

Belastungstest Hochwasser 2005: Wie haben die Blockrampen standgehalten?

Lukas Hunzinger

1 Einleitung

In den vergangenen Jahren wurden an verschiedenen Gebirgsflüssen im Kanton Bern Blockrampen errichtet, um die Durchgängigkeit der Gewässer für Fische an jenen Stellen zu verbessern, an welchen diese durch Schwellen und Abstürze unterbunden war. Zu Beginn wurden ausschließlich konventionelle Rampen errichtet, in jüngster Zeit auch einige aufgelöste Rampen.

Die Hochwasser vom August 2005 haben die verschiedenen Bauwerke einer hohen Belastung ausgesetzt. Teilweise wurden ihre Bemessungsabflüsse deutlich überschritten. Das Ereignis bietet deshalb eine gute Gelegenheit, das Verhalten der verschiedenen Rampen zu analysieren. Eine systematische Analyse ist zur Zeit bei der Versuchsanstalt für Wasserbau der ETH (VAW) im Rahmen der Ereignisanalyse des Bundesamtes für Umwelt in Bearbeitung. Der vorliegende Beitrag liefert dazu eine Grundlage. Er beschreibt das Verhalten von aufgelösten Rampen an der Simme und der Kander und geht auf das unterschiedliche Verhalten aufgelöster und konventioneller Rampen bei Hochwasser ein.

2 Die Blockrampen an der Simme bei St. Stephan

2.1 Projektierung und Bemessung

In St. Stephan am Oberlauf der Simme wurden in den Jahren 2002 und 2003 zwei aufgelöste Rampen errichtet. Sie sind je einer Schwelle vorgelagert und überwinden eine Höhendifferenz von 1.6 m bzw. 1.2 m. Die ursprünglichen Schwellen wurden stehen gelassen und die Rampen schließen mit einem Gefälle von 3.0 % unmittelbar an die Schwellenkronen an (Abmessungen in der Tab. 1).

Die Rampen wurden als aufgelöste Blockrampen mit örtlichem Flusskies als Untergrundmaterial ausgelegt und nach der Methode von Whittaker *et al.* (1988) bemessen. Für die Stabilität der Deckschicht wurde das Kriterium von Günter (1971) verwendet. Modellversuche wurden keine durchgeführt.



Abb. 1:
Blockrampe an der Simme.
Die Rampe erfüllt ihre Funktion auch nach dem Hochwasser.



Abb. 2:
Blockrampe an der Simme.
Kolkbildung an der Sperrenkronen.

2.2 Veränderungen nach dem Hochwasser

Beim Hochwasser vom August 2005 wurden die Rampen mit einem Abfluss von ca. $85 \text{ m}^3/\text{s}$ belastet, das entspricht einem spezifischen Abfluss von $7.1 \text{ m}^2/\text{s}$. Die Belastung war geringer als der Bemessungsabfluss, welcher $120 \text{ m}^3/\text{s}$ beträgt. Am Kopf beider Rampen haben sich einige Blöcke abgesenkt und es sind Kolke von ungefähr je einem Meter Tiefe entstanden. Die Sperrenkronen sind hydraulisch wieder wirksam. Bei mäßiger Wasserführung stellt sich ein Fließwechsel über den Sperrenkronen ein. Das Phänomen wurde – in etwas geringerem Ausmaß – bereits im ersten Jahr nach der Ausführung beobachtet, in welchem sich die Bauwerke insgesamt etwas gesetzt hatten. Man

hat die Kolkbildung damals mit der Schüttung von zusätzlichen Blöcken am Rampenkopf auszugleichen versucht.

Die Rampen erfüllen auch noch nach dem Hochwasser 2005 ihre Funktion zur Fischwanderung vollumfänglich. Aufgrund des Fließwechsels über den Schwellenkronen muss man aber davon ausgehen, dass sich bei zukünftigen Hochwasserereignissen die Kolke vergrößern werden. Im ungünstigen Fall können die oberen Teile der Rampen ihre hydraulische Wirkung verlieren, so dass größere Abstürze über den alten Sperrenkronen bestehen bleiben. Aus diesem Grund ist im Rahmen von Sanierungsmaßnahmen vorgesehen, die Sperrenkronen abzutragen sowie die Rampen flussaufwärts über die Sperrn hinaus zu verlängern und im Oberwasser mit einer Pufferstrecke zu ergänzen.

