

Freibordbemessung an Hochwasserschutzanlagen

Reinhard Pohl

Die einschlägigen Regelwerke verlangen zur Festlegung der Kronenhöhe von Deichen eine Freibordbemessung. Im vorliegenden Beitrag werden die dafür zur Verfügung stehenden technischen Regeln und deren Anwendung auf Fließgewässer diskutiert und zusätzliche Informationen gegeben.

Stichworte: Hochwasserschutzanlage, Deich, Hochwasserschutzwand, Freibord, Wellenauflauf, Bemessungswasserstand

1 Einführung

Bei der hydraulischen Bemessung von Hochwasserschutzanlagen, bedarf es der Formulierung bestimmter Schutzziele. Die möglichen *Einwirkungen* durch das Hochwasser müssen quantifiziert werden (Hydrologie, Hydraulik), um dann den erforderlichen, der Einwirkung entgegensetzenden *Widerstand* (Wasserbau, Geotechnik) festlegen zu können. Dazu bedarf es verschiedener hydraulischer Berechnungen, die entweder als eigenständiger Nachweis oder als Ausgangswerte für weiterführende Standsicherheitsberechnungen dienen. Die Freibordbemessung nimmt dabei einen wichtigen Platz ein, weil sie die Überflutungssicherheit bis zum Schutzziel garantieren soll.

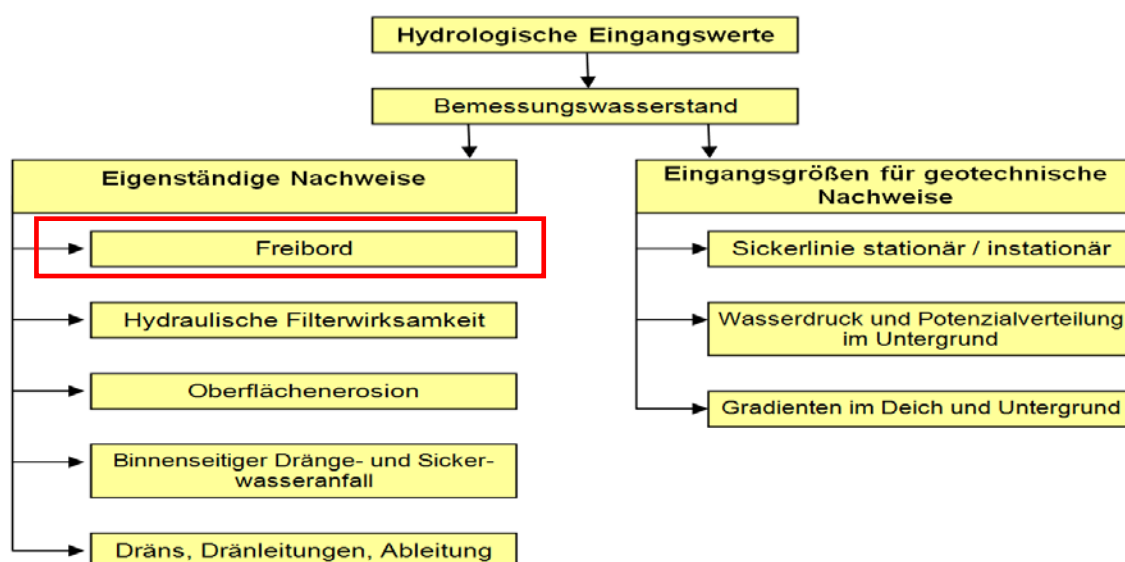


Abbildung 1: Übersicht über die hydraulischen Nachweise bei Deichen.

Als technische Regel für die Freibordbemessung wird in Deutschland vielfach das DVWK-Merkblatt 246/1997 „Freibordbemessung an Stauanlagen“ ange-

wendet. Dieses ist ursprünglich für stehende Binnengewässer, also für natürliche und künstliche Seen sowie breitere Kanäle erarbeitet worden. Angesichts der großen Wasserflächen und Streichlängen des Windes bei Hochwasser, die durch Deichrückverlegungen noch vergrößert werden, wird von Anwendern immer wieder die Frage gestellt, inwieweit diese Ansätze auch für Hochwasserschutzanlagen an Fließgewässern anwendbar sind.



Abbildung 2: Hochwasserschutzdeiche beidseits des Mississippi oberhalb von New Orleans, LA, USA. Streichlängen ca. 1 km.

