Zeitschrift: Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria

Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband

Band: 105 (2013)

Heft: 1

Artikel: Freibord bei Hochwasserschutzprojekten und Gefahrenbeurteilung : Empfehlungen der Kommission Hochwasserschutz (KOHS)

Autor: [s.n.]

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-941542

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 07.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Freibord bei Hochwasserschutzprojekten und Gefahrenbeurteilungen

Empfehlungen der Kommission Hochwasserschutz (KOHS)

KOHS

Zusammenfassung

Die Kommission für Hochwasserschutz (KOHS) hat eine Methode erarbeitet, nach welcher das für die Gewährleistung der Abflusskapazität erforderliche Freibord in Fliessgewässern bestimmt werden kann. Das erforderliches Freibord setzt sich aus mehreren Teilfreiborden zusammen. Diese berücksichtigen einerseits Unschärfen, die bei der Berechnung einer Wasserspiegellage auftreten, und andererseits hydraulische Prozesse wie die Wellenbildung, den Rückstau an Hindernissen oder den Platz, welcher unter Brücken für das Abführen von Treibgut benötigt wird. Es wird auch eine Methode vorgeschlagen, wie das Freibord bei der Wirkungsanalyse im Rahmen von Gefahrenbeurteilungen berücksichtigt werden kann.

Résumé

La Commission pour la protection contre les crues (CIPC) a élaboré une méthode pour déterminer la revanche nécessaire pour assurer la capacité hydraulique des cours d'eau. La revanche requise est composée de plusieurs revanches partielles. Ces dernières intègrent soit les incertitudes liées au calcul hydraulique, soit des processus hydrauliques tels que la formation des vagues, les remous d'exhaussement causé par des obstacles ou l'espace nécessaires pour assurer le transport de flottants sous les ponts. L'article propose également une méthode pour prendre en considération la revanche lors de l'analyse d'impact dans le cadre de l'évaluation des dangers. Avec cette recommandation, la CIPC vise à unifier l'utilisation de la revanche lors des projets de protection contre les crues et de l'analyse des dangers. Une version française de cet article sera publiée dans la prochaine édition d' «Eau Energie Air».

1. Weshalb eine Empfehlung zum Freibord?

Bei der Bestimmung der Abflusskapazität eines Gewässers und bei der Bemessung von Schutzbauten gegen Hochwasser wird in der Regel ein Freibord berücksichtigt. Dieses bezeichnet den Abstand zwischen dem Wasserspiegel und der Oberkante des Ufers oder der Unterkante einer Brücke. Für die Festlegung des erforderlichen Freibordes gibt es unterschiedliche Ansätze; z.B. eine feste Grösse (0.5 m, 1.0 m), die Geschwindigkeitshöhe $v^2/2g$ oder ein Bruchteil davon. Manchmal wird das erforderliche Freibord auch in Abhängigkeit der zu schützenden Objekte, der Art der Schutzbaute oder in Funktion der Jährlichkeit des Bemessungsabflusses festgelegt und erhält damit die Funktion einer Schutzzielgrösse. In der wasserbaulichen Praxis in der Schweiz hat sich bis jetzt keine einheitliche Methode durchgesetzt. Auch werden bei der Bemessung von Hochwasserschutzbauten und bei einer Gefahrenbeurteilung oftmals unterschiedliche Kriterien und Ansätze verwendet. Der Gebrauch unterschiedlicher Kriterien stiftet Verwirrung, verursacht bei Projektanten und Fachbehörden Unsicherheit über die «richtige» Wahl des Freibords und erschwert die Vergleichbarkeit verschiedener Hochwasserschutzprojekte und Gefahrenbeurteilungen.

Das nachfolgende Beispiel zeigt die Bedeutung des Freibordes bei der Beurteilung der Abflusskapazität des Alpenrheins bei Diepoldsau *(Bild 1)*. Der Alpenrhein ist bei einem Abfluss von 4500 m^3/s bordvoll (Freibord = 0 m). Die Energielinie (mittlere Geschwindigkeit des gesamten benetzten Querschnittes) erreicht die Dammkrone bei einem Abfluss von 3750 m^3/s (Freibord ca. 0.5 m) und bei einem Freibord von 1 m liegt die Abflusskapazität noch bei 3200 m^3/s.

Für diese Abflussmenge wird im Mittelgerinne eine Fliesstiefe von rund 7.5 m beansprucht. Im obersten Meter bis zur Dammkrone können rechnerisch rund 1300 m^3/s oder 40% der Abflusskapazi-

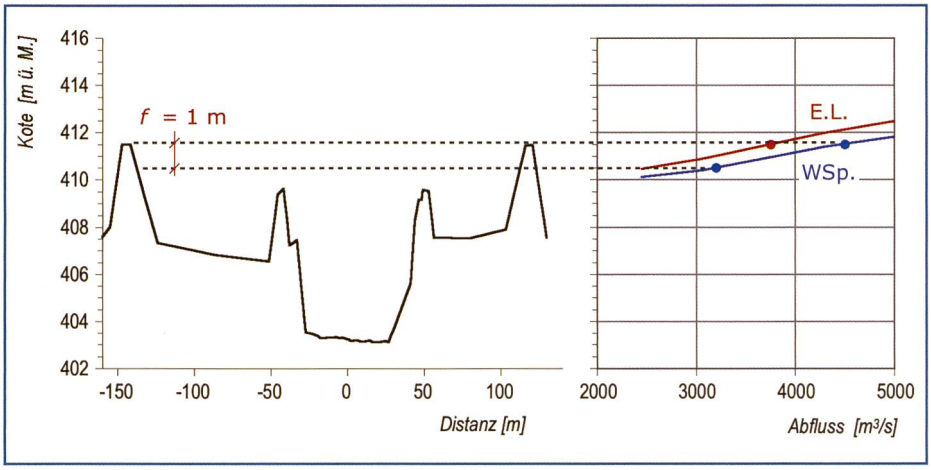

Bild 1. Einfluss des Freibords auf die Abflusskapazität des Alpenrheins. Angepasst aus [8].

tät bei einem Freibord von 1 m abgeführt werden. Je nach dem, welches Kriterium für das erforderliche Freibord angewandt wird, definiert man die Abflusskapazität in diesem Abschnitt des Alpenrheins also zwischen 3200 m^3/s (ca. HQ_{100}) und 4500 m^3/s (ca. HQ_{300}).

Mit einer Empfehlung zum Thema Freibord möchte die Kommission für Hochwasserschutz (KOHS) dazu beitragen, dass das Freibord in der wasserbaulichen Praxis in der Schweiz einheitlich berücksichtigt wird. Die vorliegende Empfehlung wurde von der KOHS am 17. Januar 2013 verabschiedet. Sie beschreibt die bisherige Praxis in der Anwendung des Freibordes in der Schweiz und im benachbarten Ausland (Kap. 2), legt Grundsätze fest für den Umgang mit dem Freibord bei Schutzprojekten und Gefahrenbeurteilungen (Kap. 3) und schlägt eine Berechnungsmethode für das erforderliche Freibord vor (Kap. 4). In Kap. 5 wird die Anwendung der Freibordbetrachtung bei der Wirkungsanalyse diskutiert.

