

09.09.2026

Freibord in Flüssen mit dynamischer Morphologie

Hintergrundbericht



hydrosuisse
Kommission für Hochwasserschutz
(KOHS)

Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU)

Impressum

Auftraggeberin	Schweizerische Eidgenossenschaft Bundesamt für Umwelt BAFU Abteilung Gefahrenprävention 3003 Bern
Auftragnehmer	hydrosuisse Rütistrasse 3a 5400 Baden
Arbeitsgruppe Freibord	Lukas Hunzinger (Leitung) Tony Arborino Giovanni de Cesare Roger Kolb Jürg Speerli
Echogruppe	Paul Demuth (VAW- ETHZ) Jolanda Jenzer-Althaus (FH Burgdorf) Antoine Magnollay (BAFU, Abt. Gefahrenprävention) Christina Rachelly (IUB AG) Viktor Schmidiger (vif, Kt. Luzern) Jürg Stückelberger (TBA Kt. Bern) Volker Weitbrecht (VAW- ETHZ) Benno Zarn (Hunziker, Zarn & Partner AG)
Hinweis	Diese Studie wurde im Auftrag des BAFU verfasst. Für den Inhalt ist allein der Auftragnehmer verantwortlich. Cette publication est également disponible en langue française (www.hydrosuisse.ch/freibord). Questa pubblicazione è anche disponibile in lingua italiana (www.hydrosuisse.ch/freibord).

Titelfoto: Escherkanal

Vorwort

Das Freibord ist ein wichtiger Faktor in der Hochwasserschutzplanung. Die Kommission für Hochwasserschutz (KOHS) hat 2013 eine Methode erarbeitet, nach welcher das für die Gewährleistung der Abflusskapazität erforderliche Freibord für Fliessgewässern mit ebener Sohle bestimmt werden kann. Die standardisierte Methodik hat sich in der Schweiz etabliert.

In den letzten Jahren werden, im Zusammenhang mit dem Hochwasserschutz und der Revitalisierung der Gewässer, Flussabschnitte oft auch aufgeweitet. Damit entstehen dynamische morphologische Prozesse, die die Berechnung der Wasserspiegellagen erschweren.

Die KOHS hat sich darum mit einer Arbeitsgruppe zum Ziel gesetzt, die Empfehlung des erforderlichen Freibords für Gewässer mit dynamischen morphologischen Prozessen zu erweitern.

Wir hoffen, dass diese Empfehlung den Planenden, Mitarbeitenden aus der Verwaltung und den zuständigen Verantwortlichen der Gewässer als wichtiges Hilfsmittel dienen wird.

Dieter Müller

Vorsitzender der KOHS, hydrosuisse

Zusammenfassung

Die Kommission Hochwasserschutz KOHS erweitert ihre Empfehlung aus dem Jahre 2013 zum Freibord bei Hochwasserschutzprojekten und Gefahrenbeurteilungen. Mit dem erweiterten Ansatz sollen Phänomene berücksichtigt werden, die in breiten Fließgewässern mit einer dynamischen Morphologie auftreten, also z. B. variable Flussbettbreiten oder die Bildung von Kiesbänken und bewachsenen Inseln. Diese Phänomene führen dazu, dass der Wasserspiegel und die Energielinie nicht gleichmässig über den Querschnitt verteilt sind sondern örtlich und zeitlich variieren. Die Variation ist umso grösser, je stärker ein Gerinne verzweigt ist.

Es wird eine Berechnungsmethode vorgeschlagen, mit welcher die Variation in Funktion der Gerinneform beschrieben und als Teil Freibord bei der Berechnung des erforderlichen Freibords eingesetzt werden kann.

Bei der Bemessung von Schutzbauten gegen Hochwasser muss unterschieden werden zwischen Unsicherheiten in den Eingangsgrössen wie dem Abfluss und dem Geschiebeeintrag und der Unschärfe im Ergebnis einer Berechnung. Erstere werden mit einer klugen Wahl von Bemessungsszenarien und Überlastszenarien abgedeckt, letztere durch ein Freibord, welches im Sinne dieser Empfehlungen bestimmt werden.

Die neue Empfehlung ist mit derjenigen von 2013 vollständig kompatibel.

Inhalt

1	Einleitung	6
2	Ein Blick zurück – Die Freibordempfehlung von 2013	7
3	Ein Blick über die Grenzen – Andere Ansätze zur Bestimmung des Freibords	8
4	Prozesse in Gewässern mit dynamischer Morphologie	9
4.1	Übersicht	9
4.2	Zeitliche und örtliche Variabilität der Vegetation	9
4.3	Umlagerung von Geschiebe und Bankbildung	11
4.4	Hydraulik der komplexeren Strömungsverhältnisse	12
5	Abgrenzung zwischen Szenarien und Freibord	13
5.1	Unsicherheiten und Unschärfen	13
5.2	Phänomene, Ereignisabläufe und Szenarien	13
5.3	Bemessungsszenario x	14
5.4	Überprüfungsszenario y und Verhalten bei Überlast	15
5.5	Senario z – nicht berücksichtigt	16
5.6	Aufgaben von Planer/in und Bauherrschaft	16
5.7	Folgerung: Tragweite des Freibords	16
6	Das Freibord in Gerinnen mit Bänken	18
6.1	Die Variabilität von Wasserspiegel und Energielinie	18
6.2	Unschärfe in der Berechnung des Wasserspiegels	23
6.3	Die Berechnung des erforderlichen Freibords	24
7	Anwendungsbeispiele	26
7.1	Aufweitungen der Sense und des Alpenrheins	26
7.2	Erforderliches Freibord in Funktion der Breite	27
7.3	Weitere Unsicherheiten am Beispiel der Rheinaufweitung	29
	Symbole	31
	Literatur	32

1 Einleitung

Um die Abflusskapazität eines Gewässers zu bestimmen und um Schutzbauten gegen Hochwasser zu bemessen, wird in der Regel ein Freibord berücksichtigt. In der wasserbaulichen Praxis in der Schweiz haben sich dafür die Empfehlungen der KOHS (2013) etabliert. Das in diesen Empfehlungen definierte erforderliche Freibord berücksichtigt Unschärfen in der Bestimmung der Wasserspiegellage, die Wellenbildung und den Aufstau an Hindernissen sowie den Raum, der benötigt wird, um Treibgut abzuführen. Die Empfehlungen von 2013 wurden für schmale Gewässer mit ebener Sohle entwickelt, welche einen gleichförmigen und flussparallel ausgerichteten Abfluss haben und deren morphologische Dynamik sich auf die Variation der Sohle im Längsprofil beschränkt. In breiten Gewässern, wie sie beispielsweise mit Flussaufweitungen geschaffen werden, treten hydraulische und dynamische morphologische Prozesse auf, welche die Vorhersage des massgeblichen Wasserspiegels erschweren. Einerseits ist die Unschärfe in der Berechnung der mittleren Wasserspiegellage grösser, andererseits ist der Wasserspiegel nicht gleichmässig über den Gerinnequerschnitt verteilt und kann erheblich von einem berechneten, mittleren Wasserspiegel abweichen. Die KOHS hat deshalb den Ansatz zur Berechnung des erforderlichen Freibords von 2013 erweitert, um darin diejenigen Prozesse zu berücksichtigen, welche die Wasserspiegellage in Gerinnen mit dynamischer Morphologie beeinflussen. Die vorliegende Empfehlung wurde von der KOHS am 1. Juni 2026 verabschiedet.

Gegenstand der vorliegenden Empfehlung ist das erforderliche Freibord f_e , das einzuhalten ist, um die zu erwartenden Unschärfen und Unsicherheiten bei der Bestimmung der Abflusskapazität zu berücksichtigen. Sind in einem Hochwasserschutzkonzept noch andere Erfordernisse von Bedeutung, so liegt es im Ermessen der Bauherrschaft oder der Planenden, ein anderes Freibord anzusetzen, welches aber in der Regel f_e nicht unterschreiten sollte.

2 Ein Blick zurück – Die Freibordempfehlung von 2013

Die KOHS hat im Jahr 2013 Empfehlungen für die Ermittlung des Freibords bei Hochwasserschutzprojekten und bei der Gefahrenbeurteilung publiziert (KOHS 2013). Diese wird in der Praxis weit angewandt. Das Freibord bezeichnet den senkrechten Abstand zwischen dem Wasserspiegel und der Oberkante des Ufers oder eines Wasserbauwerks, wie z.B. eines Längsdammes (Bild 1) oder der Unterkante einer Brücke. Das erforderliche Freibord f_e bezeichnet das Freibord, welches eingehalten werden muss, damit eine rechnerisch bestimmte Abflusskapazität des Gerinnes gewährleistet ist.

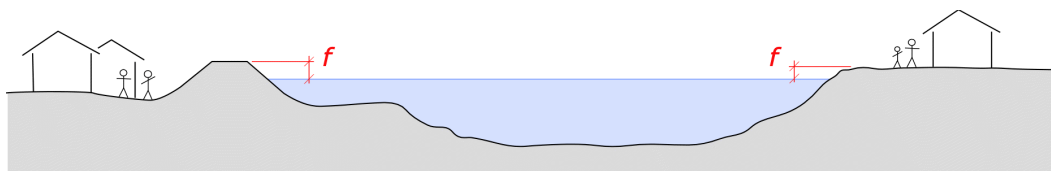


Bild 1: Das Freibord als Abstand zwischen dem Wasserspiegel und der Oberkante des Ufers.

Das erforderliche Freibord f_e setzt sich aus mehreren Teilfreiborden zusammen. Diese berücksichtigen einerseits Unschärfen, die bei der Berechnung einer Wasserspiegellage auftreten aufgrund von Unschärfen in der Prognose der Sohlenlage und von Unschärfen in der Berechnung der Abflusstiefe, und andererseits hydraulische Prozesse wie die Wellenbildung, den Rückstau an Hindernissen oder den Platz, welcher unter Brücken für das Abführen von Treibgut benötigt wird. Das erforderliche Freibord wird auf eine beste Schätzung des Wasserspiegels bei Hochwasser angewandt.

Im erforderlichen Freibord werden Unsicherheiten in hydrologischen Szenarien (Abfluss, Geschiebeeintrag), Unsicherheiten in der Bemessung (statisch, geotechnisch) von Schutzbauten sowie das Schadenpotenzial oder Schutzziel entlang des Gewässers **nicht** berücksichtigt.

Das erforderliche Freibord wird rechnerisch gemäss Formel (1) ermittelt:

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

darin bezeichnen.

f_e = erforderliches Freibord

f_{min} = minimal erforderliches Freibord, $f_{min} = 0.3 \text{ m}$

f_{max} = maximal erforderliches Freibord, $f_{max} = 1.5 \text{ m}$

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. Für die Berechnung und Anwendung der Teilfreiborde f_w , f_v , und f_t sei auf die Empfehlung von 2013 verwiesen.

3 Ein Blick über die Grenzen – Andere Ansätze zur Bestimmung des Freibords

Im Ausland gibt es unterschiedliche Philosophien, wie das Freibord ermittelt wird (KOHS 2010 & KOHS 2013). Es werden entweder probabilistische Ansätze verwendet oder das Freibord wird in Abhängigkeit von Prozessen berechnet. In einzelnen Ländern wird das Freibord auch in Abhängigkeit der Schutzzielgrösse festgelegt oder es wird ein Mindest-Freibord definiert.

Framji (1983) erstellte einen Überblick über angewandte deterministische Freibordwerte für Längsdämme weltweit; diese variierten damals zwischen 0.5 m (z. B. Donau in Ungarn) und 2.0 m (z. B. einige Flüsse in China und Japan).