Abbildung 3: Hochwasserschutzwand mit verschließbarer Durchfahrt und Übersteigmöglichkeit, Belle Schasse, LA, USA (Fotos: Verfasser)

2 Grundzüge der Freibordbemessung

Der Freibord ist der vertikale Abstand zwischen der Krone der Hochwasserschutzanlage und dem Bemessungshochwasserstand und damit ein Maß für die Gewährleistung der Bauwerkssicherheit gegenüber Versagen infolge Überströmung. Er setzt sich aus *Windstau*, *Wellenauflauf* und zusätzlichen *Kronenerhöhungen* zusammen.

Für die praktische Berechnung der *Wellenkennwerte* (H , T) und den sich daraus für eine bestimmte Ufergeometrie ergebenden Größen *Windstau* und *Wellenauflauf* gibt es detaillierte Anleitungen (z.B. DVWK-Merkblatt 246/1997), die auf eine Auswahl von geeigneten Ansätzen aus einer Vielzahl von Verfahren zurückgreifen.

Der *Windstau* kann z.B. mit der empirischen Zuiderzee-Formel in Abhängigkeit von der Form und Ausdehnung der vom Wind überwehten Fläche (Streichlänge, Windwirklänge), von der hauptsächlich Windrichtung, der Windgeschwindigkeit, der Windeinwirkzeit, der Wassertiefe und der Strömung ermittelt werden. Bei kleinen Streichlängen ist er vernachlässigbar. Bei großen Wasserflächen ge-

ringer Tiefe (z. B. Vorländer, Flutungspolder) kann er wenige Dezimeter betragen.

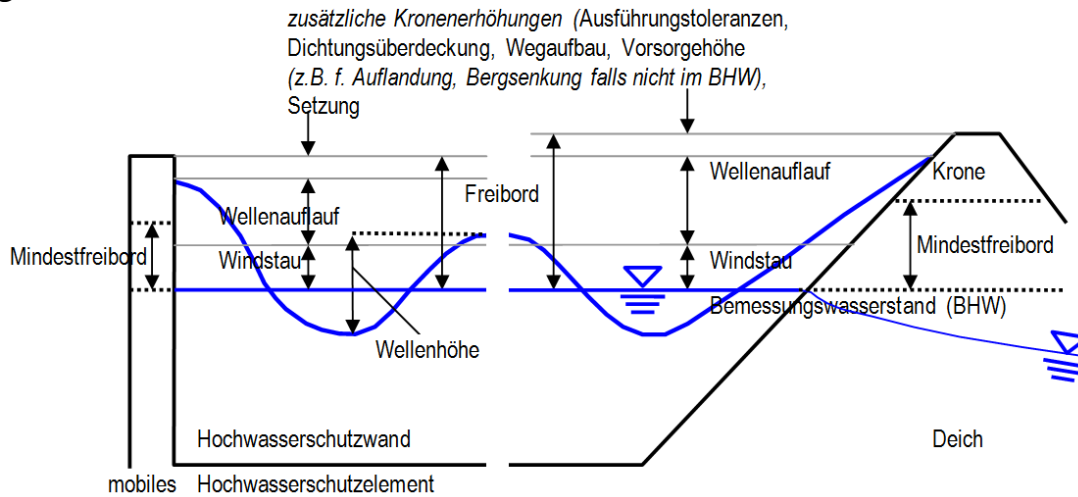


Abbildung 4: Zusammensetzung der rechnerisch erforderlichen Freibordhöhe

Den größten Anteil an der rechnerisch erforderlichen Freibordhöhe beansprucht im Allgemeinen der *Wellenauflauf*, der aus den zuvor ermittelten Wellenkennwerten in Abhängigkeit von der Form und der Beschaffenheit der Auflaufböschung berechnet werden kann.

In Abhängigkeit von der Bauweise und der Größe/Bedeutung der Hochwasserschutzanlagen werden Mindestfreibordempfehlungen vorgeschlagen, die nur dann zum Tragen kommen, wenn die rechnerisch ermittelte Freibordhöhe an kleinen Flüssen geringer ausfällt: für kleine und mittlere Deiche: 50 cm; große Deiche mit 3 m Deichhöhe: 50 cm, ab 5 m Deichhöhe: 1 m; Zwischen 3 m und 5 m Deichhöhe wird eine gleitende Mindestfreibordhöhe (z. B. mit linearer Interpolation von 0,50 bis 1,0 m) empfohlen. Für Hochwasserschutzwände und überströmungsfeste mobile Hochwasserschutzelemente wird ein Mindestfreibord von 20 cm vorgeschlagen, während für die Überströmung nicht zugelassene mobile Hochwasserschutzelemente wenigstens 50 cm Freibord haben sollten. Außerdem sollten sie mindestens gleich hoch wie der angrenzende Deich oder die Hochwasserschutzmauer sein, um nicht als erstes überströmt zu werden.

