

Bemessungshilfe für gebaute Stufen-Becken-Abfolgen

Fiona Maager, Benjamin Hohermuth, Volker Weitbrecht und Robert Boes

Zusammenfassung

In den vergangenen Jahrzehnten wurden steile Gebirgsbäche mittels Sperrentreppen aus Beton verbaut, um der Sohl- und Seitenerosion entgegenzuwirken und die Geschiebezufuhr zu regulieren. Gebaute Stufen-Becken-Abfolgen aus natürlichem Blockmaterial stellen eine naturnahe Alternative zu diesen Betonsperren dar, wobei die typische Stufen-Becken-Morphologie steiler Gebirgsbäche imitiert wird. Im Rahmen einer Doktorarbeit an der VAW, ETH Zürich, wurden physikalische Modellversuche durchgeführt, um die Kolkentwicklung, die Stabilität und die Versagensmechanismen gebauter Stufen-Becken-Systeme zu untersuchen. Die wichtigsten Parameter hinsichtlich Stabilität sind das Blockgewicht, die Geschiebezufuhr und die Anordnung der stufenbildenden Blöcke. Die häufigsten Versagensmechanismen von einzelnen Stufen waren das Kippen der oberen Blockreihe und die Destabilisierung der unteren Blockreihe infolge Unterkolkung. Das Versagen einer einzelnen Stufe verursachte in 70% der Versuche eine rückwärtsschreitende Erosion, welche die oberhalb liegenden Stufen innerhalb kurzer Zeit zerstörte und zu einer Abnahme der Sohlneigung führte. Basierend auf den Resultaten wurde eine Bemessungshilfe erarbeitet, welche Empfehlungen für den Stufenabstand, die maximale Stufenhöhe und die erforderliche Blockgröße gibt.

1 Einleitung

In der Schweiz wurden steile Gebirgsbäche seit etlichen Jahrzehnten mit Wildbachsperren aus Beton verbaut (Abb. 1a), um die Sohl- und Seitenerosion zu reduzieren und den Geschiebetrieb zu regulieren. Diese starren Bauwerke sind mit hohen Bau- und Unterhaltskosten verbunden, sie versagen schlagartig im Überlastfall, sind wenig wertvoll aus ökologischer Sicht und gliedern sich schlecht ins Landschaftsbild ein. Gebaute Stufen-Becken-Abfolgen aus natürlichem Blockmaterial stellen eine naturnahe Alternative dar, wobei die typische Stufen-Becken-Morphologie steiler Gebirgsbäche mit Sohlneigungen zwischen $S = 0.04$ und 0.15 als Vorbild dient. Im Vergleich zu den Betonsperren bieten sie vielfältigere Lebensräume und verbessern die Durchwanderbarkeit für Fische (Gafner, 2022). Gebaute Stufen-Becken-Abfolgen wurden beispielsweise an der Maira im Kanton Graubünden (Abb. 1b, Tognacca & Tognacca, 2022), am Steinbach im Kanton Schwyz (Beffa, 2022) oder im Betelriedbach im Kanton Bern (Hunzinger & Hodel, 2022) realisiert. Bisher sind jedoch nur wenig Grundlagen für die Bemessung solcher Stufen-Becken-Abfolgen vorhanden, welche die Dimensionierung erleichtern.



Abb. 1 a) Wildbachsperren in der Gürbe (CH), $S \approx 0.07$ (Foto: SWV, 2021); b) Gebaute Stufen-Becken-Abfolge an der Maira (CH), $S \approx 0.08$ (Tognacca & Tognacca, 2022).

Im Rahmen einer Doktorarbeit an der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH Zürich, wurden physikalische Modellversuche durchgeführt, um die Kolkentwicklung, die Stabilität und die Versagensmechanismen solcher gebauten Stufen-Becken-Abfolgen systematisch zu untersuchen. In diesem Beitrag werden der Versuchsaufbau (Kapitel 2) und die wichtigsten Resultate hinsichtlich Stabilität (Kapitel 3) und Versagensmechanismen (Kapitel 4) vorgestellt sowie als Empfehlungen für die Praxis (Kapitel 5) zusammengefasst.

2 Physikalische Modellversuche

Die Modellversuche wurden in einer geraden Versuchsrinne mit rechteckigem Fließquerschnitt im Maßstab 1:20 nach Froudeähnlichkeit durchgeführt, wobei im Folgenden alle Größen im Naturmaßstab angegeben werden. Es wurden Sohlneigungen zwischen $S = 0.04$ und 0.08 und Gerinnebreiten zwischen $W = 6$ und 12 m untersucht. Die Stufen-Becken-Abfolgen bestanden aus sechs bis acht zweilagigen Stufen und wurden mit Stufenabständen zwischen $L_d = 6.7$ und 18.8 m bzw. Absturzhöhen zwischen $H_d = 0.4$ und 1.1 m eingebaut (Abb. 2a). Die Stufenhöhe H bezeichnet die Distanz zwischen der Stufenkrone und dem tiefsten Punkt im Kolk. Folglich ist die Kolktiefe die Differenz aus Stufenhöhe und Absturzhöhe.