Internationale Praktiken zur Bestimmung des Freibords stützen sich im Allgemeinen auf empirische oder konstruktive Bemessungsregeln, die sich vereinzelt vom Schweizer Ansatz unterscheiden. In den Vereinigten Staaten definieren die Richtlinien des USACE und der FEMA das Freibord als Sicherheitszuschlag, der eine feste empirische Marge (typischerweise 0.3 bis 1.0 m) kombiniert mit dem Beitrag der lokalen Geschwindigkeitshöhe $v^2/2g$, der Rückstau, Wellen- und Turbulenzeffekte repräsentiert (USACE, 2016). Bei urbanen Hochwasserschutzprojekten wendet das USACE zudem das Konzept der *Levee superiority* (Deichüberlegenheit) an, wonach die Höhen der Längsdämme entlang des Flussabschnitts variiert werden, sodass ein Überlaufen bei Extremhochwasser vorzugsweise an Stellen auftritt, an denen die Folgen minimal sind (USACE, 1992). Diese Ansätze priorisieren strukturelle Robustheit und vereinfachte Sicherheitsmargen gegenüber einer expliziten Quantifizierung hydraulischer oder morphodynamischer Unsicherheiten.

In DVA (2011) und Vorgänger DVWK (1986) wird ein progressives Anwachsen des Freibords mit der Höhe des Längsdammes empfohlen.

In der wissenschaftlichen Literatur heben mehrere probabilistische Studien die Grenzen fester Freibordwerte hervor. Probabilistische Methoden gewinnen seit mehreren Jahrzehnten an Bedeutung, da das Auftreten von Hochwassern und die damit verbundene Belastung, z. B. die zu erwartenden Wasserstände an Längsdämmen, durch grosse Unsicherheiten gekennzeichnet sind. In den Niederlanden werden diese Unsicherheiten seit Beginn der 1990er Jahre bei der Analyse von Hochwasserschutzmassnahmen systematisch berücksichtigt (Steenbergen et al., 2004). Darüber hinaus fügen Möllmann (2009) sowie Möllmann et al. (2009) hier die geotechnischen Unsicherheiten hinzu, da diese aufgrund der Heterogenität des Dammkörpers und des Untergrunds für die Beschreibung der Dammkonstruktion relevant werden und die Belastung mit der Versagenswahrscheinlichkeit eines Längsdammes in Verbindung bringen.

4 Prozesse in Gewässern mit dynamischer Morphologie

4.1 Übersicht

In Gerinnen mit einer dynamischen Morphologie können die folgenden Prozesse einen Einfluss auf die Sohlenlage und den Wasserspiegel bei Hochwasser haben, welche in Gerinnen mit ebener Sohle nicht oder weniger bedeutend sind.

- a) Die Vegetation kann sich örtlich und zeitlich unterschiedlich entwickeln, womit der durchflossene Gerinnequerschnitt entlang der Fließstrecke variiert.
- b) Schwemmholtz kann sich an mit Gehölzen bewachsenen Inseln ansammeln und den Abflussquerschnitt zusätzlich reduzieren.
- c) Die Variation des Gerinnequerschnitts führt zu einer Variation der Sohlenlage und des Wasserspiegels sowohl in Fließrichtung als auch quer dazu.
- d) In lokalen Einschnürungen entstehen Kolke, in lokalen Verbreiterungen Ablagerungen. In Gerinnen mit Bänken kann deshalb eine über die Flussbettbreite gemittelte Sohlenlage örtlich und zeitlich von einem Mittelwert abweichen.
- e) Die Fließgeschwindigkeit ist ungleichmässig über den Querschnitt verteilt. Es können Zonen mit konzentriertem Abfluss auftreten und Zonen mit verzögertem Abfluss. Die Abschätzung der dadurch erzeugten zusätzlichen hydraulischen Energieverluste ist mit einer grösseren Unsicherheit verbunden als bei einem gleichförmigen Abfluss.
- f) Sekundärströmungen in Gerinnen mit Bänken führen zu Energieverlusten. Diese können grösser sein als in Gerinnen mit ebener Sohle.
- g) Ist ein Nebengerinne durch hohe Geschiebebänke oder sehr dichte Vegetation hydraulisch vom Hauptgerinne entkoppelt, gleicht sich der Wasserspiegel im Nebengerinne nicht mehr mit demjenigen im Hauptgerinne ab. Der Hochwasserspiegel kann in Ufernähe lokal höher oder tiefer liegen als im übrigen Gerinnequerschnitt.

Wegen der genannten Prozesse ist die Prognose der Wasserspiegellage als Summe von Sohlenlage und Fliesstiefe in Gerinnen mit Bänken generell mit grösseren *Unsicherheiten* behaftet als in Gerinnen mit einer ebenen Sohle.

Bestehende Ansätze zur Berechnung der Geschiebetransportkapazität und der Abflusskapazität in Gerinnen mit Bänken wurden unter Gleichgewichtsbedingungen und für die unter Gleichgewichtsbedingungen vorherrschende Gerinneform entwickelt. Deshalb können die in Gerinnen mit einer dynamischen Morphologie auftretenden hydraulischen und geschiebetechnischen Prozesse mit den bei der Projektierung häufig angewandten Modellen zum Teil nur ungenügend abgebildet werden. Häufig fehlen Referenzzustände, um eine Abflussrechnung daran zu kalibrieren. Die Unschärfe in einer prognostizierten Hochwasserspiegellage ist deshalb in einem morphologisch dynamischen Gerinne mit Bänken und insbesondere in grossen Flussaufweitungen grösser als in einem schmalen Gerinne.

4.2 Zeitliche und örtliche Variabilität der Vegetation

Ist ein Flussbett breiter als die vom Gewässer dauernd offen und gehölzfrei gehaltene, dynamische Breite, entwickeln sich an den Rändern oder in der Mitte des Flussbetts mit der Zeit Gehölze, welche den Abfluss behindern. Ihre Ausdehnung und somit die Breite des offenen Abflussquerschnitts sind örtlich und zeitlich variabel, wie das Beispiel eines natürlichen Gewässers in Bild 2 zeigt.

Die örtliche Variabilität der Gehölzvegetation wird mit dem in Kapitel 6.1 vorgestellten Berechnungsansatz abgedeckt, nicht aber die Unsicherheit in der Prognose der zeitlich und örtlich gemittelten Breite des offen bleibenden Abflussquerschnitts (Regimebreite).

Diese ist mit einer geeigneten, gegebenenfalls auf ein Unterhaltskonzept abgestützte Wahl der Bemessungsszenarien zu berücksichtigen (Kapitel 5.1).

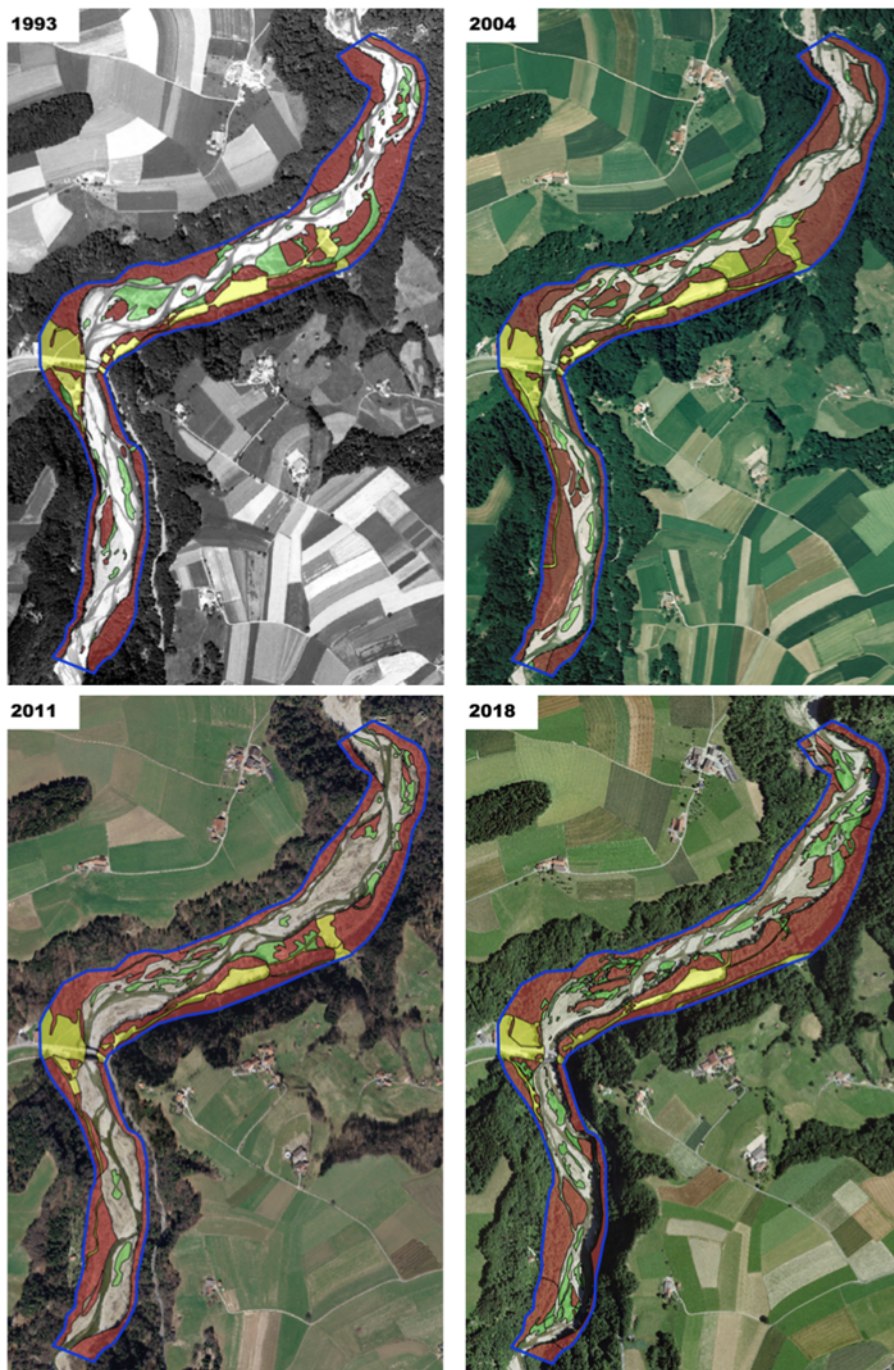


Bild 2: Bodenbedeckung in der Sense bei Sodbach: rot: entwickelte Vegetation (Gehölze), hellgrün: Pioniervegetation, transparent: Kies und Wasser, gelb: durch Uferverbauung gesicherte und anthropogen genutzte Fläche (Flussbau AG, 2021).

4.3 Umlagerung von Geschiebe und Bankbildung

Zarn (1997) beschreibt, wie die Sohlenlage in einem verzweigten Gerinne trotz konstanter Geschiebezufuhr und trotz eines über längere Zeit gemittelten Gleichgewichtszustandes zeitlichen Schwankungen unterworfen ist. Sie weicht damit von einer gemittelten Sohlenlage (rote Linie in Bild 3) ab. Die Variation der Sohlenlage wirkt sich auf die Variation des Wasserspiegels um eine (prognostizierte) mittlere Lage aus.

