

Wellentransmission an Schlitzwänden

Von Joachim Grüne und Sören Kohlhase

Inhalt

1. Einführung	74
2. Definitionen und Bezeichnungen	75
3. Versuchseinrichtungen und Versuchsdurchführung	76
4. Versuchsergebnisse	77
4.1. Ergebnisse für senkrechten Wellenangriff ($\beta = 0^\circ$)	78
4.2. Ergebnisse für Wellenangriffsrichtungen $0^\circ < \beta \leq 90^\circ$	79
5. Schriftumsüberblick und Diskussion	80
6. Zusammenfassung	82
7. Schriftenverzeichnis	82

Summary

This paper deals with the wave transmission through a vertical, slotted wall. In an experimental study the transmission coefficient has been investigated as a function of the shape of the wall elements (rectangular shape and H-beam shape), of the ratio of solid wall to total wall length (wall-element ratio) and of the wave approach direction.

The test results for a wave direction perpendicular to the wall are compared with previous investigations and theoretical derivations. For an oblique wave approach the test results are described by a semi empirical formula. This formula, combined with a theoretical solution for perpendicular wave approach, is used to describe the transmission coefficient for any angle of wave approach.

1. Einführung

Zur Lösung bestimmter Aufgaben des See- und Hafenausbaus kann manchmal ein Bauwerk erforderlich werden, das zum einen teildurchlässig ist, um nur in geringem Maße die Strömungsverhältnisse im Planungsgebiet zu beeinflussen und um Sedimentationsproblemen zu begegnen, das aber zum anderen einen hinreichenden Schutz gegen Wellenangriff bietet. Ein derartiges Bauwerk kann z. B. eine vertikal geschlitzte Wand sein.

Der physikalische Vorgang, wenn eine Welle eine Wand mit senkrechten Schlitz durchläuft, ist schematisch in Abbildung 1 dargestellt. Der Energiehaushalt ergibt sich wie folgt:

$$E_I = E_T + E_R + E_V$$

- mit E_I = Wellenenergie der anlaufenden Welle
 E_T = Energie der durchlaufenden (transmittierten) Welle
 E_R = Energie der reflektierten Welle
 E_V = Energieverlust (-umwandlung) an der Wand

Der Dämpfungsgrad kann allein durch die transmittierte Wellenenergie im Vergleich zur Energie der anlaufenden Welle beschrieben werden oder aber (anstelle eines Energievergleichs) durch einen Vergleich der Wellenhöhen vor und hinter dem Bauwerk.

Das Ziel der Untersuchungen, über die hier berichtet wird, besteht darin, den Dämp-

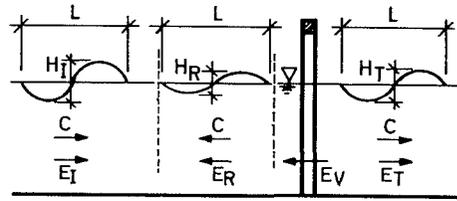


Abb. 1. Wellendurchgang an einer Schlitzwand

fangsgrad, d. h. den Transmissionskoeffizienten für vertikal geschlitzte Wände zu bestimmen unter Berücksichtigung folgender Einflüsse:

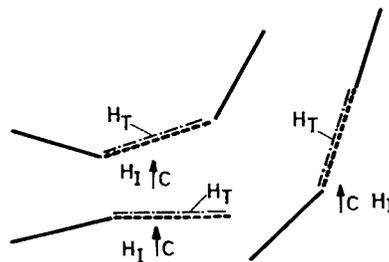
1. Verbauungsgrad der teildurchlässigen Wand, d. h. Verhältnis des undurchlässigen Teils der Wand zur Gesamtfläche
2. Form der Wandelemente
3. Wellenangriffsrichtung.

