

Mitteilungen

273

**Stufen-Becken-Tagung
24. August 2022, Zweisimmen**

Zürich, 2022

Herausgeber: Prof. Dr. Robert Boes

ETH zürich

Zitiervorschlag für VAW-Mitteilungen:

Stufen-Becken-Tagung
24. August 2022, Zweisimmen.

VAW-Mitteilungen 273, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW),
(R. M. Boes, ed.), ETH Zürich, Schweiz.

Im Eigenverlag der
Versuchsanstalt für Wasserbau,
Hydrologie und Glaziologie
ETH Zürich
CH-8093 Zürich

Tel.: +41 - 44 - 632 40 91
info@vaw.baug.ethz.ch
www.vaw.ethz.ch

Zürich, 2022

ISSN 0374-0056

DOI 10.3929/ethz-b-000576385

Organisiert von:



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Bundesamt für Umwelt BAFU

Bundesamt für Umwelt BAFU

ETH zürich

Versuchsanstalt für Wasserbau,
Hydrologie und Glaziologie, ETH Zürich

Unterstützt von:



Banholzer Bau AG



**Theiler
Ingenieure AG**

**dipl. Bauingenieure
ETH SIA USIC**

Theiler Ingenieure AG



Flussbau AG SAH
dipl. Ing. ETH/SIA flussbau.ch

Flussbau AG SAH



**Kanton Bern
Canton de Berne**

Wirtschafts-, Energie- und Umweltdirektion
des Kantons Bern, Amt für Landwirtschaft
und Natur, Fischereiinspektorat



Wirtschafts-, Energie- und Umweltdirektion

beffa tognacca gmbh
Wasserwirtschaft und Flussbau

Beffa Tognacca GmbH

3 LABORATORIUM

Laboratorium^{3D}



Gebaute Stufen-Becken-Abfolge am Betelriedbach im August 2022 kurz nach der Erstellung (Foto: Theiler Ingenieure AG)

Vorworte

Steile Wildbäche wurden in den letzten Jahrzehnten meist mit Sperrentreppen aus Stahlbeton oder Holz verbaut, um die Sohlerosion zu reduzieren, den Geschiebetrieb zu regulieren und die Hangstabilität zu erhöhen. Diese massiven Schutzbauten erfüllen aus heutiger Sicht die ökologischen und landschaftlichen Anforderungen nur noch bedingt und weisen hohe Bau- und Instandhaltungskosten auf. Im Überlastfall können sie zudem abrupt versagen. Es besteht deshalb ein Bedarf an ökologischen, landschaftsverträglichen, kosteneffizienten, innovativen, integralen und gutmütigen Systemen zur Sohlstabilisierung in Wildbächen.

Stufen-Becken-Abfolgen erfüllen diese umfassenden Anforderungen und wurden in den letzten Jahren in einzelnen Wildbächen ausprobiert (z.B. Steinbach, Gross, SZ im Jahre 2013 und jetzt aktuell am Betelriedgraben, Zweisimmen, BE). Naturbelassene Wildbäche haben eine ausgeprägte Tendenz zur Selbststabilisierung durch die Bildung von Stufen-Becken-Abfolgen. Es existieren bereits Ansätze, diese Selbststabilisierungstendenz durch den übersteilten Einbau von grobem Material zu nutzen. Die Entstehung natürlicher Stufen-Becken-Abfolgen ist jedoch mit einem grossen Materialverlust verbunden und darum kaum praktikabel. Um die Menge des einzubringenden Materials und den Bauaufwand zu reduzieren, muss die Grundstruktur der Stufen-Becken-Abfolge baulich vorgegeben werden. Für dieses Vorgehen gibt es bisher nur unzureichende Bemessungsgrundlagen und nur wenig Praxiserfahrung.

Aus diesem Grund finanzierte das BAFU das Forschungsprojekt «Sohlstabilisierung mittels Stufen-Becken-Abfolgen in Wildbächen» an der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) der ETH Zürich. Im Forschungsprojekt wurde untersucht, wie sich die Stabilität von natürlichen Stufen-Becken-Abfolgen beschreiben lässt (Einfluss Fliesszustand, Geschiebetrieb und Kornverteilung), welche Mechanismen für die Entstehung und Zerstörung von natürlichen Stufen-Becken-Abfolgen verantwortlich sind und wie künstliche Stufen-Becken-Abfolgen am besten gebaut werden, damit sie einen gutmütigen Versagensmechanismus aufweisen und die ökologischen und landschaftlichen Anforderungen erfüllen. Das Forschungsprojekt wurde in den Jahren 2018 bis 2022 erfolgreich durch Fiona Maager als Doktorandin durchgeführt und durch eine Gruppe von Vertreterinnen und Vertretern von Kantonen, dem Bund und privaten Büros aus den Bereichen Wasserbau und Fischerei begleitet.

An der Stufen-Becken-Tagung vom 24. August 2022 in Zweisimmen

- wurden die Ergebnisse aus dem Forschungsprojekt «Sohlstabilisierung mittels Stufen-Becken-Abfolgen in Wildbächen» der Praxis vorgestellt, wodurch ein Wissenstransfer aus der Forschung in die Praxis erfolgte,
- fand durch mehrere Präsentationen realisierter Beispiele ein Erfahrungsaustausch statt,
- konnte das konkrete Projekt Betelriedgraben auf einer Exkursion besichtigt werden,
- gab es Inspiration für einen naturnahen Wasserbau in Wildbächen.

Wir danken der Schwellenkorporation Zweisimmen für die Bereitschaft, in ihrem Projekt am Betelriedgraben eine Stufen-Becken-Abfolge als Versuch umzusetzen und für die Gastfreundschaft für die Durchführung der Tagung. Wir bedanken uns herzlich bei der VAW für die erfolgreiche und interessante Durchführung des Forschungsprojekts. Auch herzlich danken möchten wir den Referentinnen und Referenten der Tagung sowie allen interessierten Teilnehmenden, welche nach Zweisimmen gereist sind, um sich dem spannenden Thema Stufen-Becken-Abfolgen in Wildbächen zu widmen.

Bern, im August 2022

Adrian Schertenleib, Eva Gertsch-Gautschi
Sektion Hochwasserschutz, BAFU

In der Vergangenheit wurden unzählige Wildbäche im Alpenraum mit Serien von Sperrentreppen verbaut, um Sohlerosion entgegen zu wirken und Hanginstabilitäten infolge von Sohlintiefungen zu vermeiden. Viel dieser Systeme kommen an ihr bauliches Lebensende und müssen in der näheren Zukunft saniert oder ersetzt werden. Die heutige Gewässerschutzgesetzgebung verlangt, stark vom Menschen überprägte Gewässer wieder naturnäher zu gestalten, wobei die Schutz- und Nutzungsfunktionen nicht vernachlässigt werden dürfen. Dies erfolgt idealerweise in Anlehnung an die ursprüngliche Morphologie und unter Verwendung von naturnahen Bauweisen mit dem Ziel, die Gewässerökologie und die Quantität und Qualität von Habitaten für Flora und Fauna zu verbessern. Bezogen auf steile Wildbäche stellen Stufen-Becken-Sequenzen eine typische Morphologie dar, welche sich natürlich ausbildet. In gewissen Längsneigungsbereichen sind zur Sohlstabilisierung baulich vorgegebene Stufen-Becken-Systeme als Alternative für Sperrentreppen geeignet. Solche Sequenzen lassen sich unter Verwendung grober Gesteinsblöcke baulich gestalten, um mit weniger Materialaufwand natürliche Stufen-Becken-Systeme nachzubilden. Durch die Abfolge von schiessendem und strömendem Abfluss, d.h. eine Aneinanderreihung von Wechselsprüngen im Bereich der Becken, ist die Energiedissipation auf solchen Stufen-Becken-Systemen sehr ausgeprägt.

Fiona Maager hat sowohl natürliche als auch gebaute Stufen-Becken-Systeme im Rahmen einer Dissertation an der VAW der ETH Zürich systematisch mit hydraulischen Modellversuchen untersucht. Sie hat damit das Wissen über natürliche Stufen-Becken-Abfolgen deutlich erweitert und z.B. eine Methode entwickelt, welche es erlaubt, die makrorauen Uferbereiche von Wildbächen zu quantifizieren. Vor allem aber hat sie aus ihren Resultaten ein Bemessungsschema entwickelt, mit dem gebaute Stufen-Becken-Systeme für Längsgefälle zwischen 4 und 8% dimensioniert werden können. Die für die wasserbauliche Praxis relevanten Ergebnisse hat sie an der Stufen-Becken-Tagung vom 24. August 2022 in Zweisimmen vor rund 75 Teilnehmerinnen und Teilnehmern vorgestellt und damit einen wichtigen Beitrag für den Wissenstransfer zwischen Forschung und Praxis geleistet.

Fiona Maagers Forschungsprojekt wurde vom BAFU finanziert (Projekt Nr. 17.0093.PJ/Q422-0908), wofür ich mich an dieser Stelle ganz herzlich bedanke. Zudem haben wir an der VAW die wertvolle Begleitung dieses Projekts durch Fachexperten und Fachexpertinnen aus der Verwaltung und Praxis sehr geschätzt – auch dafür ein herzlicher Dank an alle Beteiligten.

Mein besonderer Dank geht an dieser Stelle an die Schwellenkorporation Zweisimmen, die Gemeinde Zweisimmen, an Dr. Eva Gertsch-Gautschi (BAFU), David Hodel (Theiler Ingenieure AG), Dr. Lukas Hunzinger (Flussbau AG), Karin

Gafner (Fischereiinspektorat des Kantons Bern), Bruno Kohler (Banholzer Bau AG) und alle Referenten für die grosse Unterstützung bei der Durchführung der Tagung in Zweisimmen. Und nicht zuletzt bedanke ich mich bei Dr. Fiona Maager, ihren Betreuern Dr. Volker Weitbrecht und Dr. Benjamin Hohermuth und allen Beteiligten der VAW für die hervorragende Forschungsarbeit und ihr grosses Engagement bei Organisation und Durchführung dieser Tagung.

Zürich, im September 2022

Prof. Robert Boes, VAW, ETH Zürich

Inhaltsverzeichnis

Sohlstabilisierung von Gebirgsbächen mittels gebauten Stufen-Becken-Abfolgen <i>Fiona Maager, Benjamin Hohermuth, Volker Weitbrecht, Robert Boes</i>	1
Stufen-Becken am Steinbach: Erfahrungen aus der Praxis..... <i>Cornel Beffa</i>	13
Stufen-Becken-Abfolgen an der Maira: Erfahrungen im Labor und in der Praxis <i>Christian Tognacca, Stefano Tognacca</i>	19
Fischgängiges Traversensystem Sandweidli, Weisse Lütschine (BE)	
<i>Thomas Berchtold</i>	29
Stufen-Becken-Abfolgen am Betelriedbach.....	
<i>Lukas Hunzinger, David Hodel</i>	39
Anforderungen an steile Fliessgewässer aus Sicht der Fischerei	
<i>Karin Gafner</i>	47
Besichtigung Hochwasserschutz Betelried.....	
<i>Impressionen</i>	52

Sohlstabilisierung von Gebirgsbächen mittels gebauten Stufen-Becken-Abfolgen

Fiona Maager, Benjamin Hohermuth, Volker Weitbrecht, Robert Boes

Kurzfassung

Gebaute Stufen-Becken-Abfolgen aus natürlichem Blockmaterial stellen im Gegensatz zu den Sperrtreppen aus Beton eine naturnahe Alternative zur Sohlstabilisierung von steilen Gebirgsbächen dar. Im Rahmen einer Doktorarbeit an der VAW wurden physikalische Modellversuche durchgeführt, um die Kolkentwicklung, die Stabilität und die Versagensmechanismen solcher gebauten Stufen-Becken-Abfolgen zu untersuchen. Dabei waren das Blockgewicht der stufenbildenden Blöcke und die Geschiebezugaberrate wichtige Parameter hinsichtlich Stabilität. Das Stufenversagen war jeweils etwa zur Hälfte auf ein Kippen der oberen Blockreihe oder Unterkolkung der unteren Blockreihe zurückzuführen. Die Stabilität konnte mit einer im Längsschnitt pyramidenförmigen Blockanordnung erhöht werden, da die obere Blockreihe dadurch weniger stark der Strömung exponiert war und das Versagen durch Kippen erst bei grösseren Abflüssen erfolgte. Ein Kolkenschutz am Stufenfuss bestehend aus zwei Blocklagen führte ebenfalls zu einer Erhöhung der Stabilität, da die Unterkolkung damit unterbunden wurde. Basierend auf den Erkenntnissen aus den Modellversuchen wurde eine Bemessungshilfe für die Praxis erarbeitet.

1 Einleitung

In den vergangenen Jahrhunderten wurden oftmals starre Wildbachsperrren zur Sohlstabilisierung in steilen Bächen verwendet. Gebaute Stufen-Becken-Abfolgen stellen eine naturnahe Alternative dar, wobei die typische natürliche Stufen-Becken-Morphologie in Bächen mit Sohlneigung zwischen ~4 und 15% als Vorbild dient (Church & Zimmermann, 2007). Aufgrund der Fließwechsel zwischen schiessendem Abfluss über den Stufen und strömendem Abfluss in den Becken wird Energie dissipiert und damit die Sohle stabilisiert.

Im Rahmen einer Doktorarbeit an der VAW wurden physikalische Modellversuche durchgeführt, um die Kolkentwicklung, die Stabilität und die Versagensmechanismen solcher Systeme zu untersuchen (Maager, 2022). Die wichtigsten Resultate wurden in einer Bemessungshilfe für die Praxis zusammengefasst, welche im Folgenden präsentiert wird.

2 Physikalische Modellversuche

Die physikalischen Modellversuche wurden in einer Versuchsrinne im Massstab 1:20 nach Froude-Ähnlichkeit durchgeführt. Im Folgenden werden alle Einheiten im Naturmassstab angegeben. Die untersuchte Stufen-Becken-Abfolgen bestehen aus sechs bis acht Stufen mit Absturzhöhen von $H_d = 0.4$ bis 1.1 m und Stufenabständen zwischen $L_d = 6.7$ und 18.8 m (Abb. 1). Die Versuche wurden für Sohlneigungen $S = 4$ bis 8%, Gerinnebreiten $W = 6$ bis 12 m und für zwei unterschiedliche Grundmischungen mit $d_m = 9$ cm (beide), $d_{84} = 18$ und 21 cm und einer geometrischen Standardabweichung $\sigma_g \approx 5$ (mit $\sigma_g = (d_{84}/d_{16})^{1/2}$) durchgeführt. Die zweilagigen Stufen (Abb. 1) bestehen aus Blöcken mit mittlerem Blockgewicht zwischen $M_B = 4.6$ und 8.0 t. Ausserdem wurden zusätzliche Blöcke zwischen den Stufen platziert, welche die Kolkentiefe begrenzen sollen. Neben der Basiskonfiguration (Abb. 1c) wurde eine pyramidenförmige Anordnung der Stufen ohne (Abb. 1d) und mit Kolkenschutz (Abb. 1e) untersucht. Mehr Informationen zum Versuchsaufbau können Maager (2022) entnommen werden.

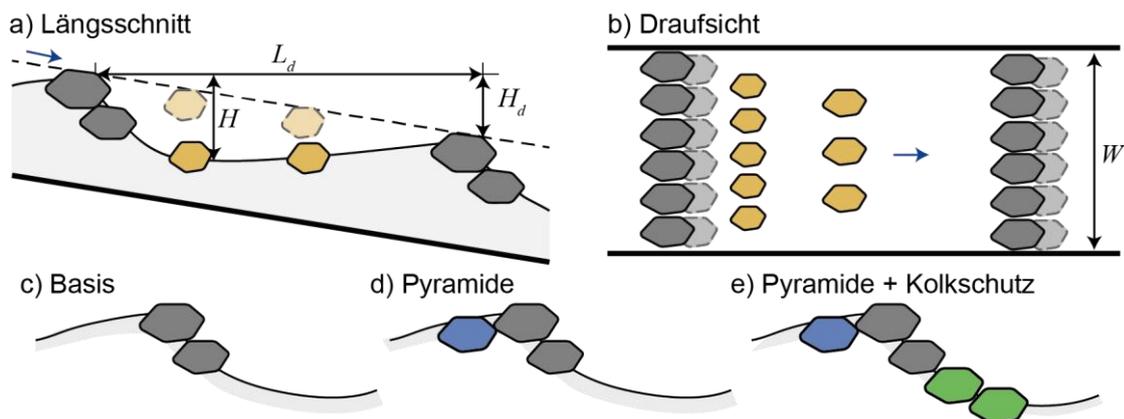


Abb.1: Skizze der Stufen-Becken-Abfolge mit a) Längsprofil, b) Draufsicht, c) Basiskonfiguration, d) pyramidenförmige Anordnung und e) pyramidenförmige Anordnung mit Kolkenschutz; L_d = Stufenabstand, H_d = Absturzhöhe und H = gesamte Stufenhöhe.

