

# Naturnahe Wildbachverbauung mittels Stufen-Becken-Abfolgen

*Benjamin Hohermuth, Lukas Hunzinger, Volker Weitbrecht*

## Zusammenfassung

Die Stabilisierung des Wildbachs Betelriedgraben in den Berner Alpen mittels naturnaher Stufen-Becken-Abfolgen wurde in Modellversuchen untersucht. In den ersten Versuchen wurde ermittelt, welche Blockverteilung nötig ist, damit sich stabile Stufen-Becken-Abfolgen eigendynamisch bilden können. Die Versuche haben gezeigt, dass bei einem Blockdurchmesser von 1.8 m (rund 5 t Blockgewicht) selbst im Überlastfall ( $HQ_{300}$ ) die mittlere Sohlenlage stabil bleibt. Aus diesen Versuchen und mit Hilfe bestehender Bemessungsansätze wurden Bauweisen für künstlich gebaute, naturnahe Stufen-Becken-Abfolgen abgeleitet. Die Tests der künstlichen Bauweisen zeigen, dass 2-lagige Stufen mit einer Absturzhöhe von 1.2 m eine höhere Stabilität aufweisen als 1.8 m hohe 3-lagige Stufen, welche teilweise ein sehr abruptes Versagen zeigen. Für den Stufenabstand konnte im Bereich von 1.4 – 4.4 Gerinnebreiten kein eindeutiger Einfluss auf die Stabilität ermittelt werden. Massgebend für die Stabilität ist der Abstand zur Gegenschwelle respektive zur nächsten Stufe, welcher die Kolktiefe begrenzt und so ein schlagartiges Abrutschen der Stufen in den Kolk verhindert. Es wurde eine Bauweise gefunden, die bei 8% Neigung selbst im  $HQ_{300}$  stabil bleibt. Bei 15% Neigung bleibt die gleiche Bauweise im Bemessungsfall ( $HQ_{100}$ ) stabil und versagt erst bei Überlast ( $HQ_{300}$ ) graduell. Das Erhöhen der Gerinnebreite ist trotz reduzierter spezifischer Belastung nicht in jedem Fall empfehlenswert.

## 1 Einleitung

Das Dorf Betelried liegt auf dem Schwemmkegel des Wildbachs Betelriedgraben in den Berner Alpen. Heute führen bereits 30-jährliche Hochwasserereignisse  $HQ_{30}$  zu Ausuferungen und Übersarungen der Gebäude und Infrastruktur entlang des Gewässers. Sohlstabilisierungs-Massnahmen im oberen Einzugsgebiet und ein neuer Geschiebesammler am Kegelhals sollen den Geschiebeeintrag in den unteren Gewässerabschnitt reduzieren. Zusätzlich wird das Gerinne auf dem Schwemmkegel in einen weniger stark besiedelten Teil des Schwemmkegels verlegt. Die neuen Gerinneabschnitte mit einer planmässigen Sohlneigung von 8 bis 15% sollen häufigen Ereignissen ( $HQ_{30}$ ) bei annähernd geschiebefreiem Abfluss und mittleren Ereignissen ( $HQ_{100}$ ) mit Geschiebetrieb standhalten. Bei Überlast ( $HQ_{300}$ ) soll das System nicht schlagartig versagen.

Der Verbau der Sohle mit einer Sperrentreppe wird wegen der hohen Bau- und Unterhaltskosten sowie aus Gründen des Landschaftsschutzes ausgeschlossen. Natürliche Wildbäche haben ein hohes Potential zur eigendynamischen Stabilisierung der Gerinnesohle durch die Ausbildung morphologischer Strukturen in verschiedenen Grössenskalen (Weichert 2006). Für die praktische Nutzung solcher naturnaher Strukturen müssen diese mit möglichst wenig Aufwand im Feld gebaut werden können. Basierend auf dem Konzept der eigendynamischen Sohlstabilisierung mittels Stufen-Becken von Weichert (2006) wurden verschiedene Bauweisen in Modellversuchen im Massstab 1:20 getestet. Diese sollen folgende Fragen beantworten:

- Ist eine Sohlstabilisierung bei 15% Gefälle mit Stufen-Becken prinzipiell möglich?
- Welche Blockgrösse und Blockverteilung ist nötig?
- Wie lassen sich Stufen-Becken mit möglichst geringem Aufwand bauen?
- Welches ist die optimale Gerinnebreite?

Im nachfolgenden Abschnitt werden die Grundlagen zu Stufen-Becken aus der Literatur zusammengefasst. Anschliessend werden der Versuchsaufbau und die Resultate vorgestellt und mit bestehenden Ansätzen zur Bemessung von Stufen-Becken-Abfolgen verglichen.

