

# 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 erforderliche 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 Krite-

rien 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<sup>3</sup>/s bordvoll

(Freibord = 0 m). Die Energielinie (mittlere Geschwindigkeit des gesamten benetzten Querschnittes) erreicht die Dammkrone bei einem Abfluss von 3750 m<sup>3</sup>/s (Freibord ca. 0.5 m) und bei einem Freibord von 1 m liegt die Abflusskapazität noch bei 3200 m<sup>3</sup>/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<sup>3</sup>/s oder 40% der Abflusskapazi-

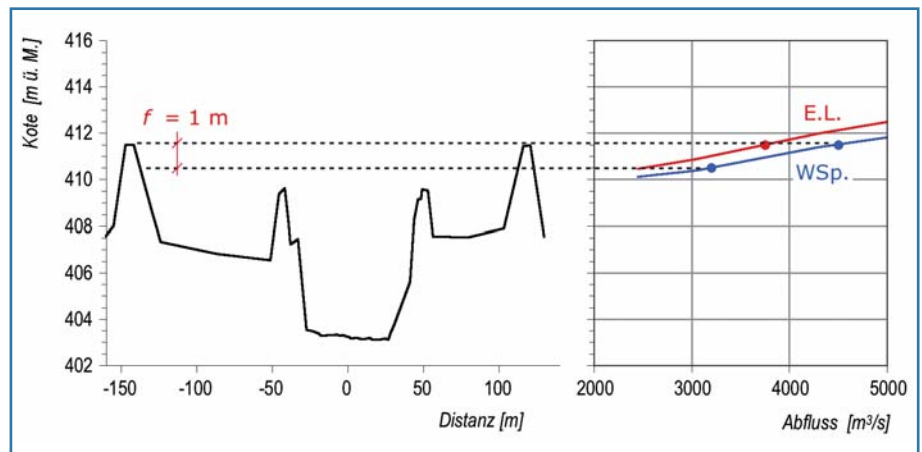


Bild 1. Einfluss des Freibords auf die Abflusskapazität des Alpenrheins. Angepasst aus [8].

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<sup>3</sup>/s (ca. HQ<sub>100</sub>) und 4500 m<sup>3</sup>/s (ca. HQ<sub>300</sub>).

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 Hochschu-

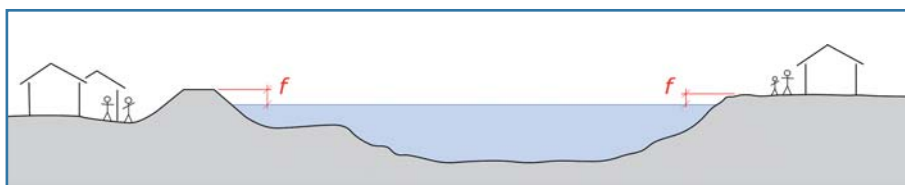


Bild 2. Das Freibord  $f$  als Abstand zwischen dem Wasserspiegel und der Oberkante des Ufers.

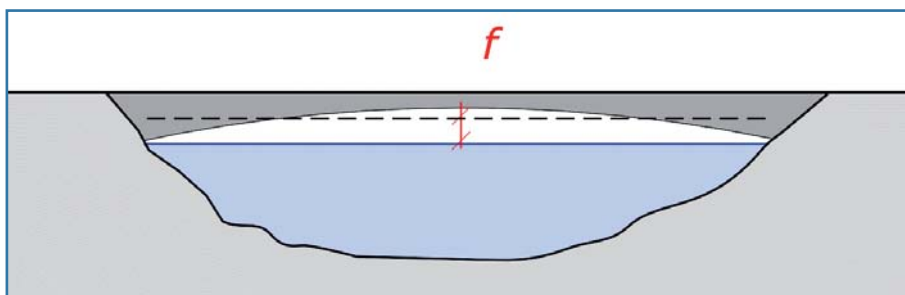


Bild 3. Bei Brücken bezieht sich das Freibord auf eine mittlere Kote der Unterkante.

len 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.

### 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  $f_e = \text{min. } 1.0 \text{ m}$
- Bäche  $f_e = \text{min. } 0.5\text{--}1.0 \text{ m}$
- Flüsse  $f_e = \text{min. } 0.8\text{--}1.0 \text{ m}$
- Wildbäche  $f_e = \text{min. } 1.5\text{--}2.5 \text{ m}$

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 andererseits berücksichtigt es Prozesse wie Wellenbildung und Staudruck an Hindernissen sowie den Transport von Treibgut.

