Zeitschrift: Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria
Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband
Band: 99 (2007)
Heft: 2

Artikel: Stufen-Becken-Abfolgen als sohlstabilisierende Massnahmen
Autor: Weichert, Roman / Bezzola, Gian Reto / Minor, Hans-Erwin
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-940128

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

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

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

Download PDF: 23.08.2025

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

Stufen-Becken-Abfolgen als sohlstabilisierende Massnahme

Roman Weichert, Gian Reto Bezzola, Hans-Erwin Minor

Zusammenfassung

Die Wertigkeit eines naturnahen Flussbaus ist in den letzten Jahrzehnten stark gestiegen. Dieses betrifft zunehmend auch Massnahmen, die der Stabilisierung der Sohle dienen. Im vorliegenden Artikel wird eine Methode zur Stabilisierung von steilen Fliessgewässerabschnitten vorgeschlagen. Grundidee dieses Konzepts ist, dem Gerinne Material zuzufügen, sodass sich unter hydraulischer Belastung eine natürliche und stabile Stufen-Becken-Struktur ausbilden kann. Es wird ein Bemessungskonzept vorgeschlagen, das auf physikalischen Modellversuchen basiert. Um eine Reihe offener Fragen beantworten zu können, sind weitere Untersuchungen notwendig.

Summary

Nature-oriented, man-made structures gained in importance during the recent years. In this context, structured block ramps that seek to simulate step-pool systems have been variously applied. Within the present paper a concept is proposed where the material with a widely graded grain size distribution is supplied to the channel and the river is left to its own resources to generate a stable step-pool configuration. The design concepts closely orients on flume experiments carried out at the Laboratory of Hydraulics, Hydrology and Glaciology (VAW) of the Swiss Federal Institute of Technology (ETH) in Zurich.

1. Einleitung

Schäden durch Hochwasserereignisse in Gebirgsregionen stehen häufig im Zusammenhang mit Prozessen, bei denen die Stabilität der Gerinnesohle von grosser Bedeutung ist. In Fällen, bei denen die Stabilität der natürlichen Gerinnesohle für ein bestimmtes Hochwasserereignis nicht ausreicht, besteht die Möglichkeit, erosionsbegrenzende Massnahmen zu realisieren. Hierbei ist in den letzten Jahren die Nachfrage an gewässerökologisch verträglichen Lösungen gestiegen. Dieser Forderung wird mit der Entwicklung und Realisierung von morphologienahen Sohlenbauwerken (z.B. aufgelöste Blockrampen) entsprochen (siehe *Bild 1)*.

Die Sohlenmorphologie und Stabilität steiler Gerinne waren der Schwerpunkt eines mehrjährigen Forschungsprojekts, das an der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) der ETH Zürich durchgeführt wurde. Es hatte zum Ziel, ein besseres Verständnis der massgebenden Prozesse im Zusammenhang mit der Sohlstabilität steiler Gerinne zu gewinnen. Die Erkenntnisse des Forschungsprojekts sollten des Weiteren benutzt werden, um Bemessungshinweise für morphologienahe Sohlenbauwerke abzuleiten. Die Resultate zur Stabilität natürlicher Gerinnesohlen sind in Weichert et al. (2006) zusammengefasst. Der vorliegende Artikel geht auf die Ergebnisse des zweiten Schwerpunkts ein, der sich mit morphologienahen Massnahmen zur Sohlenstabilisierung auseinandersetzt.

2. Sohlenmorphologie von Wildbächen und morphologienahe Sohlenbauwerke

Die natürlichen Morphologien steiler Fliessgewässer zeichnen sich durch grobe, strukturierte Deckschichten aus. Eine Klassifizierung verschiedener Typen wird zum Beispiel in Schälchli (1991) gegeben. Für Wildbäche im Gefällsbereich zwischen etwa 3 und 15% ist diese strukturierte Deckschicht gekennzeichnet durch Abfolgen steiler und flacher Abschnitte, die als Stufen und Becken bezeichnet werden *(Bild 2)*. Die Stufen resultieren dabei aus der Gruppierung der groben Sohlkomponenten zu Riegeln, die in der Regel quer oder schräg zur Fliessrichtung die ganze Gerinnebreite überspannen. Die Voraussetzung für die Bildung der Stufen ist die Bewegung der groben Blöcke, was in der Regel nur bei grösseren Hochwasserereignissen der Fall ist. Lagert sich ein transportierter Block an

Bild 1. Naturnah gestaltete Steilstrecke an der Dala. Im linken Bild der Zustand bei Niedrigwasser (Foto VAW), rechts ist der Zustand während des Hochwassers im Oktober 2000 gezeigt.

Bild 2. Natürliche Stufen-Becken-Abfolge am Campo-Bach (Foto: VAW).

einem unbeweglichen Block an, kommt es zur Stufenbildung. Da die Fliesstiefen auch für grössere Abflussereignisse in der Grössenordnung der Blockdurchmesser liegen, wird das Wasser nach den Stufen zur Sohle hin abgelenkt und es findet eine Kolkbildung statt. Dieser Bereich wird als Beckenabschnitt bezeichnet.

In Analogie zu der in der Natur vorhandenen Vielfalt möglicher Sohlenmorphologien existieren eine Anzahl Bauwerkstypen zur Sohlstabilisierung, die sich an den natürlichen Morphologien orientieren. Den natürlichen Stufen-Becken-Abfolgen nachempfundene Bauwerke sind dabei sogenannte aufgelöste, strukturierte Blockrampen, wie sie z.B. in Semadeni et al. (2004) oder Vogel (2005) beschrieben sind. Bei dieser Variante werden die Stufen in einer bestimmten Struktur durch Blockreihen nachgebaut, die Becken sind durch kleineres, uniformes Material ausgekleidet. Somit weist die Zusammensetzung des Rampenmaterials bei einer aufgelösten, strukturierten Rampe einen eher bimodalen Charakter auf.