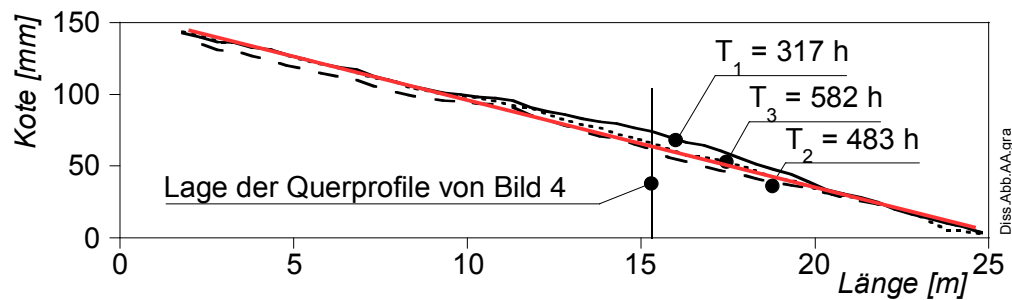


Bild 3: Veränderungen im Längenprofil der mittleren Sohle während eines Versuchs nach dem Erreichen eines Gleichgewichtszustandes (modifiziert nach Zarn, 1997).

Bild 4 zeigt an einem Querprofil die Variation der Teilgerinne während des Versuchs. Zum Zeitpunkt T_1 haben sich 4 Teilgerinne gebildet, zum Zeitpunkt T_2 hat sich ein ausgeprägtes Hauptgerinne mit einem kleinen Nebengerinne gebildet. Zum Zeitpunkt T_3 hat sich das Hauptgerinne vom Zeitpunkt T_2 geteilt. Die Bildung von Teilgerinnen wirkt sich auf die Transportkapazität aus. Das Querprofil weist zum Zeitpunkt eine deutlich höhere Transportkapazität auf als zu den Zeitpunkten T_1 und T_3 . Zarn (1997) folgert, dass in einem Gewässer mit Bänken im Gleichgewicht die Querprofilgeometrie ständig ändert und deshalb weder die Transportkapazität konstant noch das Längenprofil nicht stabil sind, sondern um Mittelwerte schwanken.

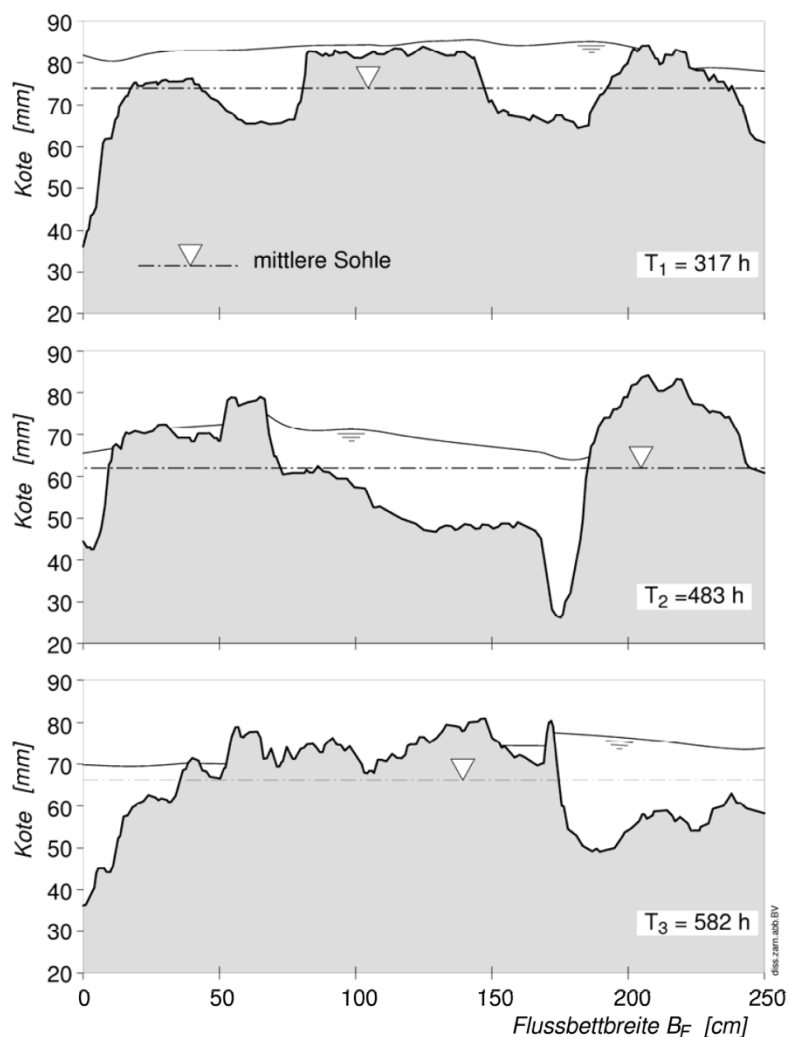


Bild 4: Drei Querprofile bei derselben X-Koordinate beim gleichen Modellversuch zu drei verschiedenen Zeitpunkten wie in Bild 3 (Zarn, 1997).

4.4 Hydraulik der komplexeren Strömungsverhältnisse

In breiteren Gerinnen mit Bänken und Gehölzvegetation entsteht eine komplexere Strömung als in einem Gerinne mit ebener Sohle. Die mit Bänken strukturierte Sohle, die Gehölzvegetation mit variabler Breite und zufällige ungeordnete Schwemmholtansammlungen verursachen eine zusätzliche Formrauheit, welche neben den herkömmlichen Kornreibungsverlusten mitberücksichtigt werden muss. Schwankungen des Geschwindigkeitsgradienten sowohl in Längs- als auch in Querrichtung führen zu zusätzlichen Energieverlusten. Zudem reduziert die längere, gewundene Linienführung das massgebliche Sohlgefälle. Die Prognose der Hochwasserspiegellagen ist daher anspruchsvoller und mit grösseren Unsicherheiten verbunden. Diese Prognoseunschärfe ist je nach dem verwendeten hydraulischen Modell, und je nach der Güte seiner Eichung an vergleichbaren Gerinneabschnitten und Hochwasserereignissen, unterschiedlich zu bewerten.

5 Abgrenzung zwischen Szenarien und Freibord

5.1 Unsicherheiten und Unschärfen

Das Freibord ist eine hydraulische Grösse und wird für die Bemessung des Gerinnequerschnitts verwendet. Es wird zum berechneten Wasserspiegel bei einem Bemessungsszenario Q_{Dim} addiert. Q_{Dim} wird im Rahmen der Projektierung auf der Basis von Kosten-Nutzen-Überlegungen festgelegt. Um genau zu verstehen, was im Freibord enthalten ist und was nicht, müssen die folgenden Punkte unterschieden werden.

Unsicherheiten sind unbekannte Variationen an einer Eingangsgrösse. So enthält zum Beispiel die Schätzung eines Hochwasserereignisses HQ_{100} zu $150 \text{ m}^3/\text{s}$ hydrologische Unsicherheiten, welche mit einer statistischen Variation geschätzt werden können und mit einem Vertrauensintervall und einer Unsicherheit von z. B. $\pm 10 \text{ m}^3/\text{s}$ beschrieben werden können.

Unschärfen hingegen sind Variationen am Ergebnis einer hydraulischen Berechnung, welche für einen hydrologischen Wert durchgeführt wird, der als genau betrachtet wird. Die Variationen ergeben sich aus dem gewählten Berechnungsmodell und der Unsicherheit der hydraulischen Eingabeparameter. Beispielsweise ist das Ergebnis der Berechnung der Abflusstiefe für einen Abfluss von $Q = 150 \text{ m}^3/\text{s}$ unscharf, weil die der Berechnung zugrunde liegende Schätzung der Rauheiten mit Unsicherheiten verbunden sind. In diesem Beispiel wird der Abfluss von $150 \text{ m}^3/\text{s}$ nicht als unsicher betrachtet sondern als feste Eingangsgrösse.

Hydrologische Unsicherheiten werden durch das Schutzkonzept und insbesondere durch den Umgang mit Restrisiken bewältigt. Die hydraulischen Unschärfen werden durch das Freibord abgedeckt. Das Freibord ist also ein Sicherheitsfaktor im Sinne der SIA-Tragwerksnorm.

Natürlich können in der Praxis gelegentlich innerhalb des rechnerisch ermittelten Freibords Abflussmengen grösser als Q_{Dim} abgeleitet werden. Das Freibord kann konzeptionell aber nicht als Sicherheitsreserve für höhere Abflüsse angesehen werden, weil keine Garantie dafür besteht, dass das Freibord verfügbar ist. In diesem Sinne liefert eine bordvolle Abflussberechnung, welche die erforderliche Reserve ausser Acht lässt, keinen verlässlichen Wert für die Bemessung eines Abflussquerschnitts.

Die Situation ist vergleichbar mit der statischen Bemessung eines Gebäudes. Der Sicherheitsbeiwert erlaubt es, Unschärfen in der Berechnung abzudecken und die Tragfähigkeit für den Lastfall sicherzustellen. Eine Bodenplatte, die für eine Belastung von 200 kg/m^2 ausgelegt ist, kann punktuell möglicherweise auch einer höheren Belastung standhalten, ist jedoch nicht dafür ausgelegt und ihre Tragfähigkeit kann nicht garantiert werden.

5.2 Phänomene, Ereignisabläufe und Szenarien

- *Phänomene* beschreiben natürliche Prozesse in einem Gewässer und seinem Einzugsgebiet.
- *Ereignisabläufe* beschreiben eine mögliche Abfolge von natürlichen Prozessen in einem Gewässer und seinem Einzugsgebiet. Sie werden aufgrund von vergangenen Beobachtungen oder der Analyse von möglichen Entwicklungen identifiziert. Ihnen wird eine Überschreitungswahrscheinlichkeit zugeordnet.
- *Szenarien* sind Kombinationen von Ereignisabläufen mit einer bestimmten Überschreitungswahrscheinlichkeit. Diese Szenarien bilden die Grundlage für eine Gefahrenbeurteilung und die Erarbeitung von Gefahrenkarten.

Das gleiche Prinzip wird bei der Festlegung der Szenarien für die Bemessung von Schutzbauten angewandt. Aus den verschiedenen Szenarien (a...z) wird ein Szenario x (oder eine Szenarienfamilie) als Bemessungsszenario und ein anderes Szenario (y) zur Überprüfung der Überlast ausgewählt. Es ist wichtig, die nicht berücksichtigten Szenarien (z) klar zu definieren (siehe Bild 5).

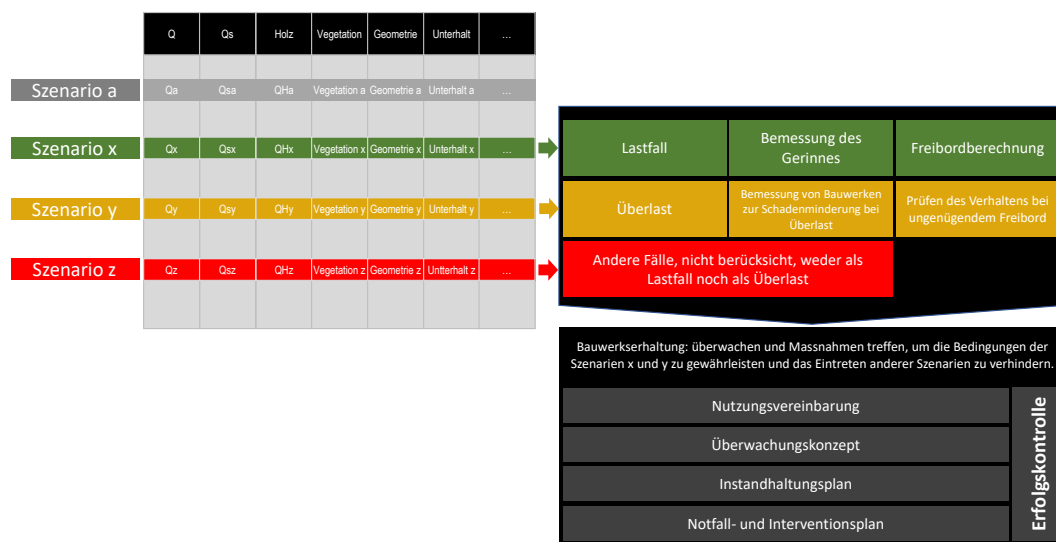


Bild 5: Szenarien und ihre Bedeutung für die Berechnung des Freibords.