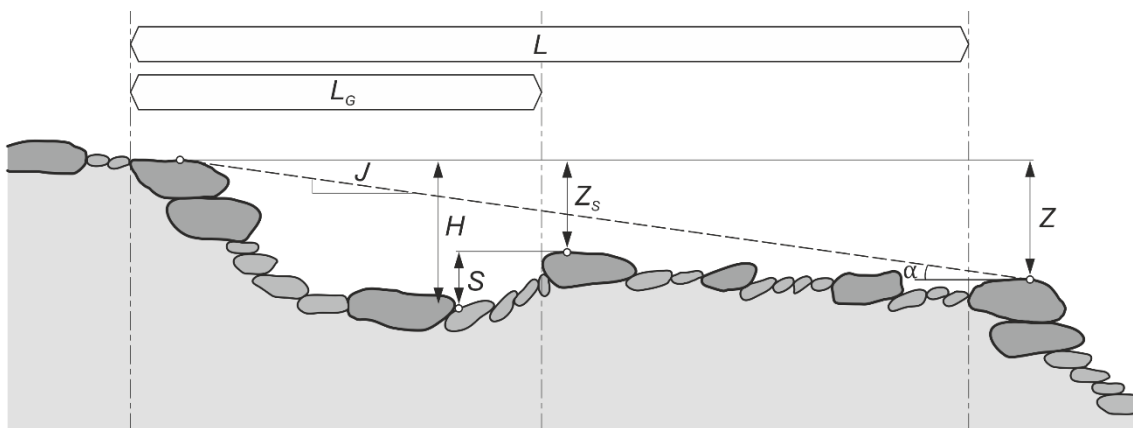
## 2 Grundlagen

### 2.1 Übersicht

Ein genereller Literaturüberblick zu Stufen-Becken-Abfolgen findet sich in Church & Zimmermann (2007) und Comiti & Mao (2012). Ansätze zur Beschreibung der Stabilität von steilen Gerinne ohne ausgeprägte Sohlenformen (Raubettgerinne) finden sich beispielsweise in Hohermuth & Weitbrecht (2016). Nur wenige Untersuchungen befassen sich explizit mit der Stabilität von Stufen-Becken-Abfolgen (z.B. Weichert 2006, Zimmermann *et al.* 2010). Für Stufen-Becken lassen sich drei Versagensmechanismen unterscheiden: (1) Abrutschen der Stufe in den Kolk, (2) direkte Erosion der stufenbildenden Blöcke und (3) Eindecken der Stufen-Becken durch Geschiebeablagerungen. Gemäss Crowe (2002) ist (1) mit 77% der häufigste Versagens-Mechanismus. Bei der Bemessung von Stufen-Becken muss das Kriterium  $6 \leq D/d_{90} \leq 17$  mit  $D$  – äquivalenter Kugeldurchmesser,  $d_{90}$  – Korngrösse des Grundmaterials eingehalten werden, um übermässiges Einsinken oder Abgleiten der Stufen zu verhindern (Raudkivi & Ettema 1982).

### 2.2 Stabilität von Stufen-Becken Abfolgen

Im folgenden Abschnitt werden bestehende Ansätze zur Bemessung von Stufen-Becken-Abfolgen vorgestellt und verglichen. Die Parameter zur Beschreibung der Geometrie von Stufen-Becken sind in Abb. 1 dargestellt.



**Abb. 1** Definition der geometrischen Stufen-Becken Parameter,  $\alpha$  = Sohleigung (Bruttogefälle),  $H$  = Stufenhöhe,  $J$  = Längsgefälle,  $L$  = Stufenabstand,  $L_G$  = Beckenlänge,  $S$  = Kolkentiefe,  $Z$  = Höhenunterschied zwischen den Stufen,  $Z_s$  = Absturzhöhe

Basierend auf Modellversuchen mit eigendynamisch gebildeten und künstlich gebauten Stufen-Becken-Abfolgen kommt Weichert (2006) zum Schluss, dass eigendynamisch gebildete Stufen eine höhere Stabilität erreichen als künstlich gebaute Stufen. Er fand eine gute Übereinstimmung mit dem kritischen spezifischen Abfluss  $q_c$  gemäss Aberle (2000)

$$q_c = 0.20 \sin \alpha^{-1.3} \sqrt{g s^3} \quad (1)$$

mit  $s$  – Standardabweichung der Rauigkeitshöhen,  $g$  – Erdbeschleunigung.

Weichert (2006) schlägt ein Bemessungsverfahren für Stufen-Becken vor, bei welchem durch die Zugabe von Blöcken die eigendynamische Bildung von Stufen-Becken ermöglicht wird. Aus der benötigten Rauigkeit  $s_{dim}$  kann die maximale Korngrösse  $d_{max} = 4s$  und die Kornverteilung abgeschätzt werden zu

$$s_{dim} = \frac{2.92q^{0.67}J^{0.87}}{g^{0.33}} \quad (2)$$

Die resultierende Kornverteilung ist gemischt und überhöht einzubringen, damit sich durch die Abflachung des Gefälles Stufen-Becken-Abfolgen eigendynamisch bilden (Weichert 2006).

Die Erfahrungen von Lenzi (2002) mit naturnahen Stufen-Becken-Abfolgen zur Sohlstabilisierung in Norditalien führen zu folgenden Richtwerten für die Stufenhöhe  $H$ : (1)  $H < 2.5$  m grössere Stufen waren in den untersuchten Wildbächen weniger stabil, (2)  $H/d_{90} = 1-4$  (Mittelwert  $H/d_{90} = 2$ ). Es ist anerkannt, dass die Stufenhöhe durch die Blockgrösse vorgegeben wird (Church & Zimmerman 2007). Über den Stufenabstand herrschen verschiedenen Ansichten. Abrahams *et al.* (1995) postulieren, dass für  $H/(2J) \leq L \leq H/(1J)$  die Energiedissipation in den Stufen maximal wird. Aufgrund von Feldmessungen empfiehlt deshalb Lenzi (2002)  $H/(1.1J) \leq L \leq H/(1.3J)$ . Die Ansätze von Judd (1963) und Whittaker (1987) liefern deutlich kleinere Stufenabstände (Tab. 1). Zur Bemessung der stufenbildenden Blöcke gegen direkte Erosion empfiehlt Lenzi (2002) die kritische Geschwindigkeit  $u_c$  [m/s] nicht zu überschreiten. Mit  $d_a$  als längste Achse des Blocks in [m] gilt

$$u_c = 3\sqrt{d_a} \quad (3)$$

Gl. (3) wurde aus dem Kräftegleichgewicht am Block hergeleitet. Die Blockgrösse ist stark von der Geschwindigkeit  $u$  abhängig. Wird auf der Stufe kritischer Abfluss zur Berechnung der Geschwindigkeit angenommen resultieren für den Betelriedgraben Blockdurchmesser  $D$  von über 3 m (Tab. 1).