Das Stufen-Becken-System wurde mittels Ganglinierversuche untersucht, wobei die Hochwasserspitze rund 20 Minuten dauerte und nach $\frac{1}{4}$ der Gesamtdauer erreicht wurde. Der spezifische Abfluss der Hochwasserspitze $q = Q/W$ wurde schrittweise erhöht bis zum Systemversagen, d.h. bis die mittlere Sohlneigung um mehr als 1% vom Ursprungsgefälle abgenommen hat. Zwischen den Ganglinien wurde die Sohle getrocknet, damit ein hochaufgelöstes digitales Höhenmodell (DEM) mittels Structure from Motion (SfM) – Photogrammetrie ermittelt werden konnte. Die mittlere Fliessgeschwindigkeit v wurde mittels Salzverdünnungsmethode bestimmt. Die Versuche wurden sowohl bei Reinwasserbedingungen als auch mit Geschiebezugabe durchgeführt. Dabei wurde maximal 20% der rechnerischen Transportkapazität nach Rickenmann (1990) beschickt.

3 Resultate

3.1 Versagensmechanismen

Die häufigsten Versagensmechanismen waren Kippen der oberen Blockreihe (46%, Abb. 2a) und Abrutschen der unteren Blockreihe aufgrund von Unterkolkung (45%, Abb. 2b). Weniger häufig beobachtet wurden ein Stufenversagen infolge innerer Erosion (5%), direkter Erosion der Blöcke (3%) und Beckenverfüllung mit Geschiebe (1%). In den Versuchen wurde sowohl ein *gradueller* (30%) als auch ein *abruptes* (70%) Systemversagen beobachtet.

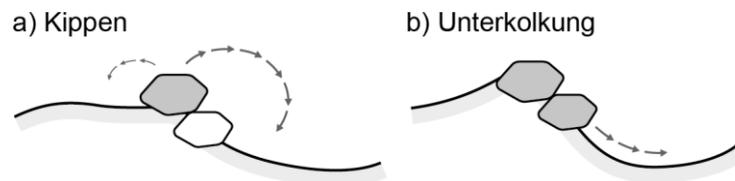


Abb. 2: Skizze der Versagensmechanismen der Stufen: a) Kippen der oberen Blocklage und b) Abrutschen infolge Destabilisierung des Stufenfusses.

Beim *graduellen* Systemversagen bewegten sich die Blöcke in den Stufen vereinzelt und sehr lokal, wobei die Stufe nicht komplett zerstört wurde. Die Sohlneigung nahm bei einer Erhöhung des Spitzenabflusses kontinuierlich ab, wobei die Abnahme ΔS vergleichsweise klein war ($\Delta S \ll 1\%$), speziell im Vergleich zum abrupten Systemversagen. Ein Versagensmechanismus, welcher typischerweise zu einem graduellen Systemversagen führte, war das Versagen durch innere Erosion. Dabei wurde das Feinmaterial ausgewaschen, wodurch sich die stufenbildenden Blöcke schrittweise voneinander entfernten. Dadurch entstand eine Art aufgelöster Blockteppich und die für Stufen-Becken-Abfolgen typischen Wechselsprünge verschwanden, was zu einer weniger effizienten Energiedissipation führte.

Beim *abrupten* Systemversagen blieben in der Regel alle stufenbildenden Blöcke bis zu einem bestimmten Abfluss an Ort und Stelle. Versagte dann eine Stufe, führte das zum Versagen aller oberhalb liegender Stufen, was in Abb. 3 für einen ausgewählten Versuch gezeigt wird. Die Stufe V versagte initial infolge Unterkolkung, wodurch die Kolkentiefe der oberhalb liegenden Stufe IV zunahm und diese nach $\Delta t \approx 3$ bis 4 Minuten ebenfalls versagte. Dieser Erosionsprozess schritt ins Oberwasser fort, bis alle oberhalb liegenden Stufen komplett zerstört wurden. Für das gezeigte Beispiel nahm die Sohlneigung innerhalb von 5 bis 10 Minuten (Naturmassstab) um $\Delta S \approx 2\%$ ab, was insbesondere im oberen Bereich zu Eintiefungen von mehreren Metern führte.

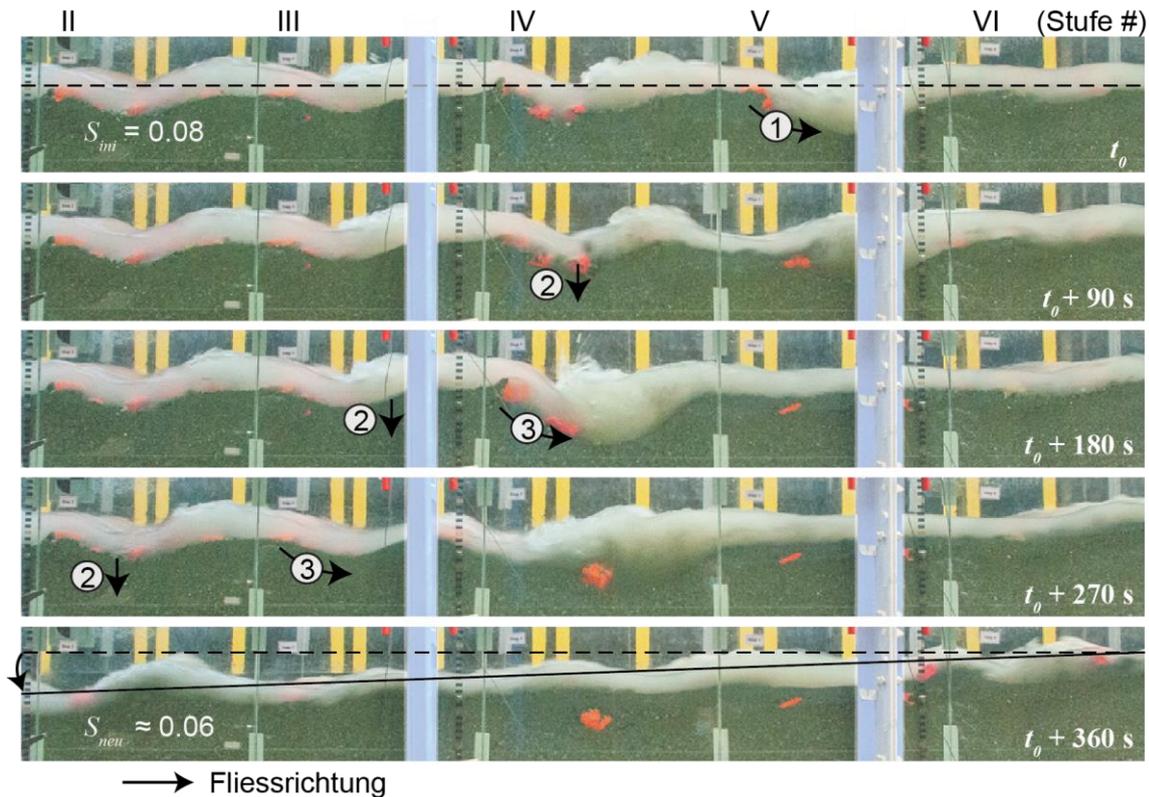


Abb. 3: Seitliche Aufnahmen der Versuchsrinne parallel zum Initialgefälle S_{ini} . Beispiel für ein abruptes Systemversagen für $S = 0.08$, $W = 6$ m, $M_B = 4.6$ t, $H_d = 1.1$ m, $L_d = 14$ m mit Geschiebezugabe ($\sim 20\%$ der Transportkapazität) bei $q = 8.75$ m²/s: ① initiales Stufenversagen infolge Unterkolkung, ② Kolkentiefe nimmt zu, ③ Versagen der oberhalb liegenden Stufe.

Die häufigsten Versagensmechanismen infolge Kippen (in Fließrichtung) und Unterkolkung können beide potenziell ein abruptes Systemversagen auslösen. Um ein abruptes Systemversagen im Bemessungsereignis zu verhindern, muss das System ausreichend stabil dimensioniert werden. Im folgenden Abschnitt wird daher näher auf die Stabilität von gebauten Stufen-Becken-Abfolgen eingegangen.

3.2 Stabilität von gebauten Stufen-Becken-Abfolgen

Das System galt bis zum spezifischen Abfluss q_{stab} als stabil, bei welchem die Sohlneigung gerade noch nicht um mehr als 1% vom Initialgefälle abnahm. Demzufolge versagte das System beim darauffolgenden spezifischen Abfluss $q_f(1\%)$, bei welchem die Sohlneigung um mehr als 1% abnahm ($\Delta S > 1\%$). Die wichtigsten Parameter hinsichtlich Stabilität waren das mittlere Gewicht der stufenbildenden Blöcke M_B , die Geschiebezugaberate sowie die Anordnung der stufenbildenden Blöcke (Basis, Pyramide und Pyramide + Kolkschutz, Abb.1c-e). Wie erwartet nahm $q_f(1\%)$, und damit die Stabilität, mit zunehmendem Blockgewicht zu (Abb. 4). In Versuchen mit Geschiebezugabe (ausgefüllte Symbole, Abb. 4) blieb das System stabil für spezifische Abflüsse, die ungefähr $\Delta q = 4$ bis

5 m²/s grösser waren als bei den entsprechenden Versuchen bei Reinwasserbedingungen. Das war einerseits auf die kleineren Stufenhöhen H (bzw. Kolk-tiefen) in Versuchen mit Geschiebezugabe zurückzuführen, wodurch das Stufenversagen infolge Unterkolkung erst bei einer grösseren Belastung erfolgte. Andererseits war das Stufenversagen durch Abkippen der oberen Blocklage wahrscheinlicher in Reinwasserversuchen, da das Feinmaterial zwischen den Stufen ausgewaschen wurde, wodurch die obere Blocklage stärker der Strömung exponiert war. Möglicherweise spielt auch die Verteilung zwischen den stufenbildenden Blöcken und dem Grundmaterial (mit maximaler Korngrösse $d_{max} = 64$ cm) eine Rolle, wodurch ein Teil der auf die Stufe wirkende Kräfte in die Ufer abgeleitet wird.

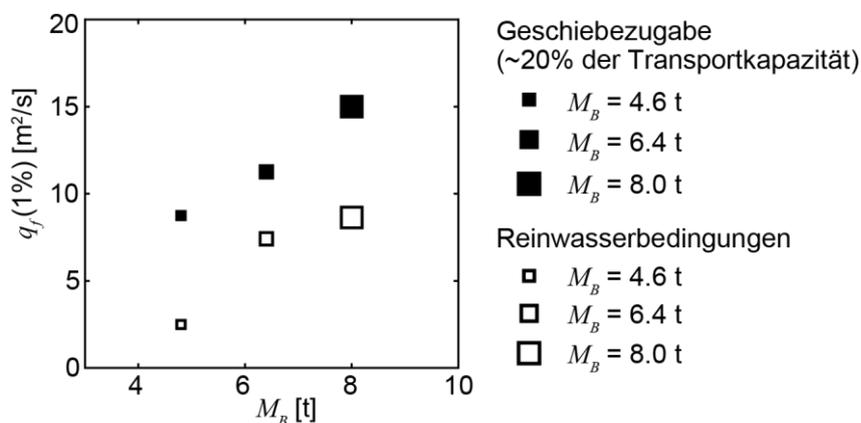


Abb. 4: Einfluss des Blockgewichts und der Geschiebezugabe auf die Stabilität der gebauten Stufen-Becken-Abfolgen für $S = 0.08$, $W = 6$ m, $H_d = 1.1$ m, $L_d = 14$ m; q_f (1%) = spezifischer Abfluss, bei welchem die Sohlneigung um $\Delta S > 1\%$ abnahm (Systemversagen); M_B = mittleres Blockgewicht.

Neben dem Blockgewicht und der Geschiebetransportraten spielte zusätzlich die Blockanordnung in der Stufe (Abb. 1c-e) eine wichtige Rolle. Das System versagte sowohl bei der Konfiguration «Pyramide» als auch bei «Pyramide + Kolk-schutz» bei einer grösseren spezifischen Belastung als bei der «Basis»-Konfiguration. Durch die oberwasserseitige Blocklage (blaue Blöcke in Abb. 1d) war die obere Blocklage der Stufe in der Konfiguration «Pyramide» weniger stark der Strömung exponiert. Der unterwasserseitige Kolk-schutz im Becken (grüne Blöcke in Abb. 1e) verhinderte ein frühes Stufenversagen infolge Unterkolkung. Es gilt aber zu beachten, dass die Belegungsdichte mit den pyramidenförmigen Anordnungen mit und ohne Kolk-schutz deutlich zunimmt, was sich wiederum negativ auf die Baukosten auswirkt.

3.3 Anpassungsmechanismen an eine zunehmende Belastung

Als Nächstes wird auf die Anpassungsmechanismen der Sohle steiler Fließgewässer an eine zunehmende Belastung eingegangen. Dazu wird ein Konzept verwendet, welches ursprünglich für natürliche Stufen-Becken-Abfolgen entwickelt wurde (Aberle, 2000; Weichert *et al.*, 2009). Abb. 5a zeigt den Zusammenhang zwischen der Sohlneigung S und dem dimensionslosen Parameter $q^* = q/(g\sigma_z^3)^{1/2}$, wobei g = Erdbeschleunigung und σ_z = Standardabweichung der Rauheiterhebungen (Mass für die Sohlrauheit nach Aberle & Smart, 2003). Aberle (2000) hat folgendes Stabilitätskriterium mithilfe von physikalischen Modellversuchen ermittelt:

$$q^* = \frac{q_{stab}}{\sqrt{g\sigma_z^3}} = 0.20S^{-1.3} \quad (1)$$

Folglich wird für den spezifischen Abfluss q_{stab} bei Sohlneigung S und Sohlrauheit σ_z ein stabiler Zustand erreicht. Wird die Belastung nun erhöht (q nimmt zu), dann verschiebt sich das System in einen instabilen Zustand (Abb. 5a). Es gibt zwei grundlegende Mechanismen, wie das System wieder in einen stabilen Zustand zurückgelangen kann: ① die Sohlrauheit σ_z nimmt zu oder ② die Sohlneigung S nimmt ab. Die beiden Prozesse können auch gleichzeitig auftreten, dann bewegt sich das System auf Trajektorie ③ in Richtung stabilen Zustand.

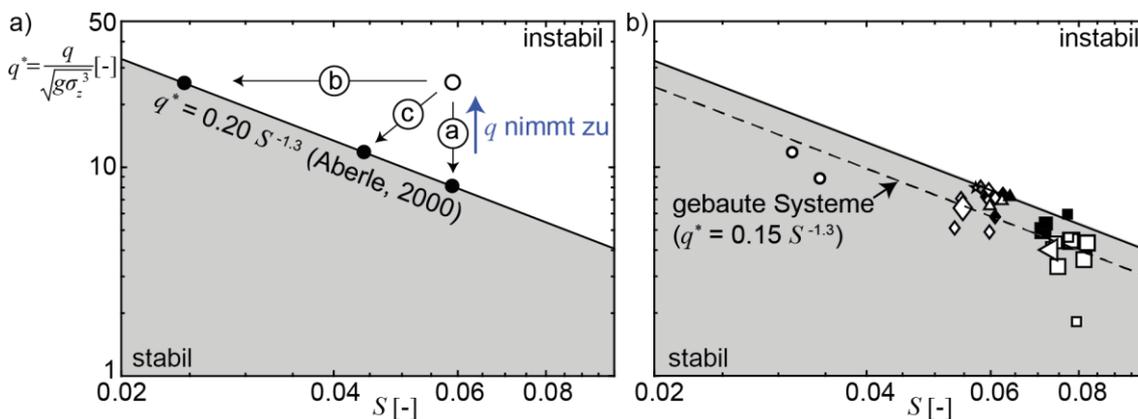


Abb. 5: Stabilitätsdiagramm nach Aberle (2000) und Weichert *et al.* (2009): a) Natürliche Stufen-Becken-Abfolgen; b) Datenpunkten für gebaute Stufen-Becken-Abfolgen für q_{stab} = spezifischer Abfluss, bei dem das System gerade noch stabil war (Abnahme der Sohlneigung $\Delta S < 1\%$).

Die Versuche haben gezeigt, dass sich diese Anpassungsmechanismen auch auf gebaute Stufen-Becken-Abfolgen anwenden lassen (Abb. 5b). Die Datenpunkte zeigen den spezifischen Abfluss q_{stab} für die 29 durchgeführten Versuche, bei welchem das System gerade noch stabil war. Die Datenpunkte befinden sich in der Nähe oder unterhalb der Stabilitätsgrenze für natürliche Stufen-Becken-Abfolgen. Zweiteres liegt insbesondere daran, dass die Geometrie des Systems

künstlich optimiert wurde und die Sohlrauheit σ_z damit bei tieferen Belastungen bereits grösser ist im Vergleich zu natürlichen Systemen. In der Natur wären grössere Abflüsse erforderlich, um die eingebaute Sohlrauheit zu erreichen. Für gebaute Stufen-Becken-Abfolgen wurde folgende Stabilitätsgrenze ermittelt (strichlierte Linie in Abb. 5b):

$$q^* = \frac{q_{stab}}{\sqrt{g\sigma_z^3}} = 0.15S^{-1.3} \quad (2)$$

Mit diesem Zusammenhang kann für eine bestimmte Sohlneigung S und einen spezifischen Dimensionierungsabfluss q ein Wert für die erforderliche Sohlrauheit σ_z abgeschätzt werden. Zwischen σ_z und der Stufenhöhe H besteht ein linearer Zusammenhang, wobei d_{84} die Sohlrauheit ohne Stufen abbildet:

$$\sigma_z = 0.5d_{84} + 0.26H \quad (3)$$

Folglich kann mit Gleichungen (2) und (3) für ein System mit Sohlneigung S und Dimensionierungsabfluss q die Stufenhöhe H und damit die Absturzhöhe H_d und der Stufenabstand L_d ermittelt werden. Dieser Zusammenhang ist die Grundlage für die Bemessungshilfe, welche im Folgenden präsentiert wird.