Das mittlere Blockgewicht der stufenbildenden Blöcke variierte zwischen $M_B = 4.6 \pm 1$ t und 8.0 ± 1 t, was einem äquivalenten Kugeldurchmesser ($\approx B$ -Achse) von $D = 1.5$ bis 1.7 m entspricht. Zwischen den Stufen wurden zwei Reihen von Zusatzblöcken platziert, um die Ausdehnung des Kolks in der Länge und Tiefe zu begrenzen (Abb. 2a). Die erste Reihe Zusatzblöcke ($M_B = 3.8 \pm 0.5$ t) wurde im Abstand $L_{A1} = D$ und die zweite Reihe ($M_B = 5.4 \pm 0.5$ t) im Abstand $L_{A2} = L_d/2$ eingebaut (Abb. 2b). Neben der Basiskonfiguration (Abb. 2c) wurde eine pyramidenförmige Blockanordnung mit einer zusätzlichen Blocklage oberhalb der Stufe (blaue Blöcke, Abb. 2d) und eine Pyramide mit Kolkenschutz bestehend aus zwei weiteren Blocklagen am Stufenfuß (Abb. 2e, grüne Blöcke) untersucht. Für das Grundmaterial wurden zwei Mischungen mit mittlerem Korndurchmesser $d_m = 9$ cm und unterschiedlichen charakteristischen Korngrößen d_{16} (0.7 und 0.8 cm) und d_{84} (18 und 21 cm) untersucht. Diese Grundmischungen orientieren sich an der Kornverteilung des Gebirgsbachs Kleine Schliere im Kanton Nidwalden. Weitere Information zum Versuchsaufbau können Maager (2022) entnommen werden.

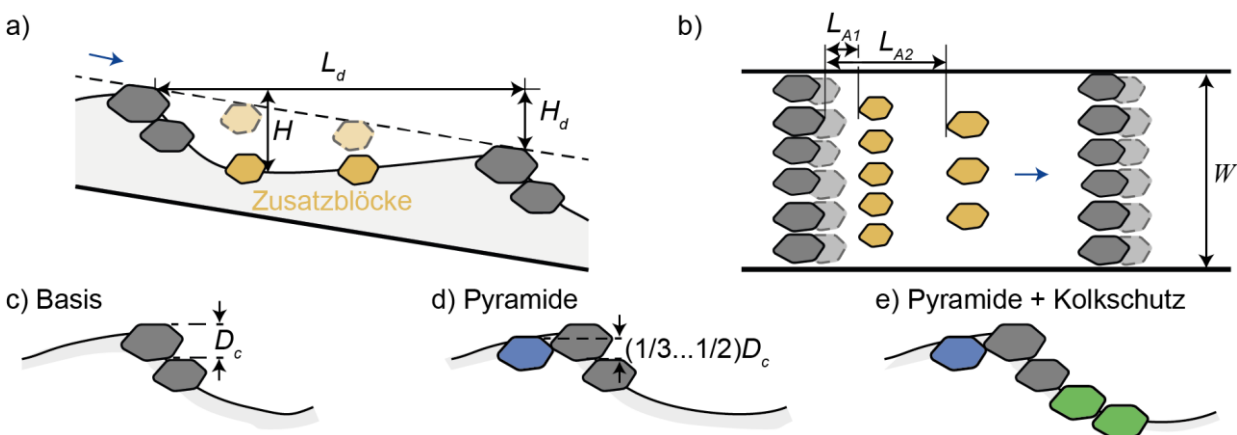


Abb. 2 Schematische Darstellung der gebauten Stufen-Becken-Abfolgen: a) Längsschnitt, b) Situation, c) Basiskonfiguration, d) pyramidenförmige Stufe (PYR), e) PYR mit Kolkenschutz; L_d = Stufenabstand, H_d = Absturzhöhe, H = Stufenhöhe, L_{A1} , L_{A2} = Abstand zur ersten bzw. zweiten Reihe Zusatzblöcke, W = Gerinnebreite, D_c = C-Achse der stufenbildenden Blöcke.

Die gebauten Stufen-Becken-Abfolgen wurden mit drei- bis vierstündigen (dreiecksförmigen) Ganglinien belastet, wobei die Hochwasserspitze nach 1/4 der Gesamtdauer erreicht wurde und rund 20 Minuten anhielt. Der Spitzenabfluss wurde schrittweise erhöht bis zum Systemversagen, welches beim Abfluss $q_f(1\%)$ erfolgte, bei welchem die mittlere Sohlneigung S um mehr als 1% abnahm. Insgesamt wurden 21 Klarwasserversuche und 8 Versuche mit Geschiebezugabe durchgeführt, wobei maximal 20% der rechnerischen Transportkapazität nach Rickenmann (1990) beschickt wurde. Das Geschiebe wurde ebenfalls als Ganglinie zugegeben, wobei die Abfluss- und Geschiebespitzen zeitgleich erfolgten.

3 Versagensmechanismen

Das Versagen der einzelnen Stufen war über alle Versuche betrachtet entweder auf das Kippen der oberen Blockreihe (46%) oder auf das Abrutschen der Stufe infolge Unterkolung des Stufenfußes (45%) zurückzuführen. Weniger häufig beobachtet wurde das Versagen infolge innerer Erosion (5%), direkter Erosion der stufenbildenden Blöcke (3%) und Verfüllung der Becken (1%). In den Versuchen wurde sowohl ein *graduelles* (30%) als auch ein *abruptes* Systemversagen (70%) beobachtet, welches im Folgenden erläutert wird. Abb. 3a zeigt die Entwicklung der mittleren Sohlneigung S mit zunehmendem spezifischem Abfluss q für zwei Versuche jeweils mit und ohne Geschiebezugabe aber ansonsten identischen Randbedingungen.