Für strukturierte Rampen mit Stufen-Becken-Abfolgen im Bereich von  $J = 3.3-10\%$  gibt Vogel (2003) basierend auf Modellversuchen den spezifischen Durchfluss für die vollständige Zerstörung der Rampe  $q_c$  an als

$$q_c = \left(0.05J^{-1.463} - 51.4(1 - 0.54e^{6.07J})e^{-48J}\right) \cdot 0.774\sqrt{g(s^* - 1)D^3} \quad (4)$$

mit  $s^*$  = relative Dichte. Für natürliche Stufen-Becken-Abfolgen im Himalaya fand Palt (2001) für den kritischen Durchfluss  $q_c$  bei Bewegungsbeginn

$$q_c = 0.093J^{-1.25}\sqrt{g(s^* - 1)d_{65}^3} \quad (5)$$

Basierend auf der Untersuchung von acht Wildbächen in Colorado definieren Thomas *et al.* (2000) analog zur Bemessung von steilen Sohlpflasterungen den minimalen stufenbildenden Blockdurchmesser  $D_{30}$

$$D_{30} = \frac{1.95J^{0.555}q^{2/3}}{g^{1/3}} \quad (6)$$

Thomas *et al.* (2000) bemerken, dass in natürlichen Stufen „deutlich“ grössere Ankersteine vorhanden sind, quantifizieren deren Grösse jedoch nicht. Die Beckenlänge ist gemäss Thomas *et al.* (2000) eine Funktion der Energiehöhe auf der Stufe, des spezifischen Abflusses und des

Längsgefälles (Tab. 1). Die Anwendung der obigen Bemessungsvorschläge führt für den flacheren Abschnitt ( $J = 0.08$ ) des Betelriedgrabens zu Werten nach Tab. 1.

**Tab. 1** Bemessung der Stufen-Becken-Abfolge im Betelriedgraben,  $q = 6 \text{ m}^2/\text{s}$ ,  $J = 0.08$

<b>Blockdurchmesser <math>D</math> [m]</b>		
Weichert (2006)	1.6	
Vogel (2003)	1.1	
Lenzi (2002)	3.3	
Palt (2001)	1.5	
Thomas <i>et al.</i> (2000)	0.75	$D_{30}$
<b>Stufenhöhe <math>H</math> [m]</b>		
Lenzi (2002)	1.2-4.8	( $d_{90}=1.2\text{m}$ )
<b>Stufenabstand <math>L</math> [m]</b>		
Judd (1963)	4.5	
Whittaker (1987)	6.3	
Abrahams <i>et al.</i> (1995)	10-20	( $H=1.5\text{m}$ )
Lenzi (2002)	14-17	( $H=1.5\text{m}$ )
Thomas <i>et al.</i> (2000)	13	$L_G$

Die verschiedenen Ansätze zeigen untereinander teils deutliche Abweichungen, dies kann mit der hohen Variabilität natürlicher Stufen-Becken erklärt werden. Für die eigendynamische Bildung spielen in der Natur neben der Hydraulik noch weitere Faktoren wie beispielsweise das Vorkommen von groben Blöcken eine Rolle.

