



Internationales Symposium INTERPRAEVENT 2004 – RIVA / TRIENT

AUFGELÖSTE BLOCKRAMPEN – FALLBEISPIEL AN DER EMME

STRUCTURED BLOCK RAMPS – RIVER EMME CASE STUDY

Nadia Semadeni, Daniela Lange und Gian Reto Bezzola¹

ZUSAMMENFASSUNG

Die Emme fliesst durch das schweizerische Mittelland und tieft sich als Folge ihrer Korrektur weiterhin ein. Mitte des letzten Jahrhunderts wurden zur Sohlstabilisierung rund 80 Sperren erstellt. Aufgrund ihrer Absturzhöhe verhindern diese die Wandertätigkeit von Fischen und Kleinstlebewesen.

Als Ersatz für die inzwischen sanierungsbedürftigen Sperren sind aufgelöste Blockrampen vom Typ Tausendfüssler vorgesehen. Aufgrund der fehlenden Bemessungs- und Dimensionierungsgrundlagen wurden an der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich physikalische Modellversuche durchgeführt. Für die Interpretation der Versuchsergebnisse von aufgelösten Blockrampen werden Erkenntnisse zur Stabilität von natürlichen Stufen-Becken-Systemen herangezogen. Die Versuche ermöglichen den Einfluss der Parameter Rampengefälle, Geschiebezufuhr und zu überwindende Höhendifferenz auf die Rampenstabilität zu quantifizieren.

Key words: aufgelöste Blockrampe, Erosionsschutz, Ökologie

ABSTRACT

The river Emme, one of Switzerland's major pre-alpine rivers, as a consequence of the river training works in the late 19th century still erodes today. Since the 1950s, round 80 sills have been built to stabilize the longitudinal profile. Fish and aquatic fauna are unable to pass the sills due to their large drop height. Structured block ramps were chosen to replace the ecological barriers. As no design guidelines are available yet for such ramps model experiments were performed at the Laboratory of Hydraulic, Hydrology and Glaciology of Swiss Federal Institute of Technology Zurich. Analogies to natural step-pool-systems are used to explain the experimental results. The tests allow qualifying the influence of the following parameters for the stability of structured ramps: slope, sediment transport rate and drop height.

Key words: structured block ramp, erosion control measures, ecology

¹ Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH Zürich, Schweiz;
Tel. +41-1-632-54-98; Fax. +41-1-632-11-92, email: semadeni@vaw.baug.ethz.ch

Laboratory of Hydraulics, Hydrology and Glaciology, Swiss Federal Institute of Technology Zurich, Switzerland

EINLEITUNG UND PROBLEMSTELLUNG

Die Emme fließt durch das schweizerische Mittelland und mündet östlich von Solothurn in die Aare. Anfangs des 19. Jahrhunderts wurde zur Landgewinnung der Flusslauf begradigt und kanalisiert. Wie bei den anderen grossen Flusskorrekturen des 18. und 19. Jahrhunderts ging es primär darum, dem Fluss einen bestimmten Raum zuzuweisen und die versumpften Flächen und unsicheren Überschwemmungsgebiete in den grossen Talebenen der land- und forstwirtschaftlichen Nutzung zuzuführen (Vischer 1986). Die Einengung der Gerinnebreite auf 30 bis 40 m führte zu einer vorerst gewollten Eintiefung der Flusssohle und zu einer Zunahme der Abfluss- und Geschiebetransportkapazität. Ein Geschiebedefizit war die Folge, was sich wiederum in einer Erosionstendenz der Flusssohle niederschlug. Diese Eintiefung der Emme wurde durch die abnehmende Geschiebezufuhr aus den Seitenflüssen verstärkt.

Im Laufe der Zeit führte die kontinuierliche Sohlenerosion zur Gefährdung der Ufer- und Flussbauten und zum Wunsch nach einer stabilen Sohlenlage. In der Mitte des 20. Jahrhunderts wurden auf dem fast 40 km langen Abschnitt von der Quelle bis zur Mündung rund 80 Querbauwerke (Abb. 1) zur Begrenzung dieser Sohleneintiefung eingebaut. Diese Querbauwerke unterteilen die gesamte Flussstrecke in Abschnitte von 200 bis 1'500 m. In diesen hat sich seither ein Zwischengefälle eingestellt, welches wesentlich flacher als das Talgefälle ist. Infolge ihrer Absturzhöhen Δz von 1.5 bis 2.5 m sind die Schwellen im Laufe der Zeit zu Wanderhindernissen geworden und hindern Fische und Kleinstlebewesen in ihrer Wandertätigkeit. Aufgrund der realisierten Massnahmen schreitet die Sohleneintiefung heute zwar langsamer voran, trotzdem ist mittelfristig mit einer weiteren Absenkung von 0.5 m im Mittel zu rechnen. Den Schwellen kommt daher in ihrer Funktion als Sohlenfixpunkt weiterhin eine grosse Bedeutung zu.



Abb. 1 Absturz mit $\Delta z = 2$ m bei Emme-Flusskilometer 22.000, Fließrichtung von hinten nach vorne
Fig. 1 Drop with $\Delta z = 2$ m at Emme-River kilometer 22.000, flow direction from the rear forward

Im Rahmen des Projekts „Eliminierung der Wanderhindernisse“ des Schwellenverbands Emme wird ein Beitrag zum langfristigen Ziel „Längsvernetzung auf der ganzen Länge der Emme“ geleistet. Eine grössere Anzahl der Querbauwerke ist heute baufällig und muss in naher Zukunft ersetzt werden. Als Ersatz für die bestehenden baufälligen Schwellen kommen nur **durchgängige Sohlenbauwerke** in Frage.