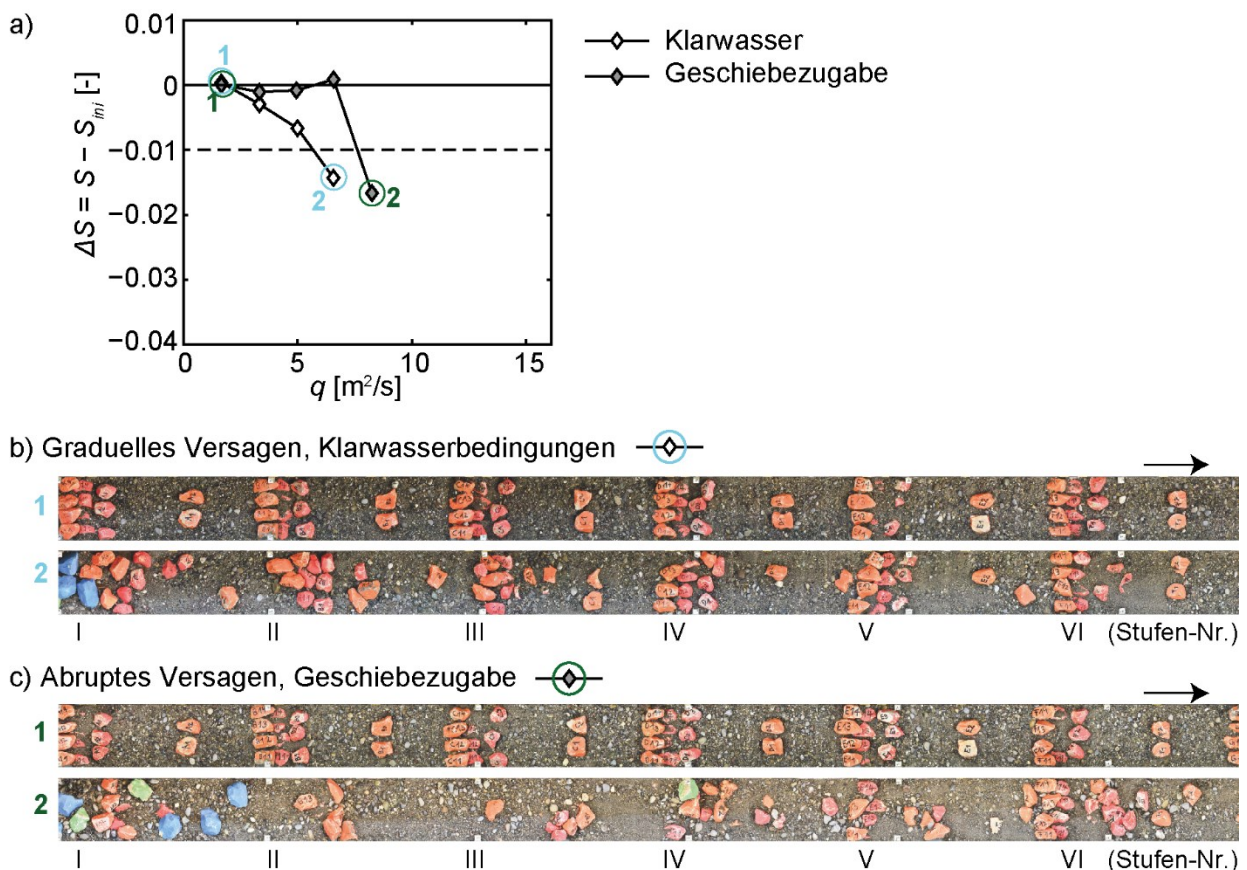


Abb. 3 Versuche für $S = 0.06$, $W = 6$ m, $H_d = 1.1$ m, $L_d = 18.7$ m, $M_B = 4.6$ t mit und ohne Geschiebezugabe. a) Abnahme der Sohlneigung ΔS mit zunehmendem spezifischem Abfluss q , gestrichelte Linie = Systemversagen; b) Graduelles Systemversagen: Orthofotos für den Initialzustand (① bei $q = 1.67$ m²/s) und nach dem Versagen (② bei $q_f(1\%) = 6.67$ m²/s); c) Abruptes Systemversagen: Orthofotos für den Initialzustand (① bei $q = 1.67$ m²/s) und nach dem Versagen (② bei $q_f(1\%) = 8.33$ m²/s).

Im Versuch mit Klarwasserbedingungen nahm die mittlere Sohlneigung bei jeder Belastungsstufe schrittweise um $\Delta S \approx -0.003$ ab bis zum Systemversagen bei $q_f(1\%) = 6.67 \text{ m}^2/\text{s}$. Bei diesem *graduellen* Versagensmechanismus bewegten sich die Blöcke in den Stufen schon bei kleinen Belastungen ($q \approx 3.3 \text{ m}^2/\text{s}$), die Stufen blieben aber mehr oder weniger intakt an ihrer ursprünglichen Position (Abb. 3b). Folglich ist die eingebaute Stufen-Becken-Abfolge auch nach dem Versagen erkennbar, die Stufen haben sich teilweise leicht in Fließrichtung verschoben.