5.3 Bemessungsszenario x

Die Bemessung eines Gerinnes und damit die Berechnung des erforderlichen Freibords stützt sich auf ein Referenzszenario (Bemessungsszenario x) welches folgende Elemente umfassen kann:

- Abfluss Q_{Dim}
- Sedimentfracht Q_{S_Dim}
- Schwemmholtfracht Q_{H_Dim} (Volumen und Abmessungen)
- Referenzgeometrie (mittlerer Gerinnequerschnitt, Längsgefälle, Höhe von Längsdämmen)
- Referenzvegetation (Ausdehnung und Durchlässigkeit bzw. Rauheit der entwickelten Vegetation)
- Unterhalt (Überwachung und Konzept zum Unterhalt der Vegetation und/oder des Geschiebes)

Es ist zu beachten, dass es sich dabei nicht nur um ein einzelnes, sondern um eine Gruppe von Bemessungsszenarien mit ähnlichen Werten handeln kann, die unterschiedliche Ereignisabläufe abdecken. Das Ziel besteht nicht darin, die Bemessungsszenarien einzuschränken, sondern sie anhand der Beschreibung des Referenzszenarios klar und transparent zu identifizieren.

Im Sinne der Tragwerksnorm (SIA) entsprechen die Bemessungsszenarien den in der Nutzungsvereinbarung des Bauwerks vereinbarten Lastfällen und das erforderliche Freibord dem Sicherheitsfaktor in Bezug auf diese. Das erforderliche Freibord wird daher nicht nur für einen Bemessungsabfluss (Q_{Dim}), sondern für ein Bemessungsszenario x, das die Bedingungen und den Lastfall des Bauwerks insgesamt definiert, berechnet.

Es wird vorgeschlagen, die für die Dimensionierung eines Bauwerks und die Prüfung des Verhaltens bei Überlast massgebenden Szenarien in einer Nutzungsvereinbarung zwischen Bauherrschaft und Planer festzulegen.

5.4 Überprüfungsszenario y und Verhalten bei Überlast

Das erforderliche Freibord wird für das Bemessungsszenario x und dem dazugehörigen Bemessungsabfluss Q_{Dim} bestimmt. Im Rahmen der Projektierung muss aufgezeigt werden, welche Konsequenzen sich ergeben, wenn beim Überprüfungsszenario y oder den Überprüfungsszenarien $y_{1...n}$ das erforderliche Freibord nicht mehr eingehalten wird. Kann mangels Freibord die Abflusskapazität nicht gewährleistet werden, z.B. weil mehr Wasser abfließt, mehr Geschiebe herangeführt wird oder sich die Vegetation stärker entwickelt hat, muss das Überströmen eines Ufers, ein Dammbruch oder die Verklausung eines Brückenquerschnitts angenommen werden, wie das in KOHS (2013) ausführlich beschrieben ist.

Wird einem Schutzkonzept mit dem Bemessungsszenario x eine ausreichende Abflusskapazität für den Abfluss Q_{Dim} angestrebt und beim Überprüfungsszenario y beispielsweise eine gezielte Entlastung nach rechts geplant, um hohe Sachwerte linksufrig zu schützen, ändert sich die Anwendung der Freibordkriterien. Für die Begrenzung des Gerinnes wird das erforderliche Freibord immer mit dem Bemessungsszenario und dem Abfluss Q_{Dim} bestimmt. Für die linke Begrenzung wird ab der Entlastung der Abfluss Q_y abzüglich der entlasteten Wassermenge ΔQ zum Bemessungsabfluss. Das erforderliche Freibord für den linken Damm muss also für einen Abfluss

$$Q_{Dim_links} = Q_y - \Delta Q \quad (2)$$

bestimmt werden (Bild 6). Schliesslich muss im Rahmen des Konzepts zum Umgang mit dem Szenario y aufgezeigt werden, welche Konsequenzen der Abfluss $Q_y > Q_{Dim}$ oberstrom der Entlastungsstelle hat.

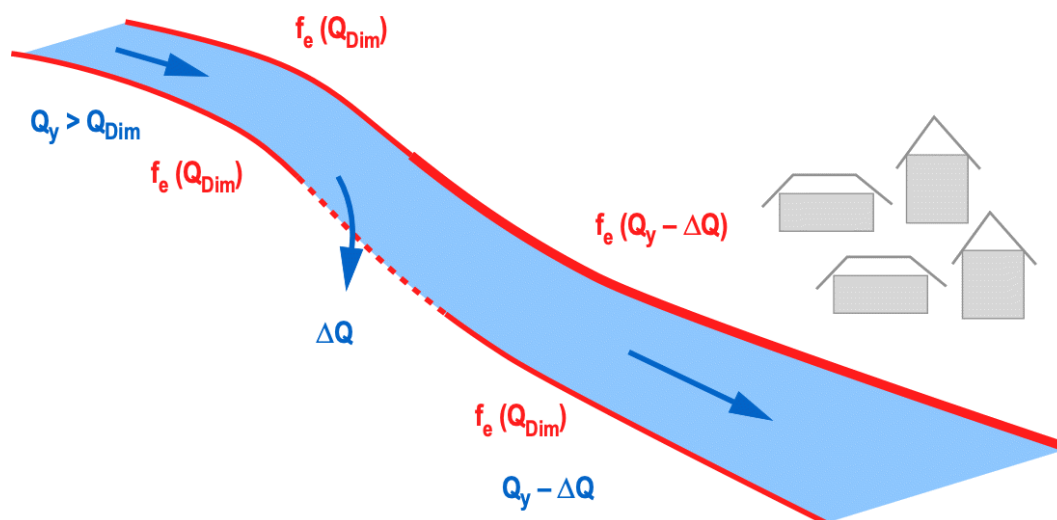


Bild 6: Freibordbedingung auf einen Flussabschnitt mit gezielter Entlastung ΔQ , welche für das Szenario y vorgesehen wird. Das erforderliche Freibord wird links und rechts für unterschiedliche Abflüsse bestimmt.

5.5 Szenario z – nicht berücksichtigt

Das Szenario z beschreibt Situationen, die als zu selten gelten oder deren Auswirkungen auf die Raumplanung unverhältnismäßig groß sind, um als Auslegungs- oder Nachprüfszenario herangezogen zu werden. Dies kann zum Beispiel ein Szenario mit dem höchstmöglichen Abfluss PMF sein oder ein Szenario, bei welchem der Pflege der Vegetation vollständig vernachlässigt wird. In jedem Fall muss ein solches Szenario ausdrücklich erläutert und aus der Nutzungsvereinbarung ausgeschlossen werden.

5.6 Aufgaben von Planer/in und Bauherrschaft

Im Rahmen der Projektplanung soll ein Bezugsrahmen für die Berechnung des erforderlichen Freibords aufgespannt werden. Darin haben Planer/in und die Bauherrschaft unterschiedliche Aufgaben:

Der Planer / die Planerin

- definiert das Bemessungsszenario und bezieht alles ein, was relevant und angemessen erscheint,
- erstellt auf dieser Grundlage eine Nutzungsvereinbarung,
- bemisst das Projekt und berechnet auf dieser Grundlage das erforderliche Freibord,
- ermittelt, was kontrolliert und beherrscht werden muss, um die Sicherheit des Bauwerks und damit die Übereinstimmung mit dem Bemessungsszenario zu gewährleisten, indem Folgendes festgelegt wird:
 - das Überwachungskonzept, das die zu prüfenden Elemente und die Schwellenwerte definiert, ab denen eine Instandhaltung erforderlich ist;
 - der Instandhaltungsplan, der die Einhaltung der grundlegenden Parameter des Bemessungsszenarios gewährleistet;
 - der Notfallplan für die Intervention am Bauwerk während Ereignissen.

Die Bauherrschaft genehmigt

- die Nutzungsvereinbarung
- das Überwachungskonzept
- den Instandhaltungsplan
- den Notfall- und Interventionsplan für das Bauwerk

Diese vier Elemente sind Bestandteil der Erhaltung des Bauwerks im Sinne der SIA 469. Sie dienen auch der Erfolgskontrolle des Wasserbauvorhabens.

5.7 Folgerung: Tragweite des Freibords

Aus den obigen Ausführungen lässt sich zusammenfassen, dass das erforderliche Freibord

- die Unschärfe in der Wasserspiegelberechnung für das Bemessungsszenario,
- die Variabilität von Wasserspiegel und Energielinie im Fließquerschnitt,
- die physikalischen Prozesse wie Wellenbildung und Rückstau an Hindernissen und
- den für Treibgut benötigten Platz

berücksichtigt (s. Kap.2). Das Freibord dient aber nicht dazu,

- hydrologische Unsicherheiten,
- Veränderungen des Abflusses durch den Klimawandel,

- Szenarien zu Abfluss, Sedimentfracht, Schwemmholtzfracht, Gerinnegeometrie und Bewuchs, die nicht durch das Bemessungsszenario abgedeckt sind oder
- die Veränderung des Bauwerks und die Entwicklung der Vegetation ausserhalb der in der Nutzungsvereinbarung festgelegten Zustände

abzudecken.

6 Das Freibord in Gerinnen mit Bänken

6.1 Die Variabilität von Wasserspiegel und Energielinie

Untersuchte Gewässer

Um die Variabilität von Wasserspiegel und Energielinie zu bestimmen, wurden einerseits Wasserspiegelmessungen in hydraulischen Modellversuchen von Zarn (1997) und Marti (2006) ausgewertet und andererseits Wasserspiegellagen und Fliessgeschwindigkeiten ausgewertet, welche mit Hilfe einer hydrodynamischen 2d-Simulation in natürlichen, verzweigten Gewässern bestimmt wurden. Bei den Modellversuchen wurden Gleichgewichtszustände erfasst, bei denen die Morphologie des Gerinnes durch den beobachteten Abfluss gebildet worden ist. Bei den 2d-Simulationen wurden verschiedene Abflüsse auf einer eingefrorenen Sohle simuliert, welche das Ergebnis der vorangehenden Hochwassergeschichte ist. Mögliche Sohlenveränderungen während eines grossen Hochwassers wurden nicht abgebildet. Es wurde also nicht berücksichtigt, dass sich die Sohle beim Durchgang einer Hochwasserwelle tendenziell auebnen würde. Die Variabilität des Wasserspiegels und der Energielinie wird damit eventuell etwas überschätzt.

Die Simulationen und Auswertungen von Modellversuchen wurden im Rahmen der Erarbeitung dieser Empfehlung durch Dritte durchgeführt (Collin & Ruegg, 2022; Erdem, 2023; Jouhari, 2023; Fahrenberg, 2024; Flussbau AG, 2024). Tabelle 1 und Tabelle 2 geben eine Übersicht über die ausgewerteten Modellversuche und die untersuchten Gewässerabschnitte.

Tabelle 1: Übersicht über die von Fahrenberg (2024) ausgewerteten hydraulischen Modellversuche von Zarn (1997) und Marti (2006) und die daraus abgeleiteten Ergebnisse.