4 Bemessungshilfe

Für die Bemessung von gebauten Stufen-Becken-Abfolgen müssen zuerst die Sohlneigung S , der spezifische Bemessungsabfluss q , die Gerinnebreite W und der charakteristische Korndurchmesser d_{84} festgelegt werden. Es wird empfohlen, die Stufe pyramidenförmig zu bauen (Abb. 1d) und gegebenenfalls einen Kolkenschutz (Abb. 1e) vorzusehen. Die Bemessungshilfe ist in vier Schritte unterteilt: in den ersten beiden Schritten wird die Stufen-Becken-Geometrie festgelegt, im dritten Schritt wird die Hydraulik berechnet und im vierten Schritt wird die Blockgrösse dimensioniert. Eine ausführliche Beschreibung der Bemessungshilfe inklusive Bemessungsbeispiel ist Maager (2022) zu entnehmen.

Schritt 1: Erforderliche Sohlrauheit

Als erstes muss die erforderliche Sohlrauheit $\sigma_{z,req}$ mit Gleichung (4) berechnet werden, wobei der Parameter m zwischen 0.15 und 0.20 liegt (siehe Abb. 5b).

$$\sigma_{z,req} = \left(\frac{q}{mS^{-1.3}\sqrt{g}} \right)^{2/3} \quad m = 0.15 [0.15 \dots 0.20] \quad (4)$$

Mithilfe dieser erforderlichen Sohlrauheit lässt sich im nächsten Schritt 2 die Stufen-Becken-Geometrie (Absturzhöhe H_d und Stufenabstand L_d) festlegen. Mit

dem Parameter $m = 0.15$ resultierte die obere Grenze für $\sigma_{z,req}$, was gleichbedeutend ist mit einem Maximalwert für H_d und L_d (siehe Schritt 2). Demgegenüber stellt $m = 0.20$ die untere Grenze für $\sigma_{z,req}$ beziehungsweise für H_d und L_d dar. Folglich ist die Wahl $m = 0.15$ eher auf der sicheren Seite bezüglich der erforderlichen Sohlrauheit. Aufgrund der grösseren Stufenhöhen sind aber grössere Blöcke erforderlich, um das Versagen aufgrund von Unterkolkung zu vermeiden. Es wird empfohlen, eine Sensitivitätsanalyse für den Parameter m durchzuführen.

Schritt 2: Stufen-Becken-Geometrie

Aus den Versuchen wurde folgende Gleichung ermittelt, woraus die Absturzhöhe H_d zum Erreichen der erforderlichen Sohlrauheit $\sigma_{z,req}$ berechnet werden kann:

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

mit $s = \rho/\rho_s =$ relative Sedimentdichte und $g =$ Erdbeschleunigung. Daraus kann mit Gleichung (6) der Stufenabstand L_d geometrisch ermittelt werden.

$$L_d = H_d/S; \quad (L_{d,min} = W) \quad (6)$$

Die Stufenhöhe (von der Stufenkrone bis zum tiefsten Punkt im Kolk) bei Reinwasserbedingungen H kann mit Gleichung (7), welche aus den Modellversuchen ermittelt wurde, abgeschätzt werden. Für Bedingungen mit Geschiebetrieb wird die Stufenhöhe H_s entsprechend reduziert.

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

Die resultierende Sohlrauheit σ_{z,H_s} der Stufen-Becken-Abfolge mit Absturzhöhe H_d und Stufenabstand L_d für Bedingungen mit Geschiebetransport wird mit Gleichung (8) berechnet.

$$\sigma_{z,H_s} = 0.50d_{84} + 0.26H_s \quad (8)$$

Im Grunde resultiert Gleichung (5) aus der Kombination der Gleichungen (6) bis (8) aufgelöst nach H_d für die Bedingung $\sigma_{z,req} = \sigma_{z,H_s}$. Um ein Stufenversagen infolge Unterkolkung zu vermeiden, sollte das Verhältnis zwischen Stufenhöhe und Absturzhöhe nicht zu gross gewählt werden:

$$H/H_d \leq c \quad c = 1.8 [1.1 \dots 2.6] \quad (9)$$

Falls dieses Verhältnis im Bereich $1.8 < H/H_d < 2.6$ liegt, wird ein Kolkschutz gemäss Abb. 1e empfohlen.

Schritt 3: Hydraulische Bedingungen

Im nächsten Schritt wird die mittlere Fließgeschwindigkeit mit folgender Gleichung nach Aberle & Smart (2003) ermittelt:

$$v = 0.96 g^{0.20} S^{0.20} q^{0.60} \sigma_{z, Hs}^{-0.40} \quad (10)$$

Daraus kann mittels Kontinuität die mittlere Abflusstiefe $h = q/v$ bestimmt werden. Um das für Stufen-Becken-Abfolgen typische Abflussregime mit schiessendem Abfluss über den Stufen und strömendem Abfluss in den Becken zu gewährleisten, müssen über den gesamten Abschnitt betrachtet strömende Bedingungen vorhanden sein (d.h. Froudezahl $F < 1$). Bei durchgehend schiessenden Bedingungen ist nicht mehr mit Fließwechseln in den Becken zu rechnen, wodurch die Energiedissipation weniger effizient ist.

Schritt 4: Erforderliche Blockgrösse

Im letzten Schritt wird die erforderliche Blockgrösse D festgelegt. Um ein Abkippen der oberen Blocklage zu verhindern, soll eine dimensionslose kritische Sohl Schubspannung θ_c nicht überschritten werden:

$$\theta \leq b \theta_c; \quad \theta = \frac{hS}{(s-1)D} \quad (11)$$

mit $\theta_c = 0.15 S^{0.25}$, wobei die Zunahme von θ_c für grossen Sohlneigungen berücksichtigt wird (Lamb *et al.*, 2008). Gemäss dem Konzept von Shields ist mit Erosion zu rechnen, sobald die Sohl Schubspannung einen kritischen Wert überschreitet ($\theta/\theta_c > 1$). Da die Sohle nicht durchgehend mit Blöcken mit Durchmesser D ausgekleidet ist, wird θ_c um den Faktor b reduziert. Nach Auflösen der Gleichung (11) nach dem Blockdurchmesser D resultiert:

$$D = \frac{hS}{(s-1) b (0.15S^{0.25})} \quad b = 0.56 [0.43 \dots 0.69] \quad (12)$$

Damit kann das Blockgewicht M_B über die Blockdichte ρ_s berechnet werden:

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

Der Parameter b wurde aus den Daten für gebaute Stufen-Becken-Abfolgen ermittelt. Es wird empfohlen, eine Sensitivitätsanalyse für b durchzuführen, da die Unsicherheiten bezüglich Blockgewicht sehr gross sind. Mit $b = 0.43$ resultieren grosse Blockdurchmesser D , welche sich beispielsweise in Situationen mit grossem Schadenpotenzial empfehlen. Demgegenüber resultieren mit $b = 0.69$ kleinere D , welche in Situationen mit geringem Schadenpotential oder bei kurzen Teststrecken denkbar sind.

Für Sohlen bestehend aus bimodalen Mischungen besteht die Gefahr, dass die grossen Blöcke abgleiten oder einsinken (Raudkivi & Ettema, 1982). Daher soll das Verhältnis zwischen Blockdurchmesser und charakteristischer Korngrösse des Grundmaterials D/d_{84} folgende Kriterien erfüllen:

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

Für $D/d_{84} > 11$ wird eine Filterschicht zwischen dem grossen Blockmaterial und dem feineren Untergrundmaterial empfohlen.

Als letztes soll überprüft werden, ob das Verhältnis zwischen Stufenhöhe und Blockdurchmesser H/D nicht zu gross wird, um ein Versagen durch Unterkolkung zu verhindern:

$$H/D < e \qquad e = 1.0 [1.0 \dots 1.5] \qquad (15)$$

Für $1.0 < H/D < 1.5$ wird ein Kolkenschutz gemäss Abb. 1e empfohlen, um ein Versagen infolge Unterkolkung zu vermeiden.

Bemerkungen zur Ufersicherung

Damit bei praktischen Anwendungen die gebauten Stufen-Becken-Abfolgen stabil bleiben, muss die Uferstabilität gewährleistet werden, was eine genügend tiefe Fundation der Ufersicherung voraussetzt. Mit Gleichung (7) kann die mittlere Stufenhöhe, und damit die Kolkentiefe, abgeschätzt werden. Die Stufenhöhe variierte innerhalb der Stufen-Becken-Abfolge sehr stark, wobei die maximale Stufenhöhe einer einzelnen Stufe teilweise bis zu 50% grösser war als die mittlere Stufenhöhe ($H_{max} \leq 1.5 H$).

Die Versuche wurden in einer geraden, rechteckigen Versuchsrinne mit glatten, senkrechten, nicht erodierbaren Ufern durchgeführt. Folglich wurden geneigte Böschungen, Ufererosion und Kurveneffekte nicht berücksichtigt. Es gilt zudem zu beachten, dass sich in breiten Gerinnen alternierende Bänke bilden können, wobei sowohl die Belastung auf die Ufer als auch die lokale Belastung an der Stufe deutlich zunehmen kann.

5 Zusammenfassung

Mithilfe von physikalischen Modellversuchen wurden die Versagensmechanismen, die Stabilität und die Kolkentwicklung gebauter Stufen-Becken-Abfolgen untersucht. Es hat sich gezeigt, dass über 90% aller Stufenversagen entweder auf Kippen oder Unterkolkung zurückzuführen waren. Das Versagen einer einzelnen Stufe führte potenziell zu einer rückwärtsschreitenden Erosion, wobei alle oberhalb liegenden Stufen innerhalb kurzer Zeit komplett zerstört wurden und die

mittlere Sohlneigung deutlich abnahm. Folglich ist zu gewährleisten, dass die einzelnen Stufen im Bemessungsergebnis stabil bleiben. Die wichtigsten Parameter hinsichtlich Stabilität waren das Blockgewicht, die Geschiebeverfügbarkeit und die Anordnung der Stufen. Eine pyramidenförmige Anordnung der stufenbildenden Blöcke und ein Kolkenschutz konnten die Stabilität der Stufe verbessern. Die Resultate wurden in einer Bemessungshilfe zusammengefasst, mit welcher die Absturzhöhe, der Stufenabstand, die Stufenhöhe, sowie die Blockgrösse der stufenbildenden Blöcke festgelegt werden können. Eine Sensitivitätsanalyse ist zwingend erforderlich, um die Unsicherheiten bezüglich Stufen-Becken-Geometrie (Absturzhöhe und Stufenabstand) und insbesondere bezüglich der erforderlichen Blockgrösse zu quantifizieren.

Referenzen

- 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.
- Church, M., & Zimmermann, A. (2007). Form and stability of step-pool channels: research progress. *Water Resources Research*, 43.
- 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-Mitteilung Nr. 272*, 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. *Ph.D. dissertation*, Laboratory of Hydraulics, Hydrology and Glaciology (VAW), ETH Zurich.
- Weichert, R.; Bezzola, G.; Minor, H.E. (2009). Bed erosion in steep open channels. *Journal of Hydraulic Research*, 47(3): 360–371.

Adressen der Autor/innen

Dr. Fiona Maager (maager@vaw.baug.ethz.ch)

Dr. Benjamin Hohermuth, Dr. Volker Weitbrecht, Prof. Dr. Robert Boes

Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH Zürich
CH-8093 Zürich, Höggerbergring 26

Stufen-Becken am Steinbach: Erfahrungen aus der Praxis

Cornel Beffa

Kurzfassung

Im Winter 2012/2013 wurde im Steinbach (Bezirk Einsiedeln, Kt. SZ) die Sohle auf einer Länge von rund 350 m mittels Stufen-Becken-Abfolgen gesichert. Dieser Verbautyp für steile Gerinne bis zirka 10% wurde von R. Weichert an der Versuchsanstalt für Wasserbau der ETH Zürich entwickelt (Weichert, 2006; Weichert *et al.*, 2007). Das Stufen-Becken-System wurde seit Fertigstellung mehrfach belastet. Ein Hochwasser im Juni 2016 hat dabei Schwachstellen der Verbauungen v.a. in der Ufersicherung aufgezeigt und Instandstellungsmassnahmen in grösserem Umfang notwendig gemacht.

1 Ausgangslage

Der Steinbach (Einzugsgebiet 3.2 km²; Bruttogefälle 19%) mündet westlich des Steinbachviadukts bei Euthal in den Sihlsee. Ein Hochwasserereignis im Juni 2007 hat neben den angrenzenden Gross- und Nidlaubach auch am Steinbach erhebliche Schäden verursacht. Beobachtet wurde die Mobilisierung von grossen Geschiebemengen und Schwemmholz im Oberlauf und Schäden an den Verbauungen im Ober- und Unterlauf. Das bestehende System von Schwellen und Sohlensicherungen war abschnittsweise massiv überlastet. Besonders betroffen war der mittels Sohlenpflasterung gesicherte Abschnitt im Hauptast (Wellchessibach). Ein Versagen der Sohlensicherung führte zu lokalen Eintiefungen bis zu mehreren Metern (Abb. 1).



Abb. 1: Zerstörungen nach dem Hochwasser 2007 (Aufnahmen August 2008).

Im Unterlauf wurde in den bestehenden Sammlern viel Geschiebe abgelagert und das Gerinne teilweise aufgefüllt. In der Folge wurde Kulturland übersart sowie Wohn- und Gewerbebauten überflutet. Laut Aussagen von Anwohnern waren die Ausmasse des Hochwassers 2007 die grössten seit mindestens 80 Jahren.

2 Bauprojekt

Zur Wiederherstellung des Sohlenschutzes wurden folgende Baumassnahmen näher untersucht:

1. Abfolge von Betonsperren (Sperrentreppe)
2. Dichte Blockbelegung (Raugerinne)
3. Aufgelöste Blockbelegung (aufgelöste, unstrukturierte Blockrampe)
4. Stufen-Becken-Abfolge (Selbststabilisierung)

Die Variante Stufen-Becken-Abfolge stellte unter den untersuchten Verbauethoden nach Abwägung aller wesentlicher Gesichtspunkte die beste Lösung dar. Das System ist sowohl hinsichtlich der Kosten als auch des Landschaftsbildes im Vorteil. Obwohl in der Praxis noch unerprobt, fiel der Entscheid auf diesen neuen Verbautyp.

2.1 Bemessung

Bei einem Bemessungsabfluss von $32 \text{ m}^3/\text{s}$ (HQ_{100}) ergibt sich bei einer anrechenbaren Sohlenbreite von 10 m ein spezifischer Abfluss von $3.2 \text{ m}^2/\text{s}$. Abb. 2 zeigt die gemäss Weichert (2006) notwendige Kornverteilung für die Stabilisierung eines Sohlengefälles von 10%.

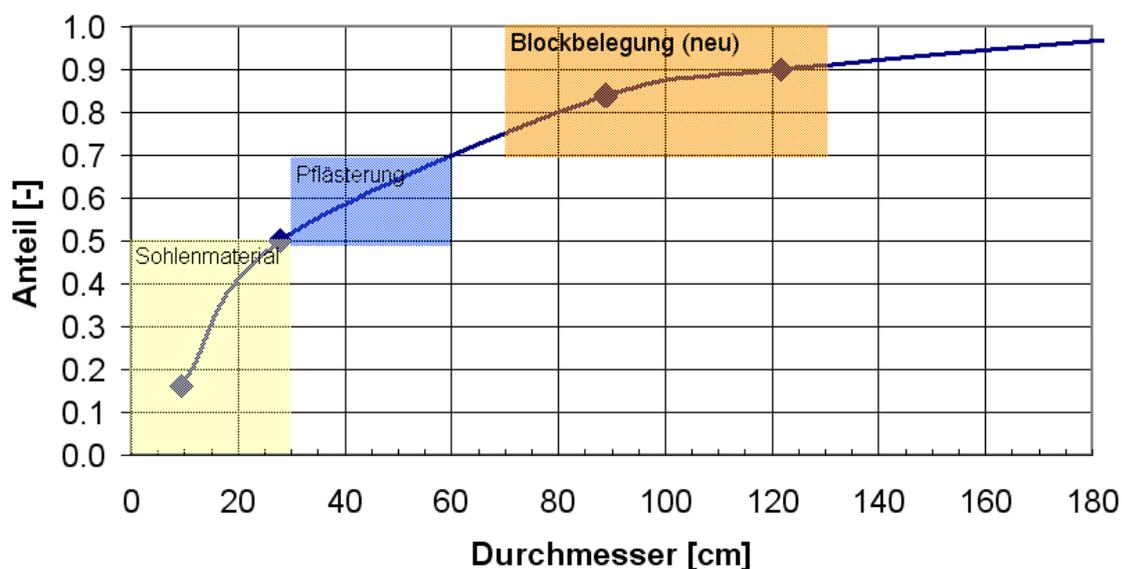


Abb. 2: Kornverteilung für eine stabile Deckschicht nach Bemessung Weichert (2006) für die Verhältnisse am Steinbach.

