

Zeitschrift: Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria
Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband
Band: 115 (2023)
Heft: 1

Artikel: Bemessungshilfe für gebaute Stufen-Becken-Abfolgen = Aide au dimensionnement pour des séquences seuil-mouille construites
Autor: Maager, Fiona / Hohermuth, Benjamin / Weitbrecht, Volker
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1043740>

Nutzungsbedingungen

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

Conditions d'utilisation

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

Terms of use

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

Download PDF: 22.01.2026

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

Bemessungshilfe für gebaute Stufen-Becken-Abfolgen

Fiona Maager, Benjamin Hohermuth, Volker Weitbrecht, Robert Boes

Zusammenfassung

In den vergangenen Jahrzehnten wurden Wildbäche oftmals mittels Sperrentreppen aus Beton verbaut, um die Sohl- und Seitenerosion zu reduzieren und den Geschiebetrieb zu regulieren. Gebaute Stufen-Becken-Abfolgen aus natürlichem Blockmaterial stellen eine naturnahe Alternative zur Sohlstabilisierung mit Sperren dar. Dabei wird die Stufen-Becken-Morphologie steiler Fließgewässer nachgeahmt, deren Energie-dissipation aufgrund der Fließwechsel zwischen den Stufen und Becken sehr effizient ist. Im Rahmen einer Doktorarbeit an der VAW wurden physikalische Modellversuche durchgeführt, um die Stabilität und die Versagensmechanismen von gebauten Stufen-Becken-Abfolgen zu untersuchen. Es wurden Sohlneigungen zwischen $S=0,04$ und $0,08$, Gerinnebreiten zwischen $W=6$ und 12 m, Absturzhöhen von $H_d=0,4$ bis $1,1$ m und Stufenabstände zwischen $L_d=5,6$ und $18,9$ m für spezifische Abflüsse $q \leq 15 \text{ m}^2/\text{s}$ getestet, sowohl ohne als auch mit Geschiebezugabe. Aus den Versuchen ging hervor, dass rund 90 Prozent aller Stufen entweder infolge Kippen der oberen Blocklage oder Abrutschen der Stufe nach Unterkolkung versagten. Ein Stufenversagen führte in rund 70 Prozent der Versuche zu einem abrupten Systemversagen, wobei alle oberhalb liegenden Stufen innert kürzester Zeit zerstört wurden. Die wichtigsten Resultate wurden in einer Bemessungshilfe für die Praxis zusammengefasst, in welcher die Absturzhöhe bzw. der Stufenabstand, die resultierende Kolkentiefe und das erforderliche Blockgewicht bestimmt wird.

Version française à la suite de cet article.

1. Einleitung

In der Schweiz wurden viele steile Fließgewässer in den letzten Jahrzehnten mit starren Wildbachsperren verbaut (Bild 1a), um Sohl- und Ufererosion zu verhindern und den Geschiebetrieb zu regulieren. Diese Sperren sind teuer in der Erstellung und

im Unterhalt, sie versagen im Überlastfall schlagartig, sind wenig wertvoll aus ökologischer Sicht und gliedern sich schlecht ins Landschaftsbild ein. Gebaute Stufen-Becken-Abfolgen sind eine naturnahe Alternative zur Sohlstabilisierung, mit welcher die typische Stufen-Becken-Morphologie steiler Fließgewässer mit Sohlnei-

gung zwischen ungefähr $0,04$ und $0,15$ imitiert wird. Das Abflussregime mit schiesendem Abfluss über den Stufen und strömendem Abfluss in den Becken führt zur Entstehung von Wechselsprüngen und damit zu ausgeprägter Energiedissipation. Eine solche Stufen-Becken-Abfolge wurde beispielsweise im Betelriedbach mit einer Sohlneigung von $S=0,15$ im oberen Abschnitt umgesetzt (Bild 1b; Hunzinger & Hodel, 2022). Zwei weitere gebaute Stufen-Becken-Abfolgen wurde am Steinbach (SZ) und an der Maira (GR) realisiert (Beffa, 2022; Tognacca & Tognacca, 2022).

Natürliche, eigendynamische Stufen-Becken-Systeme wurden an der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) der ETH Zürich bereits von Weichert (2006) systematisch untersucht. Daraus resultierte eine Bemessungshilfe für eigendynamische Systeme, wobei das Sohlmaterial mit grossen Blockfraktionen angereichert wird (Weichert et al., 2007). Dieses angereicherte, breit abgestufte Sohlmaterial wird überhöht eingebaut, damit die Stufen-Becken-Abfolgen bei hoher Belastung eigendynamisch entstehen. Dieser Prozess ist immer mit einer Abnahme der Sohlneigung verbunden, da insbesondere die feineren Fraktionen aus dem System ausgetragen werden. Die Herausforderungen dieses Bemessungsansatzes bestehen darin, dass die Anrei-



Bild 1: a) Wildbachsperren in der Gürbe (BE) mit $S=0,07$ (Foto: SWV, 2021); b) Gebaute Stufen-Becken-Abfolge im Betelriedbach (BE) mit $S=0,15$ (Foto: VAW).

cherung mit grobem Blockmaterial (insbesondere das Einmischen) oftmals schwierig umzusetzen ist und mit einem beachtlichen Sedimentaustrag zu rechnen ist. Aus diesem Grund wurde im vorliegenden Forschungsprojekt beabsichtigt, eine Methodik zu entwickeln, um Stufen-Becken-Abfolgen direkt in ihrer endgültigen Geometrie zu bauen. Dadurch wird weniger Blockmaterial benötigt und die initiale Abnahme der Sohlneigung sowie der damit verbundene Materialaustrag entfallen.

Im Rahmen einer Doktorarbeit an der VAW, ETH Zürich wurden physikalische Modellversuche durchgeführt, um die Kolkentwicklung, die Stabilität und die Versagensmechanismen solcher gebauten Stufen-Becken-Abfolgen zu untersuchen. Im Folgenden werden die physikalischen Modellversuche vorgestellt (Kapitel 2), die wichtigsten Resultate hinsichtlich Versagensmechanismen (Kapitel 3) und Stabilität (Kapitel 4) präsentiert und anschliessend in einer Bemessungshilfe (Kapitel 5) zusammengefasst. Weitere Informationen, speziell zum Einfluss der Uferrauheit und zu experimentellen Details, können Maager (2022) entnommen werden.

2. Physikalische Modellversuche

2.1 Versuchsaufbau

Die physikalischen Modellversuche wurden in einer Versuchsrinne im Massstab 1:20 nach Froude-Ähnlichkeit durchgeführt. Sofern nicht anders erwähnt, werden alle Grössen im Naturmassstab angegeben. In der Versuchsrinne wurde eine Abfolge bestehend aus sechs bis acht Stufen eingebaut mit Sohlneigungen zwischen $S = 0,04$ und $0,08$ und mit Gerinnebreiten zwischen $W = 6$ und 12 m. Dabei wurden zwei Grundmischungen mit jeweils einem mittleren Korndurchmesser $d_m = 9$ cm untersucht, mit jeweils unterschiedlichen $d_{16} = 0,7$ bzw. $0,8$ cm und $d_{84} = 18$ bzw. 21 cm bei jeweils einer geometrischen Standardabweichung von $\sigma_g = (d_{84}/d_{16})^{1/2} \approx 5$.

2.2 Stufen-Becken-Geometrie

Die untersuchten Stufen-Becken-Geometrien sind Bild 2 zu entnehmen. Diese Geometrien stellten sich aus vorhergehenden Studien und Masterarbeiten an der VAW als besonders effektiv heraus hinsichtlich gewünschtem Fliessregime und Stabilität (z.B. VAW, 2015; Kaspar, 2017; Lange, 2019). Es wurden mehrheitlich zweilagige Stufen untersucht mit einem mittleren Blockgewicht zwischen $M_B = 4,6 \pm 1$ t und $8,0 \pm 1$ t, was ungefähr einem Blockdurchmesser $D = 1,5$ bis $1,7$ m (äquivalenter Kugel-

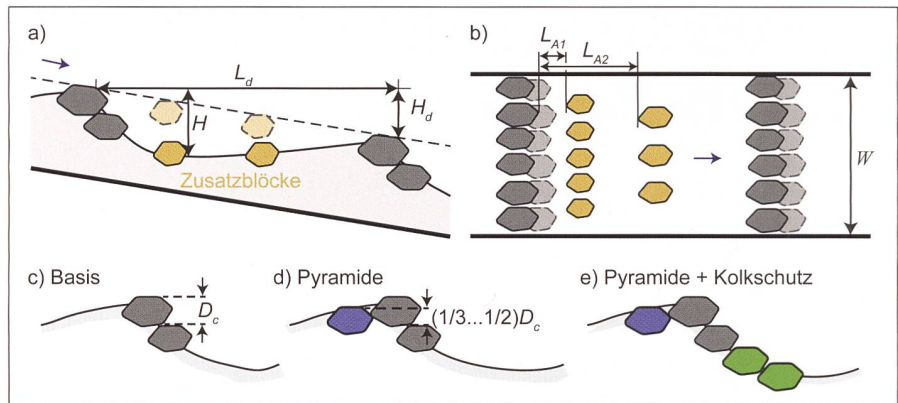


Bild 2: Geometrie der gebauten Stufen-Becken-Abfolgen: a) Längsschnitt, b) Draufsicht, c) Basisanordnung der Stufe, d) pyramidenförmige Anordnung der Stufen, e) pyramidenförmige Anordnung der Stufen mit Kolkchutz; H = Stufenhöhe, H_d = Absturzhöhe, L_d = Stufenabstand, L_{A1} , L_{A2} = Abstand bis zur ersten bzw. zweiten Reihe mit Zusatzblöcken, D_c = c-Achse der stufenbildenden Blöcke.

durchmesser) entspricht (Basiskonfiguration, Bild 2c). Dabei wurden die grösseren Blöcke in der oberen Blockreihe eingebaut. Zwischen den Stufen wurden Zusatzblöcke (Bild 2a–b, gelb markiert) platziert, um die Kolkentiefe zu begrenzen. Die erste Reihe Zusatzblöcke mit Blockgewichten zwischen $3,8 \pm 0,5$ t wurde ca. einen Blockdurchmesser unterhalb der Stufe eingebracht ($L_{A1} = D$). Die zweite Reihe mit Blöcken von $5,4 \pm 0,5$ t wurde mittig zwischen den Stufen platziert ($L_{A2} = L_d/2$).

Zusätzlich zur Basiskonfiguration wurde eine pyramidenförmige Blockanordnung untersucht mit einer weiteren Blockreihe oberhalb der Stufe (Bild 2d, blau). Die vertikale Überlagerung zwischen der oberen Blockreihe und dieser zusätzlichen Blockreihe entspricht ungefähr $1/3$ bis $1/2 D_c$, wobei D_c = Mass der c-Achse der stufenbildenden Blöcke. Die pyramidenförmige Anordnung wurde zusätzlich mit einem Kolkchutz untersucht mit zwei weiteren Blockreihen am Stufenfuss (Bild 2e, grün). Für diese zusätzlichen Reihen (blau und grün) wurden Blöcke mit einem Blockgewicht von $3,8 \pm 0,5$ t verwendet.

2.3 Versuchsablauf

Die gebauten Stufen-Becken-Abfolgen wurden mit einer dreiecksförmigen Ganglinie belastet, wobei der Spitzenabfluss in jedem Versuchsintervall schrittweise erhöht wurde. Die Hochwasserspitze wurde nach $1/4$ der Gesamtdauer erreicht und dauerte ca. 20 Minuten. Die Gesamtdauer der Ganglinie belief sich auf ca. drei bis vier Stunden und nahm proportional mit der Zunahme des Spitzenabflusses zu. Die Versuche wurden mit Klarwasserbedingungen (21 Versuche) und mit Geschiebezugabe (8 Versuche) durchgeführt, wobei bei letzterem maximal 20 Prozent der rechneri-

schen Transportkapazität nach Rickenmann (1990) beschickt wurde. Die Geschiebezugabe erfolgte ebenfalls als Ganglinie, wobei die Abflussspitze und die Geschiebespitze zeitgleich erfolgten.

Der spezifische Abfluss q der Hochwasserspitze wurde schrittweise erhöht bis zum Systemversagen ($q \leq 15 \text{ m}^3/\text{s}$). Das Systemversagen wurde definiert als Abfluss $q_f(1\%)$, bei welchem die mittlere Sohlneigung S um mehr als 1 Prozent abnahm. Dementsprechend blieb das System bis zum vorhergehenden Intervall mit spezifischem Abfluss q_{stab} stabil, bei welchem die Sohlneigung weniger als 1 Prozent abnahm.

2.4 Messtechnik

Die über den gesamten Abschnitt gemittelte Fliessgeschwindigkeit v wurde während der Hochwasserspitze mittels Salzverdünnungsmethode gemessen (Waldon, 2004). Nach jeder Ganglinie wurde die Sohle getrocknet und ein hochaufgelöstes digitales Höhenmodell mittels Structure from Motion-Photogrammetrie (SfM) generiert. Aus diesen Daten wurde die mittlere Sohlneigung S und die Standardabweichung der Sohle σ_z gemäss Aberle & Smart (2003) ermittelt. Letzteres ist ein Mass für die Sohlrauheit, welche im Vergleich zu charakteristischen Korndurchmessern d_{50} oder d_{84} die Formrauheit von Stufen-Becken-Sequenzen direkt berücksichtigt.

3. Versagensmechanismen

3.1 Versagensmechanismen der einzelnen Stufen

In den 21 Versuchen unter Klarwasserbedingungen waren die Versagensmechanismen der einzelnen Stufen zu 51 Prozent auf das Kippen der oberen Blockreihe (Bild 3a)

zurückzuführen, wobei mehr als drei Viertel der Blöcke in Fliessrichtung und knapp ein Viertel gegen die Fliessrichtung kippten. Weiter versagten rund 44 Prozent der Stufen aufgrund des Abrutschens der unteren Blockreihe infolge Unterkolkung (Bild 3b). Die verbleibenden 5 Prozent waren auf innere Erosion des Feinmaterials zurückzuführen. In den acht Versuchen mit Geschiebezugabe waren 53 Prozent der Stufenversagen auf Unterkolkung zurückzuführen und 31 Prozent auf das Kippen der oberen Blockreihe. Die weniger häufig beobachteten Stufenversagen waren die direkte Erosion der stufenbildenden Blöcke (11 Prozent), Beckenverfüllung (3 Prozent) und innere Erosion (2 Prozent).

Zusammenfassend waren in allen Versuchen 46 Prozent der Stufenversagen auf Kippen der oberen Blockreihe und 45 Prozent auf Unterkolkung zurückzuführen, womit diese beiden Prozesse über 90 Prozent aller Stufenversagen ausmachten. Auffallend ist dabei, dass das Versagen infolge Unterkolkung in Versuchen mit Geschiebezugabe häufiger vorkam. Ursprünglich wurde erwartet, dass das Versagen infolge Unterkolkung bei Klarwasserbedingungen häufiger auftritt aufgrund der grösseren Kolk-tiefen. Die folgenden Grün-

de erklären diese Diskrepanz. Erstens versagten die Stufen bei Klarwasserbedingungen zuerst infolge Kippens, bevor die kritische Kolk-tiefe erreicht bzw. der Stufenfuss destabilisiert wurde. Das Kippen wurde durch die Zunahme der Exposition der Blöcke in den Stufen begünstigt, welche in Klarwasserversuchen grösser war aufgrund von innerer Erosion des Feinmaterials. Des Weiteren hielten die Stufen in Versuchen mit Geschiebezugabe allgemein grösseren Belastungen stand, was zu tieferen Kolken führte (bei höheren spezifischen Abflüssen).

