

Gestaltung effizienter Geschiebesammler anhand physikalischer Modellversuche mit Fallbeispiel

Sebastian Schwindt, Mário J. Franca, Giovanni De Cesare und Anton J. Schleiss

Zusammenfassung

In den vergangenen Jahren haben Hochwasser im Alpenraum die Notwendigkeit von Schutzmaßnahmen vor allem auch auf lokaler Ebene eindringlich in Erinnerung gerufen. Das große Geschiebetransportpotential von Wildbächen kann zu der Zerstörung ganzer Ortschaften führen falls keine entsprechenden Schutzmaßnahmen errichtet wurden. Eine effiziente Schutzmaßnahme ist der Geschieberückhalt mittels Geschiebesammlern oberhalb von Siedlungsgebieten. Geschiebesammler bestehen aus einem Rückhaltebecken und einem unterstrom anschließendem Sperrbauwerk mit Durchlassöffnung. Entscheidend für die nachhaltige Funktionalität des Bauwerks mit geringem Unterhaltsaufwand ist die Dimensionierung der Durchlassöffnung, da effiziente Geschiebesammler nicht nur den Geschieberückhalt garantieren sondern auch die Durchgängigkeit des Geschiebes bis zu kleineren Hochwassern ermöglichen. Geschiebesammler, die zu viel Geschiebe zurückhalten verfügen im Hochwasserfall nicht über ihr volles Rückhaltevolumen und benötigen regelmäßige Unterhaltsmaßnahmen in Form von Ausbaggerungen. Hinzu kommt, dass zu kleine Durchlassöffnungen ein Hindernis für die ökologische Durchgängigkeit von Flüssen darstellen, insbesondere hinsichtlich der Fischpassierbarkeit. Ein generelles Konzept für die hydraulische Gestaltung von Geschiebesammlern existiert nicht und jede Maßnahme benötigt eine individuelle Betrachtung basierend auf der Flusshydraulik, der Gerinnemorphologie sowie den Schutzzielen des Projekts. Im Rahmen der Forschungsarbeit des LCH wird die Beeinträchtigung der Geschiebetransportkapazität durch Sperrbauwerke analysiert, wobei ein Fallbeispiel an der Dranse in Martigny (Wallis, Schweiz) zu der Veranschaulichung der Problematik und Lösungsansätze aufzeigt. Die Eignung passiver Maßnahmen zur Auslösung des ganzen oder teilweisen Geschieberückhalts in Form eines vorgeschalteten Rechens mit breiter Basisöffnung wird anhand eines physikalischen Modells nachgewiesen. Eine rein wissenschaftliche, experimentelle Untersuchung und das Fallbeispiel indizieren eine große Sensibilität des Geschiebetransports auf die Öffnungshöhe von Sperrbauwerken. Ein sinnvoller Lösungsansatz besteht in der Kombination von Durchlassöffnungen, deren Höhe in einem Rahmen von etwa $\pm 20\%$ der Ausgangshöhe von den zuständigen Behörden nach Bedarf reguliert werden kann.

1 Einleitung

Der Hochwasserschutz in alpinen Regionen bedarf nicht nur der Abflussregulierung, sondern auch der Regulierung des Geschiebetransports von Flüssen, da beträchtliche Sedimentvolumina durch die kurzzeitig hohen Abflüsse umgelagert werden können. Im Oberlauf sind Gebirgsbäche charakterisiert durch große Längsgefälle und hohe Verfügbarkeit von Geschiebe. Mit abnehmendem Längsgefälle sinkt auch die Transportkapazität des Gerinnes und der Differenzbetrag zwischen Transportkapazität und eingetragenen Sedimentstrom lagert sich ab. Mit der Abnahme des Längsgefälles nehmen die Möglichkeiten einer Besiedlung der Flussauen zu und damit auch die Gefahr von infrastrukturellen Schäden bei Hochwasser.

Der Gefahr von Geschiebeablagerungen in Siedlungsgebieten kann mit der Errichtung von Geschiebesammlern im Oberstrom zuvor gekommen werden. Dabei wird das Gerinne nach

Möglichkeit aufgeweitet, um Stauraum zu schaffen und das Längsgefälle künstlich zu reduzieren (Hunzinger *et al.*, 1995). Am Ende der Aufweitung besteht die Möglichkeit der Errichtung eines Sperrbauwerkes um den Ablagerungsprozess zu erzwingen. Das Sperrbauwerk besteht aus einem Querdamm mit einer Durchlassöffnung (Dole), deren Größe und Geometrie auf einen bestimmten Bemessungsabfluss ausgelegt ist. Wenn dieser überschritten wird, induziert das Sperrbauwerk einen Rückstau im Gerinne, wodurch die hydraulisch bedingte Ablagerung von Geschiebe verursacht wird. Ein Beispiel für einen klassischen Geschiebesammler mit Ablagerungsplatz (Aufweitung) und Sperrbauwerk ist in Abb. 1 ersichtlich.



