

Zum Freibord an Flussdeichen

Ronald Haselsteiner¹, Theodor Strobl²

¹Dipl.-Ing., Lehrstuhl für Wasserbau und Wasserwirtschaft, TU München

²Univ.-Prof. Dr.-Ing., Lehrstuhl für Wasserbau und Wasserwirtschaft, TU München

KURZFASSUNG

Dieser Beitrag enthält Hinweise zur Freibordermittlung und zeigt, bei welchen Randbedingungen eine rechnerische Abschätzung des Freibordes an Flussdeichen möglich und in welchen Fällen eine pauschale Festlegung gerechtfertigt ist. In diesem Zusammenhang wird ein vereinfachtes Verfahren zur Ermittlung des Freibords vorgestellt, das sowohl die Erkenntnisse der Freibordermittlung aus der Talsperrenpraxis bei ruhenden Gewässern als auch das Verhalten von fließenden Gewässern berücksichtigt. Der Freibord kann dadurch ohne großen Aufwand abgeschätzt werden, wobei Windstau und Wellen, welche durch Wind oder Strömung bzw. Sohlumlagerungen hervorgerufen werden, berücksichtigt werden können, wie auch unvermeidbare Zuschläge und ggf. der Mindestfreibord. Zuschläge sind beispielsweise dann gerechtfertigt, wenn aufgrund einer unzureichenden Datenlage Unsicherheiten aufgefangen werden müssen. Bevor eine Berechnung bzw. Abschätzung durchgeführt werden kann, müssen jedoch die einzelnen Bestandteile des Freibords festgelegt und eine klare Abgrenzung zu den im Bemessungshochwasser berücksichtigten Größen gezogen werden. Deshalb wird auf die Größe und Wahl des Bemessungshochwassers eingegangen und folglich eine Übersicht aller Bestandteile der Deichkronehöhe erarbeitet.

EINLEITUNG

Die Freibordbemessung an fließenden Gewässern wird gegenwärtig, wenn überhaupt, analog zur Methodik an Stauanlagen mit ruhenden Speicherseen durchgeführt. Oft ist es der Fall, dass der Freibord für Deiche pauschal gewählt wird und Zuschläge für allerhand bei der Planung und Ausführung auftretende Unsicherheiten enthält. Dabei wird ungeachtet der Randbedingungen in Kauf genommen, dass das festgelegte Schutzziel verändert wird. Dies kann dazu führen, dass Flussabschnitte mit gleichem Schadenspotential im Hinterland unterschiedliche Schutzziele aufweisen. Falls die Grundlagen für eine Bemessung nicht vorhanden sind, muss der Freibord auf Basis von Erfahrungen und/oder Beobachtungen festgelegt werden. Die pauschale Festlegung des Freibords resultiert aus dem Bestreben, den unzureichenden Werkzeugen und Erfahrungen bei der Ermittlung durch eine Abschätzung auf der sicheren Seite zu begegnen. Diese pauschalen, über den Daumen gepeilten Freibordmaße werden zum Teil in der Öffentlichkeit besser angenommen, sollten jedoch nur wenn notwendig angewendet werden. Die Größe des Freibords, selbst wenn pauschal festgelegt, sollte trotz der bestehenden Unsicherheiten bei der Ermittlung das gewährleistete Schutzziel weitgehend unangetastet lassen.

Die Sicherheit, die ein Freibord gegen temporäres Überströmen durch Wellen bietet, sollte in Abstimmung mit der Empfindlichkeit des Absperrbauwerks an allen Gewässern zugunsten einer gerechten Sicherheitsphilosophie vergleichbar sein. Es

ist einleuchtend, dass ein Freibordmaß von 1,0 m an einem großen Gewässer im Vergleich zu kleineren Gewässern bei gleichen Deichkonstruktionen aufgrund unterschiedlicher Randbedingungen nicht zwangsläufig die gleiche Sicherheit bergen muss.

STAND DER KENNTNISSE

Definition des Freibords und seiner Bestandteile

„Der Freibord ist der vertikale Abstand zwischen der Deichkrone und dem Bemessungshochwasserstand. Er setzt sich aus Windstau, Wellenaufbauhöhe und gegebenenfalls Zuschlägen zusammen. ... Zuschläge beim Freibord haben nicht den Zweck, Ungenauigkeiten bei der Bestimmung des Bemessungshochwasserabflusses oder des sich daraus ergebenden Wasserstandes zu kompensieren. Das dadurch erreichte Sicherheitsmaß läge um ein unbekanntes Maß, meist erheblich über dem Bemessungsansatz. ... Setzungen des Deichkörpers werden durch entsprechende Überhöhungen beim Bau und nicht durch einen Zuschlag im Freibord berücksichtigt.“ (DIN 19712/1997; Abb. 1)

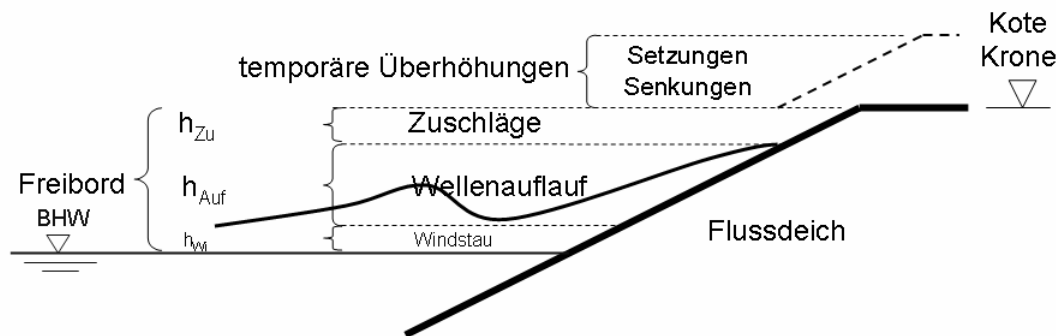


Abb. 1: Zusammensetzung des Freibordes an Deichen nach DIN 19712 (1997)

Entsprechend dieser Definition des Freibordes soll der Freibord dazu dienen, die Überströmung infolge von Wellen und Windstau unter Berücksichtigung unvermeidlicher Zuschläge mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit auszuschließen (vgl. Poweleit 1985). Somit ist die Sicherheit gegen Wellenüberlauf bis zu einem Bemessungshochwasserstand bestimmter Jährlichkeit gewährleistet. Bei Wasserständen über den Bemessungshochwasserstand hinaus steigt die Wahrscheinlichkeit der temporären Überströmung durch Wellen und/oder Windstau. Es wird angemerkt, dass Deiche auch für Kronenstau bemessen (Lastfall 3) werden, wobei kein Freibord mehr berücksichtigt wird.

Der Freibord muss für den Bemessungshochwasserstand dauerhaft gewährleistet werden, was Prognose bzgl. der Abfluss- und Gewässerentwicklung erfordert. Der Freibord ist weiterhin zu untergliedern in Freibordkomponenten und etwaige Überhöhungen, welche eine Veränderung der Deichhöhe durch z. B. Setzungen berücksichtigen.