Beim *abrupten* Versagensmechanismus, welcher für den Versuch mit Geschiebezugabe beobachtet wurde, blieb die mittlere Sohlneigung bis zu $q = 6.67 \text{ m}^2/\text{s}$ ungefähr konstant bei S_{ini} (Abb. 3a). Dafür nahm die Sohlneigung innerhalb der darauffolgenden Belastungsstufe direkt um $\Delta S \approx -0.017$ ab, wodurch das System bei $q_f(1\%) = 8.33 \text{ m}^2/\text{s}$ versagte. Das initiale Versagen der Stufe Nr. V (Abb. 3c) führte zu einer rückwärtsschreitenden Erosion, da die Kolkentiefe der oberhalb liegenden Stufe IV unmittelbar zunahm, wodurch Stufe IV versagte. Dieser Prozess schritt gegen die Fließrichtung fort, bis alle oberhalb liegenden Stufen innerhalb von 10 bis 15 Minuten (Naturmaßstab) zerstört wurden. Diese Beobachtung zeigt vor allem die Variabilität des Verhaltens solcher Systeme und ist weniger ein Beweis dafür, dass alle Stufen-Becken-System mit Geschiebezugabe abrupt versagen.

4 Stabilität

4.1 Einfluss von Blockgewicht, Geschiebezufuhr und Blockanordnung

Um den Einfluss des Blockgewichts und der Geschiebezugabe zu untersuchen, wurden Versuche mit Gerinnebreite $W = 6 \text{ m}$, Sohlneigung $S = 0.08$, Absturzhöhe $H_d = 1.1 \text{ m}$ und Stufenabstand $L_d = 14 \text{ m}$ durchgeführt und lediglich das mittlere Blockgewicht M_B der stufenbildenden Blöcke und die Geschiebezugaberate variiert. Die gebauten Stufen-Becken-Abfolgen hielten mit zunehmendem Blockgewicht M_B größeren Belastungen stand bzw. versagten bei deutlich größeren $q_f(1\%)$ (Abb. 4). Wird dem Stufen-Becken-System Geschiebe zugeführt, nimmt die Stabilität weiter zu. Dies ist einerseits auf die kleineren Kolkiefen in Versuchen mit Geschiebezugabe zurückzuführen, wodurch das Risiko eines Stufenversagens infolge Unterkolkung reduziert wird. Andererseits wird das Feinmaterial in den Zwischenräumen der Stufen weniger stark herausgewaschen, was wiederum die Exposition der oberen Blockreihe verringert und somit das Abkippen der oberen Blockreihe weniger wahrscheinlich macht.

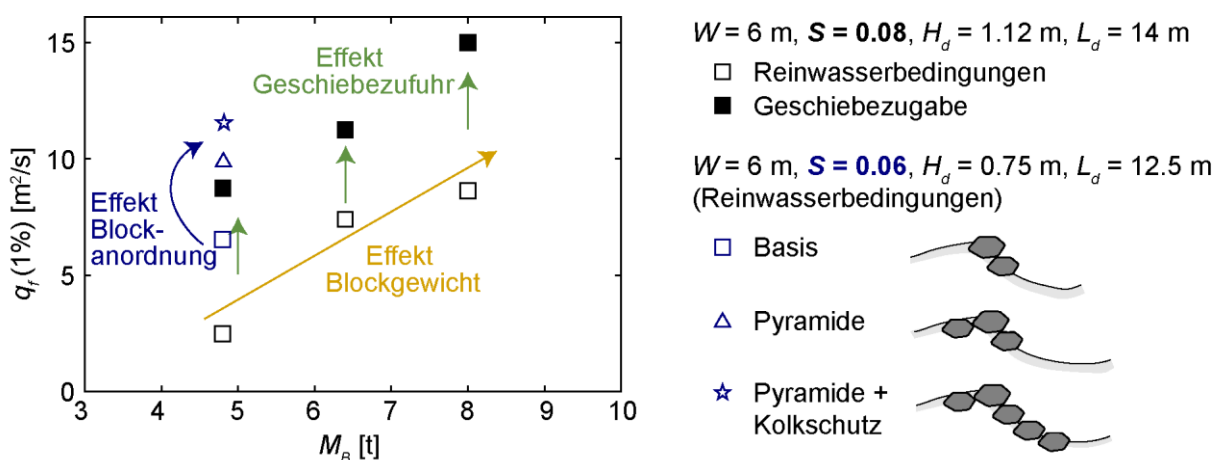


Abb. 4 Einfluss des mittleren Blockgewichts der stufenbildenden Blöcke M_B , der Geschiebezugabe (20% der rechnerischen Transportkapazität) und der Blockanordnung auf die Stabilität; $q_f(1\%) =$ spezifischer Abfluss, bei Systemversagen, $W =$ Gerinnebreite, $S =$ Sohlneigung, $H_d =$ Absturzhöhe, $L_d =$ Stufenabstand.