Das anstehende Kornmaterial deckt den Bereich bis Korndurchmesser von 30 cm ab. Die bestehende Sohlenpflasterung stellt die Fraktion von 0.3 bis 0.6 m. Die für die Bildung der Stufen wichtige Fraktion der grossen Blöcke mit Durchmesser grösser als 0.70 m muss zugeführt werden. Für die Mächtigkeit der Deckschicht wird der zweifache Wert des mittleren Korndurchmessers (D_{65}) angenommen. Bei einem Blockgewicht von 2.65 t/m^3 und einer Porosität von 30% führt dies auf eine notwendige Blockbelegung von 0.45 t/m^2 .

2.2 Ausführung

Für die praktische Ausführung wurde im Bauprojekt eine Blockbelegung von mindestens 0.45 t/m^2 empfohlen. Um der Tendenz des Abgleitens der Blöcke zu begegnen, sollte ein Mindestdurchmesser der Blöcke von 70 cm beachtet werden. Die Blöcke sollten gedrunen sein und ein Gewicht von **0.7 bis 3.0 t** aufweisen.

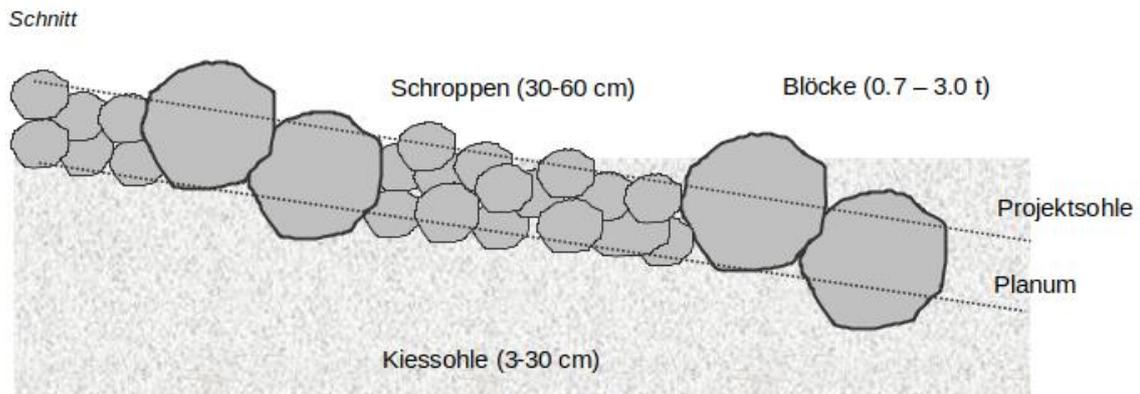


Abb. 3: Längsschnitt durch Stufen-Becken-Sequenz (Schemaskizze Ausführungsplanung).

Im Unterschied zur Versuchsanlage von Weichert (2006) wurden die Blöcke nicht in die Sohle eingemischt, sondern als zweilagige Blockstufen eingebaut und die Zwischenräume mit Schroppenmaterial aufgefüllt (Abb. 3).

Es wurden somit die Sohlenstrukturen imitiert, welche sich in den Laborversuchen von Weichert (2006) nach hydraulischen Belastungen durch Selbststabilisierung ergeben. Der Abstand der Blockstufen wurde zu 5 m gewählt, was bei einem Gefälle von 10% eine Stufenhöhe von 0.5 m ergibt.

3 Bisherige Entwicklung

Kleinere und mittlere Hochwasserabflüsse führten rasch zu der erwarteten Herausbildung der Becken-Stufen-Strukturen (Abb. 4). Nach kurzer Einschwemmphase war auch die Abdichtung der Sohle abgeschlossen.



Abb.4: Ansicht Steinbach nach Ausführung Stufen-Becken-Abfolge (Aufnahme Mai 2013).

Ein grösseres Hochwasser im Juni 2016 (geschätzte Wiederkehrperiode >30 Jahre) führte zu Schäden an den Schutzbauten. Betroffen waren primär die Ufer ohne Schutz durch massiven Blocksatz. Die Entwicklung von Sohlenformen (Bankbildung) hat das Versagen möglicherweise zusätzlich begünstigt. Ein grösserer Abtrag der Blöcke in der Sohle konnte hingegen nicht beobachtet werden. Im Rahmen der Instandstellungsmassnahmen wurde der Uferschutz mit massivem Blocksatz verstärkt und die Blockstufen – wo nötig – ergänzt (Abb. 5).



Abb. 5: Ansicht Steinbach fünf Jahre nach Instandstellung (Aufnahme Juni 2021).

4 Zusammenfassung

Am Steinbach wurden erstmalig Stufen-Becken-Sequenzen als naturnahe Massnahme zur Sohlensicherung von Gebirgsbächen erprobt. Die bisherigen Erfahrungen bestätigen im Wesentlichen die verwendeten Bemessungsgrundlagen von Weichert (2006). Aufgrund der sehr hohen Fliessgeschwindigkeiten während Hochwasser sind auch die Gerinneböschungen starken Belastungen ausgesetzt. Eine ausreichend bemessene Ufersicherung ist deshalb für die Stabilität des Gesamtsystems unerlässlich.

Fazit: Gebaute Stufen-Becken-Sequenzen zur Stabilisierung von Gebirgsbächen sind naturnah und in vielen Fällen auch wirtschaftlich interessant. Für den Gewässerunterhalt ist gute Zugänglichkeit von Vorteil. Verbesserte Bemessungsgrundlagen (Dissertation F. Maager) werden künftig eine noch effizientere Gestaltung ermöglichen.

Referenzen

Weichert, R. (2006). Bed morphology and stability of steep open channels. *VAW-Mitteilung Nr. 192*, 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*, Heft 2.

Adresse des Autors

Dr. Cornel Beffa (cbeffa@fluvial.ch)

Beffa Tognacca GmbH, Wasserwirtschaft & Flussbau
CH-6422 Steinen, Bahnhofstrasse 13a

Stufen-Becken-Abfolgen an der Maira: Erfahrungen im Labor und in der Praxis

Christian Tognacca, Stefano Tognacca

Kurzfassung

Zur Stabilisierung des steilen Abschnittes der Maira bei Promontogno wurde die Realisierung einer Stufen-Becken-Abfolge als Bestvariante definiert. Aufgrund der extremen hydraulischen Belastungen bei einem hohen Gefälle waren die Unsicherheiten bei der Bemessung gross und die offenen Fragen für die Umsetzung in der Praxis vielzählig. Aus diesen Gründen wurde eine physikalische Modelluntersuchung empfohlen. In den Modellversuchen wurde die Geometrie der Stufen-Becken-Sequenz auf ihr Stabilitätsverhalten untersucht und sukzessive optimiert, bis die Stabilität der Verbauung auf rund 360 m³/s erhöht werden konnte. Nach der Optimierung im Labor wurde das Projekt in der Praxis umgesetzt und mit einer künstlich erzeugten Hochwasserwelle auf rund 20 m³/s belastet, was eine erste natürliche Strukturierung der Sohle ermöglichte.

1 Situation

Die Maira in Promontogno entwässert ein Einzugsgebiet von rund 150 km² und weist sehr hohe Hochwasserabflüsse auf. Das HQ_{100} liegt bei 280 m³/s und HQ_{300} erreicht 420 m³/s. Seit der künstlichen Einengung des Gewässers auf 12 bis 14 m mit einem beidseitigem Längsverbau zum Schutz der lokalen Infrastruktur hat sich die Maira in diesem ca. 8 %-steilen Abschnitt zum Teil stark eingetieft.



Abb. 1: Maira im Projektperimeter im Zustand vor der Verbauung (Aufnahme: Sommer 2019).

Zur Stabilisierung der Flusssohle und zur Sicherung der Längsverbauungen erarbeitete das Büro beffa tognacca GmbH ein Variantenstudium, aus welcher eine Serie von Stufen und Becken als Bestvariante hervorging.

2 Bauprojekt

Zur Stabilisierung der Sohle der Maira untersuchte beffa tognacca (2016) im Rahmen einer Variantenstudie verschiedene Massnahmen, und zwar (1) eine klassische kompakte Blockrampe (Raugerinne), (2) eine Abfolge von Betonsperren (Sperrtreppe) und (3) eine Stufen-Becken-Abfolge.

Aus der Analyse der untersuchten Baumassnahmen wurde die Stufen-Becken-Abfolge als Bestvariante gewählt. Diese Variante wurde im nachfolgenden Bauprojekt weiter verfeinert (beffa tognacca, 2017). Insbesondere wurde die Bemessung des Sohlenmaterials nach Weichert (2006) durchgeführt und die Stabilitätsbedingungen des Einzelkorns nach Bezzola (2002) beurteilt. Aufgrund der für die sehr grossen spezifischen Belastungen noch bestehenden Unsicherheiten bei der Bemessung der Massnahmen und bei der baulichen Ausführung wurde eine Überprüfung und Optimierung anhand von physikalischen Modellversuchen empfohlen.

3 Laboruntersuchungen

Die physikalischen Modellversuche wurden in einer idealisierten Versuchsrinne im Massstab 1:30 nach Froude-Ähnlichkeit durchgeführt (Abb. 2). Die Versuche und die Resultate sind im Bericht des Laboratorium^{3D} (2020) ausführlich dokumentiert.



Abb. 2: Idealisiertes Gerinne der Maira im Modell, Fliessrichtung von rechts nach links.

Die Neigung der Rinne beträgt 8%, die Breite liegt bei 12 m und die Uferneigungen wurden in Anlehnung an den mittleren Bedingungen an der Maira bei 5/1 für das rechte Ufer und bei 3/1 für das linke Ufer definiert.

Insgesamt wurden vier Versuchsreihen durchgeführt. Bei jeder Versuchsreihe wurde der Abfluss stufenweise bis zum totalen Kollaps der Strukturen erhöht (Abb. 3). Bei jeder Belastungsstufe wurde der maximale Abfluss während mindestens einer Stunde (Naturzeit) konstant gehalten. Nach jeder Belastungsstufe wurde der Abfluss abgestellt, die Sohle vermessen (photogrammetrisch und mit Stechpegel) und der Zustand beurteilt. Eine schematische Darstellung der Belastungszyklen für die ersten Versuchsreihen ist in der folgenden Abbildung dargestellt. Die Größen sind in Naturmassstab angegeben.

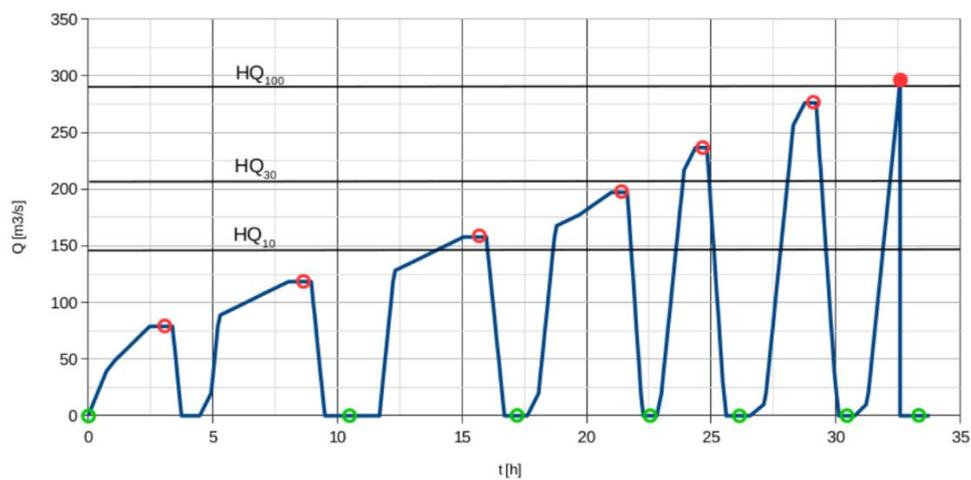


Abb. 3: Belastungszyklen für die 3. Versuchsreihe. Rote Kreisringe sind die untersuchten stationären Belastungen, bei den grünen Kreisringen wurde die Sohle vermessen, beim roten Punkt ist der Kollaps der Struktur eingetreten.

Entsprechend den beobachteten Bruchmechanismen und den allgemeinen Abflussbedingungen wurde die anfänglich realisierte Geometrie der Stufen-Becken-Abfolge nach jeder Versuchsserie progressiv verstärkt. Dabei wurde insbesondere die Anzahl Blockreihen in jeder Stufe sowie die Blockbelegung in den Becken sukzessiv erhöht.

4 Resultate

Dank der progressiven Erhöhung der Länge der Stufen (mit zusätzlichen Reihen am Fusse der Rampe) und dank der progressiven Verlängerung der Blockbelegung oberstrom (auch mit zusätzlichen Blockreihen) bei grundlegend gleichbleibender Geometrie der Struktur konnte die Stabilität der Stufen-Becken-Abfolge sukzessive erhöht werden. Die progressive Stabilisierung der Struktur wird in den

Abb. 4A bis 4C präsentiert. Dabei sind die verwendeten Blockklassen mit denselben Farben dargestellt, wie sie im physikalischen Modell gefärbt wurden. Zur Anwendung kamen vier Blockklassen: (1) rot: 11 bis 12 Tonnen, (2): 5 bis 6 Tonnen, (3) blau: 2 bis 3 Tonnen und (4) grau: rund 2 Tonnen. Die roten und grünen Blöcke bilden die Stufen inklusive der Reihen oberstrom des Rampenkopfes, die kleineren Blöcke (blau und grau) werden im Beckenbereich lose verteilt. Die Belegungsdichte wurde progressiv von ca. 1.2 t/m^2 bis auf 2.1 t/m^2 erhöht. Der kritische spezifische Abfluss konnte von $12.5 \text{ m}^2/\text{s}$ auf $30 \text{ m}^2/\text{s}$ erhöht werden, bei einer Sohlenbreite von 12 m.

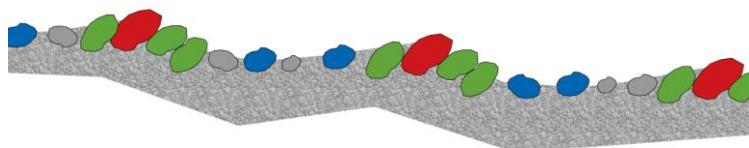


Abb. 4A: Stufen mit 3 Blockreihen + 1 im Oberwasser vorgelagerte Reihe. Stabil bis ca. $150 \text{ m}^3/\text{s}$. Kollaps infolge Erosion am Fusse der Stufe (Erläuterungen: siehe Text).

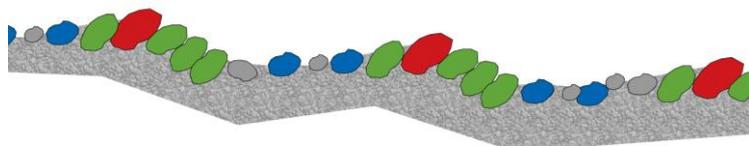


Abb. 4B: Stufen mit 4 + 1 Blockreihen. Stabil bis ca. $200 \text{ m}^3/\text{s}$. Kollaps infolge Erosion am Fusse der Stufe.

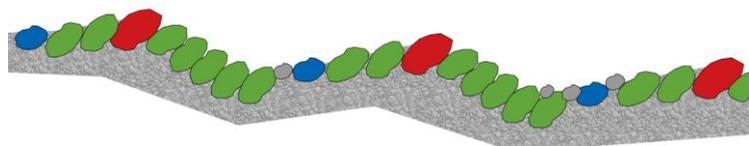


Abb. 4C: Definitive Dimensionierung: Stufen mit 6 Reihen + 2 vorgelagerte Blockreihen. Stabil bis ca. $360 \text{ m}^3/\text{s}$. Kollaps infolge Instabilität der oberen (roten) Reihe.

Bei einer progressiven Zunahme des Abflusses lassen sich bei der definitiven Geometrie folgende Fließzustände beobachten (vgl. Abb. 5A bis 5D):

A) Bei kleinen Abflüssen und bis zu einem Abfluss von 100 bis $120 \text{ m}^3/\text{s}$ bildet sich eine Abfolge von Fließwechseln. An der Krone der Stufe beschleunigt der Abfluss und schießt bis ins Becken, wo im Rückstau der nächsten Stufe ein Wechselsprung entsteht. Die grösste Belastung der Sohle liegt im Bereich des Wassersprungs am Fusse der Stufe.

B) Bei zunehmendem Abfluss wird der Wassersprung progressiv zur nächsten Stufe geschoben. Bis zu einem Abfluss von ca. 140 bis $150 \text{ m}^3/\text{s}$ ist immer noch die Ausbildung eines Wassersprungs klar zu erkennen. Die höchste Sohlenbelastung befindet sich im Beckenbereich.

C) Ab Abflüssen über ca. 160 m³ und bis Abflüsse um ca. 200 m³/s schießt die Strömung ohne Fließwechsel über die Stufen-Becken-Abfolge hinweg. Dabei ist die Fließtiefe relativ konstant.