Weitere Bestandteile des Freibords sind folgendermaßen festgelegt:

„Der Windstau ist der durch die auf die Wasseroberfläche eingetragenen Windschubspannungen entstehende Anstieg des Wasserspiegels am Absperrbauwerk.“ (DVWK 246/1997)

„Der Wellenaufschlag bezeichnet die lotrecht gemessene Höhe der anlaufenden Welle über dem Ruhewasserspiegel.“ (DVWK 246/1997)

„Zuschläge sind aus praktischen Gründen erforderlich. Die Deichkrone muss auch im Hinblick auf Ausführungstoleranzen, Dichtungsanschlüsse und Wühltriebfall über dem Bemessungshochwasserstand liegen. Die höhere Lage vermindert Kronenaufweichungen.“ (DIN 19712/1997)

Der Sicherheitszuschlag, der in der aktuellen Fassung DIN 19700 bei der Ermittlung des Freibords zulässig ist, findet hier keine Anwendungsmöglichkeit (siehe Abschnitt „Bestehende normative Regelungen“).

Wahl des Bemessungshochwassers

Laut DIN 19712 (1997) sollte „die Wahl des Bemessungshochwassers... wirtschaftliche, technische, ökologische und städtebauliche Gesichtspunkte berücksichtigen“. Alte Hochwasserstände als BHW heranzuziehen ist zu riskant, daher sollte eine hydraulische Abflussberechnung mit anschließender statistischer Auswertung durchgeführt werden. Hinweise zur Wahl des Bemessungshochwassers gibt DVWK 209 (1989) „Wahl des Bemessungshochwassers“.

Die Festlegung des Bemessungshochwassers sollte primär auf Basis des hydrologischen Risikos und des Schadenspotentials erfolgen (Mosonyi u. Buck 1976). Eine pauschale Zuordnung von Wiederholungszeitspannen T_n zu bestimmten Schadenspotenzialen (z. B. DIN 19700-12/1986) kann im Einzelfall jedoch auch unwirtschaftlich sein.

In Siedlungsgebieten strebt man in der Regel den Schutz gegen ein 100-jährliches Hochwasser (HQ_{100}) an (LAWA 1995). In folgender Tabelle sind Schutzobjekte und Schutzgrade aus DVWK 202 (1991) bzw. DIN 19700-12 (1986) und aus Bobbe (2005) gegenübergestellt.

Tab. 1: Anhaltswerte für Schutzgrade (Jährlichkeiten von Hochwasserereignissen) von zu schützenden Objekten im Deichhinterland

Objekt	Schutzgrad nach HWSK Sachsen (aus Bobbe (2005))	T_n für Unterlieger von HWRB (nach DVWK 202 (1991) und DIN 19700-12 (1986))
Sonderobjekte mit außergewöhnlichen Konsequenzen im Hochwasserfall	Im Einzelfall zu bestimmen.	-
Geschlossene Siedlungen / Industrieanlagen	100	100 (hochwertig bebaute Gebiete)
Überregionale Infrastrukturobjekte	100	50 - 100
Regionale Infrastrukturanlagen / Einzelgebäude, nicht dauerhaft bewohnt	25	25 bis 50
Landwirtschaftlich genutzte Flächen	5	10 bis 25 (Intensivkulturen)
		5 bis 10 (Ackerflächen)
Naturlandschaften	-	-

Bestehende Regelungen in Deutschland

DIN 19712 (1997) verweist für die Ermittlung von Windstau und Wellenaufschlag analog den Bestimmungen der Ermittlung des Freibordes an Stauanlagen auf DVWK 246 (1997). Pohl (2001) erläutert dieses Bemessungsverfahren und gibt Hinweise zur praktischen Ermittlung des Freibordes an Talsperren.

In DVWK 210 (1986) ist ein progressives Anwachsen des Freibords mit der Deichhöhe empfohlen. Es wurde hier indirekt das mit der Deichhöhe zunehmende Gefährdungspotential berücksichtigt. Deiche mit einer Höhe von 5,0 m sollten einen Freibord von 1,0 m erhalten. In DIN 19712 (1997) wird ein Mindestmaß von 0,5 m empfohlen. Ebenfalls wie in DVWK 210 (1986) ist eine Zunahme des Freibordes auf 1,0 m bei einer Deichhöhe von 5,0 m möglich. Das Maß von 1,0 m reicht auch im Allgemeinen für höhere Deiche aus, wenn „Wind und Wellen keine besondere Rollen spielen“. Schneider et al. (1997) nennen einen Richtwert von 1,0 m mit dem Hinweis, dass Kronenaufweichungen bei Hochwasser der Befahrbarkeit wegen möglichst nicht auftreten sollten. DVWK 202 (1991) gibt die Spanne von 0,5 m bis 1,5 m für den winderzeugten Anteil des Freibords (Windstau + Wellenaufbauhöhe) bei Hochwasserrückhaltebecken in Abhängigkeit vom Stauraum an.

Im Gegensatz zum Freibord an Talsperren nach DIN 19700-10 (2004) insbesondere an Staudämmen nach DIN 19700-11 (2004) wird in DIN 19712 (1997) der Zuschlag für Eisstau nicht dem Freibord zugeordnet, sondern der Eisstau ist, da er „nicht berechenbar- oder abschätzbar [ist.] ... durch Deichverteidigung“ zu beseitigen. Zweiter Unterschied ist, dass der Zuschlag h_{Si} (Sicherheitszuschlag) bei der Bestimmung von f_2 bei Bemessungshochwasserstand 2 nach DIN 19700-11 (2004) auf eine Erhöhung der Sicherheit des Absperrbauwerkes abzielt und z. B. die Empfindlichkeit des Absperrbauwerkes gegen Wellenbeanspruchung berücksichtigt, wohingegen ein Sicherheitszuschlag bei Deichen in den Regelwerken nicht vorgesehen ist (vgl. Abb. 2).

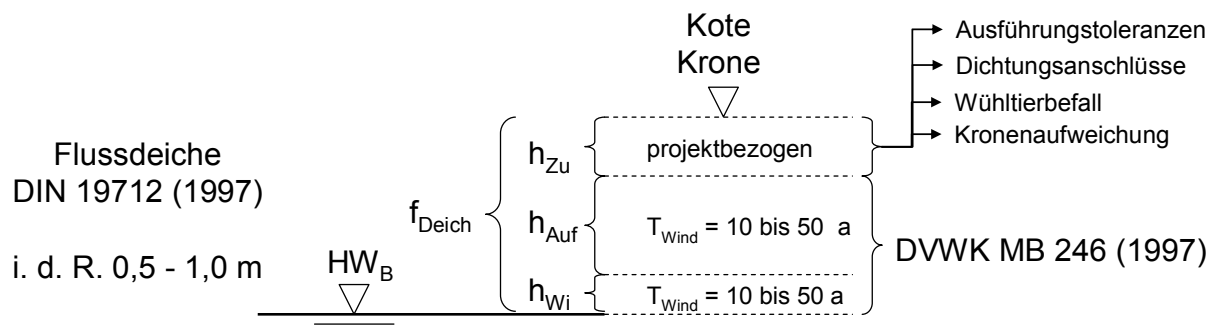


Abb. 2: Regelung zur Festlegung des Freibordes an Deichen (nach DIN 19712/1997)

Bestehende Ansätze und pauschale Festlegungen

Bereits Poweleit (1985) fordert, dass bei der Ermittlung der Deichhöhe die Zuschläge gesondert aufgeführt bzw. dort gemacht werden, wo Unsicherheiten auftreten können. Alle Freibordanteile sollen gesondert aufgeführt werden. Alle hydraulischen und hydrologischen Unsicherheiten müssen bei der Berechnung der Wasserspiegellagen berücksichtigt werden. Insgesamt sollen Zuschläge nur so hoch angesetzt werden, wie unbedingt nötig ist. Setzungen und Bergsenkungen sind durch eine Überhöhung der Krone zu berücksichtigen. Den vereinfachten Ansätzen zur Bestimmung von Wellen- und Wellenaufbauhöhen aus Poweleit (1985) sollten die Verfahren aus DVWK 246 (1997) vorgezogen werden (Pohl 2001).