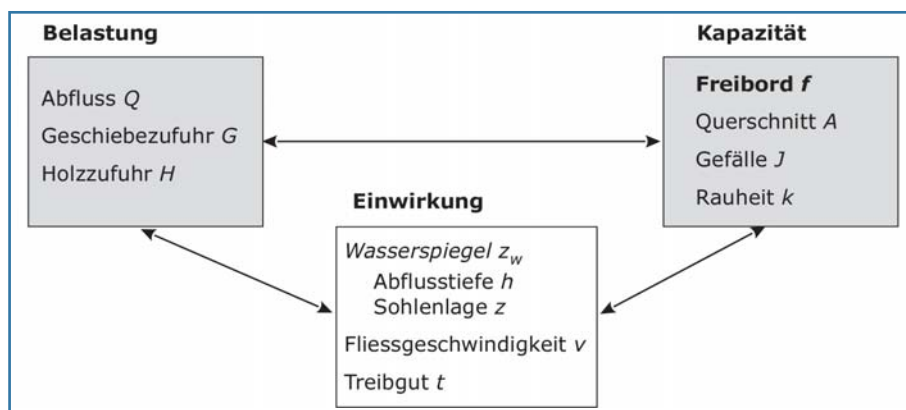
### 3.3 Belastung, Einwirkung und Kapazität

In einen Gewässerabschnitt können der Abfluss sowie die Zufuhr von Geschiebe, Schwemmholz und anderem Treibgut<sup>1</sup> 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 Wasserspie-



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

gels 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.

### 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 Flusstauhaltungen 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

<sup>1</sup> 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.

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

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  $\sigma_w$ . Dieser setzt sich zusammen aus dem mittleren Fehler, hervorgerufen durch die Unschärfe der Prognose der massgeblichen

Sohlenlage  $\sigma_{wz}$  und aus dem mittleren Fehler der Abflussrechnung  $\sigma_{wh}$ .

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

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

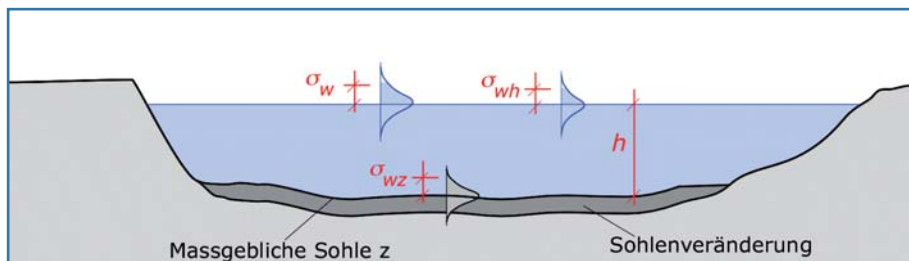
Grundsätzlich müssen mögliche Sohlenveränderungen während eines Hochwassers prognostiziert und bei der Abflussrechnung berücksichtigt werden. Der Parameter  $\sigma_{wz}$  dient also nicht dazu, eventuelle Geschiebeablagerungen per se im Freibord zu berücksichtigen sondern dazu, die Unschärfe in der 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  $\sigma_{wz}$  gibt es bislang nur wenige Erfahrungswerte. Für  $\sigma_{wz}$  dürften Werte zwischen 0.1 m (grösserer Talfluss) und 1.0 m (Wildbach) als plausibel eingestuft werden<sup>2</sup>. 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



**Bild 5. Mittlerer Fehler  $\sigma_w$  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.**

<sup>2</sup> Der Wert  $\sigma_{wz}$  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:

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

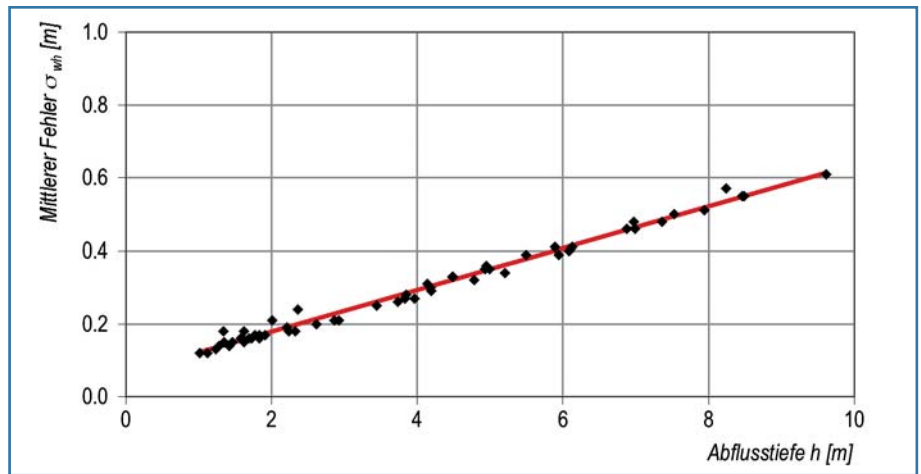
Je grösser die Abflusstiefe ist, desto grösser ist auch der Fehler an der Abflussrechnung. Der Fehler an der Rauheit wirkt sich am stärksten auf den Fehler an der Abflusstiefe aus, weil nach dem Fließgesetz von Strickler der Rauheitsbeiwert linear in die Abflussrechnung einfließt. Bei gegliederten Querschnitten 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.