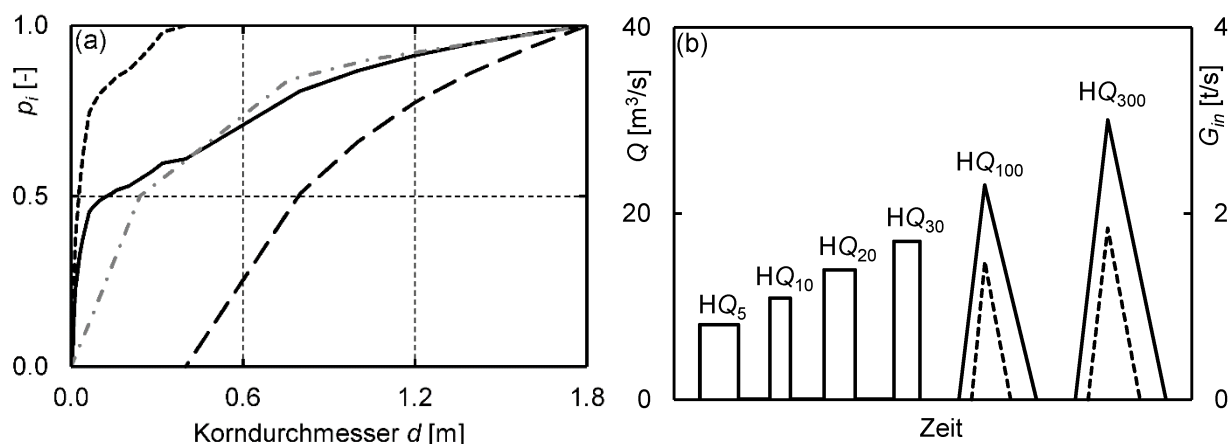
### 3 Versuchsaufbau

#### 3.1 Versuchsrinne

Die Versuche wurden in einer 13.5 m langen, 0.6 m breiten und 0.6 m tiefen neigbaren Rinne durchgeführt. Die Seitenwände bestanden aus Glas respektive PVC, die Rinnenbreite wurde mit Einbauten auf 0.25 m und 0.35 m reduziert. Der Einfluss der glatten Wände auf den Fließwiderstand ist aufgrund der niedrigen Fließstiefen und der rauen Sohle vernachlässigbar. Es wurden Längsgefälle von 8% und 15% untersucht. Bei den Versuchen mit 15% Gefälle musste die Sohle aufgrund der maximalen Rinnenneigung von 10% keilförmig eingebaut werden. Dadurch reduziert sich die nutzbare Länge auf 5 m.

#### 3.2 Geschiebemischung

Auf dem Schwemmkegel des Betelriedgrabens wurden Volumenproben entnommen. Die daraus ermittelte Kornverteilung wurde in drei Schritten skaliert: (1) geometrische Skalierung mit dem Modellmassstab 1:20, (2) Vergrößerung der Kornfraktionen mit Korn-Reynoldszahlen  $Re^* < 200$ , (3) Entfernen der Kornfraktionen mit  $d < 0.25 \text{ mm}$ . Die resultierende Grundmischung ist in Abb. 2a ersichtlich. Zu der Grundmischung wurde basierend auf Angaben der Flussbau AG SAH eine Blockverteilung mit  $d_{max} = 1.8 \text{ m}$  (entspricht ca. 5 t) zugegeben um die von Weichert (2006) empfohlene Kornverteilung anzunähern (Abb. 2a).



**Abb. 2** (a) Kornverteilung im Naturmassstab (---) Grundmischung Betelriedgraben, (— —) zugegebenen Blockmischung, (— —) zusammengelegte Verteilung und (— • —) gemäss Weichert (2006), (b) Illustration des Versuchsablaufs (—) Durchfluss  $Q$ , (---) Beschickung  $G_{in}$ , Naturmassstab

### 3.3 Messtechnik

Der Durchfluss wurde mit einem magnetisch-induktiven Durchflussmesser (MID) auf  $\pm 0.1$  l/s Genauigkeit genau gemessen. Für die Ganglinienversuche wurde mit einer gravimetrischen Beschickungsmaschine mit  $\pm 5\%$  Genauigkeit Geschiebe zugegeben. Am Ende der Rinne wurde ausgetragenes Geschiebe in einem vollständig getauchten Filterkorb aufgefangen und mit Kraftmessdosen gewogen. Die Messfrequenz betrug 1 Hz, aufgrund des Messrauschens wurde die Datenserie mit einem 2 min gleitenden Mittel geglättet.

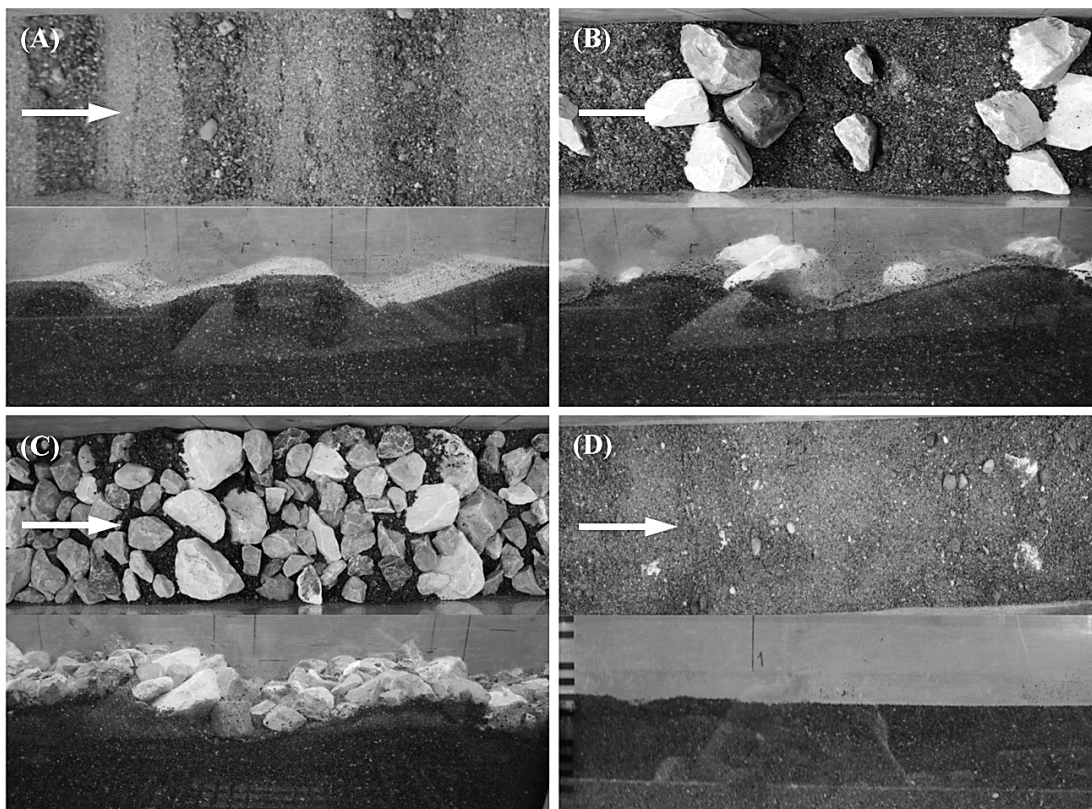
Zur Vermessung der Gerinnesohle wurde ein Laserdistanzsensor mit  $\pm 2$  mm Genauigkeit verwendet. Der Sensor wurde zusammen mit einem Ultraschallsensor an einem automatischen X-Y Positioniersystem montiert. Die Sohle wurde in einem  $0.02 \text{ m} \times 0.02 \text{ m}$  Raster vermessen. Das Längsgefälle wurde aus dem linearen Trend des breitengemittelten Längensprofils berechnet. Zur Ermittlung der Standardabweichung der Rauigkeitshöhen  $s$  wurde eine Fenstergrösse von 1 m verwendet. Sie wurde analog wie in Weichert (2006) berechnet, mit dem Unterschied, dass Trends in der Makroskala nicht entfernt wurden. Vergleiche für ausgewählte Sohlvermessungen zeigen eine maximale Abweichung in  $s$  von 10% bei Berücksichtigung der Trends. Stufen-Becken-Abfolgen wurden mit dem Algorithmus von Milzow *et al.* (2006) identifiziert und durch Beobachtungen bestätigt. Die Geometrie der Stufen wurde aus dem Längsprofil ermittelt.