Palt und Dittrich (2002) schlagen ein grundlegend anderes Bemessungskonzept für naturnahe raue Rampen vor. Die Idee für diesen Rampentyp ist dabei die Verwendung wildbachtypischen Sohlenmaterials, anstelle des eher bimodalen Charakters aufgelöster, strukturierter Rampen. Ziel ist, eine Stabilisierung des Gerinnes aufgrund einer natürlichen Ausbildung von Stufen-Becken-Morphologien zu erreichen.

3. Konzept zur Sohlstabilisierung mit Stufen-Becken-Abfolgen

Das hier vorgestellte Konzept basiert auf Resultaten von physikalischen Modellversuchen. Eine genaue Beschreibung der Versuche lässt sich in Weichert (2006) oder Weichert et al. (2006) finden.

Die im Folgenden beschriebene Sohlstabilisierungsmassnahme ist dem Konzept nach Palt und Dittrich ähnlich, d.h., die grundlegende Idee besteht darin, das im Gerinne vorhandene Sohlmaterial mit grobem Fremdmaterial abzudecken. Somit besteht eine Analogie des hier vorgestellten Konzepts zu Ideen früherer Untersuchungen von Lichtenhahn (1977) oder Hartlieb (1999), die ebenfalls durch Zugabe von Fremdmaterial die Ausbildung einer künstlichen Deckschicht initiieren. Der Unterschied zwischen den genannten Untersuchungen und dem hier vorgestellten Konzept liegt im Gefälle des zu stabilisierenden Fliessgewässerabschnitts und somit auch in der Zusammensetzung des zugeführten Fremdmaterials. Während Lichtenhahn und Hartlieb ihre Untersuchungen für Flüsse im Gefällsbereich kleiner als etwa 0,5–1% durchführten, sollen mit der hier vorgeschlagenen Massnahme Steilstrecken im Gefällsbereich von 3–10% stabilisiert werden. Für diese Abschnitte wird die Verwendung eines Fremdmaterials vorgeschlagen, das eine für Wildbäche typische breite Kornverteilung aufweist. Dieses Material wird dem zu stabilisierenden Abschnitt zugeführt. Unter hydraulischer Belastung wird sich dann eigendynamisch eine natürliche Stufen-Becken-Struktur ausbilden.

Palt und Dittrich (2002) merken an, dass es aufgrund des instationären Abflussgeschehens nicht möglich ist, die Zeiträume zu definieren, die es braucht, dass sich eine natürliche Stufen-Becken-Struktur ausbildet. Sie schlagen daher vor, diese Strukturen zu initialisieren. Die dem vorliegenden Konzept zu Grunde liegenden Modellversuche haben gezeigt, dass bei gebauten Stufenstrukturen mit Anpassungen zu rechnen ist, da eingebaute Stufen nicht die Stabilität der natürlich entwickelten Strukturen erreichen (Weichert 2006). Die grundlegende Idee der hier vorgestellten Massnahme besteht demnach darin, das vorhandene Sohlmaterial mit Fremdmaterial abzudecken, das homogen durchmischt, d.h., ohne Initialisierung einer Struktur zugeführt wird. In Funktion der hydraulischen Belastung wird sich dann jeweils eine entsprechende morphologische Struktur ausbilden. Gemäss den Erfahrungen aus den Modellversuchen wird diese schon bei relativ kleinen Belastungen ein natürliches Erscheinungsbild aufweisen.

Die Ausbildung einer stabilen Stufen-Becken-Struktur unter der Anfangsbedingung einer homogen ins Gerinne eingebauten Fremdmaterialschicht geht einher mit Sohlenerosionen. Dies bedeutet, dass sich nach dem Einbringen des Materials unter hydraulischer Belastung die Sohle eintiefen wird. Je nach dem, ob die Massnahme für einen längeren Fliessgewässerabschnitt oder punktuell als Rampenbauwerk verwendet wird, erfolgt diese Sohleneintiefung durch eine Parallel- bzw.

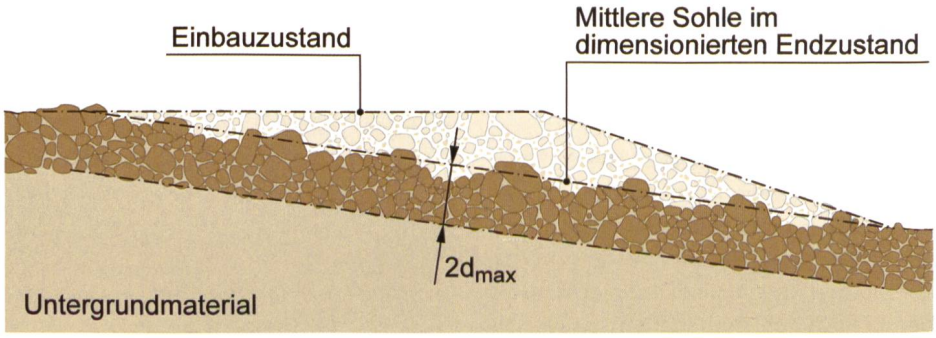

Bild 3. Grundlegende Idee des Stabilisierungskonzepts: Das homogen eingebrachte Material wird übersteilt eingebaut, sodass sich für den Dimensionierungsabfluss eine stabile, natürliche Struktur mit dem Dimensionierungsgefälle ausbilden wird. Es ist mit Becken zu rechnen, die eine Tiefe von $2d_{max}$ haben (bezogen auf die mittlere Sohlenlage des dimensionierten Endzustandes).

