



**INGENIEURBIOLOGIE  
GÉNIE BIOLOGIQUE  
INGEGNERIA NATURALISTICA  
INSCHENIERA BIOLOGICA**



**GESCHIEBE UND  
SCHWEBSTOFFE**

**CHARRIAGE ET  
SÉDIMENTS FINS**

**MATERIALE SOLIDO  
E IN SOSPENSIONE**

# Inhalts- verzeichnis

## **Titelbild/Frontispice:**

Frontseite: Eier eines Flussregenpfeifers. Foto: Fabian Peter, AquaPlus AG.

Rückseite: Aua da Fedoz. Foto R. Bänziger

Photo page de couverture : Œufs d'un petit gravelot.

Photo : Fabian Peter, AquaPlus AG.

Photo dernière page : Aua da Fedoz. Photo R. Bänziger, Bänziger Kocher Ingenieure AG

Frontespizio: Uove d'un pivièr dagli anelli.

Foto: Fabian Peter, AquaPlus AG.

Foto ultima pagina: Ova da Fedoz. Foto R. Bänziger, Bänziger Kocher Ingenieure AG.

<b>3</b>	Editorial	Robert Bänziger
<b>5</b>	Geschiebesanierung: Die Zutat für Dynamik und Strukturen im Fluss	Manuel Nitsche
<b>14</b>	Die Bedeutung von Geschiebe und Schwebstoffen für die Lebewelt im und am Bach	Fredy Elber AquaPlus AG Zug
<b>28</b>	Einfluss der Klimaerwärmung auf den Sedimenttransport in Fließgewässern	Aurelian Schumacher Andrea Kristin Bachmann Jürg Speerli
<b>37</b>	Simulation der Morphodynamik von Fließgewässern	David Vetsch Lukas Vonwiller Davide Vanzo
<b>44</b>	Erfahrungen aus und Grenzen von physikalischen Murgangversuchen	Andrea Kristin Bachmann Jürg Speerli Aurelian Schumacher
<b>55</b>	Geschiebe und Schwebstoffe berücksichtigen in kleinen und mittleren Gewässerprojekten; Berichte aus der und für die Praxis.	Martin Schibli Daniel Zimmermann



# Editorial

Robert Bänziger

## Liebe Leserin, lieber Leser

In diesem Sommer 2021 war das Thema «Hochwasser» nach grossen Unwetterereignissen vor allem in Deutschland in aller Munde. Welche wichtige Rolle erodierte, transportierte und abgelagerte Feststoffe bei solchen Ereignissen spielen: Diese Frage ging im vielen Wasser sozusagen ebenfalls unter. Geschiebe und Feststoffe sind jedoch von entscheidender Bedeutung, und dies nicht nur im Zusammenhang mit Hochwassersicherheit und Unwetterschäden. Sie prägen das Erscheinungsbild (Morphologie) und Dynamik unserer Fliessgewässer und ermöglichen Biodiversität. Ein kompetenter Umgang mit der Feststoffproblematik in der Planung und Umsetzung von Wasserbauprojekten ist deshalb für uns Menschen und die weiteren Bewohner der Gewässerlebensräume von überlebenswichtiger Bedeutung. Dieses Heft widmet sich diesem wichtigen Thema.

Manuel Nitsche (BAFU) gibt einen Überblick über die Bedeutung, die geschichtliche Entwicklung, die gesetzlichen Anforderungen und den aktuellen und künftigen Umgang mit Geschiebe aus Sicht des Bundes. Fredy Elber (AquaPlus AG) führt uns in die biologischen Aspekte dieses wunderbaren Lebensraumes ein. Andrea Kristin Bachmann, Jürg Speerli (beide Ingenieurbüro Speerli GmbH) und Aurelian Schumacher fassen in einem ersten Artikel die Grundlagen des Sedimenttransports zusammen und zeigen die voraussichtlichen Auswirkungen der Klimaerwärmung auf dieses Themenfeld. Wie man die Wirkung von Projekten auf Feststofftransport, Morphologie usw. voraussagen und Projekte somit optimieren kann, zeigen David Vetsch, Davide Vanzo (beide ETHZ, VAW) und Lukas Vonwiller (Wasser und Morphologie Engineering GmbH) für numerische Modelle, insbesondere für das Programmpaket «Basement». Andrea Kristin Bachmann, Jürg Speerli (beide Ingenieurbüro Speerli GmbH) und Aurelian Schumacher zeigen, wie dies mit physikalischen Modellen für Murgangereignisse geht. Abgerundet wird dieser bunte Strauss an Informationen durch einen Beitrag von Martin Schibli und Daniel Zimmermann (Niederer + Pozzi Umwelt AG). Sie zeigen uns auf, wie man diese vielen Informationen und Kenntnisse ganz konkret umsetzen kann.

Dank dem grossen Einsatz kompetenter Autorinnen und Autoren ist ein spannendes und lehrreiches Heft entstanden. Es beleuchtet ein wichtiges Thema aus verschiedenen Blickwinkeln und stärkt unsere persönliche Fachkompetenz als Wasserbaufachleute.

Ich wünsche Ihnen eine unterhaltsame und lehrreiche Lektüre.  
Robert Bänziger

## Chère lectrice, cher lecteur,

Lors de cet été 2021, le thème des « crues » était sur toutes les lèvres après de grosses intempéries, notamment en Allemagne. Quel rôle important jouent les solides érodés, charriés et déposés lors de tels événements : cette question s'est également perdue dans l'eau, pour ainsi dire. Cependant, le charriage et les matières solides sont d'une importance cruciale, et pas seulement en ce qui concerne la protection contre les crues et les dégâts dus aux intempéries. Ils façonnent l'apparence (morphologie) et la dynamique de nos cours d'eau et permettent la biodiversité. Une gestion compétente de la problématique des matières solides dans la planification et la mise en œuvre des projets d'aménagement hydraulique est donc d'une importance vitale pour nous, les humains, et pour les autres habitants des habitats aquatiques. Ce bulletin est consacré à ce thème important.

Manuel Nitsche (OFEV) donne un aperçu de l'importance, de l'évolution historique, des exigences légales et du traitement actuel et futur des charges de fond du point de vue de la Confédération. Fredy Elber (AquaPlus AG) nous présente les aspects biologiques de ce merveilleux habitat. Andrea Kristin Bachmann, Jürg Speerli (Ingenieurbüro Speerli GmbH) et Aurelian Schumacher résumant dans un premier article les bases du transport des sédiments et montrent les effets probables du réchauffement climatique dans ce domaine. David Vetsch, Davide Vanzo (tous deux de l'EPFZ, VAW) et Lukas Vonwiller (Wasser und Morphologie Engineering GmbH) montrent comment prévoir l'effet des projets sur le transport des sédiments, la morphologie, etc. et ainsi optimiser les projets pour les modèles numériques, en particulier pour le paquet de programmes « Basement ». Andrea Kristin Bachmann, Jürg Speerli (Ingenieurbüro Speerli GmbH) et Aurelian Schumacher montrent comment cela peut être fait avec des modèles physiques pour les laves torrentielles.

Ce bouquet coloré d'informations est complété par une contribution de Martin Schibli et Daniel Zimmermann (Niederer + Pozzi Umwelt AG). Ils nous montrent comment mettre en pratique cette mine d'informations et de connaissances.

Grâce au grand engagement d'auteur(e)s compétent(e)s, un bulletin passionnant et instructif a été réalisé. Il éclaire un sujet important sous différents angles et renforce nos compétences professionnelles personnelles en tant qu'experts en aménagement hydraulique.

Je vous souhaite une lecture divertissante et instructive.  
Robert Bänziger

## Cara lettrice, caro lettore

In questa estate 2021, il tema delle "alluvioni" era presente dappertutto dopo i grandi eventi temporaleschi, soprattutto in Germania. Non è chiaro quale ruolo gioca il materiale solido eroso, trasportato e depositato durante questi eventi: anche questa domanda è stata portata via da tutta quell'acqua, per così dire. Tuttavia, il materiale solido di fondo e il materiale in sospensione sono di importanza cruciale non solo in relazione alla sicurezza delle inondazioni e ai danni da temporali. Infatti, modellano l'aspetto (morphologia) e la dinamica dei nostri corsi d'acqua e favoriscono la biodiversità. Una gestione competente del problema del materiale solido nella pianificazione e realizzazione di progetti di ingegneria idraulica è quindi di vitale importanza sia per noi esseri umani che per gli abitanti degli habitat acquatici. Questa edizione è dedicata a questo importante argomento.