2. Definitionen und Bezeichnungen

Der Transmissionskoeffizient wurde – wie allgemein üblich – als Verhältnis der transmittierten Wellenhöhe zur Höhe der anlaufenden Welle definiert. Es ist also

$$K_T = \frac{H_T}{H_I}$$

Es war bei den Messungen und Auswertungen zu berücksichtigen, daß die Wellenhöhe hinter der Schlitzwand, bedingt durch die Geometrie des Beckens hinter der Wand, durch Diffraktion beeinflusst wird. Die transmittierte Wellenhöhe mußte daher direkt hinter der Schlitzwand bestimmt werden, wie in Abbildung 2 gezeigt ist. Abbildung 2 zeigt weiter einige mögliche Anordnungen einer Schlitzwand, die mit anschließenden, undurchlässigen Wänden kombiniert wurde.

Abb. 2. Definition der durchlaufenden Welle H_T

Die Öffnungen in der Wand erstreckten sich über die ganze Wassertiefe (Abb. 1). Das Verbauungsverhältnis W kann daher definiert werden (Abb. 3) als

$$W = \frac{b}{e}$$

Die Größe b ist die Breite eines einzelnen Elements; e ist der Abstand der Mittellinien zweier benachbarter Elemente. $100 \times W$ gibt das relative Verbauungsverhältnis in % an.

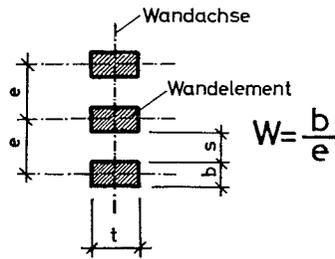


Abb. 3. Bezeichnungen der Wandelemente

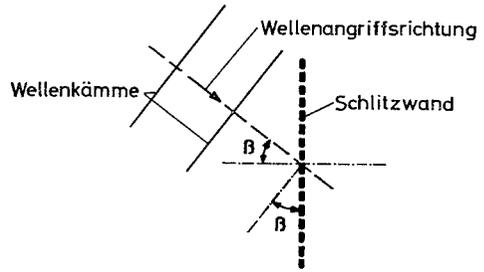


Abb. 4. Definition der Wellenangriffsrichtung

Der Wellenangriffswinkel β wurde, wie in Abbildung 4 angegeben, als Winkel zwischen Wellenkamm und Wand definiert.

3. Versuchseinrichtungen und Versuchsdurchführung

Die Versuche wurden in einem Wellenbecken mit einer Breite von 6,7 m, einer Länge von 35 m und einer Tiefe von 0,5 m durchgeführt (Abb. 5). Das Becken war mit einer Plattenwellenmaschine für monochromatische Wellen ausgestattet, die eine aus Translation und Rotation zusammengesetzte Bewegung erlaubte. Die oberen und unteren Auslenkungen der Platte konnten mit zwei Exzentrerscheiben unabhängig voneinander eingestellt werden, um die Verteilung der horizontalen Komponenten der Orbitalgeschwindigkeiten der Welle für jede gewünschte Wellenhöhe und -periode optimal annähern zu können.

Auf der einen Seite der Schlitzwand wurde eine Wellendämpfung (Böschung) angeordnet, so daß hinter der Schlitzwand ein Ausbreitungsbecken entstand. Auf der anderen