### 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 Fließquer-



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

	Brücke mit glatter Untersicht	Brücke mit rauher Untersicht
Schwemmholz mit geringen Abmessungen (nur Äste)	0.3 m	0.5 m
Einzel 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.**

schnittes). 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

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

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 abgeleitet 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, Wurzelstöcke, 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.
$f_t$	In gepflasterten Wildbachschalen. In Brückenquerschnitten oder bei Eindolungen, wo Treibgut eine Rolle spielen kann.

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

holzes definiert (Tabelle 2). Als Brücke mit rauher 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 abschnittsweise 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, Dammbbruch, Verklauung)?
- 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. Verklauung an Brückenpfeilern, Seitenerosion, geotechnisches Versagen eines Dammes, Unterkolkung usw.) bleiben vorbehalten.

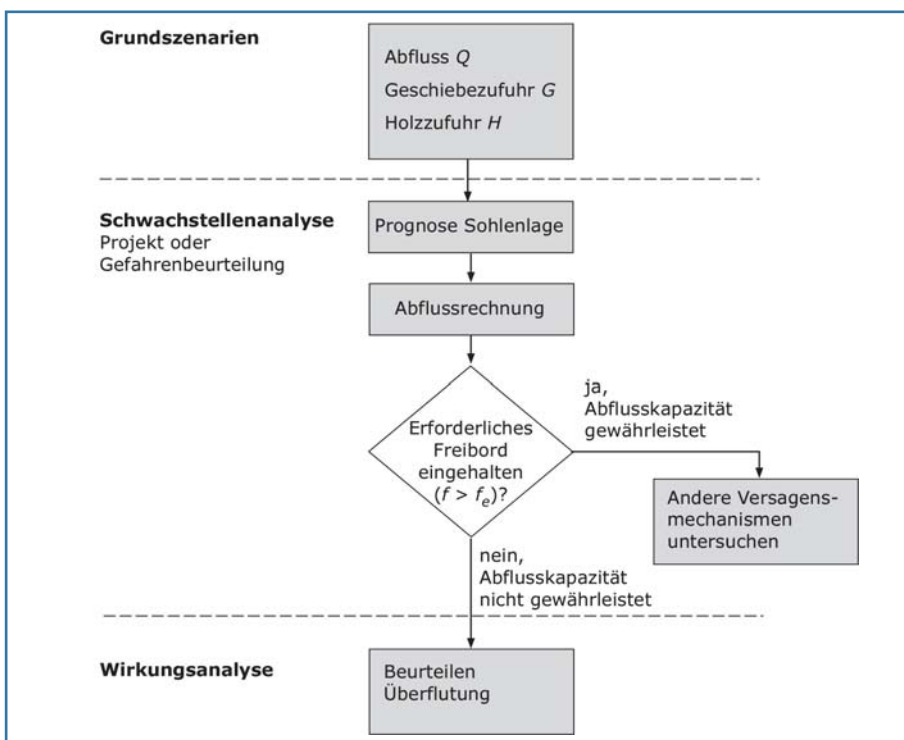
Ist für einen Abfluss  $Q$  und den dazugehörigen berechneten Wasserspiegel  $z_w$  das Freibord  $f$  kleiner als das erforderliche Freibord  $f_e$ , reicht die Abflusskapazität des betreffenden Gerinneabschnittes nicht aus, um den Abfluss schadlos abzuführen. In der Terminologie einer Gefahrenbeurteilung 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.

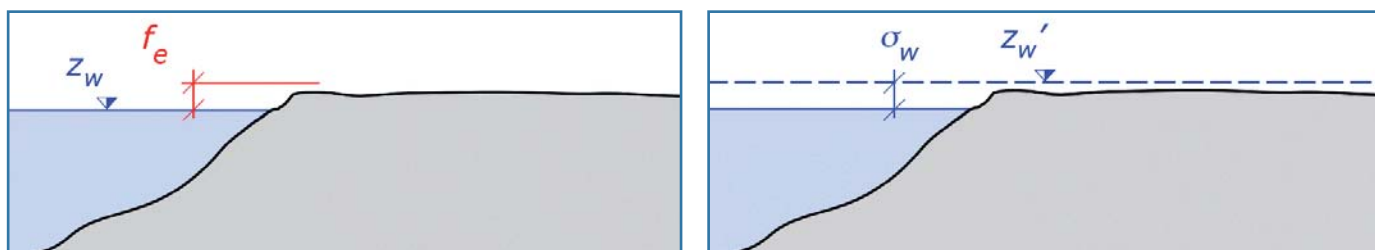
#### 5.2 Wirkung bei Gerinnen mit überströmsicherer Begrenzung