In USACE (1992) für Schussrinnen wird eine empirische Formel zur Abschätzung des Freibords verwendet, welche die Fließgeschwindigkeit, die Fließtiefe und einen Mindestfreibord (2 feet \approx 0,61 m) beinhaltet (1).

$$\text{Freibord} = 2,0 + 0,025 v \cdot d^{1/3} \text{ [feet]} \quad (1)$$

Die Berücksichtigung der Fließgeschwindigkeit bzw. der Energiehöhe favorisiert auch Weiß (2003), da in „den meisten Fällen ... die Wellenentwicklung weniger vom Wind als von der Fließgeschwindigkeit und damit von der Energiehöhe verursacht“ wird. Bei diesem Ansatz kann der Windstau bei den Verhältnissen, wie sie an den bayerischen Flüssen vorhanden sind, vernachlässigt werden. Die Wellenaufbauhöhe ergibt sich nach Weiß (2003) in Abhängigkeit von der mittleren Fließgeschwindigkeit mit einem 20%-igen Zuschlag für den Windeinfluss (2). Die Zuschläge sollten bei Befahrbarkeit der Krone 0,50 m betragen, ansonsten 0,20 m bis 0,30 m. Bei einer mittleren Fließgeschwindigkeit von 2,5 m/s ergeben sich Freibordhöhen von 0,60 m bis 0,90 m.

$$\text{Freibord} = 0,2 \div 0,5 \text{ m} + 1,2 \frac{v^2}{2g} \quad (2)$$

Schonlau et al. (2005) führten Freibordberechnungen an Deichen am Niederrhein durch und erhielten Wellenaufbauhöhen von ca. 1,00 m bis 1,40 m. Sie bedienten sich dabei, der „Berechnungsformeln aus dem Staudambau“, sprich die Herangehensweise für ruhende Gewässer. Den Unterschied zwischen ruhenden und fließenden Gewässer berücksichtigten die Autoren dadurch, dass sie die mittlere Fließgeschwindigkeit auf die Windgeschwindigkeit addieren, wenn beide Größen entgegengesetzt auftraten.

In der Praxis übliche Freibordhöhen an Deichen bewegen sich laut Poweleit (1985) zwischen 0,5 m bis 1,0 m in Deutschland, 1,0 m bis 3,0 m in Österreich und 0,3 m bis 1,3 m in der Schweiz. In der Praxis Bayerns wird der Freibord häufig pauschal mit 1,0 m angesetzt. Die Vorteile für eine Verwendung eines einheitlichen Freibordmaßes an einem Gewässerabschnitt sind z. B. die klaren Planungsvorgaben und somit die Planungstransparenz sowie die bessere Vermittelbarkeit in der Öffentlichkeit.

Bei unzureichender Datenlage und schwierig zu beurteilenden Verhältnissen muss ein Freibordmaß abgeschätzt und ggf. über weite Strecken pauschal festgelegt werden. Dabei sollten Einflussgrößen wie u. A. Abflussgröße, Sohlstabilität, Treibholzmengen, Strömungssituation, Gewässergeometrie etc. qualitativ beurteilt werden und anschließend ein möglichst auf Erfahrungs- und Beobachtungswerten basierendes Freibordmaß gewählt werden. Bei mit Auwäldern bewachsenen Vorländern ist mit einem Welleneintrag bis zum Deich nicht zu rechnen, da die Baumstämme und –kronen als Wellenbrecher wirken können.

Bei Deichen geringer Höhe und niedrigem Schadenspotential kann auf eine genauere Ermittlung des Freibords weitestgehend verzichtet werden und das Mindestfreibord $f_{\min} = 0,50 \text{ m}$ (DIN 19712/1997) oder geringer pauschal gewählt werden.

VORGESCHLAGENES ABSCHÄTZUNGSVERFAHREN

Allgemeines

Der Freibord von Deichen an fließenden Gewässern kann nur bedingt mit von Stauanlagen an ruhenden Speichern verglichen werden. Bei langsam fließenden Gewässern werden sich ähnliche Wellen wie bei ruhendem Gewässer ausprägen können. Bei hohen Fließgeschwindigkeiten können hingegen Wellen entstehen. Stehende Wellen können an Bauwerken und/oder bei Querschnittsveränderungen

auftreten. Bilden sich Dünen oder Antidünen oder andere Sohlumlagerungsprozesse wie z. B. Kolke oder Anlandungen aus, können ebenfalls Oberflächenwellen entstehen (Abb. 3). Riffelwellen stellen i. d. R. aufgrund ihrer Größe keine Gefahr dar und werden durch den Mindestfreibord abgedeckt.

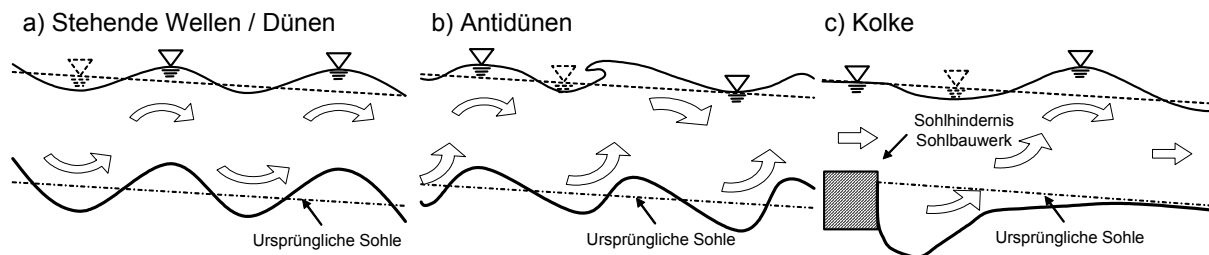


Abb. 3: Sohlveränderung als Ursachen für periodische Wellenbildung

Dies hat für die Freibordberechnung die Konsequenz, dass für langsam fließende Gewässer der Einfluss von Windwellen maßgebend sein kann und für schnell fließende Gewässer mit instabilen Sohlen oder Unstetigkeiten das Auftreten von stehenden Wellen oder eines gewellten Abflusses. Um beiden Erscheinungen gerecht zu werden, wird die Wellenbildung durch Wind bei langsam fließenden Gewässern ($v_m \ll 1,0$ m/s) nach DVWK 246 (1997) mit einer Abschätzung von strömungsinduzierten Wellen in Abhängigkeit des Strömungszustands (Froudezahl) verglichen.

Festlegung der Deichkrone

Die Deichkrone ergibt sich aus dem Bemessungshochwasserstand und dem Freibord zuzüglich den temporären Zuschlägen für Setzungen und Senkungen (Abb. 4).

Auch im Zusammenhang mit der Wahl des Bemessungshochwassers und somit mit der Festlegung des Schutzgrades werden zum Thema „Freibord“ z. B. in DVWK 209 (1989) einige Empfehlungen gegeben: „Der Ansatz eines pauschalen Freibordes oder quantitativ nicht begründeter Freibordkomponenten wird nicht empfohlen. Er macht die Bemessungsverfahren fragwürdig, weil die Bindung an das relative Sicherheitsmaß, das für die Wahl des Bemessungshochwassers maßgebend ist, dabei verloren geht. „Der Freibord ... sollte nur für diejenigen Beanspruchungen ausgelegt werden, die mit dem Bemessungshochwasserstand nicht erfasst werden können“ (DVWK 209/1989). Dies entspricht den Aussagen der DIN 19712 (1997) und den Ausführungen in Abschnitt „Wahl des Bemessungshochwassers“.