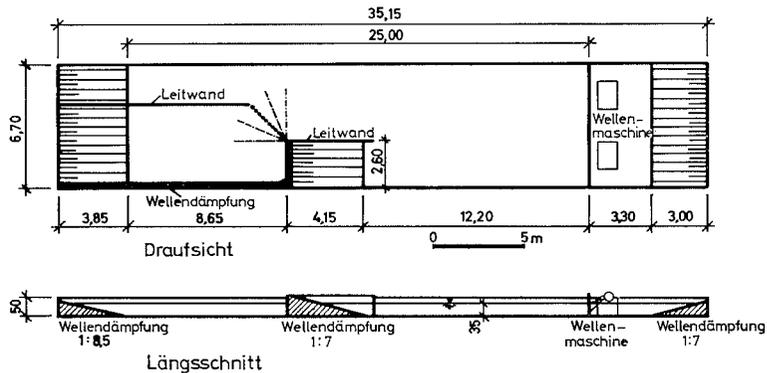


Abb. 5. Versuchseinrichtung

Seite der Schlitzwand wurde die anlaufende Welle von der durchlaufenden Welle durch eine bewegliche, undurchlässige Leitwand getrennt. Für senkrechten Wellenangriff ($\beta = 0^\circ$) wurden auf beiden Seiten Leitwände angeordnet. Die Wellenrichtung wurde schrittweise geändert; die Versuchsreihen umfaßten $\beta = 0^\circ, 45^\circ, 67,5^\circ$ und 90° .

Die Formen und Abmessungen der Wandelemente sind in der folgenden Abbildung angegeben:

Form der Wandelemente	rechteckig $b:t = 1:0,1$	rechteckig $b:t = 1:1,5$	rechteckig $b:t =$	rechteckig $b:t =$	H(Doppel-T) $b:t=1:2$
Abmessungen [cm]					
W	0,5 0,6 0,75	0,4 0,5 0,68	0,68	0,6 0,75	0,425 0,61

Abb. 6

Jede Versuchsserie (mit gleichbleibender Wellenrichtung β , vorgegebener Form und konstantem Verbauungsverhältnis) umfaßte etwa 12 Versuche mit jeweils unterschiedlichen Wellenkennwerten. Diese Wellenparameter wurden schrittweise in folgenden Bereichen verändert:

Wellenhöhe H_I :	4 cm bis 14 cm
Wellenlänge L:	80 cm bis 300 cm
Wellenperiode T:	0,7 s bis 1,7 s
Wellensteilheit H_I/L :	1 : 12 bis 1 : 40

Die Wassertiefe war mit $d = 35$ cm in allen Versuchen konstant.

Die Wellen wurden mit einem beweglichen Wellenpegel über eine elektrische Widerstandsmessung registriert. Sowohl die anlaufende als auch die transmittierte Welle wurde in Querprofilen gemittelt, die anlaufende Welle H_I etwa 5 m vor der Schlitzwand, die transmittierte Welle H_T unmittelbar hinter der Schlitzwand (Abb. 2). Zusätzlich wurde die anlaufende Welle auch in einem Längsprofil gemessen, um den Reflexionsanteil von der Ausgangswelle zu trennen. Für Wellenrichtungen $\beta > 45^\circ$ wurde der an die Wellendämpfung angrenzende Teilbereich der Schlitzwand von etwa 0,5 m Länge für die Mittelwertbildung der transmittierten Wellenhöhe nicht berücksichtigt, um Randeinflüsse, die durch die geometrische Anordnung auftreten, weitgehend auszuschalten.

4. Versuchsergebnisse

Zunächst wurde der Transmissionskoeffizient K_T als Funktion der Wellensteilheit H_I/L aufgetragen. Abbildung 7 zeigt als ein Beispiel einige Ergebnisse von vier Versuchsreihen für Wandelemente mit einem H-förmigen Querschnitt und einem konstanten Verbauungsverhältnis $W = 0,61$. Die Streuung in den Versuchsergebnissen ist möglicherweise zusätzlich durch eine erneute Reflexion der an der Schlitzwand bereits reflektierten Welle an der Wellenmaschine beeinflusst.

Die Meßwerte lassen sich jedoch mit guter Genauigkeit durch eine Gerade ausgleichen, die dann für die weitere Auswertung verwendet wurde. Abbildung 7 zeigt in der Tendenz eine geringe Abnahme des Transmissionskoeffizienten mit zunehmender Wellensteilheit.

Der Einfluß der relativen Wassertiefe d/L ergab sich in Übereinstimmung mit früheren Versuchen [1] als nur gering.