Die Basiskonfiguration wurde zusätzlich mit der pyramidenförmigen Anordnung (Abb. 2d) und der pyramidenförmigen Anordnung mit Kolkenschutz (Abb. 2e) verglichen. Diese Versuche wurden für $W = 6$ m, $S = 0.06$, $H_d = 0.75$ m, $L_d = 12.5$ m und Reinwasserbedingungen durchgeführt. Abb. 4 zeigt, dass die pyramidenförmige Blockanordnung größeren Belastungen standhielt im Vergleich zur Basiskonfiguration. Die zusätzliche Blockreihe oberhalb der Stufe reduziert die Exposition der oberen Blockreihe, wodurch die obere Blockreihe vermutlich erst bei einer größeren Belastung abkippt und die Stufe somit später versagt. Mit einem Kolkenschutz am Stufenfuß kann die Stabilität zusätzlich erhöht werden, da die Stufe erst bei einer größeren Belastung bzw. größeren Kolk-tiefen abrutscht. Die Versuche zur Blockanordnung wurden bei Reinwasserbedingungen durchgeführt. Vermutlich ist die Stabilitätszunahme in Versuchen mit pyramidenförmiger Blockanordnung mit Kolkenschutz durch den Einfluss der Geschiebezufuhr aufgrund der geringeren Kolk-tiefe nicht gleich ausgeprägt wie bei Versuchen der Basiskonfiguration.

4.2 Anpassungsmechanismen an eine zunehmende Belastung

Als nächstes werden die Anpassungsmechanismen von natürlichen Stufen-Becken-Systemen an eine zunehmende Belastung aufgezeigt und auf gebaute Stufen-Becken-Abfolgen übertragen. Aberle (2000) analysierte Daten aus Modellversuchen zu natürlichen Stufen-Becken-Systemen und fand den folgenden Zusammenhang für stabile Bedingungen:

$$q^* = \frac{q}{\sqrt{g\sigma_z^3}} = 0.20S^{-1.3} \quad [1]$$

Dabei ist q = spezifischer Abfluss, g = Erdbeschleunigung und σ_z = Standardabweichung der Rauheitselemente (Maß für die Sohlrauheit). Das System befindet sich in einem stabilen Zustand, wenn die Datenpunkte auf oder unterhalb dieser Grenze zu liegen kommen (Abb. 5a). Folglich ist für eine Kombination aus S und q eine bestimmte Sohlrauheit σ_z erforderlich, um die zugeführte Energie im System aufzunehmen. Wird q nun erhöht, verschiebt sich das System in einen instabilen Zustand (nach oben). Gemäß Weichert et al. (2009) kann sich das System in einen stabilen Zustand zurückbewegen, indem entweder die Sohlrauheit erhöht wird (Trajektorie ① in Abb. 5a), die Sohlneigung reduziert wird (Trajektorie ②) oder beides gleichzeitig geschieht (Trajektorie ③). Die Erhöhung der Sohlrauheit erfolgt beispielsweise durch selektiven Transport (Deckschichtbildung) oder durch die Optimierung der Sohlgeometrie (z.B. Entstehung von Stufen-Becken-Abfolgen in steilen Gerinnen). Die Abnahme der Sohlneigung ist auf eine Rotationserosion um einen Fixpunkt im Unterwasser zurückzuführen.

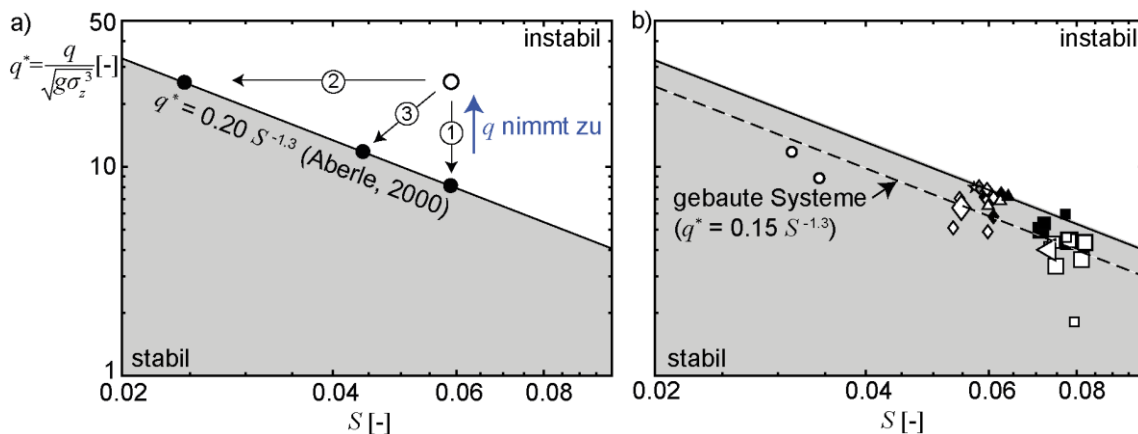


Abb. 5 a) Stabilitätsdiagramm nach Aberle (2000) und Weichert et al. (2009) für eigendynamische, natürliche Systeme, b) Datenpunkte für gebaute Stufen-Becken-Abfolgen für den spezifischen Abfluss, bei welchem das System gerade noch stabil war.