Bei kleinen und mittleren Deichen kann der Freibordnachweis entfallen, wenn Wellenauflauf, Windstau und notwendige zusätzliche Kronenerhöhungen keine den Mindestfreibord überschreitende Größe erwarten lassen wie dies i. d. R. bei Hauptstreichlängen unter 100 Metern und Wassertiefen unter 5 Metern sowie wasserseitigen Böschungsneigungen von 1 : 3 und flacher der Fall ist.

Die abschnittsweise Festsetzung des Freibordes mit stufenlosen Übergängen hat sich als zweckmäßig erwiesen. Die Summe aller ermittelten Freibordanteile ist mit dem Mindestfreibord zu vergleichen. Maßgebend für die Festlegung der

Kronenhöhe ist der größere Wert. In Abhängigkeit vom gewählten Schutzbauwerk, den maßgebenden Streichlängen, der Lage sowie der Flussmorphologie können sich unterschiedliche erforderliche Kronenhöhen ergeben, die aber bei Betrachtung aller Einwirkungen den gleichen Schutzgrad aufweisen.

Bei der *Festlegung der Kronenhöhe* sind in der Regel noch weitere Gesichtspunkte wie benachbarte und gegenüberliegende Deichkronenlagen sowie das Schutzziel und das Restrisiko zu berücksichtigen. Weil ein Schutz gegen das höchstmögliche Hochwasser nicht möglich ist, nimmt man ein bestimmtes Restrisiko in Kauf, über dessen Annehmbarkeit unter Berücksichtigung der Folgen (des Schadenspotenzials) zu entscheiden ist.

Diese gesellschaftliche Entscheidung muss mit einem besonderen Maß an Verantwortung getroffen werden, da sie wirtschaftliche, technische, ökologische, städtebauliche, psychologische und politische Gesichtspunkte berührt und gebührend berücksichtigen muss.

Eine Deichüberströmung birgt große Gefahren, weil ein dadurch möglicherweise initiiertes Bruch im Hinterland katastrophale Schäden anrichten kann. Daher sollte der Polderraum bei Überschreiten der Bemessungsgrenze allmählich gefüllt werden (z.B. durch erosionsstabile Überlaufstrecken oder andere Flutungsbauwerke), um somit den unkontrollierten Bruch zu vermeiden. Kammerungen (Binnendeiche) im Polderraum können helfen, Restrisiken zu vermindern.

3 Weiterführende Berechnungsansätze

Zusätzlich zu den im DVWK-Merkblatt 246 aufgeführten Ansätzen können noch weitere Einflüsse berücksichtigt werden. Dies sind insbesondere das Auflaufverhalten im Übergangsbereich zwischen brechenden und nicht brechenden Wellen, der schräge Wellenan- und -auflauf sowie der Einfluss einer deichparallelen Strömung. Darüber hinaus gibt es verschiedene Möglichkeiten, der Ermittlung des wellenbedingten Freibordanteiles, wofür vom Verfasser bereits 1989 Kriterien vorgestellt wurden:

1. Die Auflaufhöhe, die von einem bestimmten auf die anlaufenden Wellen bezogenen Prozentsatz überschritten wird, ist maßgebend. (z. B. 2%: von 100 Wellen gelangen 2 Aufläufe auf/über die Krone).
2. Der Überlauf von Wellen, deren Auflaufhöhe größer ist als die mit einer bestimmten Überschreitungswahrscheinlichkeit wird zugelassen. (z. B. 2%: von 100 Aufläufen gelangen 2 auf/über die Krone).

3. Ein kritisches wellenbezogenes Überlaufvolumen (z.B. $q \cdot T = 0,5 \text{ m}^3/\text{m}$) mit einer bestimmten Überschreitungswahrscheinlichkeit ist maßgebend. (z.B. 2% von 100 Überläufen haben 2 ein Volumen $> 0,5 \text{ m}^3/\text{m}$).
4. Der mittlere quasistationäre spezifische Überlauf q darf einen Grenzwert (z.B. $q = 0,001 \text{ m}^3/\text{s}$) nicht überschreiten.
5. In einer bestimmten Zeit darf nur eine festgelegte Anzahl von Überläufen ein kritisches Volumen überschreiten (z.B. pro Stunde maximal 2 Überläufe mit $q \cdot T = 0,5 \text{ m}^3/\text{m}$)

Die Kriterien 1 und 4 sind modelltechnisch am besten zu erfassen. Während Möglichkeit 1 bei Hochwasserschutzanlagen an Fließgewässern die gängige Praxis ist, wird vor allem bei Seedeichen zunehmend das vierte Kriterium benutzt.

