, 3, 1952.
- SIEFERT, W. u. KALDENHOFF, H.: Analysis of random waves in shallow water and laboratory reproduction. Proc. 16th Congr. IAHR, Sao Paulo, 1975.
- WEBBER, N. u. BULLOCK, G.: A model study of the distribution of runup of wind generated waves on sloping sea walls. Proc. 11th Conf. Coast. Eng., London, 1968.