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

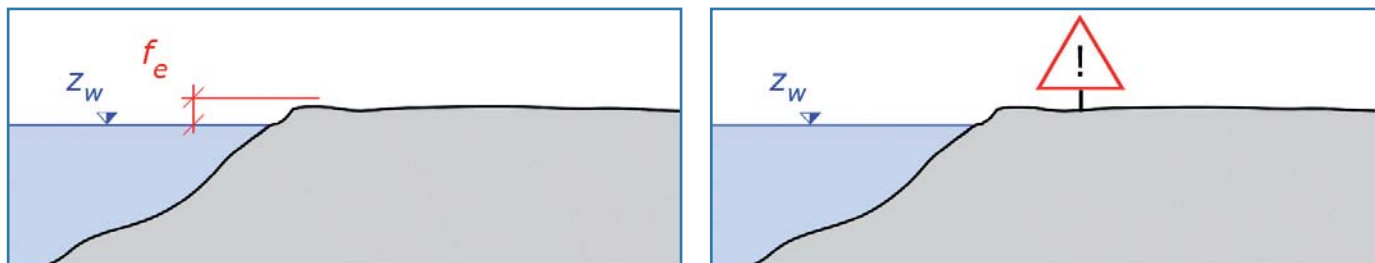
Als massgeblicher Wasserspie-



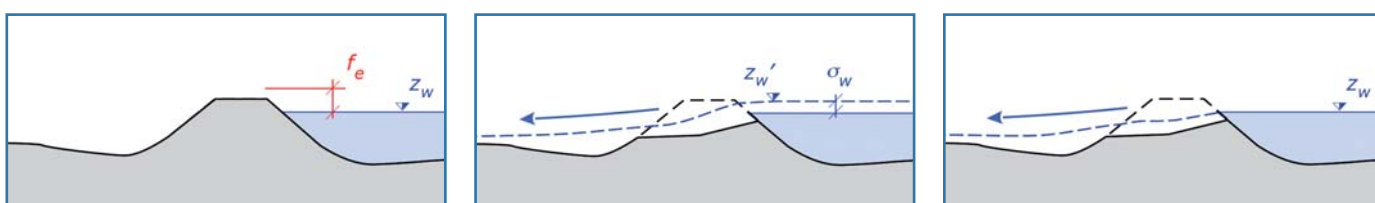
**Bild 7. Berücksichtigung des Freibordes bei der Schwachstellenanalyse.**



**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 Dammbrechtszenario. 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:

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

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<sup>3</sup>. 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).

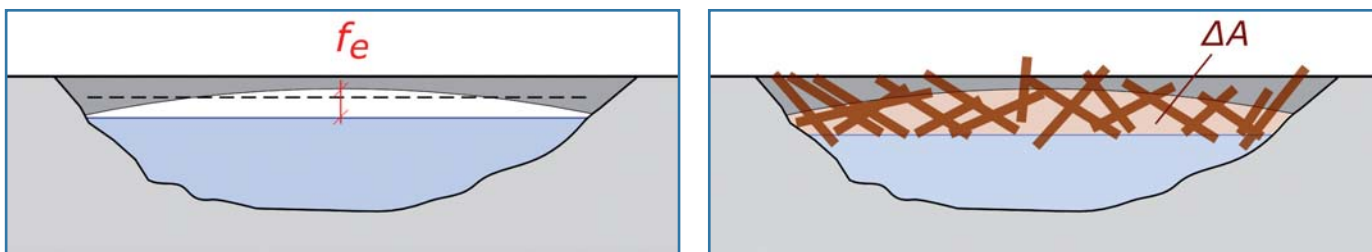
Es bleibt zu beachten, dass in den meisten Fällen andere Faktoren wie z.B. die Grösse der Bresche, der Zeitpunkt eines Dammbrechens oder Ablagerungen von Geschiebe bei der Entlastung die Austrittswassermenge stärker beeinflussen als die Wahl des massgeblichen Wasserspiegels.

Im Rahmen der Wirkungsanalyse wird die Geschwindigkeitshöhe verwendet um gegebenenfalls ein Dammbrechtszenario 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 Verkläusungsszenario definiert, d.h. es wird definiert, um welchen Flächenanteil  $\Delta A$  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<sup>2</sup> wurden im

<sup>3</sup> 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 Verkläusungsszenario.**

Rahmen von Protect Verkläusungsszenarien vorgeschlagen [6]:

- Reduktion des Abflussquerschnittes um 100 % (vollständige Verkläusung), 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% (Teilverkläusung), 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