3.1 Übergangsbereich zwischen brechenden und nicht brechenden Wellen

Auf der Grundlage von Modellversuchen wurde vom Verfasser (Pohl 1997) vorgeschlagen, die Auflauhöhen der brechenden und der nicht brechenden Wellen in eine Gleichung miteinander zu verbinden, so dass sich eine stetige Funktion der Auflauhöhe

$$R = R_{nb} \cdot P + R_b \cdot (1 - P) \cdot k_r \quad (1)$$

in Abhängigkeit vom Brandungsparameter

$$\xi_{m-1,0} = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{H_{m0} / L_{m-1,0}}} \quad (2)$$

mit der Wahrscheinlichkeit

$$1 - P = e^{-\left(\frac{\xi_{m-1,0}}{3,6}\right)^{2,25}} \quad (3)$$

des Wellenbrechens für $R_{2\%}$ ergibt. Diese Funktion der Auflauhöhe startet mit kleinen Böschungsneigungen und Brandungsparametern in der Nähe von Null und geht über ein lokales Maximum bei etwa $\zeta = 3$ zur Auflauhöhe schwingender Wellen an einer senkrechten Wand, um sich dem Wert $R_{2\%}/H_{m0} \rightarrow 2$ asymptotisch zu nähern. Die zugehörigen Auflauhöhen R für den brechenden (b) und den nicht brechenden (nb) Bereich werden mit üblichen Ansätzen ermittelt, die nachfolgend verkürzt dargestellt sind

$$R_{b,2\%} = 1,77 \cdot H_{m0} \cdot \xi_{m-1,0} \quad (4)$$

$$R_{nb,2\%} = 1,89 \cdot \sqrt{\frac{\pi}{2 \cdot \alpha}} \cdot H_{m0} \quad (5)$$

Hydraulische Modellversuche von Forschergruppen unter Beteiligung des Verfassers im Wellenbecken des Dänischen Hydraulischen Institutes (DHI) in Hørsholm im Rahmen des Hydralab III – Programmes der EU, deren Auswertung vom BMBF unterstützt wurden, gaben die Möglichkeit, diesen Ansatz zu überprüfen und weitere Untersuchungen durchzuführen. Die ursprüngliche Datenbasis für die Gleichung wurde mit eigenen Versuchen in einer Glasrinne des Hubert-Engels-Labors der TU Dresden (30 m x 0,8m x 0,8m) mit den Auflaufböschungen 1:2; 1:1,3; 1:1 und 1:0,5 sowie einem JONSWAP Spektrum mit $H_{m0} = 0.077$ m und einer Peak Frequenz von 1,14 Hz (Heyer & Pohl, 2005) unter Hinzuziehung weiterer Untersuchungen gelegt (e.g. Ahrens, 1981; van der Meer & Janssen, 1994, Pohl 1997).