Manuel Nitsche (UFAM) fornisce una panoramica sull'importanza, lo sviluppo storico, le disposizioni legali e la gestione attuale e futura del trasporto solido dal punto di vista della Confederazione. Fredy Elber (AquaPlus AG) ci introdurrà agli aspetti biologici di questo incredibile habitat. Andrea Kristin Bachmann, Jürg Speerli (Ingenieurbüro Speerli GmbH) e Aurelian Schumacher riassumono le basi del trasporto dei sedimenti in un primo articolo e mostrano i probabili effetti del riscaldamento del clima su questa area tematica. David Vetsch, Davide Vanzo (entrambi ETHZ, VAW) e Lukas Vonwiller (Wasser und Morphologie Engineering GmbH) mostrano come prevedere l'effetto dei progetti sul trasporto dei sedimenti, la morfologia, ecc. e quindi ottimizzare i progetti e i loro modelli numerici, in particolare per il programma "Basement". Andrea Kristin Bachmann, Jürg Speerli (Ingenieurbüro Speerli GmbH) e Aurelian Schumacher descrivono invece come questo può essere fatto con modelli fisici per eventi di flusso di detriti.

Questa grande palette di informazioni è completata da un contributo di Martin Schibli e Daniel Zimmermann (Niederer + Pozzi Umwelt AG). Ci mostrano come mettere in pratica questa grande quantità di informazioni e conoscenze.

Grazie al grande impegno di autori competenti, è stata prodotta un'edizione appassionante e istruttiva. Fa luce su un argomento importante da diversi punti di vista e rafforza la nostra personale competenza professionale come esperti di ingegneria idraulica.

Vi auguro una lettura divertente e informativa.  
Robert Bänziger

# Geschiebe- sanierung: Die Zutat für Dynamik und Strukturen im Fluss

Manuel Nitsche

## Zusammenfassung

Geschiebedefizite sind mitverantwortlich für den Biodiversitätsverlust in unseren Gewässern. Über Jahrhunderte wurde Geschiebe zumeist als Naturgefahr und Managementproblem wahrgenommen. Das hatte auch negative Folgen für die Gewässer. Mit der Revision des Gewässerschutzgesetzes 2011 bot sich die Chance und die Pflicht, diejenigen Anlagen zu sanieren, die den Geschiebehaushalt wesentlich beeinträchtigen. Um die natürlichen Funktionen der Gewässer wiederherzustellen, braucht es aber auch Revitalisierungen und ausreichend Gewässerraum, damit sich wieder naturnahe Strukturen und Dynamik im Gewässer einstellen, die für unsere bedrohten einheimischen Arten lebenswichtig sind. Dass Geschiebesanierungen wirken, zeigen erste Messkampagnen bei Sanierungsprojekten.

## Keywords

Geschiebesanierung, Gewässerschutzgesetz, Renaturierung der Gewässer, Biodiversität

## Assainissement du charriage : l'ingrédient pour la dynamique et les structures dans le cours d'eau

### Résumé

Les déficits de charriage sont en partie responsables de la perte de biodiversité dans nos cours d'eau. Pendant des siècles, le charriage a surtout été perçu comme un danger naturel et un problème de gestion. Cela a également entraîné des conséquences négatives pour les cours d'eau. La révision de la loi sur la protection des eaux en 2011 a offert la possibilité et l'obligation d'assainir les installations nuisant considérablement au régime de charriage. Toutefois, afin de rétablir les fonctions naturelles des cours d'eau, des revitalisations et un espace suffisant réservé au cours d'eau sont également nécessaires afin que des structures et une dynamique proches de la nature puissent se rétablir dans le cours d'eau, ce qui est vital pour nos espèces indigènes menacées. Les premières campagnes de mesures effectuées dans le cadre de projets d'assainissement montrent que les assainissements des charges de fond sont efficaces.

### Mots-clés

Assainissement du charriage, loi sur la protection des eaux, renaturation des cours d'eau, biodiversité.

HOWOLIS



**Drenoroll Drainagerohr**  
Die Drainage mit Schweizer Holz.

**Drenoroll tube de drainage**  
Le drainage avec du bois suisse.

**Drenoroll tubo di drenaggio**  
Il drenaggio con legno svizzero.

**Lindner**  
suisse

produziert von | produit par | prodotto da:  
Lindner Suisse GmbH | CH-9630 Wattwil  
holzvolle@lindner.ch | www.lindner.ch







## Risanamento del trasporto solido: l'ingrediente per più dinamica e strutture in alveo

### Riassunto

Il deficit di materiale solido è una delle cause della perdita di biodiversità nelle nostre acque superficiali. Per secoli, il trasporto di materiale solido è stato percepito soprattutto come un pericolo naturale e un problema da gestire. Questo ha avuto anche conseguenze negative per le acque. La revisione della legge sulla protezione delle acque nel 2011 ha offerto l'opportunità e l'obbligo di riabilitare le opere che compromettono significativamente il trasporto di materiale solido. Per ripristinare le funzioni naturali dei corsi d'acqua, tuttavia, sono necessari anche la rivitalizzazione e uno spazio sufficiente per i corsi d'acqua, in modo che le strutture e le dinamiche quasi naturali, che sono vitali per le nostre specie native in pericolo, possano ricrearsi. Le prime campagne di misurazione nei progetti realizzati mostrano che il risanamento del trasporto solido è una misura efficace.

### Parole chiave

Risanamento trasporto solido, Legge sulla protezione delle acque, Rinaturazione dei corsi d'acqua, Biodiversità.

## 1. Einleitung

Der Boden von Gewässern ist ein Flickenteppich aus Sand, Kies und Steinen. Der Fluss zerrt unwiderstehlich an den Körnchen und reisst Teile des Teppichs heraus. Wenn die Kräfte bei Hochwasser grösser werden, werden ganze Schichten abgetragen und wieder neu lagern sich ab. Für Tiere und Pflanzen im Wasser, denen der Geschiebeteppich als wohliger Lebensraum, Brutstätte und Refugium dient, ist es ein Leben im permanenten Wandel. Als würde ihnen jedes Jahr die Wohnungseinrichtung zerstört. Aber sie sind auf diese wilde Dynamik spezialisiert, mehr noch: sie sind darauf angewiesen. Dynamik hängt von vielen Faktoren ab. Geschiebe ist eine Zutat, an der es heute in zahlreichen Gewässerabschnitten mangelt. Wie in vielen Teilen der Welt, wo Flussdeltas und Küsten erodieren, weil die Flüsse wegen Wasserkraftnutzung und Kiesausbeutung weniger Feststoffe transportieren [Syvitski 2005], so leiden auch einige unserer Schweizer Gewässer unter den Folgen von Geschiebedefiziten [Schälchli und Hunzinger 2005]. Aber der Umgang mit Geschiebe ändert sich.

## 2. Umgang mit Geschiebe über die Jahrhunderte

In der Lebenserfahrung der Menschen war und ist Geschiebe aber vor allem eine Naturgefahr (Abbildung 1). Bis ins 18. Jahrhundert nahmen die Flusssanrainer noch kaum direkt Einfluss auf das Gewässer und schützten sich

