

Teildurchgängige Geschiebesammler für sicheren Rückhalt

Geschiebesammler halten oft bei kleineren Hochwassern unnötig Geschiebe zurück. Dadurch wird die öko-morphologische Gewässerkontinuität unterbrochen. Beobachtet werden zudem oft gefährliche, selbsttätige Entleerungen. Durch den Einsatz eines Leitgerinnes im Rückhalteraum von Geschiebesammlern und einem Abschlussbauwerk mit vorgelagertem Grobrechen können die Geschiebedurchgängigkeit bei geringem Abfluss erhöht und der sichere Geschieberückhalt bei Hochwasser verbessert werden.

Sebastian Schwindt, Mário J. Franca und Anton J. Schleiss

1 Einsatzbereich und Funktionsweise von Geschiebesammlern

Hochwasserereignisse in Wildbächen stellen nicht nur wegen ihres plötzlichen Auftretens eine Gefahr für Siedlungen und Infrastrukturbauten dar. Die erhöhten Abflüsse können zusätzlich große Geschiebemengen mobilisieren. Oft können diese großen Geschiebefrachten in verbauten Strecken des Unterlaufs nicht abgeführt werden. Dies kann zu unerwünschten Geschiebeablagerungen und gefährlichen Ausuferungen in Siedlungsgebieten mit erheblichen Schäden führen.

Aus Gründen des Hochwasserschutzes wurden viele Wildbäche bereits vor mehr als 150 Jahren korrigiert [11]. Dabei wurden in Kombination mit Sperrentreppen zur Erosionssicherung Geschiebesammler für den Geschieberückhalt durch eine Flussaufweitung mit einem teildurchlässigen Abschlussbauwerk errichtet, wie in **Bild 1** anhand eines Beispiels gezeigt ist. Das Abschlussbauwerk ist eine massive Betonsperre mit einem oder mehreren Durchlässen für die Durchleitung von Abflüssen und Geschiebe, das im Unterlauf noch problemlos abgeführt werden kann.

Der aufgeweitete Rückhalteraum und das Abschlussbauwerk führen zu Rückstau und einer Reduktion des energetischen Abflussgefälles bei Hochwasser, wodurch die Ablagerung von Geschiebe herbeigeführt wird. Dieser Vorgang entspricht dem Prinzip des hydraulisch kontrollierten Geschieberückhalts. Parallel oder alternativ dazu kann der Geschieberückhalt auch mechanisch kontrolliert werden, mittels der Verlegung der Öffnung (-en) des Abschlussbauwerks durch Grobmaterial [3], [12], [4]. Für konventionelle Geschiebesammler sind verschiedene Bemessungskriterien erarbeitet worden [1], [4].

Kompakt

- Ein Leitgerinne im Rückhalteraum eines Geschiebesammlers verbessert die Geschiebedurchgängigkeit für kleinere Hochwasser.
- Ein Durchlass im Abschlussbauwerk mit vorgelagertem Grobrechen verhindert selbsttätige Entleerungen.

Diese konventionellen Konzepte sind jedoch problematisch hinsichtlich öko-morphologischer Anforderungen, da oft der Geschiebedurchgang in den Unterlaufs sowie die Fischdurchgängigkeit des Gewässers unterbrochen werden. Im Rahmen eines Forschungsprogramms wurde ein neues Konzept für sichere Geschiebesammler entwickelt, welche neben dem sicheren Geschieberückhalt bei Hochwasser auch die Geschiebe- und Fischdurchgängigkeit bis zu kleineren, bettbildenden Abflüssen ermöglichen [5].

2 Problematik der selbsttätigen Entleerung und Gewässerdurchgängigkeit

Bei funktionellem Versagen des Geschiebesammlers besteht die Gefahr sogenannter selbsttätiger Entleerungen während Hochwasserereignissen. Unter selbsttätiger Entleerung wird das unerwünschte, plötzliche Ausspülen zuvor abgelagerten Geschiebes durch die Durchlässe des Abschlussbauwerks während eines Hochwassers verstanden. Dies wurde beispielsweise in der Schweiz am Geschiebesammler Stiglisbrücke (Uri) oder in Österreich am Schnannerbach (Tirol) beobachtet. Um selbsttätigen Entleerungen zuvorzukommen, werden die Durchlässe des Abschlussbauwerks oft konservativ ausgelegt, wodurch die Gewässerkontinuität bereits bei kleineren, ungefährlichen Hochwassern unterbrochen wird.