Rotationserosion. Wird der Prozess einer Rotationserosion zu Grunde gelegt, ist dies gleichbedeutend mit einer Abflachung des Rampengefälles. Dieses Verhalten wiederum bedingt die Notwendigkeit, das Material dem Gerinne in einem steileren Gefälle zuzufügen, als es dem gewünschten Dimensionierungsgefälle entspricht. Dieser Grundgedanke ist in *Bild 3* dargestellt.

Hiermit unterscheidet sich die hier vorgestellte Massnahme in einigen Punkten massgeblich von anderen Konfigurationen. So wird z.B. bei klassischen wie auch bei aufgelösten, strukturierten Blockrampen direkt der Endzustand der Rampe realisiert, d.h., das eingebaute Rampengefälle entspricht dem dimensionierten Rampengefälle für alle Abflüsse bis zum Dimensionierungsereignis. Für grössere Abflüsse ist jedoch mit grösseren Schäden zu rechnen, d.h., eine Überlastung der Rampe kann je nach Randbedingungen zu einem totalen Kollaps des Bauwerks führen (Weichert 2007). Im Gegensatz dazu gehören Anpassungen im stabilisierten Fliessgewässerabschnitt bei der hier vorgestellten Massnahme zum Bemessungskonzept. Dieses hat zur Folge, dass eine Überbelastung eher eine graduelle Anpassung des Gefälles und keinen totalen Kollaps zur Folge hat.

Ein weiterer wichtiger Unterschied zwischen der aufgelösten, strukturierten Rampe sowie der hier vorgestellten, sich eigendynamisch entwickelnden strukturierten Deckschicht liegt im Spannungsfeld der Variabilität des Rampenaufbaus zur Reproduzierbarkeit ihrer Struktur. Bemessungskriterien für beide Bauwerkstypen werden in der Regel aufgrund von physikalischen Modelluntersuchungen abgeleitet. Im Falle aufgelöster, strukturierter Blockrampen muss für den Stufenaufbau eine Konfiguration gewählt werden, die reproduzierbar ist, ansonsten ist sie für eine Umsetzung in der Natur nicht praktikabel (Felix 2005). Diese Randbedingung bedingt jedoch eine gewisse Regelmässigkeit innerhalb der Rampenstruktur. Natürlich entwickelte Stufen sind hingegen aus vielen verschiedenen Steinen und Blöcken unterschiedlicher Grösse aufgebaut und zeichnen sich durch eine sehr grosse Variabilität in ihrer Struktur aus. Im Rahmen des hier beschriebenen Forschungsprojekts zeigte sich, dass im Mittel gebaute Stufen nicht die Stabilität der natürlichen Stufen erreichen (Weichert 2006, siehe auch Palt und Dittrich 2002). Dieses ist durch die hohe Variabilität innerhalb der natürlichen Strukturen zu erklären. Diese reproduzierbar nachzubauen, ist jedoch nicht möglich (Weichert 2006), weswegen sie für Bemessungskonzepte aufgelöster, strukturierter Blockrampen nicht in Frage kommen.

Für die sich eigendynamisch entwickelnde Stufen-Becken-Struktur gilt hingegen diese Einschränkung nicht. Baumeister ist zu einem grossen Teil die Natur selbst, da sich eine variable und stabile Struktur unter der jeweils vorhandenen hydraulischen Belastung eigenständig aus dem zugeführten Fremdmaterial formt. Diese Struktur ist dadurch gekennzeichnet, dass sich für gleiche Randbedingungen zwar nicht exakt identische Stufen an den gleichen Stellen im Gerinne bilden werden, sich jedoch im statistischen Sinne immer die gleiche Morphologie ausbilden wird (Aberle 2000, Weichert 2006).

Die Abhängigkeit der Morphologie von den auftretenden Abflüssen bedingt jedoch auch für die hier vorgestellte Sohlstabilisierungsmassnahme eine Einschränkung hinsichtlich der Reproduzierbarkeit der Modelluntersuchungen für die Praxis, da die zeitlichen Abfolgen der Abflüsse in der Natur nicht vorhersagbar sind.

Im Folgenden wird ein Vorgehen für die Dimensionierung der sich eigendynamisch ausbildenden Stufen-Becken-Struktur als sohlenstabilisierende Massnahme vorgestellt. In einem nächsten Schritt werden die Grenzen des Ansatzes dargelegt sowie offene Fragen diskutiert.

4. Vorgehen zur Bemessung

Das Berechnungsverfahren stellt im Prinzip die Umkehr der tatsächlich im Fluss auftretenden Prozesse dar. Während die grundlegende Idee ist, dem Fluss Material zuzufügen und über die hydraulische Belastung eine Anpassung des Gefälles zu erhalten, beginnt die Berechnung am erwünschten Endzustand. Ausgehend von diesem Zustand wird schrittweise für jeweils geringere Abflüsse das zugehörige stabile Flussabschnittsgefälle mit der entsprechenden Rauigkeit berechnet. Dieses Vorgehen wird solange wiederholt, bis das Anfangsgefälle des Fliessgewässerabschnitts bestimmt ist, das beim Einbringen des Materials eingebaut werden sollte. Anders ausgedrückt, liefert der Berechnungsvorgang das notwendige Überschüttungsmass, damit sich unter Annahme einer Rotationserosion das gewünschte stabile Gefälle mit natürlich ausgebildeter Struktur ausbildet.