Gemäß Abb. 5b befinden sich alle Datenpunkte für gebaute Stufen-Becken-Abfolgen unterhalb oder in unmittelbarer Nähe der von Aberle (2000) definierten Stabilitätsgrenze, wodurch sich das Konzept auch auf gebaute Stufen-Becken-Systeme übertragen lässt. Da die Sohlgeometrie von gebauten Stufen-Becken-Abfolgen künstlich optimiert wurde, ist σ_z tendenziell größer als in natürlichen Systemen. Dort wären größere Abflüsse erforderlich, um eine solch große Sohlrauheit zu erreichen und die Datenpunkte liegen deshalb tendenziell unterhalb der Grenze für natürliche Systeme. Mittels Regressionsanalyse wurde folgende Stabilitätsbedingungen für gebaute Stufen-Becken-Abfolgen ermittelt:

$$q^* = \frac{q}{\sqrt{g\sigma_z^3}} = 0.15S^{-1.3} \quad [2]$$

Mithilfe dieses Zusammenhangs kann für eine Kombination aus q und S die erforderliche Sohlrauheit σ_z ermittelt werden, um die zugeführte Energie aufzunehmen. Zwischen σ_z und der Stufenhöhe H besteht ein linearer Zusammenhang, womit sich die Stufen-Becken-Geometrie (Stufenabstand, Absturzhöhe) indirekt ableiten lässt. Diese Überlegungen stellen die Grundlage für die Bemessungshilfe dar, welche im Folgenden präsentiert wird.

5 Empfehlungen für die Praxis

5.1 Bemessungshilfe

Als Eingangsgrößen müssen zuerst die gewünschte Sohlneigung S , die Gerinnebreite W , der spezifische Bemessungsabfluss $q = Q/W$ und der charakteristische Korndurchmesser d_{84} des Grundmaterials ermittelt werden. Im Allgemeinen wird empfohlen, die pyramidenförmige Blockanordnung (Abb. 2d) zu wählen und gegebenenfalls im Rahmen der Bemessung mit einem Kolk-schutz (Abb. 2e) zu verstärken.

Schritt 1: Erforderliche Sohlrauheit

Im ersten Schritt wird Gleichung (3) verwendet, um die erforderliche Sohlrauheit σ_z zu bestimmen (d.h. Gleichung (1) bzw. (2) nach σ_z aufgelöst):

$$\sigma_{z,req} = \left(\frac{q}{mS^{-1.3}\sqrt{g}} \right)^{2/3} \quad m = 0.15 [0.15 \dots 0.20] \quad [3]$$

Der Parameter $m = 0.15$ wurde für gebauten Stufen-Becken-Abfolgen ermittelt und stellt eine obere Grenze für $\sigma_{z,req}$ dar. Der Parameter $m = 0.20$ stammt aus der Datenanalyse natürlicher Stufen-Becken-Systeme und stellt eine untere Grenze für die erforderliche Sohlrauheit dar. Im Rahmen der Bemessung wird eine Sensitivitätsanalyse hinsichtlich m empfohlen.

Schritt 2: Stufen-Becken-Geometrie

Im zweiten Schritt wird die Absturzhöhe H_d mithilfe von Gleichung (4) ermittelt:

$$H_d = \left(\frac{(\sigma_{z,req} - 0.5d_{84}) d_{84}^{7/20} (s-1) g^{1/5}}{0.52 q^{2/5} S^{1/6}} \right)^{4/3} \quad [4]$$

mit $s = \rho_s/\rho$ = relative Sedimentdichte. Danach wird der Stufenabstand mit Gleichung (5) bestimmt, wobei der minimale Stufenabstand $L_{d,min}$ die Gerinnebreite nicht unterschreiten sollte.

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

Schließlich kann die resultierende Stufenhöhe H bei Klarwasserbedingungen und die Stufenhöhe mit Geschiebezufuhr H_s abgeschätzt werden:

$$H = 2.23 \frac{q^{2/5} S^{11/12} L_d^{3/4}}{d_{84}^{7/20} (s-1)g^{1/5}}; \quad H_s = 0.90H \quad [6]$$

Als letzter Schritt wird der lineare Zusammenhang zwischen der Stufenhöhe H_s für Bedingungen mit Geschiebezufuhr, welche in den meisten Fällen maßgebend sind, und dem Sohlrauheitsparameter σ_{z,H_s} hergestellt:

$$\sigma_{z,H_s} = 0.50d_{84} + 0.26H_s \quad [7]$$

Falls keine Stufen-Becken-Abfolgen vorhanden sind ($H_s = 0$ m), entspricht die Sohlrauheit σ_{z,H_s} der Hälfte des charakteristischen Korndurchmessers d_{84} , was zu Ergebnissen aus anderen Studien passt (z.B. Aberle & Smart, 2003; Nitsche et al., 2012; Chen et al., 2020). Gleichung (4) resultiert aus den Gleichungen (5) und (6) eingesetzt in Gleichung (7) und aufgelöst nach H_d für die Bedingung $\sigma_{z,req} = \sigma_{z,H_s}$. Ist diese Bedingung erfüllt, entspricht die erforderliche Sohlrauheit gemäß Gleichung (3) der Sohlrauheit des festgelegten Stufen-Becken-Systems.