Der Widerspruch zwischen sicherem Geschieberückhalt und Gewässerdurchgängigkeit wurde in der jüngeren Praxis, beispielsweise am Schannerbach in Österreich, durch die Anordnung mit Schützen ausgerüsteter Durchlässe angegangen, um die Öffnungsabmessungen im Hochwasserfall zu verringern. Die Errichtung solcher gesteuerten Geschiebesammler in geschiebetransportintensiven Flüssen ist mit erheblichen Kosten verbunden und zudem können rechtliche Probleme bezüglich der Steuerung der Durchlassöffnung bestehen. Beispielsweise ist die Frage der Schadenshaftung in Folge zu später Betätigung der Schützen im Hochwasserfall strittig.

Im Folgenden wird ein selbstständig funktionierendes Konzept für Geschiebesammler beschrieben, welches die Durchgängigkeit kleinerer, bettbildender Hochwasserabflüsse gewährleis-



Bild 1: Geschiebesammler am Jenbach (Bayrische Voralpen) mit Blick vom Ablagerungsplatz in Richtung des Abschlussbauwerks

tet, aber selbsttätige Entleerungen verhindern. Das neue Konzept basiert auf systematischen hydraulischen Modellversuchen im Rahmen einer Forschungsarbeit [5].

3 Hauptelemente des verbesserten Konzepts

Ein erweitertes Konzept für Geschiebesammler ist in **Bild 2** gezeigt mit folgenden Elementen (geordnet in Fließrichtung):

- (1) Einlaufschwelle in den Rückhalteraum mit Kolkschutz;
- (2) Rückhalteraum in einem aufgeweiteten Flussabschnitt für die Geschiebeablagerung;
- (3) Leitgerinne für den Geschiebedurchgang durch den Rückhalteraum und die Sperre bis zum Auftreten des Bemessungshochwassers (im Folgenden als Durchgängigkeitsabfluss bezeichnet), ab welchem der Geschieberückhalt erfolgen muss;
- (4) Unterhaltungszufahrt;
- (5) Teildurchgängiges Abschlussbauwerk (Rückhaltesperre) mit Durchlass und vorgelagertem Grobrechen;
- (6) Kolkschutz mit Gegenschwelle.

Vor der Bemessung eines Geschiebesammlers sind eine ortsspezifische Gefahrenanalyse sowie die Beurteilung von Risiko- und Schadmechanismen notwendig. Auf die statische Bemessung der Rückhaltesperren wird hier nicht eingegangen. Hinweise dazu befinden sich in Bergmeister et al. [1].

Auch wenn Geschiebesammler ausschließlich dem Sedi-mentrückhalt dienen, ist eine abflussbasierte Bemessung sinnvoll. Dementsprechend sollte ein maximaler Durchgängigkeitsabfluss definiert werden, der dem höchsten Abfluss entspricht, dessen Geschiebefracht im Unterlauf gefahrlos abgeführt werden kann. Dabei sollte die zusätzliche Abflusstiefe infolge des Geschiebetransports berücksichtigt werden [8]. Die rele-

vante Korngröße des mobilen Geschiebes kann durch Korngrößenanalysen von Sedimentablagerungen an den Ufern des Oberlaufs bestimmt werden, wobei das Flussbett selbst wesentlich gröber ist. Die Geschiebefracht von Abflüssen, die höher als der Durchgängigkeitsabfluss sind, sollten demnach im Rückhalteraum zurückgehalten werden.

4 Hinweise zur Anordnung und Bemessung der Hauptelemente

4.1 Rückhalteraum

Der verfügbare Rückhalteraum (Element 2 gemäß Bild 2) ist oft durch die Geländetopographie begrenzt. Andernfalls kann die Form des Rückhalterauts durch seitliche Dämme angepasst werden. Dadurch kann das Verhältnis von Länge zu Breite opti-