	Simme	Kander
Breite	12 m	35 m
Gefälle	3.0 %	2.5 %
Länge	70 m / 55 m	135 m (inkl. Vorrampe)
Höhendifferenz	1.6 m, 1.2 m	2.5 m
Bemessungsabfluss	120 m ³ /s 10 m ² /s	400 m ³ /s 11.4 m ² /s
Maximalabfluss 2005	85 m ³ /s 7.1 m ² /s	530 m ³ /s 15.1 m ² /s (mittel)
Untergrundmaterial	$d_{90} = 20.2$ cm $d_m = 8.0$ cm	$d_{90} = 20$ cm $d_m = 7.5$ cm
Blockgewicht	2.7 t (2.5 – 3.0 t)	3.0 t (2.7 – 3.5 t)
Belegung	0.10 m ⁻²	0.18 m ⁻²

Tab. 1: Charakteristische Größen der aufgelösten Blockrampen in der Simme bei St. Stephan und in der Kander Augand.

3 Die Blockrampen an der Kander in der Augand

3.1 Projektierung und Bemessung

Im Rahmen des Renaturierungs- und Hochwasserschutzprojektes Kander Augand in den Gemeinden Reutigen und Spiez wurde im Frühjahr 2005 eine aufgelöste Rampe als Sohlenfixpunkt in der Kander errichtet. Sie soll eine im Oberwasser liegende Gruppe von Betonschwellen stützen, welche wegen der fortschreitenden Sohlenerosion zu unterkolken drohten. Bei der Projektierung und beim Bau konnte man sich auf Erfahrungen stützen, welche aus den oben genannten Rampen in der Simme und aus Modellversuchen der VAW gewonnen wurden. Im Unterschied zu den Rampen in der Simme schließt die Rampe in der Kander nicht unmittelbar an ein Bauwerk an. Zudem ist sie mit einer Vorrampe als Pufferstrecke im Oberwasser der eigentlichen Rampe ausgestattet (Abmessungen in Tab. 1).

Die Rampe befindet sich nur wenig unterstrom des Zusammenflusses von Kander und Simme. Die Simme mündet nach einer scharfen Rechtskrümmung in annähernd rechtem Winkel in die Kander. Die Zuflussbedingungen (Verteilung der spezifischen Abflüsse) wurde mit Hilfe einer zweidimensionalen Strömungssimulation überprüft. Gestützt auf die Simulationen wurde der Abstand zwischen Zusammenfluss und Rampenkopf definiert, welcher erforderlich ist, damit die Rampe gleichmäßig angeströmt wird. Beim Bau der Rampe wurde