Abb. 1 Geschiebesammler mit Ablagerungsplatz und Sperrbauwerk am Jenbach bei Bad Feilnbach (Blickrichtung unterstrom)

Aufgrund der Komplexität des Abflusses steiler Gerinne mit rauer Flusssohle, kombiniert mit Geschiebetransport, ist die Auslegung der Durchlassöffnung ein kritischer Punkt, der bis dato nur teilweise verstanden ist. Der Ausgangswert der Dimensionierung sind die hydraulischen Charakteristika des Normalabflusses eines Dimensionierungshochwassers (meist das hundertjährige Hochwasser HQ 100) und die entsprechende Geschiebetransportkapazität an kritischen Stellen im Unterstrom. Letztere definieren sich durch Siedlungen oder infrastrukturelle Objekte wie Brücken.

Armanini und Larcher (2001) haben einen Zusammenhang zwischen Ablagerungshöhe und Abfluss für schmale, schlitzwandige Durchlassöffnungen etabliert, auf Basis der Geschiebetransportformel von Meyer-Peter und Müller (1948). Aus ökologischer Sicht ist es sinnvoller breite Öffnungen anzuvisieren, da schmale Öffnungen das Fließkontinuum auch bei geringen Abflüssen stören können und damit für Fische und andere aquatische Lebewesen unüberwindbare Hindernisse darstellen. Die allgemeine konstruktive Auslegung von Geschiebesammlern ist umfassend von Bergmeister *et al.* (2009) beschrieben und der aktuelle Stand der Technik bezüglich hydraulischer Gesichtspunkte ist prägnant von Piton und Recking (2016) zusammengefasst. Um die hydraulische Dimensionierung der Durchlassöffnung zu verbessern, werden am LCH (Laboratoire de Constructions Hydrauliques) systematische Versuche durchgeführt. Ohne Bezug zu einem bestimmten Prototyp werden dabei Abflusshindernisse in

einen rauen Versuchskanal seitlich und von der Oberfläche aus eingeschoben, wobei die Abflüsse und die Geschiebezugabe variiert werden. Komplementär wird eine Fallstudie an der Dranse bei Martigny (Wallis, Schweiz) durchgeführt. Im Jahr 2005 hat ein etwa 50 jährliches Hochwasser die Ängste der Einwohner Martignys hervorgerufen und in der Folge wurde ein komplexes Hochwasserschutzprojekt entworfen. Ein elementares Modul des Projekts ist ein Sperrbauwerk in Form einer Schwelle mit Durchlassöffnung im Oberstrom der Dranse, das im Vorfeld theoretisch dimensioniert wurde und durch ein physikalisches Modell des LCH experimentell optimiert wurde.

2 Forschungsbezogener Versuchsaufbau

Der rein wissenschaftliche Teil Forschungsarbeit basiert auf einem Versuchsstand ohne Bezug zu einem bestimmten Prototyp.

2.1 Beschreibung des Modells

In einem 2,5 m langen Zulaufgerinne wird das Geschiebe dem Pumpenabfluss beigegeben um bei Eintritt in den eigentlichen Versuchskanal optimal etablierte Randbedingungen zu erreichen. Entlang des Versuchskanals befinden sich 5 Ultraschallsonden zur Messung der Fließtiefe, wobei zwischen den letzten beiden Sonden die Abflusshindernisse in Form einer Einschnürung, bzw. einer Dole durch PVC Elemente eingeführt werden. Unterstrom des Versuchskanals wird das Geschiebe in einem Korb abgefangen und permanent gewogen. Der Versuchsaufbau mit der Einschnürung in Form von PVC Elementen ist in Abb. 2 dargestellt.