DURCHGÄNGIGE SOHLENBAUWERKE

Der Schutz vor Hochwasser ist bei flussbaulichen Projekten nach wie vor eine der zentralen Aufgaben, doch haben in den letzten Jahren und Jahrzehnten ökologische Aspekte mehr und

mehr an Bedeutung gewonnen. Heute lassen sich bauliche Massnahmen an Fließgewässern in der Regel nur realisieren, wenn dadurch gleichzeitig die ökologische Situation verbessert wird. Die zuvor beschriebene Erosionsproblematik erfordert somit einerseits ein Sohlenbauwerk, das die Funktion des Fixpunktes bei Hochwasserabflüssen erfüllt und andererseits den ökologischen Kriterien bei kleineren Abflüssen genügt. Die Belange des reinen Schutzwasserbaus werden so mit den Anforderungen des Naturschutzes verbunden.

Der Flusslauf der Emme ist heute durch Längssicherungen für die Uferböschungen und durch Sperren an gegebenen Punkten fixiert. Zur Begrenzung der Sohleneintiefung unter Berücksichtigung der ökologischen Anforderungen stehen grundsätzlich folgende Massnahmen zur Verfügung: Die Realisierung einer Betonsperre mit einem Umgehungsgerinne oder einem Fischaufstieg, der Bau einer Blockrampe oder die Aufweitung des Gerinnes. Die ersten zwei Massnahmen beruhen auf der Erhaltung eines Fixpunktes im Längsgefälle, was zu einem kleineren Nettogefälle zwischen den Fixpunkten führt. Eine Aufweitung wirkt ebenfalls der Sohlenerosion entgegen, nur ist deren Wirkung von einzelnen Hochwasserereignissen und deren Geschiebefracht abhängig. Im Rahmen dieses Projekts wurde die Massnahme Blockrampe für die Wiederherstellung des Fließgewässerkontinuums gewählt. Das Bauwerk Blockrampe erlaubt eine Vernetzung des Lebensraumes auf der gesamten Flussbreite und kann zudem mit natürlichen Baumaterialien erstellt werden, was die Eingliederung ins Landschaftsbild vereinfacht. Die naturnahe Umgestaltung verbessert die Lebensbedingungen für die Lebewesen im Fließgewässer ganz erheblich.

Blockrampen

Grundsätzlich werden zwei verschiedene Arten von Setzsteinrampen unterschieden: Die **klassische Blockrampe** (Abb. 2. links) ist durch einen Blockteppich auf einem Filterunterbau charakterisiert. Bei den üblichen Rampenneigungen $J < 10\%$ findet ein zweimaliger Fließwechsel statt. Neben den Bemessungsansätzen nach Hartung/Scheuerlein (1970), Knauss (1979), Platzer (1982) wurden die fundiertesten Bemessungskriterien von Whittaker/Jäggi (1982) angegeben, die aus umfangreichen Modellversuchen an der VAW der ETH Zürich basieren.

Bei der **aufgelösten Blockrampe** (Abb. 2 rechts) wird die Rampe nicht als einheitlicher Körper gestaltet, sondern besteht aus mehreren konkav gekrümmten Einzelriegeln, die zusammen eine Gitterstruktur bilden. Diese tief gegründeten Riegel bilden die Tragkonstruktion der Rampe, durch die die natürliche Gewässerdynamik mit Auskolkungen und Ablagerungen gefördert wird. Bis zum heutigen Zeitpunkt fehlen allerdings weitgehend die Bemessungskriterien und fundierte Dimensionierungsangaben.

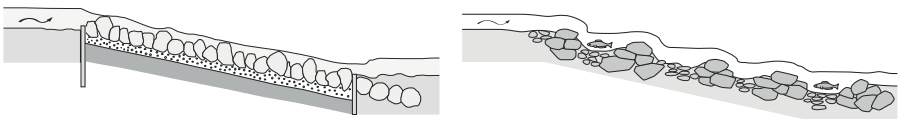


Abb. 2 Längsschnitt einer klassischen Blockrampe (links) und einer aufgelösten Blockrampe (rechts) in Setzsteinbauweise (DVWK 1996)

Fig. 2 Profile of classical block ramp (left) and dissolved block ramp (right) in placed stone construction

Die rauen und strukturreichen Rampen stellen für die Herstellung der ökologischen Durchgängigkeit an Fließgewässern eine geeignete Lösung dar, da sich mit ihnen die natürlichen Verhältnisse einer Fließstrecke nachgestalten lassen. Daher fiel für den Ersatz der Querbau-

werke an der Emme die Wahl auf den Typ der aufgelösten Blockrampe, auch um dem Trend zum naturnahen Wasserbau gerecht zu werden.

KONZEPT FÜR DIE AUFGEÖSTE BAUWEISE

Das Konzept für die Struktur der aufgelösten Blockrampe soll sich an natürlichen Steilstrecken orientieren. Die Sohlen von Wildbächen zeigen eine ausgeprägte Tendenz zur Selbststabilisierung, indem sich, infolge des Auswaschens von Feinteilen aus dem Untergrundmaterial, grobe Deckschichten bilden. Unter weiterer hydraulischer Belastung formen sich typische, strukturierte Wildbachmorphologien, die als Stufen-Becken-Sequenzen beschrieben werden. Diese natürlichen Morphologien (Abb. 3) zeichnen sich durch eine grosse Stabilität bei mittleren Abflüssen aus. Die Analogie in der Sohlenstabilität zwischen Gebirgsflüssen und rauen Rampen wird zur Entwicklung einer Rampenstruktur genutzt. Bekannte Eigenschaften der Morphologien und der Hydraulik von steilen Gerinnen fliessen in die Bemessung ein.