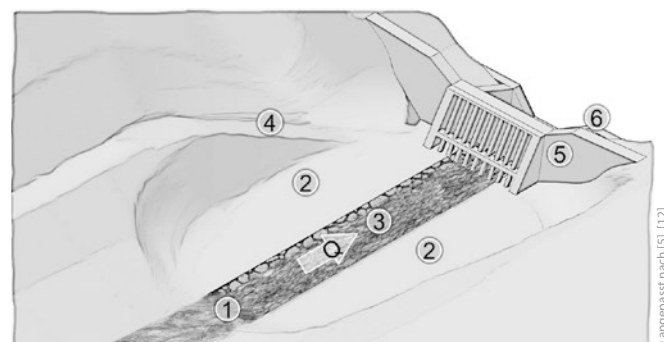


Bild 2: Erweitertes Konzept für teildurchgängige, zuverlässige Geschiebesammler bestehend aus: (1) Einlaufschwelle, (2) Rückhalteraum, (3) Leitgerinne (4) Unterhaltungszufahrt, (5) Teildurchgängiges Abschlussbauwerk mit Durchlass und vorgelagertem Grobgeschieberechen, (6) Kolkschutz mit Gegensperre

miert werden, basierend auf der Speichereffizienz des Rückhalteraums. Aus früheren Studien [12] ist bekannt, dass die Speichereffizienz höher wird, wenn die Länge des Rückhalteraums zunimmt. Allerdings steigt mit größerer Länge auch das Risiko von selbsttätigen Entleerungen. Um eine gute Speichereffizienz zu erreichen und gleichzeitig das Risiko selbsttätiger Entleerungen gering zu halten, schlägt Zollinger [12] birnenförmige Rückhalteräume vor, wobei das Verhältnis zwischen Länge und maximaler Breite in etwa 4:3 betragen sollte. Das Längsgefälle des Rückhalteraums sollte wenn möglich dem Gefälle zu schützender Abschnitte des Unterlaufs entsprechen.

Das verfügbare Rückhaltevolumen hängt von der Fläche des Rückhalteraums und insbesondere der Höhe des Abschlussbauwerks ab.

Piton und Recking [4] schlagen eine iterative Bemessung des erforderlichen Rückhaltevolumens von Geschiebesammlern vor. Dies setzt jedoch voraus, dass die Größe des Rückhalteraums frei wählbar ist. In der Praxis ist dies nur selten der Fall und die Wahl der Höhe des Abschlussbauwerks (Rückhaltesperre) ist die einzige Möglichkeit, um das Rückhaltevolumen zu beeinflussen.

Zusätzliches Rückhaltevolumen im Oberlauf des Geschiebesammlers kann durch die Berücksichtigung des Ablagerungsgefälles J_{dep} (Bild 3) erhalten werden, welches konservativ in erster Näherung als Funktion des natürlichen Gerinnegefälles J_n abgeschätzt werden kann zu:

$$J_{dep} = \frac{1}{2} \cdot J_n \quad (3)$$

Bei intensivem Geschiebetransport ergeben sich ein größeres Ablagerungsgefälle J_{dep} und damit auch ein größeres Rückhaltevolumen.

4.2 Leitgerinne

Die wichtige Bedeutung des Leitgerinnes wurde durch systematische hydraulische Modellversuche identifiziert [5]. Das Leitgerinne (Element 3 gemäß Bild 2) dient der morphologischen und hydraulischen Kontrolle des Abflusses im Rückhalteraum bis zum Erreichen des Durchgängigkeitsabflusses. Dabei sollte das Leitgerinne eine stabile und raue Sohle haben, ähnlich einer Blockrampe, was durch die Verwendung von groben Blöcken erreicht wird [9]. Diese sollten einen Mindestkorndurchmesser haben, der dem D_{90} der Flusssohle des Oberlaufs entspricht. Es

ist zu beachten, dass die Flusssohle von Wildbächen durch Pflasterungseffekte wesentlich gröber sein kann als das mobile Geschiebe. Das Längsgefälle des Leitgerinnes sollte dem des Rückhalteraums J_0 entsprechen sowie einen trapezförmigen Querschnitt haben mit einer Seitenneigung von etwa 1:1,75 (30°), wie in Bild 4 dargestellt ist. Das Leitgerinne sollte einen randvollen Abfluss entsprechend des Durchgängigkeitsabflusses mit Geschiebetransport haben.