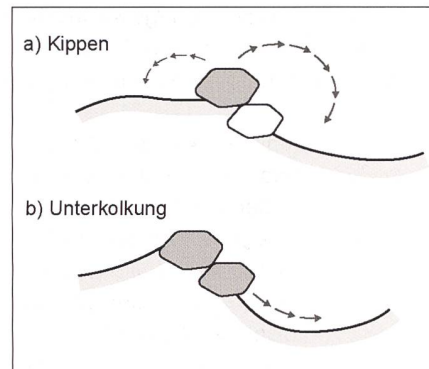


Bild 3: Schematische Darstellung der häufigsten Versagensmechanismen der einzelnen Stufen.

Die häufigsten Versagensmechanismen Kippen und Unterkolkung konnten durch die Bauweisen «Pyramide» (Bild 2d) und «Pyramide mit Kolkschutz» (Bild 2e) verhindert bzw. verzögert werden, d.h. sie wurden erst bei grösseren Belastungen beobachtet. Die zusätzliche Blockreihe oberhalb der Stufe verringerte die Exposition der oberen Blöcke, wodurch die Wahrscheinlichkeit eines Stufenversagens infolge Kippens in und gegen die Fliessrichtung reduziert wurde. Die Konfiguration «Pyramide + Kolkschutz» mit zwei weiteren Blockreihen unterhalb der Stufe verhinderte das Versagen infolge Unterkolkung.

3.2 Systemversagen

In den Versuchen wurde sowohl ein graduelles (30 Prozent) als auch ein abruptes (70 Prozent) Systemversagen beobachtet. Beim graduellen Systemversagen nahm die Sohlneigung über mehrere Belastungsstufen kontinuierlich in kleinen Schritten ab. Demgegenüber nahm die Sohlneigung beim abrupten Systemversagen innerhalb einer Belastungsstufe unmittelbar um (deutlich) mehr als 1 Prozent ab. Das abrupte Systemversagen wird im Folgenden anhand eines Beispiels erläutert (Bild 4).

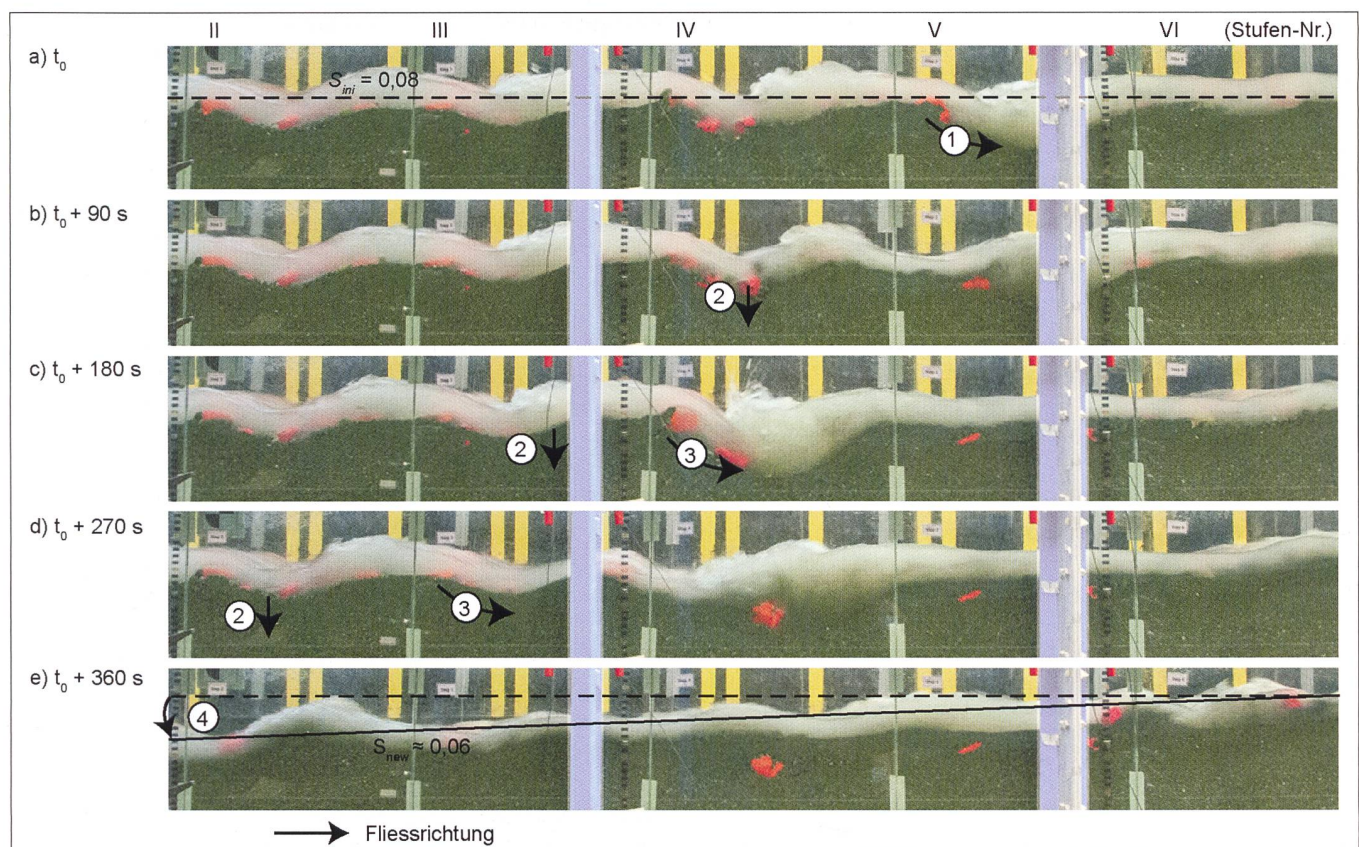


Bild 4: Beispiel eines abrupten Systemversagens ($S=0,08$, $W=6\text{ m}$, $M_B=4,6\text{ t}$, $H_d=1,1\text{ m}$, $L_d=14\text{ m}$, mit Geschiebezugabe) bei $q=8,75\text{ m}^2/\text{s}$; seitliche Fotos der Versuchsrinne (Zeitangaben im Naturmassstab); ① initiales Stufenversagen infolge Unterkolkung, ② Zunahme der Kolk-tiefe der oberhalb liegenden Stufe, ③ Versagen der oberhalb liegenden Stufe, ④ Rotationserosion führt zur Reduktion des mittleren Sohlgefälles.

Im obersten Bild (Bild 4a) ist ein seitliches Foto der Stufen-Becken-Abfolge für einen Versuch mit Initialgefälle $S=0,08$ zu sehen. Zum Zeitpunkt t_0 versagte die Stufe V infolge Unterkolkung, was zu einer raschen Zunahme der Kolkentiefe der oberhalb liegenden Stufe IV führte. Zum Zeitpunkt $t_0 + (180 \dots 270 \text{ s})$, bzw. ungefähr vier Minuten nach dem initialen Versagen der Stufe V, versagte die Stufe IV, was wiederum zu einer Zunahme der Kolkentiefe der oberhalb liegenden Stufe III führte. Dieser rückwärtsschreitende Erosionsprozess zerstörte alle oberhalb liegenden Stufen innerhalb von fünf bis zehn Minuten (Naturmassstab!). In der Folge erodierte die Sohle und rotierte um den Fixpunkt bei Stufe VI und die mittlere Sohlneigung nahm um ca. $\Delta S=0,02$ ab. Die maximal zu erwartende Eintiefung im oberen Bereich hängt stark vom Ort des Stufenversagens ab, welche die rückwärtsschreitende Erosion initiiert. Die grössten Eintiefungen sind für das Versagen der untersten Stufe im System zu erwarten. Kenntnisse über die maximale Stabilität von gebauten Stufen-Becken-Abfolgen sind also sehr wichtig, um ein abruptes Systemversagen zu verhindern.

4. Stabilität

4.1 Wichtige Einflussgrössen

Aus den Versuchen ging hervor, dass das mittlere Blockgewicht M_B einen grossen Einfluss auf die Stabilität der Stufen hatte. Gemäss Bild 5 nimmt die Stabilität mit zunehmendem Blockgewicht M_B zu, wenn alle anderen Parameter konstant gehalten werden. Zudem ist ersichtlich, dass die Stabilität in Versuchen mit Geschiebezugabe (ausgefüllte Quadrate) gegenüber Versuchen ohne Geschiebezugabe zunahm. Einerseits nimmt die Kolkentiefe bei Bedingungen mit erhöhtem Geschiebetransport ab, wodurch der Versagensmechanismus Unterkolkung erst bei grösseren Belastungen zu erwarten ist. Andererseits wird weniger Feinmaterial ausgewaschen, wodurch die obere Blockreihe der Strömung weniger stark exponiert ist. Folglich ist auch der Versagensfall Kippen weniger wahrscheinlich für Bedingungen mit Geschiebetransport.

Neben dem Blockgewicht und der Geschiebezufuhr spielte auch die Anordnung der stufenbildenden Blöcke eine wichtige Rolle hinsichtlich Stabilität. Sowohl die Konfigurationen «Pyramide» (Bild 2d) als auch «Pyramide mit Kolkenschutz» (Bild 2e) hielten jeweils einer grösseren spezifischen Belastung stand. Es ist jedoch zu beachten,

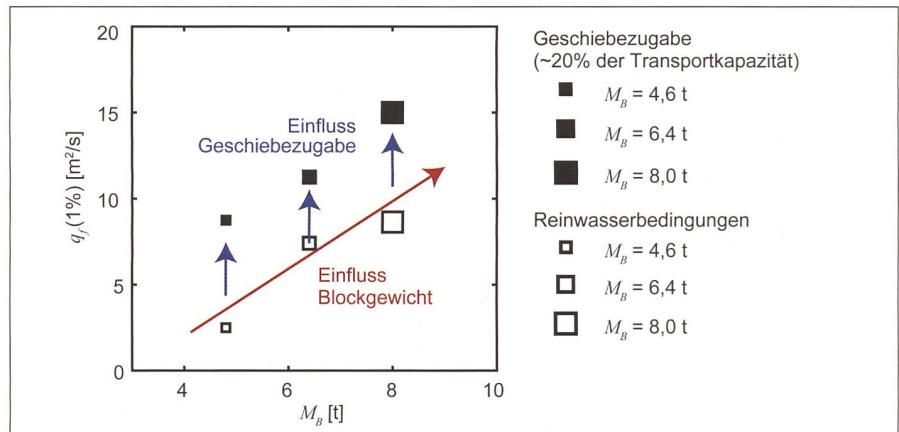


Bild 5: Einfluss des mittleren Blockgewichts M_B und der Geschiebezugabe auf die Stabilität der gebauten Stufen-Becken-Abfolgen; Versuche für $S=0,08$, $W=6 \text{ m}$, $H_d=1,1 \text{ m}$, $L_d=14 \text{ m}$, $q_f(1\%)$ =spezifischer Abfluss, welcher zum Systemversagen führte.

dass die Belegungsdichte von der Basis-konfiguration zur «Pyramide + Kolkchutz» ungefähr verdoppelt wird, was sich negativ auf die Projektkosten auswirkt.

4.2 Anpassungsmechanismen auf eine zunehmende Belastung

Aberle (2000) entwickelte ein Stabilitätsdiagramm für natürliche Stufen-Becken-Abfolgen mithilfe von Daten aus physikalischen Modellversuchen (Bild 6a). Ein stabiler Zustand eines Gerinnes wird durch folgende Gleichung beschrieben:

$$q^* = \frac{q}{\sqrt{g\sigma_z^3}} = 0,20 S^{-1,3} \quad (1)$$

mit g =Erdbeschleunigung. Gemäss Gleichung (1) ist für die Kombination aus spezifischem Abfluss q und Sohlneigung S eine Sohlrauheit σ_z erforderlich, um der Belastung standzuhalten. Wird der spezifische Abfluss q nun erhöht, verschiebt sich das zuvor stabile System in einen instabilen Zustand (Bild 6a).

Es gibt zwei grundlegende Mechanismen, wie sich die Sohle an die steigende

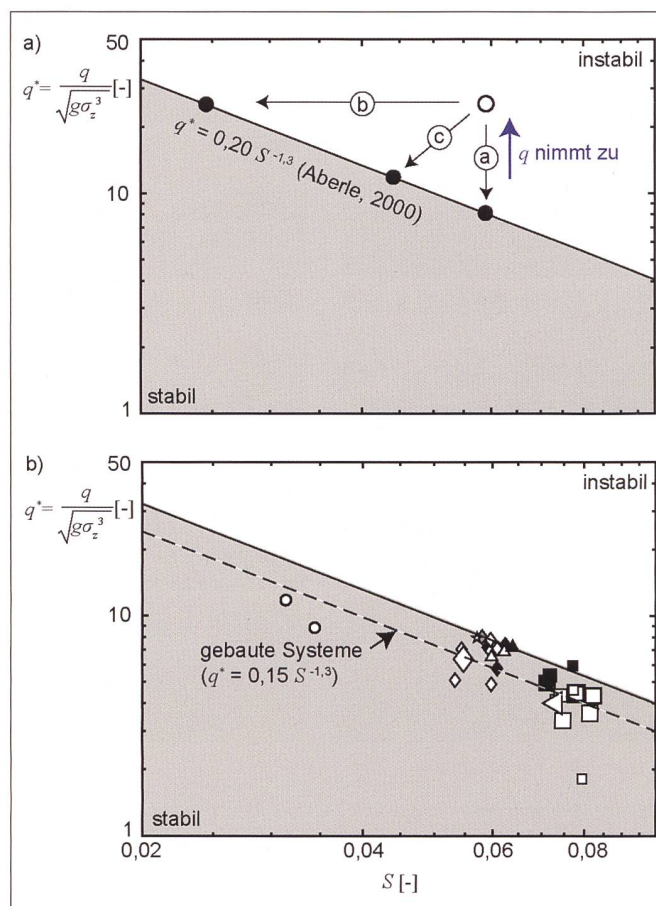


Bild 6: Stabilitätsdiagramm von Aberle (2000), modifiziert durch Weichert et al. (2009): a) Natürliche Stufen-Becken-Abfolgen; b) Datenpunkte für 29 Versuche mit gebauten Stufen-Becken-Abfolgen für q_{stab} =spezifischer Abfluss, bei welchem das System gerade noch stabil war (leere Datenpunkte: Klarwasserbedingungen, ausgefüllte Datenpunkte: Geschiebezugabe).

hydraulische Belastung anpassen kann: (a) sie wird über eine Zunahme der Sohlrauheit kompensiert, wobei ein neuer stabiler Zustand bei gleichbleibender Sohlneigung erreicht wird (*Bild 6a, Trajektorie a*). Diese Zunahme der Sohlrauheit kann beispielsweise durch eine Vergröberung der Deckschicht oder durch die Optimierung der Sohlgeometrie (z.B. Entstehung von Stufen-Becken-Abfolgen) erreicht werden. (b) Die zunehmende Belastung wird über die Abnahme der Sohlneigung kompensiert, wobei sich das instabile System nach links verschiebt (*Bild 6a, Trajektorie b*) infolge einer Rotationserosion um einen Fixpunkt im Unterwasser. Es können auch beide Prozesse gleichzeitig auftreten, wobei sich das System auf Trajektorie (c) in einen neuen stabilen Zustand bewegt.