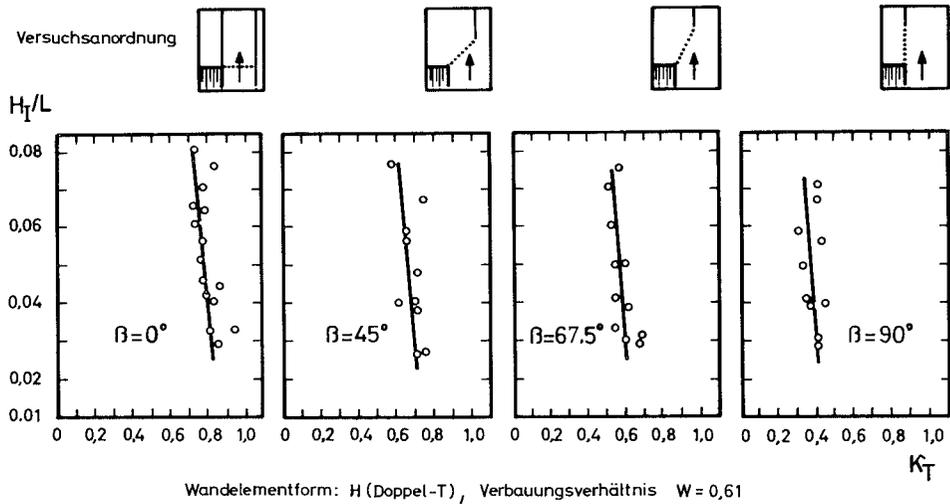


Abb. 7. Transmissionskoeffizient K_T als Funktion der Wellensteilheit H_T/L

4.1. Ergebnisse für senkrechten Wellenangriff ($\beta = 0^\circ$)

Abbildung 8 zeigt den Einfluß der Form der Wandelemente und des Verbaunungsverhältnisses W . Es zeigt sich, daß der Formeinfluß nur gering ist. Abbildung 9 gibt den Einfluß der Wanddicke t an. Erwartungsgemäß nimmt K_T mit zunehmender Wanddicke t ab. Diese Abnahme ist bei zunehmendem Verbaunungsverhältnis W verstärkt vorhanden.

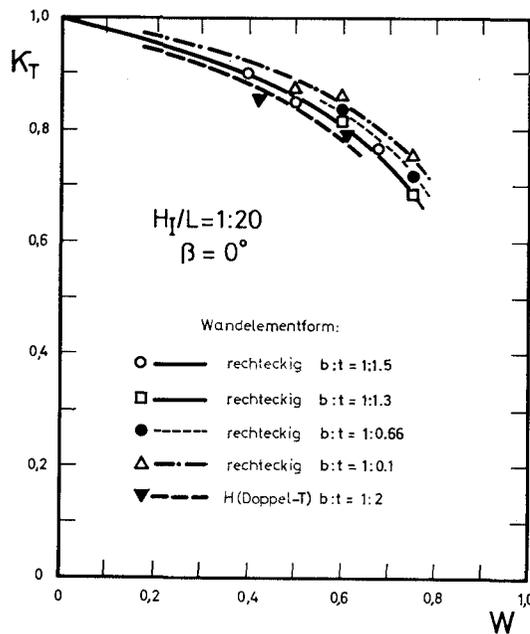


Abb. 8. Transmissionskoeffizient K_T als Funktion des Verbaunungsverhältnisses W

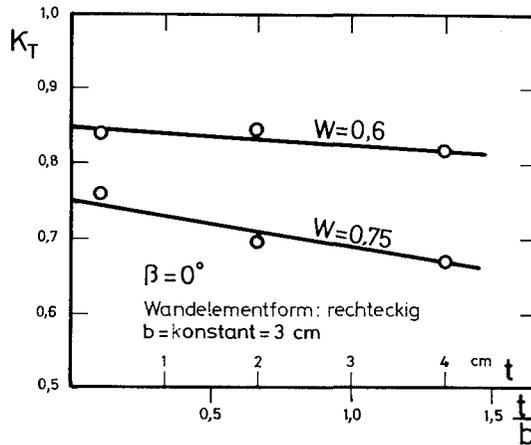


Abb. 9. Transmissionskoeffizient K_T als Funktion der Wanddicke t

Jedoch ist auch der Einfluß der Wanddicke (dem nur geringen Anteil an Wandreibung entsprechend, im Vergleich zu den Ein- und Austrittsverlusten) nur von untergeordneter Bedeutung.