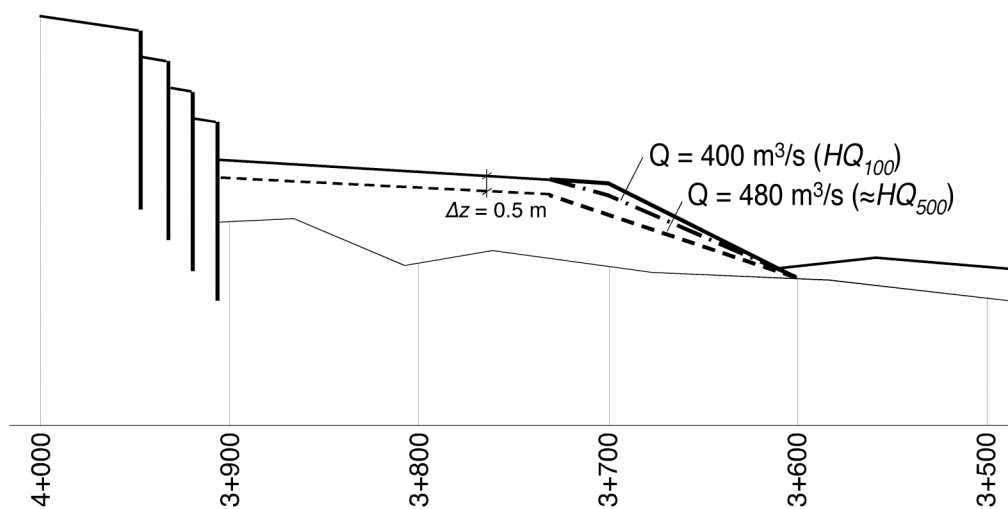


Abb. 3: Prognostizierte Veränderung des Längengefälles der Rampe bei Abflüssen von $400 \text{ m}^3/\text{s}$ und $480 \text{ m}^3/\text{s}$.

besondere Sorgfalt darauf verwendet, dass die für die Stabilität des Bauwerkes maßgeblichen Parameter (Korngröße des Untergrundes, Blockgewichte) den Vorgaben der Bemessung entsprachen. Dazu wurde das eingebrachte Material regelmäßig analysiert und jeder einzelne Block vor dem Einbau gewogen (Künzi *et al.*, 2005).

Im Rahmen der Projektierung wurde das Verhalten der Rampe bei Hochwasser prognostiziert. Bei einem Abfluss von $400 \text{ m}^3/\text{s}$ (HQ_{100} ¹) würde das Gefälle von 2.5 % auf 2.2 % abnehmen, wobei der Gefälleverlust von der Pufferstrecke aufgefangen würde. Bei einem Abfluss von $480 \text{ m}^3/\text{s}$ ($\approx HQ_{300}$) würde sich die Rampe auf 1.6 % abflachen. Damit würde der Puffer der Vorrampe aufgebraucht und im Oberwasser resultierte eine Sohlenabsenkung um 0.5 m (Abb. 3).

3.2 Das Hochwasser 2005 und die Folgen

Weniger als ein halbes Jahr nach ihrer Fertigstellung wurde die Rampe mit einem außerordentlichen und lang andauernden Hochwasser belastet (Abb. 4). Während 18 Stunden war der Abfluss höher als der Bemessungsabfluss von $400 \text{ m}^3/\text{s}$. Die Abflussspitze betrug $530 \text{ m}^3/\text{s}$. Die Rampe hat sich dabei deformiert.



Abb. 4:
Blockrampe an der Kander.
Abfluss von $460 \text{ m}^3/\text{s}$ am
Vormittag des 22. August
2005.

¹ Hochwasserstatistik ohne Hochwasser 2005.

Zur Analyse der Veränderungen wurde in vier Querschnitten die im Untergrund eingebetteten Blöcke ausgegraben, die Höhenlage ihrer Oberkante vermessen und mit den projektierten (theoretischen) Oberkanten verglichen (Abb. 5 und Abb. 6).

Aus dem rechten, oberen Teil der Rampe, d.h. auf rund einem Viertel der Fläche, wurde das Untergrundmaterial erodiert und die Blöcke sind in eine tiefere Lage gesunken. Die linke und die untere Hälfte der Rampe hat sich wenig verändert. Dort wurden die Blöcke durch alluviale Ablagerungen überschüttet.