Bei den hydraulischen Berechnungen gilt es zu berücksichtigen, dass die Wasserspiegellage am Deichkörper aufgrund der Flusskrümmung oder der geringeren Fließgeschwindigkeit im Vorland höher stehen kann als im Fluss oder es die Rechenergebnisse von 1D-Modellen zeigen. Moderne zweidimensionale Strömungsmodelle berücksichtigen i. d. R. Rückstaeinflüsse und Erhöhungen der Wasserspiegellagen an den Außenufern von Flusskrümmungen (Abb. 4).

Eine besondere Unsicherheit geht vom Bewuchs in den Vorländern bzw. im Hauptgewässer aus, wie z. B. in Haimerl u. Ebner (2006) an der Donau gezeigt wird. Je nach Vorlandbewuchs ergeben sich im untersuchten Gebiet an der Donau abweichende Wasserspiegel von über 1,0 m über den festgesetzten Bemessungshochwasserstand. Weitere Ansätze zur hydraulischen Leistungsfähigkeit von bewachsenen Gewässerquerschnitten sind in Indlekofer (2004) zu finden.

Anlandungen im Vorland und im Hauptgewässer können eine veränderte Abflussgeometrie zur Folge haben, die dann als Basis für hydraulische Modelle zur Ermittlung des Bemessungswasserstandes herangezogen werden kann. Prognosen für derartige Entwicklung sind schwierig. Eine Berücksichtigung dieses Einflusses sollte ausschließlich als Zuschlag zum Wasserstand nach durchgeführter hydraulischer Berechnung erfolgen, da z. B. eine Feinsedimentablagerung in Vorländern i. d. R. auch einen erhöhten Wasserstand zur Folge haben (Kausalprinzip).

Die Auswirkungen von Eingriffen in das Gewässerregime auf den Wasserstand im Bereich von Deichen sollte abgeschätzt werden und der veränderte, ungünstigere Zustand als Grundlage zur Ermittlung der Bemessungswasserstände herangezogen werden.

Prognostizierte hydrologische Veränderungen, wie z. B. durch eine Klimaveränderung, können zum Beispiel über eine Erhöhung des Abflusses ΔQ dem existierendem Bemessungsabfluss zugeschlagen werden.

Hydrologische Unsicherheiten wie z. B. das Fehlen von ausreichend langen Datenreihen, einer Veränderung der Abflussverhältnisse durch ein potentielle Klimaveränderung oder durch Veränderungen im Einzugsgebiet sollten durch Sicherheitszuschläge in der hydrologischen Berechnung berücksichtigt werden.

Unsicherheiten bei hydraulischen Berechnungen, wenn z. B. Kalibrierungsereignisse fehlen oder die Berechnung von gemessenen Wasserständen abweichende Ergebnisse bringt, sollten durch auf der sicheren Seite liegende Annahmen berücksichtigt werden.

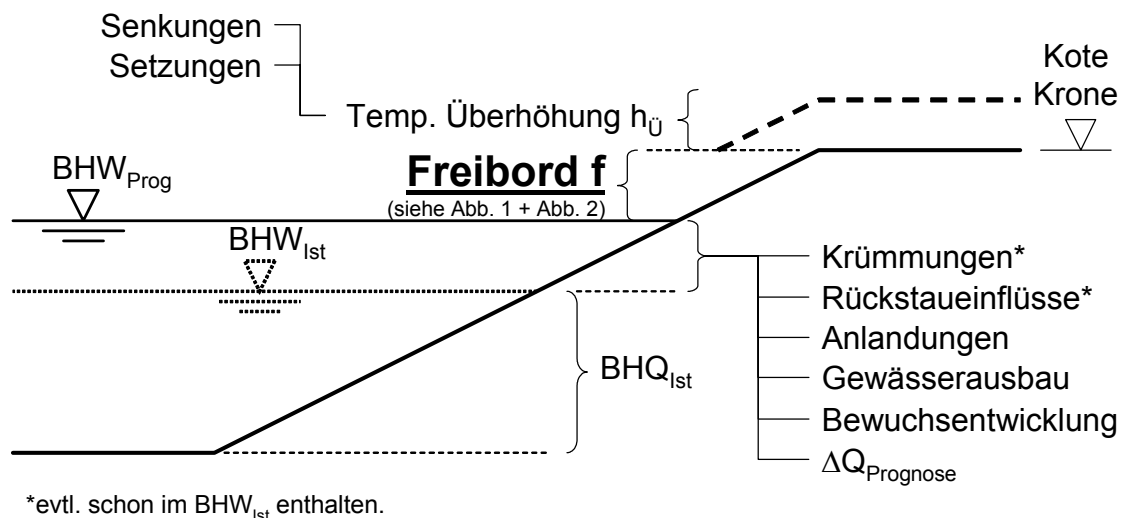


Abb. 4: Festlegung der Kronenkote (BHW + Freibord + Überhöhungen)

Aus Gründen der Sicherheit und nicht zuletzt wegen der bei weitem nicht zureichenden Erkenntnisse bei der Ermittlung des Freibordes an fließenden Gewässern soll der Freibord den in DIN 19712 (1997) geforderten Wert von 0,5 m für Hauptdeiche nicht unterschreiten.

Ausgangssituation

Das folgende Verfahren gilt streng genommen nur unter den Annahmen, dass die Deiche parallel zum Gewässer verlaufen, die Gewässerstrecken gerade verlaufen und die maßgebliche Windrichtung senkrecht auf die Deichachse trifft.

Da die Eingangsparameter (h , v , Fr) für die vorgeschlagene Freibordermittlung gemittelt werden, sind die Lage der Deiche und die Geometrie des Abflussquerschnittes für die Festlegung der Eingangsparameter von wesentlicher Bedeutung.

Treten Vorländer auf, ist zu bedenken, dass die hohen Strömungsgeschwindigkeiten im Hauptgerinne ggf. höhere Strömungswellen erzeugen, als mittels der über den gesamten Abflussquerschnitt inklusive Vorlandbereiche gemittelten Geschwindigkeiten und Fließtiefen abgeschätzt werden kann. Deshalb sollten bei direkt am Gewässer liegenden Deichen die Strömungsparameter des Hauptgerinnes ohne die Berücksichtigung von Vorländern angesetzt werden (Abb. 5, A + B – Fall 1). Bei breiten Vorländern (Abb. 5, C – Fall 2) kann mit den mittleren Strömungsparametern des Gesamtquerschnitts gerechnet werden. Für die Ermittlung einer vom Wind verursachten Freibordsgröße kann i. d. R. der gesamte Querschnitt mit den entsprechenden mittleren Eingangsgrößen verwendet werden (Abb. 5, A bis C).