D) Ab einem Abfluss von ca. 220 m³/s entwickelt sich eine Strömung mit einem mehr oder weniger regelmässigen Wasserspiegelverlauf. Dabei ist die Fließtiefe minimal bei den Stufenkronen und maximal am Fusse der Stufe. Im Becken bildet sich eine Art Wasserkissen, teilweise mit Rückwärtsströmungen.

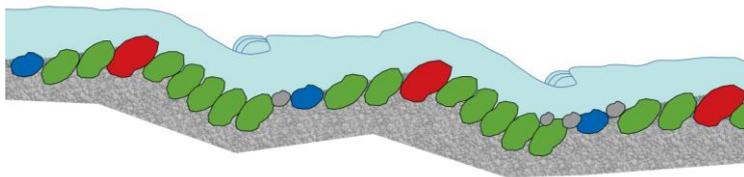


Abb. 5A: Der Wechsprung befindet sich am Fusse der Stufe. Abflüsse bis ca. 100-120 m³/s.

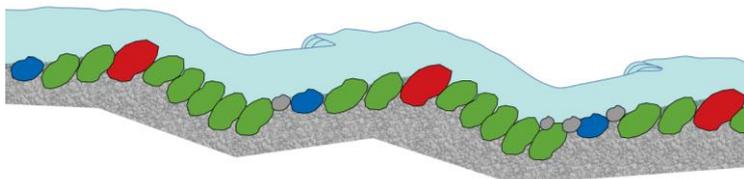


Abb. 5B: Der Wechsprung wird progressiv in Richtung nächster Stufe geschoben. Abflüsse bis ca. 140-150 m³/s.

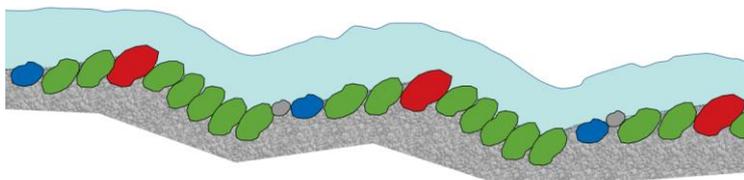


Abb. 5C: Der Abfluss schießt mit mehr oder weniger konstanter Fließtiefe über Stufen und Becken hinweg. Abflüsse bis ca. 200 m³/s.

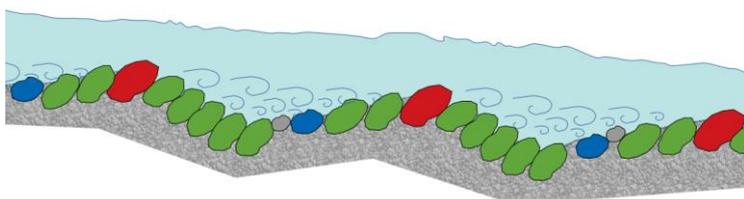


Abb. 5D: Der Abfluss schießt mit relativ linearem Wasserspiegel über die einzelnen Stufen hinweg. Abflüsse ab ca. 220 m³/s.

Die in den Versuchen optimierte Geometrie, welche die Grundlage für die Realisierung in der Maira bildete, ist in Abb. 6 dargestellt.

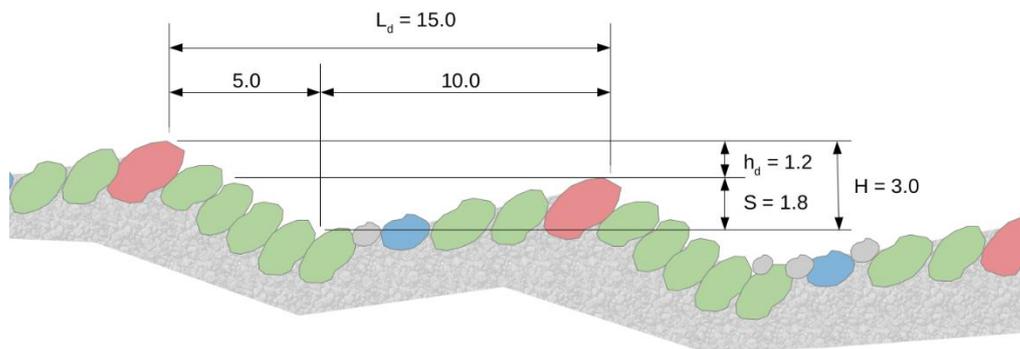


Abb. 6: Definitive Abmessung der Stufen-Becken-Abfolge für die Ausführung.

5 Realisierung

Die Stufen-Becken-Abfolge wurde im Winterhalbjahr 2019-2020 realisiert. Die Ausführung dauerte insgesamt 3 Monate. Zum Einsatz kamen rund 4'800 Tonnen Blöcke, welche in Bondo aus den Ablagerungen der Murgänge nach dem Bergsturz vom Cengalo im August 2017 gewonnen wurden. Bei einer Gerinnebreite zwischen 12 bis 14 m ergibt sich eine mittlere Belegungsichte von 2.1 t/m^2 . Insgesamt wurden auf einem 180 m langen Abschnitt 14 Stufen verbaut, mit einem mittleren Abstand von rund 15 m und einer mittleren Sohlneigung von 8%.

Im Allgemeinen beträgt das Gewicht der stufenbildenden Blöcke 6 bis 12 Tonnen. Verbaut wurden in der oberen Reihe der Stufen Blöcke bis zu 18 Tonnen. Die Anzahl Blocklagen in jeder Stufe liegt bei 6.



Abb. 7: Bau der Stufe Nr. 5 (Blick in Fliessrichtung), mit Anschluss an den Fels am linken Ufer.

Auf der Baustelle waren insgesamt zwei Bagger (einer beim Verladen der Blöcke in Bondo, der andere bei deren Verlegung in der Maira) und zwei grosse Dumper im Einsatz. Dank der grossen Erfahrung der Maschinisten konnten die Blöcke gemäss den Erkenntnissen aus den Laborversuchen auf einer groben Filterschicht (0 bis 1'000 mm) ideal verlegt werden.

6 Bisherige Entwicklung

Die rund 250 m lange Stufen-Becken-Abfolge an der Maira wurde unmittelbar nach der Fertigstellung (Ende März 2020) mit einem künstlich erzeugten Minihochwasser im April 2020 eingeweiht. Dabei wurde ein maximaler Abfluss von ca. 20 m³/s dank einer kontrollierten Öffnung des Grundablasses der Staustufe Löbbia (Kraftwerk von EWZ) erreicht. Die Situation in der Maira nach drei Belastungsstufen in der Natur ist in den Abb. 8A bis 8C dargestellt. Für jede Situation wird ein schematischer Längsschnitt präsentiert, wo die progressive Mobilisierung des Lockermaterials in den Becken zu sehen ist.

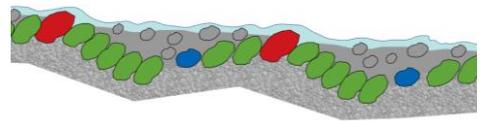


Abb. 8A: Links: Maira nach dem Bau (April 2020), oben: Schematischer Längsschnitt, Farben wie im Modell.

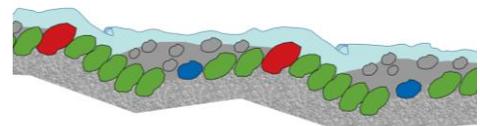


Abb. 8B: Links: Maira nach einer anfänglichen Belastung mit 20 m³/s (April 2020); oben: Schematischer Längsschnitt.

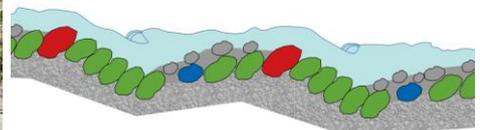


Abb. 8C: Links: Maira nach einem kleinen Hochwasser mit einem Abfluss von 80-90 m³/s (Okt. 2020); oben: Schematischer Längsschnitt.

Seit dem kleinen Hochwasserereignis im Oktober 2020 sind keine weitere nennenswerte Belastungen der Struktur eingetreten. Aus der bisherigen Entwicklung kann man die progressive Ausbildung der Beckenstrukturen infolge der Mobilisierung des Lockermaterials erkennen. Diese Entwicklung des Systems wird sich mit zunehmender hydraulischer Belastung künftiger Hochwasser fortsetzen.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Dank einer physikalischen Untersuchung im Labor konnte die geplante Stufen-Becken-Abfolge an der Maira in Promontogno auf ihr Stabilitätsverhalten untersucht und optimiert werden. Durch die progressive Erhöhung der Belegungsdichte und dank einer optimalen Geometrie der Stufen und Becken konnte die Stabilität des Systems bis auf fast HQ_{300} erhöht werden. Die Versuche zeigten, dass bei zunehmender Belegungsdichte das System progressiv starrer und sein Stabilitätsverhalten entsprechend spröder wird.

Als mögliche Verbesserungen des Systems bzw. als Möglichkeiten zur Erhöhung der Stabilität können folgende Baumassnahmen genannt werden:

1. Theoretisch könnten noch grössere Blöcken eingebaut werden, allenfalls in Kombination mit einer losen Verbauung zur Erreichung einer besseren Überlastbarkeit. Praktisch sind die Grenzen der Machbarkeit bezüglich Blockgrösse an der Maira allerdings mit der heutigen Technik schon erreicht worden.
2. Kombination der untersuchten Bauweise mit einer Verbreiterung der Sohle zur Minderung der spezifischen Belastungen. Dies wäre auch an der Maira theoretisch möglich gewesen, hätte allerdings schwere Folgen auf die Nutzung der Infrastruktur entlang des Flusses gehabt.
3. Zwei- oder sogar mehrlagiger Einbau von Blöcken.
4. Anwendung von künstlichen Stabilisierungselementen (Betonblöcke verschiedener Formen, wie zum Beispiel Tetrapoden oder Prismen). Diese Baumassnahme wäre praktisch möglich, hätte allerdings landschaftliche Nachteile und höhere Kosten zur Folge.
5. Einbetonierung einzelner oder sogar aller Stufen. Diese Variante wäre durchaus möglich, hätte allerdings höhere Kosten zur Folge. Ob das allgemeine Stabilitätsverhalten in jedem Fall besser wäre, müsste noch nachgewiesen werden.

Wie die Versuche im physikalischen Modell gezeigt haben, ist die Stabilität einer Stufen-Becken-Abfolge nicht unbegrenzt. Allerdings wäre eine weitere Erhöhung dieser Stabilität nur mit noch massiveren Eingriffen und noch höheren Kosten

denkbar. Im Falle der Maira wäre eine noch stärkere Dimensionierung der Bauwerke angesichts des Schadenpotentials bei einem Kollaps nicht wirtschaftlich gewesen.

Referenzen

beffa tognacca gmbh (2016), Maira a Promontogno, Sistemazione fluviale in zona Cava Böcc, Progetto di massima. Unveröffentlichter Bericht im Auftrag der Gemeinde Bregaglia.

beffa tognacca gmbh (2017), Maira a Promontogno, Sistemazione fluviale in zona Cäva Böcc, Stabilizzazione dell'alveo mediante alternanza di salti e pozze "step and pool", Progetto definitivo. *Unveröffentlichter Bericht* im Auftrag der Gemeinde Bregaglia.

Bezzola, G.R. (2002). Fließwiderstand und Sohlenstabilität natürlicher Gerinne unter besonderer Berücksichtigung des Einflusses der relativen Überdeckung. *VAW-Mitteilung Nr. 173*, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH Zürich.

Laboratorium^{3D} GmbH (2020). Maira a Promontogno, Sistemazione fluviale in zona Cäva Böcc, Stabilizzazione dell'alveo mediante alternanza di salti e pozze, Ottimizzazione progetto mediante experimenti in laboratorio, *Unveröffentlichter Bericht* im Auftrag der Gemeinde Bregaglia.

Weichert, R. (2006). Bed morphology and stability of steep open channels. *VAW-Mitteilung Nr. 192*, 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*, Heft 2.

Adressen der Autoren

Dr. Christian Tognacca (christian.tognacca@laboratorium3d.ch)

Stefano Tognacca

Laboratorium^{3D} GmbH

CH-6710 Biasca, Via Prada 6

Fischgängiges Traversensystem Sandweidli Weisse Lütschine (BE)

Thomas Berchtold

Kurzfassung

Eine auffällige sechs Meter hohe Betonsperre in der Weissen Lütschine unterband die Fischwanderung zwischen dem Brienersee und dem Lauterbrunnental. Hätte die Sperre versagt, wäre die nahe Verkehrsinfrastruktur (Bahntrasse Jungfraubahn, Kantonsstrasse) gefährdet gewesen. Die Sperre wurde durch ein Traversensystem ersetzt und die Gerinnesohle verbreitert. In die Blockriegel ist eine Niedrigwasserrinne eingelassen. Sie ermöglicht den Seeforellen den Aufstieg. Die Projektvariante wurde mit Hilfe von Modellversuchen optimiert. Diese zeigten die Systemgrenzen auf und machten deutlich, dass gerade im Fall von prototypspezifischen Randbedingungen die Bemessungsansätze an ihre Grenzen stossen können. Aufgrund der geringen Platzverhältnisse und hohen Belastung musste vom ursprünglich angedachten, naturnahen selbststabilisierenden Stufen-Becken Gerinne abgesehen werden und stattdessen ein Traversensystem aus Blockriegeln in Hinterbeton realisiert werden. Damit können unter den vorliegenden Randbedingungen die wesentlichen Ziele, eine Stabilisierung der Gerinnesohle und eine Längsvernetzung der Lütschine mit Fischwanderung der Seeforelle erreicht werden.

1 Ausgangslage

Die Sohle der Weissen Lütschine war in der Gemeinde Lauterbrunnen im Gebiet Sandweidli mit einem Sperrensystem verbaut (Abb. 1). Das System bestand aus einer rund 6 m hohen Hauptsperre und einer kleineren Vorsperre. Sie waren 1933 nach folgeschweren Sohlenerosionsprozessen gebaut worden und hatten seither die Sohle der Lütschine bei Sandweidli stabilisiert. Die Sperren waren für stromaufwärts schwimmende Fische über lange Zeit unpassierbar. Erst nach dem Bau einer Fischtreppe in den Jahren 1994/95 wurde die Längsvernetzung der Lütschine verbessert.

Das Hochwasserereignis im Oktober 2011 zerstörte die Fischtreppe vollständig und führte zu einer Unterspülung der Vorsperre. Die Fischtreppe wurde durch eine Holzkonstruktion ersetzt, deren Betrieb aber aufgrund des hohen Unterhaltsaufwandes später eingestellt wurde. Insbesondere Geschiebeeintrag und -ablägerungen erhöhten den Unterhaltsaufwand.



Abb. 1: Baufälliges Sperrensystem mit Haupt- und Vorsperre. Rechtsufrig der Fischpass in alter Form (Vordergrund) und in provisorischer Konstruktion (Hintergrund). Bild: HSR

Eine weitere Beschädigung des Schwellensystems hätte zu einer unkontrollierten Rückwärtserosion und Unterspülung der Ufer mit weitreichenden Folgeschäden führen können (Erosion Bahntrasse BOB). Massnahmen sowohl zur Sicherung der Sohle als auch zur Verbesserung der Längsvernetzung der Weissen Lütschine waren deshalb zwingend notwendig.

Gemäss strategischer Revitalisierungsplanung des Kantons Bern (Stand Januar 2018), wies der Projektperimeter ein Revitalisierungspotenzial mit grossem Nutzen für Natur und Landschaft auf. Entsprechend wurden möglichen Revitalisierungsmassnahmen für die Periode 2016 - 2030 eine hohe Priorität zugewiesen und hohe Subventionsbeiträge in Aussicht gestellt.

Die wesentlichen Hauptprojektziele waren:

- Gewährleistung einer langfristigen Sohlensicherung im Bereich Sandweidli durch Sanierung oder Ersatz der bestehenden Sperre
- Aufhebung des letzten künstlichen Fischwanderhindernisses zwischen Brienersee und Stechelberg. Mit einem robusten System soll die Fischwanderung im Bereich Sandweidli sichergestellt und der dazu nötige Unterhaltsaufwand minimal sein.

Als wichtigste Randbedingungen sind die geringen Platzverhältnisse hervorzuheben. Die Lütschine fliesst entlang der steilen rechten Talflanke. Linksseitig verläuft das Bahntrasse der Berner Oberland Bahnen (BOB) sozusagen auf der Böschung. Dazwischen soll zusätzlich Platz für einen Unterhaltsweg eingeplant sein. Das Bruttogefälle beträgt ca. 6%.

2 Projektierung

Zur Erreichung der Ziele liess die Schwellenkorporation Lauterbrunnen verschiedene Projektvarianten untersuchen und mithilfe einer Nutzwertanalyse bewerten. Damit konnten verschiedene Varianten ausgeschlossen und zwei als Bestvarianten weiterverfolgt werden.