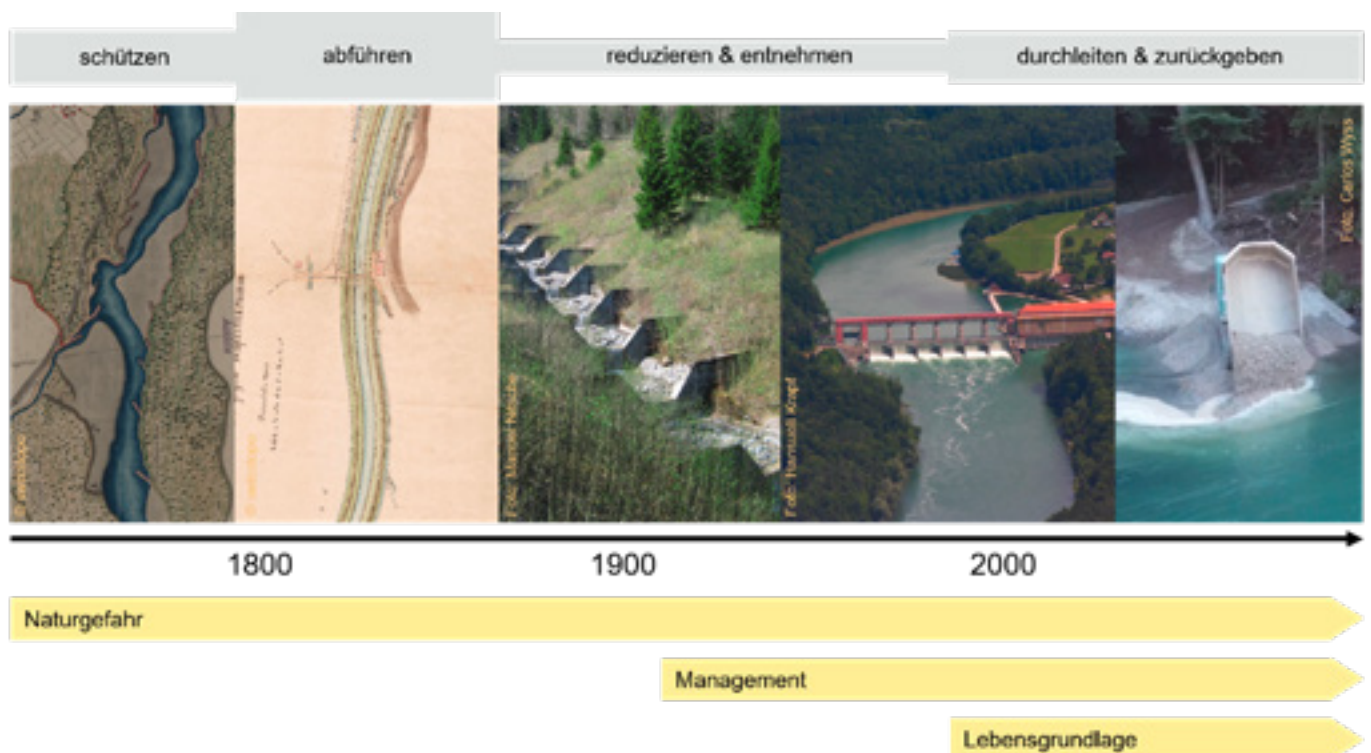


Abbildung 1: Dominante Strategien [oben] und Wahrnehmung [unten] im Umgang mit Geschiebe über die Jahrhunderte. | Figure 1 : Stratégies dominantes [en haut] et perceptions [en bas] dans la gestion de la charge sédimentaire au fil des siècles.

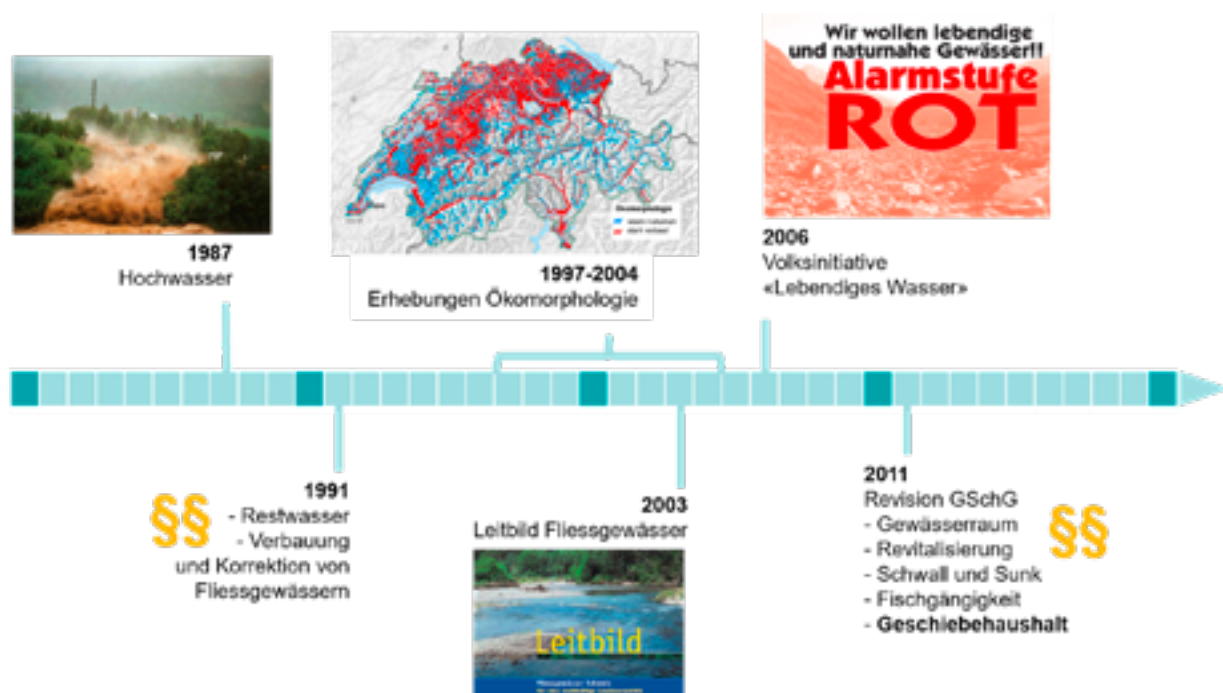


Abbildung 2: Vorgeschichte des aktuellen Gewässerschutzgesetzes von 2011, welches auch Anforderungen an den Geschiebehalt stellt. | Figure 2 : Historique de la loi actuelle sur la protection des eaux de 2011, qui impose également des exigences en matière de gestion de la charge sédimentaire.

lokal etwa mit Wuhren vor Wasser- und Geschiebeschäden. Im 19. Jahrhundert begannen sie Wasser und Geschiebe durch Begradigung und Einengung bewusst abzuführen, um auch Überflutungsgebiete landwirtschaftlich nutzen zu können. Ende des 19. Jahrhunderts fing der Bund an, Wildbachverbauungen zu fördern, um die Geschiebelieferung an der Quelle zu reduzieren oder zu unterbinden (Vischer 2003).

In der Mitte des 20. Jahrhunderts erlebte die Stromproduktion aus Wasserkraft eine Blütezeit (Pfammatter und Piot 2014) und Geschiebe wurde zum Managementproblem, da es Stauseen verfüllen und Fassungen und Wehrteile beschädigen konnte. Dies führte vor allem in den Mittellandflüssen zu Geschiebedefiziten. Darüber hinaus wurde Kies als Baumaterial auch aus Flüssen und Seen ausgebeutet.

Nach dem Hochwasser 1987 setzte ein Bewusstseinswandel im Umgang mit Geschiebe ein, der bis heute anhält. Geschiebe wurde nicht nur als Naturgefahr und Managementproblem, sondern zunehmend auch als Grundlage für unsere Gewässerlebensräume anerkannt. Das zeigte sich bereits im Wasserbaugesetz von 1991 und den Restwasserbestimmung, die Flüssen wieder mehr Raum, natürliche Strukturen und Abfluss zugestanden. Zwischen 1997 und 2004 analysierten die Kantone in einer vom Bund unterstützten Kampagne den ökomorphologischen Zustand unserer Gewässer. Fazit: 14'000 Kilometer, also etwa ein Viertel des Schweizer Fließgewäs-

ernetzes waren ökomorphologisch stark beeinträchtigt, künstlich oder eingedolt (Zeh Weissmann et al. 2009). Damit hatte das Problem eine Nummer.

Im Jahr 2003 formulierten die Wasserämter der Schweiz gemeinsame Grundsätze, um den Schutz und die Nutzung des Gewässerraums in ein besseres Verhältnis zu bringen (BUWAL/BWG 2003). Die Volksinitiative Lebendiges Wasser, die 2006 eingereicht wurde, führte schliesslich zur Revision des GSchG im Jahr 2011 (Abbildung 2), in dem umfassende Massnahmen zur Renaturierung unserer Gewässer verankert sind. Eine Massnahme ist die Sanierung des Geschiebehalt.

### 3. Beeinträchtigte Gewässer und die sanierungspflichtigen Anlagen

Im Jahr 2014 lieferten die Kantone mit ihren «Strategischen Planungen» die Grundlage für die Geschiebesanierung. Darin stellten sie fest: Mehr als 2000 Gewässerkilometer weisen ein Geschiebedefizit auf (Abbildung 3), welches sich beispielsweise in Erosionen, Einengungen, Strukturverlust oder starker Vergrößerung der Gewässersohle äusserte. Als Verursacher identifizierten die Kantone rund 140 Wasserkraftwerke und 360 Geschiebesammler, Kiesentnahmen und Gewässerverbauungen. Die kantonalen Planungen bildeten die erste Etappe eines ambitionierten gesetzlichen Auftrages, die bestehenden wesentlichen Beeinträchtigungen durch Wasserkraftwerke und andere Anlagen im Gewässer zu beseitigen. In der



Abbildung 3: Wesentlich beeinträchtigte Gewässerabschnitte aufgrund von anlagenbedingten Geschiebedefiziten. In grau hinterlegten Kantonen liegen keine Geodaten vor. Daten: Kantonale Strategische Planungen Geschiebesanierung 2014. | Figure 3 : Tronçons de cours d'eau gravement atteints en raison des déficits de charriage causés par les installations. Géodonnées non disponibles dans les cantons surlignés en gris. Données : Planifications stratégiques cantonales de l'assainissement du régime du charriage 2014.

zweiten Etappe erarbeitete die Kantone Studien über Art und Umfang von Geschiebmassnahmen. Das sind Einzugsgebietsstudien, mit denen Geschiebmassnahmen zwischen verschiedenen Anlagen und mit anderen Gewässerschutzmassnahmen koordiniert werden. Auf deren Basis werden die Massnahmen dann von den Anlageninhabern projiziert und umgesetzt.