In der Schweiz bestehen wenige Normen für die Bemessung von Schutzbauten oder für die Beurteilung von Naturgefahren. Die vorliegende Methode zur Bestimmung des erforderlichen Freibordes ist als Empfehlung der Kommission für Hochwasserschutz des Schweizerischen Wasserwirtschaftsverbandes zu verstehen. Sie richtet sich an Wasserbauingenieure aus Praxis und Verwaltung. Die Ansätze wurden im Bestreben entwickelt, möglichst transparent, allgemeingültig und in sich kohärent zu sein und lassen sich auf die meisten in der Praxis vorkommenden Fälle anwenden. Es ist dem Anwender jedoch überlassen, die Methode an die Verhältnisse des von ihm bearbeiteten Gewässers anzupassen und zu verbessern.

Die Bestimmung des Freibords ist ein Baustein in der Analyse von Hochwassergefahren oder in der Konzeption und Bemessung von Schutzmassnahmen. Andere Elemente wie z.B. die Definition von Schutzzielen, das Festlegen von Bemessungsereignissen oder die Bewältigung von Überlast müssen gesondert betrachtet werden.

2. Die bisherige Praxis

2.1 Untersuchungsmethoden

Die im In- und Ausland bestehende Methoden zur Festlegung des erforderlichen Freibords f_e und ihre Anwendung wurde mit einer Literaturrecherche, einer Umfrage bei Wasserbaubehörden und Hochschulen im In- und Ausland mittels Fragebogen sowie mit Interviews von Fachpersonen ermittelt [3]. Die Praxis in den Kantonen bei der Anwendung des Freibordes bei Gefahrenbeurteilungen wurde mit einer Recherche im Bundesamt für Umwelt erhoben.

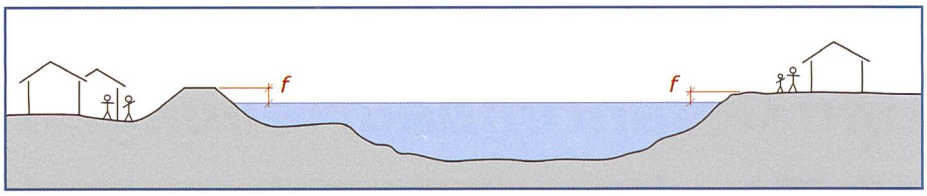

Bild 2. Das Freibord f als Abstand zwischen dem Wasserspiegel und der Oberkante des Ufers.

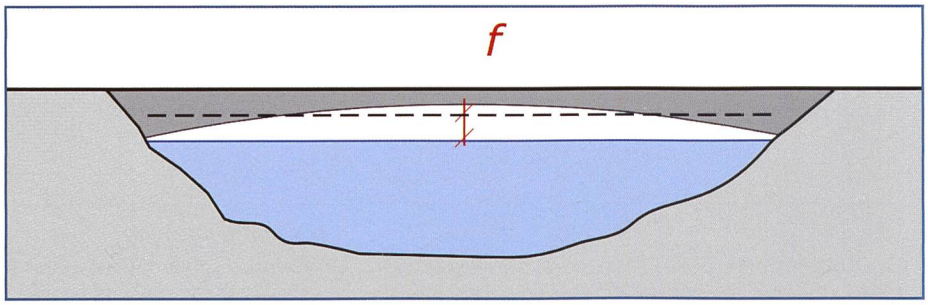

Bild 3. Bei Brücken bezieht sich das Freibord auf eine mittlere Kote der Unterkante.

2.2 Methoden und ihre Anwendung in der Schweiz

In der Schweiz sind die am häufigsten vertretenen Philosophien:

- f_e = feste Grösse
- $f_e = v^2/2g$
- f_e = abhängig von der Schutzzielgrösse und vom Schadenpotenzial

Als Werte für die festen Grössen wurden genannt:

- unter Brücken f_e = min. 1.0 m
- Bäche f_e = min. 0.5–1.0 m
- Flüsse f_e = min. 0.8–1.0 m
- Wildbäche f_e = min. 1.5–2.5 m

Dabei verwenden unterschiedliche Institutionen unterschiedliche Werte.

Folgende Prozesse werden laut Umfrage im Freibord berücksichtigt:

- Schwemmholz
- variable Sohlenlage
- Kurvenüberhöhung
- instationäre Abflüsse
- Wellenbildung

Praktisch alle befragten Institutionen gaben an, das Freibord nicht zu verwenden, um hydrologische oder bauliche Unsicherheiten abzudecken. In der Regel wird in Projekten ein Freibord gefordert. Bei der Gefahrenbeurteilung ist die Praxis sehr unterschiedlich: In je rund einem Drittel der Kantone wird ein Freibord ganz, teilweise oder überhaupt nicht berücksichtigt. Wenn es berücksichtigt wird, dann am ehesten bei der Beurteilung der Abflusskapazität bei Brückenquerungen.

2.3 Methoden und ihre Anwendung im Ausland

Jede der angefragten Institutionen hat eine andere Philosophie zur Festlegung des erforderlichen Freibords. Nachfolgend die Bandbreite:

- f_e = mit probabilistischem Ansatz (Niederlande, Südtirol, England)
- f_e = abhängig von Prozessen, durch Berechnung (Österreich, Deutschland)
- $f_e = v^2/2g$ (Österreich, Italien)
- f_e = abhängig von der Schutzzielgrösse (Österreich)
- f_e = Mindest-Freibord (Deutschland)
- $f_e = 0.17 \cdot Fr^{1/3} \cdot h_m$, Berücksichtigung einer strömungsinduzierten Wellenentwicklung mit Fr = Froude-Zahl und h_m = mittlere Fliesstiefe (Deutschland)

Für die Festlegung des Freibords werden folgende Prozesse berücksichtigt:

- Wind
- Wellenauflauf
- Verklausung (durch Treibholz)
- Verstopfung (durch seitliche Lawinen- und Mureinstösse)
- Variable Sohlenlage
- Eis
- Querströmungen
- Ausführungstoleranzen

Hydrologische Unsicherheiten werden in der Festlegung des erforderlichen Freibords nicht berücksichtigt.

3. Konzept Freibord: Grundsätze

3.1 Definition Freibord

«Das Freibord bezeichnet den senkrechten Abstand zwischen dem Wasserspiegel und der Oberkante des Ufers oder eines Wasserbauwerks (z.B. Damm, Sperre) oder der Unterkante einer Brücke.» ([1],

zit. in [3], vgl. *Bild 2*). Bei Brücken mit nicht horizontaler Unterkante (schräg, gebogen) bezieht sich das Freibord auf eine mittlere Kote der Unterkante *(Bild 3)*.

Das erforderliche Freibord f_e bezeichnet das Freibord, welches eingehalten werden muss, damit eine rechnerisch bestimmte Abflusskapazität des Gerinnes gewährleistet ist.

3.2 Das Freibord als hydraulische Grösse

Das erforderliche Freibord wird als hydraulische Grösse betrachtet. Es beschreibt einerseits die Unschärfen in der Berechnung einer Wasserspiegellage bei gegebenem Gerinnequerschnitt und andrerseits berücksichtigt es Prozesse wie Wellenbildung und Staudruck an Hindernissen sowie den Transport von Treibgut.