Als Varianten ausgeschlossen wurden die Wiederinstandstellung des bestehenden Sperrsystems, eine aufgelöste Blockrampe und verschiedene Varianten mit klassischen gesetzten Blockrampen. Eine Wiederinstandstellung hätte nicht die notwendige Verbesserung der Längsvernetzung (Fischwanderung) gebracht. Die Herausforderungen eines hohen Unterhaltsaufwandes wären damit nicht beseitigt gewesen. Die Fischerei und der Renaturierungsfonds des Kantons Bern (RenF) wären nicht bereit gewesen, das Vorhaben grosszügig zu unterstützen. Eine Variante mit aufgelöster Blockrampe musste aufgrund der hohen Gefälleverhältnisse frühzeitig ausgeschlossen werden. Die Varianten mit klassischen Blockrampen hätten aufgrund ihres steilen Gefälles und ihrer Länge die Anforderungen an die Fischwanderung nicht erfüllen können. Zudem erreichten die Varianten mit Blockrampen in der Nutzwertanalyse ungünstige Bewertungen in den Themenbereichen Hochwasserschutz und Umwelt.

Zur weiteren Bearbeitung wurden die beiden Bestvarianten mit einem selbststabilisierenden Stufen-Becken-System oder mit einem Traversensystem berücksichtigt. Beide Varianten überzeugten in der Nutzwertanalyse in den Unterzielen Hochwasserschutz und Umwelt und schnitten in der Kostenschätzung gleich gut ab wie die übrigen Varianten.

Das selbststabilisierende Stufen-Becken-System sollte in Anlehnung an die heutige natürliche Sohlenstruktur zwischen Sandweidli und Zweilütschinen gestaltet sein (Abb. 2). Mit einer geeigneten und sorgfältig zu bestimmenden Anreicherung des anstehenden Sohlenmaterials mit Blöcken und groben Kornfraktionen sollte sich die Gerinnesohle nach anfänglichen dynamischen Verschiebungen mit der Zeit durch grössere Ereignisse selbstständig stabilisieren können. Das Längsgefälle sollte vom unteren Abschnitt übernommen und flussaufwärts extrapoliert werden. Da dieses Konzept mit grossen Unsicherheiten verbunden war, wurden für einen Machbarkeitsnachweis physikalische Modellversuche durchgeführt.

Das Traversensystem ist im weiteren Sinne auch ein Stufen-Becken-System, das aber aus stark strukturierten Stufen in bestimmten Abständen und in künstlicher Bauweise besteht. Diese Variante sollte als Rückfallebene in der weiteren Planung mitberücksichtigt werden.



Abb. 2: Stufen-Becken-Gerinne in natürlicher Form unterhalb des Projektperimeters (Bild: HSR).

Die notwendige Blockanreicherung des anstehenden Sohlenmaterials für ein selbststabilisierendes Gerinne wurde nach Weichert *et al.* (2007) abgeschätzt (Abb. 3). Weichert *et al.* (2007) geben in ihrer Arbeit eine geeignete Kornverteilung des Untergrundmaterials in Abhängigkeit der maximalen Blockgrösse an, für die sich gemäss ihren Modellversuchen stabile Sohlenstrukturen entwickeln. Für das laufende Projekt wurde das anstehende Sohlenmaterial (Kurve a) mit einer Blockmischung (Kurve b) angereichert, so dass die Kornverteilung der Mischung (Kurve c) möglichst gut die Idealkornverteilung (Kurve d) nach Weichert *et al.* (2007) abbildete. Die Mischung wurde für die Modellversuche verwendet.

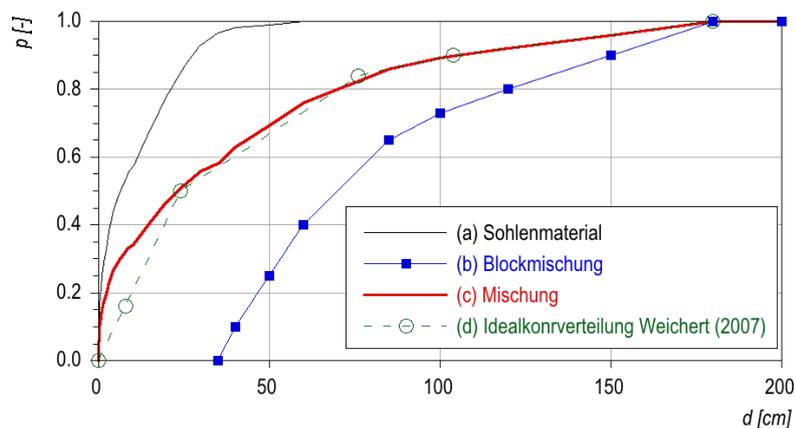


Abb. 3: Kornverteilungskurven des Sohlenmaterials der Lutschine (a), der Blockmischung (b), des angereicherten Sohlenmaterials (c) und der Idealkornverteilung (d) nach Weichert *et al.* (2007).

3 Physikalische Modellversuche

Die physikalischen Modellversuche wurden durch die Fachhochschule OST in drei Phasen durchgeführt. In einer ersten Phase wurde geprüft, ob und wie sich

auf natürliche Weise Stufen-Becken-Sequenzen für die vorhandenen Randbedingungen einstellen würden (Abb. 4). Dazu wurde das heute anstehenden Material durch Beigabe grober Komponenten und Blöcke gemischt. Es zeigte sich, dass das Verhalten der Sohle stark durch die Kurvensituation geprägt ist. Die grössten Blöcke formierten sich zwar teilweise zu riegelartigen Konstrukten zusammen und bildeten eine Art Stufen-Becken-Sequenz. Das System blieb aber insbesondere unter dem Einfluss des Geschiebetransports und der Kurvensituation instabil. Die hydraulischen Bedingungen erlaubten keine Stabilisierung der Sohle alleine durch unregelmässig angeordnete kleinere Blockgruppen aus Blockgrössen, die wirtschaftlich transportier- und einbaubar gewesen wären. Dies dürfte hauptsächlich auch auf die verhältnismässig grosse Gerinnebreite zurückzuführen sein.



Abb. 4: Physikalische Modellversuche während kleinen Abflüssen. links: mit Blockmischung angereichertes Sohlenmaterial, rechts: künstlich gebaute Blockriegel (Bild: HSR).

In einer zweiten Phase wurde deshalb der Einbau von künstlich erstellten Blockriegeln über die ganze Gerinnebreite geprüft (Abb. 4). Der Riegelabstand orientierte sich an einem mittleren Stufenabstand, der sich in der ersten Phase eingestellt hatte. Die Riegel setzten sich aus zwei übereinanderliegenden, gesetzten Blockreihen zusammen, wobei die obere Lage an die untere Lage angelegt und wenig stromaufwärts versetzt war. Die Riegel wurden schrittweise hinsichtlich Stabilität und Wirtschaftlichkeit optimiert. Als beste Bauweise erwiesen sich leicht gegen die Fliessrichtung gebogene Blockriegel, welche unterhalb mit einem flächigen Kolkschutz und oberhalb mit einem flächigen Erosionsschutz komplettiert waren.

Auch mit der optimierten Bauweise wurden in den unterschiedlichen Versuchen immer wieder lokale Schäden beobachtet, die ohne Eingriffe in kollapsartigem Versagen des Traversensystems endeten. Die Schäden entstanden meist durch

Mobilisierung einzelner grosser Blöcke, welche lokale Strömungskonzentrationen verursachten und folglich zu weiteren Schäden führten.

Die auch beim optimierten System immer wieder auftretenden Schäden und Risiken für ein kollapsartiges Versagen sowie das hohe Schadenpotenzial der angrenzenden Infrastrukturbauten führten zur Empfehlung, die Blockriegel und Böschungen in Hinterbeton zu befestigen. Dadurch kann gleichzeitig Grösse und Gewicht der einzelnen Blöcke reduziert werden und, bei genügend tiefer Fundation, auf flächige Erosions- und Kolkschutzeinbauten verzichtet werden. Ohne derartige flächige Einbauten wird das Überwinden der Riegel für Fische erleichtert, denn diese sind auf Kolke resp. minimale Abflusstiefen ober- und unterhalb der Riegel angewiesen. Gleichzeitig erlaubt die Fixierung in Hinterbeton eine freiere, fischgerechte Gestaltung von Niedrigwasserrinnen mit minimalen Wasserspiegeldifferenzen und ermöglicht, die hohen Anforderungen an die Fischgängigkeit zu erfüllen.

Das physikalische Modell wurde in einer dritten Phase für eine etho-hydraulische Untersuchung zur Optimierung der einzelnen Blockriegel und deren Gestaltung verwendet. Für kleinere Abflüsse konnten die zu erwartenden Abflusstiefen und Fließgeschwindigkeiten in den einzelnen Traversenfelder und in den Niedrigwasserrinne gemessen und verbessert werden.

4 Realisierung

Das finale und schlussendlich realisierte Bauprojekt geht auf die Erkenntnisse aus den physikalischen Modellversuchen zurück. Ein Traversensystem aus in Hinterbeton versetzten Blockriegel sichert die Sohle (Abb. 5). Das Traversensystem wurde gemäss den hydraulischen Bemessungsansätzen nach Volkart (1972) dimensioniert. Hierbei wurde ein Optimum zwischen Sohlenbreite, Böschungneigung und Stufenhöhe gesucht, damit das notwendige Bruttogefälle von 6% erreicht werden konnte. Die Traversen müssen zwecks Energieumwandlung resp. Kolkausbildung einen minimalen Abstand aufweisen. Je grösser der Abstand der Traversen, desto grösser wird aber auch die Absturzhöhe der Stufen. Der Traversenabstand kann durch Verbreiterung der Gerinnesohle und damit reduzierter Belastung verkürzt werden. Dies war aufgrund der eingeschränkten Platzverhältnisse jedoch nur mit steileren Ufern möglich. Da in diesem Fall aber die Längsvernetzung oberste Priorität hatte, konnten bei der terrestrischen Quervernetzung Kompromisse eingegangen und steilere Ufer in Kauf genommen werden.

Die Dimensionierung wurde auf ein Bemessungshochwasser HQ_{100} von $98 \text{ m}^3/\text{s}$ ausgelegt und resultierte in 14 ca. 0.85 m hohen Riegeln im Abstand von 14 m und in einer Verbreiterung der Gewässersohle von bisher 10 bis 13 m auf 14 m.

Die Uferböschungen bestehen aus gesetzten Blocksätzen mit einer Neigung von 3:2, der obere Uferbereich ist bestockt und flacher geneigt. Zur Optimierung des Fischeaufstiegs sollen die Traversenfelder mit einzelnen Strukturelementen belegt werden und sind die Riegel jeweils mit einer Niedrigwasserrinne ausgebildet. Die Blöcke der Riegel und der Böschung sind in Hinterbeton versetzt. Die Riegel sind leicht bogenförmig gegen die Fließrichtung gekrümmt, um den Hauptstrom tendenziell gegen die Gerinnemitte zu bündeln.



Abb. 5: Alte Betonsperre (links) und Traversensystem kurz nach Fertigstellung (rechts) im Mai 2022. Die Traversenfelder sind noch mit Sohlenmaterial gefüllt. Dieses wird mit den ersten Hochwasserabflüssen teils ausgespült werden (Bild: David Birri).

Die theoretische Stufenhöhe von brutto 0.85 m wird durch die Sohlendifferenz infolge Nettogefälle um ca. 0.20 m auf 0.65 m reduziert. Eine Niedrigwasserlücke von ca. 0.5 m Tiefe reduziert die effektiv zu überwindende Wasserspiegeldifferenz weiter auf 0.15 m (Abb. 6). Stimmen die Abflussbedingungen, können die Seeforellen die Stufen schwimmend durchqueren.

Die Arbeiten im Gerinne wurden in einem kurzen Winterzeitfenster zwischen November und März 2021/22 realisiert. Die Gesamtkosten liegen bei ca. 5.1 Mio., wobei sich die BOB zur Hälfte daran beteiligte. Das Projekt wurde im Rahmen eines Revitalisierungsprojekts durch Bund, Kanton und den RenF zu grossen Anteilen subventioniert. Der BKW Ökofonds leistete ebenfalls einen finanziellen Beitrag an das Projekt.



Abb. 6: Blocktraverse im Bau. Blöcke werden in Hinterbeton gelegt, die Niedrigwasserrinne wird jeweils einseitig angeordnet. (Bild: Mätzener & Wyss Bauing. AG).

5 Zusammenfassung

Die Schwellenkorporation Lauterbrunnen liess die sanierungsbedürftige, 6 m hohe Betonsperre in der Weissen Lütschine bei Sandweidli im Winter 2021/22 abbrechen und durch ein fischgängiges Traversenbauwerk ersetzen. Zur langfristigen Sicherung der Sohle und des umliegenden Geländeneiveaus wurden 14 Traversen im Abstand von 14 m aus Blöcken in Hinterbeton erstellt. Die Böschungen wurden durch Blocksätze gesichert und ebenfalls mit Hilfe von Hinterbeton fixiert (Neigung 3:2). Unter Berücksichtigung des Sohlgefälles zwischen den Traversen und der Niedrigwasserrinne ergibt sich eine Wasserspiegeldifferenz je Traverse von ca. 15 cm, was von Seeforellen (Leitfischart) gut überwunden werden kann.

Die realisierte Lösung ging aus einem Variantenstudium und aufwändigen physikalischen Modellversuchen hervor. Von der ursprünglichen Idee, das künstliche Betonsperrenbauwerk durch eine naturnahere Massnahme zur langfristigen Sicherung der Sohle zu ersetzen musste im Laufe der Projektierung abgewichen werden. Das Vorhaben, mit Blockanreicherung ein selbststabilisierendes Stufen-Becken-Gerinne zu erzeugen im ähnlichen Stil wie es unterhalb des Projektperimeters auf natürliche Weise vorhanden ist, erwies sich in den Modellversuchen als nicht realistisch. Die Modellversuche gaben den Planern die notwendige Sicherheit und Entscheidungshilfe bei der Anwendung von empirischen Bemessungsansätzen. Modellversuche bleiben auch in Zukunft ein wichtiges, vertrauenswürdiges Planungsinstrument.

Die realisierte Bestvariante mit künstlich in Hinterbeton gelegten Blockriegeln stellt stellvertretend für viele Beispiele dar, wie eingeschränkte Platzverhältnisse oft die in Frage kommenden Möglichkeiten stark einschränken. Um ein wirklich naturnahes Projekt umzusetzen, wäre viel mehr Raum notwendig gewesen, der in diesem Fall nur mit ausserordentlich hohen Investitionen hätte geschaffen werden können. Es ist deshalb mit Blick in die Zukunft nicht falsch, den Raum entlang der Gewässer wo möglich frühzeitig für spätere Optionen zu sichern.

Referenzen

Schwellenkorporation Lauterbrunnen (2019). Wasserbaubewilligung HWS und Längsvernetzung Lütschine Sandweidli. *Genehmigungsdossier*. Flussbau AG SAH und Mätzener & Wyss Bauingenieure AG.

Volkart, P. (1972). Die Stabilisierung von Flussläufen mittels einer Folge von Querswellen. *VAW-Mitteilung Nr. 6*. 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*, Heft 2.

Adresse des Autors

Dr. Thomas Berchtold (thomas.berchtold@flussbau.ch)

Flussbau AG SAH

CH-3007 Bern, Schwarztorstrasse 7

Stufen-Becken-Abfolgen am Betelriedgraben

Lukas Hunzinger, David Hodel

Kurzfassung

Im Rahmen des Hochwasserschutzprojektes für Blankenburg wurde für den Betelriedgraben ein 200 m langes, neues Gerinne gebaut. Es verläuft auf einem wenig bebauten Teil des Schwemmkegels. Das Gerinne mit einem Längsgefälle von 15% bzw. 8% wird mit einer Abfolge von Stufen und Becken stabilisiert. Die Bauweise und die Abmessungen der Stufen-Becken-Abfolge wurden 2014 in hydraulischen Modellversuchen an der Versuchsanstalt für Wasserbau der ETH Zürich ermittelt. Bei der Umsetzung der Ergebnisse aus den Modellversuchen im Bau- und Ausführungsprojekt mussten weitere Aspekte wie die Ufersicherung und die Anforderung an die Bauausführung vertieft betrachtet werden.

1 Das Hochwasserschutzkonzept am Betelriedgraben

1.1 Gefährdung im Ist-Zustand

Der Betelriedgraben hat ein Einzugsgebiet von 11.5 km² mit relativ mächtigen Moränenablagerungen auf schiefrigem Flysch. Aus den steilen Talflanken sind spontane Rutschungen möglich, die als Murgänge eine Reichweite bis hinunter zur Kantonsstrasse haben. Diese Murganggefährdung prägt die Gefahrenkarte vor Massnahmen mit roten und blauen Gefahrengebieten im Siedlungsgebiet (Abb. 1).