Eingabegrössen				Ergebnisse					
Versuchsnummer	Gerinnebreite [mm]	d_m Sohle [mm]	Gefälle [%]	Abfluss [l/s]	h [mm]	Y [-]	Z [-]	W [-]	ω_{ZW} [mm]
Versuche Zarn (1997)									
75.2	750	1.16	0.50	1.56	17.0	44.0	15.0	17.5	1.87
75.4	750	1.16	0.97	3.97	10.7	70.0	9.0	33.2	2.52
75.6	750	1.16	0.43	4.03	24.5	31.0	21.0	11.0	2.30
140.1	1400	1.16	1.08	4.02	8.6	163.0	7.0	84.1	3.32
140.3	1400	1.16	0.58	1.68	12.9	109.0	10.0	49.8	2.57
140.4	1400	1.16	0.52	4.03	16.7	84.0	14.0	34.2	2.82
250.2	2500	1.16	0.65	1.59	10.9	230.0	9.0	109.0	3.04
250.6	2500	1.16	0.62	4.10	16.0	156.0	14.0	63.6	3.91
Versuche Marti (2006)									
1-3	3000	3.90	1.75	26.2	23.1	129.9	5.9	70.9	11.50
2-1	3000	3.90	1.40	29.8	27.3	109.9	7.0	56.7	11.41
3-1	3000	3.90	2.12	15.7	18.3	163.9	4.7	96.9	11.51
4-1	3000	3.90	2.43	12.7	15.6	192.3	4.0	120.0	13.10

Tabelle 2: Übersicht über die Gewässerabschnitte mit hydrodynamischer Simulation und die daraus abgeleiteten Ergebnisse.

	Eingabegrößen				Ergebnisse							
	Quelle Sohlen- topographie	mittlere Breite [m]	d_m Sohle [cm]	Gefälle [%]	Q [m ³ /s]	h [m]	h_e [m]	Y [-]	Z [-]	W [-]	ω_{zw} [m]	ω_{ze} [m]
Sense Sodbach (1) (Flussbau AG, 2024)	SwissAlti3d	71	7.0	1.05	100	0.63	0.85	112	9.0	53.1	0.18	0.21
					275	1.37	1.78				0.37	0.37
Sense Sodbach (2) (Flussbau AG, 2024)	SwissAlti3d	95	7.0	1.04	100	0.58	0.75	164	8.3	79.8	0.22	0.30
					275	1.13	1.50				0.22	0.45
Sense Plaffeien (Collin & Ruegg, 2022)	SwissAlti3d	113	7.0	1.91	124	0.63	0.83	178	9.1	84.3	0.49	0.52
					331	1.20	1.59				0.58	0.60
Allondon (Collin & Ruegg, 2022)	SwissAlti3d, 2013	32	2.1	0.86	43	1.03	1.16	31	49.2	8.2	0.31	0.24
					175	2.83	3.01				1.09	1.24
Hinterrhein Rhäzuns (Erdem, 2023)	DTM 2m, 2008	184	6.2	0.47	385	1.18	1.41	157	19.0	57.7	0.29	0.26
					545	2.14	2.50				0.38	0.19
Gérine (Jouhari, 2023)	Morphodyna- misch simulierte Topographie	60	9.5	1.49	64	0.51	0.73	117	5.4	70.7	0.24	0.32
					152	0.69	1.05				0.24	0.46

Gerinneformen in den untersuchten Gewässer

Die Gerinneform von Flüssen ändert mit ihrer Breite und ihrer Abflusstiefe. Je breiter ein Gewässer im Verhältnis zu seiner Abflusstiefe ist, desto stärker ist es verzweigt. Das Auftreten einer bestimmten Gerinneform kann mit dem Diagramm von Ahmari & da Silva (2011) beschrieben werden. In diesem Diagramm werden in Abhängigkeit der relativen Flussbettbreite Y und der relativen Abflusstiefe Z verschiedene Bereiche bezeichnet, in denen entweder Mäander, alternierende Bänke oder Verzweigungen mit zwei Teilgerinnen oder solche mit mehr als zwei Teilgerinnen vorkommen. Es gilt:

$$Y = \frac{B}{h} ; Z = \frac{h}{d_m} \quad (3)$$

mit B = Flussbettbreite, h = mittlere Abflusstiefe, d_m = mittlerer Korndurchmesser. Als Flussbettbreite wird hier die abflusswirksame Breite bezeichnet. In Gerinnen mit Bänken ist das die Breite, die mit Wasser, Kies oder Pionierv egetation bedeckt ist, nicht aber mit entwickelter Vegetation (vgl. Bild 2).

Alternierende Bänke treten nur in Gerinnen mit festem Rand auf. Schälchli & Hunzinger (2021) haben den Bereich der alternierenden Bänke deshalb unterteilt in einen Bereich mit gewundenen Gerinnen mit Bänken und in einen solchen mit gewundenen Gerinnen mit Bänken und Inseln, wie sie in natürlichen Gewässern auftreten können, deren Breite nicht begrenzt ist.

Die beiden Parameter Y und Z können in der Grösse

$$W = \frac{Y}{Z^{0.34}} \quad (4)$$

zusammengefasst werden. W verläuft senkrecht zu den Trennlinien zwischen

gewundenen und verzweigten Gerinnen¹ und kann als Mass für die Verzweigung verwendet werden.

Die in Tabelle 1 und Tabelle 2 aufgeführten Gewässer können mit ihren Werten von Y und Z im modifizierten Ahmari-daSilva-Diagramm von Bild 7 abgebildet werden. Es wird deutlich, dass mit den Beispielen die Gerinneform der verzweigten Gewässer mit zwei Ausnahmen gut repräsentiert wird. Es werden die Werte für den gerinnebildenden Abfluss dargestellt. Bei den Modellversuchen sind das die Abflüsse des Versuchs, bei den Naturdaten diejenigen, die mit dem Abfluss HQ_2 berechnet wurden. Bei höheren Abflüssen und sonst gleichbleibenden Parametern nehmen die relative Breite Y ab und die relative Abflusstiefe Z zu, der Wert W nimmt ab. Im Ahmari-daSilva-Diagramm verschieben sich die Punkte nach unten rechts in eine Region mit weniger intensiver Verzweigung.

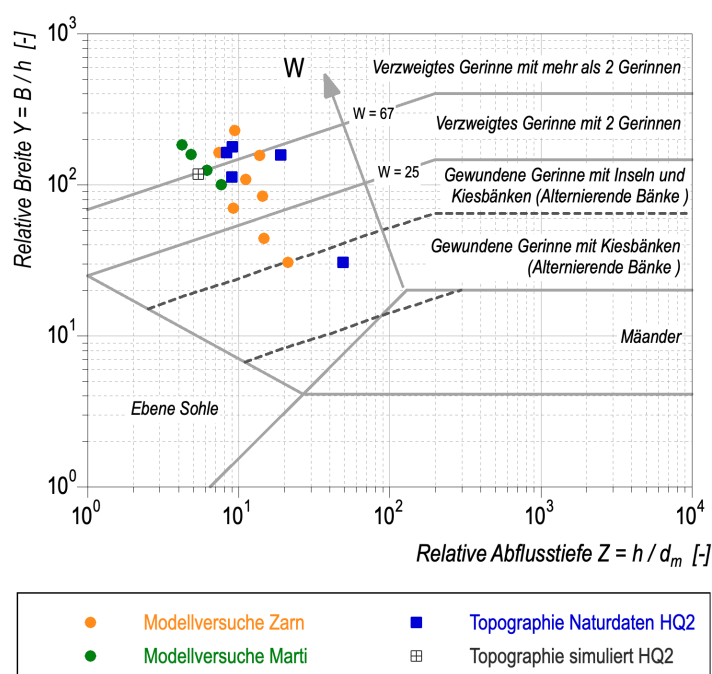


Bild 7: Diagramm von Ahmari & da Silva (2011) modifiziert nach Schälchli & Hunzinger (2021) zum Auftreten von Gerinneformen in Abhängigkeit von Flussbettbreite, Abflusstiefe und Korndurchmesser. Dargestellt sind die Parameterkombination Y, Z für die in der Untersuchung verwendeten Modellversuche von Tabelle 1 und die untersuchten natürlichen Gewässer von Tabelle 2. Von letzteren sind die Werte beim gerinnebildenden Abfluss HQ_2 eingetragen.

Methode der Auswertung

Die Auswertung stützt sich auf folgende Arbeitshypothesen:

- Die in Kapitel 0 beschriebene zeitliche Variabilität der mittleren Sohlenlage um eine mittlere Gleichgewichtssohlenlage ist gleich gross wie ihre örtliche Variabilität.
- Die Variabilität der Sohlenlage wirkt sich unmittelbar auf die Variabilität des Wasserspiegels und der Energielinie aus. Wenn letztere bekannt sind, erübrigt es sich, die Variabilität der Sohlenlage zu bestimmen.

¹ Wenn die Achsen im Ahmari-daSilva-Diagramm gleich skaliert sind.

- Bänke und Teilgerinne führen dazu, dass der Wasserspiegel und die Energiehöhe nicht horizontal über den Querschnitt verteilt sind und dass der mittlere Wasserspiegel und die mittlere Energiehöhe je Querschnitt um je eine Ausgleichsgerade im Längenprofil schwanken.
- Die Ausgleichsgeraden der mittleren Sohle, des mittleren Wasserspiegels und der mittleren Energiehöhe verlaufen parallel.

Die Daten wurden nach dem Schema von Bild 8 ausgewertet: Über einen relativ einheitlichen Abschnitt wurden Querprofile definiert und je Querprofil die mittlere Sohle bestimmt (s. Ziffer 1 in Bild 8). Mit Hilfe einer linearen Regression wurde eine Ausgleichsgerade entlang der Fliesstrecke definiert und dieses als «schiefe Ebene der mittleren Sohle» gedacht (2). Anschliessend wurden alle entlang der Querprofile gemessenen oder berechneten Abflusstiefen h_i gemittelt und eine Ebene im Abstand dieser mittleren Abflusstiefe h zur Ebene der mittleren Sohle gelegt (3)². Diese Ebene bildet den Mittelwert der gemessenen oder berechneten Wasserspiegellage ab. Schliesslich wurde für jeden Messpunkt in den Querprofilen die Differenz des gemessenen bzw. berechneten Wasserspiegels von der Ebene des mittleren Wasserspiegels bestimmt (4). Die Streuung dieser Differenzen wurde mit ihrer Standardabweichung beschrieben und wird als Variabilität ω_{zw} bezeichnet. Um die Ergebnisse von Gewässern unterschiedlicher Grösse miteinander vergleichen zu können, wurde die Variabilität an der mittleren Abflusstiefe h normiert, was letztlich dem Variationskoeffizienten entspricht.

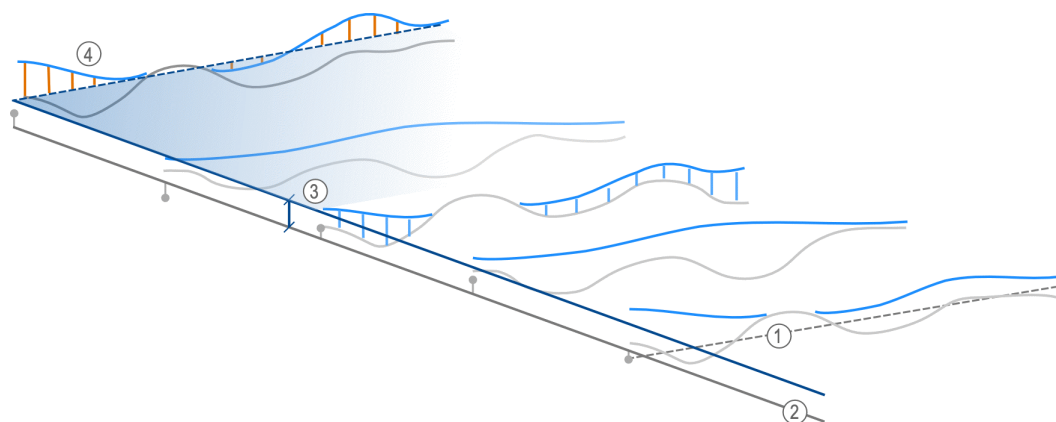


Bild 8: Schema zur Auswertung der Variabilität des Wasserspiegels. Es wird die Abweichung des gemessenen (oder berechneten) Wasserspiegels über eine erwartete Wasserspiegellage bestimmt. Erläuterung zu den Ziffern im Text. Angelehnt an Fahrenberg (2024).