#### 4. Die Liaison von Geschiebe und Strukturen

Geschiebetransport ist zwar ein unsichtbarer Vorgang im Gewässer, für das Erscheinungsbild des Gewässers spielt er aber eine wesentliche Rolle. Denn ob ein Gewässer viel oder wenig Geschiebe transportiert, hat einen grossen Einfluss auf seine Breite und die morphologischen Strukturen. Entzieht man einem naturnahen Gewässer Geschiebe, dann verengt sich sein Lauf und aufkommende Gehölze stabilisieren das einst dynamische Flussbett. Diesen Prozess beobachtet man auch in Schweizer Gewässern, die durch langjährige Geschiebeentnahmen an Breite und Struktur verloren [Abbildung 4]. Mit der Verengung gingen auch die typischen, verzweigten Gerinnestrukturen verloren – der Gerinnetyp änderte sich [Abbildung 5].

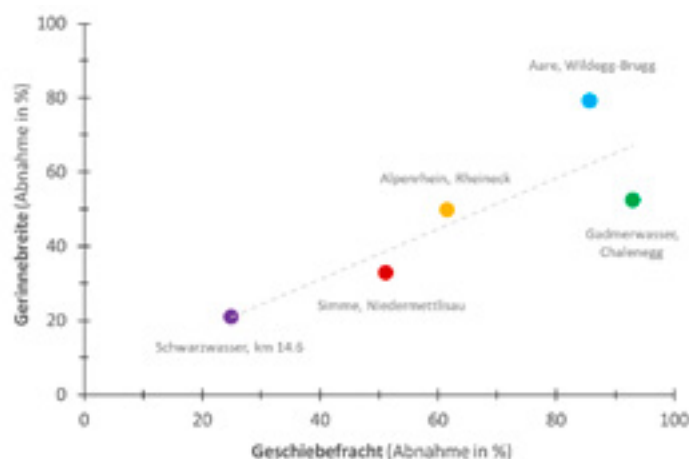


Abbildung 4: Abnahme der Gerinnebreite aufgrund von Geschiebeentnahmen oder -rückhalt an fünf Gewässerabschnitten. Dargestellt ist jeweils der prozentuale Rückgang der mittleren jährlichen Geschiebefracht und der Gerinnebreite vom naturnahen zum aktuellen Zustand. Daten: Schälchli und Hunzinger [2021]. | Figure 4 : Diminution de la largeur du lit due au prélèvement ou à la rétention de la charge de fond dans cinq tronçons du cours d'eau. Dans chaque cas, le pourcentage de diminution de la charge moyenne annuelle et de la largeur du lit entre l'état quasi naturel et l'état actuel est indiqué. Données : Schälchli et Hunzinger [2021].





Abbildung 5: Morphologische Veränderungen aufgrund von Kiesentnahmen an der Simme zwischen 1940 und 2015. Die Geschiebefracht reduzierte sich von 12'000 m<sup>3</sup>/a auf 6'000 m<sup>3</sup>/a, die Breite von 52 m auf 33 m und die Gerinneform wechselte von verzweigt auf ein gewundenes Einzelgerinne. Daten: Schälchli und Hunzinger [2021]. Luftbilder: Swisstopo. | Figure 5 : Modifications morphologiques dues à l'extraction de gravier sur la Simme entre 1940 et 2015. Le charriage a été réduit de 12'000 m<sup>3</sup>/a à 6'000 m<sup>3</sup>/a, la largeur de 52 m à 33 m et la forme du lit est passée d'un chenal ramifié à un chenal unique sinueux. Données : Schälchli et Hunzinger [2021]. Photographies aériennes : Swisstopo.

Geschiebemessungen sind mit grossen Unsicherheiten behaftet. Das ist ein Grund, weshalb nur sehr wenige quantitative Beziehungen zwischen Geschiebetransport, Breite und Morphologie publiziert wurden. Die wenigen, die es gibt, stammen oft aus Laborversuchen. So konnte beispielsweise Marti [2006] an der ETH Zürich beobachten, wie drastisch sich die Morphologie ändert, wenn die Geschiebezufuhr einbricht, bei ansonsten gleichbleibendem Abfluss: In einem Versuch schrumpfte die Breite um 60% als er die Geschiebefracht um 80% verringerte; und das verzweigte Gerinne verwandelte sich in ein eingetieftes Einzelgerinne. Auch Rachelly et al. [2021] beobachteten im Labormodell einer Gerinneaufweitung, dass sich bei intensiverem Geschiebetransport eine grössere morphologische Aktivität und ein breiteres, strukturierteres Gerinne einstellt, als bei geringerem Geschiebetransport.

## 5. Ein Element der Renaturierung unserer Gewässer

Geschiebe ist aber nicht die ultimative Lösung aller morphologischen und ökologischen Probleme in unseren Gewässern. Solange ein Gewässer durch Uferverbauungen eingeengt ist, kann sich Geschiebe kaum ablagern und Gerinneformen aufbauen, die für unsere einheimischen Tiere und Pflanzen überlebenswichtig sind. Deshalb ist es für die Verbesserung unserer Habitate zentral, dass bei Revitalisierungen und Hochwasserschutzprojekten genügend Gewässerraum sichergestellt wird, in dem sich ein strukturreiches und dynamisches Gerinne aus Geschiebe bilden kann. In Restwasserstrecken spielt zusätzlich die Dynamik des Abflusses eine entscheidende Rolle für ein funktionierendes Flussökosystem.

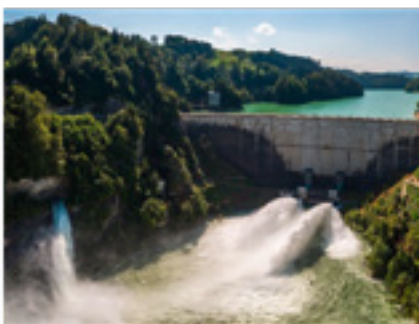
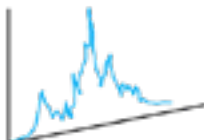
Das Gewässerschutzgesetz sieht daher ein ganzes Bündel an Renaturierungsmassnahmen vor, mit dem unsere Gewässerlebensräume aufgewertet werden sollen. Die Sanierung oder Wiederherstellung von Breite, Abfluss und

**Breite & Struktur**



§ Gewässerraum  
§ Revitalisierung

**Abfluss**



§ Restwasser  
§ Schwall-Sunk

**Geschiebe**



§ Geschiebehaushalt

Abbildung 6: Faktoren für morphologische Strukturen und Dynamik eines natürlichen Gewässers und die Gesetzesartikel, in denen sie geregelt sind. Foto links: Herbert Böhler & Flurin Bertschinger/Ex-Press/BAFU, Foto Mitte: Forschungsgruppe Ökohydrologie der Zürcher Hochschule für angewandte Wissenschaften. Foto rechts: Manuel Nitsche | Figure 6 : Facteurs des structures morphologiques et de la dynamique d'un cours d'eau naturel et articles juridiques dans lesquels ils sont réglementés. Photo de gauche : Herbert Böhler & Flurin Bertschinger/Ex-Press/DFEV, photo au centre : Groupe de recherche en écohydrologie de l'Université des sciences appliquées de Zurich (ZHAW). Photo de droite : Manuel Nitsche

Geschiebe sind jeweils in spezifischen Gesetzen geregelt (Abbildung 6). Gemeinsam bilden sie das physikalische Fundament für morphologisch naturnahe Gewässer. Das gesetzliche Ziel der Sanierung des Geschiebehaushalts ist, die von Anlagen verursachten wesentlichen Beeinträchtigungen von Tieren, Pflanzen, Lebensräumen, Hochwasserschutz und Grundwasserhaushalt zu beseitigen. Eine wesentliche Beeinträchtigung besteht, wenn Wasserkraftwerke und andere Anlagen die naturnahen morphologischen Strukturen und Dynamik nachteilig verändern. Es sind aber unwesentliche Beeinträchtigungen erlaubt. Die Erhöhung der Geschiebefracht ist der Hebel, der zu diesen Zielen beiträgt (Abbildung 7). Wenn möglich, sollte der Geschiebetransport wieder natürlichen Verhältnissen entsprechen.