4.2. Ergebnisse für Wellenangriffsrichtungen $0^\circ < \beta \leq 90^\circ$

Im Vergleich zu den unter Abschnitt 4.1. für $\beta = 0^\circ$ angegebenen Ergebnissen nimmt der Einfluß der Elementform bei schrägem Wellenangriff $\beta > 0^\circ$ zu. Abbildungen 10 und 11 zeigen die Ergebnisse für K_T als Funktion der Wellenrichtung β für verschiedene Verbauungsverhältnisse W und Querschnittsformen der Wandelemente.

In allen Fällen mit $\beta = 90^\circ$ ist der Transmissionskoeffizient etwa nur halb so groß wie bei senkrechtem Wellenangriff ($\beta = 0^\circ$). Dieses findet eine einfache Erklärung durch Diffraktionseffekte, die durch den an die Schlitzwand angrenzenden, undurchlässigen Teil der Wand entstehen. Diese undurchlässige Wand an der Seite der Wellendämpfung

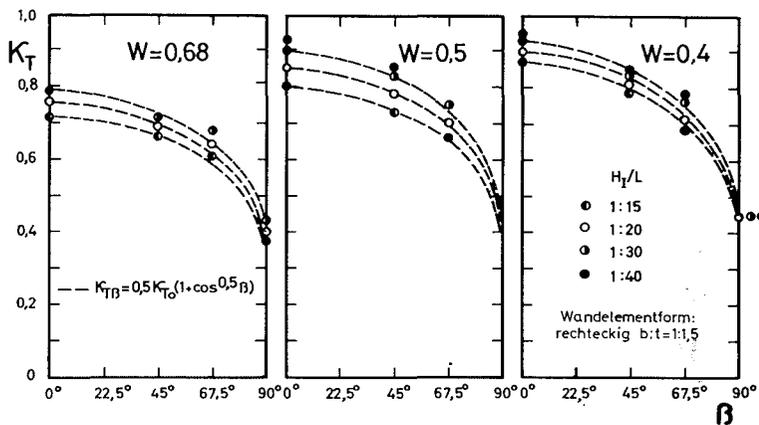


Abb. 10. Transmissionskoeffizient K_T als Funktion der Wellenangriffsrichtung

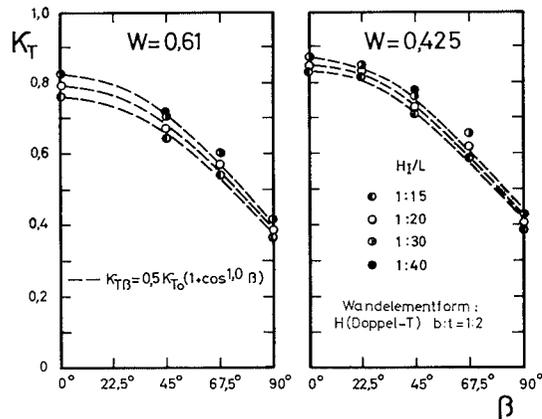


Abb. 11. Transmissionskoeffizient K_T als Funktion der Wellenangriffsrichtung

(Abb. 5) kann als halbbunendlicher Wellenbrecher aufgefaßt werden und die Wellenausbreitung dafür nach den bekannten Diagrammen für die Diffraktion bestimmt werden.

Grundsätzlich muß beachtet werden, daß der Transmissionskoeffizient K_T für $\beta \geq 0^\circ$ (speziell für $\beta > 75^\circ$) einen Teil der Diffraktionseffekte enthält. Diese Diffraktionseffekte sind abhängig von der relativen Wandlänge l/L (Schlitzwandlänge bezogen auf die Wellenlänge); sie lag in den Versuchen im Bereich von $1,0 < l/L < 3,75$.