Die normierte Variabilität des Wasserspiegels lässt sich in Funktion von W auftragen. Es zeigt sich, dass die Variabilität mit zunehmender Intensität der Verzweigung zunimmt. Aus den Daten lässt sich eine lineare Beziehung ableiten. Sie wurde im vorliegenden Fall durch den Nullpunkt forciert. Für die Verwendung in der Freibordbetrachtung wird eine Beziehung vorgeschlagen, welche die Mehrheit der Datenpunkte abdeckt, also steiler verläuft als die mit der linearen Regression bestimmte Gerade. Sie lautet

²

Aus den physikalischen Modellversuchen lagen nur Messergebnisse in Querprofilen vor. Um die Daten unterschiedlicher Herkunft möglichst gut miteinander vergleichen zu können, wurden auch aus den 2d-Simulationen Querprofile ausgewertet, obwohl die Abflusstiefe flächenhaft berechnet wurde.

$$\omega_{zw} = h \cdot 0.0075 W \quad (5)$$

Der Gerinneformparameter W wird dabei mit dem gerinnebildenden Abfluss HQ_2 bestimmt.

In Bild 9 fällt auf, dass zwei Punkte mit einem kleinen Gerinneformparameter W deutlich über der Linie von Gleichung 5 liegen. Es handelt sich um Datenpunkte des Allondon. In der Simulation dieses durch die Vegetation stark fragmentierten Gerinnes sind einzelne, schmale Teilgerinne kaum durchflossen und die Wasserspiegellagen liegen darin bis zu 2 m tiefer als im Hauptgerinne des gleichen Querschnitts. Das führt zu einer ausnehmend hohen Variabilität des Wasserspiegels, in diesem Fall aber einer Variabilität «nach unten».

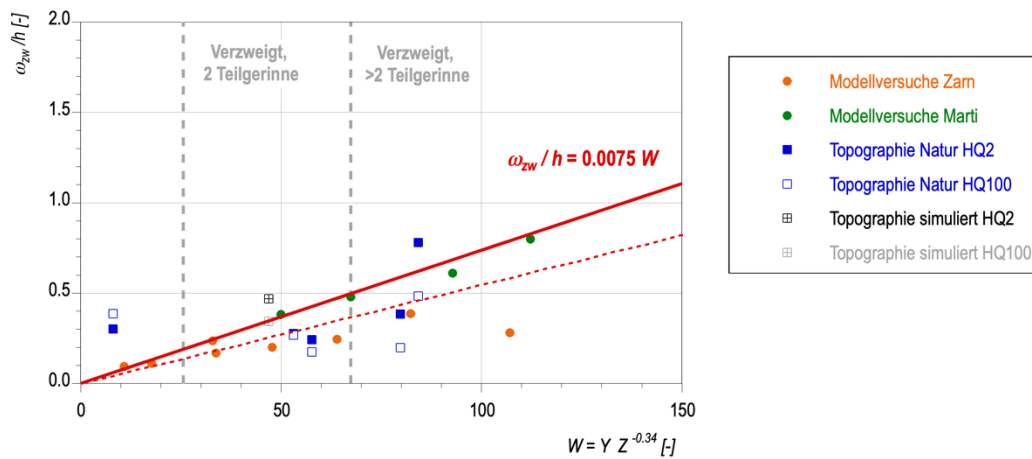


Bild 9: Normierte Variabilität des Wasserspiegels in Funktion des morphologischen Parameters W , der für den gerinnebildenden Abfluss berechnet wurde. Lineare Regression durch den Nullpunkt (gestrichelte Linie) und für die Bemessung vorgeschlagene Beziehung.

Analog dazu wurden die Daten zur Variabilität der Energiehöhe ω_{ze} ausgewertet. Dazu stehen allerdings nur die Daten aus den numerischen Simulationen in den Gewässern der Tabelle 2 zur Verfügung. Die Variabilität der Energiehöhe wurde an der mittleren Energiehöhe h_e normiert um eine Beziehung zwischen Variabilität und dem Gerinneformparameter W herzuleiten (Bild 10). Analog zu Gleichung 3 gilt

$$\omega_{ze} = h_e \cdot 0.006 W \quad (6)$$

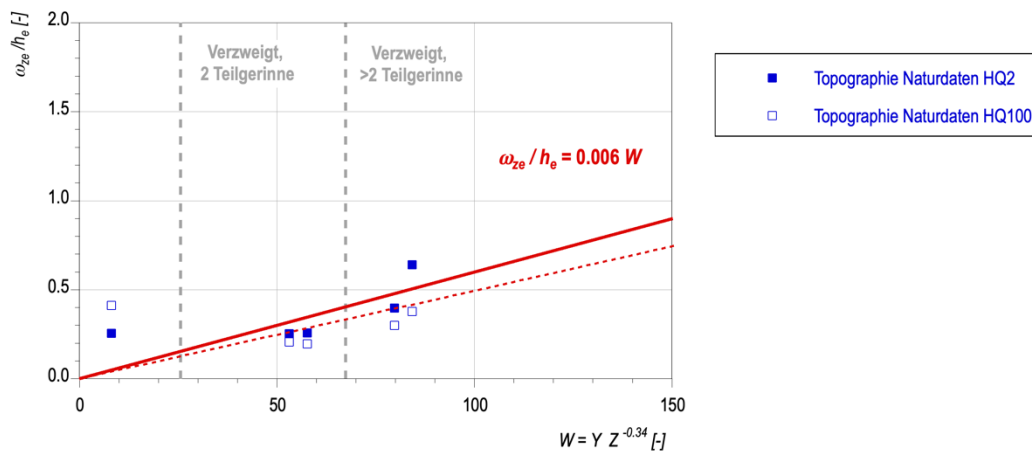


Bild 10: Normierte Variabilität der Energiehöhe in Funktion des morphologischen Parameters W , der für den gerinnebildenden Abfluss berechnet wurde. Lineare Regression durch den Nullpunkt und für die Bemessung vorgeschlagene Beziehung.

6.2 Unschärfe in der Berechnung des Wasserspiegels

Nach KOHS (2013) setzt sich die Unschärfe in der Berechnung des Wasserspiegels σ_w aus den Unschärfen in der Prognose der Sohlenlage σ_{wz} und der Berechnung der Abflusstiefe σ_{wh} zusammen und es gilt:

$$\sigma_w = \sqrt{\sigma_{wz}^2 + \sigma_{wh}^2} \quad (7)$$

Dieser Ansatz wird auch in dieser Empfehlung weiter verfolgt. Für σ_{wz} wurde 2013 ein Wertebereich von 0.1...1.0 m empfohlen. In Gerinnen mit Bänken ist zwar die Prognose der Sohlenlage schwieriger als in einem Gerinne mit ebener Sohle (s. die Ausführungen in Kapitel 0), dafür bildet ein breites Gewässer einen grösseren Sohlenspeicher als ein schmales. Wird ein Ablagerungs- oder Erosionsvolumen falsch eingeschätzt, verteilt sich dieses auf eine grössere Breite und muss deshalb nicht zwingend zu einem grösseren Fehler in der prognostizierten Sohlenlage führen. Aus diesem Grund soll auch in Flüssen mit Bänken ein ähnlicher Wertebereich für σ_{wz} gelten. Allerdings wird eine Untergrenze empfohlen, die mindestens dem Korndurchmesser d_{90} des Sohlenmaterials entspricht.

Wie in Kapitel 4.4 gezeigt, ist die Berechnung der Abflusstiefe in Gerinnen mit Bänken mit grösseren Unsicherheiten behaftet als in solchen mit ebener Sohle, weil nicht alle Rauheiten systematisch erfasst werden können. KOHS (2013) postuliert einen linearen Zusammenhang zwischen Abflusstiefe und Fehler an deren Schätzung. Der Zusammenhang wurde mit einer Fehlerbetrachtung für die Eingangsgrössen der Abflussrechnung hergeleitet. Dabei wurde für den Rauheitsbeiwert als eine der Eingangsgrössen ein mittlerer Fehler von 10% angenommen. Wird der Fehler an der Rauheit auf 20% erhöht, wirkt er sich stärker auf den Fehler an der berechneten Abflusstiefe aus (Bild 11). Für die Unschärfe an der Berechnung der Abflusstiefe gilt dann

$$\sigma_{wh} = 0.06 + 0.10 h \quad (8)$$

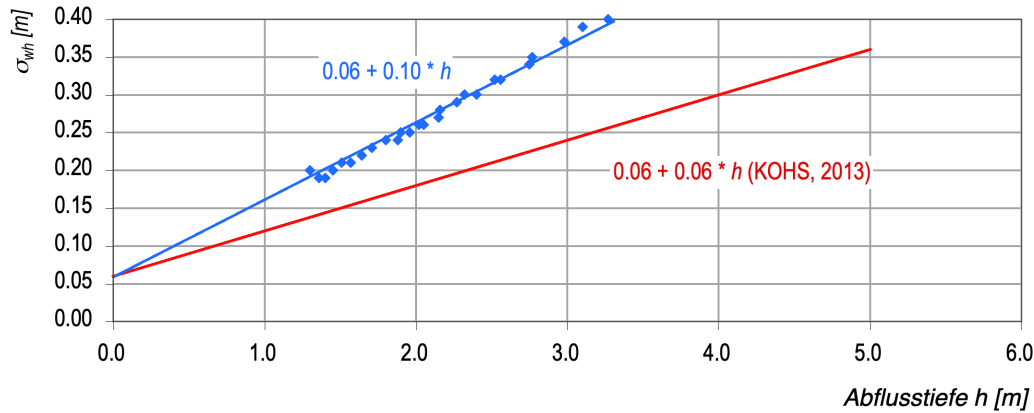


Bild 11: Unschärfe an der Berechnung der Abflusstiefe in Funktion der Abflusstiefe. Rot: Empfehlung KOHS (2013) mit einem mittleren Fehler an Rauheitsparameter von 10%, blau: neue Empfehlung mit einem mittleren Fehler am Rauheitsparameter von 20%. Blaue Punkte: berechneter Fehler für die untersuchten Gewässer in KOHS (2026a).

6.3 Die Berechnung des erforderlichen Freibords

Das erforderliche Freibord wird für Gerinne mit dynamischer Morphologie analog dem erforderlichen Freibord in Gerinnen mit ebener Sohle bestimmt (s. Kapitel 2). Es wird also je nach Begrenzung des Gerinnes ein Teilfreibord für die Unschärfe in der Bestimmung der Wasserspiegellage, ein Teilfreibord zur Berücksichtigung der Wellenbildung und des Rückstaus an Hindernissen und ein Teilfreibord aufgrund von zusätzlich benötigtem Abflussquerschnitt unter Brücken berücksichtigt. Ein zusätzliches Teilfreibord wird für die Variabilität des Wasserspiegels oder die Variabilität der Energiehöhe berücksichtigt. Ausserdem wird die Unschärfe in der Bestimmung der Wasserspiegellage gegenüber einer Berechnung im kanalisierten Gerinne erhöht.

In einem Gerinne mit Bänken, welches in einem Einschnitt fließt oder durch überströmsichere Dämme begrenzt wird, gilt

$$f_{e_Einschnitt} = \sqrt{f_w^2 + f_{w_morph}^2} \quad (9)$$

mit

$$f_w = \sigma_w = \sqrt{\sigma_{wz}^2 + \sigma_{wh}^2} \quad (10)$$

$$\sigma_{wz} = d_{90_Sohlenmaterial} \dots 1.0 \text{ m} \quad (11)$$

$$\sigma_{wh} = 0.06 + 0.10 h \quad (12)$$

und

$$f_{w_morph} = \omega_{zw} = 0.0075 W h \quad (13)$$

In einem Gerinne mit Bänken, welches durch nicht überströmsichere Dämme begrenzt wird oder auf einem Schwemmkegel fließt, gilt

$$f_{e_Damm} = \sqrt{f_w^2 + f_v^2 + f_{v_morph}^2} \quad (14)$$

mit

$$f_v = \frac{v^2}{2g} \quad (15)$$

und

$$f_{v_morph} = \omega_{ze} = 0.006 W h_e \quad (16)$$

Für einen Brückenquerschnitt über einem Gerinne mit Bänken gilt:

$$f_{e_Bruecke} = \sqrt{f_w^2 + f_v^2 + f_t^2 + f_{v_morph}^2} \quad (17)$$

wobei f_t nach der Empfehlung der KOHS (2013) bestimmt wird.

Der Gerinneform-Parameter W wird aus der Abflusstiefe beim gerinnebildenden Abfluss HQ_2 berechnet:

$$W = \frac{Y}{Z^{0.34}} = \frac{B/h_{HQ2}}{(h_{HQ2}/d_m)^{0.34}} \quad (18)$$

Für die Berechnung des Teilfreibords f_v muss die jeweils massgebliche Fließgeschwindigkeit eingesetzt werden. Das ist in der Regel die mittlere Fließgeschwindigkeit. In der Empfehlung von KOHS (2013) werden Ausnahmen von dieser Regel formuliert, welche in Gerinnen mit dynamischer Morphologie wie folgt umgesetzt werden sollen:

- In einem Doppelprofil (Profil mit Vorland, Berme) ist die mittlere Fließgeschwindigkeit auf dem Vorland massgebend, wenn die Breite des Vorlandes mindestens dem Fünffachen der Abflusstiefe auf dem Vorland entspricht und wenn eine morphologische Dynamik und eine Strömungskonzentration auf dem Vorland ausgeschlossen werden können.
- Bei Brücken gilt die mittlere Fließgeschwindigkeit des jeweiligen Teilquerschnitts (Hauptgerinne oder Vorland) als örtliche Geschwindigkeit.

Eine Strömungskonzentration an der Kurvenaussenseite einer Flusskrümmung muss in der Regel nicht gesondert berücksichtigt werden sondern ist im Teilfreibord f_{v_morph} enthalten.

7 Anwendungsbeispiele

7.1 Aufweitungen der Sense und des Alpenrheins

Der oben beschriebene Ansatz zur Berechnung des erforderlichen Freibords in morphologisch dynamischen Gerinnen wurde an mehreren Anwendungsbeispielen getestet und mit der bisherigen Methode von 2013 verglichen. Zwei davon werden in der Folge vorgestellt: die Sense oberhalb von Laupen (Bild 12) und der Alpenrhein im Abschnitt der geplanten Rheinaufweitung Maienfeld/Bad Ragaz (Bild 13).

Sense bei Laupen

Die Sense als stark geschiebeführender Voralpenfluss durchfließt bei Laupen eine flache Talsohle, bevor sie in die Saane einmündet. Rund einen Kilometer vor der Mündung wurden im Rahmen eines Hochwasserschutz- und Revitalisierungsprojektes die Hochwasserschutzdämme zurück versetzt und die bestehende Ufersicherung entfernt. Das Gerinne kann sich über eine Länge von ca. 1 km selbsttätig von 25 m auf maximal 100 m verbreitern.



Bild 12: Sense bei Laupen im Zustand vor der Revitalisierung. Aufnahme vom März 2010.

Rheinaufweitung Maienfeld/Bad Ragaz

Im kanalisierten Flussabschnitt nach der Landquartmündung ist eine rund 3.5 km lange Flussaufweitung geplant, wovon die grössere der beiden Teilaufweitungen eine Verbreiterung des Flussbetts um fast das Zweieinhalbfache auf rund 200 m vorsieht. Die Referenzstrecke für den Endzustand der neuen Aufweitung ist die unmittelbar flussaufwärts anschliessende Flussaue bei Mastrils.

Der Alpenrhein ist ebenfalls von einer starken Geschiebeführung und von grossen Hochwasserabflüssen geprägt, und liegt in einer vergleichbar flachen Talebene. Er hat aber im Vergleich zur Sense deutlich grössere Dimensionen.



Bild 13: Links Projektperimeter der geplanten Rheinaufweitung Maienfeld/Bad Ragaz sowie rechts die unmittelbar flussaufwärts anschliessende Referenzstrecke Mastrils. Die Vegetation Letzterer zeigt sich aktuell in einem stark ausgeräumten Zustand (Bildhintergrund Swissimage von 2025)

7.2 Erforderliches Freibord in Funktion der Breite

Für die Überprüfung der Freibordberechnung wurde die Abflusstiefe in einem rechteckigen Ersatzgerinne nach Zarn (1997) unter Berücksichtigung von Formrauheit und Wandrauheit, sowie unter Anwendung der Annahmen von Tabelle 3 berechnet.

Bild 14 zeigt die erforderlichen Freiborde an der Sense in Abhängigkeit von der abflusswirksamen Breite berechnet nach dem Ansatz von 2013 und nach der aktuellen Empfehlung sowie die neu eingeführten Teilfreiborde für die Variabilität von Wasserspiegel und Energiehöhe.

Die mit der Methode 2013 berechneten Freiborde nehmen mit zunehmender Breite kontinuierlich ab, was den geringeren Fliesstiefen und Fliessgeschwindigkeiten in den aufgeweiteten Gerinnen geschuldet ist.

Unter Annahme gleicher Unschärfen σ_{wz} und σ_{wh} ist das mit der neuen Methode 2026 berechnete Freibord im schmalen Gerinne noch weitgehend identisch mit den Werten, die nach dem Ansatz von 2013 berechnet werden. Mit zunehmender Breite des abflusswirksamen Querschnitts gewinnen die Teilfreiborde f_{w_morph} und f_{v_morph} an Bedeutung. Bei einer Gerinnebreite von 70 m und im Einschnitt ist das neue Teilfreibord f_{w_morph} gleich gross wie f_w . Die beiden Teilfreiborde tragen also gleichermassen zum erforderlichen Freibord f_e bei. Beim nicht überströmsicheren Damm und im Brückenquerschnitt ist der Anteil von f_{v_morph} kleiner, weil für das erforderliche Freibord f_e die Teilfreiborde f_v und f_t in das geometrische Mittel einfließen.

Tabelle 3: Eingangsgrößen für die Berechnung des erforderlichen Freibords in den Beispielen Sense Laupen und Alpenrhein Maienfeld-Bad Ragaz.

Abflusswirksamer Querschnitt	Sense Laupen rechteckförmiges Ersatzgerinne	Alpenrhein Maienfeld / Bad Ragaz
Breite	25...100 m	Heutige Breite: 80-90 m Aufgeweitete Breite: ca. 200 m Regimebreite ³ : 150 m
Rauheiten	Ufer $k_{str} = 20 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ Sohle $k_{str} = 27 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$	Ufer $k_{str} = 20 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ Sohle $k_{str} = 27 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$
Sohlengefälle	0.6%	0.4%
Abflüsse	HQ ₂ = 143 m ³ /s HQ ₁₀₀ = 400 m ³ /s	HQ ₂ = 1'180 m ³ /s HQ ₁₀₀ = 3'350 m ³ /s
Korndurchmesser Sohlenmaterial	$d_m = 5.0 \text{ cm}$ $d_{90} = 12.6 \text{ cm}$	$d_m = 4.5 \text{ cm}$ $d_{90} = 12.0 \text{ cm}$
Unschärfe Sohle	$\sigma_{wz} = 2 \cdot d_{90} = 0.25 \text{ m}$	$\sigma_{wz} = 2 \cdot d_{90} = 0.24 \text{ m}$
Unschärfe Abflusstiefe	$\sigma_{wh} = 0.06 + 0.10 \cdot h$	$\sigma_{wh} = 0.06 + 0.10 \cdot h$
Zusätzliches Freibord unter Brücken	$f_t = 1.0 \text{ m}$	$f_t = 1.0 \text{ m}$

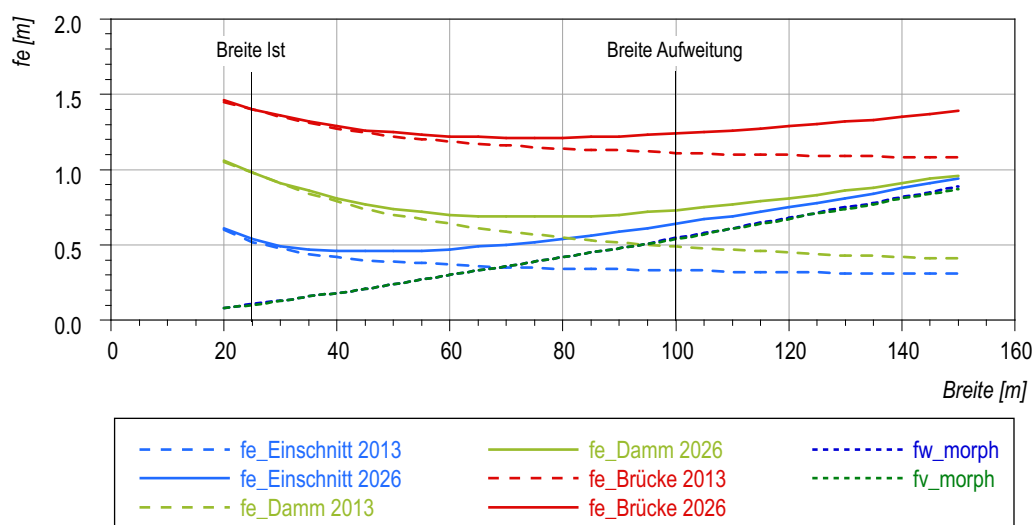


Bild 14: Erforderliches Freibord und Teilfreiborde f_{w_morph} und f_{v_morph} für einen Abfluss von 400 m³/s in der Sense bei Laupen nach KOHS (2026 und 2013) in Abhängigkeit der abflusswirksamen Gerinnebreite. f_{w_morph} und f_{v_morph} fallen in diesem Beispiel zusammen.

Beim Alpenrhein (Bild 15) zeigt sich ein ähnlicher Verlauf des erforderlichen Freibords mit der Breite wie bei der Sense, wobei eine eher stärkere Abhängigkeit von der Gerinnebreite feststellbar ist. Hätte der Rhein eine weitgehend unbegrenzte Dynamik und würde wieder einen grossen Teil der Talebene in Beschlag nehmen, so wäre an den Hochwasserbegrenzungen ein wesentlich grösseres Freibord erforderlich als mit der Methode 2013. Der Anteil der Variabilität würde dann praktisch das ganze erforderliche Freibord bestimmen.

In der unteren Teilaufweitung Bad Ragaz kann der Rhein auf eine Breite von etwa 200 m aufgeweitet werden. Wie die Zeitreise in der Referenzstrecke Mastrils jedoch zeigt, wird das Flussbett mit der Zeit mit dichter Vegetation einwachsen und nicht mehr auf der ganzen Breite abflusswirksam bleiben. Die Regimebreite, welche der Fluss ohne Unterhaltseingriffe selbstständig und langfristig offen und abflusswirksam halten kann, kann örtlich und zeitlich stark variieren, und wird über den ganzen Rheinabschnitt und über Jahrzehnte gemittelt auf rund 150 m geschätzt.