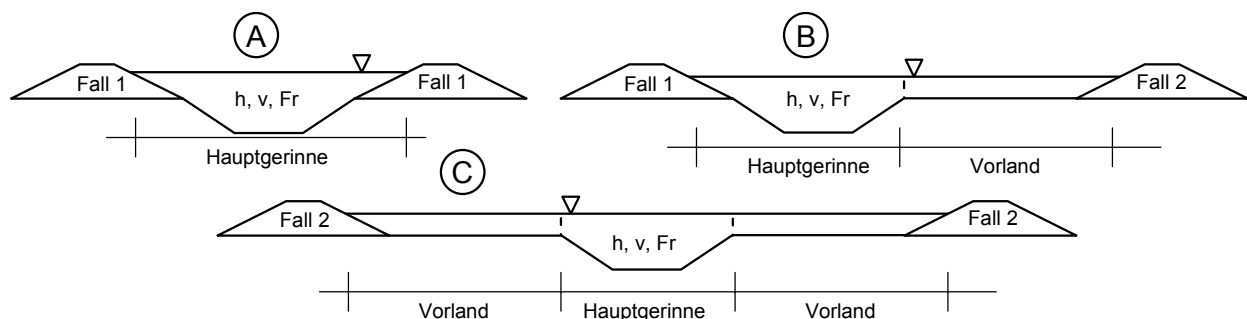


Abb. 5: Mögliche Lage von Deichen an Fließgewässern

Wahl des Bemessungswindes für Windstau und Wellenauflauf

Die Windgeschwindigkeit wird pauschal angesetzt. Bei der Festlegung dieser Größe wird berücksichtigt, dass zwischen Hochwasser- und Windereignissen keine signifikanten Abhängigkeiten bis dato nachgewiesen werden konnten (Pohl 2001, Buck 2002). Da Deiche temporär eingestaut sind und das Bemessungshochwasser nicht selten einem 100-jährlichen Ereignis entspricht, kann ein Wiederkehrintervall $T < 25$ a angesetzt werden. Vergleichsweise wird an Talsperren, die auf ein BHQ_1 mit $T = 100$ a bemessen sind, ein 25-jährliches Windereignis angesetzt, wobei zu beachten ist, dass BHW_1 oft dem Dauerstauziel entspricht und somit der Wind auf einen Wasserstand mit hundertprozentiger Eintretenswahrscheinlichkeit trifft. Vergleicht man diese Sicherheitsphilosophie mit dem Freibord an Deichen, wäre sogar gerechtfertigt, einen Wind mit $T = 1$ a anzusetzen. Auf der sicheren Seite liegend wird ein Bemessungswind $v_{10} = 20$ m/s mit $T < 25$ a gewählt, was im Vergleich mit vorhandenen Ansätzen (Tab. 2) plausibel erscheint. Bei begründeten Einzelfällen können nach wie vor Windgutachten vom Deutschen Wetterdienst (DWD) beantragt werden. Ausführlicher wird die Ermittlung von Windgeschwindigkeiten in DIN 1055-4 (2001) behandelt.

Der pauschale Ansatz von $w_{10} = 30$ m/s bei Hochwasserrückhaltebecken, die auch Trockenbecken sein könne, erscheint nicht zuletzt aufgrund der neuen Regelungen der DIN 19700 (2004) als zu hoch.

Tab. 2: Bemessungswind und Wiederkehrintervall an Stauanlagen

Quelle	Bemessungswind w_{10} [m/s]	Jährlichkeiten T [a]	Anwendungsgebiet / Bezugsgrößen
Bachmann et al. (2003)	22,5 - 25,0	≈ 50	für Bayern
DIN 1055-4 (2001)	24,3	50	für Bayern
DIN 19700 (2004)	-	25 für f_1 (bei BHQ ₁) < 25 für f_2 (bei BHQ ₂)	Talsperren (HRB, Stauhaltungsdämme ...)
DVWK 202 (1991)	30 ¹ (pauschal)	-	Hochwasserrückhaltebecken / Stauraumgröße
DVWK 246 (1997)	ca. 10 - 31 ²	≥ 25	Windexponiertheit

¹ Kleine und mittlere Hochwasserrückhaltebecken / nicht überdurchschnittlich windexponiert

² Werte abgemindert um die Faktoren 1,1 bis 1,31 für Windgeschwindigkeiten über Land.

Ermittlung der Streichlänge S

Das in DVWK 246 (1997) beschriebene Spektralverfahren zur Berücksichtigung von unregelmäßig verlaufenden Wasserflächen vor dem Staubauwerk lässt sich auf einen Spektralbereich reduzieren, wenn man gewässerparallele Deiche an geraden Gewässerstrecken hat und deshalb alle möglichen Spektralbereiche die gleiche Streichlänge haben. Dies entspricht einer Rechnung mit nur einem Spektralbereich, der zwischen 0° und 180° liegt.

Vereinfacht kann bei eingedeichten Fließstrecken aus einem Lageplan der Abstand der Deichtrassen bzw. des höhengleichen Geländes und der Deichtrasse als Streichlänge angesetzt werden.

Ermittlung des Windstaus h_{wi}

Der Windstau kann laut DVWK 246 (1997) mittels der Zuiderseeformel ermittelt werden. In Abb. 6 ist erkennbar, dass größere Windstauhöhen nur bei sehr kleinen mittleren Wassertiefen h_m und großen Streichlängen S auftreten.

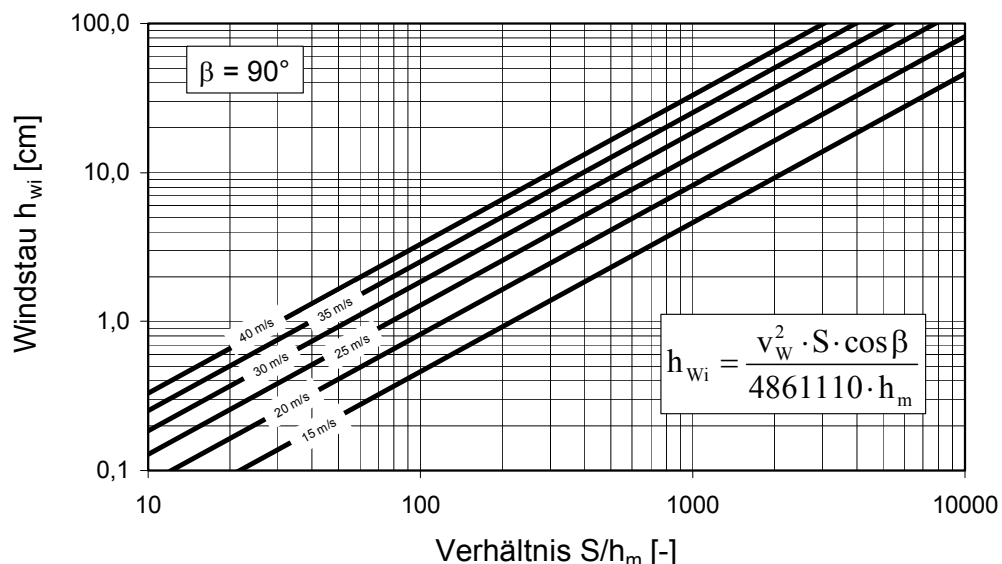


Abb. 6: Bestimmung der Windstauhöhe aus S/h_m und der Windgeschwindigkeit

Aufgrund der in der Praxis auftretenden Verhältnisse kann auch eine vereinfachte, auf der sicheren Seite liegende Festlegung der Windstauhöhe nach Tab. 3 erfolgen.

Hier wird als Abgrenzungskriterium die Streichlänge S verwendet. Bei großen Fließtiefen kann mit niedrigeren Windaufstauhöhen gerechnet werden.