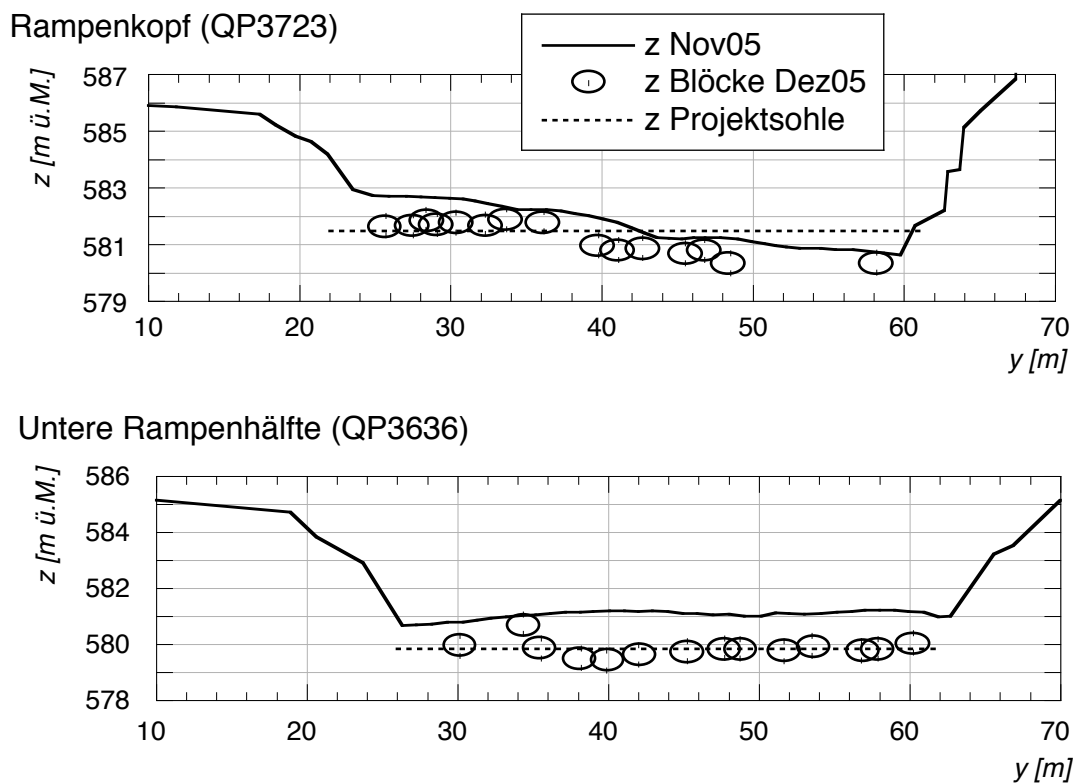


Abb. 5: Querprofile der Rampe. Oben: Absinken der Blöcke unter die Projektsohle auf der rechten Hälfte des Rampenkopfes. Unten: praktisch unveränderte Blocklagen und Sohlenaufandung in der unteren Hälfte der Rampe.

Die Deformation der Rampe hat die Form eines Kolkes und lässt sich mit Veränderungen der Anströmungsbedingungen erklären: Während des Hochwassers hat die Simme ihr Gerinne durch Seitenerosion um 20-30 m flussabwärts verlagert. Der Zusammenfluss von Kander und Simme ist damit um diesen Betrag näher zur Rampe hin gerückt, in die Nähe einer Stelle, an welcher die

Kander durch einen Sporn verfestigter Schotterbänke am rechten Ufer eingengt wird. Die Umlenkung der Strömung und damit die Sekundärströmungen dürften an dieser Stelle stärker gewesen sein, als sie bei gleichen Abflüssen beim Zusammenfluss weiter flussaufwärts gewesen wären. Die Geometrie der Sohle und die Anordnung der Blöcke lässt darauf schließen, dass spätestens 100 m unterstrom des Zusammenflusses die Strömung wiederum gleichmäßig über das Gerinne verteilt war.

Für die Deformation der Rampe gibt es also zwei Ursachen:

1. Abflüsse über längere Zeit deutlich über dem aus der Bemessung ermittelten Grenzabfluss.
2. Strömungskonzentration und Sekundärströmungen auf der rechten Flussseite, verstärkt durch die Verlagerung des Zusammenflusses in Richtung Rampenkopf.

Trotz der hohen Belastung hat das Bauwerk nicht vollständig versagt. Von den ursprünglich 2.5 m Höhendifferenz ist eine wirksame Höhe von 1.5 m verblieben.

3.3 Wiederinstandstellung

Nach dem Hochwasser wurde die Blockrampe teilweise wieder instand gestellt. Die Gerinneverlagerung der Simme wurde nicht rückgängig gemacht. Dafür wurde die Rampe um den Betrag der Gerinneverlagerung gekürzt, so dass der alte Abstand zwischen Zusammenfluss von Kander und Simme und dem Rampenkopf wieder hergestellt ist. In Zukunft muss somit auf die Pufferstrecke verzichtet werden. Wird der Grenzabfluss der Rampe überschritten, verflacht sich die Rampe und die Sohlenhöhe im Oberwasser reduziert sich.