3.3 Belastung, Einwirkung und Kapazität

In einen Gewässerabschnitt können der Abfluss sowie die Zufuhr von Geschiebe, Schwemmholz und anderem Treibgut [1] als Belastungsgrössen betrachtet werden. Als Mass für die Einwirkung der Belastung auf einen Gerinnequerschnitt werden die Lage des Wasserspiegels – sie wird von der (veränderlichen) Sohlenlage und der Abflusstiefe bestimmt – die Fliessgeschwindigkeit sowie eine Mass *t* über dem Wasserspiegel definiert. Letzteres beschreibt den Raum, welcher durch Treibgut beansprucht wird. Die Geometrie des Gerinnes, sein Gefälle und seine Rauheit sowie das Freibord bestimmen die Kapazität des Gerinnes, die Belastungsgrössen abzuführen.

Die Belastungsgrössen und die Grössen der Kapazität beeinflussen beide die Grössen der Einwirkung und beeinflussen sich gegenseitig *(Bild 4)*. So sind z.B. die Lage des Wasserspiegels z_w und die Fliessgeschwindigkeit *v* sowohl eine Funktion des Abflusses als auch eine Funktion der Geometrie und der Rauheit des Gerinnes. Im Weiteren ist z.B. die Geometrie des Querschnitts abhängig davon, ob dieser durch Treibgut verlegt wird oder nicht. Umgekehrt werden die Wellenbildung und somit das erforderliche Freibord von der Fliessgeschwindigkeit *v* und der Abflusstiefe *h* bestimmt.

3.4 Berücksichtigte Unschärfen

Das erforderliche Freibord deckt Unschärfen in der Berechnung des Wasserspiegels ab, welche hervorgerufen werden durch Unschärfen in der Prognose der Sohlenlage bei Hochwasser und durch Unschärfen in der Abflussrechnung. Die Unschärfen in der Berechnung des Wasserspiegels können nach den Methoden von Kap. 4.2 bestimmt werden. Das Freibord deckt keine Fehler ab, welche durch die Verwendung eines ungeeigneten hydraulischen Modells oder durch eine falsche Modellkonfiguration entstehen.

Die Unschärfen sollen bei einer Abflussrechnung ausgewiesen werden. Sie sollen nicht durch konservative Annahmen in Bezug auf massgebliche Fliessquerschnitte, Sohlenlagen oder Rauheiten «überdeckt» werden.

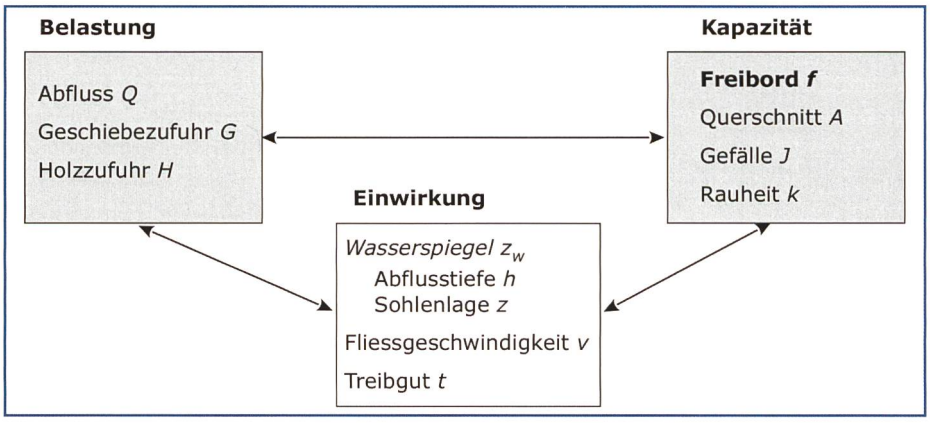

Bild 4. Systemabgrenzung zwischen Belastung, Einwirkung und Kapazität eines Gerinneabschnittes. Das Freibord f ist ein Element der Kapazität.

3.5 Berücksichtigte Prozesse

Das erforderliche Freibord deckt die nachfolgend aufgeführten Prozesse ab, d.h. das Freibord trägt dazu bei, dass trotz Auftreten dieser Prozesse die Abflusskapazität eines Gerinnes nicht erschöpft ist:

- Wellen, durch den Abfluss verursacht
- Aufstau an lokalen Abflusshindernissen (z.B. an Bäumen oder vorspringenden Mauerecken)
- Schwemmholztransport und Eistrieb

Das Freibord wird zum Wasserspiegel addiert, welcher unter Berücksichtigung der folgenden Prozesse berechnet wurde:

- Sohlenveränderung während eines Hochwassers
- Langfristige Sohlenveränderungen
- Überhöhung des Wasserspiegels in Kurvenaussenseiten
- Unterschiedliche Fliessgeschwindigkeiten im Hauptgerinne und im Vorland bei gegliederten Querschnitten
- Ansammlungen von Schwemmholz und Treibeis an Brückenpfeilern oder -widerlagern

Bei Murgängen wird das Freibord sinngemäss zum beanspruchten Abflussquerschnitt der Murgangfront addiert. Das vorliegende Konzept berücksichtigt keine Windwellen (sie sind in den betrachteten Gewässern von untergeordneter Bedeutung) und kein geotechnisches Versagen von Dämmen.

3.6 Anwendungsbereich

Das vorliegende Konzept für die Definition des erforderlichen Freibords wird bei Wasserbauprojekten und Gefahrenbeurteilungen an Flüssen, Bächen und Wildbächen angewandt. Der Fliessquerschnitt kann einfach oder gegliedert sein. Bei Brücken und Durchlässen muss in der Regel ein Freibord eingehalten werden. Andernfalls muss der Nachweis erbracht werden, dass ein Abfluss unter Druck möglich ist. Die Freibordkriterien gelten dann für den Zulauf.

Die Methode wurde entwickelt, um die meisten in der Praxis vorkommenden Fälle zu bearbeiten. In Spezialfällen, z.B. bei Grossprojekten oder bei Spezialbauwerken wie Hochwasserentlastungen kann bzw. soll die vorliegende Methode ergänzt oder erweitert werden.

Für Stauseen und Flussstauhaltungen sind die Anforderungen an das Freibord in den Richtlinien zur Stauanlagenverordnung festgelegt [7]. Sie werden hier nicht weiter behandelt.

3.7 Wozu das Freibord nicht dient

Das Freibord soll nicht verwendet werden, um Unschärfen in den hydrologischen Szenarien (Festlegen eines Abflusses oder eines Geschiebeeintrages bestimmter Jährlichkeit) oder Unschärfen in der geotechnischen oder statischen Bemessung von Schutzbauten abzudecken. Es

[1] *Zum Beispiel Siloballen, Sperrgut, Treibeis usw.*

soll auch nicht dazu dienen, für ein hohes Schadenpotenzial einen höheren Sicherheitszuschlag (und damit implizit eine höhere Abflusskapazität) zu begründen. Solche Kriterien sollten durch die Wahl des Bemessungsszenarios berücksichtigt werden.

4. Berechnung des erforderlichen Freibords

4.1 Aufbau

Das erforderliche Freibord f_e setzt sich aus verschiedenen Teil-Freiborden zusammen. Jedes der Teil-Freiborde berücksichtigt eine der in Kap. 3.3 definierten Einwirkungen.

$$f_{min} \leq f_e = \sqrt{f_w^2 + f_v^2 + f_t^2} \leq f_{max} \qquad (1)$$

mit

f_e = erforderliches Freibord

f_{min} = minimal erforderliches Freibord

f_{max} = maximal erforderliches Freibord

f_w = erforderliches Freibord aufgrund von Unschärfen in der Bestimmung der Wasserspiegellage

f_v = erforderliches Freibord aufgrund von Wellenbildung und Rückstau an Hindernissen

f_t = erforderliches Freibord aufgrund von zusätzlich benötigtem Abflussquerschnitt für Treibgut unter Brücken

Je nach Situation sind die einzelnen Elemente mehr oder weniger bedeutend. Unter Umständen spielen die Wellenbildung (langsam fliessendes Gewässer) oder der zusätzlich benötigte Abflussquerschnitt (im offenen Gerinne) keine Rolle. In diesen Fällen können die entsprechenden Terme zu null gesetzt werden.