Tab. 3: Vereinfachte Wahl der Windstauhöhe in Abhängigkeit der Streichlänge S

Streichlänge	h_{Wi} [m]
$S < 100$ m	0,00
$100 \leq S < 500$ m	0,05
$500 \text{ m} \leq S$	0,10

„Der Windstau kann bei Streichlängen unter etwa einem Kilometer vernachlässigt werden“ (DIN 19712/1997). Weiß (2003) geht davon aus, dass in Bayern der Windstau generell vernachlässigt werden kann, da auch an den großen bayerischen Gewässern die Streichlängen senkrecht zu den Deichen unter einem Kilometer liegen.

Ermittlung der Wellenaufbauhöhe h_{auf}

Der Wellenaufbau ist abhängig von der Windgeschwindigkeit, der Streichlänge aber auch von Bauwerksparametern wie z. B. der Oberflächenrauheit und der Art des Bauwerks. Wie in DVWK 246 (1997) empfohlen, wird hier auch das Verfahren von KRYLOW II aufgrund der Übereinstimmung von Berechnungswerten und gemessenen Naturwerten verwendet (Pohl 2001).

Zuerst werden die mittlere Wellenhöhe, die mittlere Wellenperiode und die mittlere Wellenlänge ermittelt. Die Gleichung zur Berechnung der Wellenaufbauhöhe für brandende Wellen an Staudämmen vereinfacht sich durch die getroffenen Annahmen der empirischen Faktoren $k_D \cdot k_R = 0,80$ für Böschungen aus Rasen- oder Sand und $k_X = 2,4$, dem Faktor für die Überschreitungswahrscheinlichkeit (1 % für Erddämme).

Für Streichlängen von 50 bis 1.600 m und mittleren Wassertiefen von 0,5 bis 10 m bei einer Bemessungswindgeschwindigkeit von 20 m/s sind in Abb. 7 die Wellenaufbauhöhen für Böschungsneigungen von 1:2 und 1:3 angegeben.

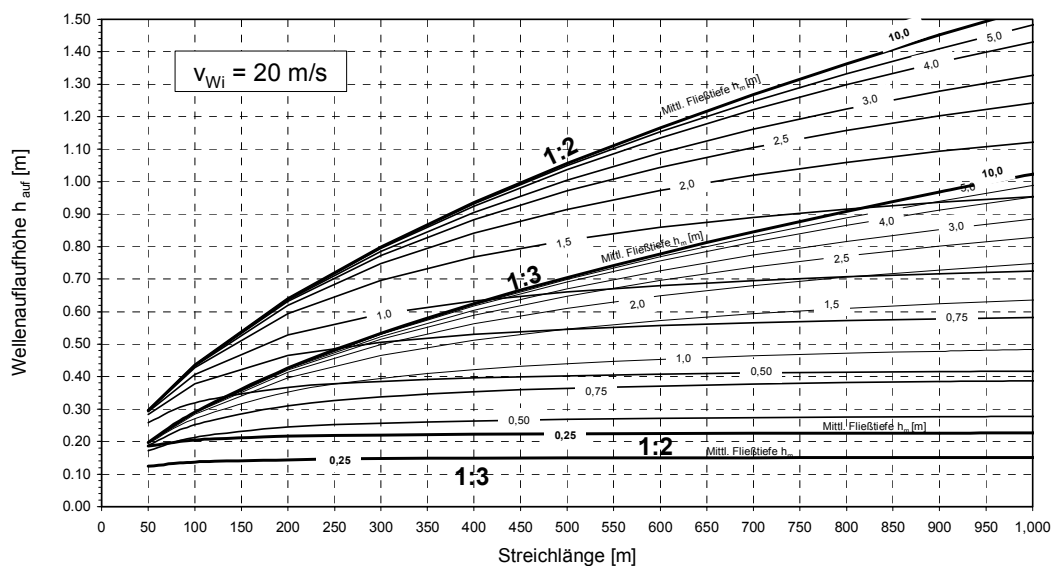


Abb. 7: Wellenaufbauhöhen für Böschungsneigungen von 1:2 und 1:3 (nach DVWK 246/1997)

Festlegung der Zuschläge

In 1972 (1997) sind die Zuschläge in Berücksichtigung von Ausführungstoleranzen, Wühltiertätigkeit, Dichtungsabschlüssen und Kronenaufweichungen zu wählen. Grundsätzlich sollten bauliche oder konstruktive Problemstellungen sowie Sicherheitszuschläge nicht in den Freibord eingehen.

Ausführungstoleranzen

Die Ausführungstoleranzen können für Erdbauarbeiten und Dichtwandarbeiten im Deichbau auf $\pm 5,0$ cm beschränkt werden. Dies ist mit der modernen Einbautechnologie ohne Mehraufwand möglich.

Wühltiere

Wühltiere können den Deichkörper durchörtern. Bei Wasserzutritt können wasserseitig angeschlossene Hohlräume einbrechen und Sackungen oder Einbrüche eintreten. Bei Deichen, die günstige Bedingungen für Wühltiertgänge oder -bauten bieten, wie z. B. leicht kohäsiver Boden oder steile Böschungen, sollten konstruktive Maßnahmen zur Wühltierabwehr ergriffen werden wie z. B. Wühltiergitter, Dichtwände und/oder die besondere Auswahl der Deichbaustoffe (DVWK 226/1993). Eine pauschale Berücksichtigung von möglichen Wühltierschäden im Freibord als Zuschlagshöhe sollte nicht erfolgen, da kein Maß für eine plausible Höhe angegeben werden kann. Höhenzuschläge für Biberbauten müssten sich dementsprechend bei ca. 0,5 m bewegen, was jedoch auch durch den Mindestfreibord abgedeckt ist.

Dichtungsanschlüsse / -abschlüsse

Bei Bemessungshochwasserstand sollte die Dichtwand nicht überströmt werden. Deshalb wird i. d. R. gefordert, dass die Dichtwand bis über den Bemessungshochwasserstand zu führen ist. Ist der notwendige rechnerische Freibord geringer als die Mächtigkeit des Fahrbahnaufbaus und kann die Dichtwand nur bis unter den Fahrbahnaufbau geführt werden, liegt der Bemessungshochwasserstand über der Dichtung. Diesem Zustand kann mittels konstruktiver Mittel, z. B. durch Anbringen einer wasserseitigen Tonschicht, entgegnet werden. Eine Erhöhung des Freibordes, um in diesem Fall den BHW unter die Oberkante der Dichtung herabzulegen, sollte aus bereits genannten Gründen nicht erfolgen.

Frosteinwirkungen

Ebenso sollte die Sicherstellung der Frostsicherheit keinen Einfluss auf den Freibord haben. Die Frostsicherheit von Dichtungen wie auch von Wegen sollte konstruktiv bei der Planung und Ausführung berücksichtigt werden. Falls die Frosteindringtiefe größer als der rechnerische Freibord ist, und die Dichtung bis mindestens über den BHW geführt werden soll, kann die Dichtungswirkung im Kronenbereich durch andere konstruktive Zusatzmaßnahmen erreicht werden.

Kronenaufweichungen

Bis Bemessungshochwasserstand sollten keine Kronenaufweichungen auftreten. Kronenaufweichungen können auftreten, wenn einerseits Regenwasser auf der Oberfläche gestaut wird und nicht entwässern kann. Deshalb ist für eine Entwässerung der Deichkrone und aller Wege zu sorgen. Andererseits können kapillare Saugkräfte Wasser aus dem Grundwasserspiegel bzw. der Sickerlinie „hochziehen“ (kapillare Steighöhe). Besonders bei Kronen mit

Deichverteidigungswegen sind Kronenaufweichungen konstruktiv zu verhindern. Das ist i. d. R. durch die für Verteidigungswege üblichen Bauweisen mit z. B. einer ausreichend mächtigen Schottertragschicht sichergestellt. Die kapillaren Steighöhen von durchlässigen, grobkörnigen Materialien sind nur wenige Zentimeter und deshalb i. d. R. vernachlässigbar. Kronenaufweichungen durch Regenwasser spielt bei durchlässigen Schüttmaterialien i. d. R. keine Rolle. Maßgebend wird hier eher die Frostsicherheit.