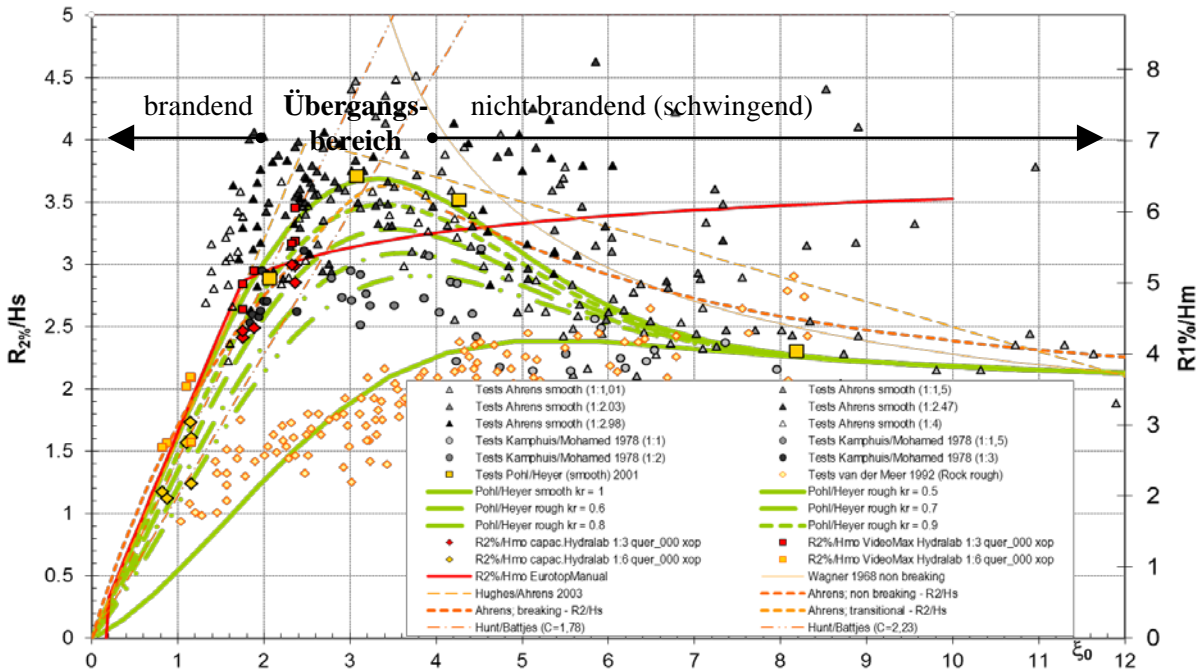


Abbildung 5: Normierte Auflaufhöhe in Abhängigkeit vom Brandungsparameter

3.2 Schräger Wellenan- und -auflauf

Für die Erfassung weiterer Einflüsse auf den Wellenauflauf werden die Koeffizienten γ_b (Berme), k_r (Böschungsrauhheit) und γ_β (schräger Wellenanlauf $\beta \neq 0^\circ$) entsprechend der Definition

$$\gamma_\beta = \frac{(R_{2\%}/H_{m0})_\beta}{(R_{2\%}/H_{m0})_{\beta=0^\circ}} \quad (6)$$

verwendet. Auch für letzteren Einfluss gibt es verschiedene empirische Gleichungen, von denen nicht alle die Randbedingungen bei großen ($\beta \rightarrow \pm 90^\circ$) oder steilen Böschungen plausibel erfüllen. Zur Klärung dieser Unsicherheiten wurden im großen Wellenbecken des DHI Versuche zum Wellenauf- und Überlauf

auf 1:3 und 1:6 geneigten Böschungen mit $H_s = 0,07 \dots 0,15$ m; $T_p = 1,0 \dots 2,15$ s; $\beta = -45^\circ, -30^\circ, -15^\circ, 0^\circ, +15^\circ, +30^\circ$ und deichparallelen Strömungsgeschwindigkeiten $v = 0; 0,15; 0,3; 0,4$ m/s durchgeführt. Über weitere Details der Versuche gibt der entsprechende Forschungsbericht Auskunft.

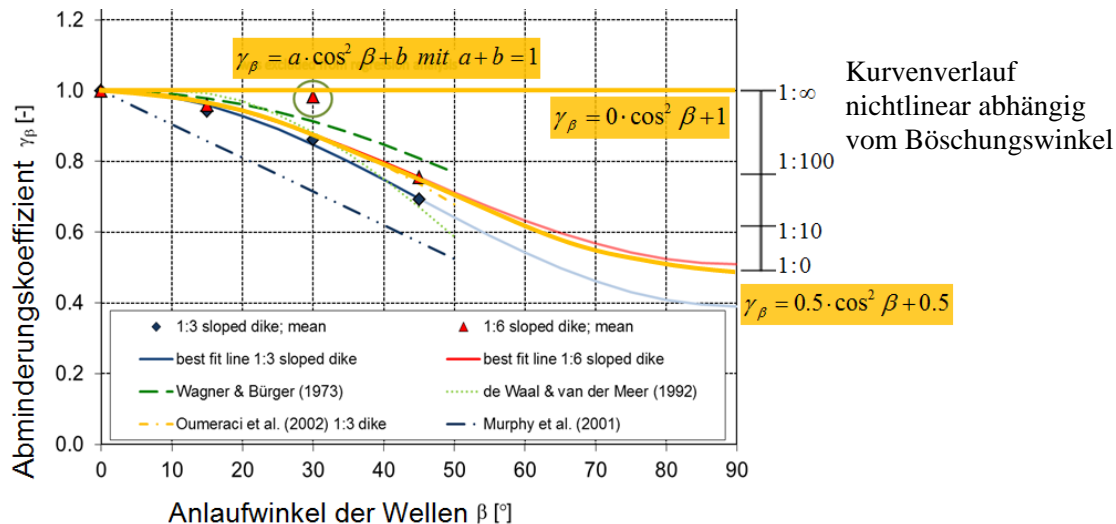


Abbildung 6: Abminderung der Auflaufhöhe bei schrägem Wellenanlauf

Aus theoretischen Überlegungen und unter Berücksichtigung der Randbedingungen wurde für den Abminderungsfaktor bei schrägem Wellenanlauf die Gleichung

$$\gamma_\beta = a \cdot \cos^2 \beta + b \quad \text{mit } a + b = 1 \quad (7)$$

vorgeschlagen. Die Anpassung an die Versuchswerte ergab die Gleichungen

$$\gamma_\beta = 0,49 \cdot \cos^2 \beta + 0,51 \quad \text{für } 1 : 6 \quad (8)$$

$$\text{und } \gamma_\beta = 0,61 \cdot \cos^2 \beta + 0,39 \quad \text{für } 1 : 3, \quad (9)$$

die in der Tendenz den theoretischen Vorüberlegungen entsprechen.