Für die Definition des erforderlichen Freibords werden die Teil-Freiborde geometrisch addiert. Damit wird berücksichtigt, dass sich nicht immer alle Unschärfen oder Prozesse gleichermassen manifestieren.

4.2 Freibord aufgrund von Unschärfen in der Bestimmung der Wasserspiegellage

4.2.1 Einführung

Jede berechnete Wasserspiegellage ist mit Unschärfen behaftet. Die Unschärfen werden hervorgerufen durch Unsicherheiten

- in der Prognose der massgeblichen Sohlenlage
- in der Abflussrechnung auf der massgeblichen Sohlenlage *(Bild 5)*

Das Freibord aufgrund von Unschärfen in der Bestimmung der Wasserspiegellage hat den Betrag des mittleren Fehlers an der berechneten Wasserspiegellage σ_w. Dieser setzt sich zusammen aus dem mittleren Fehler, hervorgerufen durch die Unschärfe der Prognose der massgeblichen Sohlenlage σ_{wz} und aus dem mittleren Fehler der Abflussrechnung σ_{wh}.

$$f_w = \sigma_w = \sqrt{\sigma_{wz}^2 + \sigma_{wh}^2} \qquad (2)$$

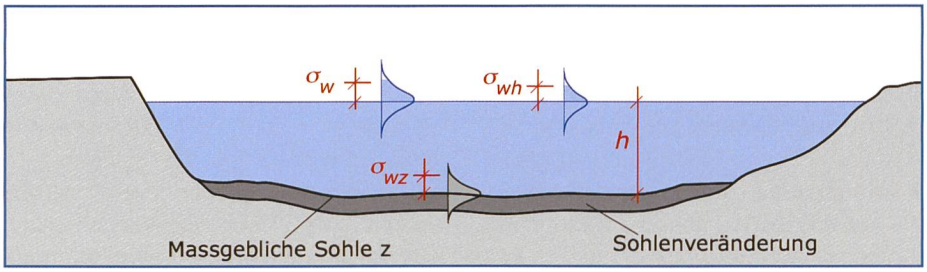

Bild 5. Mittlerer Fehler σ_w an der Bestimmung des Wasserspiegels. Die Abflusstiefe h wird auf einer prognostizierten, massgeblichen Sohlenlage z berechnet. Die prognostizierte Sohlenlage und die Abflusstiefe sind mit Fehlern behaftet.

Eingangsgrösse	Mittlerer Fehler
Breite [m]	10 %, max. 1 m
Gemessene Sohlenkote [m]	0.1 m
Mittlere Rauheit [$m^{1/3}/s$]	10 %
Gefälle [-]	10 %
Böschungsneigung [°]	3°

Tabelle 1. Geschätzte mittlere Fehler an den Eingangsgrössen einer hydraulischen Rechnung.

4.2.2 Fehler am Wasserspiegel hervorgerufen durch Unschärfen in der Prognose der massgeblichen Sohlenlage

Grundsätzlich müssen mögliche Sohlenveränderungen während eines Hochwassers prognostiziert und bei der Abflussrechnung berücksichtigt werden. Der Parameter σ_{wz} dient also nicht dazu, eventuelle Geschiebeablagerungen per se im Freibord zu berücksichtigen sondern dazu, die Unschärfe in der Prognose der Sohlenlage abzudecken. Diese Unschärfe muss im Einzelfall ausgewiesen werden.

Die Unschärfe in der Prognose der massgeblichen Sohlenlage ist vor allem dort von Bedeutung, wo während eines Hochwasserereignisses mit Ablagerungen von Geschiebe zu rechnen ist (z.B. an Gefälleknicken oder beim seitlichen Eintrag von Geschiebe), oder wo die Sohle ihre Lage langfristig verändern kann. Sie ist umso grösser, je grösser die erwartete Sohlenveränderung ist.

Für die Bestimmung von σ_{wz} gibt es bislang nur wenige Erfahrungswerte. Für σ_{wz} dürften Werte zwischen 0.1 m (grösserer Talfluss) und 1.0 m (Wildbach) als plausibel eingestuft werden [2]. Wird die Sohlenlage mit numerischen Simulationen bestimmt, kann der Nachweis mit einer Sensitivitätsanalyse, z.B. durch eine Variation von massgeblichen Korngrössen oder durch die Anwendung unterschiedlicher Transportgesetze geführt werden. Wird eine Sohle als stabil bezeichnet, kann die Unschärfe in der Sohlenlage vernachlässigt werden ($\sigma_{wz} = 0$).

4.2.3 Fehler am Wasserspiegel hervorgerufen durch Unschärfen in der Abflussrechnung

Unschärfen in der Abflussrechnung können hervorgerufen werden durch Unschärfen in der Querprofilgeometrie oder durch Fehler in der Schätzung der Rauheit des Gerinnes. Mit einer Sensitivitätsanalyse für Abflussrechnungen an verschiedenen Gewässern in der Schweiz wurde die Grössenordnung dieser Fehler bestimmt [3]. Dabei wurde angenommen, dass jede

[2] *Der Wert σ_{wz} beschreibt den mittleren Fehler am Wasserspiegel aufgrund von Unschärfen in der Sohlenlage. Im Sinne einer Vereinfachung kann er der Unschärfe an der Sohlenlage gleichgesetzt werden und es gilt $\sigma_{wz} = \sigma_z$.*

Eingangsgrösse für die Abflussrechnung mit einem mittleren Fehler behaftet sei. Der Einfluss der einzelnen Fehler am Resultat der Berechnung wurde durch Ableitung der Fliessformel von Strickler bestimmt und die jeweiligen Ergebnisse mit dem Fehlerfortpflanzungsgesetz nach Gauss addiert.

Die Fehlerrechnung wurde für 18 Gewässer und insgesamt 52 Abflüsse durchgeführt. Als Fehler an den Eingangsgrössen wurden die Werte von *Tabelle 1* geschätzt. Die Ergebnisse sind in *Bild 6* dargestellt. Es zeigt sich, dass der mittlere Fehler an der berechneten Abflusstiefe linear mit derselben ansteigt. Die Ergebnisse lassen sich mit einer linearen Gleichung annähern:

$$\sigma_{wh} = 0.06 + 0.06\,h \qquad (3)$$

Je grösser die Abflusstiefe ist, desto grösser ist auch der Fehler an der Abflussrechnung. Der Fehler an der Rauheit wirkt sich am stärksten auf den Fehler an der Abflusstiefe aus, weil nach dem Fliessgesetz von Strickler der Rauheitsbeiwert linear in die Abflussrechnung einfliesst. Bei gegliederten Querschnitten soll eine an den Abflussanteilen von Hauptgerinne und Vorland gewichtete mittlere Abflusstiefe in Gleichung 3 eingesetzt werden.