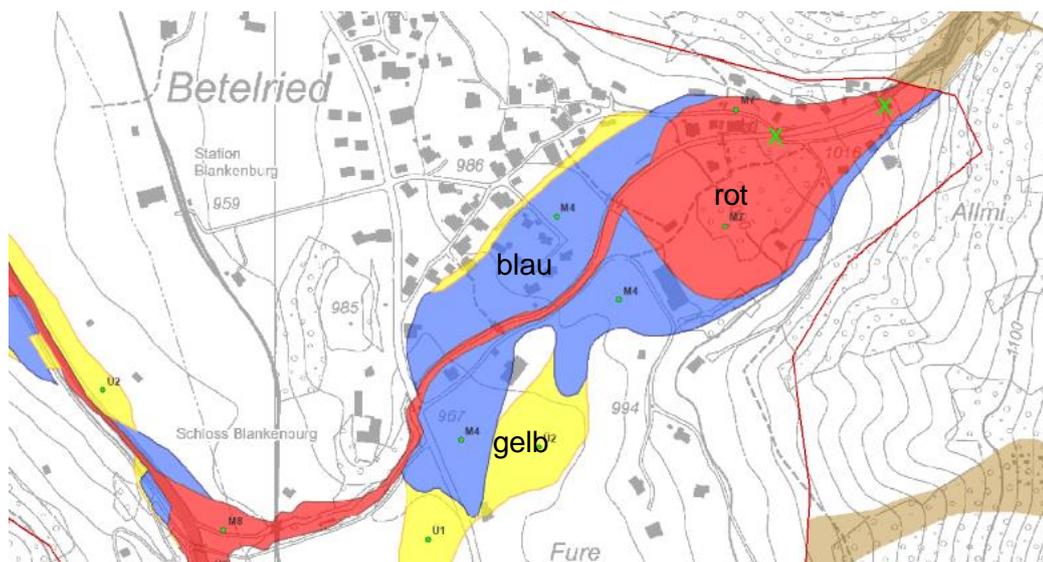


Abb. 1: Aktuelle Gefahrenkarte Zweisimmen, Betelriedbach für Wassergefahren

Beim alten Bachlauf war schon bei häufigen Ereignissen mit Ausuferungen zu rechnen. Für die Aufnahme von Murgangabflüssen war der Gerinnequerschnitt deutlich zu klein. Das führte zu einem kumulierten Gesamtrisiko von 154'400 CHF/a, das individuelle Todesfallrisiko war bei 18 Objekten über dem tolerierten Grenzwert von 10^{-5} Jahr.

Tab. 1: Tabelle mit Ereignisszenarien

Szenario	HQ ₃₀	HQ ₁₀₀	HQ ₃₀₀	EHQ
Hochwasser	17 m ³ /s	23 m ³ /s	30 m ³ /s	40 m ³ /s
Murgangspitze	fluvial	130 m ³ /s	175 m ³ /s	220 m ³ /s
Murgangfracht	12'000 m ³	20'000 m ³	30'000 m ³	40'000 m ³

1.2 Projektziele

Betreffend Wassergefahren wurden im Projekt folgende Ziele vereinbart:

- keine Wassergefahren ausserhalb des Gerinnes bis HQ₁₀₀
- keine Wassergefahren mit hoher Intensität in bewohntem Gebiet bei HQ₃₀₀
- Individualrisiko für Todesfälle $< 10^{-5}$.

Zudem wurden die ökologischen Ziele verfolgt, dass

- ein möglichst natürliches Gerinne mit Strukturen und einer grossen Variabilität entsteht,
- möglichst kleine Abstürze mit tiefen Kolkbecken aquatischen Lebensraum bieten und
- dass natürliche Lebensräume an den Ufern durch passende Strukturen zur Artenvielfalt beitragen können.

1.3 Rückhalten, durchleiten und Ablagern – das Schutzkonzept

Das alte Gerinne führte in wenigen Metern Abstand an Wohnbauten vorbei. Ein Schutz mit vorliegenden Ereignisszenarien (Murgang - Abflussspitzen!) hätte nicht ohne einschneidende Massnahmen ausgeführt werden können. Das Konzept sah deshalb eine Kombination aus Rückhalt, Durchleiten, Gerinneverlegung und Instandstellung vor.

Murgänge sollen bis zu einem Ereignis HQ₁₀₀ im dazu ertüchtigten Geschiebesammler zurückgehalten werden. Grössere Ereignisse sollen kontrolliert in einem Raubettgerinne durch den Siedlungskern durchgeleitet werden. Mit einer Gerinneverlegung auf 300 m Länge wird der Bach von Wohnbauten weg durch den Bachehewald geführt. Murgänge werden somit durch einen Gefällsknick dort zur

teilweisen Ablagerung gebracht, wo das Schadenpotential gering ist. Aus Gründen der Kostenwirksamkeit wird der unterste Abschnitt nicht voll ausgebaut, sondern instand gestellt. Bei Engstellen wird der Querschnitt vergrößert.

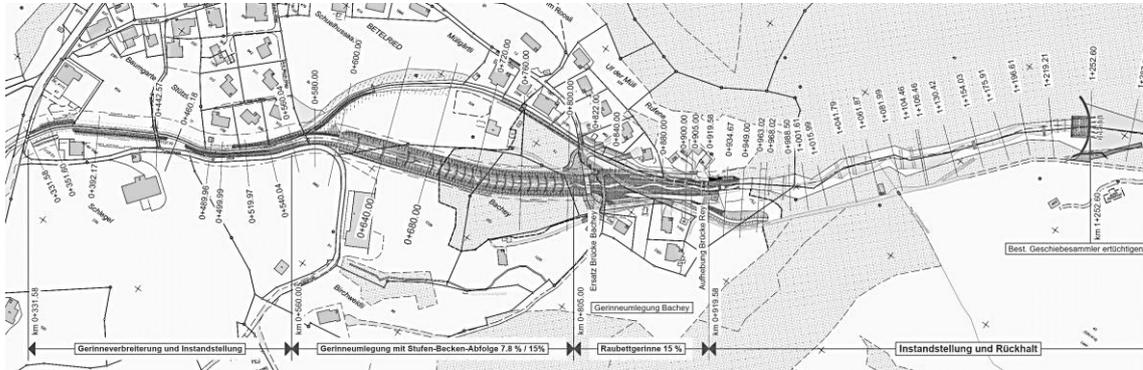


Abb. 2: Projektübersicht mit Sammler, Gerinneverlegung, Instandstellung (in Fließrichtung von rechts nach links).

1.4 Projektvarianten für das neue Gerinne

Für den Abschnitt der Gerinneverlegung mit 15 % Gefälle wurden verschiedene Varianten geprüft: Raubbettgerinne weiterführen, Betonsperrentreppe, betonierter Blockriegel oder eine Stufen-Becken-Abfolge. Nur das Stufen-Becken-System war mit den vereinbarten Projektzielen betr. Hochwasserschutz und Ökologie verträglich und wurde im Projekt weiterverfolgt.

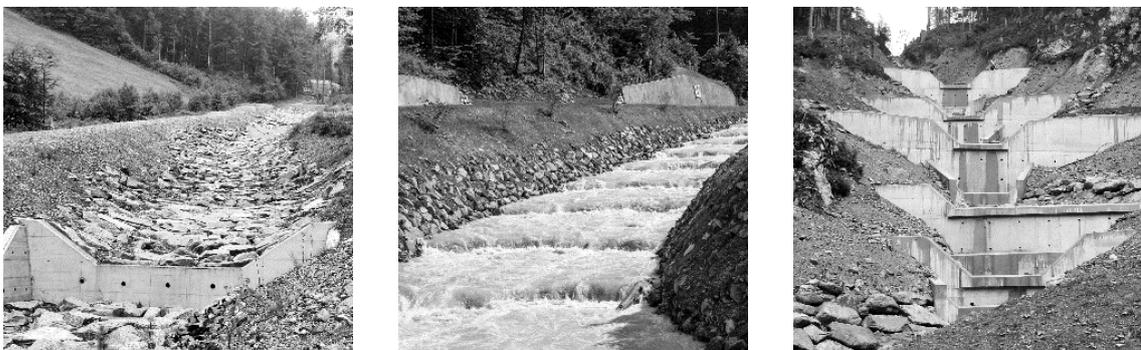


Abb. 3: Geprüfte Varianten: Raubbett, Blockriegel im Hinterbeton, Betonsperrn

2 Stufen-Becken im hydraulischen Modell

2.1 Fragestellung

Weichert (2006) hat in seiner Arbeit die Stufen und Becken durch Sohlenerosion und Entmischung der Sohle sich selbst bilden lassen, so wie es den Prozessen in der Natur entspricht. Möchte man dieses Konzept auf ein neues Gerinne anwenden, hieße das, dass die Sohle mit einem Überschuss an Material übersteil eingebaut werden müsste. Dies ist in einer Schwemmkegelsituation wie am

Betelriedgraben aus drei Gründen nicht praktikabel: a) der Einbau über das Endgefälle, welches dem Bruttogefälle des Schwemmkegels entsprechen soll, würde unweigerlich dazu führen, dass Wasser am oberen Ende der Stufen-Becken-Abfolge austritt; b) das erodierende Material könnte den unteren, flacheren Teil des Schwemmkegels überlasten und c) die Zufuhr von Überschussmaterial verteuerte das Projekt unverhältnismässig.

Aus diesen Gründen wurde das geplante Stufen-Becken-System am Betelriedgraben in hydraulischen Modellversuchen an der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich untersucht. Dabei sollten unter anderem die folgenden Fragen beantwortet werden:

- Gibt es bei einem Gefälle von 15% eine stabile Stufen-Becken-Abfolge?
- Mit welcher Blockzusammensetzung muss die Sohle angereichert werden?
- Welches ist die optimale Gerinnebreite?
- Wie kann eine Stufen-Becken-Abfolge mit wenig Aufwand gebaut werden?
- Welche Wasserspiegellagen bei Hochwasser und Niedrigwasser werden erwartet?
- Welche Lebensraumbedingungen für Fische kann man erwarten?

2.2 Versuchsanordnung und Versuchsserien

Die Modellversuche wurden in einer neigbaren Laborrinne mit senkrechten Wänden im Maßstab 1:20 durchgeführt. In insgesamt vier Versuchsserien wurden zuerst Versuche bei 8% und später bei 15% Neigung durchgeführt. Das Gerinne wurde jeweils mit steigenden Reinwasserabflüssen bis zu einem Abfluss HQ_{30} und anschließend mit Hochwasserganglinien HQ_{100} und HQ_{300} mit Geschiebezugabe belastet. Zuerst ließ man jeweils die Stufen sich aus einer vollständig durchmischten Sohle selber bilden. Anschließend wurde aus den sich selbst stabilisierten Stufen eine Geometrie für gebaute Stufen abgeleitet.

Die Versuche wurde mit jeweils zwei Kornmischungen durchgeführt. Die am Betelriedgraben vorherrschende Grundmischung wurde mit zwei verschiedenen Blockmischungen angereichert, deren maximale Durchmesser (Durchmesser der b -Achse) 1.5 m bzw. 1.8 m betragen haben. Das entspricht einem maximalen Blockgewicht von 5.5 t bzw. 9.5 t.

2.3 Ergebnisse der Versuche

Die Ergebnisse der Versuche sind im Detail in VAW (2015) und in Hohermuth *et al.* (2016) beschrieben und lassen sich folgendermaßen zusammenfassen:

Eigendynamische Stufen-Becken-Abfolgen in einem 8% steilen Gerinne waren bis zu einem Abfluss von HQ_{300} stabil. Bei 15% Neigung war die Stabilität jedoch nur bis zu einem Abfluss von HQ_{30} gegeben. In einem schmalen Gerinne waren die Stufen stabiler als in einem breiten Gerinne. Offenbar fehlte in breiten Gerinnen der gegenseitige Halt der Blöcke. Gebaute Stufen hingegen waren stabiler, wenn sie in einem breiten Gerinne gebaut wurden. Die geringere spezifische Belastung in breiten Gerinnen war dafür ausschlaggebend. Gebaute Stufen waren bei einer Neigung von 15% bis zu einem Abfluss HQ_{100} stabil. Bei einem Abfluss HQ_{300} versagten die Stufen und das Längsgefälle reduzierte sich von 15% auf 13%. In den Kolkbecken konnten bei Niedrigwasser Wassertiefen zwischen 0.5 m und 0.75 m beobachtet werden.

3 Umsetzung im Bauprojekt

3.1 Abmessungen der Stufen

Gestützt auf die Ergebnisse der hydraulischen Modellversuche wurden am Betelriedgraben die in Abb. 5 und Tab. 2 aufgeführten Abmessungen der Stufen gewählt. In der 15% steilen Strecke wurde auch die Sohle der Becken praktisch flächendeckend mit Blöcken belegt, um die Kolkiefen zu begrenzen und das Versagen der Stufen durch Unterkolkung zu verhindern.

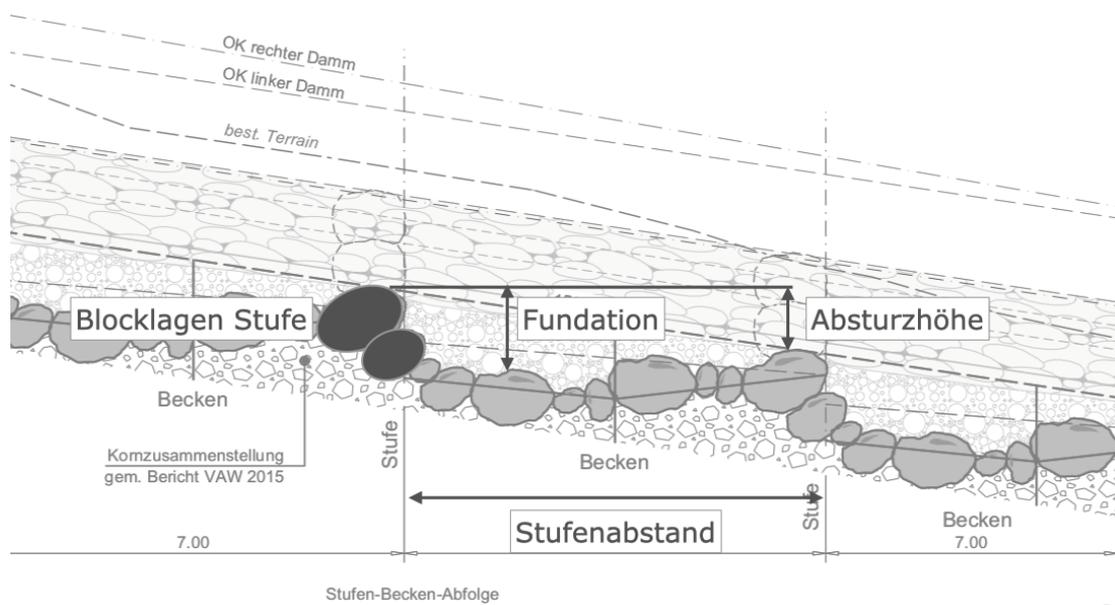


Abb. 4: Längsprofil (Normalprofil) für die Stufen am Betelriedgraben (Theiler und Flussbau, 2019).

Schon im Bauprojekt muss geklärt werden, ob Massnahmen zum Abdichten der Bachsohle geplant werden müssen, da mit dem Bau eine Auflockerung des Untergrundes stattfindet.

Tab. 2: Abmessungen der Stufen und Becken am Betelriedgraben (Theiler & Flussbau 2019).

	Längsgefälle 15%	Längsgefälle 8%
Anzahl Blocklagen	2	2
Stufenabstand	7 m	22 m
Absturzhöhe	1.2 m	1.2 m
Foundation	2.0 m	1.8 m
Sohlenbreite	5 m	7 m

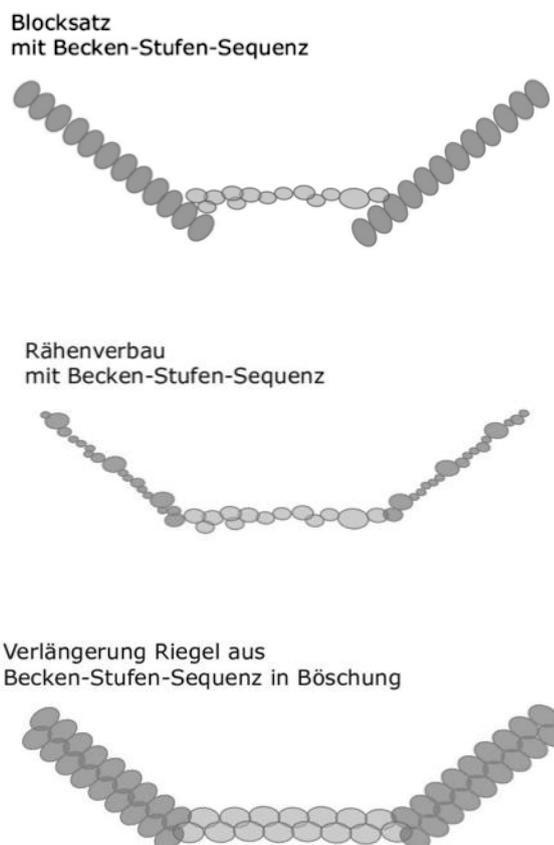
3.2 Ufersicherung

Neben der Abmessung der Stufen musste im Rahmen des Bauprojektes auch die Ufersicherung festgelegt werden. Dazu wurden drei Varianten evaluiert: Ein durchgehender Blocksatz, ein Rähnenverbau und eine Verlängerung der Riegel in die Böschung (Abb. 5).

Abb. 5: Varianten der Ufersicherung. Die Variante Verlängerung Riegel wurde im Projekt umgesetzt.

Ein durchgehender Blocksatz hätte wegen der hohen hydraulischen Belastung Blöcke mit hohem Gewicht erfordert. Diese hätten zudem entlang der Becken bis auf die maximale Kolktiefe fundiert werden müssen. Wegen der massiven Bauweise und der erschwerten Quervernetzung wurde diese Lösung nicht weiterverfolgt.