3.3 Einfluss einer deichparallelen Strömung auf den Wellenaufbau

Die für die Berechnung von Windstau und Windwellenkennwerten auf Fließgewässern zur Verfügung stehenden Ansätze basieren meist auf Beobachtungen an stehenden Gewässern und gelten daher nur für sehr geringe Fließgeschwindigkeiten. Deshalb war die Untersuchung des Einflusses von quer oder schräg zur Wellenausbreitungsrichtung verlaufenden Strömungen ein besonders wichtiger Punkt der durchgeführten Modellversuche.

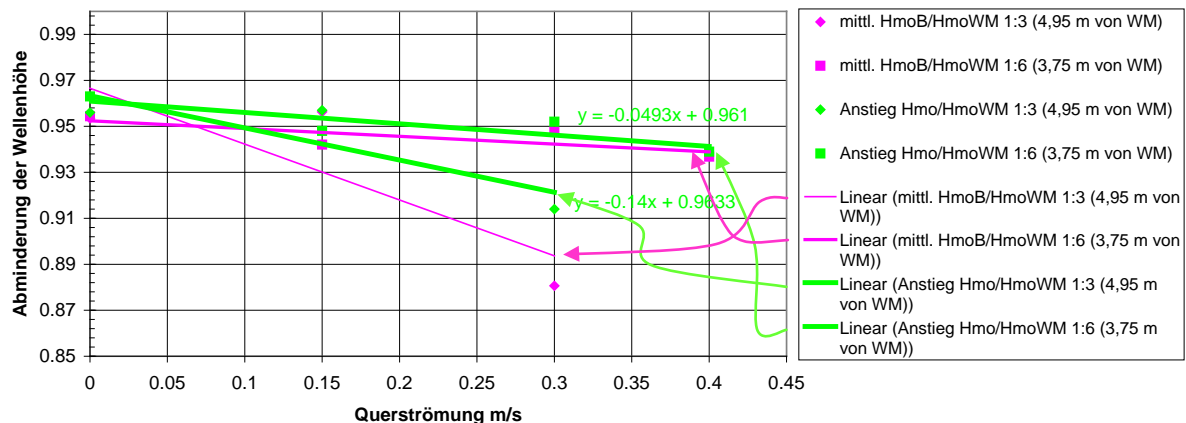


Abbildung 7: Abminderung der Wellenhöhe (Verhältnis der signifikanten Wellenhöhen nach und vor der Strömungsquerung am Wellenerzeuger) in Abhängigkeit der Querströmungsgeschwindigkeit und der Lauflänge nach zwei verschiedenen Auswertemethoden

Zunächst wird die mögliche Veränderung der Wellenkennwerte auf dem Weg durch das quer zur Wellenausbreitungsrichtung fließende Wasser betrachtet. Wegen der versuchstypischen Streuung der Werte bei Wellenversuchungen ist die Feststellung einer signifikant nachweisbaren Abminderung der Wellenhöhe durch die Querströmung schwierig. Nach dem gegenwärtigen Stand der Auswertung zeichnet sich ab, dass die in Gl. (4) und (5) eingesetzten Wellenhöhen beim Durchlaufen der Querströmung eine geringe Abminderung auf 90 bis 95 Prozent erfahren (Abb. 7), die von der Quergeschwindigkeit und der Lauflänge abhängig ist. Die Abminderung ist relativ gering, weil beim Anlauf mit Querströmung lediglich eine seitliche Parallelverschiebung der Wellenkämme stattfindet. Wenn für die Wellenbewegung das Orbitalmodell benutzt werden soll, ergeben sich durch die seitliche Verschiebung der Wellenkämme spiralförmige Bahnlinien der Wasserteilchen, die mit einem etwas längeren Weg verbunden sind, der bei gleichem Energieinhalt zu geringeren Wellenhöhen führen mag.