In spezifischen Situationen soll der Fehler an der Abflussrechnung individuell bestimmt werden, z.B. bei sehr variabler Gerinnegeometrie oder grossen Rauheiten oder wenn bei Grossprojekten ohnehin umfangreiche Abflussrechnungen durchgeführt werden, welche es erlauben die Fehler an der hydraulischen Rechnung mit Hilfe einer Sensitivitätsanalyse zu präzisieren. Ebenso kann die Beobachtung vergangener Hochwasserereignisse in die Schätzung des Fehlers mit einbezogen werden.

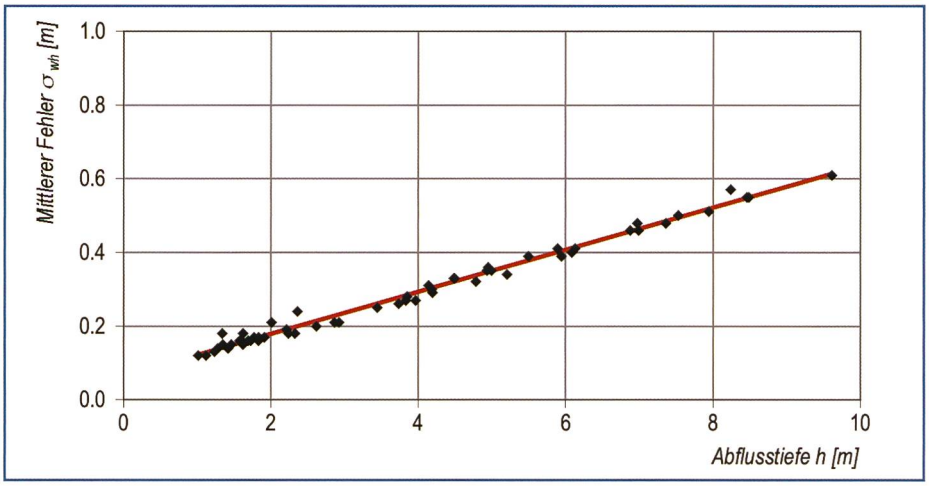

Bild 6. Mittlerer Fehler σ_{wz} an der berechneten Abflusstiefe in Abhängigkeit der Abflusstiefe h für die Testgewässer im Anhang A.

	Brücke mit glatter Untersicht	Brücke mit rauer Untersicht
Schwemmholz mit geringen Abmessungen (nur Äste)	0.3 m	0.5 m
Einzeln angeschwemmte Baumstämme	0.5 m	1.0 m
Wurzelstöcke	1.0 m	1.0 m
Schwemmholz als Teppich angeschwemmt	1.0 m	1.0 m

Tabelle 2. Teil-Freiborde f_t für Schwemmholz in Abhängigkeit der Beschaffenheit der Brücke und Art und Menge des Schwemmholzes.

4.3 Freibord aufgrund von Wellenbildung und Rückstau an Hindernissen

Bei Hindernissen im Fliessquerschnitt (z.B. Pfeiler, Brückenwiderlager, vorspringende Mauerecken) wird der Abfluss örtlich zurück gestaut. Der Wasserspiegel erhöht sich im Rückstau bis maximal auf die Höhe der Energielinie, liegt also höchstens um den Betrag $v^2/2g$ höher als der mittlere Wasserspiegel im Gerinnequerschnitt.

Bei Abflussverhältnissen nahe dem kritischen Abfluss bilden sich auf der Wasseroberfläche Wellen. Sie sind an der Stelle mit den grössten Fliessgeschwindigkeiten am höchsten (in einem geraden Gewässerabschnitt in der Mitte des Fliessquerschnittes). Ein Wellenberg liegt höchstens um den Betrag $v^2/2g$ höher als der mittlere Wasserspiegel im Gerinnequerschnitt.

Das Freibord aufgrund von Wellenbildung und Rückstau an Hindernissen wird deshalb mit

$$f_v = \frac{v^2}{2\,g} \qquad (4)$$

bestimmt. Dabei bezeichnet v die örtliche Fliessgeschwindigkeit. Sie ist im Prinzip eine Funktion der örtlichen Abflusstiefe, des Längengefälles und der Sohlrauigkeit und kann über die üblichen Fliessformeln abgleitet werden. Es sollen die folgenden Regeln angewandt werden:

- In einfachen Trapez- und Rechteckgerinnen setzt man die örtliche der mittleren Fliessgeschwindigkeit gleich.
- In einem Doppelprofil (Profil mit Vorland, Berme) ist die Fliessgeschwindigkeit in Funktion der mittleren Abflusstiefe auf dem Vorland massgebend. Die Breite des Vorlandes muss mindestens dem Fünffachen der Abflusstiefe entsprechen.
- Bei Brücken gilt die mittlere Fliessgeschwindigkeit des jeweiligen Teilquerschnitts (Hauptgerinne oder Vorland) als örtliche Geschwindigkeit.
- An der Kurvenaussenseite einer starken Krümmung ist die örtliche Geschwindigkeit um bis zu 30% grösser als die mittlere Fliessgeschwindigkeit im Querschnitt.
- Bei dichter Vegetation in Ufernähe kann die örtliche Fliessgeschwindigkeit gleich null gesetzt werden, wenn die folgenden Bedingungen erfüllt sind:
  - Der Vegetationsstreifen ist genügend breit.
  - Der Vegetationsstreifen wird in der Abflussrechnung als nicht durchströmt angenommen.
  - Der Erhalt des Vegetationsstreifens ist durch ein Unterhaltskonzept nachweislich gesichert.

4.4 Freibord aufgrund von zusätzlich benötigtem Abflussquerschnitt unter Brücken

Beim Abfluss unter Brücken beansprucht mitgeführtes Treibgut zusätzlichen Raum über dem Wasserspiegel, damit es ohne hängen zu bleiben, abgeführt wird. Grundsätzlich hängt der benötigte Raum von der Menge und den Abmessungen des Treibgutes ab (glatte Baumstämme, Wurzelteller, Eisschollen, Siloballen usw., die einzeln oder als Teppich angeschwemmt werden) sowie von der Beschaffenheit der Untersicht der Brücke.

Für die Festlegung des Teil-Freibordes f_t für Schwemmholz wird ein Klassensystem vorgeschlagen. f_t ist eine feste Grösse zwischen 0.3 m und 1.0 m. Der Wert von f_t wird in Funktion der Beschaffenheit der Brücke und in Funktion von Art und Menge des erwarteten Schwemm-

Teil-Freibord	*Kriterium für die Anwendung*
f_w	In allen Gewässerabschnitten.
f_v	In Brückenquerschnitten oder bei Eindolungen.
	Auf Strecken mit Hochwasserschutzdämmen oder –mauern, die nicht überströmsicher ausgebildet sind.
	Auf Strecken, bei denen der Rückstau an einem Abflusshindernis dazu führen kann, dass Wasser kontinuierlich austreten kann.
	Auf einem Schwemmkegel.
	In gepflasterten Wildbachschalen.
f_t	In Brückenquerschnitten oder bei Eindolungen, wo Treibgut ein Rolle spielen kann.

Tabelle 3. Kriterien für die Anwendung der Teil-Freiborde.

holzes definiert *(Tabelle 2)*. Als Brücke mit rauer Untersicht gilt z.B. eine Brücke mit Fachwerk, vorspringenden Trägern oder angehängten Leitungen.

In einem Gewässer mit anderem Treibgut als Schwemmholz (Siloballen, Eis) muss f_t sinngemäss bestimmt werden.