Die Versuchsergebnisse aus Abbildung 10 und 11 können zusammengefaßt werden durch eine halbempirische Gleichung:

$$K_{T\beta} = 0,5 \cdot K_{T0} (1 + \cos^a \beta)$$

Hierin sind

- $K_{T\beta}$ = Transmissionskoeffizient für den Wellenangriffswinkel β
- K_{T0} = Transmissionskoeffizient für senkrechten Wellenangriff ($\beta = 0^\circ$)
- a = Formbeiwert der Wandelemente

Die Größe des Formbeiwertes a wurde ermittelt zu

- $a = 0,5$ für den Rechteckquerschnitt mit $b : t = 1 : 1,5$
- $a = 1,0$ für den H-förmigen Querschnitt mit $b : t = 1 : 2$

Die Unterschiede in K_T für verschiedene Querschnittsformen der Wandelemente, insbesondere für große Winkel β , sind ohne Zweifel beeinflusst durch ausgeprägte Ablösewirbel beim H-Typ, die im Versuch deutlich sichtbar wurden.

5. Schrifttumsüberblick und Diskussion

Für die Transmission an geschlitzten Wänden sind lediglich für senkrechten Wellenangriff $\beta = 0^\circ$ vergleichbare Ergebnisse veröffentlicht worden. Für diesen Fall wurden Versuche durchgeführt von HARTMANN [1] für rechteckförmige Elemente, HAYASHI et al. [2] [3] und WIEGEL [4] für Wandelemente mit Kreisquerschnitt. Wie Abbildung 12 zeigt, sind diese Ergebnisse in guter Übereinstimmung mit den im Franzius-Institut durchgeführten Messungen.

Für $\beta = 0^\circ$ haben WIEGEL, HAYASHI et al. und HARTMANN die Wellentransmission durch teildurchlässige Wände auch theoretisch untersucht.

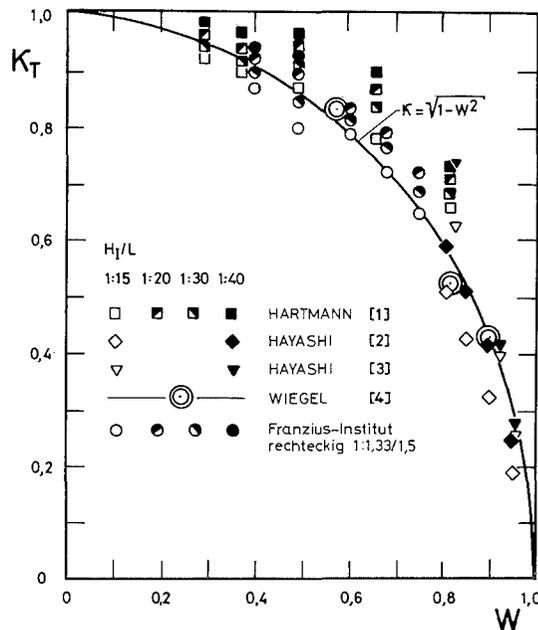


Abb. 12. Vergleich der Ergebnisse für senkrechten Wellenangriff ($\beta = 0^\circ$)

WIEGEL [4] gibt als Beziehung zwischen Transmissionskoeffizient K_T und Verbauungsverhältnis W folgende Gleichung an:

$$K_{T0} = \sqrt{1 - W}$$

Die nach dieser Gleichung berechneten Transmissionskoeffizienten liegen um rd. 25 % unter den gemessenen.