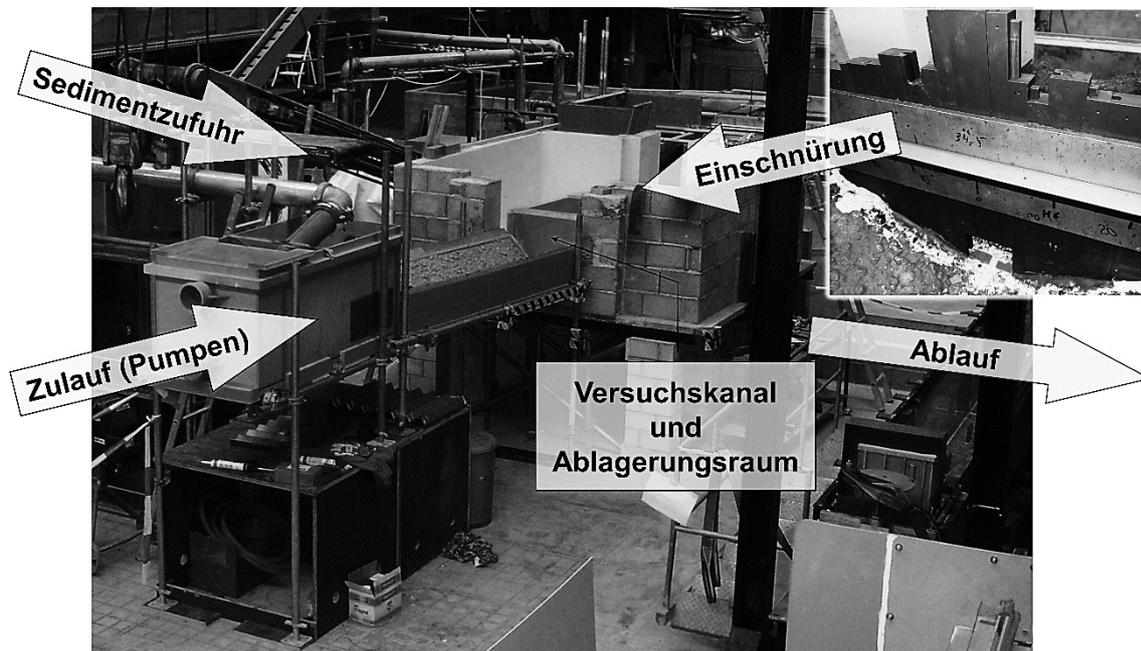


Abb. 2 Versuchsaufbau mit Einblendung der Einschnürung in Form von PVC Elementen.

Das Geschiebe ist charakterisiert durch $D_{30} = 4,1$ mm, $D_{50} = 5,3$ mm, $D_m = 8$ mm, $D_{84} = 13$ mm, $D_{90} = 14$ mm und $D_{max} = 21$ mm. Der trapezförmige Kanal hat eine Basisbreite von $0,12 \pm 0,03$ m und eine Uferneigung von $23,9 \pm 0,9^\circ$ mit einem Längsgefälle von etwa $2 \pm 0,5$ %. Die lokalen Abweichungen sind rauigkeitsbedingt, da der Versuchskanal mit Körnern größer als D_{84} des Geschiebes ausgekleidet ist.

2.2 Ablauf und Ziel der Experimente

In einer Reihe von Vorversuchen werden die Gerinnerauigkeit und die Transportkapazität des Versuchskanals ohne Abflusshindernis analysiert. Die Transportkapazität ist definiert durch die höchste Geschiebetransportrate, welche gerade noch keine Ablagerungen im Gerinne verursacht. In der Folge werden Abflusshindernisse in Form von seitlichen Einschnürungen und vertikalen Abflussbegrenzungen (Dolen, ähnlich eines Schützwehrs) eingeführt und deren Einfluss auf die Geschiebetransportkapazität analysiert.

2.3 Versuchsergebnisse

2.3.1 Gerinnehydraulik

Die Gerinnehydraulik wird insbesondere hinsichtlich der Rauigkeit in Form des Stricklerbeiwerts K_{st} analysiert. Der Wert ist in Abb. 3 in Abhängigkeit des Abflusses ohne und mit Geschiebetransport dargestellt.

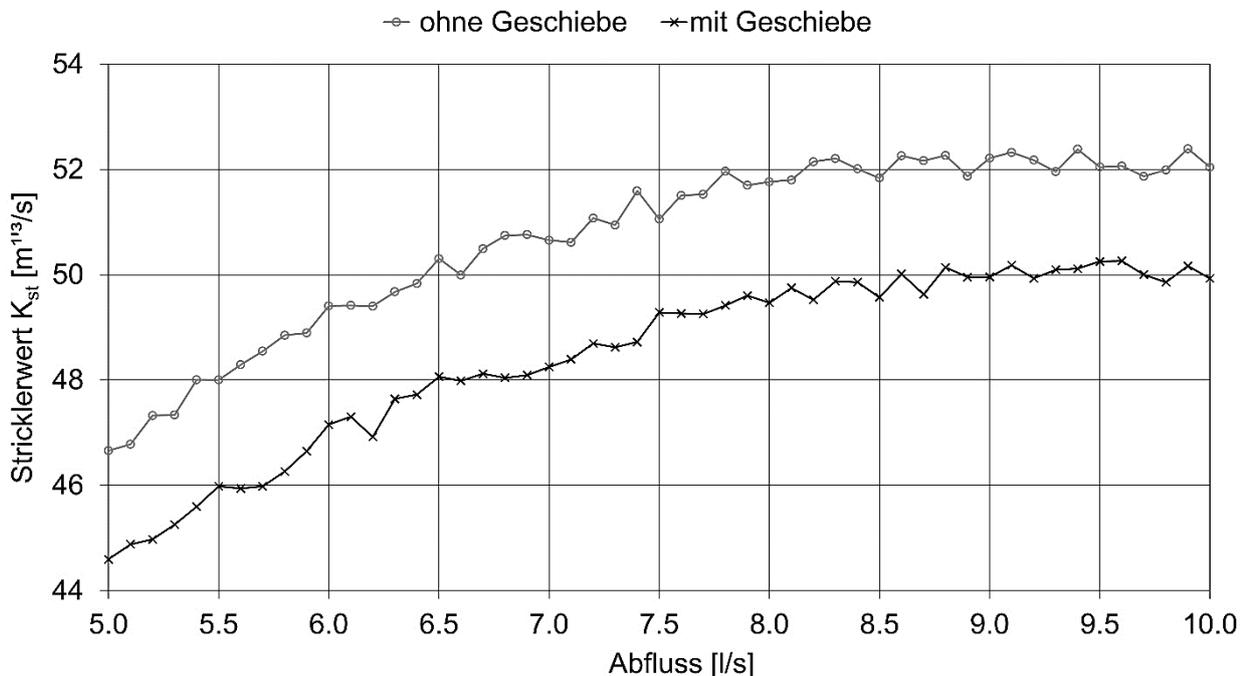


Abb. 3 Messungen des Stricklerbeiwerts K_{st} in Abhängigkeit des Abflusses, ohne und mit Geschiebetransport.