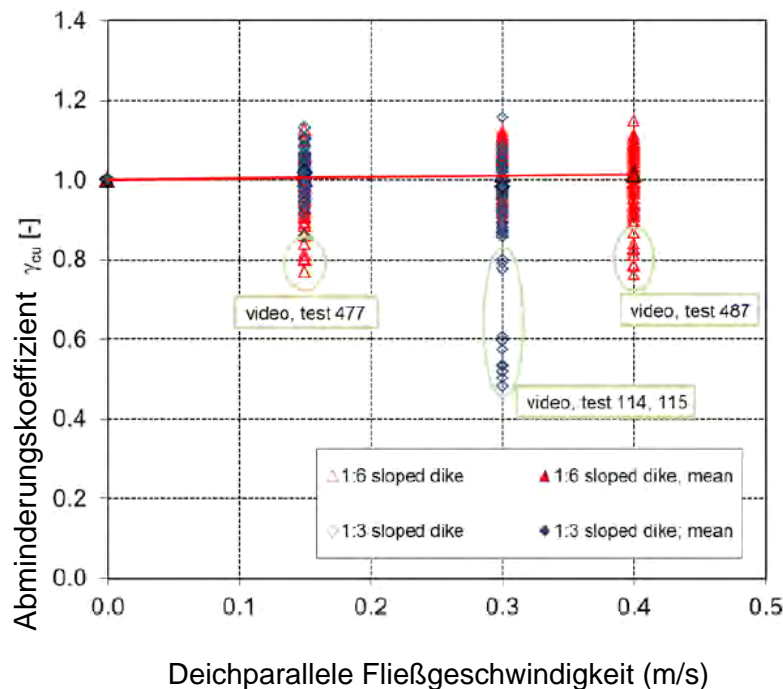


Abbildung 8: Auflaufhöhe bei Querströmung

Die Ergebnisse der auf die Wellenkennwerte am Fuß der 1 : 3 und 1 : 6 geneigten Böschungen bezogenen Auflaufhöhen mit Fließgeschwindigkeiten von bis zu 0,4 m/s und Wassertiefen von 50 cm bei bis zu 15 cm Wellenhöhe haben im Mittel keinen signifikanten Einfluss der Strömung, wohl aber eine gewisse Streuung der Einzelwerte erkennen lassen (Abb. 8).

Es ist also mit einer geringfügigen Abminderung der Wellenkennwerte auf ihrem Weg durch die Querströmung, nicht aber mit einer Abminderung des auf die Wellenkennwerte am Böschungsfuß bezogenen Auflaufes zu rechnen.

Wenn von einem 10fach vergrößerten *Froudemodell* ohne größere Maßstabseffekte ausgegangen werden könnte, wäre eine Übertragung auf Naturverhältnisse mit 5 m Wassertiefe, 1,5 m signifikanter Wellenhöhe und mittleren Fließgeschwindigkeiten von etwa 1,25 m/s möglich. Die Ergebnisse bestätigen also die früher schon praktizierte Anwendung der Ansätze der Freibordbemessung für stehende Gewässer auch auf Fließgewässer und gestatten nicht oder nur in sehr geringem Umfang die vielleicht erhoffte Abminderung der Auflaufhöhe.

4 Zusammenfassung

Die Freibordbemessung für Hochwasserschutzanlagen an Fließgewässern kann mit den bekannten Ansätzen für stehende Gewässer vorgenommen werden.

Die bisherigen Beziehungen für die Berechnung des Wellenauflaufes konnten im brandenden Bereich bestätigt und im Übergangsbereich zu den nicht brechenden Wellen mit einem weiteren Ansatz ergänzt werden. Es wurde festgestellt, dass monoton steigende Auflauhöhen mit zunehmendem Brandungsparameter, wie zum Beispiel im *EurOtop Manual 2007* dargestellt, nicht zu erwarten sind. Vielmehr gibt es ein Auflaufmaximum in der Nähe von $\xi \approx 3$.

Untersuchungen zum Einfluss einer Querströmung haben keine signifikanten Änderungen des Wellenauflaufes (bezogen auf die Wellenkennwerte am Böschungsfuß) verglichen mit stehenden Gewässern gezeigt. Daraus wird der Schluss gezogen, dass eine Abminderung der Wellenauflaufhöhe an Hochwasserschutzanlagen von Fließgewässern nicht sachgerecht ist. Insbesondere die Randbereiche des schrägen Wellenanlaufes bedürfen noch einer weiteren Untersuchung. Es wird erwartet, dass die Auswertung von im September 2012 gewonnenen Versuchsergebnissen mit sehr schrägem Wellenanlauf hierzu weitere Aufschlüsse liefern kann.