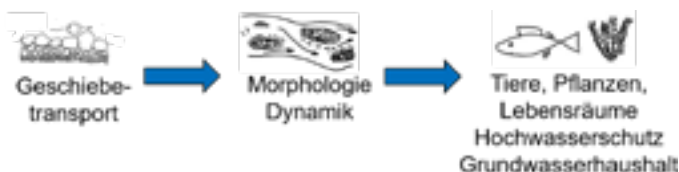


Abbildung 7: Geschiebe beeinflusst die Morphologie und Dynamik eines Gewässers und ist damit ein starker Hebel gegen Beeinträchtigungen von Tieren, Pflanzen, Lebensräumen, Hochwasserschutz und auch Grundwasserhaushalt. | Figure 7 : Le charriage influence la morphologie et la dynamique d'un cours d'eau et constitue donc un levier puissant contre les atteintes à la faune, à la flore, aux habitats, à la protection contre les crues ainsi qu'à l'équilibre des eaux souterraines.

**6. Geschiebemassnahmen und Finanzierung**

Wasserkraftanlagen sollten das Geschiebe möglichst durchleiten. Dies ist bei einigen Anlagen durch Anpassung der Wehre und temporäres Absenken des Stausees möglich. Dort wo dies nicht möglich ist, kann der Geschiebehaushalt auch durch Kiesschüttungen verbessert werden (Abbildung 8). Bei Geschiebesammlern sollte Geschiebe bis zu einem gewissen Grad durchgeleitet und nur bei grossen Hochwassern, die auch eine Gefahr darstellen, zurückbehalten werden. Dies ist mit teilweise durchgängigen Geschiebesammlern möglich, die über speziell dimensionierte Wehre und Niederwasserrinnen verfügen (Schwindt et al., 2016). Sie verbessern nicht nur die ökologischen Bedingungen im Unterwasser, sondern können langfristig auch die Bewirtschaftungskosten reduzieren, die ansonsten durch Materialentnahmen und -deponie auf die Betreiber zukommen.

Die Frist für die Umsetzung von Massnahmen ist für sanierungspflichtige Anlagen per Gesetz auf 2030 festgelegt. Aber nicht nur bestehende, sondern auch neue Anlagen im Gewässer müssen die Gewässerschutzgesetzgebung einhalten. Neue Anlagen sollten also grundsätzlich für Geschiebe durchgängig konzipiert werden. Und bei Hochwasserschutzprojekten darf nur noch so viel Geschiebe entnommen werden, wie zum Schutz vor Hochwasser notwendig ist. Die Verhältnismässigkeit des Aufwandes ist ein zentraler Aspekt, wenn Sanierungsmassnahmen von Kantonen festgelegt



Abbildung 8: Kiesschüttung an der Limmat bei Wettingen im Jahr 2021.  
Foto: Manuel Nitsche | Figure 8 : Couche de gravier sur la Limmat à Wettingen en 2021. Photo : Manel Nitsche

werden. Daher müssen Kosten und Wirkung der Massnahme in einem sinnvollen Verhältnis stehen. Ausserdem dürfen Geschiebemaassnahmen nicht zu Hochwasserschutzproblemen führen, was bei der Projektierung dargelegt werden muss. Die Finanzierung ist ein entscheidendes gesetzliches Instrument, um die Sanierungen voranzutreiben. Die Inhaber von sanierungspflichtigen Wasserkraftanlagen, die Massnahmen zur Sanierung der Fischgängigkeit, Schwall-Sunk oder Geschiebe umsetzen, erhalten die anrechenbaren Massnahmenkosten zu 100% zurückerstattet. Zu diesem Zweck wird seit 2012 ein Zuschlag von 0,1 Rappen pro Kilowattstunde auf die Übertragungskosten der Hochspannungsnetze erhoben und damit der nationale Netzzuschlagsfonds gespeist. Dabei kommen jährlich rund 50 Millionen Franken zusammen.

Für die mittelfristig geplanten Sanierungsprojekte reichen die finanziellen Mittel aus. Aus den kantonalen strategischen Planungen und den Erfahrungen aus den ersten umgesetzten Projekten wird jedoch klar, dass der finanzielle Bedarf die Einnahmen des Fonds übersteigt und nicht ausreichen wird, um bis zur gesetzlichen Frist von 2030 alle betroffenen Kraftwerksinhaber zu entschädigen. Um die Finanzierung von allen notwendigen Massnahmen sicherzustellen, braucht es eine politische Lösung.

Für die Geschiebesanierung von Anlagen, die nicht in Verbindung mit der Wasserkraft stehen, gibt es andere Lösungen. Einmalige bauliche Massnahmen wie Umbau oder Rückbau von Anlagen können beispielsweise aus Mitteln der Revitalisierung subventioniert werden [siehe BAFU 2018].

## 7. Umsetzungsstand

Alle vier Jahre sind die Kantone verpflichtet, über den Umsetzungsstand der Sanierungen zu berichten. Die aktuellen Berichte zeigen, was bis Ende 2018 bei der Geschiebesanierung umgesetzt wurde (Abbildung 9): Bei 42 Anlagen war das Variantenstudium in Erarbeitung, bei 44 Anlagen war die konkrete Sanierungsmassnahme in Planung, bei 12 Anlagen war die Massnahme im Bau oder die Wirkungskontrolle bereits im Gange. Somit wurden bis Ende 2018 bei 20 Prozent der rund 500 sanierungspflichtigen Anlagen mit den Arbeiten gestartet.



Abbildung 9: Umsetzungsstand der Geschiebesanierung Ende 2018. Jeder Punkt repräsentiert eine sanierungspflichtige Anlage. Die Farbe zeigt den Umsetzungsfortschritt seit den strategischen Planungen 2014 an. Bei grau hinterlegten Kantonen liegen keine Geodaten zum Umsetzungsstand vor. Daten: Kantonale Berichte zum Umsetzungsstand der Sanierung von Wasserkraftanlagen 2019 und Kantonale Strategische Planungen Geschiebehaushalt 2014. | Figure 9 : État d'avancement de la mise en œuvre de l'assainissement du régime du charriage à la fin 2018. Chaque point représente une installation nécessitant un assainissement. La couleur indique les progrès de la mise en œuvre depuis la planification stratégique de 2014. Pour les cantons dont le fond est gris, aucune géodonnée sur l'état de mise en œuvre n'est disponible. Données : Rapports cantonaux sur l'état de la mise en œuvre de l'assainissement des centrales hydroélectriques 2019 et planifications stratégiques cantonales de l'assainissement du régime du charriage 2014.

Die Sanierung von Wasserkraftanlagen ist dabei schon weiter fortgeschritten, als bei Anlagen ohne Bezug zur Wasserkraft – in den meisten Fällen sind das Geschiebesammler (Abbildung 10).

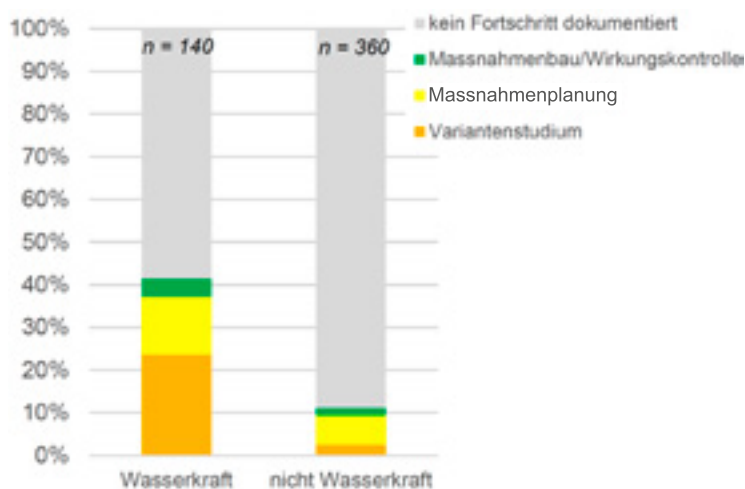


Abbildung 10: Umsetzungsstand im Bereich Geschiebehaushalt bei Wasserkraftanlagen und Anlagen ohne Bezug zur Wasserkraft – zum Beispiel Geschiebesammler. Gezeigt ist der Anteil Anlagen pro Verfahrensschritt. 100 Prozent entsprechen dem Total an sanierungspflichtigen Anlagen gemäss strategischer Planung 2014. Daten: Kantonale Berichte zum Umsetzungsstand der Sanierung von Wasserkraftanlagen 2019. | Figure 10 : État d'avancement de la mise en œuvre de la gestion du charriage pour les centrales hydroélectriques et les centrales non liées à l'hydroélectricité - par exemple, les dépotoirs à alluvions. La proportion d'installations par étape du processus est indiquée. 100 % correspond au nombre total d'installations nécessitant des mesures correctives selon le plan stratégique de 2014. Données : Rapports cantonaux sur l'état de mise en œuvre de l'assainissement des centrales hydroélectriques 2019.