4.5 Wahl der Teil-Freiborde

Mit der Wahl der Teil-Freiborde f_w, f_v und f_t von Gleichung 1 kann die Bemessung des erforderlichen Freibordes der spezifischen Situation eines Gewässerabschnittes angepasst werden. Je nach Situation kann das eine oder andere Teil-Freibord zu null gesetzt werden. Bei der Festlegung des erforderlichen Freibordes sollen die Kriterien von *Tabelle 3* angewandt werden.

4.6 Minimales und maximal erforderliches Freibord

Das rechnerisch ermittelte erforderliche Freibord wird auf Dezimeter gerundet und nach oben und unten begrenzt.

Mit der unteren Grenze f_{min} = 0.3 m wird dem mittleren Fehler an der berechneten Abflusstiefe bei kleinen, langsam fliessenden Gewässern ein höheres Gewicht beigemessen.

Mit der oberen Grenze f_{max} wird verhindert, dass das erforderliche Freibord bei hohen Fliessgeschwindigkeiten sehr gross wird. In Gewässern mit fluvialem Geschiebetransport wird eine obere Grenze von f_{max} =1.5 m vorgeschlagen. In murfähigen Wildbächen kann durchaus ein grösseres, maximales Freibord gefordert werden.

Das erforderliche Freibord wird querschnittsweise berechnet und abschnittweise vereinheitlicht.

5. Wirkung bei Überschreiten der Abflusskapazität

5.1 Freibord und Schwachstellenanalyse

Das Freibord wird bei der Schwachstellenanalyse im Rahmen der Projektierung von Hochwasserschutzmassnahmen oder im Rahmen einer Gefahrenbeurteilung berücksichtigt. Die Schwachstellenanalyse beantwortet die Fragen:

- Wo kann bei einem gegebenen Abfluss Wasser aus dem Gerinne austreten?
- Weshalb tritt Wasser aus (Überströmen, Dammbruch, Verklausung)?
- Wie viel Wasser tritt aus?

Das erforderliche Freibord f_e wird für einen Abfluss Q und eine Zufuhr von Geschiebe G, Holz H und anderem Treibgut nach der Methode von Kap. 4 bestimmt. Dabei spielt es keine Rolle, ob der betreffende Abfluss Q als Bemessungsabfluss Q_{Dim}, als Abfluss bei Überlast oder Abfluss eines bestimmten Hochwasserszenarios HQ_x oder EHQ bezeichnet wird.

Ist für einen Abfluss Q und den dazugehörigen berechneten Wasserspiegel z_w das Freibord f grösser als das erforderliche Freibord f_e, reicht die Abflusskapazität des betreffenden Gerinneabschnittes aus, um den Abfluss Q schadlos abzuführen. In Bezug auf die Abflusskapazität stellt der betreffende Gerinneabschnitt keine Schwachstelle dar *(Bild 7)*. Andere Versagensmechanismen (z.B. Verklausung an Brückenpfeilern, Seitenerosion, geotechnisches Versagen eines Dammes, Unterkolkung usw.) bleiben vorbehalten.

Ist für einen Abfluss Q und den dazugehörigen berechneten Wasserspiegel z_w das Freibord f kleiner als das erforderliche Freibord f_e, reicht die Abflusskapazität des betreffenden Gerinneabschnittes nicht aus, um den Abfluss schadlos abzuführen. In der Terminologie einer Gefahrenbeurteilung stellt der betreffende Gerinneabschnitt eine Schwachstelle dar und es ist eine Wirkung ausserhalb des Gerinnes möglich. Es wird deshalb überprüft, ob Wasser aus dem Gerinne austritt.

Diese Überprüfung wird bei Gefahrenbeurteilung in der Schweiz bisher unterschiedlich gehandhabt. In einigen Kantonen wird eine Überflutung ausgewiesen, wenn das erforderliche Freibord nicht mehr verfügbar ist, in anderen, wenn kein Freibord mehr vorhanden ist. In den folgenden Kapiteln wird ein einheitliches Vorgehen vorgeschlagen.

5.2 Wirkung bei Gerinnen mit überströmsicherer Begrenzung

In einem Gerinne, welches durch das Terrain oder durch eine überströmbare Schutzbaute (überströmsicherer Damm oder Mauer) begrenzt ist, wird bei Überschreiten der Abflusskapazität ein Ausbruchszenario in Funktion der Wasserspiegellage definiert.

Als massgeblicher Wasserspie-

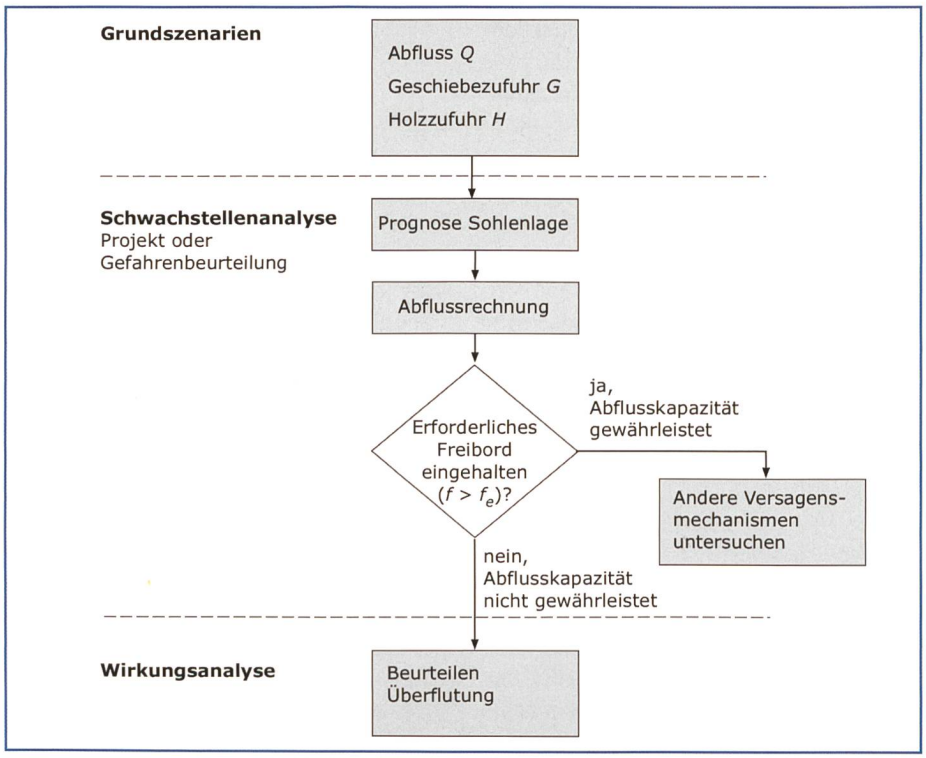

Bild 7. Berücksichtigung des Freibordes bei der Schwachstellenanalyse.