Die Versuche haben gezeigt, dass sich diese Anpassungsmechanismen auf gebaute Stufen-Becken-Abfolgen übertragen lassen. *Bild 6b* zeigt die Datenpunkte für alle 29 Versuche zu gebauten Stufen-Becken-Abfolgen für den spezifischen Abfluss q_{stab} , bei welchen das System gerade noch stabil war. Es ist zu sehen, dass die Stabilitätsgrenze für natürliche Systeme gemäss *Aberle (2000)* auch für gebaute Stufen-Becken-Abfolgen gilt. Die Datenpunkte liegen weitgehend unterhalb dieser Stabilitätsgrenze für natürliche Systeme, weil dem gebauten System von aussen eine optimierte Stufen-Becken-Geometrie auferlegt wird (und damit σ_z tendenziell grösser ist). In natürlichen Systemen wären deutlich grössere q erforderlich, um eine solche Sohlrauheit zu erreichen. Ausserdem ist die optimierte, gebaute Geometrie weniger robust im Versagensfall im Vergleich zum natürlichen System, da das Versagen einer einzelnen Stufe potenziell ein abruptes Systemversagen auslösen kann. In natürlichen Systemen sind die Stufen weniger regelmässig angeordnet und die Blockbelegungsichte ist tendenziell grösser, was zu einem robusteren System führt. Folglich wurde für die gebauten Stufen-Becken-Abfolgen folgende Stabilitätsgrenze definiert (*Bild 6b, strichlierte Linie*):

$$q^* = \frac{q}{\sqrt{g\sigma_z^3}} = 0,15 \text{ s}^{-1,3} \quad (2)$$

Mit dieser Gleichung kann für ein Gerinne mit Dimensionierungsabfluss q und Zielgefälle S die erforderliche Sohlrauheit σ_z bestimmt werden. Dies stellt die grundlegende Idee für die Bemessungshilfe dar. Ausserdem besteht ein linearer Zusammenhang zwischen der Sohlrauheit σ_z und der Stufenhöhe H , womit die Stufen-Becken-Geometrie festgelegt werden kann. Es muss

sichergestellt werden, dass diese erforderliche Sohlrauheit erreicht wird und die Stufen nicht bereits vor dem Erreichen des Bemessungsabflusses versagen infolge Kippen oder Unterkolkung. Deshalb wird unter anderem zusätzlich ein schubspannungsbasiertes Kriterium angewendet für die Bestimmung des Blockgewichts.

5. Empfehlungen für die Praxis

5.1 Bemessungshilfe

Zuerst müssen das Sohlgefälle S , die Gerinnebreite W , der Bemessungsabfluss Q bzw. der dazugehörige spezifische Abfluss $q=Q/W$, sowie der charakteristische Korndurchmesser d_{84} des Grundmaterials bestimmt werden. Danach wird die Blockanordnung der Stufen provisorisch festgelegt. Im Allgemeinen wird die pyramidenförmige Anordnung empfohlen (*Bild 2d*), da diese stabiler ist im Vergleich zur Basis-konfiguration. Im Laufe des Dimensionierungsprozesses muss gegebenenfalls die Anordnung mit Kolkenschutz (*Bild 2e*) verwendet werden, insbesondere wenn grosse Kolk-tiefen zu erwarten sind.

Die Bemessungshilfe ist in vier Schritte unterteilt, welche in *Bild 7* anhand eines Bemessungsbeispiels zusammengefasst werden. Die Bemessungshilfe wurde für den folgenden Parameterbereich entwickelt:

- $S=0,04 \dots 0,08$
- $L_d/W=0,8 \dots 3,1$
- $H_d/D=0,3 \dots 0,8$
- $D/d_{84}=6,7 \dots 10,6$
- Froude-Zahl: $F=0,53 \dots 1,16$
- $W/h=1,7 \dots 16,1$
- Geschiebezugaberraten:
 $q_{s,in} < 20 \%$ der Transportkapazität

Mit der Bemessungshilfe werden die Absturzhöhe H_d , der Stufenabstand L_d , die Stufenhöhen H für Klarwasserbedingungen und H_s für Bedingungen mit Geschiebezugabe und der stufenbildende Blockdurchmesser D ermittelt.

Schritt 1: Erforderliche Sohlrauheit

Die erforderliche Sohlrauheit $\sigma_{z,req}$ wird für q und S unter Anwendung des Stabilitätsdiagramms (*Bild 6b*) ermittelt. Folglich kann $\sigma_{z,req}$ mit folgender Gleichung berechnet werden:

$$\sigma_{z,req} = \left(\frac{q}{mS^{-1,3}\sqrt{g}} \right)^{2/3} \quad m = 0,15 [0,15 \dots 0,20] \quad (3)$$

Dabei ist $\sigma_{z,req}$ die erforderliche Sohlrauheit des Stufen-Becken-Systems um die Energie zu dissipieren, die dem System durch eine bestimmte Kombination von S und q zugeführt wird. Das System kann

sich aber nur dann zu diesem Zustand hin entwickeln, wenn die Stufen stabil bleiben. Die Sohle passt sich vorerst nur durch Zunahme der Sohlrauheit, d.h. durch das Auskolkung der Becken an (*Trajektorie (a)* in *Bild 6a*). Der Parameter $m=0,15$ stammt aus einer Regressionsanalyse für gebaute Stufen-Becken-Systeme und $m=0,20$ aus der von *Aberle (2000)* entwickelten Gleichung für natürliche Systeme. Es wird empfohlen, einen Wert $m=0,15$ anzunehmen und eine Sensitivitätsanalyse durchzuführen, da dieser Parameter sensitiv ist bezüglich Absturzhöhe H_d und Stufenabstand L_d (siehe Schritt 2). Der Wert $m=0,15$ liefert eine obere Grenze für $\sigma_{z,req}$, was gleichbedeutend ist mit einer maximalen Absturzhöhe H_d und maximalem Stufenabstand L_d . Wird $m=0,20$ verwendet, resultieren eine untere Grenze für $\sigma_{z,req}$ und minimale Werte für H_d und L_d . Dementsprechend ist ein System mit $m=0,15$ eher auf der sicheren Seite bezüglich Sohlrauheit. Es erfordert aber deutlich grössere stufenbildende Blöcke, damit die Stufen stabil bleiben und nicht bereits versagen, bevor diese Sohlrauheit durch Auskolkung erreicht wird.

Schritt 2: Stufen-Becken-Geometrie

Mithilfe der folgenden Gleichung kann die Absturzhöhe H_d berechnet werden:

$$H_d = \left(\frac{(\sigma_{z,req} - 0,5d_{84})d_{84}^{7/20}(s-1)g^{1/5}}{0,52 q^{2/5} S^{1/6}} \right)^{4/3} \quad (4)$$

mit $s=\rho_s/\rho$ =relative Sedimentdichte. Der Stufenabstand L_d , die Stufenhöhen H (Klarwasser) und H_s (Geschiebezugabe) und die resultierende Sohlrauheit $\sigma_{z,Hs}$ (für Bedingungen mit Geschiebezugabe, welche in den meisten Anwendungsfällen relevanter sind) werden mit den Gleichungen (5) bis (7) bestimmt:

$$L_d = H_d / S; \quad L_{d,min} = W \quad (5)$$

$$H = 2,23 \frac{q^{2/5} S^{11/12} L_d^{3/4}}{d_{84}^{7/20} (s-1) g^{1/5}}; \quad H_s = 0,90 H \quad (6)$$

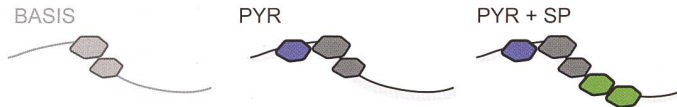
$$\sigma_{z,Hs} = 0,50 d_{84} + 0,26 H_s \quad (7)$$

Gleichung (7) beschreibt den linearen Zusammenhang zwischen der Stufenhöhe und der Sohlrauheit, welche ebenfalls aus den Versuchsdaten ermittelt wurde. Der minimale Stufenabstand L_d sollte nicht kleiner sein als die Gerinnebreite, das heisst $L_{d,min}/W \geq 1$. Es gilt zu erwähnen, dass Gleichung (4) sich aus der Kombination von Gleichungen (5) bis (7) aufgelöst nach H_d ergibt für die Bedingung $\sigma_{z,req} = \sigma_{z,Hs}$.

STUFEN-BECKEN-ABFOLGEN: BEMESSUNGSHILFE

Rahmenbedingungen

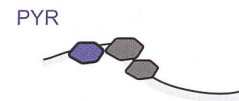
- > Sohlneigung, Gerinnebreite, (spezifischer) Bemessungsabfluss und charakteristische Korngrösse festlegen
- > Wahl der Blockanordnung in der Stufe (PYR oder PYR+SP empfohlen)



$$S = 0,065, W = 8 \text{ m}$$

$$Q = 40 \text{ m}^3/\text{s}, q = 5 \text{ m}^2/\text{s}$$

$$d_{84} = 0,25 \text{ m}$$



Schritt 1: Erforderliche Sohlrauheit

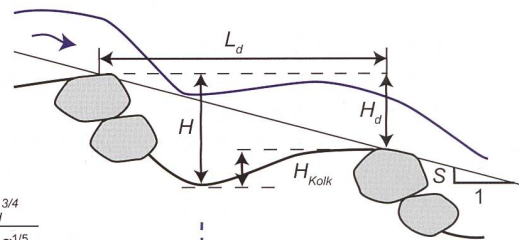
$$\text{Gl. (3)} \quad \sigma_{z, \text{req}} = \left(\frac{q}{m S^{-1.3} \sqrt{g}} \right)^{2/3} \quad m = 0,15 [0,15 \dots 0,20]$$

$$\sigma_{z, \text{req}} = 0,45 \text{ m}$$

Schritt 2: Stufen-Becken-Geometrie

Gl. (4) bis (7)

$$H_d = \left(\frac{(\sigma_{z, \text{req}} - 0,5 d_{84}) d_{84}^{7/20} (s-1) g^{1/5}}{0,52 q^{2/5} S^{1/6}} \right)^{4/3} \left\{ \begin{array}{l} L_d = H_d / S \\ H = 2,23 \frac{q^{2/5} S^{11/12} L_d^{3/4}}{d_{84}^{7/20} (s-1) g^{1/5}} \\ H_s = 0,90 H \\ \sigma_{z, Hs} = 0,50 d_{84} + 0,26 H_s \end{array} \right.$$



$$H_d = 0,79 \text{ m}$$

$$H = 1,41 \text{ m}, H_s = 1,27 \text{ m}$$

$$\sigma_{z, Hs} = \sigma_{z, \text{req}} = 0,45 \text{ m}$$

> Minimaler Stufenabstand prüfen:

$$L_d / W \geq 1$$

$$L_d = 12,1 \text{ m}, L_d / W = 1,5 \text{ (ok)}$$

> Relative Stufenhöhe

$$\text{Gl. (8)} \quad H / H_d \leq c$$

$$c = 1,8 [1,1 \dots 2,6]$$

$$H / H_d = 1,8 \text{ (~ok)}$$



$c > 1,8$: Kolkschutz in Betracht ziehen (PYR+SP)

Schritt 3: Hydraulik

$$\text{Gl. (9)} \quad v = 0,96 g^{0,20} S^{0,20} q^{0,60} \sigma_{z, Hs}^{-0,40} \quad h = q/v$$

$$v = 3,2 \text{ m/s}, h = 1,6 \text{ m}$$

> Abflussregime überprüfen

$$F < 1$$

$$F = 0,80 \text{ (ok)}$$

Schritt 4: Erforderliche Blockgrösse

$$\text{Gl. (12)} \quad D = \frac{hS}{(s-1)b(0,15S^{0,25})} \quad b = 0,56 [0,43 \dots 0,69]$$

$$D = 1,47 \text{ m}$$

$$\text{Gl. (13)} \quad M_B = \frac{D^3 \rho_s \pi}{6}$$

$$M_B = 4,4 \text{ t}$$

> Bimodale Mischung

$$\text{Gl. (14)} \quad a_1 < D/d_{84} < a_2 \quad a_1 = 6$$

$$a_2 = 11$$

$$D/d_{84} = 5,8 \text{ (~ok)}$$



$a_2 > 11$: Filterschicht verwenden

> Stufenhöhe-zu-Blockgrösse

$$\text{Gl. (15)} \quad H/D < e$$

$$e = 1,0 [1,0 \dots 1,5]$$

$$H/D = 0,96 \text{ (ok)}$$



$e > 1,0$: Kolkschutz in Betracht ziehen (PYR+SP)

Bild 7: Bemessungshilfe für gebaute Stufen-Becken-Abfolgen: Überblick mit Bemessungsbeispiel (blau).

Um das Stufenversagen infolge Unterkolkung zu verhindern, soll die dimensionslose Stufenhöhe H/H_d einen Wert c nicht überschreiten:

$$H/H_d \leq c \quad c = 1,8 [1,1 \dots 2,6] \quad (8)$$

Dieser Wert passt auch gut mit Beobachtungen von natürlichen Stufen-Becken-Abfolgen überein, in welchem H/H_d ungefähr zwischen $c=1$ und 2 liegt (Abrahams et al., 1995). Bei grossen Stufenhöhen mit $1,8 < c < 2,6$ wird ein Kolk-schutz (Bild 2e) empfohlen, um das Risiko eines Stufenversagens infolge Unterkolkung zu verringern.

Schritt 3: Hydraulik

Um die Stabilität der stufenbildenden Blöcke zu beurteilen, muss die dimensionslose Sohlschubspannung θ ermittelt werden. Dazu wird die über den gesamten Abschnitt gemittelte Fließgeschwindigkeit mit dem Ansatz nach Aberle & Smart (2003) berechnet:

$$v = 0,96 g^{0,20} S^{0,20} q^{0,60} \sigma_{z,HS}^{-0,40} \quad (9)$$

Daraus kann die mittlere Fliesstiefe mit $h=q/v$ bestimmt werden, welche im Schritt 4 für die Ermittlung der Sohlschubspannung benötigt wird. Das Abflussregime sollte über den gesamten Stufen-Becken-Abschnitt betrachtet im strömenden Bereich liegen ($F < 1$), damit Wechsell-sprünge in den Becken entstehen und ein durchgehender Schussstrahl verhindert wird.

Schritt 4: Erforderliche Blockgrösse

Der erforderliche Durchmesser D der stufenbildenden Blöcke wird mithilfe der kritischen Sohlschubspannung bestimmt, welche nicht überschritten werden soll. Die zu erwartende Sohlschubspannung θ wird mit der in Schritt 3 bestimmten Abflusstiefe h berechnet:

$$\theta = \frac{hS}{(s-1)D} \quad (10)$$

Die kritische Sohlschubspannung θ_c wird mit einem Sicherheitsfaktor b multipliziert:

$$\theta \leq b \theta_c \quad (11)$$

wobei $b=0,56 \pm 0,13$ aus den Modellversuchen ermittelt wurde. Für Sohlen, welche durchgehend mit Sohlmaterial der Korngrösse D belegt sind, gilt $b \approx 1$. Das betrachtete Stufen-Becken-System besteht jedoch aus einer bimodalen Mischung mit Blöcken von Durchmesser D und d_{84} des

Sohlmaterials. Folglich können die Blöcke mit Durchmesser D bereits bei $b < 1$ mobilisiert werden. Dabei wird die kritische Sohlschubspannung $\theta_c = 0,15 S^{0,25}$ nach Lamb et al. (2008) verwendet, wodurch die Zunahme von θ_c in steilen Fließgewässern berücksichtigt wird. Wird Gleichung (10) in (11) eingesetzt und nach D aufgelöst, resultiert:

$$D \geq \frac{hS}{(s-1)b(0,15 S^{0,25})} \quad (12)$$

Für die Bemessung wird ein Wert $b=0,56$ empfohlen. Anschliessend wird das mittlere Blockgewicht der stufenbildenden Blöcke M_B bestimmt:

$$M_B = \frac{D^3 \rho_s \pi}{6} \quad (13)$$

mit ρ_s =Dichte des Blockmaterials. Für den Parameter b wird eine Sensitivitätsanalyse empfohlen, um die Unsicherheiten bezüglich Blockgewicht abzuschätzen. Der konservative Wert $b=0,43$ führt zu grösseren Blockdurchmessern D und empfiehlt sich beispielsweise in Situationen mit grossem Schadenpotenzial oder falls wenig Geschiebezufuhr zu erwarten ist. Umgekehrt eignet sich $b=0,69$ bei geringem Schadenpotenzial oder kurzen Teststrecken.