## 8. Erste Sanierungserfolge messbar

Dass Geschiebesanierungen positive Wirkungen entfalten, darauf deuteten bereits erste Versuche mit Kiesschüttungen 2005 an der Aare bei Deitingen hin. Direkt unterhalb der Schüttungen erhöhten sich beispielsweise die Äschenlarvendichten gegenüber Standorten flussaufwärts [Schälchli et al. 2010]. Äschenlarven sind vom Geschiebehaushalt direkt betroffen und werden deshalb als Indikator eingesetzt.

Auch am stark abgeplästerten und kolmatierten Hochrhein unterhalb des Kraftwerks Eglisau wird bereits seit 2013 Kies geschüttet. An einigen Schüttstandorten konnten grössere Dichten an Äschenlarven und Jungfischen gemessen werden [Axpo 2020]. Die Schüttmengen sind jedoch viel kleiner, als natürlicherweise durch den Rhein transportiert werden könnte, sodass sich die Morphologie und das Substrats bisher vorrangig lokal unterhalb der Schüttstellen verbesserte.

Die Saane erlebte seit dem Bau des Kraftwerks Rossens 1948 beeindruckende morphologische Änderungen: Der Unterbruch der Geschiebezufuhr und reduzierte Hochwasserdynamik führte dazu, dass die einst dominierenden offenen Kiesflächen fast vollständig einwuchsen und nun Waldgebiete sind [Tonolla et al. 2020]. Die veränderten Habitate wurden auch durch standortfremde Lebensgemeinschaften eingenommen. Gezielte Kiesschüttungen und

Hochwasser seit 2016 zeigen aber Wirkung, sodass wieder gewisse Kiesflächen offengelegt werden [Döring et al. 2018] und standorttypische, kies- und strömungsliebende Arten wie Stein- und Eintagsfliegen von der verstärkten Dynamik profitieren [Döring und Tonolla 2021].

## 9. Fazit

Geschiebedefizite sind mitverantwortlich für den Verlust von Lebensräumen und Biodiversität in unseren Gewässern. Im Umgang mit Geschiebe findet deshalb ein notwendiges Umdenken statt. Die Ausgangslage für erfolgreiche Renaturierungen könnte dabei kaum besser sein: es liegen strategische Planungen für alle Renaturierungsthemen vor, es gibt Sanierungspflichten und Fristen für konkrete Anlagen im Gewässer, eine Finanzierung der Massnahmen ist sichergestellt und die Zusammenarbeit zwischen Kantonen, Kraftwerken und dem BAFU verläuft sehr offen und engagiert. Das sind Erfolgsfaktoren, um die uns unsere europäischen Nachbarn beneiden.

Trotzdem gehen die Arbeiten noch nicht rasch genug voran, um bis 2030 alle sanierungspflichtigen Anlagen ökologisch fit zu machen. Ein Grund sind die teilweise aufwändigen Planungen, die viel Zeit und Ressourcen bei Bund, Büros und Kantonen beanspruchen. Die Anstrengungen zur ökologischen Sanierung der Wasserkraft müssen daher intensiviert und die notwendigen finanziellen und personellen Mittel bereitgestellt werden.

Der Klimawandel verstärkt die Notwendigkeit zur Strukturierung der Lebensräume und damit auch die Notwendigkeit für Geschiebesanierungen. Denn nur in vielfältigen Lebensräumen finden Tiere und Pflanzen auch bei Trockenheit, Hitze und Hochwassern genügend Refugien, in denen sie überleben können.

Wenn Geschiebe nicht nur entnommen, sondern dem Gewässer gezielt wieder zurückgegeben oder durchgeleitet wird, macht das nicht nur ökologisch einen Unterschied, sondern es kann auch den Hochwasserschutz verbessern und bei Kraftwerken und Geschiebesammlern die Kosten für das Geschiebemanagement optimieren.

## Literaturverzeichnis

- Axpo Power AG. (2020). Kraftwerk Eglisau-Glattfelden AG. Kieszugaben. Morphologisches Monitoring – 1. Folgezustand 2015/2016, ergänzt mit 2. Folgezustand 2019/2020. Interner Bericht.
- BAFU. (2016). Ökologische Sanierung bestehender Wasserkraftanlagen: Finanzierung der Massnahmen. Ein Modul der Vollzugshilfe «Renaturierung der Gewässer». Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Vollzug Nr. 1634: 51 S. [\[PDF\]](#)
- BAFU. (2018). Handbuch Programmvereinbarungen im Umweltbereich 2020 – 2024. Mitteilung des BAFU als

- Vollzugsbehörde an Gesuchsteller. Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Vollzug Nr. 1817: 294 S. [\[PDF\]](#)
- BUWAL/BWG. [2003]: Leitbild Fliessgewässer Schweiz. Für eine nachhaltige Gewässerpolitik. Bern, 12 Seiten. [\[PDF\]](#)
  - Döring, M., Tonolla, D. [2021]. Der Einfluss von Restwasserbewirtschaftung, Dammüberläufen und künstlichen Hochwassern auf die Ökomorphologie der Sarine – Zwischenbericht. 15.02.2021. Im Auftrag des BAFU.
  - Döring, M., Tonolla, D., Robinson, C.T., Schleiss, A., Stähly, S., Gufler, C., Geilhausen, M., Di Cugno, N. [2018]. Künstliches Hochwasser an der Saane – Eine Massnahme zum nachhaltigen Auenmanagement. Wasser Energie Luft. 110. Jahrgang, Heft 2.
  - Marti, C. [2006]. Morphologie von verzweigten Gerinnen. Ansätze zur Abfluss-, Geschiebetransport- und Kolktiefenberechnung. Mitteilung der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich, 199, 282 S. [\[PDF\]](#)
  - Pfammatter, R., Piot, M. [2014]. Situation und Perspektiven der Schweizer Wasserkraft. Wasser Energie Luft. 106. Jahrgang, Heft 1.
  - Rachelly, C., Mathers, K.L., Weber, C., Weitbrecht, V., Boes, R.M., Vetsch, D.F. [2021]. How does sediment supply influence refugia availability in river widenings? Journal of Ecohydraulics. DOI: [Link](#).
  - Schälchli, U., Breitenstein M., Kirchhofer A. [2010]. Kiesschüttungen zur Reaktivierung des Geschiebehaushalts der Aare – die kieslaichenden Fische freut's. Wasser Energie Luft. 102/3: 209-213.
  - Schälchli U., Hunzinger, L. [2021]: Die erforderliche Geschiebefracht. Fachbericht zum Modul «Geschiebehaushalt – Massnahmen» der Vollzugshilfe Renaturierung der Gewässer. Bericht im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt [\[PDF\]](#)
  - Schälchli, U., Hunzinger, L. [2005]. Geschiebe- und Schwebstoffproblematik in Schweizer Fliessgewässern. Bericht der Flussbau AG. [\[PDF\]](#)
  - Schwindt, S., Franca, M.J., De Cesare, G., Schleiss A. [2016]. Gestaltung effizienter Geschiebesammler anhand physikalischer Modellversuche mit Fallbeispiel. 18. Wasserbausymposium, Wallgau, Germany, 275-284. [\[PDF\]](#)
  - Syvitski, J.P., Vörösmarty, C.J., Kettner, A.J., Green, P. [2005]. Impact of humans on the flux of terrestrial sediment to the global coastal ocean. Science. 308(5720):376-80. DOI: 10.1126/science.1109454.
  - Tonolla, D., Geilhausen, M., Doering, M. [2020]. Seven decades of hydrogeomorphological changes in a near-natural [Sense River] and a hydropower-regulated [Sarine River] pre-Alpine river floodplain in Western

Switzerland. Earth Surf. Process. Landforms. DOI: 10.1002/esp.5017





- Vischer, D.L. [2003]. Die Geschichte des Hochwasserschutzes in der Schweiz. Berichte des BWG, Serie Wasser. Nr. 5 – Bern. [\[PDF\]](#)
- Zeh Weissmann, H., Könitzer, C., Bertiller, A. [2009]: Strukturen der Fliessgewässer in der Schweiz. Zustand von Sohle, Ufer und Umland (Ökomorphologie); Ergebnisse der ökomorphologischen Kartierung. Stand: April 2009. Umwelt-Zustand Nr. 0926. Bundesamt für Umwelt, Bern. 100 S.