Grundlage dieser Bemessung sind dabei die aus den hydraulischen Modellversuchen abgeleiteten Beziehungen zur Sohlenstabilität natürlicher Gerinne (Weichert et al. 2006). Diese Beziehungen geben im Wesentlichen einen Zusammenhang zwischen dem Abfluss, der Sohlenmorphologie sowie den sich aus diesem Zusammenspiel ergebenden Sohleneintiefungen. In den Modellversuchen konnten dabei zwei massgebende Prozesse unterschieden werden. Zum einen passt sich die Geometrie der Stufen-Becken-Abfolgen an die jeweiligen Belastungen an und trägt so zur Stabilisierung der Sohle bei. Zum zweiten wird sich unter Annahme einer Rotationserosion das Gefälle des Fliessgewässerabschnittes in Abhängigkeit der Belastung verändern. Die Kenntnis, welcher dieser Prozesse massgebend ist, ist für die Projektierung der Sohlstabilisierungsmassnahme wichtig, da im Wesentlichen die Anpassung des Gefälles des Fliessgewässerabschnittes infolge einer Rotationserosion das für den Einbau notwendige Überdeckungsmass bestimmt. In diesem Zusammenhang muss zwischen einer hydraulisch unbelasteten Sohle sowie einer bereits belasteten Sohle unterschieden werden. Für hydraulisch belastete Sohlen haben die Modellversuche gezeigt, dass beide Prozesse in etwa zum gleichen Mass zur Stabilisierung der Sohle beitragen. Für hydraulisch unbelastete Sohlen wird hingegen bei einer Initialbelastung die Stabilisierung der Sohle über die Anpassung der Struktur der Sohle überproportional zur Sohlstabilisierung beitragen.

Das grundlegende Berechnungsverfahren ist in *Bild 4* dargestellt und wird im Folgenden beschrieben:

1.) *Festlegung der Bemessungsgrössen q_{dim} und J_{dim}*

Unter Berücksichtigung des Anwendungsbereiches dieser Stabilisierungsmassnahme (siehe Abschnitt 8) wird zunächst das Dimensionierungsgefälle J_{dim} des Fliessgewässerabschnitts festgelegt. Dieser Abschnitt soll für einen bestimmten Dimensionierungsabfluss *qdim* stabil sein. Bei der Bestimmung von q_{dim} sind möglichen Abflusskonzentrationen aufgrund von starken Bachkrümmungen o.Ä. Beachtung zu schenken.

2.) Rauigkeit im Endzustand

Aberle (2000) entwickelte einen Stabilitätsansatz für Wildbachsohlen mit Stufen-Becken-Strukturen, der sich in den an der VAW durchgeführten Modellversuchen bewährte. Für die gegebenen Grössen des Abflusses q_{dim} und des Gefälles J_{dim} lässt sich daraus die Rauigkeit berechnen, die benötigt wird, damit der Fliessgewässerabschnitt stabil ist. Die Rauigkeit der Wildbachsohle wird in diesem Zusammenhang

durch die Standardabweichung der Rauigkeitserhebungen s beschrieben. Nähere Angaben über die Definition sowie Ermittlung der Standardabweichung finden sich z.B. in Aberle (2000), Weichert (2006) oder Weichert et al. (2006).

$$s_{dim} = \frac{2.92 \cdot q_{dim}^{0.67} \cdot J_{dim}^{0.87}}{g^{0.33}} \quad (1)$$

3.) Kornverteilung

Für die Ausbildung einer Stufen-Becken-Morphologie ist zu gewährleisten, dass wildbachtypisches Sohlenmaterial in das Gerinne eingebracht wird. Dieses ist in erster Linie gekennzeichnet durch eine breite Kornverteilung, d.h. es sind alle Korngrössen von Sand bis hin zu grossen Blöcken vorhanden. Da zurzeit keine weitergehenden Erkenntnisse vorliegen, wird bis auf weiteres empfohlen, sich an der in den Modellversuchen verwendeten Kornverteilung zu orientieren (siehe *Tabelle 1*).

Der erforderliche maximale Blockdurchmesser lässt sich anhand der Dimensionierungsrauigkeit s_{dim} wie folgt bestimmen:

$$d_{max}=4\, s_{dim}. \quad (2)$$

4.) Schrittweise Berechnung des Ausgangsgefälles

Im Folgenden wird ein schrittweises Vorgehen zur Berechnung des Ausgangsgefälles dargestellt. Für die Berechnung werden die Parameter J_{alt} und q_{alt} verwendet. Im ersten Berechnungsschritt entsprechen die Werte für J_{alt} und q_{alt} den Dimensionierungsgrössen J_{dim} und q_{dim}.

Ausgehend von J_{alt} wird zunächst das zu einer kleineren Abflussmenge gehörende neue Gefälle J_{neu} berechnet, welches grösser ist als J_{alt}. Hierzu wird der Ansatz für natürliche Sohlen verwendet wie er in Weichert et al. (2006) dargestellt ist, sowie die Überlegungen berücksichtigt, die besagen, dass je nach hydraulischer Vorbelastung der Sohle eine Selbststabilisierung mehr oder weniger stark über eine Anpassung des Gefälles stattfinden wird. Wie im vorigen Abschnitt erläutert ist insbesondere der Fall zu unterscheiden, ob eine belastete oder eine unbelastete Sohle den vorherigen Zustand bildete.