### 3.4 Versuchsprogramm

In Phase 1 wurde die Entwicklung und Stabilität von eigendynamisch gebildeten Stufen-Becken untersucht. Dazu wurde die Geschiebemischung mit einer Mächtigkeit von 0.25 m in die Rinne eingebaut und mit steigenden Abflüssen belastet. In den ersten vier Versuchen einer Serie wurden stationäre Abflüsse getestet. Die Versuche wurden gestoppt, wenn die mittlere Erosionsrate kleiner als  $0.1 \text{ mm}/10 \text{ min}$  war. In den letzten zwei Versuchen wurde das Gerinne mit einer Ganglinie mit Geschiebezugegabe belastet (Abb. 2b). In Phase 2 wurden verschiedene Bauweisen von Stufen-Becken-Abfolgen untersucht. Aufgrund der Überlegungen in Kap. 2 und der Beobachtungen aus Phase 1 wurden zwei- und dreilagige Stufen mit unterschiedlichen Abständen getestet (Tab. 2). Das Vorgehen beim Einbau der Stufen ist in Abb. 3 dargestellt. Die Belegungsdichte entspricht dabei der beobachteten Belegungsdichte in Phase 1.

**Tab. 2** Getestete Geometrien, in den Versuchen #3 wurde die gleiche Geometrie über die ganze Länge (oben/unten) eingebaut. Angaben im Naturmassstab

Nr	Stufe [-]	oberen Rinnenhälfte						untere Rinnenhälfte						
		$Z_s$ [m]	$Z$ [m]	$L$ [m]	$L_G$ [m]	$B$ [m]	$J$ [-]	Stufe [-]	$Z_s$ [m]	$Z$ [m]	$L$ [m]	$L_G$ [m]	$B$ [m]	$J$ [-]
1	2-lagig	1.2	1.2	14	6	5	0.08	3-lagig	1.8	1.8	22	7	5	0.08
2	3-lagig	1.8	2.4		7	5	0.08	2-lagig	1.2	1.8	22	6	5	0.08
3	2-lagig	1.2	1.8	22	6	5	0.08	*	*	*	*	*	*	
4	2-lagig	1.2	1.8	22	5	5	0.08	2-lagig	1.2	0.6	7	5	5	0.08
5	2-lagig	1.2	1.8	7	5	5	0.15	-	-	-	-	-	-	
6	2-lagig	1.2	1.8	7	5	7	0.15	-	-	-	-	-	-	



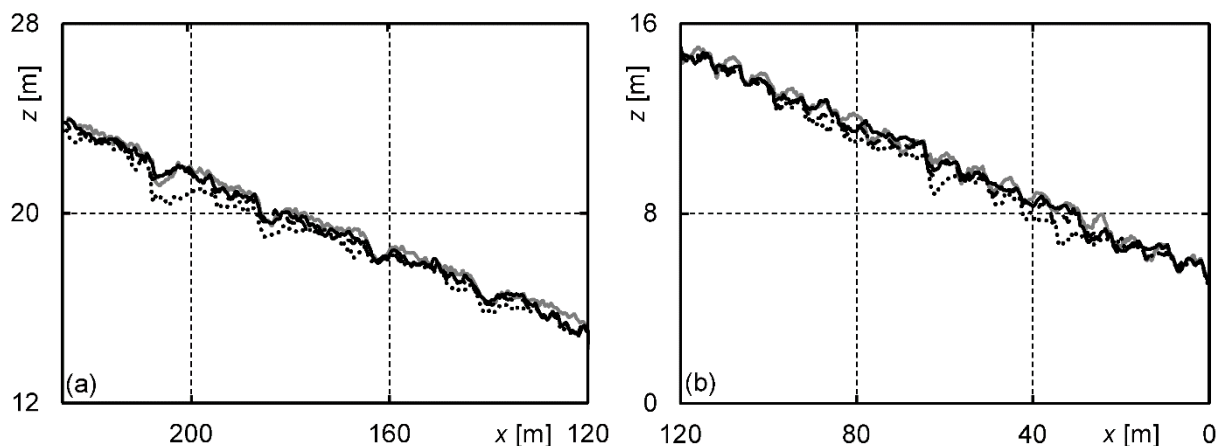
**Abb. 3** Vorgehen beim Einbau der Stufen (A) Aushub der Kolkbecken, (B) Setzen der Stufen und Blöcke zur Kolkbegrenzung, (C) Schütten der Schroppen, (D) Einschütten mit Grundmaterial