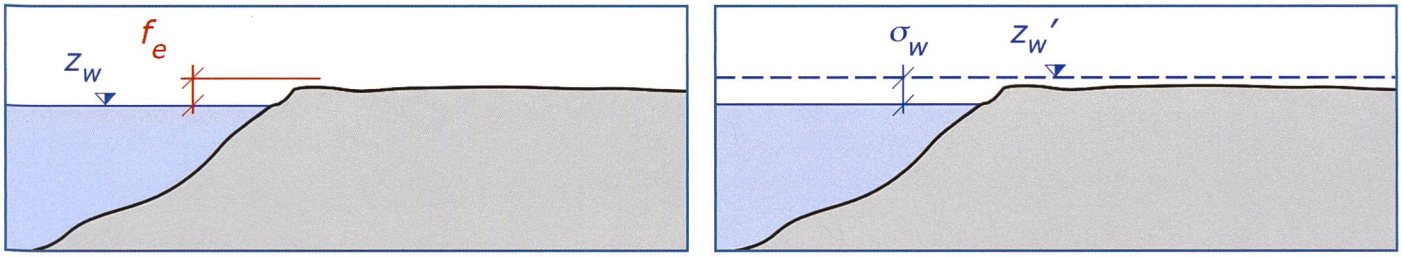

Bild 8. Überschreiten der Abflusskapazität in Gerinne mit überströmsicherer Begrenzung und Überflutungsszenario mit einem denkbaren Wasserspiegel.

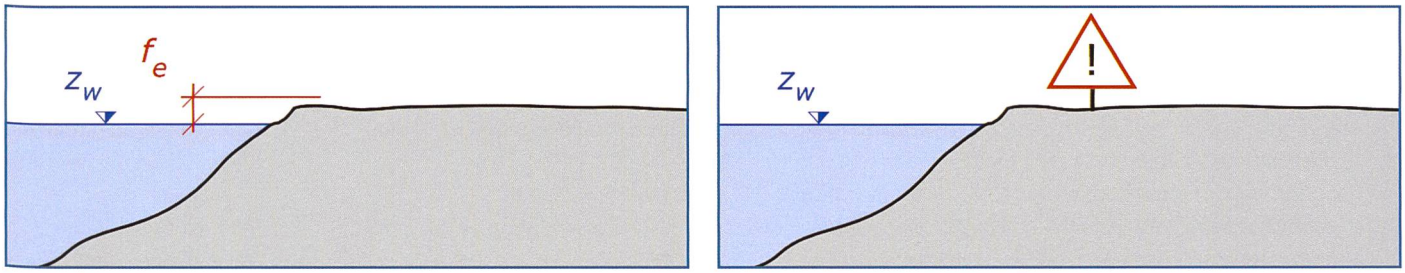

Bild 9. Überschreiten der Abflusskapazität in Gerinne mit überströmsicherer Begrenzung ohne Überflutungsszenario.

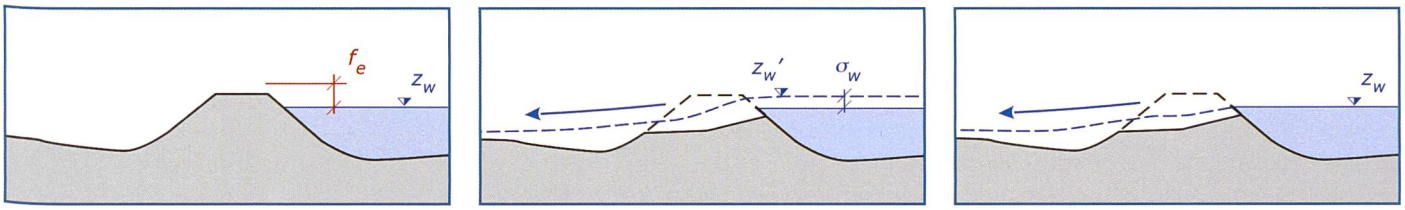

Bild 10. Überschreiten der Abflusskapazität in Gerinne mit nicht überströmsicherer Begrenzung und Dammbruchszenario. Mitte: mit möglichem Wasserspiegel z_w'; rechts: mit wahrscheinlichstem Wasserspiegel z_w.

gel wird ein Wasserspiegel z_w' angenommen, welcher unter Berücksichtigung der in Kap. 4.2 definierten Unschärfen auch möglich wäre. Für z_w' gilt:

$$z_w' = z_w + \sigma_w = z_w + \sqrt{\sigma_{wz}^2 + \sigma_{wh}^2} \qquad (5)$$

Darin bezeichnet z_w den Wasserspiegel, der mit Hilfe einer Abflussrechnung und unter Berücksichtigung der in Kap. 3.5 aufgeführten Prozesse bestimmt wurde. Es ist dies der wahrscheinlichste Wasserspiegel. z_w' bezeichnet einen um den mittleren Fehler an der Berechnung erhöhten Wasserspiegel.

Mit diesem Ansatz wird immer dann eine Überflutungsfläche ausgewiesen, wenn die Abflusskapazität als ungenügend betrachtet wird *(Bild 8)*. Bei einer Gefahrenbeurteilung und bei der Bemessung von Schutzbauten werden somit die gleichen Kriterien angewandt.

Alternativ kann für die Beurteilung einer Überflutung der Wasserspiegel z_w betrachtet werden. Dieser Ansatz wurde bislang bei Gefahrenkartierungen häufig dann angewandt, wenn Überflutungsflächen aus 2d-Abflusssimulationen direkt abgeleitet wurden. Die Wahrscheinlichkeit der Überflutung entspricht dann am ehesten der Wahrscheinlichkeit des Grundszenarios [3]. Die Methode hat aber den Nachteil, dass in Fällen, bei welchen ein Freibord zwar besteht, dieses aber ungenügend ist ($f < f_e$) und deshalb die Abflusskapazität als nicht gewährleistet bezeichnet wird, keine Überflutung ausgewiesen wird. Die Überflutungsgefahr muss dann auf einer Überflutungs-, Intensitäts- oder Gefahrenkarte anderweitig gekennzeichnet werden *(Bild 9)*.

5.3 Wirkung bei Gerinnen mit nicht überströmsicherer Begrenzung

Ist ein Gerinne durch ein nicht überströmsicheres Ufer begrenzt (nicht überströmsicherer Damm oder Mauer), wird bei Überschreiten der Abflusskapazität ein Szenario für das Versagen des Dammes bzw. der Mauer definiert. Um die Austrittswassermenge zu bestimmen können wiederum ein möglicher Wasserspiegel z_w' oder der wahrscheinlichste Wasserspiegel z_w als massgeblich bezeichnet werden *(Bild 10)*. Es bleibt zu beachten, dass in den meisten Fällen andere Faktoren wie z.B. die Grösse der Bresche, der Zeitpunkt eines Dammbruches oder Ablagerungen von Geschiebe bei der Entlastung die Austrittswassermenge stärker beeinflussen als die Wahl des massgeblichen Wasserspiegels.

Im Rahmen der Wirkungsanalyse wird die Geschwindigkeitshöhe verwendet um gegebenenfalls ein Dammbruchszenario zu begründen nicht aber um Ausbruchwassermengen zu bestimmen.