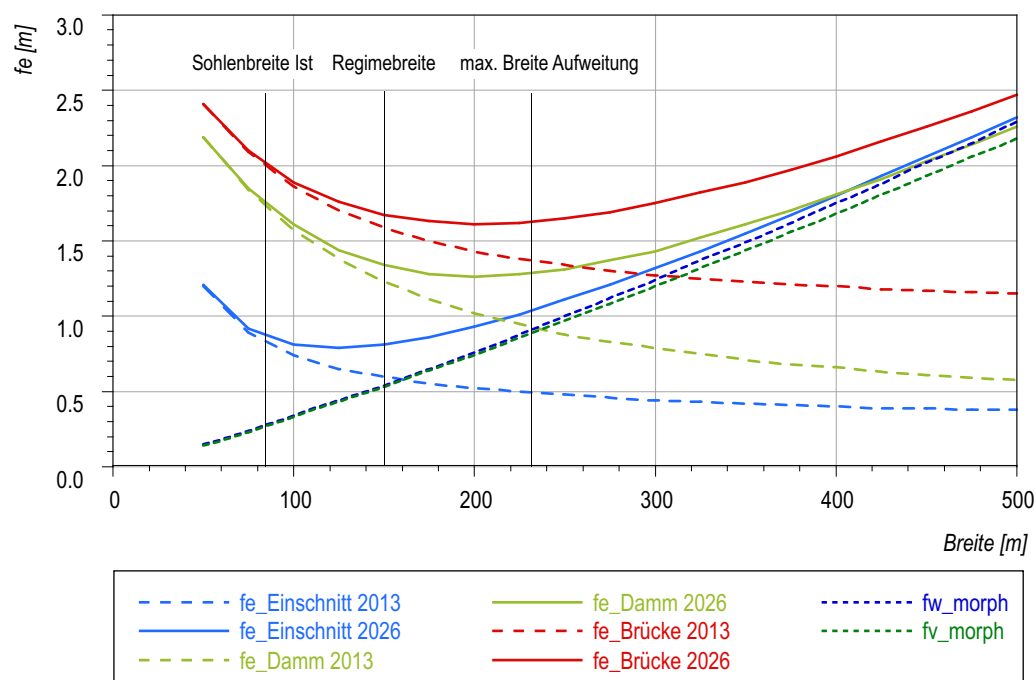


Bild 15: Erforderliches Freibord und Teilfreiborde f_{w_morph} und f_{v_morph} für einen Abfluss von 3'350 m³/s im Alpenrhein nach KOHS (2026 und 2013) in Abhängigkeit der abflusswirksamen Gerinnebreite.

7.3 Weitere Unsicherheiten am Beispiel der Rheinaufweitung

Im Zuge des Aufweitungsprojekts Maienfeld/Bad Ragaz wurden umfangreiche geschiebetechnische und hydraulische Sensitivitätsrechnungen durchgeführt. Diese zeigten, dass die mittlere Sohle und der Hochwasserspiegel stark auf die Eingangsgrössen reagieren. Variiert wurden insbesondere⁴:

- Geschiebeaufkommen v.a. aus der Landquart
- Stärke der eigendynamischen Seitenerosion

⁴ Die Wahl der charakteristischen Korndurchmesser musste am Alpenrhein nicht näher variiert werden, kann aber in einem anderen Kontext ebenfalls einen erheblichen Einfluss auf die mittlere Sohlenlage haben.

- Regimebreite (grösserer oder kleinerer Mittelwert)
- Hydraulischer Einfluss einer örtlichen Einschnürung durch Vegetation, welche im Hochwasserfall nicht rechtzeitig bis zur Ganglinienspitze ausgeräumt wird
- Nicht rechtzeitige Ausräumung von Verengungskolken

Einige dieser Sensitivitätsrechnungen ergaben Wasserspiegellagen, welche örtlich einen beträchtlichen Teil des nach dieser Empfehlung berechneten Freibords beanspruchen würden. Sie fliessen weiterhin nicht in die Freibordbestimmung ein sondern sind mittels einer geeigneter Wahl der für das Dimensionierungsereignis und für die Überlastfälle massgebenden Szenarien abzudecken (s. Kapitel 5). Ausserdem werden die mit diesen Szenarien verbundenen weiteren Unsicherheiten mit einem robusten überlastfähigen Projektdesign abgefangen. Bestandteil dieses Projektdesigns sind überströmsichere Gerinnebegrenzungen sowie ein um 20 cm zusätzlich erhöhtes strategisches Freibord auf der rechten Flussseite, damit die dort verlaufende Autobahn auch bei unwahrscheinlichen Szenarien des Restrisikos vor zu intensiven Überflutungen verschont und befahrbar bleibt.

Ebenfalls nicht im Freibord abgedeckt ist ein Auflaufen des Wasserspiegels entlang des linken Ufers, wo ein Nebengerinne geschaffen wird, welches in der Phase der eigendynamischen Aufweitung vorläufig vom Hauptgerinne isoliert sein wird. Eine Verklausung in diesem schmalen Nebengerinne hätte einen örtlich starken Aufstau des Wasserspiegels und Wasseraustritte zur Folge. Dieses Szenario würde zwar keinen Dammbruch verursachen, ihm ist aber in den Folgejahren nach dem Bau trotzdem mit geeigneter Notfallplanung zu begegnen.

Symbole

B	[m]	Flussbettbreite
d_{90}	[m]	Korndurchmesser, der von 90% (Gewichtsprozent) der Körner unterschritten wird
d_m	[m]	mittlerer Korndurchmesser
f_e	[m]	erforderliches Freibord
f_{max}	[m]	Obere Grenze für das erforderliche Freibord
f_{min}	[m]	Untere Grenze für das erforderliche Freibord
f_t	[m]	Teilfreibord aufgrund von zusätzlich benötigtem Abflussquerschnitt für Treibgut
f_v	[m]	Teilfreibord für die Geschwindigkeitshöhe
f_{v_morph}	[m]	Teilfreibord für die Variation der Lage der Energielinie
f_w	[m]	Teilfreibord für die Unschärfe in der Berechnung der Wasserspiegellage
f_{w_morph}	[m]	Teilfreibord für die Variation des Wasserspiegellage
g	[m/s ²]	Erdbeschleunigung
h	[m]	Abflusstiefe
h_e	[m]	Energiehöhe
HQ_x	[m ³ /s]	Hochwasserabfluss der Jährlichkeit x
k_{str}	[m ^{1/3} /s]	Rauhigkeitsbeiwert nach Strickler
Q	[m ³ /s]	Abfluss
Q_{Dim}	[m ³ /s]	Bemessungsabfluss für ein Szenario x
Q_{H_Dim}	[m ³ /Ereignis]	Bemessungs-Schwemmholtzfracht für ein Szenario x
Q_{S_Dim}	[m ³ /Ereignis]	Bemessungs-Geschiebefracht für ein Szenario x
T_x	[h]	Zeitpunkt x im Modellversuch
v	[m/s]	Fliessgeschwindigkeit
W	[-]	Gerinneform-Parameter
Y	[-]	Relative Breite
Z	[-]	Relative Abflusstiefe
σ_w	[m]	Unschärfe in der Berechnung der Wasserspiegellage
σ_{wh}	[m]	Unschärfe in der Berechnung der Abflusstiefe
σ_{wz}	[m]	Unschärfe in der Berechnung der Wasserspiegellage aufgrund der Unschärfe der prognostizierten Sohlenlage
ω_{ze}	[m]	Variation der Energielinie
ω_{zw}	[m]	Variation der Wasserspiegellage

Literatur

Ahmari H. & da Silva A.M.F. (2011): Regions of bars, meandering and braiding in da Silva and Yalin's plan. *Journal of Hydraulic Research*, 49718-727.

Collin R. & Ruegg E. (2022): Variabilité du niveau des crues dans les rivières naturelles en tresse ou ramifiées. *Projet SIE, Ecole Polytechnique Fédérale Lausanne*, 45 S.

DWA (2011). Deiche an Fließgewässern - Teil 1: Planung, Bau und Betrieb, *Gemeinsames Merkblatt DWA-M 507-1 der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e. V. (DGGT), des Deutschen Talsperrenkomitees (DTK), und der Deutschen Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (Hrsg.)*, Dezember 2011; fachlich auf Aktualität geprüft 2016.

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

Erdem E. (2023): Variabilität des Hochwasserspiegels in natürlichen, verzweigten Flüssen. *Bachelorarbeit an der OST, Rapperswil*, 69 S.

Fahrenberg B. (2024): Variabilität des Hochwasserspiegels in verzweigten Flüssen. *Projektarbeit, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich*, 33 S.

Flussbau AG (2021): Sense Sodbach. Revitalisierung und Parkplatzlenkung. Vorprojekt. *Im Auftrag des Amtes für Landwirtschaft und Natur des Kantons Bern und der Gemeinde Schwarzenburg*, Mai 2021.

Flussbau AG (2024): Abflussrechnung Sense Sodbach. *Internes Projekt, nicht veröffentlicht*.

Framji K.K. (1983): Manual of Flood Control Methods and Practices, International Commission on Irrigation and Drainage, Delhi

Jouhari S. (2023): La revanche dans les projets de revitalisation de cours d'eau par élargissement local. *Projet de master, Ecole Polytechnique Fédérale Lausanne*, 61 S.

KOHS (2010): Literaturrecherche Freibord. *HSR Hochschule für Technik Rapperswil – Institut für Bau und Umwelt. Nicht veröffentlicht*, 21 S.

KOHS (2013): Freibord bei Hochwasserschutzprojekten und Gefahrenbeurteilungen. Empfehlungen der Kommission Hochwasserschutz (KOHS). *«Wasser Energie Luft»* 105/1, Baden, S. 43-50.

Marti C. (2006): Morphologie von verzweigten Gerinnen. Ansätze zur Abfluss-, Geschiebetransport- und Kolkiefenberechnung. *Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich*, 199, Zürich, 272 S.

Möllmann, A., Merkel, U., Huber, M., Vermeer, P.A. and Westrich, B. (2009): Probabilistische Analyse von Flussdeichen für die Praxis / Probabilistic analysis of river dykes for practical applications. *Hydrologie*, HW 53, H.3, p.172-178

Möllmann, A.F.D. (2009). Probabilistische Untersuchung von Hochwasserschutzdeichen mit analytischen Verfahren und der Finite-Elemente-Methode. *Dissertation Inst. für Geotechnik, Universität Stuttgart*.

Schälchli U. & Hunzinger L. (2021): Die erforderliche Geschiebefracht. Fachbericht zum Modul «Geschiebehaushalt – Massnahmen» der Vollzugshilfe Renaturierung der Gewässer. *Bundesamt für Umwelt (Hrsg.)*

Steenbergen, H., Lassing, B.L., Vrouwenvelder, A.C.W.M. and Waarts, P.H. (2004): Reliability analysis of flood defence systems. *Heron*, 49 (1), p.51-73

USACE (2016). HEC-RAS River Analysis System: Hydraulic Reference Manual. US Army

Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, 2016.

USACE (1992): Levee and Floodwall Freeboard Design for Urban Flood Control. US Army Corps of Engineers, 1992.

Zarn B. (1997): Einfluss der Flussbettbreite auf die Wechselwirkung zwischen Abfluss, Morphologie und Geschiebetransportkapazität. *Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich*, 154, Zürich, 242 S.