#### 4 Resultate

Bis zu einer Ganglinge mit  $Q_{max} = 23 \text{ m}^3/\text{s}$  (HQ<sub>100</sub>) zeigen alle getesteten Geometrien ein ähnliches Verhalten. In den stationären Versuchen  $Q = 8\text{-}17 \text{ m}^3/\text{s}$  werden die Feianteile der Sohle ausgewaschen und die Kolke hinter den Stufen tiefen sich ein. Weder die stufenbildenden noch die groben Blöcke in den Zwischenfeldern sind in Bewegung. Bei einem Spitzenabfluss von  $Q_{max} = 23 \text{ m}^3/\text{s}$  werden die Blöcke in den Zwischenfeldern bewegt und lagern sich teilweise an die bestehenden Stufen an. Vereinzelt werden Blöcke durch die Strömungsbelastung oder den Anprall anderer Blöcke aus den Stufen herausgelöst. Die Beschickung füllt im ansteigenden Teil der Ganglinie die Kolke in den Becken auf. Dadurch wird die Sohle glatter, was zu einer erhöhten Strömungsbelastung der stufenbildenden Blöcke führt. Stufen in der unteren Rinnenhälfte werden zum Teil komplett eingedeckt und so vor Erosion geschützt. Die Kolke werden im absteigenden Ast der Ganglinie wieder ausgewaschen.

In den Versuchen #1 und #2 versagen die dreilagigen Stufen bei einer Abflussspitze von  $30 \text{ m}^3/\text{s}$ . Die Stufen versagen durch Abrutschen in den Kolk oder aufgrund starker Schwankungen der Sohlenlage in den Zwischenfeldern. Das Versagen einer Stufe initiiert eine rückschreitende Erosion was zu einer abrupten Destabilisierung der nächsten oberliegenden Stufe und schliesslich der ganzen Sohle führt. Im Versuch #3 wurden nur zweilagige Stufen getestet. Von insgesamt 10 Stufen wurden kurz nach dem Durchgang der Abflussspitze von  $30 \text{ m}^3/\text{s}$  3 beschädigt und 5 komplett zerstört. Die ersten Stufen versagen wie in #1 und #2 kurz nach dem Erreichen der Abflussspitze, die Destabilisierung der Sohle erfolgt jedoch weniger abrupt. Beide in #4 getesteten Geometrien bleiben für eine Ganglinie mit  $Q_{max} = 30 \text{ m}^3/\text{s}$  ( $HQ_{300}$ ) stabil, die Geschiebebilanz zeigt jedoch eine leichte Erosionstendenz. Die Kolke werden im Vergleich zum Einbauzustand teilweise deutlich tiefer (Abb. 4a,b). Im oberen Bereich der Rinne bleiben alle Stufen intakt. Im unteren Abschnitt werden 33% durch direkte Erosion beschädigt, 5% (1 Stufe) zerstört und 62% bleiben intakt.

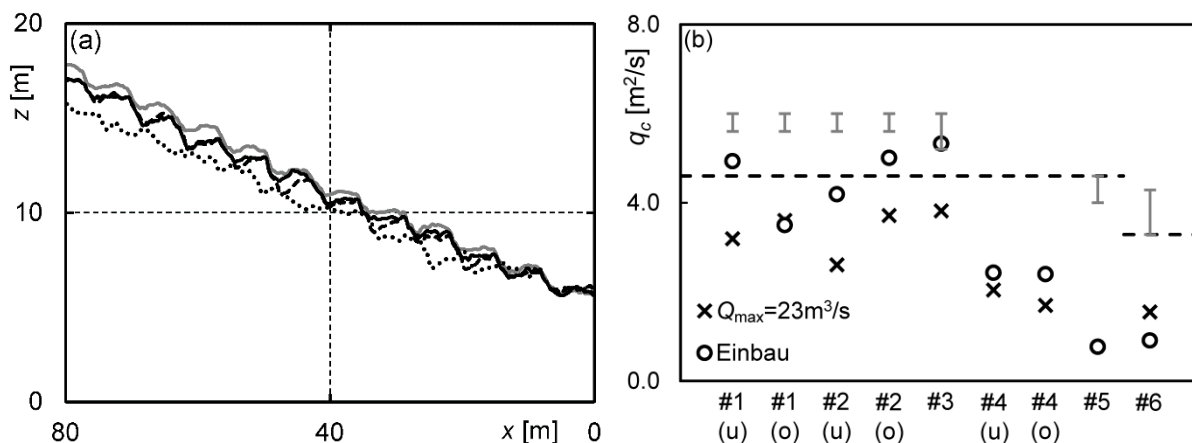
In #5 wurde die gleiche Geometrie wie in #4 im unteren Bereich getestet. Die Stufen versagten bei dem höheren Gefälle von 15% bereits bei der Abflussspitze von  $23 \text{ m}^3/\text{s}$  durch direkte Erosion der stufenbildenden Blöcke. Daraufhin wurde durch eine Verbreiterung der Sohle in #6 von 5 m auf 7 m die spezifische Belastung reduziert. Die Stufen-Becken-Abfolge bleibt für  $Q_{max} = 23 \text{ m}^3/\text{s}$  stabil, im Vergleich zu den Versuchen bei 8% kommt es jedoch zu keinem Zeitpunkt der Ganglinie zu einem Auffüllen der Kolke. Lediglich eine aus 11 Stufen (9%) wird beschädigt. Für die Ganglinie mit  $Q_{max} = 30 \text{ m}^3/\text{s}$  ( $HQ_{300}$ ) kommt es erst deutlich nach der Abflussspitze zur Zerstörung von über 60% der Stufen. Die Sohle vermag sich nicht wieder zu stabilisieren und das Längsgefälle flacht auf 12.8% ab (Abb. 5a).



**Abb. 4** Breitengemitteltes Längsprofil für Versuch #4 im (a) oberen, (b) unteren Abschnitt für (—) Einbauzustand (vgl. Abb. 3C), (---)  $HQ_{30}$ , (- -)  $HQ_{100}$  und (•••)  $HQ_{300}$

Alle gebauten Stufen-Becken-Abfolgen wurden vor dem Einschütten mit Grundmaterial und nach einer Belastung von  $23 \text{ m}^3/\text{s}$  vermessen. Mit der gemessenen Standardabweichung der Rauigkeitshöhen und dem Gefälle kann der kritische Durchfluss nach Aberle (2000) berechnet werden (Gl. 1). Versuche zu eigendynamisch gebildeten Stufen-Becken bei vergleichbaren Bedingungen haben gezeigt, dass die Stabilität durch Gl. (1) unterschätzt wird (Hohermuth *et al.* 2015, Hohermuth & Weitbrecht 2016). Für die Berechnung wurde der Koeffizient von 0.20 auf 0.29 angehoben.





**Abb. 5** (a) Breitengemitteltetes Längsprofil für Versuch #6 für (—) Einbauzustand (vgl. Abb. 3C), (---)  $HQ_{30}$ , (- -)  $HQ_{100}$  und (•••)  $HQ_{300}$ ; (b) Vergleich berechneter kritischer Durchfluss  $q_{c,berechnet}$  für (o) Einbauzustand, (x) nach  $Q_{max}=23$  m<sup>3</sup>/s mit  $q_{c,gemessen}$  bei (- -)  $HQ_{100}$ , (graue Balken) Versagensbereich bei  $HQ_{300}$ , (u) unten, (o) oben

Die berechneten kritischen Abflüsse liegen deutlich unter dem beobachteten Werten bei  $HQ_{300}$  (Abb. 5b). Auffällig ist, dass die beiden stabilsten Varianten aus Versuch #4 (kein Versagen für die untersuchten Abflüsse) deutlich tiefere berechnete Werte aufweisen als die Versuche #1 und #2. Die Stabilität der Versuche bei 15% wird selbst mit der angepassten Version von Gl. (1) stark unterschätzt.

## 5 Diskussion

In den Versuchen erweisen sich zweilagige Stufen stabiler als dreilagige. Dies deckt sich mit Erfahrungen aus der Literatur. Die Versuche zeigen keinen klaren Einfluss des Stufenabstands auf die Stabilität. In #4 konnten im oberen Abschnitt mit  $L = 22$  m Fließwechsel in den Becken beobachtet werden. Im unteren Abschnitt mit  $L = 7$  m war der Wasserspiegel phasengleich mit der Sohle gewellt und es konnten keine Wechselsprünge beobachtet werden. Die Kolkiefen waren im Vergleich zum oberen Abschnitt kleiner. Idealerweise wäre der Stufenabstand so kurz, dass die Kolktiefe begrenzt wird und lang genug, damit die Energiedissipation in den Wechselsprüngen gross ist. Die Begrenzung der Kolktiefe durch eine Gegenschwelle und Blöcke im Kolkbecken ist essentiell um ein schlagartiges Versagen der Stufen-Becken-Abfolge zu verhindern. Bei der Variante mit dem grossen Stufenabstand führt das Versagen einer Stufe zum schlagartigen Kollaps des ganzen Abschnitts. Die Variante mit dem kurzen Abstand bleibt auch nach der Zerstörung einiger Stufen stabil. Bei 15% Sohleineigung brachte die Verbreiterung des Gerinnes die gewünschte zusätzliche Erosionsfestigkeit. Versuche mit eigendynamisch gebildeten Stufen zeigen, dass die Verbreiterung der Sohle auch negative Auswirkung auf die Bildung von Stufen haben kann (Zimmermann 2010, Hohermuth *et al.* 2015).

Der Ansatz von Aberle (2000) zur Beschreibung der Stabilität von eigendynamisch gebildeten Stufen erfasst die Stabilität von gebauten Stufen-Becken nicht. Bei diesen Abfolgen ist die Stabilität einer einzelnen Stufe entscheidend. Der massgebende Versagensmechanismus ist bei ausreichender Blockgrösse das Abrutschen in den Kolk.