Stufen-Becken-Sequenzen

Stufen-Becken-Abfolgen sind durch die Anordnung der grösseren Komponenten des Sohlenmaterials in Gruppen gekennzeichnet, die oft über die ganze Flussbreite reichen oder alternierend angeordnet sind. Dadurch ergibt sich die typische Abstufung des Längenprofils.

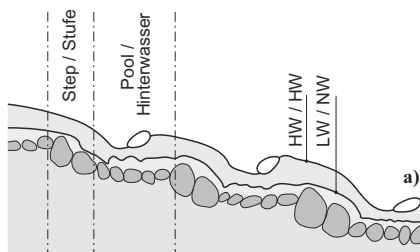


Abb. 3 a) Stufen-Becken-Abfolge am Campo-Bach im Puschlav (Schälchli 1991)

b) Typische Abstufung des Längenprofils mit einem NW- und einem HW-Abfluss

Fig. 3 a) Steps and pools at the Campo-River in the Poschiavo Valley (Schälchli 1991)

b) Typical step-pool system of longitudinal profile with low water (LW) and high water discharge (HW)

Unterhalb einer solchen Stufe bildet sich ein ausgedehnter Kolk und seitlichen Ausbuchtungen. Stufen zeichnen sich durch grosse Fliessgeschwindigkeiten, kleine Abflusstiefen und eine gute Belüftung des Wassers aus, was sich durch das schäumende Weiss des Abflusses ausdrückt. Dem gegenüber sind in den Becken geringe Fliessgeschwindigkeiten und grössere Abflusstiefen anzutreffen (Schälchli 1991). Die Stufen-Becken-Abfolgen treten vor allem bei Niedrigwasserabfluss in Erscheinung. Mit zunehmendem Abfluss nimmt die Fliessgeschwindigkeit im Stromstrich der Becken zu und gleicht sich den Strömungsverhältnissen im Stufenbereich an. Verschiedene Strukturen von Stufen wie beispielsweise Ringstrukturen oder Querriegel wurden sowohl in der Natur als auch im Modell beobachtet und untersucht. Deren Auftretenshäufigkeit ist vom Gefälle und vom Abfluss abhängig (Church et al. 1998, Weichert et al. 2004).

Konzept Tausendfüssler

Für den Aufbau der Struktur des Rampentyps „Tausendfüssler“ wurden die in der Natur und im physikalischen Modell beobachteten morphologischen Elemente „Querriegel“ und „Ring“ verwendet (Semadeni und Müller 2001). Die Riegel sind entsprechend den Ansätzen von Schauburger (1973) gegen die Fließrichtung gebogen und konzentrieren den Abfluss zur Flussmitte, um so die Belastungen in Ufernähe möglichst gering zu halten (Abb. 4).

Bei rauen Rampen kann während Niederwasserperioden das Problem des Trockenfallens der Rampe auftreten. Nebst dem ästhetischen Aspekt ergeben sich geringe Wassertiefen und unzureichende Aufstiegsmöglichkeiten für Fische. Zur Vermeidung des Trockenfallens bei Niedrigwasser wird die Rampe mit einem konkaven Querschnitt ausgeführt, wodurch eine Abflusskonzentration in der Rampenmitte stattfindet, die auch bei Niedrigwasser die Durchgängigkeit gewährleistet (LfU 2000).

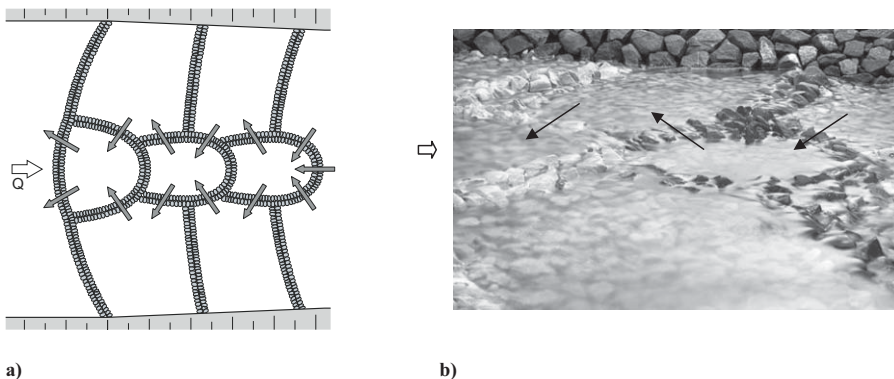


Abb. 4 a) Struktur des Rampentyps „Tausendfüssler“ mit Aufstiegsweg

b) Teilausschnitt eines Tausendfüsslers bei Niedrigabfluss

Fig. 4 a) Structure of ramp type called “Millipede”

b) Detail of millipede with low water flow

Die Tausendfüssler-Struktur beinhaltet in der Rampenmitte einen zickzackförmigen Aufstiegsweg, der vor allem in den Sommermonaten bei sehr geringer Wasserführung für die Längsvernetzung wichtig ist (Abb. 4). Die Riegel-Becken-Struktur weist strömungsarme und strömungsreiche Zonen auf. Die Struktur des Tausendfüsslers ist so ausgelegt, dass die ökologischen Anforderungen, die aus der Bemessung von Fischpässen stammen, bei Nieder- und Mittelwasser erfüllt werden können (DVWK 1996).