5 Literatur

- Bornschein, A., Lorke, S., Pohl, R.: Influence of Current and Wind on Wave Run-up on Slopes.- Mitteilungen des Lehrstuhls und Institutes für Wasserbau und Wasserwirtschaft der RWTH Aachen, Heft 165, Proceedings of the 5th Int. Short Conf. on applied coastal Research (SCACR) Aachen: Shaker-Verlag 2012, S. 121-128, ISBN 978-3-8440-1132-6
- DIN 19712 (E) Hochwasserschutzanlagen an Fließgewässern.- Gelbdruck 2011
- DVWK-Merkblatt 246/1997: Jäger, W.; Krinitz, H.; Lehmkuhler, A.; Pohl, R.; Schelp, H.: Freibordbemessung an Stauanlagen.-
- DWA-Merkblatt M 507-1 Deiche an Fließgewässern, Hennef 2011 (ersetzt DVWK-Merkblatt M 210) Bieberstein, A., Bielitz, E., Buschhüter, E., Haselsteiner, R., Kast, K., Pohl, R.: Deiche an Fließgewässern, Teil 1: Planung, Bau, Betrieb.- Merkblatt DWA-M 507-1 – DWA-Regelwerk, Dez. 2011, ISBN 978-3-941897-76-2
- EurOtop-Manual: Wave overtopping of sea defences and related structures: Assessment Manual.- In: Die Küste (2007)73
- Franke, D.; Engel, J.; Niesche, H.; Krüger, F.; Pohl, R.: Ursachen von Deichschäden.- In: Wasserwirtschaft-Wassertechnik. Berlin: Verlag Bauwesen (1999)1, S. 49-54
- Heyer, T., Pohl, R.: Der Auflauf unregelmäßiger Wellen im Übergangsbereich zwischen Branden und Schwingen.- In: Wasser und Abfall 7(2005)4, S. 20-24

- Krüger, N., Bornschein, A., Schüttrumpf, H., Pohl, R.: Wellenauflauf an Deichen unter komplexen Randbedingungen.- In: Wasserwirtschaft 102(2012)12, S. 15-19, ISSN 0043-0978
- Lorke, S., Bornschein, A., Schüttrumpf, H., Pohl, R.: Influence of wind and current on wave run-up and wave overtopping, Final Report, RWTH Aachen and TU Dresden, Germany 2012
- Lorke, S., Pohl, R., Schüttrumpf, H.: Wellenüberlauf an Flussdeichen.- In: Wasserwirtschaft 102(2012)12, S. 20-24, ISSN 0043-0978
- Martin, H.; Pohl, R.: New aspects of freeboard design of dams.- In: Berga, L. (ed.) Dam Safety (Proc. of Int. Symposium on new Trends and Guidelines on Dam Safety, Barcelona 1998), vol. 2, Rotterdam: A.A. Balkema 1998, pp. 1127-1134 ISBN 9054109742
- Pohl, R.: Aspekte der Standsicherheit von Deichen mit inhomogenem Aufbau.- In: Wasser und Abfall (2000)11 S. 52 - 57
- Pohl, R.: Der Wellenüberlauf über Dämme und Deiche.- In: Seewirtschaft, Berlin 22(1990)6, S. 313-316
- Pohl, R.: Erfahrungen bei der Freibordbemessung an Stauanlagen.- Dresdner Wasserbauliche Mitteilung 29/2005, TU Dresden, Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik, S. 297-309, ISSN 0949-5061, ISBN 3-86005-461-9
- Pohl, R.: Neue Aspekte der Freibordbemessung an Fluss- und Ästuardeichen.- In: Dresdner Wasserbauliche Mitteilung 40/2010, TU Dresden, Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik S. 467-478, ISSN 0949-5061, ISBN 978-3-86780-135-5
- Pohl, R.: Wellenauflauf im Übergangsbereich zwischen Brandung und Reflexion.- In: Hansa, Hamburg 134(1997)10, S. 62-64
- Pohl, R.: Hydrologische und hydraulische Bemessung von Deichen.- DWA-Lehrgangsbericht zum Merkblatt M-507 am 22./23.5.2007 in Fulda, am 3./4.6. 2008 in Regensburg, am 12./13.5.2009 in Magdeburg, DWA, Hennef 2007, 2008, 2009

Autor:

Prof. Dr.-Ing. habil. Reinhard Pohl
Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik, Technische Universität Dresden
George-Bähr-Straße 1, 01062 Dresden

Tel.: +49 351 46335693 Fax: +49 351 46335654

E-Mail: Reinhard.Pohl@TU-Dresden.DE