## 6 Schlussfolgerungen

Mit Modellversuchen konnten für den Betelriedgraben zwei Bauweisen naturnaher Stufen-Becken-Abfolgen gefunden werden, welche bei 8% Neigung selbst im Überlastfall ( $HQ_{300}$ ) stabil bleiben. Um ein abruptes Versagen der Stufen-Becken-Abfolge zu verhindern, ist die Begrenzung der Kolkentiefe durch eine Gegenschwelle und Blöcke im Kolk essentiell. Bei 15% Neigung wurde die Variante mit dem kürzeren Stufenabstand gewählt. Die Reduktion der spezifischen Belastung durch die Verbreiterung der Sohle führt dazu, dass die Stufen im Bemessungshochwasser ( $HQ_{100}$ ) stabil bleiben und im Überlastfall graduell versagen.

Vorhandene Bemessungsansätze zeigen grosse Unterschiede bezüglich des benötigten Blockdurchmessers. Zur konstruktiven Ausführung der Stufen finden sich nur grobe Richtwerte. Um generelle Bemessungsansätze zu entwickeln, muss die Interaktion von Stufenabstand, Kolkentiefe und Energiedissipation besser verstanden werden. Momentan ist die Dimensionierung von naturnahen Stufen-Becken-Abfolgen zur Sohlstabilisierung nur mittels Modellversuchen möglich.

## Danksagungen

Wir danken R. Haupt und C. Vögeli für ihre tatkräftige Mithilfe bei den Versuchen im Rahmen ihrer Projektarbeit. Die vorgestellte Untersuchung wurde durch den Renaturierungsfonds des Kantons Bern und die Schwellenkorporation Zweisimmen mitfinanziert.

## Literatur

- Aberle, J. (2000). Untersuchung der Rauheitsstruktur zur Bestimmung des Fließwiderstandes in Gebirgsbächen unter Klarwasserabfluss. *Mitteilung 207*. Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik, Universität Karlsruhe, Karlsruhe.
- Abrahams A.D., Li, G., Atkinson, J.F. (1995). Step-pool streams: Adjustment to maximum flow resistance. *Water Resour. Res.* 31(10), 2593–2602.
- Bathurst, J.C., Graf, W.H., Cao, H.H. (1982). Initiation of sediment transport in steep channels with coarse bed material. *Mechanics of sediment transport*; Proc. Euromech 156, 207-213, Istanbul. Rotterdam: Balkema.
- Church, M., Zimmermann, A. (2007). Form and stability of step-pool channels: Research progress. *Water Resour. Res.* 43(3), W03415.
- Comiti, F., Mao, L. (2012). Recent advances in the dynamics of steep channels. *Gravel-bed Rivers: Processes, Tools, Environments*, 353-377, M. Church, P.M. Biron, A.G. Roy, eds. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd.
- Crowe, J.C. (2002). An experimental study of the step-pool bedform. *Doktorarbeit*. The Johns Hopkins University, Baltimore ML.
- Hohermuth, B., Hunzinger, L., Weitbrecht, V. (2015). Physical experiments to determine the stability of step-pool systems in mountain torrents. E-proceedings 36<sup>th</sup> IAHR World Congress, The Hague 28 June – 3 July.
- Hohermuth, B., Weitbrecht, V. (2016). Effects of bed-load on flow resistance and stability in step-pool systems. Proc. Intl. Symp *River Sedimentation*, Stuttgart 19 – 22 September. *accepted*
- Lenzi, M.A. (2002). Stream bed stabilization using boulder check dams that mimic step-pool morphology features in Northern Italy. *Geomorphology* 45(3-4), 243-260.

- Milzow, C., Molnar, P., McArdeell, B.W., Burlando, P. (2006). Spatial organization in the step-pool structure of a steep mountain stream (Vogelbach, Switzerland). *Water Resour. Res.* 42(4), W04418.
- Palt, S.M. (2001). Sedimenttransportprozesse im Himalaya-Karakorum und ihre Bedeutung für Wasserkraftanlagen. *Mitteilung* 209. Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik, Universität Karlsruhe, Karlsruhe.
- Raudkivi, A.J., Ettema, R. (1982). Stability of armor layers in rivers. *J. Hydraul. Div. ASCE*, 108(HY9):1047–1057.
- Thomas, D., Abt, S., Mussetter, R., Harvey, M. (2000). A design procedure for sizing step-pool structures. In Rollin H., Hotchkiss, M.G., eds. *Building Partnerships - 2000 Joint Conference on Water Resource Engineering and Water Resources Planning and Management, Minneapolis July 30 - August 2*.
- Vogel, S. (2003). Ansätze zur Bemessung rauher Rampen in aufgelöster Bauweise. *Heft 88*. Institut für Wasserwesen, Universität der Bundeswehr München, München.
- Weichert, R.B. (2006). Bed morphology and stability of steep open channels. *Mitteilung* 192. Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie VAW, ETH Zürich, Zürich.
- Whittaker, J.G. (1987). Sediment transport in step-pool streams. *Sediment transport in gravel-bed rivers*: 545-579, C.R. Thorne, J.C. Bathurst, R.D. Hey, eds. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd.
- Zimmermann, A., Church, M., Hassan, M.A. (2010). Step-pool stability: Testing the jammed state hypothesis. *J. Geophys. Res.* 115(F2): F02008.

### **Anschrift der Verfasser**

Benjamin Hohermuth

Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH Zürich

Hönggerbergring 26, CH-8093 Zürich

hohermuth@vaw.baug.ethz.ch

Dr. Lukas Hunzinger

Flussbau AG SAH

Schwarztorstrasse 7, CH-3007 Bern

lukas.hunzinger@flussbau.ch

Dr. Volker Weitbrecht

Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH Zürich

Hönggerbergring 26, CH-8093 Zürich

weitbrecht@vaw.baug.ethz.ch