Im Berechnungsverfahren wird zunächst davon ausgegangen, dass für den zu berechnenden vorhergehenden Zustand eine unbelastete Sohle vorliegt. Entsprechend der Modellversuche wird dann von folgendem Abflussverhältnis ausgegangen:

$$\frac{q_{neu}}{q_{alt}} = 0.5 \quad (3)$$

Das neue, steilere Gefälle lässt sich dann berechnen zu

$$J_{neu} = 1.15 \cdot J_{alt}. \quad (4)$$

Mit den Gleichungen (3) und (4) resultiert für diese Randbedingungen eine Rauigkeit s_{neu}, für die das Gerinne stabil ist (Aberle 2000):

$$s_{neu} = \frac{2.92 \cdot q_{neu}^{0.67} \cdot J_{neu}^{0.87}}{g^{0.33}}. \quad (5)$$

Wesentliches Element ist nun die Prüfung, ob die mit Gleichung (5) berechnete Rauigkeit, der Rauigkeit entspricht, die für den Initialzustand erwartet wird, d.h., wenn das Material dem Bachabschnitt zugefügt ist. Die Rauigkeit des Initialzustandes lässt sich anhand der folgenden Beziehung abschätzen, die aus Zusatzversuchen an der VAW resultiert:

$$s_0 = 0.62 \cdot d_m, \quad (6)$$

wobei sich d_m anhand der in *Tabelle 1* ermittelten Kenngrössen bestimmen lässt.

Die Prüfung sieht nun vor, s_{neu} aus Gleichung (5) mit s_0 aus Gleichung (6) zu vergleichen. Ist $s_0 \geq s_{neu}$, so ist die Berechnung beendet, und J_{neu} entspricht dem einzubauenden Ausgangsgefälle. Ist $s_0 < s_{neu}$, so muss davon ausgegangen werden, dass im vorherigen Belastungsschritt die Sohle bereits belastet war. Für diesen Fall wird die Rechnung von Gleichung (3) bis Gleichung (6) wiederholt, wobei die Ausgangsgrössen neu gesetzt werden zu:

$$J_{alt} \equiv 1.06 \cdot J_{alt} \quad (7)$$

und

$$q_{alt} \equiv 0.87 \cdot q_{alt}. \quad (8)$$

Die dargestellten Berechnungsschritte werden nun so lange durchgeführt, bis das Kriterium $s_0 \geq s_{neu}$ erfüllt ist. Das einzubauende Ausgangsgefälle entspricht dann dem berechneten Gefälle J_{neu}, welches im Wirkungsbereich des Fixpunktes, entsprechend der Darstellung in *Bild 3*, eingebaut werden muss. Wird mit der hier vorgestellten Methode keine punktuelle Sicherung der Sohle, wie z.B. bei einem Rampenbauwerk, sondern eine Sohlstabilisierung über eine längere Fliessstrecke angestrebt, so muss berücksichtigt werden, dass eine Rotationserosion nur über eine gewisse Strecke oberstrom des Fixpunktes wirkt und sich sonst eher eine Parallelerosion beobachten lässt.

d_{16}/d_{max}	d_{50}/d_{max}	d_{84}/d_{max}	d_{90}/d_{max}	d_m/d_{max}
0.044	0.133	0.422	0.578	0.23

Tabelle 1: Wildbachtypische Kornverteilung aus den Modellversuchen.

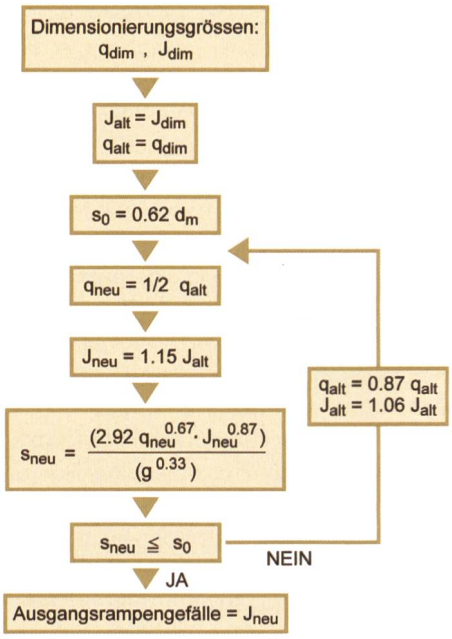

Bild 4. Prinzipielles Vorgehen für die schrittweise Berechnung des Ausgangsgefälles.

5. Fliesswiderstand

Um für jeden Zustand der Sohle den Hochwasserschutz zu gewährleisten, ist die Kenntnis der Fliesstiefe notwendig. Wildbäche mit Stufen-Becken-Systemen sind dadurch gekennzeichnet, dass selbst bei grösseren Abflüssen die Fliesstiefe im Bereich der Stufenhöhen liegt. Daraus folgt, dass die für Mittellandflüsse gängigen Fliesswiderstandsgleichungen nicht direkt angewendet werden sollten, da für kleine relative Überdeckungen (definiert als das Verhältnis von Fliesstiefe zu Rauigkeitsgrösse) der Fliesswiderstand überproportional anwächst (Bezzola 2002, Weichert 2006). Im Rahmen der Modellversuche an der VAW hat sich die Beziehung von Aberle (2000) (siehe auch Aberle and Smart 2002) bewährt:

$$\frac{U}{U^*} = 0.9 \cdot \frac{h}{s}. \quad (9)$$

Hierin ist U die mittlere Fliessgeschwindigkeit, U^* ist die Schubspannungsgeschwindigkeit, die durch

$$U^* = \sqrt{g \cdot h \cdot J} \quad (10)$$

definiert ist, und h ist die mittlere Abflusstiefe. Da aus der Stabilitätsberechnung in Abschnitt 5 für jeden Zustand der Abfluss sowie die Standardabweichung der Rauigkeitserhebungen *s* bekannt ist, lässt sich die Abflusstiefe mit Gleichung (9) sowie der Kontinuitätsgleichung ermitteln.