Zwei weitere Kriterien müssen erfüllt sein, um ein Stufenversagen vor dem Erreichen des Bemessungsabflusses zu vermeiden. Da es sich um eine bimodale Mischung handelt, gilt bezüglich D/d_{84} :

$$a_1 < D/d_{84} < a_2 \quad a_1 = 6; a_2 = 11 \quad (14)$$

Gemäss Raudkivi & Ettema (1982) ist für $D/d_{84} < 6$ mit direkter Erosion der grossen Blöcke zu rechnen, wohingegen die grossen Blöcke für $D/d_{84} > 17$ im Grundmaterial versinken können. In den Versuchen wurden Bedingungen $D/d_{84} \leq 11$ untersucht, daher wird bereits für $D/d_{84} > 11$ eine Filterschicht zwischen den stufenbildenden Blöcken (und den Zusatzblöcken zwischen den Stufen) und dem Grundmaterial empfohlen.

Als Letztes soll das Verhältnis zwischen Stufenhöhe und Blockgrösse H/D geprüft werden:

$$H/D < e \quad e = 1,0 [1,0 \dots 1,5] \quad (15)$$

wobei $e=1,0$ nicht überschritten werden sollte. Für $1,0 < H/D < 1,5$ sollte ein Kolk-schutz (Konfiguration «Pyramide+Kolk-schutz», Bild 2e) vorgesehen werden, um das Risiko eines Stufenversagens infolge Unterkolkung zu reduzieren.

5.2 Unsicherheiten und Limitationen

Um die Unsicherheiten des Bemessungsverfahrens abzuschätzen, wird eine Sensitivitätsanalyse hinsichtlich der Parameter m und b empfohlen, mit welchen die Stufen-Becken-Geometrie (Absturzhöhe H_d , Stufenabstand L_d) und die Blockgrösse D der stufenbildenden Blöcke festgelegt wird. Tabelle 1 zeigt die Resultate der Sensitivitätsanalyse für das in Bild 7 gezeigte Berechnungsbeispiel. Für den Parameter $m=0,15$ resultieren grosse Absturzhöhen H_d und somit auch grosse Stufenabstände L_d und grosse Stufenhöhen H . Damit ist die Sohlrauheit grösser, was zu kleineren mittleren Fließgeschwindigkeiten und Froude-Zahlen führt. Aufgrund der grösseren Stufenhöhe sind aber tendenziell grössere Blöcke erforderlich, damit das Verhältnis H/D nicht zu gross wird. Der Blockdurchmesser D und das mittlere Blockgewicht M_B variiert um den Faktor 2 für $b=0,56 \pm 0,13$. Für die konservative Annahme $b=0,43$ verdoppelt sich das erforderliche Blockgewicht und für $b=0,69$ wird das Blockgewicht fast halbiert. Diese grosse Bandbreite für M_B widerspiegelt die Komplexität steiler Fließgewässer. Obwohl die Versuche im Labor unter kontrollierten Bedingungen durchgeführt wurden, haben Parameter wie effektive Blockgrösse, -form, -platzierung und -exposition und die Zusammensetzung des Grundmaterials einen Einfluss auf die Stabilität der Stufen. Diese Parameter können aber weder im Labor noch in der Natur genügend genau beschrieben werden, um die Variabilität weiter zu reduzieren.

Die Versuche wurden in einer geraden Versuchsrinne mit rechteckigen, glatten Wänden durchgeführt. Folglich werden sowohl die Effekte von Ufergeometrie und -rauheit als auch von Kurvensituationen vernachlässigt. Versuche mit glatten Seitenwänden stellen eher konservative Bedingungen dar, da die Energiedissipation entlang der glatten Ufer klein ist und die Sohlschubspannungen folglich weniger stark reduziert werden im Vergleich zu rauen Ufern. Bei glatten Seitenwänden ist ein Verkeilen der stufenbildenden Blöcke, was die Stufen zusätzlich stabilisieren kann, weniger wahrscheinlich als bei rauen Ufern. Folgende Punkte sind bei der Bemessung zu beachten:

- Die stufenbildenden Blöcke in der Aussenkurve sind einer grösseren hydraulischen Belastung ausgesetzt.
- Für die Stabilität der Stufen ist eine kraftschlüssige Verbindung sowohl zwischen den stufenbildenden Blöcken als auch zwischen Blöcken und Ufer wichtig.

M	b	H_d	L_d	H	H/H_d	F	D	M_B	D/d_{84}	H/D
[-]	[-]	[m]	[m]	[m]	[-]	[-]	[m]	[t]	[-]	[-]
0,15	0,43	0,79	12,1	1,4	1,8	0,80	1,91	9,7	7,7	0,73
	0,56						1,47	4,4	5,9	1,00
	0,69						1,19	2,4	4,8	1,18
0,20	0,43	0,55	8,4	1,1	2,0	0,90	1,77	7,7	7,1	0,60
	0,56						1,36	3,5	5,4	0,78
	0,69						1,10	1,9	4,4	0,97

Tabelle 1: Sensitivitätsanalyse für das in Bild 7 gezeigte Bemessungsbeispiel (fett: Grenzwerte hinsichtlich D/d_{84} oder H/D werden nicht eingehalten).

- Bei geeigneten Böschungen ist darauf zu achten, dass die Blöcke sorgfältig in die Ufer eingebunden werden.

5.3 Ausführungshinweise

Für die Stabilität der gebauten Stufen-Becken-Abfolgen ist die Uferstabilität mitentscheidend. Werden die Ufer erodiert, kann das zur Zerstörung oder Umspülung von Stufen führen, was wiederum ein abruptes Systemversagen auslösen kann. Für die Fundationstiefe des Uferschutzes ist primär die zu erwartende Stufenhöhe massgebend. Mit Gleichung (6) kann die mittlere Stufenhöhe H abgeschätzt werden, wobei zu beachten ist, dass die maximale Stufenhöhe einzelner Stufen in den Modellversuchen bis zu 50 Prozent grösser war als die mittlere Stufenhöhe. Folglich ist mit einer maximalen Stufenhöhe $H_{max} = 1,5 H$ zu rechnen.

In breiten Gerinnen können Sohlformen wie alternierende Bänke auftreten, was zu einer Pendelbewegung der Hauptströmung führt und die hydraulische Belastung auf die stufenbildenden Blöcke lokal an den Ufern erhöht. Dies ist insbesondere bei geringen Fliesstiefen und in breiten Gerinnen zu erwarten. Daher wird zur Beurteilung der Sohlmorphologie die Regimetheorie nach Ahmari & da Silva (2011) empfohlen (Bild 8). Die Randbedingungen soll-

ten möglichst so gewählt werden, dass keine alternierenden Bänke zu erwarten sind. Ist das nicht möglich, kann alternativ der Uferschutz verstärkt werden, um seitliche Erosion zu verhindern.

5.4 Anforderungen aus Sicht der Fischerei

Gebaute Stufen-Becken-Abfolgen stellen eine naturnähere Alternative zu starren Wildbachsperrn dar, welche sich besser ins Landschaftsbild eingliedern, potenziell diversere Lebensräume für Fische bieten und die Durchwanderbarkeit erleichtern. Im Folgenden werden die Anforderungen aus Sicht der Fischerei zusammengefasst, welche in Gafner (2022) ausführlicher beschrieben sind.

Steile Fließgewässer im Anwendungsbereich von gebauten Stufen-Becken-Abfolgen liegen typischerweise in der (oberen) Forellenregion. Die Leitfischart Bachforelle ist vergleichsweise schwimmstark und bevorzugt kühle, sauerstoffreiche Bäche. Die Lebensraumansprüche von Fischen sind stark an deren Lebenszyklus gekoppelt. Während der Laichzeit der Bachforelle von Oktober bis Januar stellen lockere, gut durchströmte Kiessohlen geeignete Laichplätze dar. Die Brütlinge schlüpfen nach einigen Monaten und verbleiben im Kies, bis der Dottersack aufgebraucht ist.

Die jungen Fische verlassen anschliessend den Kies, beginnen mit der Nahrungsaufnahme und sind dabei auf Flachwasserzonen mit vielen Strukturen und wenig Strömung angewiesen. Adulte Bachforellen halten sich vorwiegend in Kolken mit grosser Wassertiefe mit Versteckmöglichkeiten auf, um zu jagen. Folglich müssen in steilen Fließgewässern geeignete Habitate wie Laichplätze, Flachwasserzonen oder tiefe Kolke vorhanden sein, um den gesamten Lebenszyklus zu durchleben. Die Kolkbecken unterhalb der Stufen, unterspülte Ufer und Holzstrukturen sind beispielsweise gute Ruheplätze für ausgewachsene Bachforellen.

Die Durchwanderbarkeit ist ein wichtiger Anspruch aus Sicht der Fischerei, insbesondere um geeignete Laichplätze aufzufinden. Die Absturzhöhe zwischen Querbauwerken stellt einen wichtigen limitierenden Faktor dar und sollte grundsätzlich möglichst klein gewählt werden. Bei der Anwendung der Bemessungshilfe kann die minimale Absturzhöhe für $m=0,20$ bestimmt werden (Schritt 1). Die überwindbare Absturzhöhe hängt stark von der Grösse der Fische und deren Kondition ab. Tiefe Kolke in den Becken unterhalb der Abstürze sind wichtig für die Überwindung der Querbauwerke. Folglich ist beim Bau von Stufen-Becken-Abfolgen darauf zu achten, dass die Becken nicht vollständig mit Feinmaterial verfüllt werden und direkt nach der Bauausführung bereits ein Kolk vorhanden ist. Ein weiterer wichtiger Faktor sind die Abflussverhältnisse, wobei langanhaltende Trockenperioden mit tiefen Abflüssen die Durchwanderbarkeit massiv erschweren können. Abschliessend kann gesagt werden, dass die Stufen-Becken-Abfolgen im Allgemeinen diversere Lebensräume und bessere Durchwanderbarkeit für die Fische bieten im Vergleich zu den bisher verwendeten Wildbachsperrn.

6. Fazit

Mithilfe von physikalischen Modellversuchen wurden an der VAW die Versagensmechanismen, die Kolkentwicklung und die Stabilität gebauter Stufen-Becken-Abfolgen untersucht. Über 90 Prozent aller Stufenversagen waren entweder auf Kippen der oberen Blockreihe oder auf Unterkolkung infolge Destabilisierung des Stufenfusses zurückzuführen. Das Versagen einer einzelnen Stufe löste in 70 Prozent aller Versuche ein abruptes Systemversagen aus, bei welchem ein rückwärtschreitender Erosionsprozess alle oberhalb liegenden Stufen innerhalb von kur-

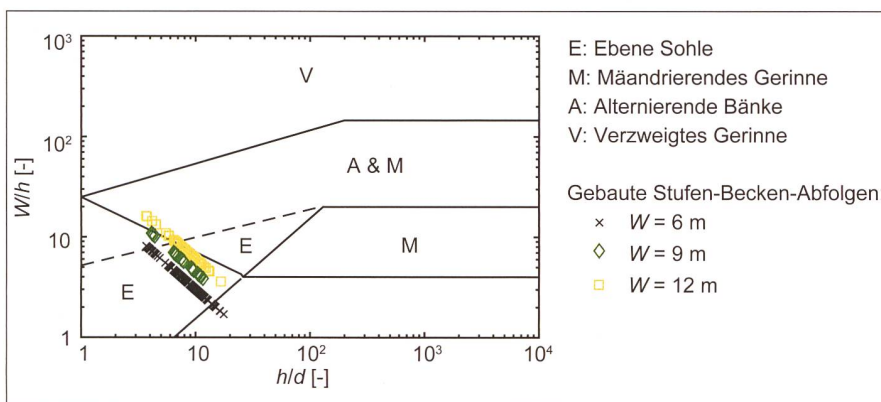


Bild 8: Regimetheorie adaptiert nach Ahmari & da Silva (2011) und Zarn (1997) mit W =Gerinnebreite, h =Abflusstiefe und d =charakteristischer Korndurchmesser; Datenpunkte der Versuche mit gebauten Stufen-Becken-Abfolgen für $W=6$ bis 12 m (als charakteristischer Korndurchmesser wurde d_{84} der Grundmischung verwendet).

zer Zeit zerstörte. Im vorliegenden Artikel wird eine Bemessungshilfe für gebaute Stufen-Becken-Abfolgen präsentiert, mit welcher die Absturzhöhe, der Stufenabstand und die erforderliche Blockgrösse festgelegt und die zu erwartende Stufenhöhe bzw. Kolkentiefe abgeschätzt werden können. Gebaute Stufen-Becken-Abfolgen aus natürlichem Blockmaterial stellen eine naturnahe Alternative zur Sohlstabilisie-

rung von steilen Gebirgsbächen dar und bieten diversere Lebensräume und bessere Durchwanderbarkeit für Fische im Vergleich zu den Sperrentreppen aus Beton.

7. Dank

Die Autorenschaft bedankt sich beim Bundesamt für Umwelt (BAFU) für die Finanzierung des Forschungsprojekts und

bei *Cornel Beffa, Karin Gafner, Eva Gertsch-Gautschi, Lukas Hunzinger* und *Adrian Schertenleib* für die hilfreichen Inputs. Ausserdem sei *Clara Streule* herzlich gedankt für die französische Übersetzung des Artikels.

Quellen:

Aberle, J. (2000). Untersuchung der Rauheitsstruktur zur Bestimmung des Fließwiderstandes in Gebirgsbächen unter Klarwasserabfluss. Dissertation, Universität Fridericiana zu Karlsruhe (TH).
Aberle, J. & Smart, G. M. (2003). The influence of roughness structure on flow resistance on steep slopes. *Journal of Hydraulic Research*, 41, 259–269.
Abrahams, A., Li, G., Atkinson, J. (1995). Step-pool streams: Adjustment to maximum flow resistance. *Water Resources Research*, 31(10):2593–2602.
Ähmari H. & da Silva A.M.F. (2011): Regions of bars, meandering and braiding in da Silva and Yalin's plan. *Journal of Hydraulic Research*, 49, 718–727.
Beffa, C. (2022). Stufen-Becken am Steinbach: Erfahrungen aus der Praxis, in VAW-Mitteilung Nr. 273 (R. Boes, ed.), Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH Zürich.
Gafner, K. (2022). Anforderungen an steile Fließgewässer aus Sicht der Fischerei, in VAW-Mitteilung Nr. 273 (R. Boes, ed.), Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH Zürich.
Kaspar, P. (2017). Stabilität künstlicher Stufen-Becken-Systeme, Masterarbeit, Professur für Wasserbau, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH Zürich.
Hunzinger, L. & Hodel, D. (2022). Stufen-Becken-Abfolgen am Betelriedbach, in VAW-Mitteilung Nr. 273 (R. Boes, ed.), Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH Zürich.
Lamb, M., Dietrich, W., Venditti, J. (2008). Is the critical Shields stress for incipient sediment motion dependent on channel-bed slope? *Journal of Geophysical Research*, 113.