Um das Stufenversagen infolge Unterkolkung zu verhindern, darf das Verhältnis zwischen Stufenhöhe und Absturzhöhe H/H_d nicht zu groß werden:

$$H/H_d \leq c \quad c = 1.8 [1.1 \dots 2.6] \quad [8]$$

Für $1.8 < H/H_d < 2.6$ sollte vorsichtshalber ein Kolkenschutz (Abb. 2e) verwendet werden.

Schritt 3: Hydraulische Bedingungen

Die über den gesamten Abschnitt gemittelte Fließgeschwindigkeit v kann mit der Gleichung von Aberle & Smart (2003) berechnet werden:

$$v = 0.96g^{0.20} S^{0.20} q^{0.60} \sigma_{z,H_s}^{-0.40} \quad [9]$$

Der Vergleich mit den gemessenen Fließgeschwindigkeit in den Versuchen ergab eine Genauigkeit von $\pm 20\%$. Mittels Kontinuität kann die mittlere Abflusstiefe $h = q/v$ ermittelt werden. Über den gesamten Abschnitt betrachtet sollte das Abflussregime im strömenden Bereich (Froudezahl $F < 1$) liegen, damit Wechsprünge in den Becken entstehen, welche die Energie effizient dissipieren.

Schritt 4: Erforderliche Blockgröße

Die stufenbildenden Blöcke müssen ausreichend groß dimensioniert werden, um ein Stufenversagen vor Erreichen des Dimensionierungsabflusses durch Abkippen zu verhindern. Die dimensionslose Sohlschubspannung θ soll die um den Faktor b reduzierte kritische Sohlschubspannung θ_c nicht überschreiten:

$$\theta \leq b \theta_c; \quad \theta = \frac{hS}{(s-1)D} \quad [10]$$

Dabei wird die kritische Sohlschubspannung $\theta_c = 0.15S^{0.25}$ nach Lamb et al. (2008) verwendet, mit welcher der Anstieg von θ_c in steilen Fließgewässern berücksichtigt wird. Theoretisch sollte eine Sohle bestehend aus Blöcken mit Durchmessern D ungefähr bis $\theta \approx \theta_c$ stabil bleiben. Das gebaute Stufen-Becken-System besteht jedoch aus einer bimodalen Mischung, wobei die stufenbildenden Blöcke deutlich größer sind als das Grundmaterial ($D \gg d_{84}$) und somit bereits für

$\theta < \theta_c$ mobilisiert werden. Die Versuche haben gezeigt, dass die Stufen schon bei $\theta \approx 0.5 \theta_c$ versagten ($b = 0.56 \pm 0.13$). Der erforderliche mittlere Blockdurchmesser D und das resultierende mittlere Blockgewicht M_B kann mit den folgenden Gleichungen berechnet werden:

$$D = \frac{hS}{(s-1) b (0.15S^{0.25})} \quad b = 0.56 [0.43 \dots 0.69] \quad [11]$$

$$M_B = \frac{D^3 \rho_s \pi}{6} \quad [12]$$

Für die Dimensionierung wird ein Wert von $b = 0.56$ empfohlen. Es sollte aber zwingend eine Sensitivitätsanalyse für $b = 0.56 \pm 0.13$ durchgeführt werden, da das erforderliche Blockgewicht für diesen Bereich bis zu Faktor ± 2 variiert.

Gemäß Raudkivi & Ettema (1982) ist für bimodale Mischungen mit $D/d_{84} < 6$ mit direkter Erosion und für $D/d_{84} > 17$ mit Einsinken der großen Blöcke zu rechnen. In den Modellversuchen wurde der Bereich zwischen $6 < D/d_{84} < 11$ untersucht, welcher einzuhalten ist:

$$a_1 < D/d_{84} < a_2 \quad a_1 = 6; a_2 = 11 \quad [13]$$

Für $D/d_{84} > 11$ wird bereits eine Filterschicht empfohlen, da sie außerhalb des Anwendungsbereichs der vorliegenden Studie liegt, obwohl gemäß Raudkivi & Ettema (1982) erst ab $D/d_{84} > 17$ mit dem Einsinken der großen Blöcke zu rechnen ist. Die Kriterien gemäß Gleichung (13) müssen auch für die Zusatzblöcke zwischen den Stufen angewendet werden.

Als letztes Kriterium soll das Verhältnis zwischen Stufenhöhe und Blockdurchmesser H/D überprüft werden, um ein frühzeitiges Stufenversagen infolge Unterkolkung zu vermeiden:

$$H/D < e \quad e = 1.0 [1.0 \dots 1.5] \quad [14]$$

Für den Bereich $1.0 < H/D < 1.5$ wird ein Kolkenschutz empfohlen (Abb. 2e).

5.2 Unsicherheiten und Limitationen

Eine Sensitivitätsanalyse hinsichtlich der Parameter m und b wird dringend empfohlen, um die Unsicherheiten in der Bemessung abzuschätzen. Ein Berechnungsbeispiel inklusive Sensitivitätsanalyse ist in Maager et al. (2023) zu finden. Die relativ großen Unsicherheiten widerspiegeln die Komplexität steiler Fließgewässer. Parameter wie beispielsweise die effektive Blockgröße, die Blockform, die Ausrichtung der Blöcke in der Stufe oder die Zusammensetzung des Grundmaterials haben einen Einfluss auf die Stabilität jeder einzelnen Stufe. Obwohl die Versuche unter kontrollierten Bedingungen durchgeführt wurden, konnten nicht alle Parameter genügend genau beschrieben werden, um die Unsicherheiten weiter zu reduzieren, u.a. weil die Prozesse auch einer gewissen Zufälligkeit unterliegen.