PHYSIKALISCHE MODELLVERSUCHE

Als Grundlage für die Bemessung der geplanten aufgelösten Blockrampen an der Emme werden systematische, physikalische Modellversuche an der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich durchgeführt. Im Teilabschnitt der Emme zwischen Emmenmatt (Emme-Kilometer 34.000) und Burgdorf (km 16.000) wurde eine Bestandsaufnahme der einzelnen Absturzbauwerke durchgeführt. Für 13 Standorte wurde die Sanierungsmaßnahme „Aufgelöste Blockrampe - Tausendfüssler“ als möglich erachtet.

Für die Modelluntersuchungen werden drei unterschiedliche Rampengefälle J (3 %, 6 %, 9 %) und zwei für die Emme typische zu überwindende Höhenunterschiede Δz (1.5 m, 2.5 m) festgelegt. Neben diesen 6 verschiedenen Rampenkonfigurationen wird der Einfluss der Geschiebezufuhr und der Abflusstiefe im Unterwasser untersucht. Ziel der Untersuchung ist, ausgehend von der erwähnten Rampenstruktur „Tausendfüßler“, die Überprüfung der verschiedenen Rampentypen hinsichtlich Stabilität des Rampenkörpers sowie des Rampenfusses bei Hochwasser und die Gewährleistung der Durchgängigkeit für Fische und Kleinstlebewesen bei Nieder- und Mittelwasser.

Versuchsanlage

Die Modellversuche wurden in einem Rechteckkanal von 13 m Länge und 2.50 m Breite durchgeführt (Abb. 5). Mit einem Modellmassstab von 1:30 konnte ein 360 m langer und rund 75 m breiter Abschnitt der Emme untersucht werden. Die Flusssohle und der Rampenkörper wurden aus beweglichem Material nachgebildet. Um die Einbindung der Rampe in die Böschungen (Neigung 2:2.5) möglichst realistisch wiederzugeben, wurden die Ufer im Bereich der Rampe und im anschließenden Unterwasser beweglich ausgeführt.

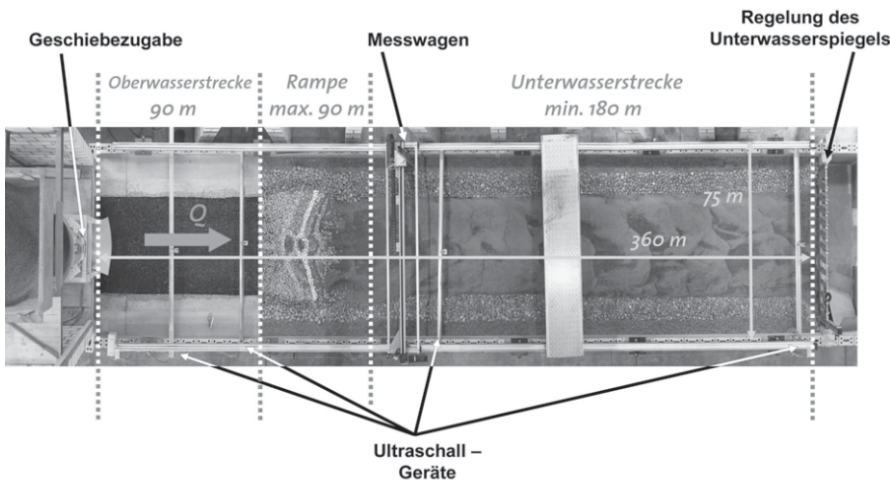


Abb. 5 Modellanlage mit Messeinrichtungen
Fig. 5 Test facility with measuring equipment

Mittels Modellsteuerung, bestehend aus einem Computer, einem Schieber und einem magnetisch induktiven Durchflussmesser, konnte der Zufluss zum Modell gesteuert und so die gewünschten Abflussganglinien erzeugt werden. Die Zugabe des Modellgeschiebes erfolgte über eine durch den Computer angesteuerte Beschickungsmaschine am Modelleinlauf. Das Wehr am unteren Ende der Unterwasserstrecke ermöglichte die Regulierung der Abflusstiefe.

Aufbau der Rampe

Das Geschiebe der Emme ist mit charakteristischen Korndurchmessern von $d_m = 25$ mm und $d_{90} = 85$ mm sehr fein. Unter Berücksichtigung der Filterkriterien darf das Verhältnis zwischen Blockdurchmesser und Durchmesser des Untergrundkorns den Wert von 6 nicht unter-

und 17 nicht überschreiten (Raudkivi und Ettema 1982, Whittaker und Jäggi 1986). Da im Fall der Emme das Verhältnis zwischen Blocksteinen und Geschiebe deutlich grösser als 20 ist, muss der Aufbau des Sohlenbauwerks mehrschichtig erfolgen. Als Zwischenschicht werden Brocken mit $d_{65} = 0.5$ m und einem Gewicht von 250 kg eingesetzt.

Der Aufbau der Rampen erfolgte in 3 Schritten: Auf das eingebaute Sohlenmaterial wurde die Filterschicht aus Brocken geschüttet. Für die Herstellung der Riegel wurden Blöcke mit $d_{65} = 1.10$ m und einem Gewicht von 2 t und für die Auskleidung der Becken Brocken verwendet. Der Einbau der Steinblöcke erfolgte hochkant, wobei speziell auf die Verteilung der Blöcke Wert gelegt wurde.

Die geringe Differenz der Wasserspiegellagen von 0.20 m zwischen den Stufen hat einschneidende Konsequenzen für die zu überwindende Höhendifferenz Δz . Eine Änderung des Rampengefälles wirkt sich nur auf die Abstände der Einzelriegel aus, nicht aber auf die Höhendifferenzen zwischen den Riegeln. Je nach zu überwindender Höhendifferenz weist der Tausendfüssler 5 ($\Delta z = 2.5$ m) oder 3 Glieder ($\Delta z = 1.5$ m) auf.