HAYASHI et al. [2] [3] untersuchte die Wellentransmission für Verbauungsverhältnisse $W = 0,8$ bis $1,0$ und entwickelte in [2] folgende Gleichung:

$$K_{T0} = 4 \frac{d}{H_I} \varepsilon \left[-\varepsilon + \sqrt{\varepsilon^2 + \frac{H_I}{2d}} \right]$$

mit

$$\varepsilon = C \left(\frac{s}{b+s} \right) \sqrt{1 - \left(\frac{s}{b+s} \right)^2} \quad \text{und } C = 0,9 \text{ bis } 1,0$$

Diese Gleichung kann umgeformt werden zu

$$K_{T0} = 4 \frac{d/L}{H_I/L} \cdot \varepsilon \left[-\varepsilon + \sqrt{\varepsilon^2 + \frac{H_I/L}{2 \cdot d/L}} \right]$$

mit

$$\varepsilon = C \cdot (1 - W) / \sqrt{1 - (1 - W)^2}$$

Die Transmissionskoeffizienten K_T ergeben sich nach obiger Gleichung für den Bereich $W < 0,8$ stärker abhängig von der relativen Wassertiefe d/L , als es nach den Versuchsergebnissen zu erwarten ist.

Für Flachwasserwellen kleiner Amplitude gilt in [3] eine Modifikation der in [2] angegebenen Gleichung:

$$K_{T_0} = 4 \cdot \frac{d/L}{H_I/L} \varepsilon \frac{a^2 kd}{\alpha \tanh kd} \left[-\varepsilon + \sqrt{\varepsilon^2 + \frac{H_I/L}{2d/L} \frac{\tanh kd}{a^2 kd}} \right]$$

mit

$$a = 1,1 \text{ und } \alpha = \left(\frac{kd}{\sinh kd} \right)^2 \left(1 + \frac{\sinh^2 kd}{3} \right)$$

Schließlich sei noch die Gleichung von HARTMANN [1] aufgeführt, die auf der von GODA und IPPEN für ein mehrfach hintereinander angeordnetes Maschengitter entwickelten Energieübertragungstheorie aufbaut. Unter gewissen Annahmen entwickelte HARTMANN die Gleichung

$$K_{T_0} = \sqrt{1 - W^2}$$

Diese Gleichung zeigt – wie Abbildung 12 verdeutlicht – eine gute Übereinstimmung mit allen experimentellen Daten.

6. Zusammenfassung

Die experimentellen Ergebnisse und ein Vergleich mit Ergebnissen anderer Autoren für senkrechten Wellenangriff ($\beta = 0^\circ$) haben gezeigt, daß der Transmissionskoeffizient nur geringfügig von der relativen Wassertiefe d/L und der Dicke t der teildurchlässigen Wand abhängig ist. Einen weit größeren Einfluß haben neben der Wellensteilheit H/L und der Querschnittsausbildung der Wandelemente das Verbauungsverhältnis W und die Wellenrichtung β .

Für schrägen Wellenangriff ($\beta > 0^\circ$) wurde festgestellt, daß der Formeinfluß gegenüber senkrechtem Wellenangriff zunimmt.

Für den Fall $0^\circ \leq \beta \leq 90^\circ$ werden die Versuchsergebnisse durch die Gleichung

$$K_{T\beta} = 0,5 \cdot K_{T_0} (1 + \cos^2 \beta)$$

erfüllt. Unter Verwendung der von HARTMANN für K_{T_0} abgeleiteten Beziehung ergibt sich damit für den Transmissionskoeffizienten die Gleichung

$$K_{T\beta} = 0,5 \sqrt{1 - W^2} (1 + \cos^2 \beta)$$

7. Schriftenverzeichnis

1. HARTMANN: Das Stabgitter in instationärer Strömungsbewegung. Mitt. des Instituts für Wasserbau und Wasserwirtschaft. TU Berlin, Heft 69, 1969.
2. HAYASHI et al.: Hydraulic Research on the Closely Spaced Pile Breakwater. Coastal Engineering in Japan. Vol. 9, 1966.
3. HAYASHI et al.: Closely Spaced Pile Breakwater as a Protection Structure against Beach Erosion. Coastal Engineering in Japan. Vol. 11, 1968.
4. WIEGEL: Closely Spaced Piles as a Breakwater. Dock und Harbour Authority. Sept. 1961.