Sicherheitszuschläge

Im Freibord einen Sicherheitszuschlag für z. B. Ungenauigkeiten bei hydrologischen oder hydraulischen Berechnungen zu berücksichtigen und somit das Schutzziel indirekt und unbestimmt zu erhöhen, sollte nicht erfolgen, was auch inhaltlich mit DIN 19712/1997 übereinstimmt. Vielmehr sollten Unsicherheiten bei der Bestimmung des Wasserstandes dadurch aufgefangen werden, dass ein höherer Wasserstand abgeschätzt wird, was der tatsächlichen Beanspruchung des Deiches entspricht (Kausalprinzip). Dies wird auch von Buck (2002) unterstrichen, der sich im folgenden Zitat auf die gängige Praxis im deutschen Talsperrenbau bezieht. „Es ist höchste Zeit, dass auch die deutsche Bemessungspraxis ... Abschied nimmt vom ominösen pauschalen Sicherheitszuschlag im Freibord, der zudem noch an falscher Stelle angesetzt wird.“

Kriterium zur Berücksichtigung der strömungsinduzierten Wellenentwicklung

Für schnell fließende Gewässer, die Froudzahlen $Fr > 0,5$ aufweisen, muss unter Umständen mit gewellten Abfluss gerechnet werden (DIN 19661 Teil 2/2000). Besonders an temporären Unstetigkeiten wie z. B. Kolken oder an dauerhaften Sohlhindernissen, wie z. B. Bauwerken oder Gefällewechsel ist verstärkt mit Wellenbildung zu rechnen, wie bereits zuvor erwähnt wurde.

Blind et al. (1982) untersuchte im Rahmen der Optimierung des Tosbeckens der Stützkraftstufe Landau an der Isar zur Beurteilung der Qualität der Energieumwandlung die Wellenentwicklung 25 m nach dem Tosbecken. Die untersuchten spezifischen Abflüsse an dem Modell reichten von 3,0 bis 40,0 m³/s*m und die dabei auftretenden Froudzahlen $Fr = 0,2$ bis 0,5.

Für folgende Betrachtungen werden die von Blind et al. (1982) untersuchten in Geometrie und konstruktiver Durchbildung unterschiedlichen Tosbeckenvarianten als fiktive Störstellen (Kolke) betrachtet, die eine Wellenentwicklung ins Unterwasser verursachen. Die Werte von $0,5 \cdot h_{\text{Welle}}$ betragen bei den durchgeführten Modellversuchen ca. 3 bis 10% der Normalwassertiefe bzw. der mittleren Fließtiefe im Bereich der Wellen.

Aufgrund der starken Streuung wird eine Abschätzung an der oberen Grenze der Ergebnisse gewählt (Abb. 8, gestrichelte Linie). Als Bemessungskurve wurde eine aufgrund von Beobachtungen während des Hochwassers 2005 nach oben korrigierte Kurve festgelegt.

Strömungsinduzierte Wellen sollen demnach als Anteil s (3) der mittleren Fließtiefe h_m im Freibord Berücksichtigung finden (Abb. 9).

$$s = 0,17 \cdot Fr^{1/3} \quad (3)$$

Bei Froudezahlen > 1 kann sich stark gewellter Abfluss durch z. B. Sohldünen ausbilden. Für die Wellenbestimmung bei gewellten Abflüssen wird auf Chanson (1996) verwiesen. FroudeWellen, wie sie in Schussrinnen bei hohen Froudezahlen auftreten können ($Fr > 3$), kommen i. d. R. in eingedeichten Flussstrecken nicht vor.

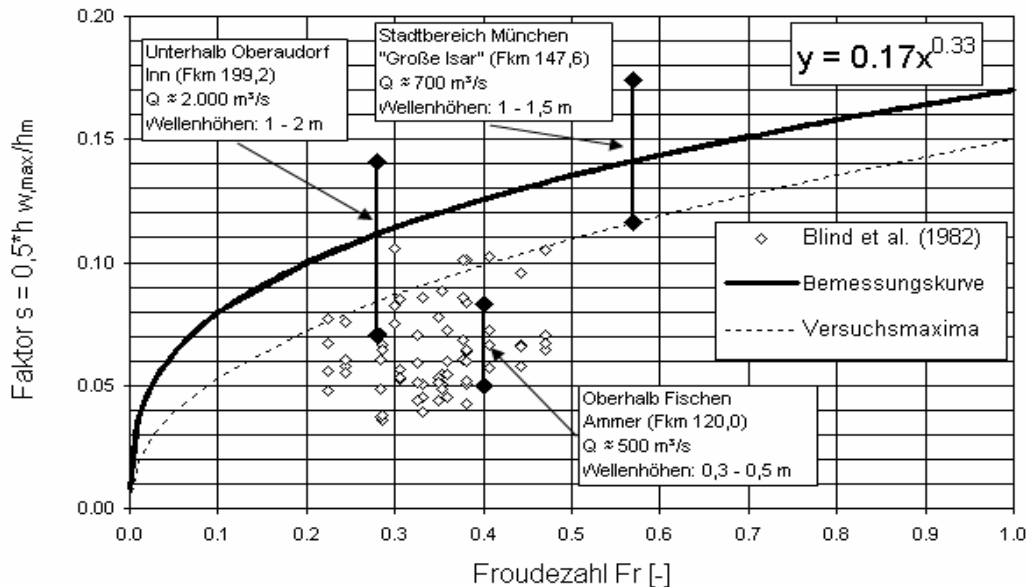


Abb. 8: Strömungswellenfaktor s in Abhängigkeit von der Froudezahl

Übersicht und Hinweise zum Verfahren

Wie in nachstehender Zusammenstellung zu sehen ist (Abb. 9), ist der Freibord der größte Wert aus Windeinwirkung, Strömungseinwirkung und Mindestfreibord.