Lange, R. (2019). Stabilität künstlicher Stufen-Becken-Systeme, Masterarbeit, Professur für Wasserbau, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH Zürich.
Maager, F. (2022). Bed stabilization of steep mountain streams with step-pool sequences. VAW-Mitteilungen 272 (R. Boes, ed.), Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH Zürich.
Raudkivi, A. & Ettema, R. (1982). Stability of armour layers in rivers. *Proc. ASCE J. of Hydr. Div*, 108(HY9), p.1047-1057.
Rickenmann, D. (1990). Bedload transport capacity of slurry flows at steep slopes. VAW-Mitteilungen 103 (D. Vischer, ed.), Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH Zürich.
SWV (2021). KOHS-Wasserbautagung 2021 – Schutzkonzepte und ihre Bauten am Lebensende – was nun? www.swv.ch/detail/kohs-wasserbautagung-2021.
Tognacca, C. & Tognacca, S. (2022). Stufen-Becken-Abfolgen an der Maira: Erfahrungen im Labor und in der Praxis, in VAW-Mitteilung Nr. 273 (R. Boes, ed.), Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH Zürich.
VAW (2015). Stufen-Becken-Abfolge, Betelriedgraben. Technischer Bericht Nr. 4319, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH Zürich.
Waldon, M.G. (2004). Estimation of Average Stream Velocity. *Journal of Hydraulic Engineering*, 130(11): 1119–1122.
Weichert, R. (2006). Bed morphology and stability of steep open channels. VAW-Mitteilung Nr. 192 (H.-E. Minor, ed.), Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH Zürich.

Weichert R., Bezzola G.R., Minor H.-E. (2007). Stufen-Becken-Abfolgen als sohlstabilisierende Massnahme. *Wasser Energie Luft*, 99(2): 161-166.
Weichert, R.; Bezzola, G.; Minor, H.E. (2009). Bed erosion in steep open channels. *Journal of Hydraulic Research*, 47(3): 360–371.
Zarn, B. (1997). Einfluss der Flussbettbreite auf die Wechselwirkung zwischen Abfluss, Morphologie und Geschiebetransportkapazität. VAW-Mitteilung Nr. 154 (D. Vischer, ed.), Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH Zürich.

Autorin und Autoren:

Fiona Maager, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH Zürich, Höggerberggring 26, 8093 Zürich (maager@vaw.baug.ethz.ch)
Benjamin Hohermuth, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH Zürich, Höggerberggring 26, 8093 Zürich
Volker Weitbrecht, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH Zürich, Höggerberggring 26, 8093 Zürich
Robert Boes, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH Zürich, Höggerberggring 26, 8093 Zürich

Aide au dimensionnement pour des séquences seuil-mouille construites

Fiona Maager, Benjamin Hohermuth, Volker Weitbrecht, Robert Boes

Résumé

Au cours des dernières décennies, les torrents ont souvent été aménagés au moyen de successions de barrages en béton afin de réduire l'érosion du lit et des berges et de réguler les matériaux charriés. Les séquences seuil-mouille construites en blocs naturels constituent une alternative à la stabilisation du lit par des barrages, qui reste proche de l'état naturel du cours d'eau. Cette approche imite la morphologie de seuil-mouille des cours d'eau à forte pente. La dissipation d'énergie de ces derniers est très efficace en raison des transitions du régime d'écoulement entre les seuils et les mouilles. Dans le cadre d'une thèse de doctorat au laboratoire de recherches hydrauliques, hydrologiques et glaciologiques (VAW) de l'EPF Zurich, des essais sur modèle physique ont été réalisés afin d'étudier la stabilité et les mécanismes de défaillance des séquences seuil-mouille construites. Des pentes du lit entre $S=4\%$ et 8% , des largeurs de canal entre $W=6\text{ m}$ et 12 m , des hauteurs de chute de $H_d=0,4\text{ m}$ à $1,1\text{ m}$ et des espacements des seuils entre $L_d=5,6\text{ m}$ et $18,9\text{ m}$ ont été testés sous la charge des débits spécifiques $q \leq 15\text{ m}^2/\text{s}$, aussi bien sans qu'avec alimentation en sédiments. Les essais ont montré que près de 90% des ruptures de seuils étaient dues soit au basculement de la rangée supérieure de blocs, soit à l'éboulement d'un seuil dû à un sapement. Dans environ 70% des essais, la rupture d'un seuil a entraîné une rupture en chaîne abrupte de toute la séquence, les seuils en amont étant tous détruits en quelques instants. Les principaux résultats ont été résumés dans une aide au dimensionnement pour la pratique, dans laquelle la hauteur de chute, l'espacement des seuils, la profondeur de l'affouillement résultante et le poids des blocs requise sont déterminés.

1. Introduction

En Suisse, de nombreux cours d'eau à forte pente ont été aménagés au cours des dernières décennies avec des barrages rigides (Figure 1a), afin d'empêcher l'érosion du lit et des berges et de réguler le charriage. La construction et l'entretien de ces

barrages sont coûteux, leur rupture est brusque en cas de surcharge, leur valeur écologique est faible et ils s'intègrent mal dans le paysage. Les séquences seuil-mouille construites constituent une alternative de stabilisation du lit proche de l'état naturel. Elles imitent la morphologie typique de seuil-mouille des rivières tor-

rentielles dont la pente du lit est comprise entre 4% et 15% environ. L'alternance entre l'écoulement torrentiel sur les seuils et fluvial dans les mouilles entraîne une dissipation d'énergie importante due aux ressauts hydrauliques associés. Une telle séquence seuil-mouille a par exemple été réalisée sur le tronçon supérieur du Betelriedbach avec une pente du lit de $S=15\%$ (Figure 1b; Hunzinger & Hodel, 2022). Deux autres séquences seuil-mouille construites ont été réalisées sur le Steinbach (SZ) et sur la Maira (GR) (Beffa, 2022; Tognacca & Tognacca, 2022).

Les systèmes de seuil-mouille naturels et dynamiques ont déjà été étudiés systématiquement par Weichert (2006) au laboratoire VAW de l'EPF Zurich. Il en est ressorti une aide au dimensionnement pour les systèmes dynamiques, dans lesquels le matériau de lit est enrichi par des fractions de grands blocs (Weichert et al., 2007). Ce matériau enrichi à large spectre granulométrique est installé à une pente surélevée afin que les séquences seuil-mouille se forment dynamiquement par des processus auto-stabilisants lors de charges élevées. Cette formation est toujours accompagnée d'une diminution de la pente du lit.

Cette approche de dimensionnement contient deux défis principaux. Premièrement, l'enrichissement en grands blocs (particulièrement le mélange des blocs avec le matériau de lit) est difficile à mettre



Figure 1 : a) Barrages dans la Gürbe (BE) avec $S=0,07$ (photo: SWV, 2021); b) séquence seuil-mouille construite dans le Betelriedbach (BE) avec $S=0,15$ (photo: VAW).

en œuvre. Deuxièmement, une érosion considérable de sédiment est attendue. Ainsi, le but de ce projet de recherche était de développer une méthode permettant de construire des séquences seuil-mouille directement dans leur géométrie finale. Cette approche permet d'utiliser moins de blocs et d'éviter la diminution initiale de la pente du lit ainsi que l'érosion de matériau qui en découle.

Dans le cadre d'une thèse de doctorat au laboratoire VAW, EPF Zurich, des essais sur modèle physique ont été réalisés afin d'étudier le développement de l'affouillement, la stabilité et les mécanismes de défaillance de telles séquences seuil-mouille construites. Dans ce qui suit, les essais sur modèle physique (*Chapitre 2*), les principaux résultats concernant les mécanismes de défaillance (*Chapitre 3*) et la stabilité (*Chapitre 4*) sont présentés, puis résumés dans une aide au dimensionnement (*Chapitre 5*). De plus amples informations, notamment sur l'influence de la rugosité des berges et sur les détails expérimentaux, sont disponibles dans *Maager (2022)*.

2. Essais sur modèle physique

2.1 Caractéristiques du modèle physique

Le modèle physique a été construit dans un canal d'essai à l'échelle géométrique 1:20 et exploité en similitude de Froude. Sauf mention contraire, toutes les grandeurs sont indiquées à l'échelle naturelle. Dans le canal d'essai, une séquence de six à huit seuils a été mise en place avec des pentes du lit comprises entre $S=0,04$ et $0,08$ et des largeurs du canal allant de $W=6$ à 12 m. Deux mélanges de base ont été évalués, l'un avec $d_{16}=0,7$ cm et $d_{84}=18$ cm, l'autre avec $d_{16}=0,8$ cm et $d_{84}=21$ cm. Tous deux avaient un diamètre moyen $d_m=9$ cm et un écart-type géométrique de $\sigma_g=(d_{84}/d_{16})^{1/2} \approx 5$.

2.2 Géométrie de seuil-mouille

Les géométries de seuil-mouille étudiées sont présentées dans la *Figure 2*. Ces géométries se sont révélées particulièrement efficaces lors d'études et de travaux de Master réalisés précédemment au laboratoire VAW (*par ex. VAW, 2015; Kaspar, 2017; Lange, 2019*). Les seuils étudiés comprenaient majoritairement deux rangées, avec le poids des blocs moyen compris entre $M_B=4,6 \pm 1$ t et $8,0 \pm 1$ t, ce qui correspond approximativement à un diamètre de bloc $D=1,5$ à $1,7$ m (diamètre sphérique équivalent) (configuration de base *Figure 2.2*). Les blocs les plus grands ont été placés dans

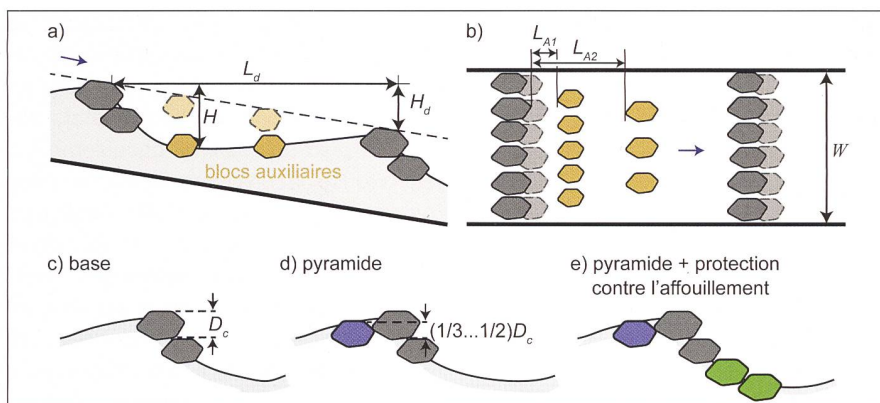


Figure 2 : Géométrie des séquences seuil-mouille construites: a) profil longitudinal, b) vue en plan, c) configuration de base, d) disposition des seuils en pyramide, e) disposition en pyramide avec protection contre l'affouillement, H = hauteur de seuil, H_d = hauteur de chute, L_d = espacement des seuils, L_{A1} , L_{A2} = distances jusqu'à la première et la deuxième rangée de blocs supplémentaires, D_c = axe c des blocs formant le seuil.

la rangée de blocs supérieure. Des blocs auxiliaires (*Figure 2a-b, marqués en jaune*) ont été placés entre les seuils afin de limiter la profondeur de l'affouillement. La première rangée de blocs auxiliaires, d'un poids compris entre $3,8 \pm 0,5$ t, a été placée à environ un diamètre de bloc en aval du seuil ($L_{A1}=D$). La deuxième rangée de blocs de $5,4 \pm 0,5$ t a été placée entre les seuils, au milieu ($L_{A2}=L_d/2$).

En plus de la configuration de base, une disposition des blocs en forme de pyramide avec une autre rangée de blocs au-dessus du seuil a été étudiée (*Figure 2d, bleu*). La superposition verticale entre la rangée de blocs supérieure et cette rangée supplémentaire correspond à environ $1/3$ à $1/2 D_c$, avec D_c = axe c des blocs formant le seuil. La disposition en forme de pyramide a également été étudiée avec une protection contre l'affouillement constituée de deux autres rangées de blocs au pied des seuils (*Figure 2e, vert*). Pour ces rangées supplémentaires (*bleu et vert*), des blocs d'un poids de $3,8 \pm 0,5$ t ont été utilisés.

2.3 Déroulement des essais

Les séquences seuil-mouille construites ont été mises en charge avec un hydrogramme triangulaire, le débit de pointe étant progressivement augmenté à chaque intervalle d'essai. La pointe de crue a été atteinte après $1/4$ de la durée totale et a été maintenue pendant environ 20 minutes. La durée totale de l'hydrogramme était d'environ trois à quatre heures et augmentait proportionnellement à l'augmentation du débit de pointe. Les essais ont été réalisés en conditions d'eau claire (21 essais) et avec une alimentation en sédiments (8 essais). Dans ces derniers es-

sais, au maximum 20% de la capacité de transport calculée selon *Rickenmann (1990)* a été injectée. L'alimentation en sédiments a également été effectuée sous forme d'hydrogramme, la pointe de débit et la pointe de sédiments ayant lieu en même temps.

Le débit spécifique q de la pointe de crue a été progressivement augmenté jusqu'à la défaillance de système ($q \leq 15$ m²/s). La défaillance de système a été définie par un débit q_f (1%) pour lequel la pente moyenne du lit S a diminué de plus de 1%. Ainsi, le système est resté stable jusqu'à l'intervalle précédent avec un débit spécifique q_{stab} , pour lequel la pente du lit a diminué de moins de 1%.

2.4 Instrumentation

La vitesse d'écoulement v , moyennée sur la longueur du tronçon, a été mesurée pendant la pointe de crue par la méthode de dilution de sel (*Waldon, 2004*). Après chaque hydrogramme, le fond du lit a été séché et un modèle numérique d'élévation à haute résolution a été généré par la technique photogrammétrique de Structure from Motion (SfM). A partir de ces données, la pente moyenne du lit S et l'écart-type du lit σ_z ont été déterminés selon *Aberle & Smart (2003)*. L'écart-type est une mesure de la rugosité du lit qui, comparée aux diamètres de grains caractéristiques d_{50} ou d_{84} , tient directement compte de la rugosité de forme des séquences seuil-mouille.

3. Mécanismes de défaillance

3.1 Rupture de seuils individuels

Dans les 21 essais réalisés en conditions d'eau claire, 51% des ruptures de seuils individuels étaient dues au basculement de la rangée supérieure de blocs (*Figure 3a*),

plus que trois quarts des blocs basculant dans le sens de l'écoulement et près d'un quart dans le sens contraire. En outre, environ 44% des seuils ont rompu en raison d'éboulement de la rangée inférieure de blocs à la suite d'un sapement (*Figure 3b*). Les 5% restants étaient dues à l'érosion interne du matériau fin. Dans les huit essais avec une alimentation en sédiments, 53% des ruptures de seuils étaient dues au sapement et 31% au basculement de la rangée supérieure de blocs. Les mécanismes de rupture moins fréquemment observés étaient l'érosion directe des blocs formant les seuils (11%), le remplissage de la mouille (3%) et l'érosion interne (2%).