Versuchsführung

Im trockenen Zustand wurden nebst Photoaufnahmen auch Laser-Topographieaufnahmen gemacht. Anschliessend wurde der Durchfluss gemäss der treppenförmig angenäherten Dauerkurve erhöht, bis der Bemessungs- oder Extremhochwasserabfluss (1.5-fach des Bemessungsabflusses) erreicht wurde. Während des Versuches wurde mittels Ultraschallgeräten der Verlauf des Wasserspiegels aufgezeichnet, mit einem Messflügel punktuell Geschwindigkeitsmessungen vorgenommen und mit Photos und Videosequenzen Beobachtungen dokumentiert.

Die transportierten Blöcke und Brocken wurden im Anschluss an die Modellversuche gewogen, so dass Aussagen des Einflusses der Geschiebeführung auf die Stabilität des Rampenkörpers möglich sind.

RESULTATE

Versagensmechanismen

Als Versagensmechanismen für aufgelöste Blockrampen konnten die gleichen Mechanismen beobachtet werden, wie sie aus den Modellversuchen für klassische Blockrampen bekannt sind (Whittaker und Jäggi 1982, Chervet und Weiss 2000):

- **direkte Erosion** der Blöcke aus dem Verband der Rampe
- **indirekte Erosion** durch Ausspülung des feinkörnigen Untergrunds, verbunden mit einem Abgleiten oder Einsinken der Blöcke
- **Abgleiten des Rampenfusses** in den Kolk und dadurch Auflösung des Rampengefüges

Diese drei Mechanismen können einzeln oder in Kombination für die Zerstörung einer Rampe verantwortlich sein.

Zerstörung des Rampenkörpers

Die direkte Erosion von Blöcken ist ein Spezialfall des Transportbeginns von losem Sohlenmaterial. Die Abschätzung des Stabilitätszustandes eines in der Sohle eingebetteten Blocks erfolgt überwiegend mit Formeln, die auf dem Ansatz von Shields (1936) basieren. Die direk-

te Erosion führt primär zu einem Massenverlust an Brocken und Blöcken und somit zu einer Verringerung der Belegungsichte, welche wiederum Einfluss auf die Bauwerksstabilität hat. Das Ausspülen der Becken hat eine Freilegung der grossen Steinblöcke und somit auch der Grobstruktur zur Folge (Abb. 6 a). Dadurch sind die Steinblöcke einer grösseren Beanspruchung ausgesetzt, was bei einer folgenden Abflusssteigerung zum plötzlichen Versagen eines ganzen Riegels respektive der Rampe führen kann.

Durch die tieferen Becken ergibt sich eine grössere Differenz zwischen Riegeloberkante und Beckensohle, wodurch bei mittleren Hochwasserabflüssen eine ausgeprägte Wellenbildung des Abflusses auf der Rampe resultiert. Trifft ein Wellental auf einen Riegel, so wird dieser stark beansprucht, was in der Regel zu Schäden führt. Stimmt hingegen die Wellenlänge mit den Riegelabständen überein, so sind die Schäden deutlich geringer.

Bei der sukzessiven Erhöhung des Abflusses wurden zwei unterschiedliche Schwellenwerte beobachtet: Der Schwellenwert (gekennzeichnet durch einen Stern), bei dem einzelne Blöcke bewegt werden und der Abfluss (ausgefüllter Kreis), bei dem das Bauwerk durch Auflösung der Grobstrukturen vollständig zerstört wird. In Abb. 6 b sind die Resultate für den Typ Tausendfüssler mit Geschiebezufuhr für verschiedene Höhendifferenzen aufgetragen. Die Aussage von Palt (2002), dass der Unterschied im kritischen spezifischen Abfluss zwischen der beginnenden Bewegung von Einzelsteinen und der Zerstörung des Rampenkörpers bei einem fast dreifachen Faktor liegt, wird durch die Modellversuche bestätigt.

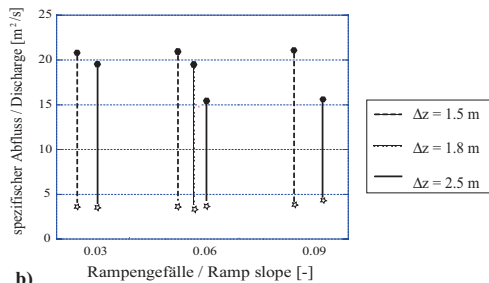
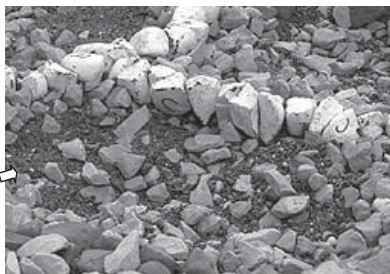


Abb. 6 a) Ausgespültes Becken (vor hellem Riegel); Fliessrichtung von links nach rechts
b) Schwellenwerte in Abhängigkeit des Rampengefälles für verschiedene Höhendifferenzen
Fig. 6 a) Washed pool (in front of the white step), flow direction from left to right
b) Threshold flows in dependence of ramp slope for different drop heights

Einem spezifischen Abfluss von mehr als $20 \text{ m}^2/\text{s}$ hat in den Versuchen keine Rampenkonfiguration mit einer Höhendifferenz von 2.5 m standgehalten. Für die kleinere Höhendifferenz von 1.5 m hingegen, konnten sämtliche Rampenkonfigurationen Belastungen des Extremhochwassers ($q = 21 \text{ m}^2/\text{s}$) abführen. Eine deutliche Abhängigkeit des Zerstörungsabflusses vom Rampengefälle ist nicht erkennbar. Die Ursache für die frühe Zerstörung der Rampenkonfiguration ($J = 6\%$, $\Delta z = 2.5 \text{ m}$) ist noch nicht im Detail bekannt. Die zu überwindende Höhendifferenz hat einen grösseren Einfluss auf die Stabilität als das Rampengefälle.