Unter Annahme von Normalabfluss im Leitgerinne, kann die notwendige Gerinnetiefe mittels des Chézy-Rauheitsbeiwerts berechnet werden. Der Geschiebetransport im Leitgerinne bis zum Erreichen des Durchgängigkeitsabflusses kann beispielsweise mit der VAW-Formel [8] berechnet werden, wobei als maßgebende Korngröße diejenige des mobilen Geschiebes verwendet werden sollte. Die Blöcke der Sohle des Leitgerinnes sollten mit möglichst rauer Oberfläche in Beton verlegt werden, um Erosion zu vermeiden. Dies ermöglicht auch das Ausräumen des Geschiebesammlers ohne das Leitgerinne zu beschädigen.

Das Leitgerinne kann durch die erwähnte Sohlenrauigkeit auch für die Fischdurchgängigkeit optimiert werden, wobei die mittlere Fließgeschwindigkeit bei häufig auftretenden Abflüssen für Forellen geringer als 1 m/s sein sollte, bei einer Mindestabflusstiefe von 0,3 m [10]. Für schwimmschwache Fische können entsprechende Kriterien der Fachliteratur bezüglich der Bemessung von Blockrampen und Fischpässen entnommen werden (z. B. [2], [9], [10]).

4.3 Abschlussbauwerk (Rückhaltesperre) mit Durchlass und Grobrechen

Das teildurchgängige Abschlussbauwerk ist maßgebend für die Funktionstüchtigkeit des Geschiebesammlers. Diese kann durch einen geneigten Grobrechen, welcher dem Durchlass des Abschlussbauwerks vorgelagert ist, erreicht werden (Bilder 3 und 4). Dadurch wird der kombinierte mechanische und hydraulische Geschieberückhalt ermöglicht, was die Funktionsfähigkeit des Geschiebesammlers erhöht.

Der Grobrechen, bestehend aus vertikalen Stäben, verstärkt durch einen massiven Horizontalträger, sollte eine Neigung von 2:1 (ca. 63,5°) aufweisen. Der mechanisch bedingte Geschieberückhalt durch den Grobrechen wird erreicht, falls die lichte Stabweite entsprechend des D_{90} des mobilen Geschiebes gewählt wird. Unterhalb des Rechens sollte gegenüber der Sohle des

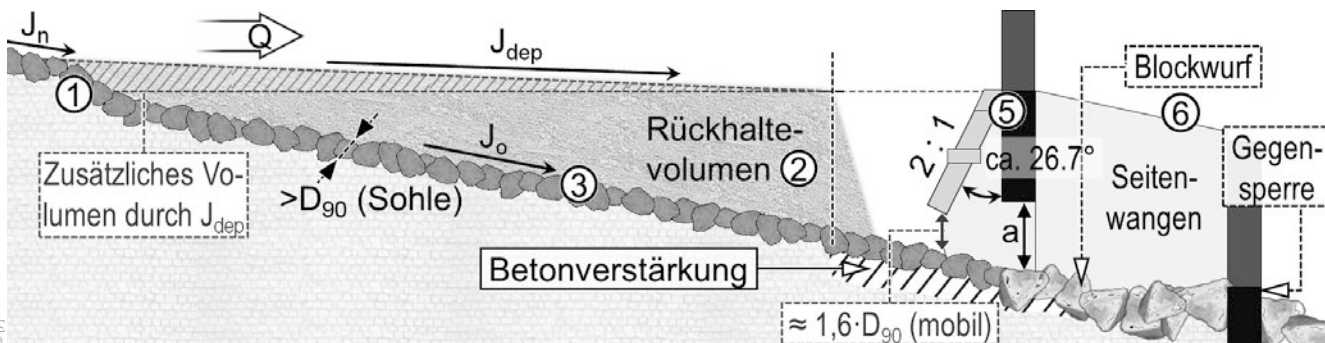


Bild 3: Längsschnitt durch den Geschiebesammler mit Andeutung eines Ablagerungsdepots sowie des natürlichen Gerinnegefälles J_n und des Ablagerungsgefälles J_{dep} ; die Elemente des Geschiebesammlers sind gemäß Bild 2 dargestellt