5.4 Wirkung bei Brücken oder Durchlässen

Ist die Abflusskapazität eines Brückenquerschnitts oder eines Durchlasses ungenügend, wird ein Verklausungsszenario definiert, d.h. es wird definiert, um welchen Flächenanteil ΔA sich der Brückenquerschnitt oder der Querschnitt eines Durchlasses vermindert *(Bild 11)*. Dabei spielen die Abmessungen und die Form des Querschnittes, die Beschaffenheit von Untersicht und Sohle (Auskolkung möglich oder nicht) und die Menge der Schwemmholzzufuhr eine Rolle. Für Querschnitte mit einer Fläche kleiner als 30 m^2 wurden im

[3] ***Abweichungen sind möglich, wenn die Wahrscheinlichkeit des Grundszenarios sich nur auf die Abflussspitze und nicht auf das Abflussvolumen bezieht.***

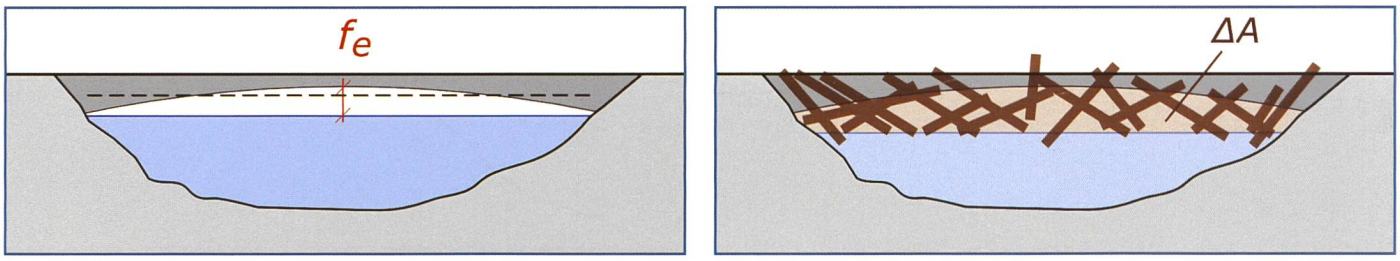

Bild 11. Überschreiten der Abflusskapazität in einem Brückenquerschnitt und Verklausungsszenario.

Rahmen von Protect Verklausungsszenarien vorgeschlagen [6]:

- Reduktion des Abflussquerschnittes um 100 % (vollständige Verklausung), wenn
  - die kleinste Abmessung des Querschnitts < 1 m misst oder
  - die Sohle sich durch Auskolken nicht anpassen kann oder
  - die Schwemmholzmenge gross ist.
- Reduktion des Abflussquerschnittes um 50% (Teilverklausung), wenn das Schwemmholzaufkommen gering ist und sich die Sohle durch Auskolken anpassen kann.

Ist eine Brücke darauf ausgelegt, Abfluss unter Druck abzuführen, gilt das Freibord-Kriterium nicht für den Brückenquerschnitt selber sondern für die Zulaufstrecke, in welcher sich der Abfluss zurück staut. Das Verhalten einer Druckbrücke bei der Zufuhr von Treibgut muss untersucht werden.

6. Schlussfolgerung

Im vorliegenden Artikel wird eine Methode beschrieben, mit welcher die Abflusskapazität eines Fliessgewässers unter Berücksichtigung eines Freibordes beurteilt werden kann. Das erforderliche Freibord wird als hydraulische Grösse verstanden und berücksichtigt Prozesse wie Wellenbildung, Rückstau an Abflusshindernissen und den Transport von Schwemmholz sowie Unschärfen in der Berechnung des Wasserspiegels. Andere Unschärfen, z.B. solche bei der Bestimmung von Abflussmengen, müssen unabhängig davon diskutiert werden.

Es bleibt jedoch zu beachten, dass ein Querschnitt in einem Gewässer auch dann eine Schwachstelle darstellen kann, wenn für einen bestimmten Abfluss das erforderliche Freibord eingehalten wird.

Die Kommission für Hochwasserschutz des Schweizerischen Wasserwirtschaftsverbandes empfiehlt, das erforderliche Freibord nach der vorliegenden Methode zu bestimmen. Sie empfiehlt die Methode bei allen künftigen Wasserbauprojekten sowie bei der Erarbeitung neuer oder der Revision bestehender Gefahrenkarten anzuwenden.

Literatur

[1] *Bezzola G.R., Hegg C.* (Hrsg.) 2008: Ereignisanalyse Hochwasser 2005, Teil 1 – Prozesse, Schäden und erste Einordnung. Bundesamt für Umwelt BAFU, Eidgenössische Forschungsanstalt WSL. Umwelt-Wissen Nr. 0707. 215 S.

[2] *Bundesamt für Wasserwirtschaft* (1982): Hochwasserschutz an Fliessgewässern. Wegleitung.

[3] *KOHS* (2012): Literaturrecherche Freibord. HSR Hochschule für Technik Rapperswil – Institut für Bau und Umwelt.

[4] *KOHS Arbeitsgruppe Freibord* (2010): Fehlerschätzung am berechneten Wasserspiegel. Internes Arbeitspapier. 24.09.2010, unveröffentlicht.

[5] *Loat R., Meier E.* (2003): Wörterbuch Hochwasserschutz. Bundesamt für Wasser und Geologie (Hrsg.). Bern: Haupt, 2003.

[6] *Romang H.* (Hrsg.) (2008): Wirkung von Schutzmassnahmen. Nationale Plattform für Naturgefahren PLANAT, Bern. 289 S.

[7] *Sicherheit der Stauanlagen*. Richtlinien des BWG, 2002.

[8] *Zarn B.* (2003): Szenarienbildung bei der Erstellung von Überflutungs- und Gefahrenkarten – ein Diskussionsbeitrag. «Wasser Energie Luft» 95. Jahrgang, 5/6.

Symbole

σ_w	[m]	Unschärfe an der berechneten Wasserspiegellage
σ_{wh}	[m]	Unschärfe an der berechneten Abflusstiefe
σ_{wz}	[m]	Unschärfe an der berechneten Wasserspiegellage aufgrund der Unschärfe der prognostizierten Sohlenlage
σ_z	[m]	Unschärfe an der prognostizierten Sohlenlage
ΔA	[m²]	Querschnittsreduktion wegen Verklausung von Brücken und Durchlässen mit Schwemmholz
A	[m²]	Gerinnequerschnitt
EHQ	[m³/s]	Extremhochwasser
f	[m]	Feibord
f_e	[m]	erforderliches Freibord
f_w	[m]	Teil-Freibord aufgrund von Unschärfe in der Bestimmung der Wasserspiegellage
f_{max}	[m]	Obere Grenze für das erforderliche Freibord
f_{min}	[m]	Untere Grenze für das erforderliche Freibord
f_t	[m]	Teil-Freibord aufgrund von zusätzlich benötigtem Abflussquerschnitt für Treibgut
f_v	[m]	Teil-Freibord aufgrund von Wellenbildung und Rückstau
g	[m/s²]	Erdbeschleunigung
G	[m³/Ereignis]	Geschiebezufuhr
H	[m³/Ereignis]	Holzzufuhr
h	[m]	Abflusstiefe
HQ_x	[m³/s]	Hochwasserabfluss mit der Jährlichkeit x
J	[-]	Gefälle
k	[m$^{1/3}$/s]	Rauheitsbeiwert
Q	[m³/s]	Abfluss
v	[m/s]	Fliessgeschwindigkeit
z	[m ü.M.]	Sohlenlage
z_w	[m ü.M.]	Wasserspiegel
z_w'	[m ü.M.]	Wasserspiegel unter Berücksichtigung von Unschärfen in der Berechnung

Autorenschaft

Kommission für Hochwasserschutz, Wasserbau und Gewässerpflege, KOHS c/o Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband.

Mitwirkende in der Arbeitsgruppe Freibord der KOHS: Lukas Hunzinger, Martin Jäggi, Jean-Pierre Jordan, Jürg Speerli, Heinz Weiss, Benno Zarn.

Dank

Die KOHS dankt dem Bundesamt für Umwelt für die finanzielle – und dem Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft des Kantons Zürich – für die logistische Unterstützung zur Erarbeitung der Empfehlung.