Die Versuche wurden in einer geraden Versuchsrinne mit senkrechten, glatten Wänden durchgeführt. Folglich wurde der Einfluss von rauen Ufern, von geneigten Böschungen und von Kurvensituationen vernachlässigt. Glatte Ufer stellen eher konservative Bedingungen dar, da die Energiedissipation entlang der Ufer geringer ist und die Sohlschubspannung somit weniger stark reduziert wird. Außerdem ist das Verkeilen der stufenbildenden Blöcke, was einen stabilisierenden Effekt hat, weniger wahrscheinlich bei glatten als bei rauen Ufern. In einer Kurvensituation ist die hydraulische Belastung insbesondere in der Außenkurve deutlich größer, was hier nicht berücksichtigt wurde.

Die Bemessungshilfe setzt voraus, dass die Ufer stabil bleiben und im Hochwasserfall nicht erodiert werden. Mit Gleichung (6) kann die mittlere Stufenhöhe H abgeschätzt werden. Die Versuche haben gezeigt, dass die maximale Stufenhöhe einer einzelnen Stufe im System um bis zu 50% tiefer sein kann als die mittlere Stufenhöhe im Gesamtsystem. Folglich muss für die Bemessung der Uferfundation mit einer maximalen Stufenhöhe $H_{max} = 1.5 H$ gerechnet werden. In breiten Gerinnen können sich Sohlenformen wie alternierende Bänke ausbilden, welche aufgrund der Pendelströmung sowohl zu einer erhöhten hydraulischen Belastung der Ufer als auch der stufenbildenden Blöcke führt. Die Randbedingungen sollten so gewählt werden, dass sich keine alternierenden Bänke gemäß Regimetheorie von Ahmari & da Silva (2011) ausbilden. Falls das nicht möglich ist, muss der Uferschutz gegebenenfalls verstärkt werden.

6 Schlussfolgerungen

Mithilfe von physikalischen Modellversuchen wurden an der VAW, ETH Zürich, gebaute Stufen-Becken-Abfolgen systematisch untersucht. Den größten Einfluss hinsichtlich Stabilität hatten das Blockgewicht der stufenbildenden Blöcke, die Geschiebezufuhr und die Blockanordnung der Stufen. Die meisten Stufen versagten entweder durch Abkippen der oberen Blockreihe oder durch Abrutschen der Stufe infolge Unterkolkung. Ein individuelles Stufenversagen führte in 70% aller Versuche zu einem abrupten Systemversagen. Dabei wurden alle oberhalb liegenden Stufen aufgrund eines rückwärtsschreitenden Erosionsprozesses innerhalb von 10 bis 15 Minuten (Naturmaßstab) zerstört. Dieser Prozess führte zu einer deutlichen Abnahme der mittleren Sohlneigung und zu Eintiefungen von mehreren Metern im oberen Bereich. Folglich muss die gebaute Stufen-Becken-Abfolgen stabil genug dimensioniert werden, um ein solches abruptes Systemversagen zu verhindern. Mit der Bemessungshilfe für gebaute Stufen-Becken-Abfolgen können die Absturzhöhe, der Stufenabstand und die erforderliche Blockgröße festgelegt und die zu erwartenden Kolk-tiefen abgeschätzt werden. Solche Stufen-Becken-Abfolgen aus natürlichem Blockmaterial stellen eine naturnahe Alternative zur Sohlstabilisierung von Gebirgsbächen dar und bieten im Vergleich zu den bisher verwendeten Betonsperren diversere Lebensräume und verbessern die Durchwanderbarkeit für Fische.

Dank

Die Autorenschaft bedankt sich beim Bundesamt für Umwelt (BAFU) für die Finanzierung des Forschungsprojekts und bei Cornel Beffa, Karin Gafner, Eva Gertsch-Gautschi und Lukas Hunzinger für die Begleitung und die wertvollen Beiträge aus Sicht der Praxis und der Fischerei.

Literatur

- 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.
- 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.

- Chen, X.; Hassan, M.A.; An, C.; Fu, X. (2020). Roughness Correlations: Meta-Analysis of Roughness Measures in Gravel Bed Rivers. *Water Resources Research*, 56(8).
- 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.
- 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.
- 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.
- Maager, F.; Hohermuth, B.; Weitbrecht, V.; Boes, R. (2023). Bemessungshilfe für gebaute Stufen-Becken-Abfolgen. *Wasser Energie Luft*, 115(1):19-27.
- Nitsche, M.; Rickenmann, D.; Kirchner, J.; Turowski, J.; Badoux, A. (2012). Macroroughness and variations in reach-averaged flow resistance in steep mountain streams. *Water Resources Research*, 48.
- 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? <https://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.
- Weichert, R.; Bezzola, G.; Minor, H.E. (2009). Bed erosion in steep open channels. *Journal of Hydraulic Research*, 47(3): 360–371.

Anschrift der Verfasser

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