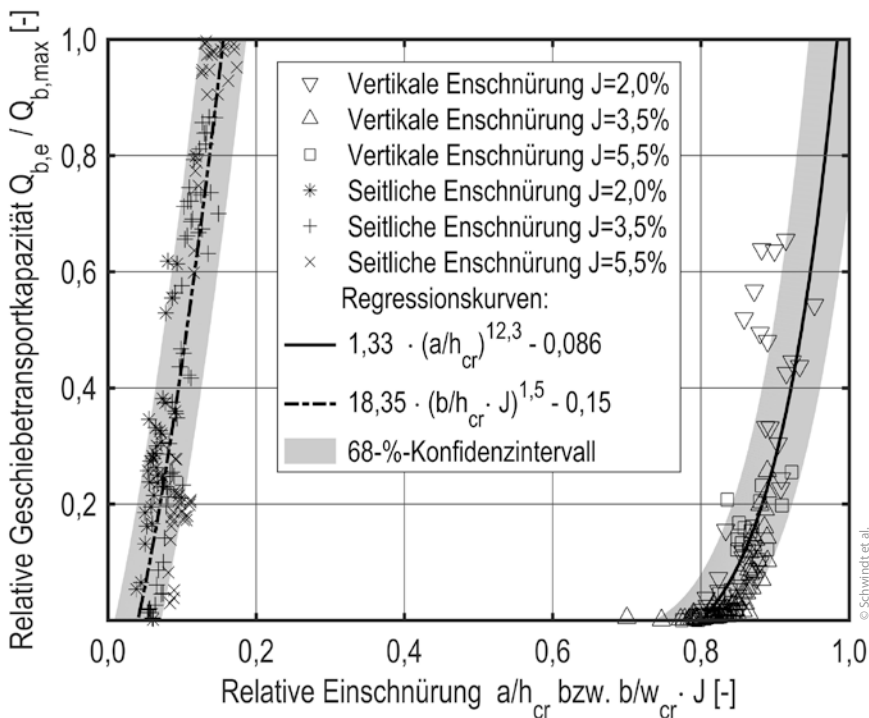


Bild 5: Reduktion der Geschiebetransportkapazität (hydraulisch bedingter Geschieberückhalt) in Funktion der normierten Durchlasshöhe a bzw. -breite b ; die Normierung erfolgt durch die kritische Abflusstiefe h_{cr} und, im Fall freien Abflusses im Durchlass, zusätzlich durch das Gefälles J_0 des Leitgerinnes

tung sollte sichergestellt werden, dass auch extreme Hochwasser, sogenannte Sicherheitshochwasser, gemäß geltenden rechtlichen Vorgaben abgeführt werden können.

4.4 Kolkenschutz und weitere konstruktive Hinweise

In steilem Gelände kann durch das flachere Längsgefälle J_0 im Rückhalteraum ein Höhenunterschied am oberen Ende eines Geschiebesammlers entstehen. In diesen Fällen ist eine Einlaufschwelle (Element 1 gemäß Bild 2) notwendig, um den Höhenunterschied an der Einmündung des Oberlaufs zu überwinden. Diese Querswellen können jedoch durch regelmäßigen, kontinuierlichen Geschiebetransport zugeschüttet werden, wodurch beträchtlicher Totraum im Geschiebesammler entsteht. In der Folge sind oft teure Ausräumarbeiten notwendig. Gleichzeitig unterbrechen Querbauwerke die Gewässerkontinuität. Deshalb

werden Einlaufschwellen in der Praxis möglichst vermieden oder, wenn unabdingbar, durch Blockrampen ersetzt [12], [10].

Eine Zufahrt zum Rückhalteraum (Element 4 gemäß Bild 2) sollte in der Nähe des Abschlussbauwerks eingerichtet werden für Unterhaltsarbeiten und die Ausräumung abgelagerten Geschiebes nach einem Hochwasser. Das Fahrbahngefälle sollte maximal 10 % und die Fahrbahnbreite mindestens 3,5 m betragen. Die seitlichen Böschungen aus Lockermaterial unter- und oberhalb der Fahrbahn sollten nicht steiler als 2:3 sein.

Die Bemessung des Kolkschutzes (Element 6 in Bild 2) mit Seitenwangen und der gegebenenfalls notwendigen Gegen Schwelle sollte für das Sicherheitshochwasser vorgenommen werden. Dies gilt insbesondere für hohe Sperren, die unter die Talsperrenverordnung fallen. Die Breite des Kolkbeckens sollte mindestens dem 1,5-fachen der Breite der Überfallsektion des Abschlussbauwerks entsprechen. Die erforderliche Mindestlänge L_a des Kolkbeckens kann nach Angerholzer wie folgt bestimmt werden [1]:

$$L_a = [u_0 + (2g h_u)^{0,5}] \cdot (\Delta H/g)^{0,5} + h_u \quad (3)$$

Wobei u_0 der Zuflussgeschwindigkeit (in m/s) des Sicherheitshochwassers bei gefülltem Rückhalteraum entspricht. ΔH ist die Absturzhöhe und h_u ist die kritische Abflusstiefe über der Überfallsektion. Bei geringer Zuflussgeschwindigkeit ($\ll 1$ m/s) kann u_0 vernachlässigt und die notwendige Länge kann vereinfacht nach Müller abgeschätzt werden [1]:

$$L_a = 4 \cdot (\Delta H \cdot h_u^3)^{0,5} \quad (4)$$

Das Kolkbecken kann mit Blöcken gegen Erosion geschützt werden, die allenfalls in Beton verlegt sind. Die erforderliche Blockgröße zur Beschränkung der Erosionstiefe kann mit entsprechenden Kolkformeln bestimmt werden [1].

Sebastian Schwindt, Mário J. Franca and Anton J. Schleiss

Partially permeable sediment traps for safe bed load retention

Conventional sediment traps mainly consist of a deposition area with a downstream open check dam to retain bed load during hazardous floods. But sediment deposition is often already triggered during non-hazardous floods, thus interrupting the eco-morphological river continuity. Moreover, the functional failure of sediment traps due to unwanted sediment flushing may cause severe damages at downstream reaches. The implementation of a guiding channel through the deposition area and a combination of hydraulic and mechanical bed load retention can avoid the existing problems. The bed load transport through the open check dam is ensured by the guiding channel until its bank-full discharge is exceeded. Then the permeable check dam is obstructed and imposes the fail-safe bed load retention in the deposition area without the risk of unwanted flushing. For the design of the guiding channel and the open check dam, it has to be distinguished between structural and travelling bed load.

5 Schlussbemerkungen

Die Anordnung eines Leitgerinnes im Rückhalteraum eines Geschiebesammlers ist der Schlüssel für eine teilweise Geschiebedurchgängigkeit, welche bis zu für den Unterlauf unkritischen Hochwasserabflüssen gewünscht ist (Durchgängigkeitsabfluss). Das Leitgerinne konzentriert den Abfluss und verhindert so die unerwünschte allmähliche Verlandung des Rückhalteriums bei kleineren, bettbildenden Hochwassern. Kostspielige regelmäßige Ausräumarbeit können so reduziert werden. Dadurch wird auch die Geschiebedurchgängigkeit verbessert, was vorteilhaft für eine natürliche morphologische Entfaltung des Unterlaufs ist. Gleichzeitig sichert das Leitgerinne das rechtzeitige Anspringen des Abschlussbauwerks und das Auslösen des Geschieberückhalts.

Mit dem vorgeschlagenem Konzept kann eine kontrollierte, teilweise selbsttätige Entleerung von Geschiebesammlern mechanisch nach einem Hochwasser herbeigeführt werden. Dazu muss die (mechanische) Verklauung des Abschlussbauwerks durch Freilegen und allenfalls Anheben der Stäbe gelöst und eine Eintiefung durch Aushub entlang der Längsachse des Leitgerinnes erzeugt werden. In der Folge können kleine Hochwasser, die in etwa dem Durchgängigkeitsabfluss entsprechen, das Leitgerinne zunehmend freispülen [5].

Der Grobrechen alleine für mechanisch bedingten Geschieberückhalt ist anfällig bezüglich der charakteristischen Korngröße für die Bemessung der Stababstände. Sollte das mobile Geschiebe jedoch ereignisbedingt feiner sein als erwartet, dann wird allenfalls der Stabrechen alleine nicht verlegt und der Geschieberückhalt findet nicht statt. Diese Gefahr des Nichtanspringens wird durch den Durchlass in der Rückhaltesperre verringert, welcher den hydraulisch kontrollierten Rückhalt erzwingt. Der Durchlass in der Rückhaltesperre erzeugt einen Rückstau, so dass sich eine Ablagerungsfront bildet, die bei Erreichen des Grobrechens zu dessen mechanischem Verklauen führt. Die verlässliche Funktionsweise dieser Kombination von Durchlass und vorgeschaltetem Rechen bei Abschlussbauwerken wurde experimentell nachgewiesen, selbst wenn das Geschiebe bis zu 50 % feiner war als für die Bemessung des Stabrechens angenommen wurde [7].