En synthèse, dans tous les essais, 46% des ruptures de seuils étaient dues au basculement de la rangée supérieure de blocs et 45% au sapement, ces deux processus représentant plus de 90% de toutes les ruptures de seuils. Il est à noter que la rupture due au sapement est plus fréquente dans les essais avec alimentation en sédiments. Initialement, il était présumé que la rupture due au sapement soit plus fréquente dans des conditions d'eau claire, en raison de plus grandes profondeurs de l'affouillement. Les raisons suivantes expliquent cette divergence. Pre-

mièrement, en conditions d'eau claire, les seuils ont rompu à la suite d'un basculement avant d'atteindre la profondeur de l'affouillement critique ou la déstabilisation du pied du seuil. Le basculement a été favorisé par une exposition accrue des blocs formant les seuils. Celle-ci était plus importante dans les essais en eau claire en raison de l'érosion interne des matériaux fins. En outre, dans les essais avec alimentation en sédiments, les seuils ont généralement résisté à des charges plus importantes, ce qui a conduit à des affouillements plus profonds (sous la charge de débits spécifiques plus élevés).

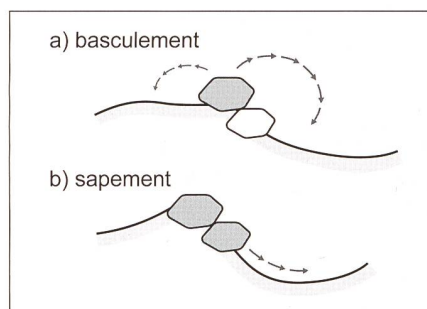


Figure 3: Représentation schématique des mécanismes les plus fréquents menant à la rupture des seuils individuels.

Les mécanismes de rupture les plus fréquents, soit le basculement et le sapement, ont pu être évités par les modes de construction en «pyramide» (*Figure 2d*) et «pyramide avec protection contre l'affouillement» (*Figure 2e*), ou n'ont été observés qu'en cas de charges plus importantes. Lors de la première configuration, l'ajout d'une rangée de blocs au-dessus du seuil a réduit l'exposition des blocs supérieurs, réduisant ainsi la probabilité d'une rupture du seuil due à un basculement dans le sens de l'écoulement ou dans le sens contraire. Quant à la configuration «pyramide+protection contre l'affouillement», avec deux rangées de blocs supplémentaires au pied du seuil, a empêché la rupture due au sapement.

3.2 Défaillance de séquence

Dans les essais, des défaillances de séquence graduelles (30%) et abruptes (70%) ont pu être observées. Dans le cas de la défaillance de séquence graduelle, la pente du lit a diminué progressivement par petites étapes sur plusieurs niveaux de charge. En revanche, dans le cas d'une défaillance de séquence abrupte, la pente du lit a diminué abruptement de (nettement) plus de 1% en l'espace d'un niveau de charge.

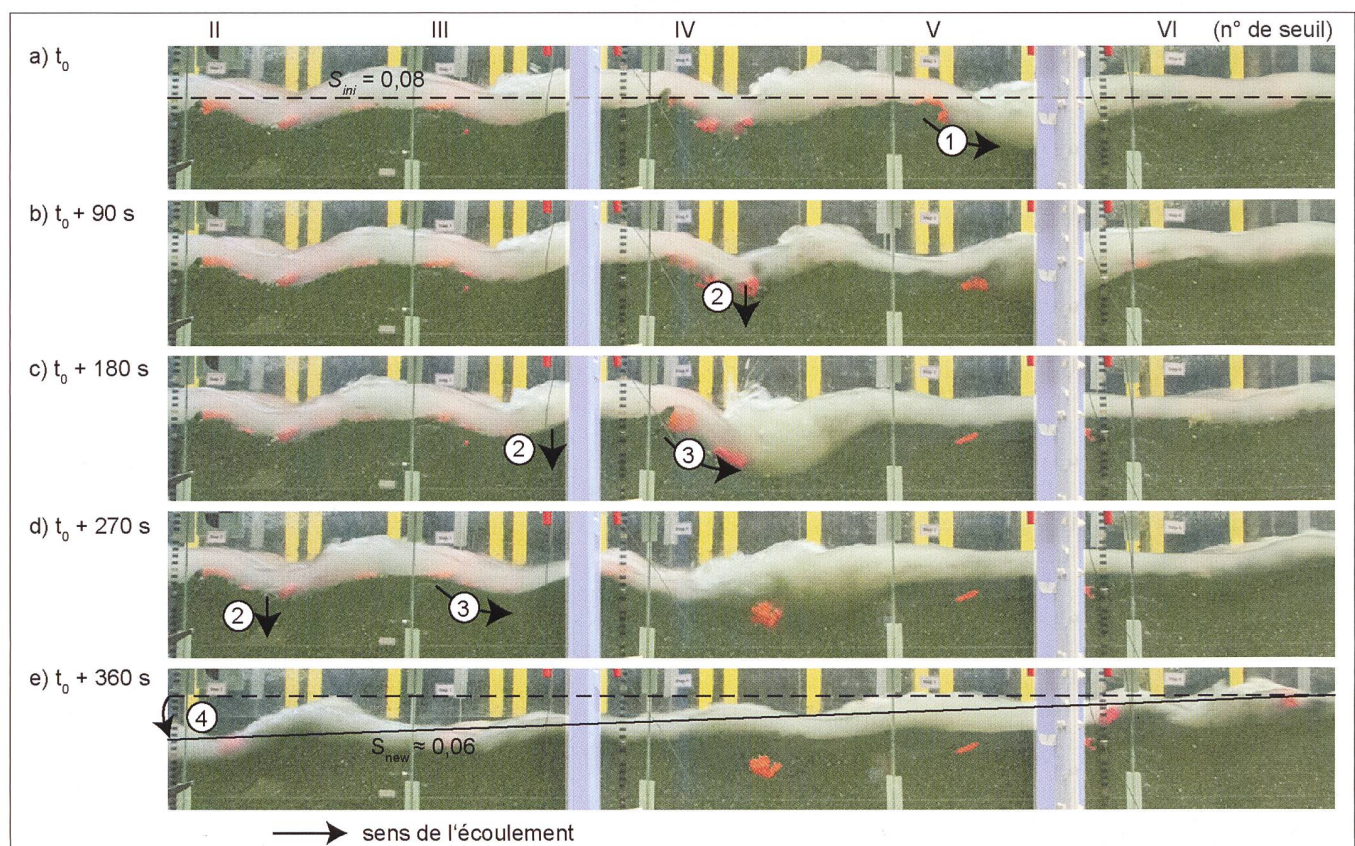


Figure 4: Exemple de défaillance abrupte du système ($S=0,08$, $W=6\text{m}$, $M_B=4,6\text{t}$, $H_d=1,1\text{m}$, $L_d=14\text{m}$, avec alimentation en sédiments) à $q=8,75\text{m}^2/\text{s}$; photo latérale du canal d'essai (temps à l'échelle naturelle) ; ① rupture initiale d'un seuil suite à un sapement, ② augmentation de la profondeur de l'affouillement du seuil en amont, ③ rupture du seuil en amont, ④ érosion de rotation entraînant une réduction de la pente moyenne du lit.

La défaillance de séquence abrupte est illustrée ci-dessous à l'aide d'un exemple (Figure 4).

L'image du haut (Figure 4a) représente une photo latérale de la séquence seuil-mouille pour un essai avec une pente du lit initiale $S=0,08$. Au moment t_0 , le seuil V a rompu dû à un sapement, ce qui a entraîné une augmentation rapide de la profondeur de l'affouillement du seuil IV situé en amont. Au moment $t_0+(180 \dots 270\text{s})$, environ quatre minutes après la rupture initiale du seuil V, le seuil IV a rompu, ce qui a entraîné une augmentation de la profondeur de l'affouillement du seuil III situé en amont. Ce processus d'érosion rétrograde a détruit tous les seuils en amont en l'espace de cinq à dix minutes (échelle naturelle!). Par la suite, le lit a été érodé et a subi une rotation autour du point fixe au seuil VI, menant à une diminution de pente moyenne du lit d'environ $\Delta S=0,02$. L'abaissement maximal auquel on peut s'attendre dans la section amont dépend fortement de la position du seuil, qui initie l'érosion rétrograde par sa rupture. Les plus grands abaisséments sont à prévoir pour la rupture du seuil le plus bas du système. La connaissance de la stabilité maximale des séquences seuil-mouille construites est donc très importante pour éviter une rupture en chaîne soudaine.

4. Stabilité

4.1 Principaux paramètres d'influence

Les essais ont montré que le poids moyen des blocs M_B influençait grandement la stabilité des seuils. Selon la Figure 5, la stabilité augmente avec le poids des blocs M_B , si tous les autres paramètres sont maintenus constants. En outre, il apparaît que la stabilité ait augmenté dans les essais avec alimentation en sédiments (carrés remplis) par rapport aux essais sans alimentation en sédiments. D'une part, la profondeur de l'affouillement diminue en conditions de charriage élevé, raison pour laquelle la rupture due au sapement ne peut être attendue que pour des charges importantes. D'autre part, moins de matériau fin est lessivé, ce qui rend la rangée supérieure de blocs moins exposée au courant. Par conséquent, le cas de rupture par basculement est également moins probable dans des conditions d'apport en sédiments.

Outre le poids des blocs et l'apport en sédiments, la disposition des blocs formant les seuils a également joué un rôle important en termes de stabilité. Les configurations en «pyramide» (Figure 2d) et «pyramide avec protection contre l'affouillement» (Figure 2e) ont chacune résisté à

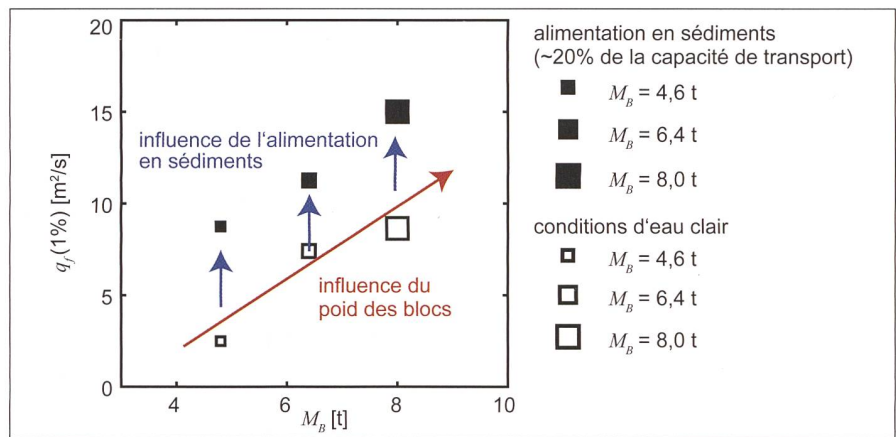


Figure 5: Influence du poids moyen des blocs M_B et de l'alimentation en sédiments sur la stabilité des séquences seuil-mouille construites; Essais avec $S=0,08$, $W=6\text{ m}$, $H_d=1,1\text{ m}$, $L_d=14\text{ m}$, $q_f\text{ (1\%)} = \text{débit spécifique menant à la défaillance du système}$.

une charge spécifique plus importante que la configuration de base. Il convient toutefois de noter que, entre la configuration de base et la configuration en «pyramide+protection contre l'affouillement», la densité surfacique est pratiquement doublée. Ceci aura un impact négatif sur les coûts d'un projet.

4.2 Mécanismes d'adaptation à une charge croissante

Aberle (2000) a développé un diagramme de stabilité pour les séquences seuil-mouille naturelles à l'aide de données issues d'es-

sais sur modèle physique (Figure 6a). L'état stable d'un canal est décrit par l'équation suivante:

$$q^* = \frac{q}{\sqrt{g\sigma_z^3}} = 0,20 S^{-1,3} \quad (1)$$

avec g = l'accélération de la pesanteur. Selon l'équation (1), la combinaison d'un débit spécifique q et d'une pente du lit S nécessite une rugosité du lit σ_z pour résister à la charge. Si l'on augmente le débit spécifique q , le système, qui était stable auparavant, se déplace vers un état instable (Figure 6a).

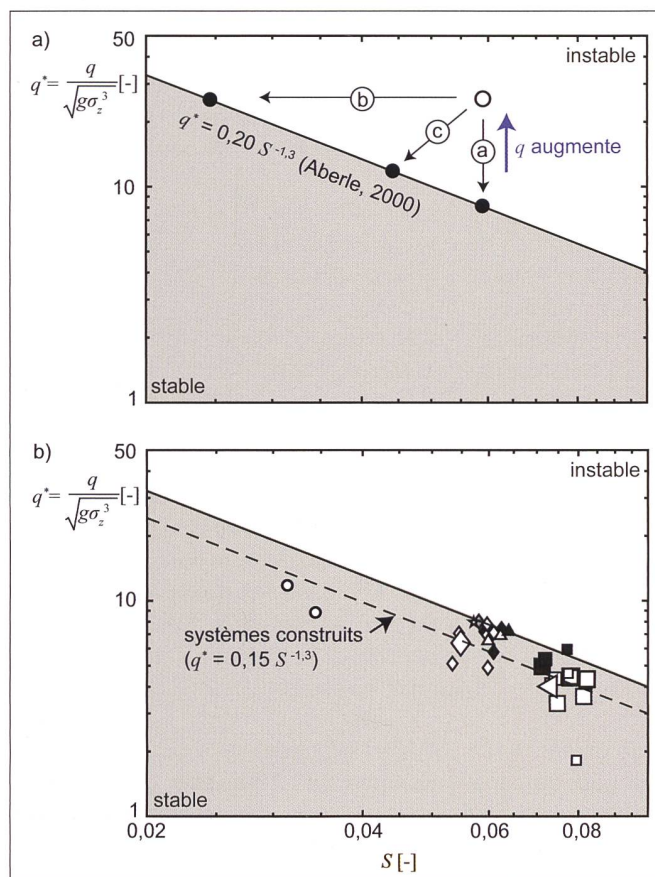


Figure 6: Diagramme de stabilité de Aberle (2000), modifié par Weichert et al. (2009): a) Séquences seuil-mouille naturelles; b) q^* au débit spécifique q_{stab} , pour lequel le système était tout juste stable, des 29 essais de séquences seuil-mouille construites (points vides: conditions d'eau claire, points remplis: alimentation en sédiments).

Il existe deux mécanismes de base permettant au lit de s'adapter à l'augmentation de la charge hydraulique: (a) Elle est compensée par une augmentation de la rugosité du lit, un nouvel état stable étant atteint avec une pente du lit maintenue (*Figure 6a, trajectoire a*). Cette augmentation de la rugosité du lit peut être obtenue notamment par la création d'un pavage ou par l'optimisation de la géométrie du lit (par exemple en formant des séquences seuil-mouille). (b) La charge croissante est compensée au moyen de la diminution de la pente du lit par une érosion de rotation autour d'un point fixe en aval. Le système instable se déplace ainsi vers la gauche (*Figure 6a, trajectoire b*). Les deux processus peuvent également se produire simultanément, le système se déplaçant alors sur la *trajectoire (c)* vers un nouvel état stable.