Kolk am Rampenfuss

Die Kenntnis der Kolktiefe und der Ausdehnung des Kolks ist für die Stabilität der Rampe von entscheidender Bedeutung. Am Rampenfuss entsteht, bedingt durch den Rückstau vom Unterwasser, ein Wechselsprung. Bei Rampen trifft der Abfluss in einem flachen Winkel auf die Sohle im Unterwasser, was zu einer lang gezogenen Kolkform führt. Die Endkolktiefe ist

deutlich geringer als bei einem Absturz. Die im Versuch resultierende Kolkform und Kolktiefe (Abb. 7 a) ist bei der Belastung der Rampenkonfiguration ($J = 9\%$, $\Delta z = 1.5 \text{ m}$) durch das Bemessungshochwasser ($q = 14 \text{ m}^2/\text{s}$) entstanden. Der Kolk hat eine Länge von rund 100 m und ist maximal 5 m tief. Neben den ufernahen (gestrichelte Linie kennzeichnet den Böschungsfuß) kleinen Kolklöchern hat sich ein lang gezogener zentraler Kolk ausgebildet. Die Kolktiefe und damit die Stabilität des Rampenfusses werden dabei vor allem durch die Effizienz der Energiedissipation auf der Rampe bestimmt.

In Abb. 7 b sind gemessene Kolk 깊ies nach einer Belastung durch das Bemessungsereignis aufgetragen. Die Rampenkonfigurationen unterscheiden sich bezüglich des gewählten Rampengefälles, der zu überwindenden Höhendifferenz und der Geschiebezugabe (G). Die gemessenen Kolk tiefes zeigen einen deutlichen Einfluss des Rampengefälles und der Geschiebezugabe. Weiter bewirkt eine grössere Höhendifferenz einen tieferen Kolk, was aufgrund der Kolkbildung als Folge des lokalen Energieüberschusses zu erwarten war.

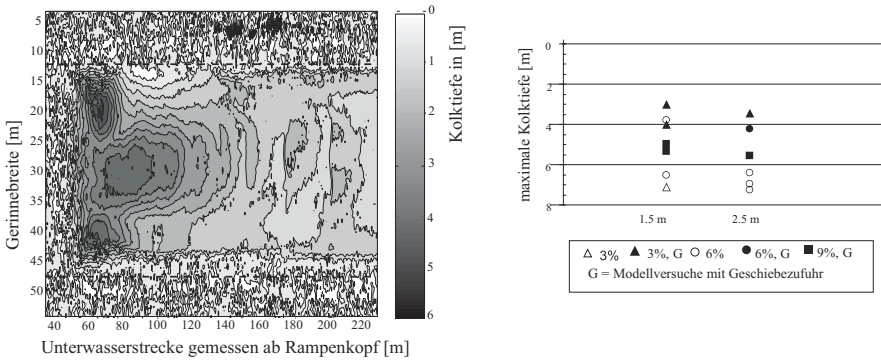


Abb. 7 a) Kolk tiefes am ab dem Rampenfuss für die Belastung durch den Bemessungsabfluss
b) Maximale Kolk tiefes beim Bemessungsabfluss in Funktion der Höhendifferenz;
 nicht ausgefüllte Symbole sind Reinwasser-Versuche, ausgefüllte Versuche mit Geschiebezufuhr
Fig. 7 a) Plot of channels differences downstream the ramp's body caused by design flow;
b) Maximum scours depths at design flow in function of drop height
 unfilled marks represent clear water, filled marks sediment supply

Die Flussstrecke unterhalb der Rampe ist einer stark turbulenten Strömung mit heftiger Wellenbildung ausgesetzt. Die entstehenden Wellen transportieren die nicht im Rampenbereich umgewandelte Energie ins Unterwasser, wodurch eine längere Unterwasserstrecke einer grösseren Beanspruchung ausgesetzt wird. Dem seitlichen Böschungsschutz muss somit besondere Aufmerksamkeit geschenkt werden.

Einfluss der Geschiebeführung

Nebst der bereits erwähnten vorteilhaften Auswirkung der Geschiebeführung auf die maximalen Kolk tiefes, bewirkt die Zufuhr von Geschiebe einen grösseren Massenverlust an Brocken (Tab.1). Dieser Massenverlust ist ein Mass für die Abnahme der Belegungsichte des Rampenkörpers bei einer Belastung durch ein Hochwasser.

Während bei Reinwasser-Bedingungen geringe bis keine Massenverluste auftreten, betragen die Massenverluste bei den Modellversuchen mit Geschiebezufuhr bis zu 28 %. Als Grund für den grösseren Verlust an Brocken kann die durch Ablagerung von Feingeschiebe zwischen den Brocken reduzierte Rauigkeit genannt werden, wodurch die Fließgeschwindigkeit in

Sohnnähe steigt. Der verstärkte Massenverlust schwächt das Rampengefüge massgeblich, so dass das Bauwerk bei kleineren Abflüssen beschädigt wird. Für die Bauwerksstabilität bedeutet dies, dass bei Geschiebezufuhr die Stabilität geringer ist und dass die Rampe durch einen kleineren Zerstörungsabfluss kollabieren kann.

Tab. 1 Massenverluste der Rampenkörper bei Bemessungsabfluss

Tab. 1 Mass loss of ramp body at design flow

Gefälle	Höhendifferenz	Massenverlust Reinwasser		Massenverlust Geschiebezufuhr	
		Blöcke	Brocken	Blöcke	Brocken
3 %	1.5 m	1 %	1 %	4 %	6 %
3 %	2.5 m	2 %	7 %	13 %	28 %
6 %	1.5 m	2 %	6 %	4 %	12 %
6 %	2.5 m	1 %	6 %	6 %	18 %
9 %	1.5 m	2 %	4 %	2 %	5 %
9 %	2.5 m	2 %	5 %	2 %	12 %

Ökologie

Um natürliche Verhältnisse in einem künstlichen Bauwerk nachzubilden, sind die Anforderungen betreffend der Fliessgeschwindigkeit $v < 2 \text{ m/s}$, der Differenz der Wasserspiegellagen $\Delta h < 0.2 \text{ m}$, der Beckentiefe $\Delta > 0.4 \text{ m}$ und des Turbulenzkriteriums² $T < 200 \text{ W/m}^3_{\text{Becken}}$ einzuhalten. Die ökologischen Anforderungen richten sich nach den Kriterien für Fischpässe. Für ein über die ganze Flussbreite erstelltes Bauwerk müssen die Anforderungen nicht auf der gesamten Rampenbreite eingehalten werden. Es wird hier ein in Längsrichtung durchgängiger Rampenbereich gefordert, in dem die Grenzwerte nicht überschritten werden. Die ökologischen Anforderungen werden aufgrund der räumlichen Krümmung des Rampenkörpers in der Abflussbandbreite von Q_{330} bis Q_{30} eingehalten. Bei Niederwasser sind die Anforderungen in der Rampenmitte, bei grösseren Mittelwasserabflüssen sind die Kriterien in Ufernähe eingehalten. Die Kriterien können unabhängig vom Rampengefälle und der Höhendifferenz erfüllt werden. Die ökologischen Anforderungen schränken die Rampenstruktur aufgrund der geforderten Wasserspiegeldifferenzen zwischen den Becken stark ein.

VERGLEICH MIT KLASSISCHEN BLOCKRAMPEN

Wie bei der klassischen Rampe (Schauberger 1973) ist die Konzentration der Strömung auf die Rampenachse und damit die Ablösung der Strömung von den beiden Ufern für die Bildung eines Mittelkolks von grosser Bedeutung. Die gewählte Becken-Struktur der aufgelösten Rampe bedingt einen in Fliessrichtung gebogenen Rampenfuss.

Bei der Dimensionierung einer klassischen Blockrampe steht die Bestimmung der Blockgrösse in Funktion des zulässigen spezifischen Abflusses, der Rampenneigung, der Belegungsichte sowie der Beschaffenheit des Untergrundes im Vordergrund (Knauss 1979, Whittaker und Jäggi 1982). Grundbedingung für die Anwendung der bekannten Gleichungen ist, dass auf der Rampe Normalabflussbedingungen herrschen. Aufgrund des vielfältigen Strömungs-

² Turbulenzkriterium gilt als Richtwert für die Leistungsdichte welche bei der Energiedissipation in einem Becken nicht überschritten werden darf.

$$T = \frac{\rho \cdot g \cdot \Delta h \cdot Q}{V_{\text{Becken}}}$$

musters kann bei der Bemessung der aufgelösten Rampe nicht von Normalabflussbedingungen ausgegangen werden. Bei Niederwasser sind die Stufen-Becken-Sequenzen durch viele Fließwechsel gekennzeichnet. Für die Beschreibung des Strömungsbildes bei Hochwasser sind weitere standortabhängige Parameter wie die Abflusstiefe im Unterwasser oder das Rampengefälle, respektive die Riegelabstände notwendig.

Die Kolkform und die Ausdehnung gleichen denjenigen bei der klassischen Blockrampe. Die gemessenen Maximaltiefen zeigen eine relativ gute Übereinstimmung mit den Berechnungsansätzen für den Kolk bei klassischen Rampen. Da Kolk-tiefen in gleicher Größenordnung resultieren kann auf eine vergleichbare Energiedissipation auf der Rampe geschlossen werden. Die Nachbettsicherung ist somit sowohl für die klassische als auch für die aufgelöste Blockrampe ein wesentliches Konstruktionselement. Die Schadensmechanismen von klassischen Blockrampen decken sich mit den beobachteten Prozessen bei der aufgelösten Blockrampe. Die beschriebenen Ansätze für die Filterkriterien sind auf beide Bauweisen von Rampen anwendbar.

Die der Rampenstruktur des Tausendfüßlers zugrunde gelegten ökologischen Anforderungen – vor allem die geringe Höhendifferenz zwischen den Riegeln – lassen im Vergleich mit den üblichen Gefällen von klassischen Blockrampen nur geringe Verhältnisse von Δh zur Beckenlänge zu. Die im Vergleich mit dem Blockteppich der klassischen Blockrampe aufwändigere Struktur der aufgelösten Rampe und die aufgrund des geringeren Rampengefalles resultierenden Rampenlängen führen zu einem grösseren Materialverbrauch. Die Berücksichtigung der ökologischen Kriterien hat somit ihren Preis.

SCHLUSSFOLGERUNGEN

Bei aufgelösten Blockrampen bestehen – trotz aller Sorgfalt bei deren Erstellung – Schwachstellen. Der Blockverband einer Rampe kann mit der Zeit, bzw. unter der Einwirkung der Strömung (z.B. durch Setzungen oder leichte Bewegungen der Blöcke) aufgelockert werden. Die aufgelöste Blockrampe vermag Massenverluste und Umlagerungen im kleinen Stil aufzufangen. Der beschriebene Massenverlust kann als Grundlage für die Abschätzung der anfallenden Unterhaltsarbeiten bei grösseren Hochwasserabflüssen genommen werden.

Der Aufbau der Rampe bedingt bei der Verteilung der einzelnen Blöcke höchste Sorgfalt, denn eine Rampe ist grundsätzlich nur so stabil wie ihre schwächste Stelle. Das unregelmässige Strömungsmuster der aufgelösten Blockrampe kann unerwünschte Abflusskonzentrationen bewirken, die mit einer erhöhten Belastung auf das Rampengefüge wirken, was zu einem verfrühten Kollaps des Systems führen kann.

Die bisherigen Resultate zeigen, dass die Stabilität von aufgelösten Blockrampen nicht a priori mit klassischen Blockrampen verglichen werden kann, da zusätzliche Parameter wie z.B. die zu überwindende Höhendifferenz (Differenz der Wassertiefen im Ober- und Unterwasser), welche Einfluss auf die Fließverhältnisse und Geschwindigkeiten am Rampenfuß haben, und die Geschiebeführung von Bedeutung sind.

Weitere Versuche werden für eine Quantifizierung des jeweiligen Einflusses auf die Stabilität des Rampenkörpers benötigt. Das Augenmerk wird vor allem auf den Einfluss der Geschiebeführung und die Übereinstimmung des wellenförmigen Abflusses mit den Riegelabständen in Abhängigkeit vom Rampengefälle gerichtet. Eine Quantifizierung könnte dann zur Ausarbeitung von allgemein gültigen Bemessungsgrundlagen führen.

LITERATUR

- Bayerisches Landesamt (2002): „Wildbäche Faszination und Gefahr“. *Spektrum Wasser* 3, Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft, München 2002.
- Chervet, A., Weiss, H. W. (1990): „Sohlenstabilisierung mit Blockrampen“. *Schweizer Ingenieur und Architekt, Jahrgang 108, Heft 42, 1205 – 1210*.
- Church, M., Hassan, M. A., Wolcott, J. F. (1998): „Stabilizing self-organized structures in gravel-bed stream channels: Field and experimental observations“. *Water research, Vol. 34, No. 11, Pages 3169 - 3179*.
- DVWK (1996): „Fischaufstiegsanlagen – Bemessung, Gestaltung, Funktionskontrolle“. *Merklblätter zur Wasserwirtschaft 232/1996*, Hamburg und Berlin 1996.
- Gebler, R.-J. (1990): „Naturgemässe Bauweisen von Sohlenstufen“ *Kolloquium „Naturgemässe Gestaltung von Fliessgewässern“*, Institut für Wasserbau und Kulturtechnik der Universität Karlsruhe, Karlsruhe 1990.
- Hartung, F. und Scheuerlein, H. (1970): „Design of Overflow Rockfill Dams“. *ICOLD-Congress, Beitrag Nr. R.35 zu Q.36*, Montreal 1970.
- Knauss, J. (1979): „Flachgeneigte Abstürze, glatte und raue Sohlrampen“. *Versuchsanstalt für Wasserbau der TU München, Bericht Nr. 45, -18*, München 1979.
- Landesamt für Umweltschutz Baden-Württemberg (LfU) (2000): „Anlagen zur Herstellung der Durchgängigkeit von Fliessgewässern – Raue Rampen und Verbindungsgewässer“. *Oberirdische Gewässer, Gewässerökologie 63*, Karlsruhe 2000.
- Platzer, G. (1982): „Kriterien für den zulässigen spezifischen Abfluss über breite Blocksteinrampen“. *Österreichische Wasserwirtschaft, Heft 5/6, 137 - 147*.
- Schälchli, U. (1991): "Morphologie und Strömungsverhältnisse in Gebirgsbächen: ein Verfahren zur Festlegung von Restwasserabflüssen". *Mitteilung Nr. 113, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH Zürich*, Zürich 1991.
- Raudkivi, A.J. und Ettema, R. (1982): „Stability of Armour Layers in Rivers“. *Proc. ASCE, Journal of Hydraulic Division, 108(HY9), 1047-1057*.
- Schauberger, W. (1973): „Die räumliche Krümmung von Gefällsstufen und Sturzbettend-schwellen.“ *Österreichische Wasserwirtschaft Jahrgang 25, Heft 5, 120 - 124*.
- Semadeni, N. und Müller, P. (2001): "Naturnahe Stabilisierung steiler Gerinne – Fallbeispiel Sohlenrampe in der Emme". *Diplomarbeit an der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH Zürich*, Zürich 2001 (unveröffentlicht).
- Shields, A. (1936): „Anwendung der Ähnlichkeitsmechanik und der Turbulenzforschung auf die Geschiebebewegung“. *Mitteilung Preussische Versuchsanstalt für Wasser-, Erd- und Schiffbau 26*, Berlin 1936.
- Vischer, D. (1986): "Schweizerische Flusskorrekturen im 18. und 19. Jahrhundert". *Mitteilung Nr. 84, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH Zürich*, Zürich 1986.
- Weichert, R., Bezzola, G.R., Minor, H.-E. (2004): „Bed morphology and stability in steep open channels“ (*accepted*).
- Whittaker, J. und Jäggi, M. (1986): „Blockschwellen“. *Mitteilung Nr. 91, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH Zürich*, Zürich 1982.