### Kontaktadresse

Manuel Nitsche  
 Bundesamt für Umwelt  
 Abteilung Wasser  
 3003 Bern  
 Tel +41 58 464 07 05  
[manuel.nitsche@bafu.admin.ch](mailto:manuel.nitsche@bafu.admin.ch)



**Unser Beratungs- und Ausführungsteam begleitet Ihre Projekte mit 55 Jahren Know-how.**

- 
**Ansaat**  
 Wir begrünen alle Flächen und Böschungen in jedem Gelände und an jedem Standort.
- 
**EcoTex®-Geotextilien als Erosionsschutz**  
 Wir liefern und verlegen Geotextilien aus Kokosfasern oder Jute; natürlich und biologisch abbaubar.
- 
**Sedummatten**  
 Sie suchen vorkultivierte, sofort verlegbare Sedummatten für die extensive Begrünung von Böschungen, Verkehrsinseln, Garten- und Rasenabschlüssen oder Garagen und Carports? Wir liefern sie.
- 
**Ingenieurbilogie**  
 Wir sind Ihr Ansprechpartner für verschiedene Stützkonstruktionen für Uferzonen und Böschungen.

Mehr Informationen und interessante Referenzobjekte finden Sie auf unserer Internetseite [www.hydrosaat.ch](http://www.hydrosaat.ch).

Senden Sie uns eine Mail an [hydrosaat@hydrosaat.ch](mailto:hydrosaat@hydrosaat.ch) oder rufen Sie uns an unter 026 322 45 25. Wir freuen uns auf Ihre Kontaktaufnahme!



# Die Bedeutung von Geschiebe und Schwebstoffen für die Lebewelt im und am Bach

Fredy Elber, AquaPlus AG, Zug

## Zusammenfassung

In einem Fliessgewässer bewegt sich nicht nur Wasser; auch die vermeintlich fixe Gewässersohle ist bei näherer Betrachtung mobil. Je nach Grösse des Abflusses werden kleinste Steinkörner und bis zu grosse Steinbrocken flussabwärts transportiert. Letztere bleiben manchmal «geföhlt» ewig an Ort und Stelle liegen, zumindest so lange, bis bei einem grossen Hochwasser die gesamte Gewässersohle mobilisiert wird. Insgesamt unterliegt das System Fliessgewässer sowohl hinsichtlich des Abflusses als auch der Gewässersohle einer ständigen Dynamik, welche gewässerabhängig stärker oder schwächer ausfällt. Hochwasser spielen dabei eine wichtige Rolle. Dieser Dynamik sind die Lebewesen des Fliessgewässers ausgesetzt, was einiges an Anpassung erfordert [hat]. Fische können sich bis zu einem gewissen Mass aufgrund ihrer Schwimmleistung der Abschwemmung entziehen. Sie müssen sich jedoch, wie alle anderen Tiere und Pflanzen der Fliessgewässer, grundsätzlich an die im Vergleich zum Wasser stabile Gewässersohle halten. Dort stehen Lückensystem, Unterschlupfe und Oberfläche für die Besiedlung zur Verfügung. Doch aufgepasst: Erst noch sicheres Versteck kann sich die Gewässersohle bei Hochwasser in eine Todesfalle verwandeln. Vom Leben in diesem Spannungsfeld bzw. der Bedeutung von Geschiebe und anorganischen Schwebstoffen in Fliessgewässern für die verschiedenen Bewohner der Gewässer handelt der folgende Beitrag.

## L'importance du charriage et des sédiments fins pour la vie dans et autour des cours d'eau

### Résumé

L'eau n'est pas la seule à se déplacer dans un cours d'eau ; à y regarder de plus près, le lit de la rivière, supposé fixe, est également mobile. Selon le débit, les plus petits grains de pierre jusqu'aux gros morceaux de roche sont transportés en aval. Ces derniers ont parfois « l'impression » de rester en place pour toujours, du moins jusqu'à ce que l'ensemble du lit du cours d'eau soit mobilisé lors d'une grande crue. Au total, le réseau hydrographique est soumis à une dynamique constante, tant au niveau du débit que du lit, plus ou moins forte selon le cours d'eau. Les crues jouent un rôle important à cet égard. Les organismes vivants du cours d'eau sont exposés à cette dynamique, qui nécessite [ou a nécessité] une certaine adaptation. Dans une certaine mesure, les poissons peuvent éviter d'être emportés par les eaux grâce à leur capacité de nage. Cependant, comme tous les autres animaux et plantes du cours d'eau, ils doivent se remettre à un lit stable de la rivière par rapport à l'eau. Là, un système d'espaces, de cachettes

et de surfaces sont disponibles pour la colonisation. Mais attention : bien qu'il s'agisse toujours d'une cachette sûre, le lit d'un cours d'eau peut se transformer en un piège mortel lors des crues. L'article suivant traite de la vie dans cette zone de tension et de l'importance du charriage et sédiments fins inorganiques dans les cours d'eau pour les différents habitants des cours d'eau.

### Mots-clés

charriage, sédiments fins, cours d'eau, lit du cours d'eau.

## L'importanza del materiale solido e di quello in sospensione per gli organismi viventi dentro e ai bordi dei corsi d'acqua

### Riassunto

Non è solo l'acqua che si muove in un corso d'acqua; guardando bene, anche l'alveo, apparentemente fisso, è mobile. A seconda della portata, dai più piccoli granelli di sabbia fino a grossi massi vengono trasportati a valle. Questi ultimi a volte sembrano rimanere al loro posto per sempre, almeno fino a quando l'intero letto del fiume non viene mobilitato durante una grande piena. Nel complesso, il sistema fiume è soggetto a dinamiche costanti, sia in termini di deflusso che di alveo, che sono più forti o più deboli a seconda del corso d'acqua. In questo senso le piene giocano un ruolo importante. Gli organismi viventi del corso d'acqua sono esposti a questa dinamica, che richiede (o ha richiesto) una certa capacità di adattamento. Fino a un certo punto, i pesci possono evitare di essere trasportati a valle grazie alla loro capacità di nuotare. Tuttavia, come tutti gli altri animali e piante del corso d'acqua, fanno affidamento al letto stabile del corso d'acqua rispetto alla corrente. Lì, il sistema di fessure, i nascondigli e la superficie sono disponibili per essere occupati. Ma attenzione: nonostante possa sembrare un nascondiglio sicuro, il letto del fiume può trasformarsi in una trappola mortale durante le piene. Il seguente articolo tratta della vita in questo habitat e dell'importanza del materiale inorganico solido di fondo e in sospensione per i vari organismi viventi dei corsi d'acqua.

### Parole chiave

Materiale solido e in sospensione, Corso d'acqua, Letto del fiume.

## 2. Lebensraum Gewässersohle: Von nass bis trocken

Fliessgewässer werden durch ihre Abfluss- und Feststoffdynamik geformt. Hochwasser verändern die Morphologie durch Erosion oder Geschiebeablagerungen. Schliesslich präsentiert sich ein Fliessgewässer aus aquatischen, amphibischen und terrestrischen Zonen, wobei sich die entsprechenden Anteile je nach Abfluss massiv unterscheiden können (Abbildung 1).



Abbildung 1: Natürliche Fliessgewässer verfügen über aquatische, amphibische und terrestrische Lebensräume. Lech in Österreich. Foto: Fredy Elber, AquaPlus AG.

Figure 1 : Les cours d'eau naturels comportent des habitats aquatiques, amphibiques et terrestres. Lech en Autriche. Photo : Fredy Elber, AquaPlus AG.

### 2.1 Die aquatische Gewässersohle

Der Gewässergrund der aquatischen Gewässersohle ist immer von Wasser überdeckt (Abbildung 2). Hier leben Organismen, welche ständig oder während eines grossen Teils des Jahres auf Wasser angewiesen sind: Neben Mikroorganismen, Algen und Wasserpflanzen u.a. Fische und Wasserwirbellose [Invertebraten]. Wasserwirbellose findet man in der Gewässersohle vor allem in Tiefen von 10 bis 40 cm gemessen ab der Oberseite des Bachgrundes. Tiefer als 50 cm dringen nur wenige Makroinvertebraten vor. Generell nimmt mit zunehmender Sohlltiefe das Nahrungsangebot sowie die Sauerstoffkonzentration ab. Der Lebensraum verliert damit an Attraktivität und die Individuendichte aber auch die Artenzahl nehmen ab.



Abbildung 2: Aquatische Gewässersohle. Foto: Fredy Elber, AquaPlus AG.

Figure 2 : Lit de cours d'eau aquatique. Photo : Fredy Elber, AquaPlus AG.