$\sigma_w$ [m]	Unschärfe an der berechneten Wasserspiegellage
$\sigma_{wh}$ [m]	Unschärfe an der berechneten Abflusstiefe
$\sigma_{wz}$ [m]	Unschärfe an der berechneten Wasserspiegellage aufgrund der Unschärfe der prognostizierten Sohlenlage
$\sigma_z$ [m]	Unschärfe an der prognostizierten Sohlenlage
$\Delta A$ [m <sup>2</sup> ]	Querschnittsreduktion wegen Verkläusung von Brücken und Durchlässen mit Schwemmholz
$A$ [m <sup>2</sup> ]	Gerinnequerschnitt
$EHQ$ [m <sup>3</sup> /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/s <sup>2</sup> ]	Erdbeschleunigung
$G$ [m <sup>3</sup> /Ereignis]	Geschiebezufuhr
$H$ [m <sup>3</sup> /Ereignis]	Holzzufuhr
$h$ [m]	Abflusstiefe
$HQ_x$ [m <sup>3</sup> /s]	Hochwasserabfluss mit der Jährlichkeit x
$J$ [-]	Gefälle
$k$ [m <sup>1/3</sup> /s]	Rauheitsbeiwert
$Q$ [m <sup>3</sup> /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.*



# Freibord bei Hochwasserschutzprojekten und Gefahrenbeurteilungen

## Fallbeispiele

KOHS

### 1. Einleitung

Die im vorhergehenden Artikel (WEL 1-2013, Seite 43–50) vorgestellte Methode zur Bestimmung des erforderlichen Freibordes wird an drei Beispielen angewandt und beschrieben. Die Beispiele repräsentieren Gewässer unterschiedlicher Grösse und in jedem Gewässer bestimmen unterschiedliche Prozesse das erforderliche Freibord.

### 2. Sagentobelbach in Dübendorf, Kanton Zürich

Der Sagentobelbach entspringt am Zürichberg Nord in steilem, waldigem Gelände. Sein Einzugsgebiet misst 3.2 km<sup>2</sup>. Er ist dort zum Teil stark verbaut und durch Abschnitte mit Molassefelsen grösstenteils stabilisiert. Zum Dorfteil Stettbach hin flacht er ab; vor allem eingangs des Dorfes ist er eng und hart verbaut, was periodisch zu Verklausungen führt. Ausgangs des Dorfes wurde er im Zuge der Erweiterung des Bahnhofareals Stettbach umgeleitet bzw. auf rund 300 m neu erstellt.

Der neue Bach wurde im kompakten Moränenmaterial ausgehoben. Dieses ist mehrheitlich feinkörnig, aber mit Kies-/Geröllinseln durchsetzt. Auf dem betrachteten Abschnitt hat der Bach ein Längengefälle zwischen 1.5% und 2.0%. Die Mittelwasserrinne ist 0.5 m bis 1.0 m breit. Vorländer liegen rund 50 cm bis 80 cm über der mittleren Sohle und wechseln sich links- und rechtsufrig ab. Die Breite der oberen Uferumrandung beträgt im Minimum 15 m. Die Böschungsneigungen sind variabel (im Mittel 1:3–1:2). Die Ufer sind im Einschnitt bis zu gut vier Meter hoch. An einigen Stellen erheben sich kleinere Dämme bis etwa 60 cm über das Terrain. Diese sind luftseitig 1:5 geneigt und mit Gras bewachsen, aber rechnerisch nicht als überströmbar gedacht. In diesem oberen Teilstück überquert eine Brücke den Bach (Breite zwischen den Widerlagern 7.0 m, Höhe über der Mittelwassersohle 2.0 m).



Bild 1. Sagentobelbach in der Flachstrecke (1.5%–2.0%). Aufnahme vom November 2012 (nach dem grossen Hochwasser vom 3. Juli 2012) (Quelle: Basler&Hofmann AG).

erforderliches Freibord $f_e$	berechnet	gerundet (Grenzwerte berücksichtigt)	Bemerkung
Abfluss $Q$ [m <sup>3</sup> /s]	13		
Fliesstiefe $h$ [m]	1.1		Staukurvenberechnung
Fließgeschwindigkeit $v$ [m/s]	2.5		Staukurvenberechnung
$\sigma_{wz}$ [m]	0.20		geschätzt
$\sigma_{wh}$ [m]	0.12		Gl. (1)
$f_w$ [m]	0.23		Gl. (2)
$f_v$ [m]	0.32		Gl. (3)
$f_t$ [m]	0.50		Schwemmholtz einzeln, Brücke mit glatter Untersicht
$f_e$ Einschnitt [m]	0.23	<b>0.3</b>	nach Gl. (1) mit $f_w$
$f_e$ Damm / Kegel [m]	0.39	<b>0.4</b>	nach Gl. (1) mit $f_w, f_v$
$f_e$ Brücke [m]	0.64	<b>0.6</b>	nach Gl. (1) mit $f_w, f_v, f_t$

Tabelle 1. Erforderliche Freiborde im Sagentobelbach für einen Abfluss von 13 m<sup>3</sup>/s.