Zur Zeit ist die unterste Sperre in der Kander eingekiest. Wegen der morphologischen Veränderungen im Zusammenflussbereich und wegen des vorübergehend überdurchschnittlichen Geschiebeeintrages hat sich das Sohlengefälle auf dem Abschnitt zwischen Sperren und Blockrampe vergrößert.



Abb. 6: Deformation der Blockrampe durch das Hochwasser 2005. Die Punkte zeigen die Stichprobe der ausgegrabenen Blöcke. Daraus wurde ein Differenzenmodell der tatsächlichen und der projizierten Oberkante der Blöcke gebildet (Konturen durch Kriging-Verfahren ermittelt). Die weißen Linien bezeichnen das linke Ufer der Simme vor und nach dem Hochwasser. Hintergrund: pseudo-entzerrte Schrägaufnahmen.

4 Unterschiede im Verhalten verschiedener Rampentypen

4.1 Versagensmechanismen aufgelöster Rampen

Beim Versagen von aufgelösten Blockrampen sind drei Mechanismen möglich:

1. Auswaschen von Sohlenmaterial zwischen den Blöcken.
2. Abgleiten der Blöcke über den Untergrund.
3. Vollständiges Einsinken der Blöcke in den Untergrund.

Der zweite und der dritte Versagensmechanismus können ausgeschlossen werden, wenn die Kriterien von Raudkivi & Ettema (1982) für das Verhältnis von Blockdurchmesser D (äquivalenter Kugeldurchmesser) und Korngrößen des Untergrundmaterials (d_{90} bzw. d_m) berücksichtigt werden:

$$D / d_{90} > 6 \dots 10 \quad [1]$$

$$D / d_m < 25 \quad [2]$$

Die Erosion der Sohle setzt ein, wenn die Grenzbelastung für die Deckschicht überschritten wird. Parallel zur Erosion der Sohle sinken auch die Blöcke ab. Wenn die oben genannten Kriterien eingehalten werden, bleiben die Blöcke jedoch in die Sohlenoberfläche eingebettet. Durch Erosion flacht sich die Rampe ab, bis ein der Belastung entsprechendes neues Grenzgefälle erreicht wird. Das Grenzgefälle ist dabei eine stetige Funktion der Belastung. Die Rampe reagiert *elastisch* auf eine Mehrbelastung (Abb. 7).

4.2 Versagensmechanismen konventioneller und strukturierter Rampen

Als konventionelle Rampe wird eine Rampe mit lückenlos, in einer oder mehreren Lagen, geschichteten Blöcken bezeichnet. Konventionelle Rampen können nach Whittaker & Jäggi (1986) versagen durch

1. Direkte Erosion der Blöcke aus der Rampe (oder am Rampenkopf).
2. Auswaschen des Untergrundmaterials zwischen den Blöcken.
3. Kolkbildung am Fuß der Rampe und Absinken der untersten Blöcke in den Kolk.

Bei allen Versagensarten geht der Zusammenhalt der Blöcke verloren und das Untergrundmaterial ist plötzlich einer starken Strömungsbelastung ausgesetzt. Die Schwächung der Struktur hat häufig ein Versagen des ganzen Bauwerkes zur Folge. Die Rampe reagiert *starr* auf eine Überlast.

Ein solches Verhalten konnte bei der konventionellen Rampe in der Kander bei Mülenern beobachtet werden. Beim Hochwasser 2005 wurden die Blöcke aus ihrem Verband gerissen. Die Rampe wurde dabei zerstört. Auslöser für das Versagen war möglicherweise eine Unstetigkeit im Aufbau des Blockteppichs, welche durch den Bauablauf bedingt sein könnte (Jäggi, 2006).

Ähnlich wie konventionelle Rampen reagieren strukturierte Rampen. Als solche wird eine Rampe bezeichnet, bei welcher die Blöcke in Strukturen angeordnet sind (Waben, Ringe, "Tausendfüssler", etc.). Dazwischen verbleiben Lücken mit Untergrundmaterial (Semadeni *et al.*, 2004).

Bei diesen Rampen sind grundsätzlich die Versagensmechanismen der aufgelösten als auch der konventionellen Rampen denkbar. Eine Schwächung der Struktur führt häufig zum vollständigen Versagen des Bauwerkes.

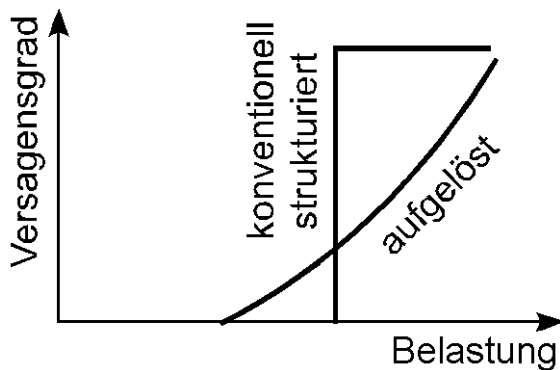


Abb. 7:
Elastisches und starres Verhalten bei Überlast von aufgelösten und von konventionellen oder strukturierten Rampen.

5 Zusammenfassung

Aus den Beobachtungen über die Wirkung der Hochwasser 2005 an den aufgelösten Blockrampen in der Simme und der Kander können die folgenden Schlüsse gezogen werden:

- Aufgelöste Blockrampen lassen sich mit den aufgeführten empirischen Methoden zuverlässig bemessen.
- Die Rampe an der Kander hat elastisch auf die hohe Belastung durch das Hochwasser 2005 reagiert. Trotz Abflüssen, die deutlich über dem Bemessungsabfluss gelegen haben, hat die Rampe ihre ursprüngliche Funktion noch zu drei Fünfteln erfüllt.
- Eine Rampe, die unmittelbar an eine bestehende Schwelle anschließt, ist der Gefahr ausgesetzt, dass durch Setzungen oder lokale Bewegungen

am Rampenkopf der ursprüngliche Absturz hydraulisch wirksam wird und sich am Rampenkopf ein Kolk bildet.

- Die Zuflussbedingungen sind entscheidend für die lokale Belastung in der oberen Hälfte einer Blockrampe. Eine ungleichmäßige Verteilung des Abflusses kann dazu führen, dass die Grenzbelastung örtlich überschritten wird. Eine örtliche Überlast führt aber nicht zum Versagen des gesamten Bauwerkes.

Dank

Die hier vorgestellten Projekte und Untersuchungen konnten im Auftrag des Fischereiinspektorates und des Renaturierungsfonds des Kantons Bern durchgeführt werden.

Referenzen

Günter A. (1971): Die kritische mittlere Sohlenschubspannung bei Geschiebemischungen unter Berücksichtigung der Deckschichtbildung und der turbulenzbedingten Sohlenschubspannungsschwankungen. Mitteilung der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH, 3, Zürich, 69 p.

Jäggi M. (2006): Mündliche Mitteilung.

Künzi R., Hunzinger L. & Jahne D. (2005): Gesamtprojekt Augand - Umsetzung der flussbaulichen Massnahmen. wasser energie luft, 97 (9/10), 279-84.

Raudkivi A. J. & Ettema R. (1982): Stability of Armour Layers in Rivers. Proc. ASCE, J. of Hydr. Div, 108(HY9), 1047-57. zitiert in Whittaker *et al.* (1988)

Semadeni N., Lange D. & Bezzola G. R. (2004): Aufgelöste Blockrampen - Fallbeispiel an der Emme. Interpraevent, Band 4, 269 - 279.

Whittaker J. G., Hickman W. E. & Croad R. N. (1988): Riverbed stabilisation with placed blocks. Central Laboratories, 3-88/3, LowerHutt New Zealand.

Whittaker J. & Jäggi M. (1986): Blockschwellen. Mitteilung der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH, 91, Zürich, 187.

Adresse des Autors

Dr. Lukas Hunzinger
Schälchli, Abegg + Hunzinger
dipl. Ing. ETH/SIA, Fluss- und Wasserbau
Schwarztorstr. 7
CH 3007 Bern
E-mail: sah.be@flussbau.ch