6. Kolktiefen

Für die hier vorgestellte Massnahme gehören Becken zum natürlichen Erscheinungsbild der gewünschten Sohlenmorphologie. Die Kenntnis der Beckentiefen indes ist wichtig, um einen ausreichend tief fundierten Uferschutz zu gewährleisten. Hierbei ist der dimensionierte Endzustand massgebend. Grundlage für die Abschätzung der Beckentiefen ist daher die mittlere Sohlenlage des stabilisierten Fliessgewässerabschnitts im dimensionierten Endzustand. Ausgehend von der mittleren Sohlenlage kann aufgrund der Vermessungen in den Modellversuchen von einem Wert von $2d_{max}$ unterhalb der mittleren Sohlenlage ausgegangen werden *(Bild 3)*. Diese Grösse bezieht sich auf die Becken im betrachteten Fliessgewässerabschnitt selbst. Entgegen den Erfahrungen mit klassischen sowie aufgelösten, strukturierten Rampen wirkt sich die Ausbildung einer natürlichen, strukturierten Sohle günstig auf die Energieumwandlung in der Fliessstrecke aus, d.h., es kommt nicht zu einer Kolkbildung am Ende der stabilisierten Fliessstrecke.

7. Ausgetragenes Material

Das hier vorgestellte Konzept sieht vor, dass sich ausgehend von einem Volumen lose eingebrachten Materials durch hydraulische Belastung eine stabile, natürliche Struktur ausbildet. Dieses bedingt Erosionen im stabilisierten Fliessgewässerabschnitt und damit Material, welches in das Unterwasser transportiert wird. Je nach Fliessgewässer kann dies unerwünscht sein. Daher sind die Angaben der ausgetragenen Volumen sowie deren Kornverteilung wesentliche Grundlage für die Entscheidung, ob die hier vorgestellte Methode für einen Fliessgewässerabschnitt in Frage kommt oder nicht.

In diesem Zusammenhang ist wiederum zu differenzieren, ob die Sohle in einem hydraulisch belasteten oder unbelasteten Zustand vorliegt, d.h., ob sich die Sohle bei einer Erhöhung des Abflusses mehr oder weniger stark über eine Abnahme des Gefälles anpassen wird. Diese Unterscheidung ist sowohl relevant für die Betrachtung, wie viel Sediment ausgetragen wird, wie auch, welche Korngrössen ausgetragenen werden. Für den Initialzustand sind die Abpflästerung und die Ausbildung der Stufen-Becken-Strukturen die massgebenden Prozesse. Demnach wird zunächst deutlich feineres Material ausgetragen, als dies bei hydraulisch belasteten Sohlen der Fall ist. Anhand der Kornverteilungen in *Bild 5* sowie den jeweils berechneten Gefällen lassen sich die ausgetragenen Volumen für jede Fraktion abschätzen.

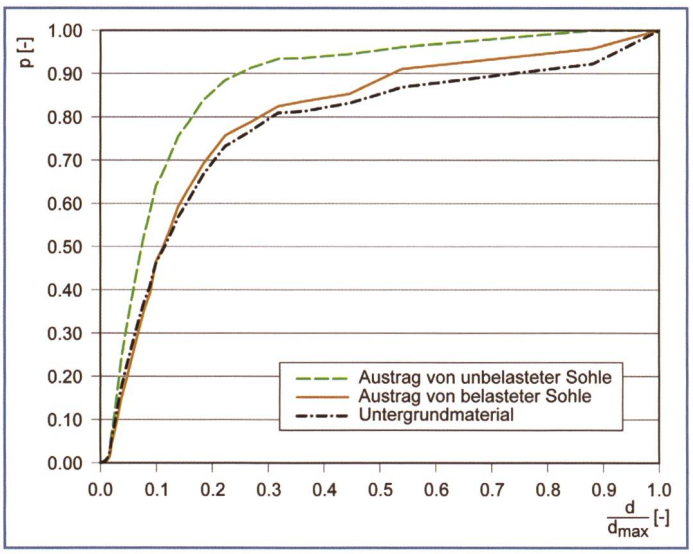

Bild 5. Kornverteilung des ausgetragenen Materials, Beispiel aus Modellversuch.

8. Gültigkeitsbereich und offene Fragen

Physikalische Modellversuche beinhalten in der Regel ein gewisses Mass an Idealisierungen. Die daraus resultierenden Unsicherheiten sowie die Beschränkungen des hier vorgestellten Bemessungskonzepts werden im Folgenden dargestellt.

Anwendungsgebiet der vorgestellten Methode sind steile, relativ schmale Gerinne. Die Modellversuche decken dabei einen Gefällsbereich von J_{dim}=0,03–0,10 sowie Gerinnebreiten zwischen B/d_{max}=3–7 ab. Für grosse Gerinnebreiten bzw. steile Gefälle konnte die Ausbildung eines pendelnden Talwegs infolge alternierender Eintiefungen beobachtet werden. Dieses ist von Bedeutung, da solche Strukturen zu Abflusskonzentrationen führen. Zudem beeinflusst diese übergeordnete Morphologie die Ausbildung der Geometrien der Stufen-Becken-Abfolgen. Anhand der Versuchsresultate zeigte sich, dass morphologische Diagramme, wie z.B. nach da Silva (1991), auch für steile Fliessgewässer gute Resultate brachten, um abzuschätzen, inwieweit mit solchen alternierenden Strukturen gerechnet werden muss.

Im Rahmen der Modelluntersuchung wurden stationäre Abflussbedingungen ohne zusätzliche Zufuhr von Geschiebe betrachtet. Ausgehend von einer homogen eingebrachten Sohle wurde der Abfluss schrittweise erhöht, um so den Zusammenhang zwischen dem Abfluss, dem Gefälle, der Rauigkeit der Sohle sowie den Sohlenerosionen zu untersuchen. Die im Modell betrachteten Schrittweiten waren dabei relativ klein, d.h., der neue, erhöhte Abfluss lag in etwa 10–20% über dem alten Abflusswert. Entgegen diesen systematischen Randbedingungen zeichnet sich die Hydrologie natürlicher Wildbäche durch grosse Schwankungsbreiten aus. Ein wesentlicher offener Punkt für die Anwendung des hier vorgestellten Massnahmentyps ist daher die Frage, was passiert, wenn ein Hochwasserabfluss sofort auf das eingebrachte Fremdmaterial trifft, d.h., das Verhältnis des neuen Abflusses zum alten Abfluss gross ist. Dieses wird zunächst zu einer verstärkten Abnahme des Gefälles führen, bei abklingendem Hochwasser wird dann wieder die Selbststabilisierung über die Ausbildung einer strukturierten Sohle stattfinden. In den Modellversuchen konnte beobachtet werden, dass die Modifikationen sehr schnell nach Erhöhung des Abflusses passierten. Dieses lässt die Annahme zu, dass die Ergebnisse, obwohl unter stationären Bedingungen erzielt, auch auf instationäre Verhältnisse übertragbar sind. Für genaue Abklärungen sind gegebenenfalls zusätzliche Untersuchungen anhand von Modell- oder Naturbeobachtungen notwendig.

Die Ausnutzung des Selbststabilisierungspotenzials von breiten Kornverteilungen ist für steile Fliessgewässer ein relativ neues Konzept für die Sohlstabilisierung erosionsgefährdeter Gerinneabschnitte. Demzufolge existieren nur wenige Grundlagendaten aus Modellversuchen und quasi keine Erfahrungen in der Praxis. Aus diesem Grund orientiert sich das hier dargestellte Bemessungskonzept sehr

eng an den an der VAW durchgeführten Modellversuchen. Generell ist daher festzuhalten, dass noch grundlegender Forschungsbedarf mit Modell- oder Naturversuchen besteht, um das Einsatzspektrum der hier vorgestellten Massnahme genau zu definieren sowie bestehende Unsicherheiten eingrenzen zu können.

9. Praktisches Beispiel

Das vorgestellte Konzept soll anhand eines konkreten Berechnungsbeispiels näher vorgestellt werden. Hierzu wird ein Gerinneabschnitt betrachtet, der mit einem Gefälle von J_{dim}=0,08 stabilisiert werden soll. Der Bemessungsabfluss soll *HQ100*=36 m³/s betragen. Bei einer Gerinnebreite von *B*=9 m, folgt daraus q_{dim}=4,0 m³/sm. Die Rauigkeit des Endzustandes lässt sich mit Gleichung (1) berechnen:

$$s_{\dim} = \frac{2.92 \cdot 4.0^{0.67} \cdot 0.08^{0.87}}{9.81^{0.33}} = 0.39 \text{ m.} \qquad (11)$$

Daraus ergibt sich mit d_{max}=4 s_{dim}=1,55 m (entspricht Blöcken mit einem Gewicht von etwa 5 t) die Kornverteilung des einzubringenden Materials nach *Tabelle 1*. Dieser Wert für d_{max} erscheint auf den ersten Blick sehr gross. Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass es sich hierbei um den maximalen Blockdurchmesser handelt, von denen, entsprechend der Kornverteilung und in Abhängigkeit des einzubauenden Volumens, nur eine geringe Anzahl benötigt werden.

Darauffolgend wird nun die Standardabweichung der Rauigkeitserhebungen im Einbauzustand s_0=0,62 d_m =0,22 m berechnet. Dieser Wert dient als Abbruchkriterium für die im Folgenden dargestellte schrittweise Berechnung des Ausgangsgefälles (siehe auch *Bild 4*).

Schritt 1:

$$q_{neu} = 0.5 \cdot q_{alt} = 0.5 \cdot 4.0 = 2.0 \text{ m}^3/\text{sm}$$

$$J_{neu} = 1.15 \cdot J_{alt} = 1.15 \cdot 0.08 = 0.092$$

$$s_{neu} = \frac{2.92 \cdot 2.0^{0.67} \cdot 0.092^{0.87}}{9.81^{0.33}} = 0.27 \text{ m.}$$

(12) (siehe Gl. 3)
(13) (siehe Gl. 4)
(14) (siehe Gl. 5)

Der Wert für s_{neu} ist grösser als der berechnete Wert für s_0. Daraus folgt, dass ein zweiter Berechnungsschritt notwendig ist. Für diesen werden die Berechnungsgrössen für J_{alt}=1,055 · 0,08 = 0,084 und q_{alt}=0,87 · 4,0=3,48 m³/sm entsprechend den Gleichungen (7) und (8) angepasst und mit diesen Werten der neue Berechnungsschritt ausgeführt.

Schritt 2:

$$q_{neu} = 0.5 \cdot q_{alt} = 0.5 \cdot 3.48 = 1.74 \text{ m}^3/\text{sm}$$

$$J_{neu} = 1.15 \cdot J_{alt} = 1.15 \cdot 0.084 = 0.097$$

$$s_{neu} = \frac{2.92 \cdot 1.74^{0.67} \cdot 0.097^{0.87}}{9.81^{0.33}} = 0.26 \text{ m.}$$

(15) (siehe Gl. 3)
(16) (siehe Gl. 4)
(17) (siehe Gl. 5)

Auch hier ist der berechnete Wert von s_{neu} noch grösser als der berechnete Wert für s_0. Es werden in Analogie zum zweiten Berechnungsschritt wiederum die Ausgangsgrössen für den dritten Berechnungsschritt bestimmt:

J_{alt}=1,055 · 0,084=0,089 und q_{alt}= 3,03 m³/sm und der neue Wert für s_{neu} berechnet. Wird dieses Vorgehen wiederholt, wird im fünften Berechnungsschritt ein Wert von s_{neu}=0,22 m berechnet. Da dieser Wert gleich dem berechneten Wert s_0=0,22 m ist, kann die schrittweise Berechnung beendet werden. Das im fünften Schritt ermittelte Gefälle beträgt J_{neu}=0,120. Das Resultat ist nun, dass man das Material in einem Gefälle von 12,0% einbringen muss, damit sich für eine Belastung von 36 m³/s eine natürliche Stufen-Becken-Abfolge mit einem Gefälle von 8% einstellen wird.

Die maximal zu erwartenden Beckentiefen unterhalb des dimensionierten Endzustandes betragen 3,10 m. Unter der Annahme eines Trapezprofils und rauer Ufer resultieren für den Dimensionierungsabfluss von *HQ100*=36 m³/s für den Einbauzustand Fliesstiefen von etwa 1,10 m für den Endzustand von etwa 1,25 m bezogen auf die mittlere Sohlenlage.

Dank

Das im vorliegenden Artikel vorgestellte Forschungsprojekt wurde vom ehemaligen Bundesamt für Wasser und Geologie (BWG) heute Bundesamt für Umwelt (BAFU) wesentlich mitfinanziert.

Literatur

Aberle, J. (2000): «Untersuchung der Rauheitsstruktur zur Bestimmung des Fließwiderstandes in Gebirgsbächen unter Klarwasserabfluss», Mitteilungen des Instituts für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik, Universität Karlsruhe (TH), Heft 207.

Aberle, J., Smart, G. (2000): «The influence of roughness structure on flow resistance on steep slopes.» Journal of Hydraulic Research, 41(3): 259–269.

Bezzola, G.R. (2002): «Fliesswiderstand und Sohlenstabilität natürlicher Gerinne», Mitteilung Nr. 173, VAW, ETH Zürich.

Felix, D. (2005): «Stabilisierung von Flusssohlen mit Traversen aus Blöcken», Diplomarbeit, Wintersemester 2004/05, VAW, ETH Zürich. (unveröffentlicht).

Hartlieb, A. (1999): «Offene Deckwerke – eine naturnahe Methode zur Sohlstabilisierung eintiefungsgefährdeter Flussabschnitte», Mitteilung 85, Lehrstuhl für Wasserbau und Wasserwirtschaft, TU München.

Lichtenhahn, C. (1977): «Flussbau», Vorlesungsmanuskript, ETH Zürich.

Palt, S., Dittrich, A. (2002): «Stabilität von Gebirgsflüssen und rauen Rampen.» Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft 54. Jhg.(Heft 5–6): 75–86.

Schälchli, U. (1991): «Morphologie und Strömungsverhältnisse in Gebirgsbächen: Ein Verfahren zur Bestimmung der Restwasserabflüsse», Mitteilung Nr. 113, VAW, ETH Zürich.

Semadeni, N., Lange, D., Bezzola, G.R. (2004), «Stabilität von aufgelösten Blockrampen», Lebensraum Fluss, Symposium vom 16.–19.Juni 2004, Wallgau, Berichte des Lehrstuhls und der Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft der Technischen Universität München, Nr.100, 2004.

Weichert, R. (2006): «Bed morphology and stability in steep open channels», Mitteilung Nr. 192, VAW, ETH Zürich, Nr. 192.

Weichert, R., Bezzola, G.R., Minor, H.E. (2006): «Beurteilung der Sohlenstabilität von Gebirgsbächen», Wasser Energie Luft, 98. Jahrgang, 2006, Heft 3, 243–249.

Weichert, R. (2007): «Die Gutmütigkeit von Blockrampen im Überlastfall», Workshop Blockrampen – Anforderungen und Bauweisen, 5.Oktober 2006, Mitteilung Nr. 201, VAW, ETH Zürich.

Vogel, S. (2005): «Ein Stabilitätsansatz zur Bemessung rauer Rampen in aufgelöster Bauweise», Wasserwirtschaft, 4/2005: 20–25.

Anschrift der Verfasser:
Roman Weichert, Beller Consult GmbH
Linnéstrasse 5, DE-79110 Freiburg
r.weichert@bellerconsult.de
ehemals VAW, ETH Zürich
Hans-Erwin Minor, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW),
ETH Zürich, CH-8092 Zürich
minor@vaw.baug.ethz.ch.
Gian Reto Bezzola, Bundesamt für Umwelt, BAFU, CH-3003 Bern
gianreto.bezzola@bafu.admin.ch
ehemals VAW, ETH Zürich