Die Ermittlung der Werte beruht auf einer numerischen Simulation (1D) unter Verwendung eines Newton Raphson Algorithmus zur Berechnung der Abflusstiefen, die auf die Messwerte der 5 Ultraschallsonden durch den Stricklerbeiwert angepasst wurde (Chapra und Canale, 2010). Die ermittelten Werte steigen mit dem Abfluss und erreichen bei etwa 8 l/s ein Plateau auf $K_{st} \approx 52 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ ohne Geschiebe und auf $K_{st} \approx 50 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ mit Geschiebe, was eine höhere Gerinnerauigkeit bei der Präsenz von Geschiebe indiziert.

Die gemessenen Werte sind etwa 20 % größer als der Wert gemäß der empirischen Formel nach Strickler (1923), wie aus Glg. [1] hervorgeht.

$$k_{st} \approx 21,1 / D_{90}^{1/6} \approx 43 \text{ m}^{1/3}/\text{s} \quad [1]$$

Das Abflussregime des Gerinnes ist über die Gesamtheit des Abflussspektrums im superkritischen Bereich ($Fr > 1$).

Mit der gewonnenen Information ist es möglich, die dimensionslose kritische Sohlschubspannung (Shieldparameter) mit $\tau_{crit}^* = 0,55$, sowie den Geschiebetransport im ungestörten Gerinne theoretisch zu berechnen. Die Formel von Smart und Jaeggi (1983) erweist sich als am besten geeignet um die Geschiebetransportkapazität des Versuchskanals zu berechnen. Verglichen wurden außerdem die Ergebnisse der Formeln von Meyer-Peter und Müller (1948), Recking (2010, 2013) und Rickenmann (1990).

2.3.2 Einfluss von Einschnürungen und Dolen auf die Geschiebetransportkapazität

Im Rahmen der Vorversuche wurde auch die Geschiebetransportkapazität $Q_{b,max}$ des unbehinderten Gerinnes ermittelt. Der Rückgang von $Q_{b,max}$ ist in Abb. 4 auf Basis des ungestörten Gerinnes verglichen mit dem Einfluss von a) vertikalen, dolenartigen Abflussbegrenzungen und b) seitlichen Einschnürungen, wobei ebenso die jeweiligen Trendkurven eingezeichnet sind.

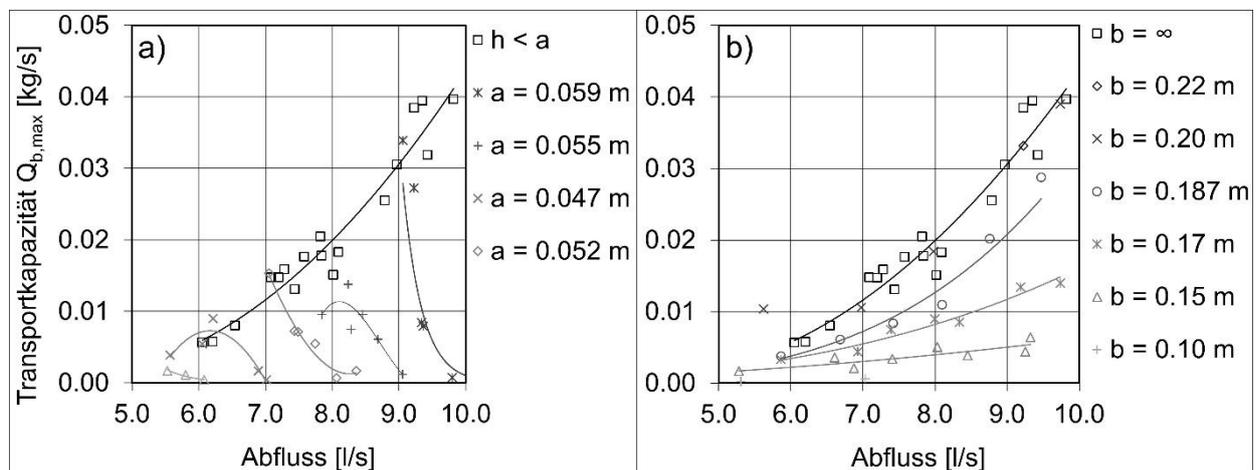


Abb. 4 Geschiebetransportkapazität $Q_{b,max}$ in Abhängigkeit des Abflusses, a) mit vertikaler, dolenartiger Abflussbegrenzung und b) mit seitlicher Einschnürung.

Die Geschiebetransportkapazität reagiert empfindlich auf bereits geringe vertikale Oberflächenbegrenzungen. Mit geringfügiger Berührung zwischen der Wasseroberfläche und den PVC Elementen bildet sich zunächst eine Bugwelle, deren Höhe mit der Energiehöhe angenähert werden kann (Piton und Recking, 2016), wobei der Geschiebetransport kaum beeinflusst wird. Werden die Elemente nur wenige Millimeter weiter abgesenkt (etwa 15-20 % der Abflusstiefe), kommt der Geschiebetransport nahezu vollständig zum Erliegen. Bei seitlichen Einschnürungen wird der Geschiebetransport erst bei deutlich größeren Behinderungen beeinflusst, beginnend bei etwa 85 % der maximalen Querschnittsbreite. Erst bei seitlichen Einschnürungen, die kleiner als etwa 25 % der maximalen Querschnittsbreite sind, kommt der Geschiebetransport nahezu vollständig zum Erliegen.

3 Fallstudie der Dranse bei Martigny

Im Rahmen eines komplexen Hochwasserschutzprojekts mit Revitalisierungsmaßnahmen des Flusslaufs der Dranse bei Martigny wurde ein Sperrbauwerk in Form einer Schwelle mit Durchlassöffnung anhand eines physikalischen Modells optimiert (LCH, 2016).

3.1 Beschreibung der Fallstudie und des physikalischen Modells

Das Modell wurde im geometrischen Maßstab von 1:42 errichtet, unter Berücksichtigung der Ähnlichkeitsabbildungen der Froudezahl und des Geschiebetransports. Der modellierte Gerinneabschnitt ist etwa 800 m lang, wobei das Längsgefälle von 2,4 % bis 3,2 % und die Gerinnebreite zwischen 8 m und 17 m variieren. Es kommen zwei Sedimentmischungen zur Anwendung mit unterschiedlichen Korngrößenverteilungen (Schwindt *et al.*, 2016). Die gröbere Mischung dient der Nachbildung des rauhen Flussbetts (Größtkorn von 85 cm) und die feinere Mischung dient der Modellierung des Geschiebetransports (Größtkorn von 45 cm). Die geographische Lage und das Gelände des Projektbereichs sind in Abb. 5 dargestellt.

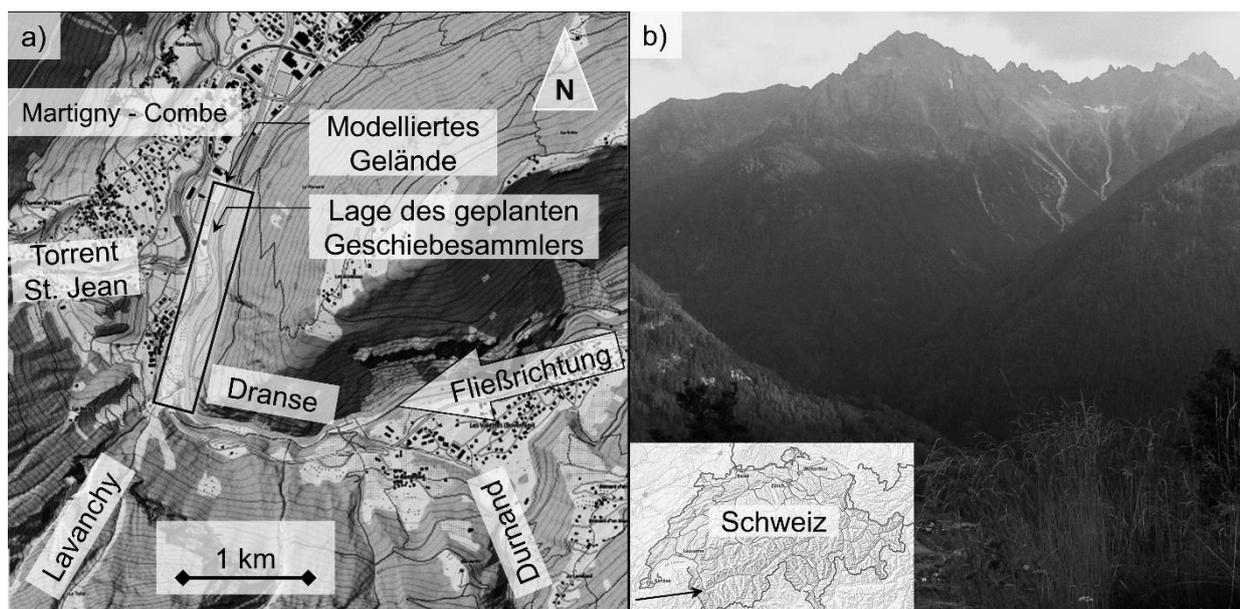


Abb. 5 a) Geographische Lage des Geschiebesammlers (mit Erlaubnis von *Swisstopo* JA100120) und b) Foto des Einzugsgebiets der Dranse.

3.2 Ziel und Ablauf der Studie

Das übergeordnete Ziel ist der Ausbau des Hochwasserschutzes und die teilweise Renaturierung der Dranse im Bereich der Gemeinden Martigny und Martigny-Combe. Teil des Konzeptes ist ein Geschiebesammler in Form eines Schwellenbauwerks mit einer Dole deren geplante Öffnung 4 m breit und 2,5 m hoch ist, um ungehinderten Abfluss ohne Beeinflussung des Geschiebetransports des durchschnittlichen Jahresabflusses zu ermöglichen. Da das geplante Bauwerk sich in einer Gerinnekurve befindet und der Geschiebetransport nur begrenzt numerisch ermittelt werden kann wegen der steilen Natur der Dranse, ihres Einzugsgebiets und der Rauhigkeit der Flusssohle, ist ein physikalisches Modell notwendig um die Funktionalität des Schwellenbauwerks zu prüfen und zu optimieren. Explizit von Interesse sind das Tosbecken unterstrom der Schwelle und die Durchlassöffnung (Dole) der Schwelle, die ursprünglich mittels eines Systems von multiplen Wehren hydraulisch kontrolliert werden sollte. In diesem Artikel wird lediglich und insbesondere auf die Dole eingegangen, die anhand der Simulation eines hundertjährigen Hochwassers mit Geschiebetransport optimiert wurde (Schwindt *et al.*, 2016). Die Abfluss- und Geschiebeganglinie der Experimente basieren auf einem (50 jährlichen) Hochwassers im Jahr 2005 (vgl. Abb 6).

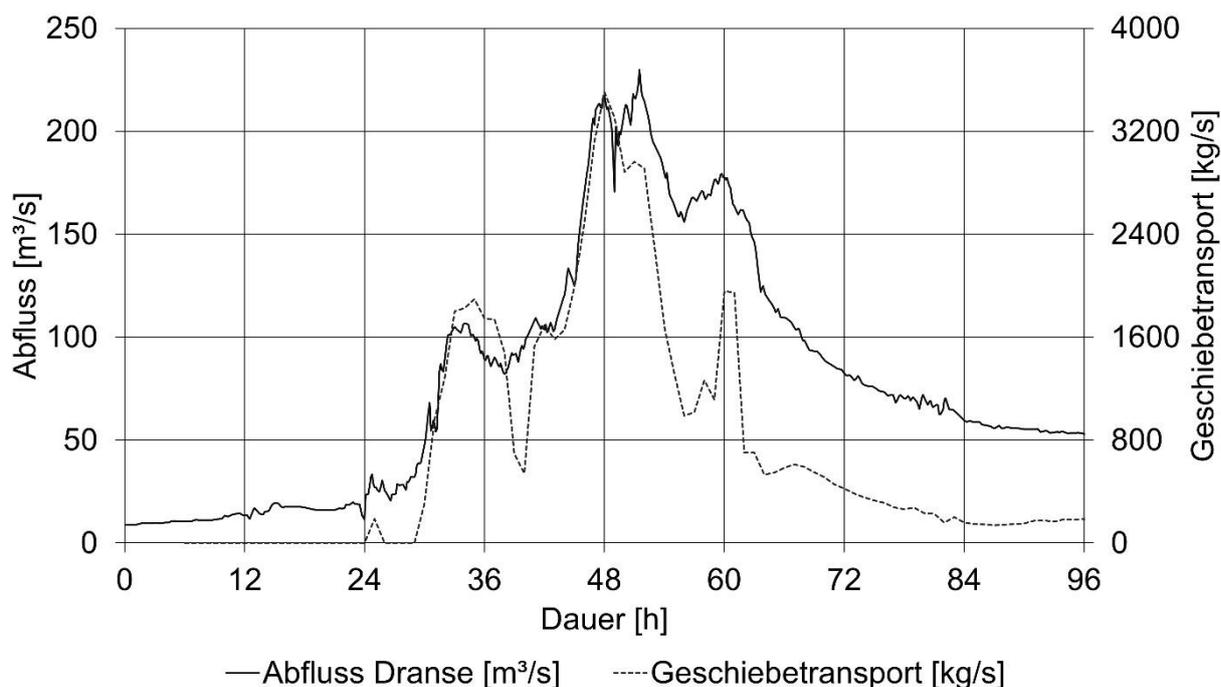


Abb. 6 Abfluss- und Geschiebeganglinie eines hundertjährigen Hochwassers der Dranse (Realmaßstab, Quelle: IDEALP SA).

Die Dauer des Hochwassers beziffert sich auf etwa 2,5-3 Tage im Realmaßstab und etwa 8 Stunden im Modellmaßstab. Das Geschiebe wurde gemäß der Ganglinie im Modellmaßstab (Faktor $1/42^{2.5}$) jede Minute und kiloweise hinzugegeben.

Gemessen werden die Lage des Wasserspiegels durch 10 Ultraschallsonden sowie das Gewicht der Sedimente, die das Modell passieren und unterhalb des Modells in Kunststoffsäcken abgefangen werden (LCH, 2016).

3.3 Versuchsergebnisse

Die ursprüngliche Konfiguration der Dole (Abb. 7 a) wurde getestet unter der Hypothese des Versagens des Schließmechanismus (Wehrsystem), d.h. mit voller Öffnung der Dole. Der Schließmechanismus ist notwendig um bei Gefahr (großes Hochwasser mit Geschiebetransport) den Verschluss der Dole und damit den Geschieberückhalt zu garantieren.

Die Experimente zeigen, dass die offene Dole den Rückhalt von lediglich 1/3 des zugegebenen Geschiebes erlaubt. Gleichzeitig entsteht Rückstau schon bei Abflüssen, die geringfügig höher als der durchschnittliche Jahresabfluss sind. Statistisch gesehen wird der Geschiebetransport dadurch an etwa jedem zweiten Tag eines Jahres (50 % der Zeit) beeinflusst.

Die naheliegende Optimierung der Dole liegt in ihrer Verbreiterung, bei gleichzeitiger Verringerung der Öffnungshöhe, wobei die Abflusskapazität der ursprünglichen Geometrie erhalten bleibt. Zusätzlich wurde ein vorgeschalteter Rechen mit einer Basisöffnung von 12 m Breite und variabler Höhe (0,9 – 1,3 m) getestet, um das Verschließen der Dole durch Verklauung herbeizuführen, anstatt der Regulierung durch ein teures und unterhaltintensives Wehrs (Abb. 7 b).

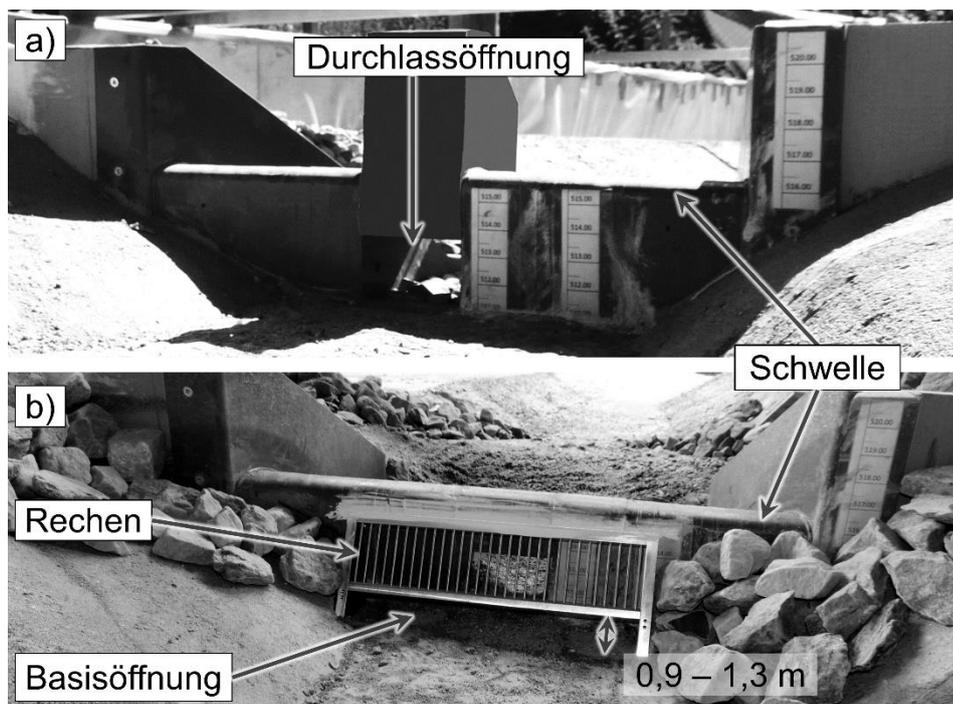


Abb. 7 a) Darstellung der Ausgangsvariante der Dole und b) Dole mit vorgeschaltetem Rechen und 12 m breiter Basisöffnung.

Als Schlüsselparameter für die Verkläuerung der Öffnungen erweist sich die Regulierung der Höhe der Basisöffnung des Rechens. Das Projekt sieht eine Aktivierung (Verschluss, bzw. Verkläuerung der Dole) ab einem Abfluss über $90 \text{ m}^3/\text{s}$ vor, wobei dann die ungestörte Abflusstiefe in etwa $1,1 \text{ m}$ beträgt. Die Verkläuerung der Basisöffnung des Rechens konnte bei entsprechender Konfiguration ($1,1 \text{ m}$ Öffnungshöhe) mit dem Eintreffen der Geschiebefront im Modellversuch bestätigt werden, wobei Schwemmholz nicht berücksichtigt wurde. Der Geschieberückhalt kann auf etwa 42% erhöht werden (LCH, 2016).

Unter Berücksichtigung von Modellfehlern und des Auftretens von Schwemmholz, ist es empfehlenswert, bei der Realisierung des Projekts die Basisöffnungshöhe des Rechens variabel zu gestalten. Dadurch können die Verantwortlichen Behörden die Verkläuerung der Öffnung der Schwelle anpassen, mittels Absenkens, um die Verkläuerung eher herbeizuführen, bzw. durch Erhöhung, um mehr Geschiebe und Schwemmholz passieren zu lassen.

4 Synthese und Schlussfolgerungen

Die Dimensionierung der Auslassöffnung von Sperrbauwerken zum Rückhalt des Geschiebes von Wildbächen im Hochwasserfall ist mit komplexen hydraulischen Phänomenen verbunden. Die experimentelle Forschung am rein wissenschaftlichen Versuchsstand zeigt, dass der Geschiebetransport deutlich ausgeprägter auf Begrenzungen der Wasseroberfläche reagiert, als auf seitliche Einschnürungen. Durch die Limitierung der Abflusstiefe um ca. $10 - 15 \%$ des Dimensionierungsabflusses, kommt der Geschiebetransport nahezu vollständig zum Erliegen. Seitliche Begrenzungen haben den gleichen Effekt auf den Geschiebetransport in einem breiteren Einschnürungsspektrum, wobei sich die Geschiebetransportkapazität auf nahezu null reduziert in einem Einschnürungsspektrum von 75% bis 30% der maximalen Breite des ungestörten Abflussquerschnitts.

Der wissenschaftliche Versuchsstand und die Fallstudie der Dranse zeigen, dass Einschnürungen auf weniger als 1/3 der natürlichen Gerinnebreite mit nahezu permanentem Rückstau verbunden sind. Dadurch wird Geschiebe auch dann abgelagert, wenn es im Unterstrom keine negativen Effekte verursacht und als Substrat sowie für die Gerinnestabilität fehlt. Die große Empfindlichkeit des Geschiebetransports auf Abflussoberflächenbegrenzungen wird durch die Fallstudie an der Dranse bestätigt.

Für die Dimensionierung von Auslassöffnungen von Wildbachsperrern zum Geschieberückhalt ist es deshalb empfehlenswert Öffnungen mit einer Mindestbreite von ca. 1/3 der Maximalbreite des Fließquerschnitts des ungestörten Normalabflusses zu entwerfen und dabei die Höhenbegrenzung variabel zu halten. Aus hydraulischen Gesichtspunkten empfiehlt es sich, die Öffnungshöhe nicht geringer als 20 % des Dimensionierungsabflusses zu halten.

Danksagung

Die Forschungsarbeit wird durch das Schweizer Bundesamt für Umwelt (BafU) finanziert. Die Fallstudie der Dranse wurde durch die örtlichen Behörden tatkräftig unterstützt. Die strukturellen Verbesserungen der geplanten Schwelle in der Dranse wurden maßgeblich konzeptioniert von Dr. Jean-Louis Boillat, dem ehemaligen Codirektor des LCH.

Literatur

- Armanini, A.; Larcher, M. (2001). Rational criterion for designing opening of slit-check dam, *Journal of Hydraulic Engineering*, 127, 94-104
- Bergmeister, K.; Suda, J.; Hübl, J.; Rudolf-Miklau, F. (2009). *Schutzbauwerke gegen Wildbachgefahren: Grundlagen, Entwurf und Bemessung*, John Wiley & Sons, 2009.
- Chapra, S. C.; Canale, R. P. (2010). *Numerical Methods for engineers*, Mc Graw Hill, 6. Auflage 2010.
- Hunzinger, L.; Hunziker, R.; Zarn, B. (1995) Der Geschiebehaushalt in lokalen Aufweitungen, *Wasser Energie Luft*, 87, 195-200.
- LCH – Laboratoire de Constructions Hydrauliques (2016). Protection contre les crues et renaturation de la Drance – Etude sur modèle physique d'un barrage filtrant. Rapport LCH, 01/2016, unveröffentlicht.
- Meyer-Peter, E.; Müller, R. (1948). Report on the 2nd Meeting International Association Hydraulic Structure Research Stockholm: Formulas for Bed-load transport, Sweden, 1948.
- Piton, G.; Recking, A. (2016). Design of Sediment Traps with Open Check Dams. I: Hydraulic and Deposition Processes, *Journal of Hydraulic Engineering*, 142, 1-16.
- Recking, A. (2010). A comparison between flume and field bedload transport data and consequences for surface based bedload transport prediction, *Water Resources Research*, 46, W03518.
- Recking, A. (2013). Simple method for calculating reach-averaged bed-load transport, *Journal of Hydraulic Engineering*, 139, 70-75.
- Rickenmann, D. (1990) Bedload transport capacity of slurry flows at steep slopes, *Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich*, 103, 1990.

- Schwindt, S., De Cesare, G., Boillat, J.-L., Schleiss, A. (2016). Physical modelling optimization of an open check dam in Switzerland. INTERPRAEVENT, Luzern, 2016.
- Smart, G. M., Jaeggi, M. N. R. (1983). Sedimenttransport in steilen Gerinnen, Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich, 64, 1983.
- Strickler, A. (1923). Beiträge zur Frage der Geschwindigkeitsformel und der Rauigkeitszahlen für Ströme, Kanäle und geschlossene Leitungen, Mitteilungen des Amtes für Wasserwirtschaft, 16, 1923.

Anschrift der Verfasser

M.Sc. Sebastian Schwindt, Dr. Mário J. Franca, Dr. Giovanni De Cesare und Prof. Anton J. Schleiss
Laboratoire de Constructions Hydrauliques, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne
Station 18, CH-1015 Lausanne
sebastian.schwindt@epfl.ch
mario.franca@epfl.ch
giovanni.decesare@epfl.ch
anton.schleiss@epfl.ch