Der Bach wurde hydraulisch mittels eindimensionaler Staukurvenrechnung dimensioniert (Rauheitsbeiwert  $k=25$  m<sup>1/3</sup>/s). Der Bemessungsabfluss beträgt 13 m<sup>3</sup>/s. Es resultieren eine Abflusstiefe von 1.1 m und eine mittlere Fließgeschwindigkeit von 2.5 m/s. Der Geschiebeeintrag im betrachteten Abschnitt wird als gering beurteilt, weil das aus dem Einzugsgebiet herangeführte Material mehrheitlich eingangs des Dorfes liegen bleibt. Hingegen wird kiesiges Material (anstehendes und aus ökologischen Überlegungen einge-

brachtes Fremdmaterial) bei Hochwasser transportiert, so dass die Sohlenlage bei Hochwasser Schwankungen unterliegt. Der Fehler am berechneten Wasserspiegel, aufgrund von Unschärfen in der Prognose der Sohlenlage wird deshalb zu  $\sigma_{wz} = 0.2$  m geschätzt. Das Holzaufkommen ist wegen der Verklausungen im engen, oberen Dorfteil und wegen der Wildbachverbauungen eher gering. Bäume werden einzeln angeschwemmt.

Es resultieren die erforderlichen Freiborde von Tabelle 1.

### 3. Schächen bei Altdorf, Kanton Uri

Der Schächen entwässert das westlich des Klausenpasses gelegene Schächental und mündet bei Attinghausen in die Reuss. Das Einzugsgebiet ist 109 km<sup>2</sup> gross. Auf

den letzten ca. 2 km seines Laufs fliesst der Schächen auf seinem Schwemmkegel. Auf diesem Abschnitt wurde das Gerinne nach dem verheerenden Hochwasser von 1911 in eine gemauerte Schale eingefasst (siehe Bild). Das Gefälle beträgt dort 2.2%,

die Sohlbreite 15 m, die Uferneigung 1:1. Wand- und Sohlrauigkeit können durch einen k-Wert nach Strickler von 45 m<sup>1/3</sup>/s charakterisiert werden.

Im oberen Teil liegt die Schale in einem Einschnitt. Nachher liegt sie auf dem Kegel, d.h. austretendes Wasser fliesst nicht mehr ins Gerinne zurück.

Weststaulagen führen immer wieder zu bedeutenden Hochwasserereignissen. Am 1. August 1977 und am 23. August 2005 uferte der Schächen oberhalb der SBB-Brücke kurz oberhalb der Mündung aus und führte zu grossen Schäden. Die Reuss konnte den grossen Geschiebeanfall des Schächens nicht bewältigen und die Sohle landete an der Mündung auf. Dies bewirkte bei beiden Ereignissen eine rückschreitende Auflandung in der Schale des Schächens, worauf der Brückenquerschnitt mit Geschiebe und Holz verfüllt wurde. Grundsätzlich gibt es somit zwei Dimensionierungsfälle, nämlich den Fall des Reinwasserabflusses auf glatter Sohle mit hohen Fließgeschwindigkeiten sowie den Fall des Abflusses auf der rückschreitenden Auflandung. Für den Fall ohne Ablagerungen auf der Schale resultieren die erforderlichen Freiborde von *Tabelle 2*. Sie werden durch die minimal bzw. maximal erforderlichen Freiborde aus Kap. 4.6 bestimmt. Die lichte Weite unter der Brücke und die Höhe der Ufer betragen 3 m. Die Summe von Abflusstiefe und Freibord ergibt 2.8 m. Die Dimensionierung wäre also für diesen Fall ausreichend.

Für den Fall mit Ablagerungen auf der Schale resultieren die erforderlichen Freiborde von *Tabelle 3*. Die Ufer müssen für diesen Fall knapp 4 m hoch sein (Summe von Ablagerung, Fliesstiefe und erforderlichem Freibord). Mit der kürzlich realisierten Erhöhung der Ufermauern ist diese Bedingung erfüllt.

erforderliches Freibord $f_e$	berechnet	gerundet (Grenzwerte berücksichtigt)	Bemerkung
Abfluss $Q$ [m <sup>3</sup> /s]	120		
Fliesstiefe $h$ [m]	1.3		Normalabflussrechnung
Fließgeschwindigkeit $v$ [m/s]	7.1		Normalabflussrechnung
$\sigma_{wz}$ [m]	0.00		feste Sohle, keine Auflandung
$\sigma_{wh}$ [m]	0.14		Gl. (1)
$f_w$ [m]	0.14		Gl. (2)
$f_v$ [m]	2.57		Gl. (3)
$f_t$ [m]	0.50		Schwemmholz einzeln, Brücke mit glatter Untersicht
$f_e$ Einschnitt [m]	0.14	<b>0.3</b>	nach Gl. (1) mit $f_w$
$f_e$ Damm / Kegel [m]	2.57	<b>1.5</b>	nach Gl. (1) mit $f_w, f_v$
$f_e$ Brücke [m]	2.62	<b>1.5</b>	nach Gl. (1) mit $f_w, f_v, f_t$