Les essais ont montré que ces mécanismes d'adaptation sont transposables à des séquences seuil-mouille construites. La *Figure 6b* montre les valeurs de q^* des 29 essais de séquences seuil-mouille construites évaluées au débit spécifique pour lequel le système était tout juste stable q_{stab} . On constate donc que la limite de stabilité pour les systèmes naturels selon *Aberle (2000)* s'applique également aux séquences seuil-mouille construites. Les points se situent en grande partie en dessous de cette limite de stabilité des systèmes naturels, car le système construit se voit imposer de l'extérieur une géométrie seuil-mouille optimisée (σ_z a donc tendance à être plus grand). Dans les systèmes naturels, il faudrait des q nettement plus importants pour obtenir une telle rugosité du lit. De plus, la géométrie construite et optimisée est moins robuste en cas de rupture par rapport au système naturel, car la rupture d'un seul seuil peut potentiellement déclencher une rupture en chaîne du système. Dans les systèmes naturels, les seuils sont disposés de manière moins régulière et la densité surfacique de blocs est généralement plus importante, ce qui conduit à un système plus robuste. Par conséquent, la limite de stabilité suivante a été définie pour les séquences seuil-mouille construites (*Figure 6b, ligne pointillée*):

$$q^* = \frac{q}{\sqrt{g\sigma_z^3}} = 0,15 S^{-1,3} \quad (2)$$

Cette équation permet de déterminer la rugosité du lit σ_z requise pour un canal avec un débit de dimensionnement q et une pente du lit cible S . Il s'agit là de l'élément central de l'aide au dimensionnement

développée. En outre, il existe une relation linéaire entre la rugosité du lit σ_z et la hauteur de seuil H , ce qui permet de définir la géométrie des seuil-mouille. Il est nécessaire que la rugosité de lit requise soit atteinte et que les seuils ne rompent par basculement ou sapement avant d'avoir atteint le débit de dimensionnement. C'est pourquoi un critère supplémentaire basé sur la contrainte de cisaillement est notamment appliqué pour déterminer le poids des blocs.

5. Recommandations pour la pratique

5.1 Aide au dimensionnement

Premièrement, il est nécessaire de déterminer la pente du lit S , la largeur du canal W , le débit de dimensionnement Q ou le débit spécifique correspondant $q = Q/W$, ainsi que le diamètre caractéristique des grains d_{84} du matériau de base. Ensuite, la disposition des blocs formant les seuils est provisoirement déterminée. En général, la disposition en pyramide est recommandée (*Figure 2d*), car elle est plus stable par rapport à la configuration de base. Au cours du processus de dimensionnement, la disposition avec protection contre l'affouillement (*Figure 2e*) doit potentiellement être utilisée, en particulier lorsque de grandes profondeurs de l'affouillement sont attendues.

L'aide au dimensionnement est divisée en quatre étapes résumées dans la *Figure 7* avec un exemple de dimensionnement. L'aide au dimensionnement a été développée pour les plages de paramètre suivantes:

- $S = 0,04 \dots 0,08$
- $L_d/W = 0,8 \dots 3,1$
- $H_d/D = 0,3 \dots 0,8$
- $D/d_{84} = 6,7 \dots 10,6$
- Nombre de Froude: $F = 0,53 \dots 1,16$
- $W/h = 1,7 \dots 16,1$
- Débit solide: $q_{s,in} < 20\%$ de la capacité de transport

L'aide au dimensionnement permet de déterminer la hauteur de chute H_d , l'espacement des seuils L_d , la hauteur de seuil H pour les conditions d'eau claire, ainsi que H_s pour les conditions avec apport de sédiments et le diamètre D des blocs formant les seuils.

Étape 1 : Rugosité du lit requise

La rugosité du lit requise $\sigma_{z,req}$ est calculée pour q et S en utilisant le diagramme de stabilité (*Figure 6b*). L'équation suivante permet donc de calculer $\sigma_{z,req}$:

$$\sigma_{z,req} = \left(\frac{q}{m S^{-1,3} \sqrt{g}} \right)^{2/3} \quad m = 0,15 [0,15 \dots 0,20] \quad (3)$$

Où $\sigma_{z,req}$ est la rugosité du lit requise dans le système de seuil-mouille pour dissiper l'énergie engendrée par une certaine combinaison de S et q . Cependant, le système ne peut évoluer vers cet état que si les seuils restent stables. Dans un premier temps, le lit ne s'adapte que par l'augmentation de la rugosité du lit, c'est-à-dire par l'affouillement des mouilles (*trajectoire (a) dans la Figure 6a*). Le paramètre $m = 0,15$ provient d'une analyse de régression pour les systèmes de seuil-mouille construits et $m = 0,20$ de l'équation développée par *Aberle (2000)* pour les systèmes naturels. Il est recommandé d'appliquer une valeur $m = 0,15$ et d'effectuer une analyse de sensibilité, car ce paramètre est sensible à la hauteur de chute H_d et à l'espacement des seuils L_d (voir étape 2). La valeur $m = 0,15$ définit une limite supérieure pour $\sigma_{z,req}$, donc une valeur maximale de la hauteur de chute H_d ainsi que l'espacement des seuils L_d . En appliquant $m = 0,20$, il en résulte une limite inférieure pour $\sigma_{z,req}$ et des valeurs minimales pour H_d et L_d . En conséquence, un système avec $m = 0,15$ est plutôt conservateur en ce qui concerne la rugosité du lit. En revanche, des blocs nettement plus grands sont nécessaires afin que les seuils restent stables et ne rompent pas avant que cette rugosité de lit ne soit atteinte par affouillement.

Étape 2 : Géométrie de seuil-mouille

La hauteur de chute H_d peut être calculée à l'aide de l'équation suivante:

$$H_d = \left(\frac{(\sigma_{z,req} - 0,5 d_{84}) d_{84}^{7/20} (s - 1) g^{1/5}}{0,52 q^{2/5} S^{1/6}} \right)^{4/3} \quad (4)$$

avec $s = \rho_s / \rho$ = la densité relative des sédiments. L'espacement des seuils L_d , la hauteur de seuil H (eau claire) et H_s (alimentation en charriage) et la rugosité du lit $\sigma_{z,Hs}$ résultante (pour la condition avec apport en charriage qui est plus probable dans la plupart des cas d'application) sont déterminées à l'aide des équations (5) à (7):

$$L_d = H_d / S; \quad L_{d,min} = W \quad (5)$$

$$H = 2,23 \frac{q^{2/5} S^{11/12} L_d^{3/4}}{d_{84}^{7/20} (s - 1) g^{1/5}}; \quad H_s = 0,90 H \quad (6)$$

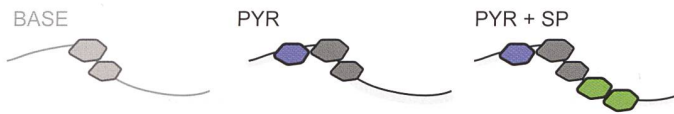
$$\sigma_{z,Hs} = 0,50 d_{84} + 0,26 H_s \quad (7)$$

L'équation (7) décrit la relation linéaire entre la hauteur de seuil et la rugosité du lit, qui

SÉQUENCE SEUIL-MOUILLE: AIDE AU DIMENSIONNEMENT

Conditions cadres

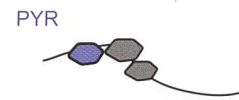
- > Définir la pente du lit, la largeur du canal, le débit (spécifique) de dimensionnement et la granulométrie caractéristique
- > Choix de la disposition des blocs (PYR ou PYR+SP conseillées)



$$S = 0,065, W = 8 \text{ m}$$

$$Q = 40 \text{ m}^3/\text{s}, q = 5 \text{ m}^2/\text{s}$$

$$d_{84} = 0,25 \text{ m}$$



Étape 1: Rugosité du lit requise

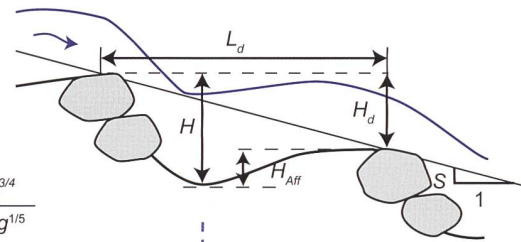
$$\text{Éq. (3)} \quad \sigma_{z, \text{req}} = \left(\frac{q}{m S^{-1,3} \sqrt{g}} \right)^{2/3} \quad m = 0,15 [0,15 \dots 0,20]$$

$$\sigma_{z, \text{req}} = 0,45 \text{ m}$$

Étape 2: Géométrie de seuil-mouille

Éq. (4) à (7)

$$H_d = \left(\frac{(\sigma_{z, \text{req}} - 0,5 d_{84}) d_{84}^{7/20} (s-1) g^{1/5}}{0,52 q^{2/5} S^{1/6}} \right)^{4/3} \left\{ \begin{array}{l} L_d = H_d / S \\ H = 2,23 \frac{q^{2/5} S^{11/12} L_d^{3/4}}{d_{84}^{7/20} (s-1) g^{1/5}} \\ H_s = 0,90 H \\ \sigma_{z, Hs} = 0,50 d_{84} + 0,26 H_s \end{array} \right.$$



$$H_d = 0,79 \text{ m}$$

$$H = 1,41 \text{ m}, H_s = 1,27 \text{ m}$$

$$\sigma_{z, Hs} = \sigma_{z, \text{req}} = 0,45 \text{ m}$$

- > Vérifier l'espacement minimal des seuils: $L_d / W \geq 1$

$$L_d = 12,1 \text{ m}, L_d / W = 1,5 \text{ (ok)}$$

- > Hauteur relative de seuil: Éq. (8) $H / H_d \leq c$
 $c = 1,8 [1,1 \dots 2,6]$

$$H / H_d = 1,8 \text{ (~ok)}$$



$c > 1,8$: Considérer une protection contre l'affouillement (PYR+SP)

Étape 3: Hydraulique

$$\text{Éq. (9)} \quad v = 0,96 g^{0,20} S^{0,20} q^{0,60} \sigma_{z, Hs}^{-0,40} \quad h = q / v$$

$$v = 3,2 \text{ m/s}, h = 1,6 \text{ m}$$

- > Vérifier le régime d'écoulement $F < 1$

$$F = 0,80 \text{ (ok)}$$

Étape 4: Taille de blocs requise

$$\text{Éq. (12)} \quad D = \frac{h S}{(s-1) b (0,15 S^{0,25})} \quad b = 0,56 [0,43 \dots 0,69]$$

$$D = 1,47 \text{ m}$$

$$\text{Éq. (13)} \quad M_B = \frac{D^3 \rho_s \pi}{6}$$

$$M_B = 4,4 \text{ t}$$

- > Mélange bimodal Éq. (14) $a_1 < D / d_{84} < a_2$ $a_1 = 6$
 $a_2 = 11$

$$D / d_{84} = 5,8 \text{ (~ok)}$$



$a_2 > 11$: Appliquer une couche filtrante

- > Hauteur de seuil / taille de blocs Éq. (15) $H / D < e$
 $e = 1,0 [1,0 \dots 1,5]$

$$H / D = 0,96 \text{ (ok)}$$



$e > 1,0$: Considérer une protection contre l'affouillement (PYR+SP)

Figure 7: Aide au dimensionnement pour des séquences seuil-mouille construites: Aperçu avec un exemple de dimensionnement (en bleu).

a également été déterminée à partir des données des essais. L'espacement des seuils L_d minimale ne doit pas être inférieure à la largeur du canal, soit $L_{d,min}/W \geq 1$. Il convient de mentionner que l'équation (4) résulte de la combinaison des équations (5) à (7) résolues pour H_d avec la condition $\sigma_{z,reg} = \sigma_{z,Hs}$.

Afin d'éviter la rupture des seuils due au sapement, la hauteur de seuil adimensionnelle H/H_d ne doit pas dépasser une valeur c :

$$H/H_d \leq c \quad c = 1,8 [1,1 \dots 2,6] \quad (8)$$

Cette valeur correspond bien aux observations de séquences seuil-mouille naturelles, dans lesquelles H/H_d se situe approximativement entre $c = 1$ et 2 (Abrahams et al., 1995). Pour les grandes hauteurs de seuil avec $1,8 < c < 2,6$, il est recommandé de prévoir une protection contre l'affouillement (Figure 2e) afin de réduire le risque de la rupture des seuils due au sapement.

Étape 3: Hydraulique

Pour évaluer la stabilité des blocs formant les seuils, il faut déterminer la contrainte de cisaillement adimensionnelle θ . Pour ce faire, la vitesse d'écoulement moyenne sur l'ensemble du tronçon est calculée à l'aide de l'approche d'Aberle & Smart (2003):

$$v = 0,96 g^{0,20} S^{0,20} q^{0,60} \sigma_{z,Hs}^{-0,40} \quad (9)$$

Ce calcul permet de déterminer la profondeur d'écoulement moyenne avec $h = q/v$, qui est nécessaire à l'étape 4 pour déterminer la contrainte de cisaillement. Le régime d'écoulement devrait se situer dans le domaine fluvial ($F < 1$) sur l'ensemble du tronçon en seuil-mouille, afin que des ressauts hydrauliques se forment dans les mouilles.

Étape 4: Taille des blocs requise

Le diamètre requis D des blocs formant les seuils est déterminé à l'aide de la contrainte de cisaillement critique, qui ne doit pas être dépassée. La contrainte de cisaillement attendue θ est calculée avec la profondeur d'écoulement h déterminée à l'étape 3:

$$\theta = \frac{hS}{(s-1)D} \quad (10)$$

La contrainte de cisaillement critique θ_c est multipliée par un facteur de sécurité b :

$$\theta \leq b \theta_c \quad (11)$$

où $b = 0,56 \pm 0,13$ a été déterminé à partir des essais sur modèle. La valeur de $b \approx 1$

s'applique aux lits recouverts en continu de matériau de diamètre D . Le système de seuil-mouille considéré est cependant constitué d'un mélange bimodal de blocs de diamètre D et de matériau avec un certain d_{84} . Les blocs de diamètre D peuvent donc être mobilisés dès $b < 1$. Par conséquent, la contrainte de cisaillement critique $\theta_c = 0,15 S^{0,25}$ selon Lamb et al. (2008) est utilisée. Cela permet de tenir compte de l'augmentation de θ_c pour les cours d'eau à forte pente. Si l'équation (10) est introduite dans (11) et résolue selon D , il en résulte:

$$D \geq \frac{hS}{(s-1)b(0,15 S^{0,25})} \quad (12)$$

Pour le dimensionnement, une valeur $b = 0,56$ est recommandée. Le poids moyen des blocs formant les seuils M_B est ensuite déterminé:

$$M_B = \frac{D^3 \rho_s \pi}{6} \quad (13)$$

avec ρ_s = la densité du matériau de blocs. Pour le paramètre b , une analyse de sensibilité est recommandée afin d'évaluer les incertitudes relatives au poids des blocs. La valeur conservatrice $b = 0,43$ conduit à des diamètres de blocs D plus importants et est recommandée, par exemple, dans les situations où les dommages potentiels sont élevés ou si l'on s'attend à un faible apport en sédiments. En revanche, $b = 0,69$ convient pour les dommages potentiels faibles ou les tronçons courts.

Deux autres critères doivent être remplis pour éviter une rupture des seuils avant que le débit de dimensionnement ne soit atteint. Comme il s'agit d'un mélange bimodal, les limites suivantes s'appliquent à D/d_{84} :

$$a_1 < D/d_{84} < a_2 \quad a_1 = 6; a_2 = 11 \quad (14)$$

Selon Raudkivi & Ettema (1982), pour $D/d_{84} < 6$, il faut s'attendre à une érosion directe des gros blocs, alors que pour $D/d_{84} > 17$, les gros blocs peuvent s'enfoncer dans le matériau de base. Comme les essais ont porté sur des conditions $D/d_{84} \leq 11$, une couche filtrante entre les blocs formant les seuils (et les blocs auxiliaires entre les seuils) et le matériau de base est recommandée dès $D/d_{84} > 11$.