Ein Rähnenverbau besteht aus einer mit Bollensteinen belegten Böschung mit einzelnen großen Blöcken und verhält sich im Prinzip wie eine schräg geneigte aufgelöste Blockrampe. Die einzelnen großen Blöcke sollen so viel Reibung absorbieren, dass die Belastung auf die



dazwischenliegende Böschung unter deren Grenzbelastung fällt. Am Betelriedgraben konnte kein Rähnenverbau gefunden werden, welcher bei der hohen erwarteten hydraulischen Belastung stabil geblieben wäre.

Schließlich wurde eine Lösung gewählt, bei der die Riegel bis zum Wasserspiegel bei HQ_{100} die Böschung hinauf verlängert wurden, in den Feldern zwischen den Riegeln die Ufer aber nur noch mit kleinen Blöcken gesichert werden. Eine lokale Erosion der Böschung kann toleriert werden. Die relativ geringen Abstände der Riegel und die Abflussverhältnisse (die Hauptströmung pendelt bei Hochwasser nicht) lassen erwarten, dass das Ausmaß der Seitenerosion begrenzt ist und dass die Riegel deshalb nicht umströmt werden können.

4 Ausführung

Künstlich gebaute Stufen-Becken-Abfolgen mit den Abmessungen des Betelriedgrabens sind für Planer und ausführende Unternehmungen neuartige Bauwerke. Zum besseren Verständnis der Ausschreibungsunterlagen und der Ausführungspläne wurden die verschiedenen Blockgrößen in den Situationsplänen, Längsprofilen und Querprofilen mit unterschiedlichen Farben dargestellt. Der Bauablauf wurde auf den Plänen detailliert beschrieben. Mit dieser Lesehilfe ist es der ausführenden Bauunternehmung gelungen, die Stufen in der gewünschten Qualität zu errichten (Abb. 6).



Abb. 6: Gebaute Stufen bei 15% Längsneigung im Betelriedgraben. Abnahme der Musterstrecke im Mai 2022.

Sind Blöcke von einem Gewicht von 7 t oder 8 t einmal gesetzt, lassen sich diese kaum drehen und wenden, um sie in die ideale Lage zu bringen. Die Toleranzen in der Ausführung müssen deshalb etwas großzügiger bemessen sein als beim Bau von Bauwerken mit Blöcken von 2 t oder 3 t Gewicht.

Das Auffüllen der Becken mit anstehendem Untergrundmaterial dient der Stabilisierung und Konsolidierung des Bauwerkes. Durch Erosion der Auffüllung kann sich eine Deckschicht bilden, welche die Stabilität bei kleinen Hochwasserabflüssen gewährleistet. Aus fischökologischer Sicht wäre jedoch schon unmittelbar nach Baubeginn Kolke im Bachbett erwünscht. Beim Betelriedgraben wurden als Kompromiss zwischen diesen beiden gegensätzlichen Anforderungen die Becken nur so weit aufgefüllt, dass ein Absturz von rund 0.8 m entstand. Damit konnten sich schon bei der ersten Beaufschlagung mit Wasser in den Becken Kolke bilden. Zum Abdichten der Sohle wurden die Blöcke in bindiges Aushubmaterial versetzt.

5 Zusammenfassung

Stufen-Becken-Abfolgen sind die naturnahe Alternative für Gerinneausbau mit Neigungen bis zu 15%. Erkenntnisse aus Modellversuchen sollen direkt in die Pläne einfließen, was eine präzise, bildhafte Plandarstellung und gute Instruktion des Unternehmers schon in der Ausschreibungsphase erfordert. Die Erfahrung hat gezeigt, dass der Bau mit Blockgrößen bis 7 t möglich ist, aber Masstoleranzen der Lage im Meterbereich erfordert. Bei geringen Mittelwasserabflüssen sollte der Abdichtung der Sohle unter der Blockschicht besondere Beachtung gegeben werden.

Referenzen

- Hohermuth B., Hunzinger L. & Weitbrecht V. (2016): Naturnahe Wildbachverbauung mittels Stufen-Becken-Abfolgen. *18. Gemeinschaftssymposium der Wasserbauinstitute TU München, TU Graz und ETH Zürich*, Wallgau, Germany, 405-414.
- Theiler und Flussbau (2019): Wasserbauplan Hochwasserschutz Betelried. Theiler Ingenieure AG und Flussbau AG SAH im Auftrag der Schwellenkorporation Zweisimmen. Zweisimmen und Bern, 19.12.2019.
- VAW (2015): Stufen-Becken-Abfolge Betelriedgraben. Hydraulische Modellversuche. *Technischer Bericht Nr. 4319*. Im Auftrag der Schwellenkorporation Zweisimmen.
- Weichert, R. (2006). Bed morphology and stability of steep open channels. *VAW-Mitteilung Nr. 192*, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH Zürich.

Adressen der Autoren

Dr. Lukas Hunzinger (lukas.hunzinger@flussbau.ch)

Flussbau AG SAH

CH-3007 Bern, Schwarztorstrasse 7

David Hodel (david.hodel@theiling.ch)

Theiler Ingenieure AG, dipl. Bauingenieure ETH SIA USIC

CH-3770 Zweisimmen, Hübelistrasse 14

Anforderungen an steile Fliessgewässer aus Sicht der Fischerei

Karin Gafner

Kurzfassung

Steile Fliessgewässer in alpinen Regionen sind wasserbaulich oft eine besondere Herausforderung. Neben den Anforderungen an die Hochwassersicherheit stellen sich bei der Sicherung von steilen Gewässern in alpinen Regionen auch ökologische Fragen. So soll neben anderen Artengruppen beispielsweise auch die Fischfauna bei Projekten bestmöglich berücksichtigt werden. Die Ansprüche der Wasserbewohner sind jedoch vielfältig und können oft schon rein technisch nicht zu 100% erfüllt werden. Neben möglichst vielfältigen Habitaten sollten die Gewässer für die Fische auch weitgehend durchwanderbar sein. Da herkömmliche Systeme aufgrund der Steilheit an ihre Grenzen stossen, sind neue Lösungsansätze wie die im Betelriedbach angewandte Stufen-Becken-Abfolge sowie daran angelehnte Systeme gefragt.

1 Fischarten in steilen / alpinen Fliessgewässern

Fliessgewässer werden aufgrund der wechselnden physikalischen Bedingungen entlang der Fliessrichtung in Regionen eingeteilt, welche jeweils über eine typische Lebensgemeinschaft verfügen. Benannt werden diese Regionen nach der jeweils vorherrschenden Leitfischart. Das Gefälle und somit die Strömungsgeschwindigkeit stellt dabei den wichtigsten ökologischen Faktor für die Zusammensetzung der Artengemeinschaften dar. Steile Gewässer wie sie hier thematisiert werden, finden sich in der (oberen) Forellenregion.

Bei der namensgebenden Bachforelle handelt es sich um einen Raubfisch, der aufgrund seines torpedoförmigen Körpers zu den guten Schwimmern gehört. Sie bevorzugt kühle und sauerstoffreiche Bäche wie sie eben typischerweise in den obersten Fliessgewässerabschnitten (Forellenregion) vorkommen. Im Kanton Bern kommt sie in 90 % aller untersuchten Fliessgewässerstrecken und in einem Drittel aller stehenden Gewässer vor.

Neben der Bachforelle kommt in gewissen steilen Abschnitten auch die Groppe vor. Sie ist ein schlechter Schwimmer, stellt jedoch hohe Ansprüche an die Wasserqualität.

Fließgewässer-zonierung	Rhithral			Potamal	
	Forellenregion obere untere	Äschenregion	Barbenregion	Brachsenregion	Kaulbarsch-Flunderregion
Schematische Abnahme des Gefälles und der Strömung und schematische Zunahme der Wasserführung					
Gefälle [%]	10 - 0,45	0,75 - 0,125	0,3 - 0,025	0,1 - 0,0	Gezeiteneinfluss
Temperatur [C°]	5 - 10	8 - 14	12 - 18	16 - 20	>20
Sauerstoffgehalt	sehr reichlich	reichlich	an der Oberfläche hoch, zur Gewässer- sohle abnehmend	an der Oberfläche ausreichend, an der Gewässersohle oft defizitär	
Gewässer- querschnitt					
dominantes Sediment	Steine	Grobkies	Feinkies	Sand	Schluff

Abb. 1: Zonierung der Fließgewässer in Regionen (DWA (2010) verändert nach Dick (1990)).

2 Lebenszyklus / Lebensraumsprüche

Die Bachforelle durchlebt einen komplexen Lebenszyklus. Sie laicht grösstenteils von Oktober bis Januar. Geeignete Laichplätze verfügen über eine lockere, gut mit Wasser durchströmte Kiessohle. Dies ist essenziell, damit die abgelegten Eier während der Entwicklung stets mit Sauerstoff versorgt werden. Um geeignete Laichhabitate zu erreichen ist die Bachforelle darauf angewiesen, dass sie das Gewässer durchwandern kann. Das Weibchen schlägt beim Laichen mit der Schwanzflosse eine flache Gruppe in die Kiessohle, wohin die vom Männchen besamten Eier abgelegt werden.

Nach einigen Monaten schlüpfen die Brütlinge aus den Eiern, verbleiben jedoch noch im Kies, bis sie ihren Dottersack aufgebraucht haben. Dann emergieren sie aus dem Kies und beginnen mit der aktiven Nahrungsaufnahme. Die jungen Fische sind dabei auf Flachwasserzonen mit vielen Strukturen und wenig Strömung angewiesen.

Adulte Bachforellen ernähren sich räuberisch und bei Gelegenheit auch von kleineren Artgenossen. Sie halten sich vorwiegend in Kolken mit grösserer Wassertiefe und Versteckmöglichkeiten auf, von wo sie Jagd auf ihre Beute machen. Auch unterspülte Ufer und Holzstrukturen bilden gute Ruheplätze für ausgewachsene Bachforellen.

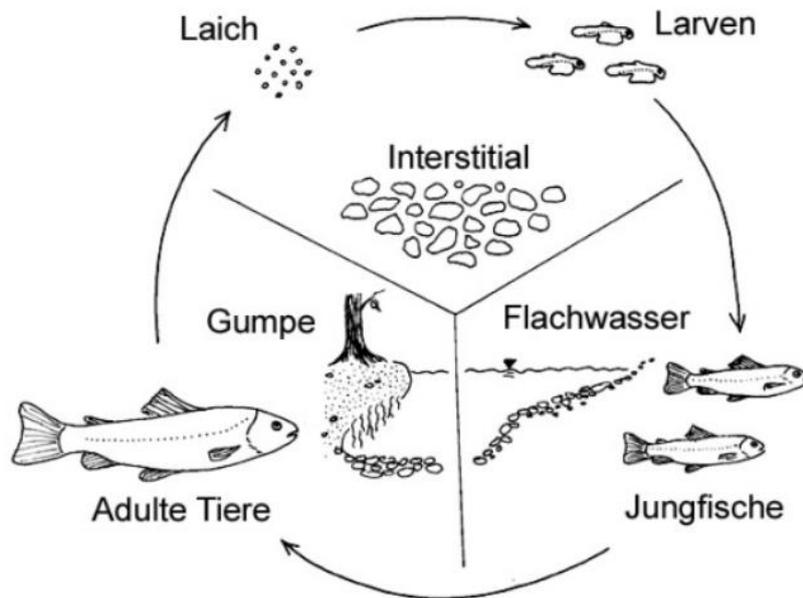


Abb. 2: Lebenszyklus der Bachforelle, Amt für Landschaft und Natur Kanton Zürich (2013) nach Bostelmann (2003).

3 Anforderungen an steile Gewässer

Um den gesamten Zyklus durchleben zu können muss die Bachforelle im Gewässer wandern können. Die wohl wichtigste Wanderung ist dabei die Laichwanderung zur Erreichung von geeigneten Stellen für die Eiablage. Während des weiteren Lebenszyklus müssen die Fische zwischen den verschiedenen Habitaten (Laichplatz, Flachwasserzone, tiefere Kolke) zirkulieren können. Daneben finden aber auch Kompensationswanderungen, beispielsweise nach Verdriftung durch ein Hochwasser oder Bewegungen zur Futtersuche statt. Immer wichtiger werden im aktuellen Umfeld zudem vernetzte Oberläufe und Seitenbäche, wo die Fische bei Hitze kühleres Wasser finden können.

Ein wesentlicher limitierender Faktor für die Durchwanderbarkeit von Querbauwerken in steilen Fliessgewässern ist die Absturzhöhe. Abhängig von Grösse und Kondition der Fische, den herrschenden Abflussverhältnissen und der Ausgestaltung des Bauwerks kann die überwindbare Höhendifferenz stark variieren. Auch wenn in der Planung gewisse Zielwerte definiert werden müssen, so ist doch immer eine möglichst geringe Hindernishöhe anzustreben. Weiter ist zu beachten, dass sich unterhalb der Stufe Ruhepools ausbilden können, in deren tiefem Wasser die Forelle auch Anlauf nehmen kann für die Überwindung der Stufe. Daneben ist die Wassermenge entscheidend, dies sowohl für die Migration als auch für das Funktionieren der Habitats an sich. Lange Trockenperioden und tiefe Abflussmengen bringen hier die Gewässer an ihre Grenzen.

4 Projektbeispiele

Der Kanton Bern verfügt mit dem Renaturierungsfonds über ein schlagkräftiges Instrument, um in Gewässern Lebensräume aufzuwerten und deren Funktionen wiederherzustellen. Gespiesen mit 10% der Wasserzinsen des Kantons können Restkosten von durch Bund, Kanton, Gemeinden und Dritte finanzierte Projekte getragen werden sowie Studien und Pilotprojekte anschubfinanziert werden. So konnten in den letzten Jahren einige Projekte im Oberland unterstützt werden, was zum Teil wesentlich zu deren Realisierung beigetragen hat:

- Beispiel Lütshine Sandweidli, Lauterbrunnen (siehe Beitrag Thomas Berchtold, *Flussbau AG*)
- Beispiel Betelriedbach, Zweisimmen (siehe Beitrag Lukas Hunzinger, *Flussbau AG*, und David Hodel, *Theiler Ingenieure AG*)
- Beispiel Kleine Simme, Zweisimmen: Wiederherstellung Bachforellenwanderung durch Anhebung der Sohle auf Niveau der oberliegenden Sperre in Anlehnung an Stufen-Becken-System
- Beispiel Kander Wimmis: Ersatz von sechs Betonschwellen oberhalb der Einmündung der Simme durch eine aufgelöste Blockrampe



Abb. 3: Kander oberhalb Mündung Simme (links Juli 2020, rechts Juni 2022), Quelle: Guido Lauper, Spiez.

5 Zusammenfassung

Die Bachforelle als die bei uns dominierende Fischart in steilen, alpinen Fließgewässern hat in jeder Phase ihres Lebenszyklus spezifische Ansprüche an ihren Lebensraum. Neben geeigneten Laichplätzen für die Reifung der Eier und die Larvalentwicklung benötigt sie Flachwasserzonen für die jungen Stadien sowie tiefere Stellen, wo sich adulte Tiere aufhalten und jagen können. Optimal sind somit möglichst strukturreiche Gewässer mit sich unterscheidenden Lebensräumen. Da sich diese Habitate jedoch selten alle in unmittelbarer Nähe finden, kommt der Durchwanderbarkeit dieser steilen Fließgewässer besondere Bedeutung zu. Klassische Vernetzungsmassnahmen wie Blockrampen kommen in steilen Gewässern an ihre Grenzen, Stufen-Becken-Systeme können hier einen Beitrag zur Fischwanderung leisten. Im Berner Oberland sind mit der Unterstützung des Renaturierungsfonds in den letzten Jahren diverse Vernetzungsmassnahmen in Fließgewässern unterschiedlicher Grösse und Steilheit realisiert worden und müssen sich nun punkto Hochwassersicherheit und Ökologie bewähren.

Referenzen

Amt für Landschaft und Natur Kanton Zürich (2013). Forellen – Naturverlaichung in den Zürcherischen Fließgewässern, 9.

DWA (2014). Merkblatt M-509 Fischaufstiegsanlagen und fischpassierbare Bauwerke – Gestaltung, Bemessung, Qualitätssicherung, 38.

Adresse der Autorin

Karin Gafner (karin.gafner@be.ch)

Wirtschafts-, Energie- und Umweltdirektion des Kantons Bern,
Amt für Landwirtschaft und Natur, Fischereiinspektorat

Schwand 17, 3110 Münsingen

Besichtigung Hochwasserschutz Betelried

Am Nachmittag wurde die nahe gelegene Baustelle der Stufen-Becken-Abfolge am Betelriedbach besichtigt. Dabei wurde den Teilnehmenden mit drei spannenden Posten die Sicht der Planungsbüros, die Sicht des Bauunternehmers zur Ausführung sowie die Sicht der Fischerei zu den Anforderungen an Lebensräume vermittelt.

Posten 1: Planung von Stufen-Becken-Abfolgen in steilen Gerinnen

David Hodel, Theiler Ingenieure AG



Posten 2: Sicht des Bauunternehmers auf die Bauausführung
Bruno Kohler, Banholzer Bau AG



Posten 3: Fische und ihre Lebensräume in steilen Gewässern
Andreas Hertig & Karin Gafner, Fischereiinspektorat (BE)