**Tabelle 2. Erforderliche Freiborde im Schächen für einen Abfluss von 120 m<sup>3</sup>/s auf glatter Sohle ohne Auflandung.**

erforderliches Freibord $f_e$	berechnet	gerundet (Grenzwerte berücksichtigt)	Bemerkung
Abfluss $Q$ [m <sup>3</sup> /s]	120		
Fliesstiefe $h$ [m]	1.36		Normalabflussrechnung auf einer Ablagerungsschicht von 1.5 m, diese wurde durch numerische Simulation ermittelt.
Fließgeschwindigkeit $v$ [m/s]	4.56		dito
$\sigma_{wz}$ [m]	0.30		Die in der Simulation ermittelte Auflandungshöhe ist stark von den gewählten Szenarien abhängig.
$\sigma_{wh}$ [m]	0.14		Gl. (1)
$f_w$ [m]	0.33		Gl. (2)
$f_v$ [m]	1.06		Gl. (3)
$f_t$ [m]	0.50		Schwemmholz einzeln, Brücke mit glatter Untersicht
$f_e$ Einschnitt [m]	0.33	<b>0.3</b>	nach Gl. (1) mit $f_w$
$f_e$ Damm / Kegel [m]	1.11	<b>1.1</b>	nach Gl. (1) mit $f_w, f_v$
$f_e$ Brücke [m]	1.26	<b>1.3</b>	nach Gl. (1) mit $f_w, f_v, f_t$

**Tabelle 3. Erforderliche Freiborde im Schächen für einen Abfluss von 120 m<sup>3</sup>/s mit rückschreitender Auflandung.**



**Bild 2. Schächen bei Altdorf (Quelle: Flussbau AG SAH).**



**Bild 3. Alpenrhein bei Au/Lustenau. (Foto stimmt nicht mit Ort Hydraulik überein) (Quelle: Hunziker, Zarn & Partner AG).**

erforderliches Freibord $f_e$	linkes Vorland		Hauptgerinne		rechtes Vorland		Bemerkung
	berechnet	gerundet	berechnet	gerundet	berechnet	gerundet	
Abfluss $Q$ [ $m^3/s$ ]	715		2080		305		$Q_{total} = 3'100 m^3/s$
Fliesstiefe $h$ [m]	3.73		7.36		2.92		Normalabflussrechnung, gew. Mittel 6.10 m
Fliessgeschw. $v$ [m/s]	2.31		3.67		1.96		Normalabflussrechnung
$\sigma_{WZ}$ [m]	0.05		0.05		0.05		geschätzt
$\sigma_{wh}$ [m]	0.43		0.43		0.43		Gl. (1)
$f_w$ [m]	0.43		0.43		0.43		Gl. (2)
$f_v$ [m]	0.27		0.69		0.20		Gl. (3)
$f_t$ [m]	1.00		1.00		1.00		viel Schwemmholz, Brücken z.T. mit rauer Untersicht
$f_e$ Einschnitt [m]	0.43	<b>0.4</b>	0.43	<b>0.4</b>	0.43	<b>0.4</b>	nach Gl. (1) mit $f_w$
$f_e$ Damm / Kegel [m]	0.51	<b>0.5</b>	0.81	<b>0.8</b>	0.47	<b>0.5</b>	nach Gl. (1) mit $f_w, f_v$
$f_e$ Brücke [m]	1.12	<b>1.1</b>	1.29	<b>1.3</b>	1.11	<b>1.1</b>	nach Gl. (1) mit $f_w, f_v, f_t$

**Tabelle 4. Erforderliche Freiborde im Alpenrhein für einen Abfluss von 3100 m<sup>3</sup>/s.**

Unter der Brücke müsste eine lichte Weite von 4.16 m vorhanden sein. Die im Zug des NEAT-Baus ursprünglich vorgesehene Höhe von 4 m hätte also nicht ausgereicht. Die neue Brücke wurde als Druckbrücke mit einer 3 m hohen Verschallung realisiert. Die rechnerische Dimensionierung erwies sich später im hydraulischen Modellversuch als korrekt.