Finalement, le rapport entre la hauteur de seuil et la taille des blocs H/D doit être vérifié:

$$H/D < e \quad e = 1,0 [1,0 \dots 1,5] \quad (15)$$

où $e = 1,0$ ne doit pas être dépassé. Pour $1,0 < H/D < 1,5$, il convient de prévoir une

protection contre l'affouillement (configuration «pyramide+protection contre l'affouillement», Figure 2e) afin de réduire le risque de rupture de seuils due au sapement.

5.2 Incertitudes et limitations

Afin d'évaluer les incertitudes de la méthode de dimensionnement, il est recommandé de réaliser une analyse de sensibilité concernant les paramètres m et b , qui permettent de définir la géométrie de seuil-mouille (hauteur de chute H_d , espacement des seuils L_d) et la taille D des blocs formant les seuils. Le Tableau 1 présente les résultats de l'analyse de sensibilité pour l'exemple de dimensionnement illustré à la Figure 7. Pour le paramètre $m = 0,15$, il en résulte de grandes hauteurs de chute H_d et, par conséquent, un espacement des seuils L_d important ainsi que de grandes hauteurs de seuils H . La rugosité du lit est donc plus importante, ce qui entraîne des vitesses d'écoulement moyennes et des nombres de Froude plus faibles. En raison de la hauteur de seuil plus importante, des blocs plus grands sont toutefois nécessaires pour que le rapport H/D ne soit pas trop élevé. Le diamètre des blocs D et le poids moyen des blocs M_B varient d'un facteur deux pour $b = 0,56 \pm 0,13$. Pour l'hypothèse conservatrice $b = 0,43$, le poids des blocs nécessaire est doublé alors que pour $b = 0,69$, il est presque réduit de moitié. Cette large fourchette de M_B reflète la complexité des cours d'eau à forte pente. Même en laboratoire sous conditions contrôlées, certains paramètres influençant la stabilité des seuils ne peuvent être décrits assez précisément pour réduire la variabilité. Ces paramètres comprennent la taille effective des blocs, leur forme, leur emplacement et exposition, ainsi que la composition du matériau de base.

Les essais ont été réalisés dans un canal d'essai droit avec des parois rectangulaires et lisses. Par conséquent, les effets de la géométrie et de la rugosité des berges ainsi que les effets de courbes sont négligés. Les essais avec des parois lisses représentent des conditions plutôt conservatrices, car la dissipation d'énergie le long des berges lisses est faible. Les contraintes de cisaillement sont donc plus grandes par rapport à des berges rugueuses. De plus, l'emboîtement des blocs avec les berges, qui permet de stabiliser les seuils, est moins probable sur des berges lisses que sur des berges rugueuses. Pour surmonter les limitations décrites ci-dessus, les points suivants doivent être pris en compte lors du dimensionnement:

M	b	H_d	L_d	H	H/H_d	F	D	M_B	D/d_{84}	H/D
[-]	[-]	[m]	[m]	[m]	[-]	[-]	[m]	[t]	[-]	[-]
0,15	0,43	0,79	12,1	1,4	1,8	0,80	1,91	9,7	7,7	0,73
	0,56						1,47	4,4	5,9	1,00
	0,69						1,19	2,4	4,8	1,18
0,20	0,43	0,55	8,4	1,1	2,0	0,90	1,77	7,7	7,1	0,60
	0,56						1,36	3,5	5,4	0,78
	0,69						1,10	1,9	4,4	0,97

Tableau 1: Analyse de sensibilité pour l'exemple de dimensionnement présenté dans la Figure 6 (en gras: les valeurs limites concernant D/d_{84} ou H/D ne sont pas respectées).

- Pour la stabilité des seuils, il est important d'assurer une connexion par adhérence aussi bien entre les blocs formant les seuils qu'entre les blocs et les berges.
- Dans le cas de talus inclinés, il faut veiller à ce que les blocs soient soigneusement intégrés dans les berges.
- Les blocs formant les seuils à l'extérieur des courbes sont soumis à une charge hydraulique accrue.

5.3 Indications pour l'exécution

La stabilité des berges est un facteur déterminant pour la stabilité des séquences seuil-mouille construites. Si les berges sont érodées, les seuils risquent d'être baignés ou détruits, ce qui peut à son tour déclencher une rupture en chaîne. La profondeur de fondation de la protection des berges est déterminée en premier lieu par la hauteur de seuils attendue. L'équation (6) permet d'estimer la hauteur moyenne des seuils H , tenant en compte que, dans les essais sur modèle, la hauteur maximale des seuils individuels était jusqu'à 50% plus élevée que la hauteur moyenne des seuils. Par conséquent, il faut s'attendre à une hauteur maximale des seuils $H_{max}=1,5H$.

Dans les canaux larges, des formes de lit telles que des bancs alternés peuvent

se former. Ces formes de lit entraînent un mouvement pendulaire du courant principal et augmentent localement la charge hydraulique sur les blocs formant les seuils au niveau des berges. On peut s'attendre à ce que cela soit le cas en particulier lorsque la profondeur du cours d'eau est faible et dans des canaux larges. C'est pourquoi la théorie des régimes selon *Ahmari & da Silva (2011)* est recommandée pour évaluer la morphologie du lit (Figure 8). Dans la mesure du possible, les contraintes doivent être choisies de manière à éviter les bancs alternés. Si cela n'est pas possible, une alternative consiste à renforcer la protection des berges afin d'empêcher l'érosion latérale.

5.4 Exigences du point de vue de la pêche

Les séquences seuil-mouille construites constituent une alternative aux barrages rigides proche de l'état naturel. Elles s'intègrent mieux dans le paysage, offrent potentiellement des habitats plus diversifiés pour les poissons et facilitent leur migration. Les exigences du point de vue de la pêche, décrites de manière plus détaillée dans *Gafner (2022)*, sont résumées ci-dessous:

Les cours d'eau à forte pente pour lesquels des séquences seuil-mouille

construites sont applicables, se situent typiquement dans la zone (supérieure) de l'habitat de la truite. La truite de rivière, espèce cible, est comparativement très bonne nageuse et préfère les ruisseaux frais et bien oxygénés. Les exigences des poissons en matière d'habitat sont fortement liées à leur cycle de vie. D'octobre à janvier, pendant la période de frai de la truite fario, des lits de gravier meubles et bien irrigués sont nécessaires. Les alevins éclosent au bout de quelques mois et restent dans le gravier jusqu'à ce que le sac vitellin soit épuisé. Les poissons juvéniles quittent ensuite le gravier et commencent à se nourrir. Ils ont besoin de zones d'eau peu profonde avec de nombreuses structures et peu de courant. Les truites fario adultes se trouvent principalement dans des affouillements avec une grande profondeur d'eau et des possibilités de se cacher pour chasser. Par conséquent, afin de permettre à la truite fario d'accomplir l'ensemble de son cycle de vie, les cours d'eau à forte pente doivent disposer de tels habitats. Par exemple, les bassins d'affouillement en aval des seuils, les berges submergées et les structures en bois constituent de bons lieux de repos.

Le maintien de la libre migration du poisson, notamment pour trouver des frayères appropriées, est une exigence importante du point de vue de la pêche. La hauteur de chute entre les ouvrages transversaux représente donc un facteur limitant important et doit en principe être maintenue aussi basse que possible. Lors de l'utilisation du guide de dimensionnement, la hauteur de chute minimale peut être déterminée pour $m=0,20$ (étape 1). La hauteur de chute franchissable dépend fortement de la taille des poissons et de leur condition physique. Des affouillements profonds dans les mouilles en aval des seuils sont importants pour le franchissement des ouvrages transversaux. Dès lors, la construction d'une séquence seuil-mouille doit veiller à ce que les mouilles ne soient pas entièrement remplies de matériaux fins et qu'un affouillement soit déjà présent juste après la construction. Les conditions d'écoulement sont un autre facteur important, car les périodes de sécheresse prolongées avec des débits faibles peuvent rendre la migration du poisson extrêmement plus difficile. En somme, les séquences seuil-mouille offrent généralement des habitats plus diversifiés et un meilleur passage des poissons, contrairement aux barrages utilisés jusqu'à présent.

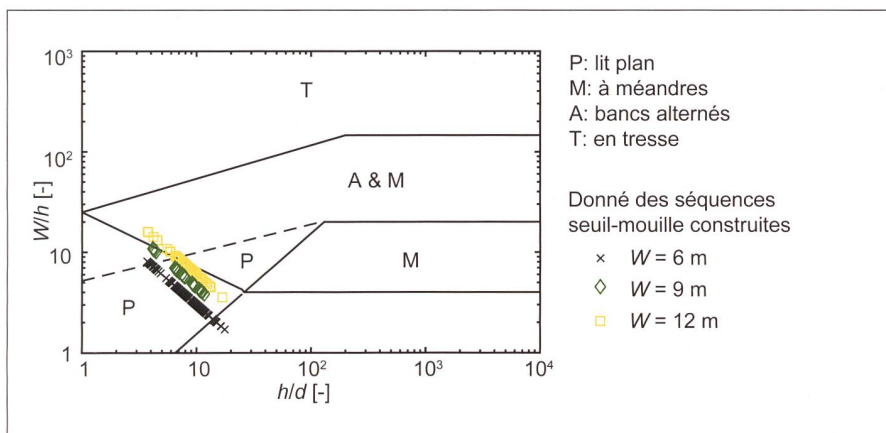


Figure 8: Théorie du régime selon Ahmari & da Silva (2011) avec W =largeur du canal, h =profondeur d'écoulement et d =diamètre caractéristique des grains; points de données des essais avec des séquences seuil-mouille construites pour $W=6$ à 12 m (d_{84} du mélange de base a été utilisé).

6. Conclusion

Les mécanismes de défaillance, le développement de l'affouillement et la stabilité des séquences seuil-mouille construites ont été étudiés à l'aide d'essais sur modèle physique. Plus de 90% des ruptures de seuils étaient dues soit au basculement de la rangée supérieure de blocs, soit au sapement par suite de la déstabilisation du pied de seuil. La défaillance d'un seul seuil a déclenché dans 70% des essais une défaillance abrupte du système, dans laquelle un processus d'érosion rétrograde a détruit en peu de temps tous les seu-

ils situés en amont. Cet article présente une aide au dimensionnement pour les séquences seuil-mouille construites, qui permet de déterminer la hauteur de chute, l'espacement des seuils et la taille des blocs nécessaires, et d'estimer la hauteur des seuils ou la profondeur de l'affouillement attendues. Les séquences seuil-mouille construites en blocs naturels offrent des habitats plus diversifiés et un franchissement plus aisé pour les poissons. Ils constituent donc une alternative à la stabilisation du lit par des barrages en béton, qui est proche de l'état naturel du cours d'eau.

Remerciements

Les auteurs remercient l'Office fédéral de l'environnement (OFEV) pour le financement du projet de recherche ainsi que *Cornel Beffa*, *Karin Gafner*, *Eva Gertsch-Gautschi*, *Lukas Hunzinger* et *Adrian Schertenleib* pour leurs précieuses contributions. En outre, nous remercions chaleureusement *Clara Streule* pour la traduction française de l'article et *Jantina van der Meer* pour la relecture.

Sources:

- Aberle, J. (2000). Untersuchung der Rauheitsstruktur zur Bestimmung des Fließwiderstandes in Gebirgsbächen unter Klarwasserabfluss. Dissertation, Universität Fridericiana zu Karlsruhe (TH).
- Aberle, J. & Smart, G. M. (2003). The influence of roughness structure on flow resistance on steep slopes. *Journal of Hydraulic Research*, 41, 259–269.
- Abrahams, A., Li, G., Atkinson, J. (1995). Step-pool streams: Adjustment to maximum flow resistance. *Water Resources Research*, 31(10):2593–2602.
- 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*, 49, 718–727.
- Beffa, C. (2022). Stufen-Becken am Steinbach: Erfahrungen aus der Praxis, in VAW-Mitteilung Nr. 273 (R. Boes, ed.), Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH Zürich.
- Gafner, K. (2022). Anforderungen an steile Fließgewässer aus Sicht der Fischerei, in VAW-Mitteilung Nr. 273 (R. Boes, ed.), Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH Zürich.
- Kaspar, P. (2017). Stabilität künstlicher Stufen-Becken-Systeme, Masterarbeit, Professur für Wasserbau, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH Zürich.
- Hunzinger, L. & Hodel, D. (2022). Stufen-Becken-Abfolgen am Betelriedbach, in VAW-Mitteilung Nr. 273 (R. Boes, ed.), Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH Zürich.
- Lamb, M., Dietrich, W., Venditti, J. (2008). Is the critical Shields stress for incipient sediment motion dependent on channel-bed slope? *Journal of Geophysical Research*, 113.
- Lange, R. (2019). Stabilität künstlicher Stufen-Becken-Systeme, Masterarbeit, Professur für Wasserbau, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH Zürich.
- Maager, F. (2022). Bed stabilization of steep mountain streams with step-pool sequences. VAW-Mitteilungen 272 (R. Boes, ed.), Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH Zürich.
- Raudkivi, A. & Ettema, R. (1982). Stability of armour layers in rivers. *Proc. ASCE J. of Hydr. Div.*, 108(HY9), p.1047-1057.
- Rickenmann, D. (1990). Bedload transport capacity of slurry flows at steep slopes. VAW-Mitteilungen 103 (D. Vischer, ed.), Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH Zürich.
- SWV (2021). KOHS-Wasserbautagung 2021 – Schutzkonzepte und ihre Bauten am Lebensende – was nun? www.swv.ch/detail/kohs-wasserbautagung-2021.
- Tognacca, C. & Tognacca, S. (2022). Stufen-Becken-Abfolgen an der Maira: Erfahrungen im Labor und in der Praxis, in VAW-Mitteilung Nr. 273 (R. Boes, ed.), Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH Zürich.
- VAW (2015). Stufen-Becken-Abfolge, Betelriedgraben. Technischer Bericht Nr. 4319, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH Zürich.
- Waldon, M.G. (2004). Estimation of Average Stream Velocity. *Journal of Hydraulic Engineering*, 130(11): 1119–1122.
- Weichert, R. (2006). Bed morphology and stability of steep open channels. VAW-Mitteilung Nr. 192 (H.-E. Minor, ed.), Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH Zürich.
- Weichert R., Bezzola G.R., Minor H.-E. (2007). Stufen-Becken-Abfolgen als sohlstabilisierende Massnahme. *Wasser Energie Luft*, 99(2): 161-166.
- Weichert, R.; Bezzola, G.; Minor, H.E. (2009). Bed erosion in steep open channels. *Journal of Hydraulic Research*, 47(3): 360–371.
- Zarn, B. (1997). Einfluss der Flussbettbreite auf die Wechselwirkung zwischen Abfluss, Morphologie und Geschiebetransportkapazität. VAW-Mitteilung Nr. 154 (D. Vischer, ed.), Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH Zürich.

Autrice et auteurs:

Fiona Maager, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH Zürich, Höggerberggring 26, 8093 Zürich (maager@vaw.baug.ethz.ch)

Benjamin Hohermuth, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH Zürich, Höggerberggring 26, 8093 Zürich

Volker Weitbrecht, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH Zürich, Höggerberggring 26, 8093 Zürich

Robert Boes, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH Zürich, Höggerberggring 26, 8093 Zürich