Geschiebesammler

Dachroth, W.; Heinrichs, M.: Geologie und Wasserbau. In: Handbuch der Baugeschiebe und Geotechnik. Berlin Heidelberg: Springer Spektrum, 2017.
www.springerprofessional.de/link/13197230

Kammerlander, J.; et al.: Geschiebehaushalt in kleinen Hochgebirgsbächen der Nordtiroler Zentralalpen. In: Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, Ausgabe 03-04/2017. Wien: Springer, 2017.
www.springerprofessional.de/link/12116340

Ein Durchlass im Abschlussbauwerk alleine, das heißt ohne vorgelagerten Grobrechen birgt die Gefahr von unerwünschten selbsttätigen Entleerungen. Dies konnte experimentell beobachtet werden, wenn Abflüsse getestet wurden, die zu gleichzeitigen Über- und Durchströmen des Durchlasses von Rückhaltesperren mit geringer Höhe führten. Durch das Vorschalten des Grobrechens konnten unter gleichen Abflussbedingungen selbsttätige Entleerungen verhindert werden [5]. Es ist jedoch zu beachten, dass der Rechen basierend auf der Korngröße des mobilen Geschiebes und nicht bezüglich der abgeplätsterten Sohle oder des Schwemmholzdurchmessers bestimmt wird.

Autoren

Dr. Sebastian Schwindt

University of California
 95616 Davis, Kalifornien, USA
sschwindt@ucdavis.edu

Prof. Dr. Mário J. Franca

IHE Delft Institute for Water Education
 Delft, 2611, Niederlande
m.franca@un-ihe.org

Prof. Dr. Anton J. Schleiss

EPFL-ENAC-LCH
 Station 18
 1015 Lausanne, Schweiz
anton.schleiss@epfl.ch

Literatur

- [1] Bergmeister, K.; Suda, J.; Hübl, J.; Rudolf-Miklau, F.: Schutzbauwerke gegen Wildbachgefahren: Grundlagen, Entwurf und Bemessung, Beispiele. Berlin: Ernst & Sohn, 2009.
- [2] Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (Hrsg.): Fischauftiegsanlagen und fischpassierbare Bauwerke – Gestaltung, Bemessung, Qualitätssicherung. In: DWA-Merkblätter (2014), M 509.
- [3] Leys, E.: Die technischen und wirtschaftlichen Grundlagen in der Wildbachverbauung der großdoligen und der kronenoffenen Bauweise. Wien: Universität für Bodenkultur, 1976.
- [4] Piton, G.; Recking, A.: Design of Sediment Traps with Open Check Dams. I: Hydraulic and Deposition Processes. In: Journal of Hydraulic Engineering 142 (2016), No. 2, S. 1-16.
- [5] Schwindt, S.; Franca, M. J.; Schleiss, A. J.: Hydro-morphological processes through permeable sediment traps. EPFL thèse n° 7 655. Lausanne Ecole Polytechnique fédérale de Lausanne, 2017.
- [6] Schwindt, S.; Franca, M.; Schleiss, A. J.: Bottom slope influence on flow and bedload transfer through contractions. In: Journal of Hydraulic Research (2017) [akzeptierter Artikel].
- [7] Schwindt, S.; Franca, M.; De Cesare, G.; Schleiss, A. J.: Analysis of mechanical-hydraulic deposition control measures. In: Geomorphology 295 (2017), S. 467 - 479.
- [8] Smart, G. M.; Jaeggi, M. N. R.: Sedimenttransport in steilen Gerinnen. Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie an der ETH Zürich, No. 64, 1983.
- [9] Studer, M.; Schleiss A. J.: Analyse von Fließgeschwindigkeiten und Abflusstiefen auf verschiedenen Typen von Blockrampen. In: WasserWirtschaft 101 (2011), Heft 1-2, S. 67-71.
- [10] Tamagni, S.: Unstructured block ramps. Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich 223, 2013.
- [11] Wang, F.: Grundriss der Wildbachverbauung. Zweiter Theil. Leipzig: Verlag von S. Hirzel, 1903.
- [12] Zollinger, F.: Die Vorgänge in einem Geschiebeablagerungsplatz: ihre Morphologie und ihre Möglichkeiten einer Steuerung. Dissertation der ETH Zürich, No. 7 419, 1983.