#### 4. Alpenrhein, Internationale Rheinstrecke

Der Alpenrhein bildet oberhalb des Bodensees die Landesgrenze zwischen St. Gallen (CH) und Vorarlberg (A) und entwässert ein 6119 km<sup>2</sup> grosses Einzugsgebiet. In diesem Abschnitt queren mehrere Brücken den Talfluss, welcher zwischen hohen, nicht überströmsicheren Dämmen in einem Doppeltrapezprofil fliesst. Die Vorländer sind vom Mittelgerinne mit überströmbaren Wuhren abgetrennt. Das Mittelgerinne ist rund 60 m breit, der Abstand zwischen den Hauptdämmen beträgt rund 255 m. Der Alpenrhein hat ein Gefälle von 0.11%. Die Rauheit der Flusssohle wird auf 37 m<sup>1/3</sup>/s und diejenige der Ufer und des Vorlandes im Mittel auf 32.5 m<sup>1/3</sup>/s geschätzt. Der Alpenrheinabschnitt oberhalb des Bodensees ist eine Anlandungsstrecke. Weil die Wildbacheinzugsgebiete weit entfernt sind und herangeführtes Geschiebe in der Sohle gespeichert wird, sind die Sohlenveränderungen während eines Hochwasserereignisses gering. Dafür ist das Holzaufkommen bei Hochwasser gross.

Der Freibordanteil  $f_w$  wegen der Unschärfen bei der Bestimmung des Wasserspiegels wird für den Gesamtquerschnitt

ermittelt. Ein Fehler bei der Rauheit im Vorland wirkt sich auch auf den Wasserspiegel im Mittelgerinne aus und umgekehrt. Bei einem Abfluss 3100 m<sup>3</sup>/s ( $HQ_{100}$ ) fließen rund 2080 m<sup>3</sup>/s im Mittelgerinne mit einer mittleren Fliesstiefe von 7.36 m und einer mittleren Geschwindigkeit von 3.67 m/s ab. Die entsprechenden Werte für das linke Vorland (CH) sind 715 m<sup>3</sup>/s, 3.73 m und 2.31 m/s und für das rechte Vorland (A) 305 m<sup>3</sup>/s, 2.92 m und 1.96 m/s. Die Werte wurden mit einer Normalabflussberechnung in einem idealisierten Querprofil bei Flusskilometer 79.4 bestimmt. Der Fehler aus der Abflussberechnung  $\sigma_{wh}$  kann mit einer an den Teilabflüssen gewichteten mittleren Fliesstiefe abgeschätzt werden. Diese lässt sich mit

$$h_{Mittel} = \frac{h_l Q_l + h_m Q_m + h_r Q_r}{Q_{total}} = \frac{3.73 \cdot 715 + 7.36 \cdot 2080 + 2.92 \cdot 305}{3100} \approx 6.10 \text{ m} \quad (6)$$

berechnen. Mit Gleichung (3) resultiert für  $\sigma_{wh}$  ein Wert von 0.43 m. Der Fehler auf den Wasserspiegel  $\sigma_{wh}$  infolge Unsicherheiten bei der Sohlenlage wird auf 0.05 m geschätzt. Im Mittelgerinne besteht die Unsicherheit wegen möglichen Geschiebeablagerungen und im Vorland wegen Schwebstoffablagerungen. Würden die Fehler für die Teilgerinne unterschiedlich geschätzt, könnte ein gewichtetes Mittel mit dem analogen Vorgehen wie bei der Fliesstiefe bestimmt werden. Mit Gleichung (2) resultiert schliesslich für  $f_w$  ein

Wert von 0.43 m. Dieser ist für die beiden Vorländer und das Mittelgerinne gleich.

Wegen der unterschiedlichen Fließgeschwindigkeiten in den Teilquerschnitten ist das Teilfreibord  $f_v$  für die Berücksichtigung von Wellenbildung und Rückstau an Hindernissen in den Vorländern und im Mittelgerinne nicht gleich. Mit Gleichung (4) resultiert für das Mittelgerinne  $f_v = 0.69$  m, für das linke Vorland  $f_v = 0.27$  m und für das rechte Vorland  $f_v = 0.20$  m. Weil Schwemmholz in allen Teilquerschnitten transportiert werden kann, wird das Teilfreibord  $f_t$  überall auf 1 m festgelegt.

Das erforderliche Freibord wird für alle drei Teilquerschnitte individuell bestimmt. Die Ergebnisse sind in *Tabelle 4* zusammengefasst. Für die Ufer in einem Einschnitt würde sich ein erforderliches Freibord  $f_e$  von 0.4 m ergeben. Dies ist ein theoretischer Wert, weil der Alpenrhein nicht in einem Einschnitt fliesst. Im Einschnitt wäre das erforderliche Freibord für alle drei Teilabflussquerschnitte gleich, weil es nur vom Fehler am Wasserspiegel abhängt. Entlang von Dämmen ist das erforderliche Freibord in den Vorländern 0.50 m, im Hauptgerinne wären es 0.8 m, falls dieses von Dämmen eingefasst würde. Der Unterschied wird durch die höhere Fließgeschwindigkeit im Hauptgerinne verursacht. Bei einer Brücke ist das erforderliche Freibord  $f_e$  in den beiden Vorländern mit 1.10 m gleich und im Mittelgerinne mit 1.3 m rund 20 cm höher.

Anschrift des Verfassers  
KOHS c/o Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband