Zeitschrift: Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria
Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband
Band: 109 (2017)
Heft: 1

Artikel: Aufgelöste unstrukturierte Blockrampen
Autor: Scapozza, Carlo / Tamagni, Simona / Weitbrecht, Volker
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-941607

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: 15.07.2025

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

Aufgelöste unstrukturierte Blockrampen

Einleitung

Carlo Scapozza

Eine der grössten Herausforderungen im Wasserbau ist die Realisierung von Schutzbauten, welche stabil und überlastbar sind und gleichzeitig den ökologischen Anforderungen entsprechen. Die aufgelösten unstrukturierten Blockrampen schaffen diesen Spagat und sind deshalb eine gute Alternative zu konventionellen Absturzbauwerken.

In einer Kombination aus praxisorientierter Forschung und Reflexion über realisierte Projekte haben sich die Autoren mit Stabilität, Durchgängigkeit, Dimensionierung, baulicher Ausführung, Bauablauf, Qualitätskontrolle und Monitoring von aufgelösten unstrukturierten Blockrampen auseinandergesetzt. Die daraus entstandene Praxisanleitung gibt einen ersten guten Überblick über die Möglichkeiten und Grenzen der aufgelösten Blockrampen und wirft ebenso neue Forschungsfragen auf, z. B. zur Stabilität im Rampenfussbereich und zum Verhalten im Unterwasser, die es sich lohnt zu vertiefen.

Das Bundesamt für Umwelt begrüsst die bisher geleistete Arbeit und die entstandene Praxisanleitung als wichtigen Beitrag zur Entwicklung der Wasserbaukunst in der Schweiz. Ebenso unterstützt das BAFU die Vertiefung der noch offenen Fragen.

Anschrift des Verfassers
Carlo Scapozza, Sektionschef Hochwasserschutz, Eidg. Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation, UVEK
Bundesamt für Umwelt (BAFU)
Abteilung Gefahrenprävention
Worblentalstrasse 68, CH-3003 Bern
carlo.scapozza@bafu.admin.ch

Praxisanleitung zur Dimensionierung – Kurzfassung

Simona Tamagni, Volker Weitbrecht, Robert Boes

Zusammenfassung

Im Rahmen einer Forschungsarbeit an der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) der ETH Zürich wurde die Stabilität von aufgelösten unstrukturierten Blockrampen mittels physikalischen Modellversuchen untersucht. Mittels eines Feldversuchs der Eawag wurde zusätzlich die Fischdurchgängigkeit dieses Rampentyps überprüft. Im Auftrag des Bundesamts für Umwelt (BAFU) wurde mit Hilfe dieser Arbeit eine Praxisanleitung zur Dimensionierung von unstrukturierten Blockrampen verfasst. Der vorliegende Artikel fasst die wichtigsten Erkenntnisse zur Dimensionierung zusammen; die praktische Ausführung wird im nachfolgenden Artikel der Flussbau AG SAH präsentiert.

Résumé

Dans le cadre d'un projet de recherche au Laboratoire d'hydraulique, d'hydrologie et de glaciologie de l'EPF Zurich (VAW), la stabilité des rampes en enrochements régulièrement répartis a été étudiée à travers des essais hydrauliques à l'échelle réduite. De plus, la franchissabilité de ce type de rampe pour des poissons a été analysée à l'aide d'un essai in situ par l'Eawag. Sur ces bases, un manuel de dimensionnement pour les rampes en enrochements régulièrement répartis a été composé pour le compte de l'Office fédéral de l'environnement (OFEV). Le présent article résume les résultats principaux sur le dimensionnement, tandis que la mise en œuvre pratique est présentée dans l'article suivant de la Flussbau AG SAH.

Riassunto

Nell'ambito di uno studio di ricerca al Laboratorio di idraulica, idrologia e glaciologia (VAW) del Politecnico federale di Zurigo è stata esaminata la stabilità delle rampe in pietrame sciolto tramite delle prove su modello. Tramite rilievi sul terreno effettuati dall'Eawag è stata inoltre testata l'effettiva libera migrazione dei pesci per questo tipo di rampe. Su incarico dell'Ufficio Federale dell'Ambiente (UFAM) è stata allestita una linea guida per il dimensionamento delle rampe in pietrame sciolto. Il presente articolo ne riassume le parti più importanti; la realizzazione pratica è presentata nell'articolo successivo, redatto dalla Flussbau AG SAH.

1. Einleitung

In den schweizerischen Fliessgewässsern finden sich etwa 100 000 Absturzbauwerke mit einer Höhendifferenz grösser als 0.5 m zur Stabilisierung der Flusssohle (*Zeh Weissman et al.* 2009). Für die meisten Fischarten stellt diese Höhendifferenz eine Wanderbarriere dar, was zu einer starken Fragmentierung der Habitate und zu einer deutlich verarmten Fischfauna führt (*Werth et al.* 2011, *Alp et al.* 2011). Zusätzlich sind die ökologischen Anforderungen an flussbauliche Massnahmen in den letzten Jahrzehnten immer wichtiger geworden; sie sind mit der Revision des schweizerischen Gewässerschutzgesetzes von 2011 nun zum Teil auch gesetzlich verankert. Ein wichtiges Ziel zur Verbesserung der Gewässerqualität ist die Entfernung von Wanderhindernissen und die Verbesserung der Vernetzung der Habitate entlang der Flüsse. In dieser Hinsicht spielen Blockrampen und speziell aufgelöste unstrukturierte Blockrampen (UBR) eine wichtige Rolle und werden vermehrt als eine Alternative zu Absturzbauwerken zur Sohlensicherung eingesetzt, die unter bestimmten Voraussetzungen eine deutlich verbesserte Fischdurchgängigkeit gewährleisten. In jüngerer Vergangenheit wurden bereits etliche Abstürze durch Blockrampen ersetzt, weitere sind in Planung. Leider zeigt sich an einigen Beispielen, dass solche Rampen aufgrund ungenügender Dimensionierungsgrundlagen bereits bei Belastungen unterhalb des Bemessungsabflusses versagten (*Bezzola* und *Hegg* 2008) oder die massgebenden Zielfischarten nicht in der Lage sind, das Bauwerk zu überwinden (*Weibel* und *Peter* 2012).

Bei der Dimensionierung von UBR müssen somit zwei übergeordnete Kriterien beachtet werden, und zwar 1.) Stabilität gegen Versagen; und 2.) Fischdurchgängigkeit. In den letzten 25 Jahren wurden an der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) der ETH Zürich diverse physikalische Modellversuche zu verschiedenen Blockrampentypen speziell im Hinblick auf deren Verhalten im Hochwasserfall durchgeführt. Die bis 2006 gesammelten Erfahrungen wurden in VAW (2007) publiziert. Zum Verhalten und zu den Dimensionierungsgrundlagen der verschiedenen Blockrampentypen gibt es eine breite Palette an Fachliteratur. Eine ausführliche Literaturübersicht ist in *Tamagni* (2013) zu finden. Hervorzuheben sind in diesem Zusammenhang zwei Veröffentlichungen, bei denen die verschiedenen Blockrampentypen zusammenfassend beschrieben werden: *Hunziker, Zarn* und *Partner* (2008) und *DWA* (2009). Speziell im Hinblick auf UBR sind diese Publikationen jedoch nicht ausreichend für eine Dimensionierung.

Mit dem Ziel, durch den Einsatz von UBR im Hochwasserfall einen wirksamen Schutz gegen Sohlenerosion und gleichzeitig möglichst gute ökologische Bedingungen zu erreichen, wurde ein Forschungsprojekt an der (VAW) der ETH Zürich durchgeführt (*Tamagni* 2013). Mit Hilfe dieser Arbeit wurde im Auftrag des Bundesamts für Umwelt (BAFU) eine Praxisanleitung zur Dimensionierung von UBR (*VAW* 2017) verfasst. In einem ersten Teil der Praxisanleitung (*Tamagni et al.* 2017) werden die dimensionierungsrelevanten Ergebnisse zu UBR zusammengestellt, und in einem zweiten Teil (*Hunzinger* und *Opferkuch*, 2017a) wird auf die bauliche Ausführung von UBR eingegangen. *Hunzinger* und *Opferkuch* (2017b) und der vorliegende Artikel sind jeweils eine Kurzfassung davon.

2. Konzept der aufgelösten unstrukturierten Blockrampen (UBR)

Die grundlegende Idee von UBR ist einerseits eine optimierte Energieumwandlung durch isolierte Rauheitselemente zur Stabilisierung der Sohle, die andererseits zu einer möglichst grossen Variabilität von Fliessgeschwindigkeiten und Wassertiefen zur Verbesserung des Fischaufstiegs *führt* (*Tamagni et al.* 2014). Im hydraulischen Überlastfall kann sich eine UBR dem Strömungsverhalten durch eine Abflachung in Längsrichtung anpassen, was einem gutmütigen Verhalten entspricht.

Die einzelnen Rauheitselemente bzw. die Blöcke einer UBR werden isoliert und zufällig über die gesamte Rampenfläche verteilt, so dass kein Kontakt zwischen den Blöcken besteht und kein geometrisches Muster erkennbar ist *(Bild 1)*. Die Blöcke sind dabei mit einer bestimmten Belegungsdichte λ (Anteil der mit Blöcken belegten Fläche im Verhältnis zur gesamten Rampenfläche) direkt auf das bestehende Sohlenmaterial gesetzt und teils eingeschüttet; sie bilden keine starre Struktur. UBR können im Wesentlichen durch den Blockdurchmesser D, die Belegungsdichte λ und die charakteristischen Korndurchmesser d_m und d_{90} des Untergrundmaterials charakterisiert werden *(Bild 2)*.

Mit UBR sollen die folgenden Ziele erreicht werden: 1.) Wirkung als Höhenfixpunkt und Überwindung eines Sohlenversatzes, 2.) Sicherung der Flusssohle gegen Erosion, und 3.) Ermöglichung der Fischwanderung. Eine UBR muss demnach die Sohle stabilisieren, sich gleichzeitig im Überlastfall gutmütig verhalten (Kap. 3.1) und in einem gewissen Abflussbereich (Kap. 3.2) ökologisch wirksam sein. Die Verwendung einer UBR für gegebene Verhältnisse hängt im Wesentlichen von folgenden Kriterien ab (*Tamagni et al.* 2017):

- Verhältnis zwischen dem Blockdurchmesser und dem charakteristischen Korndurchmesser des Untergrundmaterials D/d_{90} (Kap. 3.1.1);
- Mittleres Sohlengefälle in Längsrichtung nach Dauerbelastung J_G (Kap. 3.1.2);
- Fischdurchgängigkeit während ca. 300 Tagen im Jahr (Kap. 3.2).

Bild 1. Aufgelöste unstrukturierte Blockrampe (UBR) an der Wyna (Kanton AG) mit einem spezifischen Abfluss $q \approx 0.03\ m^3/(sm)$, entspricht in etwa einem Niederwasserabfluss Q_{329} (Blick in Fliessrichtung).

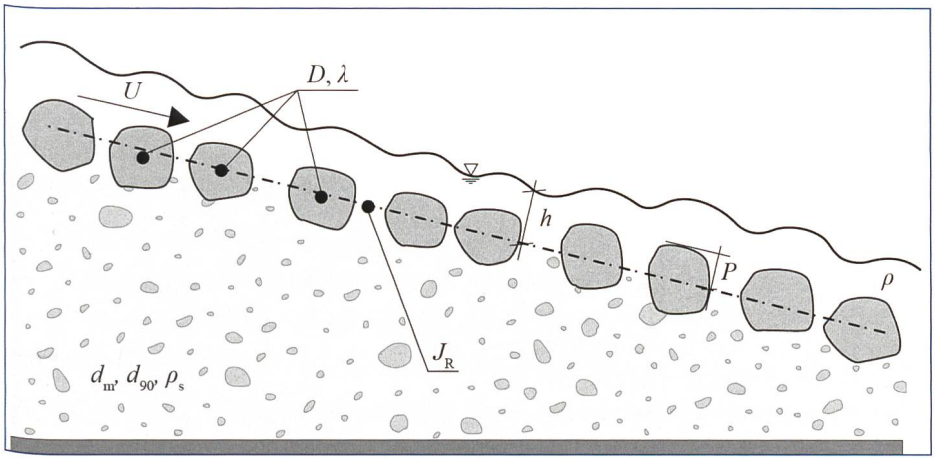

Bild 2. Schematischer Längsschnitt durch eine UBR mit den massgebenden Parametern.

Je nach hydraulischer Belastung treten unterschiedliche Prozesse und Zustände auf, die je nach Zielsetzung als Versagen einer UBR zu definieren sind:

- Abflachung der Rampe unter einen bestimmten Grenzwert. Bei stabilen Unterwasserverhältnissen führen Erosionsprozesse auf der Rampe zu einer Rotation um den Rampenfuss (s. dominierender Prozess des Einsinkens, Kap. 3.1.1). Wird ein bestimmtes Sohlengefälle unterschritten, geht die Fixpunktwirkung im Oberwasser verloren und es kann zu einer Destabilisierung der Ufersicherung kommen.
- Abgleiten der Blöcke. Kommt es im Überlastfall auf der Rampe zu einem Abgleiten der Blöcke, geschieht dies meist flächenhaft und abrupt. Ein schlagartiges, nicht gutmütiges Versagen ist die Folge (s. dominierender Prozess des Abgleitens, Kap. 3.1.1), bei der die Rampe ihre sohlenstabilisierende Wirkung verliert.
- Fehlen von Wanderkorridoren. Falls die Rampenkonfiguration als Kombination der Blockanordnung mit den entsprechenden Abflüssen keine geeigneten Wanderkorridore für den Fischaufstieg bietet, erfüllt die UBR die ökologischen Anforderungen nicht; damit versagt das Konzept.

3. Dimensionierungsgrundlagen

3.1 Stabilität gegen Erosion

Die Rampenstabilität muss bis zu einem definierten Dimensionierungsabfluss gewährleistet sein. Bei grösseren Abflüssen werden allmähliche Abflachungen und daraus entstehende Schäden in Kauf genommen. In vielen Fällen entspricht der Dimensionierungsabfluss einem hundertjährlichen Hochwasser HQ_{100}. Die Rampenstabilität wurde von *Weitbrecht et al.* (2016) ausführlich diskutiert; im Folgenden werden die zwei massgebenden Aspekte zur Stabilität von UBR betrachtet.

3.1.1 Wahl der erforderlichen Blockgrösse

Vereinfacht lassen sich UBR als ein System mit einer bimodalen Sedimentmischung betrachten. Bimodale Mischungen wurden durch *Raudkivi* und *Ettema* (1982) experimentell untersucht, wobei eine Schicht von gröberen Körnern (Blöcken) mit Durchmesser D, platziert auf einer Schicht von feineren Körnern mit Durchmesser d, betrachtet wurde. Um diese Ergebnisse auf UBR zu übertragen, bei denen das Untergrundmaterial eine breite Kornverteilung besitzt, wird $d = d_{90}$ der Unterschicht gesetzt: zwischen den Blöcken bildet sich eine Deckschicht aus, die Stabilität und Kornrauheit wird durch das Verhalten der grossen Kornfraktionen der Unterschicht dominiert. *Raudkivi* und *Ettema* (1982) beobachteten zwei dominierende Prozesse bzw. Versagensmechanismen:

- Einsinken der Blöcke für $D/d_{90} \geq 17$
  Die Blöcke bleiben zwar an Ort und Stelle, sinken jedoch nach und nach in das Untergrundmaterial ein. Im Lauf dieses Prozesses verkleinert sich der exponierte Teil der Blöcke *P (Bild 2)* und somit auch der Fliesswiderstand der Rampe. Die Belastung des Untergrundmaterials wird grösser, wodurch das Sohlengefälle kleiner wird. Dieser Prozess erfolgt meist langsam und graduell.
- Abgleiten der Blöcke für $1 \leq D/d_{90} \leq 6$
  Die Blöcke werden über die Deckschicht des Untergrundmaterials rollend oder gleitend abtransportiert. Der resultierende Blockverlust auf der Rampe führt zu einer Verminderung der Belegungsdichte und somit des Fliesswiderstands der Rampe. Dieser Prozess erfolgt meist schlagartig. Sobald der kritische Widerstand der Blöcke überschritten wird, werden viele Blöcke in Bewegung gesetzt, was im Weiteren zu einer schnellen Erosion des Untergrundmaterials führt. Dieses rasche Versagen bei Abflüssen grösser als das Dimensionierungsereignis sollte unbedingt vermieden werden. Ausnahme: Falls jedoch die Stabilität des Einzelblocks gegen direkte Erosion bei einem Dimensionierungsabfluss und auch im Überlastfall gegeben ist, ist das Verhältnis $D/d_{90} \leq 6$ durchaus einsetzbar.

Daraus folgt ein erstes Stabilitätskriterium: UBR sollten mit einem Verhältnis von $6 < D/d_{90} < 17$ dimensioniert werden. Wenn die bestehenden Randbedingungen (vorhandenes Sohlenmaterial, maximal möglicher Blockdurchmesser) ein D/d_{90} nur ausserhalb von $6 < D/d_{90} < 17$ zulassen, sollte der Bau einer UBR infrage gestellt werden. In Ausnahmefällen empfiehlt sich zur Einhaltung dieses Dimensionierungskriteriums der Einbau einer Filterschicht als Untergrundmaterial.

Die durchgeführten Modellversuche (*Tamagni* 2013) haben gezeigt, dass für die grösste Stabilität respektive das grösste Sohlengefälle bei gleichzeitig gutmütigem Versagensverhalten D/d_{90} im Bereich von $6.5 < D/d_{90} < 7.4$ liegen sollte. Bei grösserem D/d_{90} (z.B. 12) passt sich die Rampe zwar auch der zunehmenden Belastung allmählich an, weist aber bei gleicher Belastung im Vergleich mit einem kleineren D/d_{90} eine geringere Stabilität auf, was im Überlastfall zu einer grösseren Abflachung der Sohle führt. Bei Versuchen mit $D/d_{90} = 5$ sowie mit $D/d_{90} = 18$ haben sich die Ergebnisse nach *Raudkivi* und *Ettema* (1982) bestätigt, indem ein schlagartiges Abgleiten der Blöcke bzw. ein Einsinken beobachtet wurde. Bei der Dimensionierung ist somit die Wahl der Blöcke bzw. ein geeignetes Verhältnis D/d_{90} sehr wichtig. Der maximal ausführbare Blockdurchmesser (< 2 m oder < 5–6 t) sowie das vorhandene Untergrundmaterial können somit einen limitierenden Faktor darstellen.

3.1.2 Maximales Sohlengefälle

Ein zweites Stabilitätskriterium für UBR betrifft die Beziehung zwischen dem Sohlengefälle im Grenzzustand J_G und einem bestimmten Dimensionierungsabfluss bzw. dem spezifischen Abfluss $q = Q/B$, mit Q = Abfluss [m³/s] und B = Querschnittsbreite [m]. Im Allgemeinen gibt es kein absolutes

Maximum für das Sohlengefälle von UBR, sondern jeweils ein maximales Gefälle für einen bestimmten spezifischen Abfluss q. Die Erfahrungen im alpinen und voralpinen Raum haben jedoch gezeigt, dass UBR bis zu einem Gefälle von maximal ca. 3 % gebaut werden können, um eine gewisse hydraulische Belastung unbeschadet mit leichter Anpassung des Sohlengefälles zu überstehen. In steilen Wildbächen können UBR im Allgemeinen nicht eingesetzt werden. Die gängige Dimensionierungsgrundlage für UBR ist das Blockmodell nach *Whittaker et al.* (1988). Die Anwendungsbereiche des Blockmodells sind auf eine Belegungsdichte $n\,D^2 < 0.15$ begrenzt (mit n = Anzahl der Blöcke pro m² und D = äquivalenter Kugeldurchmesser der Blöcke), was in der Praxis aus Stabilitätsgründen oft überschritten werden muss. Zusätzlich wurde gezeigt, dass die Rampenstabilität mit *Whittaker et al.* (1988) für flachere Sohlengefälle eher unterschätzt und für steilere Gefälle eher überschätzt wird (*Janisch et al.* 2007). Mit den Ergebnissen aus *Tamagni* (2013) wurde eine Beziehung zwischen dem Gleichgewichtsgefälle J_G und dem dimensionslosen spezifischen Abfluss q_d^* ermittelt:

$$J_G = \frac{11}{q_d^* + 200} \qquad \text{für } q_d^* < 1700 \qquad (1)$$

mit

$$q_d^* = \frac{q}{\sqrt{g(s-1)D^3}}\,\lambda^{-1}\left(\frac{D}{d_{90}}\right)^2. \qquad (2)$$

Hierbei ist g = Erdbeschleunigung und $s = \rho_S/\rho$, mit ρ_S = Sedimentdichte und ρ = Dichte des Wassers. Das Gleichgewichtsgefälle J_G entspricht dem Gefälle, das sich für einen gegebenen Abfluss ohne Sedimentzufuhr langfristig einstellt. Dieser Zustand wurde in den Modellversuchen nach sehr langer Belastung mit konstantem Abfluss erreicht. J_G stellt somit für ein bestimmtes q ein minimales Gefälle dar, der Ansatz kann somit als konservativ betrachtet werden. Die hier vorgestellten Ansätze gelten streng genommen nur in dem Parameterraum, der durch die vorliegenden Versuche abgedeckt ist. Von einer Extrapolation der Ergebnisse auf einen erweiterten Parameterraum ist abzuraten. Gl. (1) gilt für $4.9 \le D/d_{90} \le 18.6$, $\lambda = 15$–$25\,\%$ und $q_d^* < 1700$. Zusätzliche Versuche mit Sedimentzugabe ergaben ein rund 10 % höheres Gleichgewichtsgefälle (*Tamagni* 2013).

Für den oben genannten Anwendungsbereich wurde eine Beziehung zur Bestimmung der relativen Überdeckung h_m/D (mit h_m = mittlere Abflusstiefe) in Abhängigkeit eines leicht modifizierten dimensionslosen spezifischen Abflusses q_d^{**} ermittelt.

$$h_m/D = 0.69\,q_d^{**0.64} \qquad \text{für } q_d^{**} < 10 \qquad (3)$$

mit

$$q_d^{**} = \frac{q}{\sqrt{g(s-1)D^3}}\,\lambda^{-0.2}\left(\frac{D}{d_{90}}\right)^{0.5}. \qquad (4)$$

Wichtig: Dieser Ansatz gilt nur für den Grenzzustand, der sich nach langer Belastung mit einem bestimmten Abfluss einstellen würde, also immer nur für ein bestimmtes Sohlengefälle. Wenn dieser Grenzzustand nicht gegeben ist, muss zur Bestimmung der Abflusstiefe auf andere Widerstandsformeln zurückgegriffen werden, z.B. auf den von *Tamagni* (2013) für UBR angepassten Ansatz von *Pagliara* und *Chiavaccini* (2006).

Zur qualitativen Betrachtung der Stabilität von UBR im Vergleich zu anderen Blockrampentypen sind in *Bild 3* die Beziehungen zwischen dem Sohlenge-

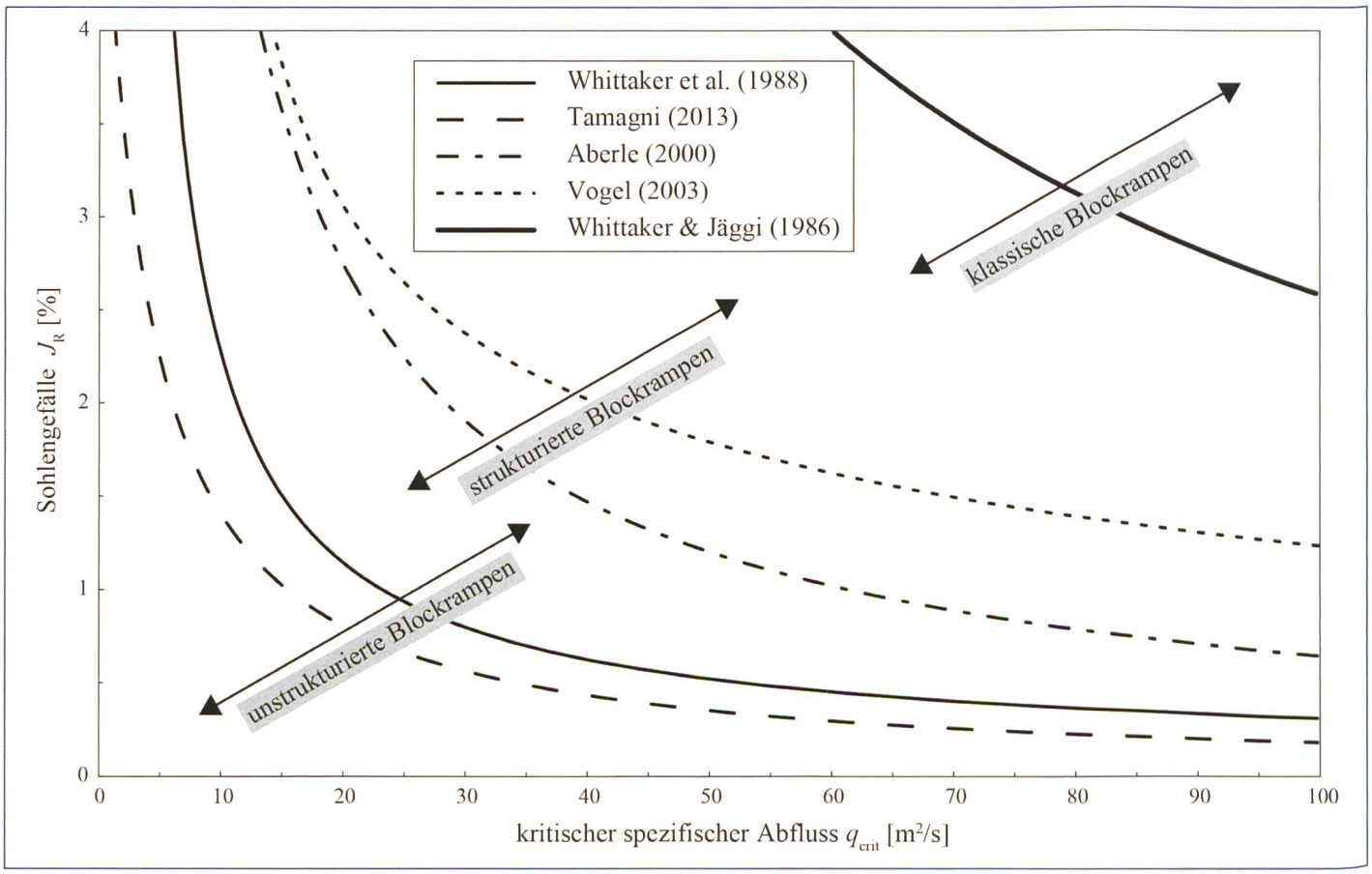

Bild 3. Sohlengefälle auf der Rampe J_R [%] in Abhängigkeit des kritischen spezifischen Abflusses q_{crit} [m²/s] für unterschiedliche Blockrampentypen bzw. Ansätze mit konstantem Blockdurchmesser D = 1.3 m (λ = 0.15 für Tamagni (2013) und λ = 0.67 für Vogel (2003), wobei λ = 0.67 der minimal untersuchten Belegungsdichte entspricht).

fälle J_R einer Rampe und dem kritischen spezifischen Abfluss q_{crit} für unterschiedliche Ansätze dargestellt. Berücksichtigt wurden zwei Ansätze für UBR (*Whittaker et al.* 1988 und *Tamagni* 2013), ein Ansatz für natürliche Absturz-Becken-Sequenzen (*Aberle* 2000), einer für strukturierte Blockrampen (*Vogel* 2003) und einer für klassische Blockrampen (*Whittaker* und *Jäggi* 1986). Bei allen Ansätzen wurden dieselben Block- und Sedimenteigenschaften angenommen. Aus dieser Darstellung ist klar ersichtlich, dass klassische Blockrampen im Vergleich zu strukturierten bzw. unstrukturierten Blockrampen auch bei deutlich höherem Gefälle stabil bleiben.

3.2 Ökologische Kriterien

Eine wichtige Voraussetzung für den Fischaufstieg möglichst vieler verschiedenen Arten und deren Altersstadien ist eine grosse strukturelle und damit hydraulische Variabilität des Bauwerks. Diese Vorgaben begrenzen die Anwendbarkeit von UBR und müssen deshalb frühzeitig während der Planung in Zusammenarbeit mit Fischökologen geprüft werden.

UBR müssen, ähnlich wie andere Bauwerke, innerhalb eines bestimmten Abflussbereichs ökologisch wirksam sein, der vom Abflussregime abhängig ist (*DWA* 2009). In der Schweiz wird üblicherweise angenommen, dass die ökologische Wirksamkeit während mindestens 300 Tagen im Jahr gewährleistet sein soll, und zwar zwischen dem Abfluss Q_{347} (= Abfluss, der statistisch gesehen an 347 Tagen im Jahr erreicht oder überschritten wird) und Q_{36} (analog zu Q_{347}). Eine UBR ist dann optimal ökologisch wirksam, wenn für alle Fische, die im betrachteten Fluss leben, während mindestens 300 Tagen im Jahr Wanderkorridore zur Verfügung stehen. Ein Wanderkorridor muss grundsätzlich zwei Anforderungen erfüllen:

- Die herrschenden Fliessgeschwindigkeiten müssen der Schwimmleistung der betrachteten Fische entsprechen, d.h., der schwimmschwächste Fisch ist massgebend. Die kritische Schwimmgeschwindigkeit U_{crit} (Kap. 3.2.1) des schwimmschwächsten Fischs darf während ca. 300 Tagen im Jahr nicht überschritten werden; es ist zumindest ein durchgehender Wanderkorridor mit $u < U_{crit}$ zu finden.
- Die Abflusstiefen müssen für die Körpergrössen der betrachteten Fische ausreichend sein, d.h., der grösste Fisch ist massgebend. Der grösste Fisch bestimmt mit seiner Körperhöhe $H_{Fisch,max}$ die minimale erforderliche Wassertiefe h_{min}, die zumindest in einem Wanderkorridor während ca. 300 Tagen im Jahr nicht unterschritten werden darf, d.h. $h > h_{min}$.

Tabellen mit den charakteristischen Grössen und Schwimmgeschwindigkeiten für Fische sind z.B. in *DWA* (2005), *DWA* (2009) oder *Tamagni* (2013) zu finden. Auf eine detailliertere Beschreibung der Schwimmleistung, der speziellen Eigenschaften hinsichtlich des Wanderverhaltens und der Anforderungen an die Habitatbedingungen einzelner Fischarten wird hier verzichtet. Generell wird eine Abklärung mit Experten vor Ort (Fischbiologen oder -ökologen) während der Dimensionierungsphase sehr empfohlen, um die spezifischen Gegebenheiten und Charakteristika des betrachteten Flussabschnitts mit in die Planung aufzunehmen. Zusätzlich sollten bestimmte Grenzwerte für die spezifische Leistungsdichte nicht überschritten werden (s. u.a. *DWA* 2010 und Kap. 3.2.2).

3.2.1 Schwimmgeschwindigkeit und Ausdauer der Fische

Die Schwimmgeschwindigkeit, Wanderdistanz und die Zeit bis zur Ermüdung sind fischartspezifisch und stark von der Körperlänge L_{Fisch} und der Muskulatur sowie von mehreren Umweltfaktoren abhängig (*Adam* und *Lehmann* 2011). Die unterschiedlichen Schwimmgeschwindigkeiten sind wie folgt definiert (u.a. *Pavlov* 1989, *Hammer* 1995, *Pavlov et al.* 2000):

- Die Dauergeschwindigkeit U_{Dauer} kann für lange Zeiten (>> 200 min) als aerobe Bewegung eingehalten werden, ohne dass die Energiereserven ausgeschöpft werden.
- Die gesteigerte Geschwindigkeit $U_{gesteigert}$ kann zwischen 20 s und 200 min eingehalten werden, ist stark von der Fischart abhängig und kann zur Erschöpfung führen.
- Die Sprintgeschwindigkeit U_{Sprint} kann nur für kurze Zeiten bis ca. 15–20 s eingehalten werden. Sie entspricht einer sehr schnellen anaeroben Bewegung und führt zur Erschöpfung. Diese Schwimmgeschwindigkeit kommt nur in aussergewöhnlichen Situationen vor, wie z.B. zur Überwindung eines Hindernisses oder auf der Flucht.

In der Literatur können mehrere nichtdimensionsreine Beziehungen zwischen Schwimmgeschwindigkeit und Körperlänge gefunden werden (z.B. *Pavlov* 1989, *Adam* und *Lehmann* 2011). Die kritische Geschwindigkeit U_{crit} ist definiert als die Geschwindigkeit, die nicht überschritten werden darf, um eine sichere Überwindung von Hindernissen zu gewährleisten. Sie sollte von der gesteigerten Geschwindigkeit $U_{gesteigert}$ als $U_{crit} \approx U_{gesteigert} L_{Fisch}$ [m/s] und nicht von U_{Sprint} (*DWA* 2009) abgeleitet werden. Die kritische Geschwindigkeit ist massgebend für die Bestimmung der Wandermöglichkeiten auf der betrachteten UBR (s. Fliessgeschwindigkeitsmessungen mit Hilfe der Laser-Doppler-Anemometrie in *Tamagni* 2013).

3.2.2 Spezifische Leistungsdichte und Fliessgewässerregion

Die spezifische Leistungsdichte ist definiert als die hydraulische Leistung, die in ein betrachtetes spezifisches Wasservolumen eingetragen wird. Diese Leistung ist entlang eines Flussbauwerks als Turbulenz der Strömung wahrnehmbar (*DWA* 2010). Je nach Bauwerkstyp und herrschenden hydraulischen Bedingungen wird diese Leistung entlang dem Flussbauwerks mehr oder weniger stark abgebaut. Für UBR ist die spezifische Leistungsdichte P_D [W/m³] definiert zu (*DWA* 2010).

$$P_D = \rho g U J_R, \qquad (5)$$

wobei U = mittlere Fliessgeschwindigkeit auf der UBR und J_R = Rampengefälle.

Wenn die spezifische Leistungsdichte P_D zu hoch ist, kann die Fischwanderung beeinträchtigt oder gar verhindert werden. P_D kann als Mass der Turbulenz betrachtet werden und wird bei zu grossen Werten von den Fischen als natürliche Barriere wahrgenommen. P_D darf deswegen bestimmte Grenzwerte während des oben genannten Abflussbereichs (zwischen Q_{36} und Q_{347}) nicht überschreiten. *Tabelle 1* zeigt die Grenzwerte für die spezifische Leistungsdichte (adaptiert nach *DWA*

Fliessgewässerregion	*spezifische Leistungsdichte P_D*
Forellenregion	*275 W/m³*
Äschenregion	*250 W/m³*
Barbenregion	*200 W/m³*
Brachsenregion	*175 W/m³*

Tabelle 1. Grenzwerte der spezifischen Leistungsdichte P_D für UBR, abhängig von der Fliessgewässerregion (DWA 2010, adaptiert).

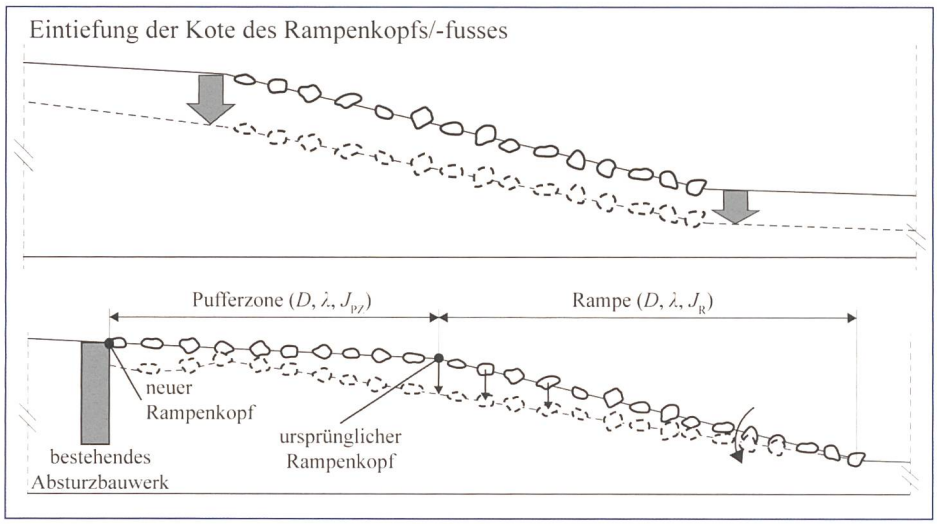

Bild 4. Wichtige Prozesse zur Betrachtung des Systems «Rampe+Fluss», die im Dimensionierungskonzept einer UBR zu berücksichtigen sind. Oben: Eintiefung der Kote des Rampenkopfs/-fusses. Unten: Prinzipskizze der Funktion der Pufferzone (der gezeigte neue Rampenkopf entspricht der Situation nach der vollständigen Inanspruchnahme der Pufferzone).

2010) in Abhängigkeit der Fliessgewässerregion. *Huet* (1949) und *Müller* (1950) unterteilen die Fliessgewässer von der Quelle bis zur Mündung in vier typische Fliessgewässerregionen, die von einer charakteristischen Artengemeinschaft besiedelt werden: Forellen-, Äschen-, Barben- und Brachsenregion. Diese Unterteilung wird oft als Grundlage für die Dimensionierung der fischpassierbaren Anlagen verwendet. Oft sind die massgebenden Grenzwerte für die Dimensionierung (h_{min}, U_{crit} und P_D) in der Literatur in Abhängigkeit dieser Regionen angegeben. Zusätzliche Informationen darüber sind u. a. in *DWA* (2010) oder in *Schager* und *Peter* (2004) zu finden. Für UBR ist vor allem die Forellenregion von Interesse, da in den anderen Fliessgewässerregionen flachere Verhältnisse typisch sind. Charakteristische in der Schweiz bzw. in der Forellenregion vorkommende Fischarten (*Schager* und *Peter*, 2004) sind die Bachforelle *(Salmo trutta fario)*, die Groppe *(Cottus gobio)*, das Bachneunauge *(Lampetra planeri)*, die Schmerle *(Barbatula barbatula)* und die Elritze *(Phoxinus phoxinus)*.

3.3 Einbindung in das Flusssystem

Neben den Prozessen, die sich auf der Rampe selbst abspielen, müssen die Auswirkungen einer UBR auf die Flussabschnitte ober- und unterhalb der Rampe berücksichtigt werden. Die physikalischen Modellversuche (*Tamagni* 2013) spiegeln den idealisierten Fall einer UBR in einer geraden Fliessstrecke wider. Es ist deswegen sehr wichtig, dass Abweichungen in der Natur von diesem idealisierten Fall und die daraus folgenden möglichen Auswirkungen analysiert und in die Planung aufgenommen werden. Im Folgenden sind drei solcher Aspekte kurz erläutert; andere Aspekte werden in der Praxisanleitung (*VAW* 2017) betrachtet.

3.3.1 Auswirkung auf Geschiebebilanz

Der Bau einer UBR innerhalb eines Flussabschnitts hat keine ausgeprägte Auswirkung auf die Sedimentbilanz ober- und unterhalb der Rampe. Eine UBR ist immer steiler als der Flussabschnitt, in dem sie gebaut wird, und weist dementsprechend eine höhere Transportkapazität auf. Von oben ankommendes Sediment wird somit fast immer durchtransportiert. Lokal können temporär sowohl Erosionen als auch Ablagerungen resultieren. Im Bereich der Pufferzone (PZ, Kap. 3.3.3) kann es lokal zu Auflandungen kommen, da die Transportkapazität in diesem vergleichsweise flachen Abschnitt durch das Einbringen der Blöcke herabgesetzt wird. Gemessen an der Gesamtsedimentbilanz, ist dieser Einfluss auf den unterliegenden Flussabschnitt jedoch meist vernachlässigbar. Wird ein Absturzbauwerk durch eine UBR ersetzt, ist in erster Näherung davon auszugehen, dass der geplante Rampenkopf auf der gleichen Höhenlage wie das ursprüngliche Absturzbauwerk liegt. Damit bleiben das Sohlengefälle oberhalb der Rampe und der Sedimenttransport unbeeinflusst.

3.3.2 Entwurfsüberlegungen zum Rampenkopf und -fuss

Mit dem Bau einer UBR wird lokal eine rauere Strecke mit grösserem Fliesswiderstand erstellt, was zu Übergängen zwischen der «normalen» Flusssohle und der rauen Rampe führt. Bei diesen Übergängen sollte die konstruktive Ausführung besonders beachtet werden, um unerwünschte lokale Effekte (z. B. Eintiefungen) zu vermeiden. Eine Eintiefung des Rampenkopfs (*Bild 4*, oben) beeinflusst die Strecke flussaufwärts der Rampe und führt zu einem Verlust der Fixpunktwirkung und somit zu einer Änderung der Sohlenlagen im Oberwasser. Eine Eintiefung der Kote des Rampenfusses (*Bild 4*, oben) beeinflusst direkt das Sohlengefälle, was wiederum zu einer Änderung der Rampenkopflage und somit zu dem zuvor erwähnten Effekt führt. In beiden Fällen ändert sich das Längenprofil der Flussstrecke, was zu Problemen mit an die Rampe anschliessenden Bauwerken (z. B. Absturzbauwerk, Uferschutz) führen kann.

3.3.3 Pufferzone und Anschluss an ein bestehendes Bauwerk

UBR sind im Regelfall so dimensioniert, dass sie sich während Abflussereignissen über dem Dimensionierungsabfluss den Belastungen anpassen. Deswegen wird das Einbaugefälle oft etwas grösser gewählt als das Grenzgegefälle für den Dimensionierungsabfluss. Durch den Erosionsprozess verschiebt sich der Rampenkopf flussaufwärts in den Bereich, der nicht durch Blöcke geschützt ist. Um dort eine erhöhte Erosion zu vermeiden, kann eine Pufferzone vorgesehen werden, die ebenfalls mit Blöcken belegt ist (*Bezzola et al.* 2005, *Janisch et al.* 2007). Die Blöcke in der Pufferzone müssen denselben Durchmesser D haben und mit derselben Belegungsdichte λ wie auf der Rampe eingebaut werden, wobei das Einbaugefälle J_{PZ} in der Pufferzone dem Sohlengefälle der Flussstrecke und nicht dem Sohlengefälle auf der Rampe entspricht (*Bild 4*, unten). Auf diese Weise kann sich die Rampe der hydraulischen Belastung durch leichte Erosion anpassen, ohne sofort ihre stabilisierende Wirkung im Oberwasser zu verlieren.

Wird ein bestehendes Absturzbauwerk durch eine UBR ersetzt, wird es in einigen Fällen nicht entfernt, sondern die Rampe wird direkt an das bestehende Bauwerk angeschlossen. Speziell in diesem Fall empfiehlt sich der Einbau einer Pufferzone, so dass ein nahtloser Übergang vom Absturzbauwerk auf die Rampe hergestellt werden kann. Die Gefahr eines Sohlenversatzes unmittelbar flussabwärts des Bauwerks, der zu einem Wanderhindernis werden kann, wird damit verhindert (*Bezzola et al.* 2005). Ein lokaler, in der Tiefe begrenzter Kolk kann sich aber aufgrund

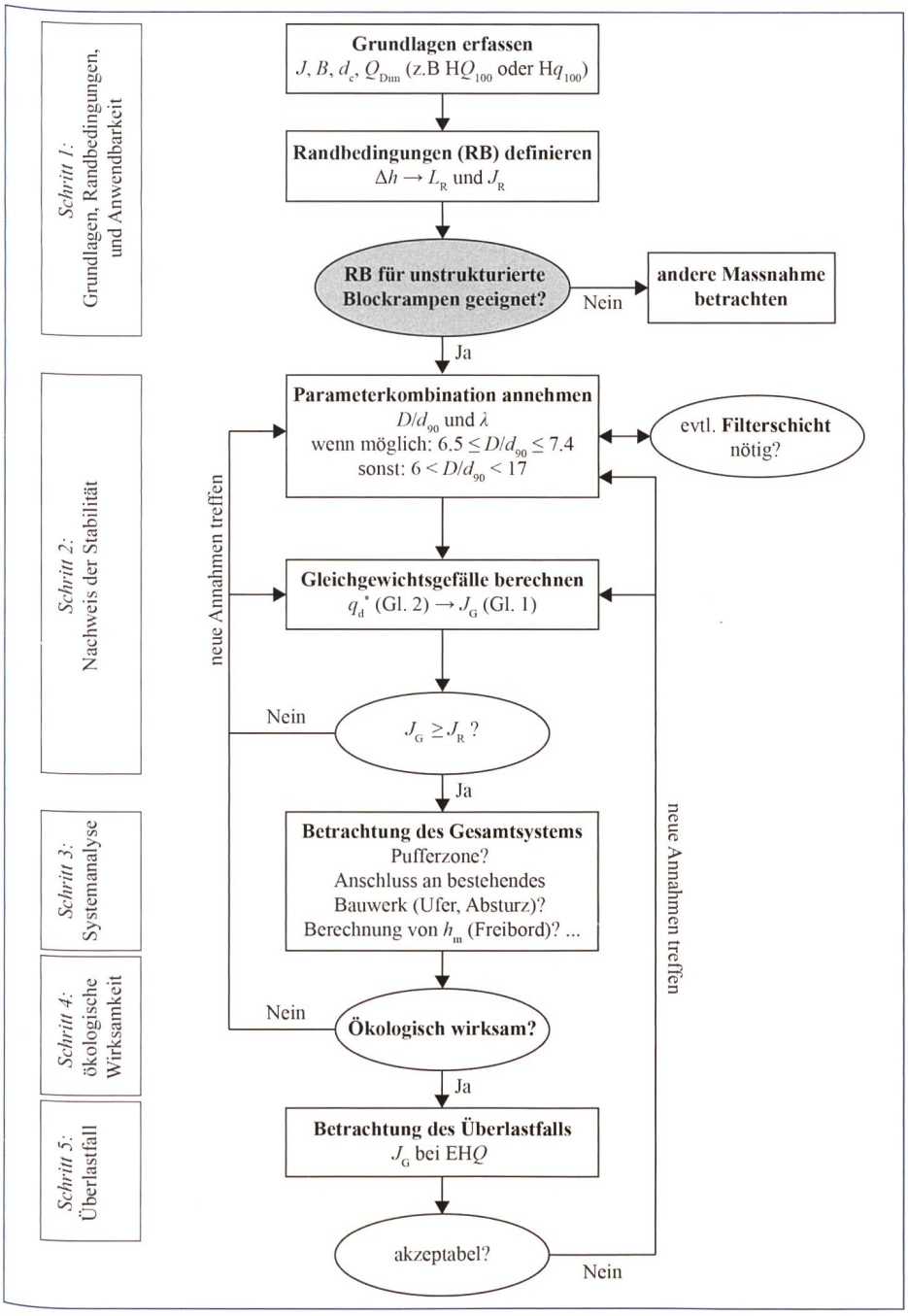

Bild 5. Fliessdiagramm zur Dimensionierung einer aufgelösten unstrukturierten Blockrampe (UBR).

des Übergangs von zwei unterschiedlichen Rauheiten trotzdem bilden (s. angedeuteter Kolk in *Bild 4*, unten). In gewissem Rahmen kann der Kolk sogar positiv sein, indem er Fischen als Ruhezone dient.

4. Dimensionierungskonzept

Im Folgenden wird das Dimensionierungskonzept für eine UBR schrittweise erläutert. Die Schritte sind grafisch in einem Fliessdiagramm *(Bild 5)* dargestellt und können wie folgt zusammengefasst werden:

1. Schritt: Ermittlung der Grundlagen, Festlegen der Randbedingungen und Bestätigung der Anwendbarkeit einer UBR

- Massnahmen- oder Projektziele festlegen
- Grundlagen erfassen: Sohlengefälle J, Flussbreite B, charakteristische Korndurchmesser des Sohlenmaterials d_c ($d_c = d_{90}$, falls Deckschickt vorhanden, sonst $d_c = d_m$), hydrologische Kenngrössen (z. B. HQ_{100} und EHQ)
- Randbedingungen der UBR definieren: Höhendifferenz Δh, die zu überwinden ist, gewünschtes Sohlengefälle auf der Rampe J_R und daraus die Rampenlänge $L_R = \Delta h/J_R$ (oder umgekehrt, falls die Länge vorgegeben ist: $J_R = \Delta h/L_R$), Dimensionierungsabfluss (Q_{Dim})
- Anwendbarkeit prüfen: Ist der Bau einer UBR mit dem gewählten J_R möglich ($J_R \leq J_{max} = 3\,\%$)? Wenn ja, weiter mit Schritt 2, wenn nicht, andere Massnahme zur Stabilisierung der Sohle ausarbeiten

2. Schritt: Nachweis der Stabilität

- Äquivalenten Kugeldurchmesser D annehmen, so dass das Verhältnis D/d_{90} dem gewünschten Rampenverhalten $6.5 < D/d_{90} < 7.4$ (bzw. $6 < D/d_{90} < 17$) entspricht
- Belegungsdichte λ wählen
- Mit der angenommenen Parameterkombination (Q_{Dim}, D/d_{90} und λ) das Sohlengefälle im Gleichgewichtszustand J_G für Q_{Dim} mit den Gln. (1) und (2) abschätzen. Ist J_G gleich oder grösser als J_R? Wenn ja, weiter mit Schritt 3, sonst neue Parameterkombination wählen

3. Schritt: Systemanalyse

- Betrachtung des Gesamtsystems: Welche Besonderheiten gibt es flussaufwärts, flussabwärts und seitlich der Rampe? Linienführung (Krümmung)?
- Mit der angenommenen Parameterkombination (Q_{Dim}, D/d_{90} und λ) die Fliesstiefe h_m bei Dimensionierungsabfluss mit den Gln. (3) und (4) abschätzen. Ist h_m für die betrachtete Flussstrecke tolerierbar? Welches Freibord liegt dann vor? Wenn zulässig, weiter, sonst neue Parameterkombination wählen
- Uferschutz, Pufferzone usw.

4. Schritt: Ökologische Wirksamkeit

- Abschätzung der Fliessgeschwindigkeiten, der Fliesstiefen und der spezifischen Leistungsdichte für Q_{347} und Q_{36}. Sind sie für die Zielfischart/-en tolerierbar?
- Eine Zusammenarbeit mit Biologen und/oder Ökologen wird empfohlen

5. Schritt: Überlastfall

- Abschätzung des Sohlengefälles im Gleichgewichtszustand J_G und der Fliesstiefe h_m für den Überlastfall (z. B. $1.5 \times Q_{Dim}$) mit den Gln. (1), (2), (3) und (4). Was sind die Konsequenzen für das Gesamtsystem (z. B. Anschluss an Uferverbau nach einer zusätzlichen Sohleneintiefung)? Erfüllt die Rampe immer noch die Ziele? Sind J_G und h_m für das betrachtete Projekt tolerierbar? Welche Prozesse sind bei einem Wasseraustritt oberhalb der Rampe zu erwarten? Wenn diese Überlegungen zeigen, dass nicht mit plötzlichem Systemversagen zu rechnen ist, kann die Dimensionierung als abgeschlossen betrachtet werden. Ist dies nicht der Fall, müssen entweder Gegenmassnahmen überlegt werden, oder es muss erneut bei Schritt 3 begonnen werden.

Ein Dimensionierungsbeispiel wird in der Praxisanleitung gezeigt (*Tamagni et al.* 2017).

Danksagung
An dieser Stelle möchten wir uns ganz herzlich bei allen bedanken, die diese Forschungsarbeit ermöglicht, begleitet und dazu wesentlich beigetragen haben, insbesondere bei Dr. *Gian Reto Bezzola* (BAFU), Prof. *S. Pagliara* (Università di Pisa), Dr. *Armin Peter* (vormals Eawag), das technische Team der VAW und den beteiligten Masterstudenten.

Finanzierung
Die Forschungsarbeit sowie die Verfassung der Praxisanleitung wurden vom Bundesamt für Umwelt (BAFU) finanziert.

Literatur

Aberle, J. (2000). Untersuchung der Rauheitsstruktur zur Bestimmung des Fliesswiderstandes in Gebirgsbächen unter Klarwasserabfluss. Mitteilung des Instituts für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik 207, Universität Karlsruhe.

Adam, B., Lehmann, B. (2011). Ethohydraulik: Grundlagen, Methoden und Erkenntnisse. Springer Verlag, Berlin Heidelberg.

Alp, M., Karpati, T., Werth, S., Gostner, W., Scheidegger, C., Peter, A. (2011). Erhaltung und Förderung der Biodiversität von Fliessgewässern. «Wasser Energie Luft» 103(3), 216–223.

Bezzola, G.R., Semadeni, N., Janisch, T. (2005). Rampen und Schwellen – künstliche Schnellen. In VAW-Mitteilung 190, Minor, H.-E., ed., ETH Zürich, 241–254.

Bezzola, G.R., Hegg, C. (2008). Ereignisanalyse Hochwasser 2005, Teil 2 – Analyse von Prozessen, Massnahmen und Gefahrengrundlagen. Umwelt-Wissen Nr. 0825. Bundesamt für Umwelt, BAFU, Eidgenössische Forschungsanstalt WSL, 243–247.

DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (2005). Fischschutz- und Fischabstiegsanlagen – Bemessung, Gestaltung, Funktionskontrolle. 2. Korrigierte Auflage. DWA-Themen WW-8.1, DWA, Hennef.

DWA, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (2009). Naturnahe Sohlengleiten. DWA-Themen WW-1.2–9, DWA, Hennef.

DWA, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (2010). Fischaufstiegsanlagen und fischpassierbare Bauwerke – Gestaltung, Bemessung, Qualitätssicherung. Entwurf. Merkblatt DWA M 509, DWA, Hennef.

Hammer, C. (1995). Fatigue and exercise tests with fish. Comparative Biochemistry and Physiology 112(A), 1–20.

Huet, M. (1949). Aperçu des relations entre la pente et les populations piscicoles des eaux courantes. Revue Suisse d'Hydrologie 11(3/4), 332–351.

Hunziker, Zarn & Partner (2008). Blockrampen Normalien: Manual zur Sanierung von Abstürzen. Projekt Nr. A-300. HZP: Aarau.

Hunzinger, L., Opferkuch, F. (2017a). Aufgelöste unstrukturierte Blockrampen, Ausführung. In: Boes, R., ed., Aufgelöste unstrukturierte Blockrampen – Eine Praxisanleitung. VAW-Mitteilung 240, ETH Zürich.

Hunzinger, L., Opferkuch, F. (2017b). Aufgelöste unstrukturierte Blockrampen, Praxisanleitung zur Ausführung – Kurzfassung. «Wasser Energie Luft» 109(1), 41–44.

Janisch, T., Weichert, R., Bezzola, G.R. (2007). Verhalten aufgelöster unstrukturierter Blockrampen. Wasser Energie Luft 99(2), 146–152.

Müller, K. (1950). Fische und Fischregionen der Fulda. Jahresbericht der limnologischen Flussstation Freudenthal 1, 18–23.

Pagliara, S., Chiavaccini, P. (2006). Flow resistance of rock chutes with protruding boulders. Journal of Hydraulic Engineering 132(6), 545–552.

Pavlov, D.S. (1989). Structures assisting the migrations of non-salmonid fish:USSR. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Fisheries Technical Paper 308, Rome, I.

Pavlov, D.S., Lupandin, A.I., Skorobogatov, M.A. (2000). The effects of flow turbulence on the behavior and distribution of fish. Journal of Ichthyology 40(Suppl. 2), 232–261.

Raudkivi, A.J., Ettema, R. (1982). Stability of armour layers in rivers. Journal of the Hydraulics Division ASCE 108(HY9), 1047–1057.

Schager, E., Peter, A. (2004). Methoden zur Untersuchung und Beurteilung der Fliessgewässer. Fische Stufe F (flächendeckend). Mitteilungen zum Gewässerschutz Nr. 44. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, BUWAL, Bern.

Tamagni, S. (2013). Unstructured block ramps. VAW-Mitteilung 223, Boes, R., ed., ETH Zürich.

Tamagni, S., Weitbrecht, V., Boes, R.M. (2014). Experimental study on the flow characteristics of unstructured block ramps. Journal of Hydraulic Research, 52(5), 600–613.

Tamagni, S., Weitbrecht, V., Boes, R.M. (2017). Aufgelöste unstrukturierte Blockrampen, Dimensionierung. In: Boes, R., ed., Aufgelöste unstrukturierte Blockrampen – Eine Praxisanleitung, VAW-Mitteilung 240, ETH Zürich.

VAW (2007). Blockrampen: Anforderungen und Bauweisen. VAW-Mitteilung 201, Minor, H.-E., ed., ETH Zürich.

VAW (2017). Aufgelöste unstrukturierte Blockrampen – Eine Praxisanleitung. VAW-Mitteilung 240, Boes, R., ed., ETH Zürich.

Vogel, S. (2003). Ansätze zur Bemessung rauer Rampen in aufgelöster Bauweise. Mitteilung des Instituts für Wasserwesen, Heft 88, Universität der Bundeswehr, München.

Weibel, D., Peter, A. (2012). Effectiveness of different types of block ramps for fish upstream movement. Aquatic Science 75(2), 251–260.

Weitbrecht, V., Tamagni, S., Boes, R.M. (2016). Stability of unstructured block ramps. Journal of Hydraulic Engineering, New York, NY, ASCE, DOI: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001259.

Werth, S., Weibel, D., Alp, M., Junker, J., Karpati, T., Peter, A., Scheidegger, C. (2011). Lebensraumverbund Fliessgewässer: Die Bedeutung der Vernetzung. «Wasser Energie Luft» 103(3), 224–234.

Whittaker, J., Jäggi, M. (1986). Blockschwellen. VAW-Mitteilung 91, D. Vischer, ed., ETH Zürich.

Whittaker, J.G., Hickman, W.E., Croad, R.N. (1988). River-bed stabilization with placed blocks. Report 3-88/3, Hydraulics Section, Central Laboratories Works Corporation, Lower Hutt, NZ.

Zeh Weissmann, H., Könitzer, C., Bertiller, A. (2009). Strukturen der Fliessgewässer in der Schweiz. Zustand von Sohle, Ufer und Umland (Ökomorphologie); Ergebnisse der ökomorphologischen Kartierung; Stand: April 2009. Umwelt-Zustand Nr. 0926. Bundesamt für Umwelt (BAFU), Bern.

Anschrift der Verfasser
Dr. *Simona Tamagni*
Ing. Büro Beffa Tognacca GmbH
In Carèe Ventívi 27, CH-6702 Claro
stamagni@fluvial.ch

Dr. *Volker Weitbrecht*, Prof. Dr. *Robert Boes*
Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH Zürich
Hönggerbergring 26, CH-8093 Zürich
weitbrecht@vaw.baug.ethz.ch
boes@vaw.baug.ethz.ch

Praxisanleitung zur Ausführung – Kurzfassung

Lukas Hunzinger, Franziska Opferkuch

Zusammenfassung

Aufgelöste unstrukturierte Blockrampen aus grossen, isolierten Einzelblöcken werden in Hochwasserschutz- und Revitalisierungsprojekten vermehrt als Alternative zu klassischen Absturzbauwerken eingesetzt. Der folgende Artikel befasst sich mit ihrer baulichen Ausführung. Es werden konkrete Hinweise zu Bauablauf und Wasserhaltung gegeben und verschiedene Vorgehensweisen vorgestellt. Anschliessend werden Anforderungen an die Ausschreibung, Qualitätskontrolle, Dokumentation und das Monitoring formuliert.

Résumé

Dans le cadre de projets de protection contre les crues ou de revitalisation, des rampes en enrochement non-structurées composées de blocs isolés sont de plus en plus construites comme alternative aux ouvrages de chute. L'article suivant traite de la réalisation de la construction des rampes en enrochement non-structurées. Dans la première partie, le déroulement des travaux, l'épuisement des eaux ainsi que les différentes options de réalisation sont précisés. Ensuite, les exigences de l'appel d'offres, du contrôle de la qualité, de la documentation et de la surveillance sont définis.

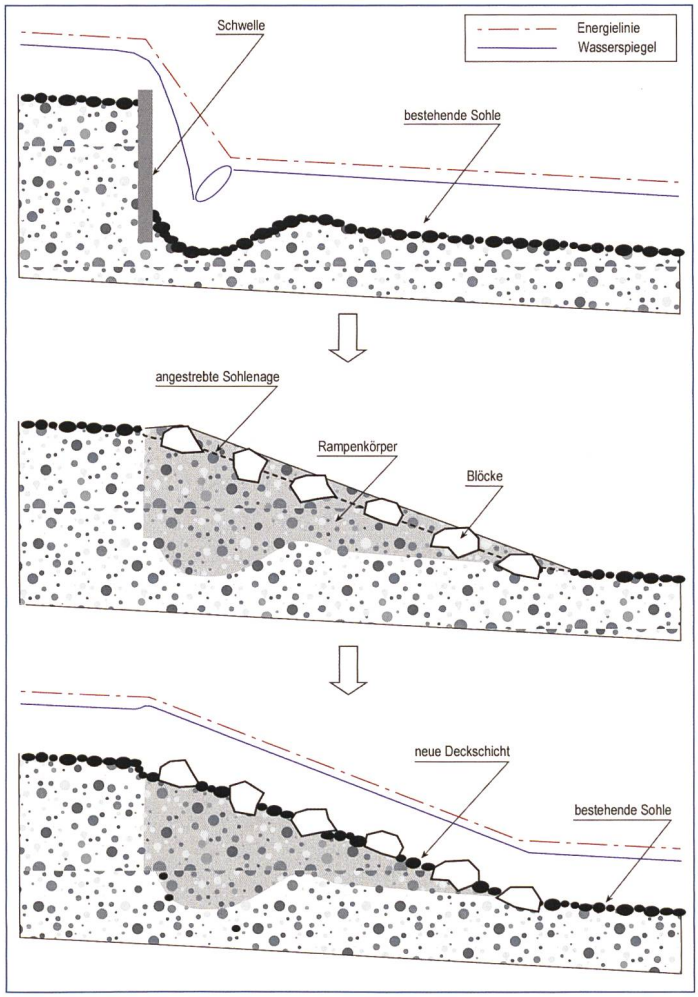

Bild 1. Schematische Darstellung des Anfangszustands (oben), des Zustands nach Ausführung (Mitte) und des Endzustands (unten) einer aufgelösten unstrukturierten Blockrampe.

1. Einleitung

Aufgelöste unstrukturierte Blockrampen bestehen aus grossen, isolierten Einzelblöcken. Sie dienen als Sohlenfixpunkte, garantieren gleichzeitig die Fischdurchgängigkeit und verhalten sich bei Überlast gutmütig. Aufgrund des wirksamen Schutzes gegen Sohlenerosion und der möglichen ökologischen Aufwertung des Gewässers werden aufgelöste unstrukturierte Blockrampen (sowie auch konventionelle Blockrampen) vermehrt als eine Alternative zu klassischen Absturzbauwerken in Hochwasserschutz- und Revitalisierungsprojekten eingesetzt.

Im vorliegenden Artikel wird gezeigt, worauf bei der Bauausführung zu achten ist. Die Ausführungen stützen sich auf Erfahrungen, welche die Autoren in den letzten zehn Jahren mit dem Bau von insgesamt sechs aufgelösten Rampen an den Flüssen Simme, Fildrich und Kander gewonnen haben.

Der Artikel ist eine Kurzfassung der Publikation *Hunzinger & Opferkuch* 2017.

2. Bauablauf

2.1 Schütten des Rampenkörpers

Zu Beginn der Ausführung wird zunächst der Rampenkörper mit Material aufgeschüttet. Dazu wird vorzugsweise Sohlenmaterial des betreffenden Gewässers oder eines Zubringers verwendet. Ist das anstehende Material zu fein für die laut Bemessung erforderliche Blockgrösse, kann das verwendete Material durch Zugabe grober Körner angereichert werden. Wird für die Zugabe gebrochenes Material verwendet, sollte dessen Anteil nicht mehr als 30 % betragen. Die neue Zusammensetzung des Rampenkörpers sollte möglichst einer natürlichen Korngrössenverteilung entsprechen. Weil es jedoch schwierig ist, Material in grossen Mengen zu mischen und damit eine natürliche Korngrössenverteilung zu erreichen, wird empfohlen, eine Anreicherung nur in Ausnahmefällen vorzunehmen.

Nach der Aufschüttung wird der Rampenkörper mit einer Walze oder einem Raupenbagger verdichtet. Die Höhe des Planums wird dabei je nach Vorgehen für das Setzen der Blöcke bestimmt (Kapitel 2.2).

2.2 Versetzen der Blöcke

Nach dem Aufschütten des Rampenkörpers werden im Bereich der Rampe in regelmässigen Abständen Blöcke in die Sohle versetzt. Der Blockdurchmesser und die Belegungsdichte sind durch die Bemessung der Blockrampe vorgegeben und müssen auf die Zusammensetzung des Untergrundmaterials abgestimmt sein (*Tamagni et al.*, 2017).

Es resultiert ein Rampenkörper mit erhöhter Sohlenlage auf der Höhe der Oberkante der Blöcke (*Bild 1*, Mitte). Beim ersten Hochwasserereignis nach Ausführung werden die feinen Sohlenanteile des Untergrundmaterials ausgewaschen, und auf der projektierten Endhöhe entsteht eine neue Deckschicht (*Bild 1*, unten).

Blöcke, welche am Fuss der Rampe zum Schutz gegen Sohlenerosion im Unterwasser gesetzt werden, werden direkt in die Sohle eingegraben. Dasselbe gilt für Blöcke, die im Oberwasser für die Sicherung bei Überlast angeordnet werden (Kapitel 2.3).

Die Rampe kann auf zwei verschiedene Arten aufgebaut werden, die im Folgenden genauer beschrieben werden. Der wichtigste Unterschied ist dabei die Höhe des Planums nach Aufschütten des Rampenkörpers.

Variante 1 – Aufsetzen der Blöcke: Das Planum wird auf der Höhe der angestrebten Sohlenlage erstellt, und die Blöcke der aufgelösten unstrukturierten Blockrampe werden einzeln auf das Planum aufgesetzt. Die Blöcke werden dabei in kleine Mulden gesetzt, um sie gut in das Planum einzubetten. Anschliessend werden die Zwischenräume der Blöcke mit dem vorgesehenen Untergrundmaterial aufgefüllt *(Bild 2)*. Ein Vorteil dieser Vorgehensweise ist, dass die Anordnung der Blöcke sehr einfach kontrolliert und bei Bedarf nachgebessert werden kann. Ein Nachteil ist jedoch, dass die Rampe vor dem Überschütten der Blöcke nicht mit Maschinen befahren werden kann. Ausserdem ist es schwierig, nach dem Überschütten der Blöcke das Untergrundmaterial in den Zwischenräumen zu verdichten.

Variante 2 – Eingraben der Blöcke: Das Planum wird auf der angestrebten Höhe der Oberkante der Blöcke erstellt. Die Blöcke der aufgelösten unstrukturierten Blockrampe werden anschliessend in das Planum eingegraben *(Bild 3)*. Die Rampe ist während der gesamten Ausführung mit Maschinen befahrbar. Ausserdem sind die Zwischenräume zwischen den Blöcken mit dieser Vorgehensweise gut verdichtet. Ein Nachteil ist jedoch der Materialüberschuss, der durch den Vorauhub entsteht. Im Weiteren lassen sich die Blöcke für eine Kontrolle von Lage und Höhe weniger gut identifizieren.

2.3 Schutz vor Überlast und vor Erosion am Fuss der Rampe

Die fachgerechte Bemessung und Ausführung einer Blockrampe garantiert ihre Stabilität bis zum Bemessungsabfluss. Bei Überlast verhält sich das Bauwerk gutmütig. Ein komplettes Versagen ist auch bei einer Überlastung wenig wahrscheinlich. Es können jedoch einzelne Blöcke abrollen oder einsinken, oder das Gefälle der Rampe kann sich abflachen (*Tamagni et al.*, 2007).

Zum Schutz vor Überlast kann die Blockrampe im Oberwasser durch zusätzliche Blockreihen ergänzt werden. Die Blöcke müssen so angeordnet werden, dass die hydraulischen Bedingungen oberhalb der Blöcke gegenüber dem Zustand vor Bau der Rampe nicht verändert werden. Durch die zusätzlichen Blöcke im Oberwasser kann die Blockrampe auch bei einer Abflachung bei Überlast ihre Funktion weiterhin erfüllen.

Um die Stabilität der Rampe bei Sohlenerosion im Unterwasser sicherzustellen, kann die Rampe flussabwärts unter die bestehende Sohle verlängert werden.

2.4 Belegungsdichte und Anordnung der Blöcke

Die in der Bemessung definierte Belegungsdichte entspricht in der Regel der minimalen Belegung, welche erforderlich ist, um die Stabilität der Deckschicht zu garantieren. Die Blöcke einer aufgelösten unstrukturierten Blockrampe werden nach Definition isoliert und zufällig über die Rampenfläche verteilt (*Tamagni et al.*, 2017). Eine zufällige Verteilung lässt sich auf der Baustelle jedoch schlecht anleiten. Eine Alternative zur zufälligen Verteilung der Blöcke ist das Einsetzen der Blöcke im Schachbrettmuster, sodass keine geradlinigen freien Fliessstrecken in Fliessrichtung auftreten.

2.5 Anschluss an die Ufersicherung

Um den Anschluss der Blockrampe an die Ufersicherung zu gewährleisten, wird immer zuerst die Ufersicherung erstellt. Erst dann werden die Blöcke der Rampe versetzt *(Bild 4)*. Die Blöcke können an den Uferschutz anlehnen, sie müssen sich aber bewegen können, ohne die Blöcke des Uferschutzes zu tangieren. Dieser könnte sonst aufgelockert und beschädigt werden.

2.6 Wasserhaltung

Für die Wasserhaltung während der Ausführung der aufgelösten unstrukturierten Blockrampe werden im Folgenden drei verschiedene Vorgehensweisen beschrieben:

- Option 1 – Erddamm: Ein Erddamm wird im Gerinne aufgeschüttet *(Bild 5)* und das Wasser auf einem Teil der Flussbreite abgeleitet. Die andere Hälfte wird dadurch trockengelegt. Nachdem die erste Hälfte der Blockrampe fertiggestellt ist, wird das Was-

Bild 2. Ausführung einer ausgelösten unstrukturierten Blockrampe an der Kander: Die Blöcke werden auf das Planum aufgesetzt und anschliessend mit Untergrundmaterial überschüttet.

Bild 3. Ausführung einer aufgelösten unstrukturierten Blockrampe an der Simme in St. Stephan: Die Blöcke werden in das Planum eingegraben.

Bild 4. Anschluss der aufgelösten unstrukturierten Blockrampe an die Ufersicherung: Die Ufersicherung wird zuerst erstellt, dann werden die Blöcke der Rampe versetzt (Kander).

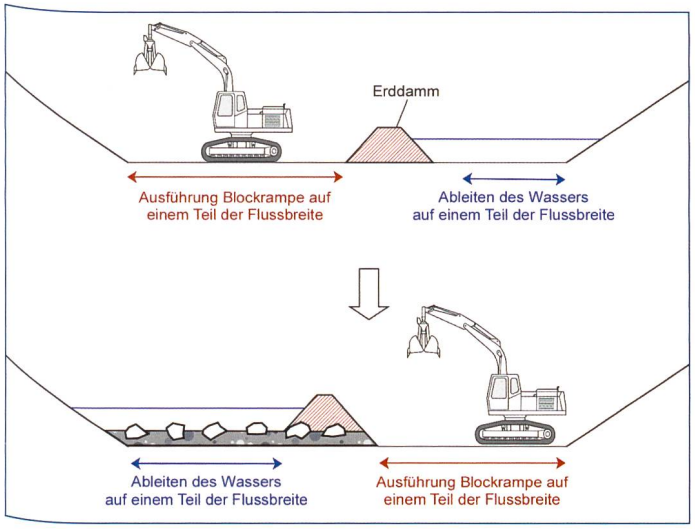

Bild 5. Aufschütten eines Erddamms in der Mitte des Gerinnes. Das Wasser wird auf einem Teil der Flussbreite abgeleitet. Die Blockrampe wird in zwei Etappen ausgeführt.

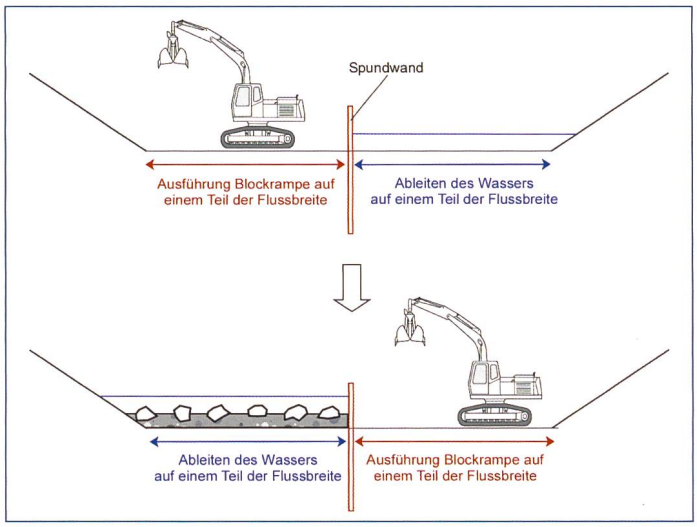

Bild 6. Einbringen einer Spundwand. Das Wasser wird auf einem Teil der Flussbreite abgeleitet. Die Blockrampe wird in zwei Etappen ausgeführt.

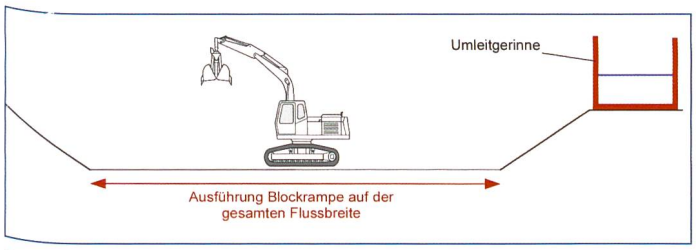

Bild 7. Ableitung des Wassers in einem Umleitgerinne.

ser über diesen Teil umgeleitet und die Blockrampe auf der zweiten Hälfte fertiggestellt (*Bild 5*, unten). Der Erddamm muss dafür versetzt werden. Um den Anschluss der zweiten Blockrampenhälfte an die erste Hälfte sicherzustellen, werden die Blockreihen am Ufer markiert und Blockoberkanten mit Farbe markiert.

- Option 2 – Spundwand: Eine weitere Möglichkeit der Wasserhaltung ist das Einbringen einer Spundwand in der Gerinnemitte *(Bild 6)*. Ähnlich wie bei Option 1 wird die Rampe schrittweise erstellt. Die Blöcke in der Gerinnemitte werden erst dann gesetzt, wenn die Spundwandelemente gezogen werden. Nach Fertigstellung der Blockrampe auf der zweiten Flusshälfte werden die Larssen Schritt für Schritt entfernt und wird jeweils ein Block an die Stelle der Spundwand gesetzt. Dabei wird vom unteren Ende der Rampe an flussaufwärts gearbeitet.
- Option 3 – Umleitgerinne: Eine dritte Option ist der Bau eines Umleitgerinnes und die Umleitung des gesamten Wassers *(Bild 7)*. Voraussetzung für ein Umleitgerinne ist eine geringe Risikowassermenge. Der Vorteil dieser Vorgehensweise ist, dass durch das Umleiten des Wassers die Baustelle komplett im Trockenen liegt und so ein rascher Baufortschritt gewährleistet werden kann.

3. Ausschreibung

Eine Ausschreibung zur Ausführung einer aufgelösten unstrukturierten Blockrampe sollte folgende Anforderungen erfüllen:

- Bereits in der Projektierungsphase sollte die Materialquelle des Schüttmaterials festgelegt werden. Nach Möglichkeit sollte Flusskies verwendet werden. Die Toleranz für die Korngrössenzusammensetzung erschliesst sich aus der Bemessung (*Tamagni et al.*, 2017). Sie muss in der Ausschreibung festgelegt sein.
- Die Streuung der Blockgewichte sollte maximal ± 0.25 t betragen.
- In der Ausschreibung muss festgelegt werden, welche Qualitätskontrollen vor und während des Baus vergütet werden und welche Qualitätskontrollen zulasten der Unternehmung gehen.
- Um eine hohe Qualität zu gewährleisten, sollte das Qualitätsbewusstsein der Unternehmung hoch gewichtet werden.

4. Bauzeiten

Die Bauzeiten für den Bau aufgelöster unstrukturierter Blockrampen können je nach Rahmenbedingungen stark variieren (erfahrungsgemäss 40–150 m^2/Tag). Die effektive Bauzeit hängt unter anderem davon ab, welcher Aufwand für die Wasserhaltung betrieben werden muss, ob zwei Maschinen gleichzeitig im Einsatz stehen können (Platzverhältnisse) und ob für den Rampenkörper Material gemischt werden muss oder nicht. Bei Blockrampen in breiten Flüssen ist der Baufortschritt (in m^2/Tag) in der Regel grösser als bei kleineren und mittleren Gewässern.

5. Qualitätskontrolle

Verschiedene Kontrollen sollen vor und während des Baus durchgeführt werden, um die Qualität der Ausführung einer aufgelösten unstrukturierten Blockrampe zu gewährleisten.

Um die Zusammensetzung des Untergrundmaterials zu kontrollieren, muss eine Siebanalyse durchgeführt werden. Dafür werden an verschiedenen Standorten Volumenproben des Untergrunds entnommen und die grobe Fraktion wird noch vor Ort ausgesiebt *(Bild 8)*. Die Korngrössenverteilung der groben Fraktion wird mit Hilfe einer Volumenzahlanalyse bestimmt. Der Feinanteil der Probe kann in einem Baustofflabor ausgesiebt werden. Das Probevolumen muss genügend gross sein, so dass die groben Komponenten gut repräsentiert sind. Als Grundregel gilt für das Probevolumen:

V_{Probe} [m^3] ≥ 2.5 d_{max} [m], wobei d_{max} der grösste zu erwartende Korndurchmesser des Untergrundmaterials ist.

Je nach tatsächlicher Zusammensetzung des Untergrundmaterials können das Rampengefälle und die Belegungsdichte auf der Rampe aus der Projektierung übernommen werden oder müssen neu bestimmt werden. Unter Umständen

Bild 8. Siebanalyse des Untergrundmaterials (Simme, Bäuertweidli), Aussieben der groben Komponenten.

Bild 9. Kontrolle der Positionierung der Blöcke (Simme, Latterbach).

muss das zur Schüttung des Rampenkörpers vorgesehene Material zurückgewiesen werden. Bei der Kontrolle des Untergrundmaterials ist deshalb eine enge Zusammenarbeit zwischen der örtlichen Bauleitung und dem Verfasser/der Verfasserin des Projekts besonders wichtig.

Weitere Qualitätskontrollen umfassen die Kontrolle der Höhenlage des Planums und der Positionierung der Blöcke *(Bild 9)*. Die verwendeten Blockgrössen können entweder durch Wiegen beim Lieferanten oder auf der Baustelle kontrolliert werden.

Die hier beschriebenen Qualitätskontrollen erfordern eine regelmässige Präsenz der örtlichen Bauleitung auf der Baustelle.

6. Dokumentation

Die Dokumentation der ausgeführten Arbeiten ist ein wichtiger Bestandteil der Bauwerksdokumentation. Bei etwaigen Schadensfällen dient die Dokumentation der Beweissicherung. Dabei sind vor allem diejenigen Grössen von Interesse, die die Stabilität der aufgelösten unstrukturierten Blockrampe gewährleisten. Die Dokumentation des ausgeführten Bauwerks sollte daher mindestens folgende Punkte beinhalten:

- Siebkurven des anstehenden und des eingebauten Materials
- Verwendete Blockgrössen auf der Blockrampe
- Belegungsdichte in Blöcke/m^2
- Position und Einbauhöhe der Blöcke

7. Monitoring und Nachbesserung

Eine aufgelöste unstrukturierte Blockrampe ist ein unterhaltsarmes Bauwerk. Ein regelmässiger Unterhalt des Bauwerks ist nicht notwendig, jedoch müssen nach einer Überlastung der Rampe möglicherweise einzelne Blöcke neu positioniert werden. Um die Rampenstabilität langfristig zu gewährleisten, ist ein regelmässiges Monitoring zu empfehlen. Das Monitoring kann in Form von Kontrollen der Blockrampen nach Belastung mit Hochwassern durchgeführt werden. Folgende Punkte sollten dabei kontrolliert werden:

- Kontrolle der Veränderung der Lage der Blöcke: Vermessung von Position und Höhenlage der Blöcke und Vergleich zu den Lagen bei Ausführung.
- Kontrolle der Veränderung der Sohlenlage in Ober- und Unterwasser.

Im Bedarfsfall müssen Nachbesserungen an aufgelösten unstrukturierten Blockrampen durchgeführt werden. Mögliche Massnahmen zur Nachbesserung einer Rampe sind die Neupositionierung von Blöcken, das Ergänzen der Rampe im Ober- oder Unterwasser oder das Verkürzen der Rampe. In Einzelfällen ist auch eine Erhöhung der Belegungsdichte möglich.

Dank

Die Recherchen zu dieser Publikation wurde vom Bundesamt für Umwelt unterstützt.

Literatur

Hunzinger, L., Opferkuch, F. (2017a). Aufgelöste unstrukturierte Blockrampen, Ausführung. In: Boes, R., ed., Aufgelöste unstrukturierte Blockrampen – Eine Praxisanleitung. VAW-Mitteilung 240, ETH Zürich.

Tamagni, S., Weitbrecht, V., Boes, R.M., 2017, Aufgelöste unstrukturierte Blockrampen, Praxisanleitung zur Dimensionierung – Kurzfassung. «Wasser Energie Luft» 109(1), 33–40.

Anschrift der Verfasser

Dr. *Lukas Hunzinger, Franziska Opferkuch*
Flussbau AG SAH, Schwarztorstrasse 7,
CH-3007 Bern
lukas.hunzinger@flussbau.ch
franziska.opferkuch@flussbau.ch