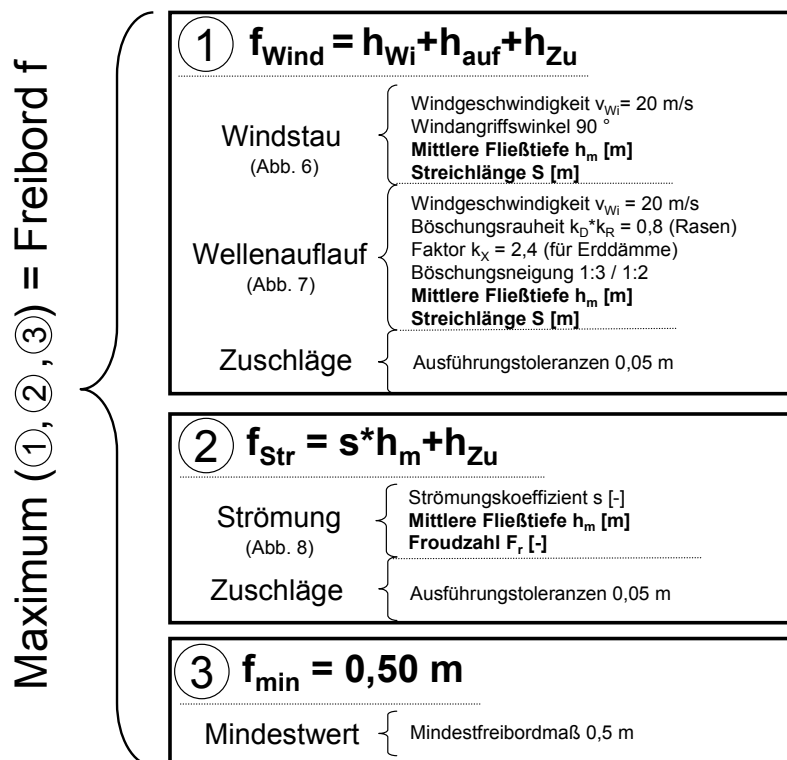


Abb. 9: Übersicht des vorgeschlagenen Verfahrens

Flussdeiche im Rückstaubereich von Talsperren oder Staustufen können im Vergleich zu den anschließenden Absperrbauwerken unterschiedliche Kronenkoten aufweisen. Die Deichkronenkoten sollten deshalb an die i. d. R. höher liegenden Koten der Absperrbauwerke von Talsperren und Staustufen angepasst werden.

Der Freibord sollte an Gewässerabschnitten an mehreren Stellen ermittelt werden. Der größte ermittelte Freibord sollte als Einheitsmaß für einen Gewässerabschnitt festgelegt werden. Werden konstruktive Maßnahmen zur Sicherung gegen Wellenauflauf getroffen, sind geringere Freibordmaße möglich.

ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Dieser Beitrag beinhaltet ein Verfahren zur Ermittlung des Freibords an Flussdeichen, das den fließenden Charakter des Gewässers und die durch z. B. bei Hochwasser auftretenden Sohlumlagerungen erzeugten Oberflächenwellen berücksichtigt. Anhand von Strömungsparametern (Fr , h) kann eine Strömungswellenhöhe ermittelt werden, woraus sich nach Berücksichtigung der notwendigen Zuschläge ein Strömungsfreibord ermitteln lässt. Nach dem Vergleich mit dem Freibord aus Wind und einem Mindestfreibord von 0,50 m kann die maßgebende, maximale Freibordhöhe festgelegt werden. Dieses Abschätzungsverfahren kann als Entscheidungshilfe oder Richtwert für pauschale Festlegungen dienen. Unsicherheiten aus Hydrologie, Hydraulik oder Gewässermorphologie sollten ggf. mit einem Zuschlag beim Wasserstand bedacht werden, da diese Größen i. d. R. eine Erhöhung des Wasserstands bewirken. Eine Anpassung des Schutzziels bzw. Schutzgrads der Hochwasserschutzanlage durch z. B. Sicherheitszuschläge im Freibord wird durch diese Handhabung sachgerecht in den Bemessungshochwasserstand „verbannt“.

Für die Ermittlung von durch Strömung erzeugten Wellen sind noch zahlreiche physikalische Untersuchungen notwendig, die durch Messungen in der Natur verifiziert werden müssen. Zur genaueren Bestimmung dieser Wellen und der daraus abgeleiteten Freibordhöhe müssten die Einflussparameter Abflussquerschnitt (Hauptgerinne, Vorland), die Strömung selbst (Gefälle, Strömungszustand), Welleninitiatoren (Kolke, Bauwerke), die Lage des Deiches im Strömungsfeld, der schräge Wellenauflauf auf Böschungen aber auch die gegenseitige Beeinflussung von Strömungsgeschwindigkeit und Wind näher untersucht werden. Aufgrund der Komplexität ist mit einer zeitnahen Entwicklung entsprechender Verfahren jedoch nicht zu rechnen.

LITERATUR

Blind, Hans; Häusler, Erich; Csallner, Karl (1982): Gestaltung der Energieumwandlungsanlage für die „Stützkraftstufe“ Landau / Isar. Versuchsbericht Nr. 257, Versuchsanstalt für Wasserbau der Technischen Universität München, Oberrach 1982 (unveröffentlicht)

Buck, Werner (2002): Überlegungen und Maßnahmen zur Verbesserung und Quantifizierung der Hochwassersicherheit auch bei eingedeichten Flussstrecken. Moderne Methoden und Konzepte im Wasserbau, Internationales Symposium, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich, Band 1, S. 281 – 290, 2002

Chanson, H. (1996): Free-surface flows with near critical flow conditions. Canadian Journal of Civil Engineering 23, pp. 1272 – 1284, 1996

DIN 19700-12 (1986): Stauanlagen. Hochwasserrückhaltebecken. Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN), 1986

DIN 19700 (2004): Stauanlagen. Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN), 2004

DIN 19712 (1997): Flussdeiche. Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN), 1997

DVWK 202 (1991): Hochwasserrückhaltebecken. Merkblätter zur Wasserwirtschaft, Heft 202, Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau, Verlag Paul Parey, Hamburg und Berlin 1991

DVWK 209 (1989): Wahl des Bemessungshochwassers, Merkblätter zur Wasserwirtschaft, Heft 209, Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau, Verlag Paul Parey, Hamburg und Berlin 1989

DVWK 210 (1986): Flussdeiche. Merkblätter zur Wasserwirtschaft, Heft 210, Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau, Verlag Paul Parey, Hamburg und Berlin 1986

DVWK 226 (1993): Landschaftsökologische Gesichtspunkte bei Flussdeichen. Merkblätter zur Wasserwirtschaft, Heft 226, Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau, Verlag Paul Parey, Hamburg und Berlin 1993

DVWK 246 (1997): Freibordbemessung an Stauanlagen. Merkblätter zur Wasserwirtschaft, Heft 246, Verlag Paul Parey, Hamburg und Berlin 1997

Haimerl, Gerhard; Ebner, Karl-Heinz (2006): Hochwasserschutz durch Vorlandmanagement – Untersuchungen an der Donau bei Straubing. Wasserwirtschaft 96, Heft 3, S. 17 – 21, 2006

Indlekofer, Horst M. F. (2004): Zur hydraulischen Wirkung von flexiblen Bewuchs. Wasser und Abfall 4, S. 20 – 23, 2004

LAWA (1995): Leitlinien für einen zukunftsweisenden Hochwasserschutz. Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) im Auftrag der Umweltministerkonferenz, 1995

Mosonyi, Emil; Buck, Werner (1976): Die Auswahl des Bemessungshochwassers. Wasserwirtschaft 66, 7/8, S. 195 – 199, 1976

Pohl, Reinhard (2001): Neue Aspekte der Freibordbemessung an Stauanlagen. Wasser und Abfall, Heft 9, S. 50 – 56, 2001

Poweleit, Axel (1985): Bemessung des Freibords im Erddammbau. Wasserwirtschaft 75, Heft 10, S. 434 – 439, 1985

Schonlau, Henning; Schweim, Christoph; Köngeter, Jürgen (2005): Freibord am Niederrhein. Wasserwirtschaft 95; Heft 7-8; S. 14 – 17, 2005

USACE (1992): Hydraulic Design of Spillways. Engineer Manual – Engineering and Design, US Army Corps of Engineers (USACE), Washington DC 1994

Weiß, Herbert (2003): Vorschlag für die Ermittlung des Freibords bei Deichen. Dienstbesprechung „Staatlicher Wasserbau Gewässer erster Ordnung“, Ingolstadt, September 2003 (unveröffentlicht)