## 2.2 Die amphibische Gewässersohle

Die amphibische Gewässersohle ist einmal nass, dann wieder trocken (Abbildung 3). Die Nass- bzw. Trockenphasen können sowohl kurze (z.B. tageszeitliche Schwankungen) als auch lange Zeit andauern (jahreszeitliche Veränderungen). Die amphibische Gewässersohle umfasst Uferbereiche aber auch Fließgewässer begleitende Tümpel. Besiedler solcher Habitats müssen im Falle der Uferbereiche sehr mobil sein, da sie der Wasserlinie folgen und sich entweder im Trockenem oder Nassen aufhalten. In Tümpeln leben Amphibien und sich schnell entwickelnde Wasserwirbellose. Auf jeden Fall müssen die Bewohner dieses temporär aquatischen Lebensraumes fähig sein, die terrestrische Phase zu überdauern oder dann permanente Gewässer als Refugium aufzusuchen.



Abbildung 3: Amphibische Gewässersohle. Foto: Fredy Elber, AquaPlus AG.  
Figure 3 : Lit de cours d'eau amphibie. Photo : Fredy Elber, AquaPlus AG.

## 2.3 Die terrestrische Gewässersohle

Bei der terrestrischen Gewässersohle (Abbildung 4) handelt es sich eigentlich gleichfalls um eine amphibische, nur reicht der Wasserstrom selten bis sehr selten in diesen Bereich. Dieses Gebiet wird daher von terrestrischer Flora und Fauna besiedelt. Es kommt zur typischen Ausbildung der Auenzonen mit den entsprechenden faunistischen Besiedlungen. Die wassernahen Kies- und Schotterbänke widerspiegeln oft die strukturellen Verhältnisse der benetzten Gewässersohle. Auf ihnen finden sich Schnecken, Spinnen und Insekten wie Laufkäfer, Kurzflügelkäfer, Ameisen, Wanzen und Heuschrecken sowie vereinzelt Reptilien, Vögel und Säuger. Bekannt bei den Vögeln ist vor allem der Flussregenpfeifer, welcher sein Gelege offen und doch fast nicht erkennbar auf Kies und Schotterbänke ablegt (Abbildung 5 und 6). Bezüglich Biodiversität von grösserer Bedeutung sind jedoch die kleineren, unscheinbareren Bewohner wie beispielsweise die Laufkäfer. Ihr Leben findet eher im Verborgenen statt, und um sie zu finden werden Fallen gestellt und spezifische Habitats abgesucht. Rund ein Viertel (139 Arten) aller Laufkäfer in der Schweiz kommen entweder ausschliesslich oder vorwiegend in Auenbiotopen

vor. Von diesen sind rund 50% (78 Arten) in der Roten Liste der gefährdeten Arten aufgeführt. Ufernahe, vegetationsarme bzw. -freie Kies-, Sand- und Schlickflächen bilden die Lebensgrundlage für eine Vielzahl von (gefährdeten)



Abbildung 4: Terrestrische Gewässersohle. Lech in Österreich. Foto: Fredy Elber, AquaPlus AG. | Figure 4 : Lit de cours d'eau terrestre. Lech en Autriche. Photo : Fredy Elber, AquaPlus AG.



Abbildung 5: Flussregenpfeifer als typischer Bewohner von Kies- und Schotterbänken. Foto: A.Trepte, www.avi-fauna.info. | Figure 5 : Le petit gravelot est un habitant typique des bancs de gravier et cailloux. Photo : A.Trepte, www.avi-fauna.info.



Abbildung 6: Wer findet die Eier des Flussregenpfeifers? Foto: Fabian Peter, AquaPlus AG. | Figure 6 : Qui peut trouver les œufs du petit gravelot ? Photo : Fabian Peter, AquaPlus AG.



Laufkäferarten. Sie tragen z.T. nicht nur wohlklingende Namen wie Mondfleck-Ahlenläufer [*Bembidion lunatum*] oder Zierlicher Grabläufer [*Pterostichus gracilis*], sondern sehen auch, zumindest auf den zweiten Blick, speziell oder gar hübsch aus [Abbildung 7]. Bei der Überschwemmung solcher Auenbereiche fliehen die mobilen Tiere. Bei den weniger mobilen können dagegen markante Verluste stattfinden.



Abbildung 7: Links: Mondfleck-Ahlenläufer [*Bembidion lunatum*]; rechts: Zierlicher Grabläufer [*Pterostichus gracilis*] Laufkäfer: Typischer Bewohner von Kies- und Schotterbänken. Foto: [www.angewandte-carabidologie.de](http://www.angewandte-carabidologie.de) | Figure 7 : A gauche : Le *Bembidion lunatum* ; à droite : *Pterostichus gracilis*. Carabidés : habitant typique des bancs de gravier et cailloux. Photo : [www.angewandte-carabidologie.de](http://www.angewandte-carabidologie.de)

### 3 Choriotope/Habitate der aquatischen Gewässersohle: Von grob bis fein

Vorliegend behandeln wir lediglich die anorganischen Choriotope, welche vom Fels bis zu den kleinsten Korn-durchmessern der Tonfraktion reichen. Daneben gibt es noch die organischen Choriotope, die vor allem lebende und tote Pflanzenstrukturen umfassen wie z.B. Wurzelstöcke und Totholzansammlungen.

Vorangestellt sei hier, dass die Fauna eines Standortes nicht nur vom Typ des Substrates, sondern auch von der Fließgeschwindigkeit des Wassers und weiterer Faktoren bestimmt wird. Ausserdem bestehen zwischen den hier vorgestellten Choriotopen fließende Übergänge.

Bezüglich der Bewohner der Gewässersohle fokussieren wir im Folgenden auf die Wasserwirbellosen und die Fische. Daneben besiedeln weitere, insbesondere mikroskopisch kleine Organismen wie u.a. Räder- und Wimpertierchen den Lückenraum der Gewässersohle. Ausserdem sorgen eine Vielzahl von Bakterien für den Abbau organischer Biomasse und bewirken so die sogenannte Selbstreinigung des Wassers nach Eintrag von Abwasser.

### 3.1 Megalithal

Megalithal [Abbildung 8] ist der Lebensraum der Oberfläche von grossen Steinblöcken bis hin zum Fels [Mindestdurchmesser 40 cm]. Die Lebensgemeinschaft des Megalithals funktioniert mehr oder weniger unabhängig vom Kieslückenraum der Gewässersohle. Tiere, die hier leben, sind oft rasch fließendem Wasser ausgesetzt und leben sessil oder nahezu sessil. Sie haben unterschiedliche Anpassungen hinsichtlich Anatomie [Befestigungsvorrichtungen wie Saugnäpfe oder Hakenkränze] oder Verhalten [Ernährung aus der fließenden Welle] vorgenommen, um hier existieren zu können.

Bekannt sind die Larven der Kriebelmücken, die teilweise in großen Dichten die Oberflächen stark überströmter Blöcke oder Felswände besiedeln und mit ihren Fangfächern Nahrung aus dem Wasser filtrieren. Beindruckend sind die Lidmückenlarven [Abbildung 9], welche Fließgeschwindigkeiten bis 3 m/s standhalten können. Sie schaffen dies mit 6 auf der Bauchseite ausgebildeten Saugnäpfen, die zu den besten im Tierreich gelten.



Abbildung 8: Megalithal. Foto: Fredy Elber, AquaPlus AG. | Figure 8 : Mégalithe. Photo : Fredy Elber, AquaPlus AG.



Abbildung 9: Lidmückenlarve [*Blephariceridae*] als typischer Bewohner des Megalithals. Foto: AquaPlus AG. | Figure 9 : Larves de blephariceride [*Blephariceridae*] comme habitant typique des mégalithes. Photo : AquaPlus AG.

### 3.2 Makrolithal

Das Makrolithal [Abbildung 10] umfasst Blöcke von 20 bis 40 cm Durchmesser und variable, aber deutlich kleinere Anteile an kleineren Korngrößen. Zur typischen Makrolithal-Fauna zählen beispielsweise die grossen, räuberischen Steinfliegenlarven der Familien Perlidae oder Perlodidae [Abbildung 11] aber auch die «abgeflachten» Eintagsfliegen der Familie der Heptagenidae sowie Egel und Schnecken. Auch hier gilt es, sich der Strömungsgeschwindigkeit anzupassen.

Das Makrolithal dient der Groppe als Laichsubstrat. Sie klebt ihre Eier paketweise an die Unterseite grösserer Steine. Das Männchen bewacht dann das Nest bis zum Schlüpfen der Jungfische.



Abbildung 10: Makrolithal. Foto: Fredy Elber, AquaPlus AG. | Figure 10 : Macrolithe. Photo : Fredy Elber, AquaPlus AG.



Abbildung 11: Grosse Steinfliegenlarven als typische Bewohner des Makrolithals. Foto: Fredy Elber, AquaPlus AG. | Figure 11 : Larves de mouche de pierre comme habitants typiques du macrolithe. Photo : Fredy Elber, AquaPlus AG.

### 3.3 Mesolithal und Mikrolithal

Das Mesolithal [Abbildung 12] bezeichnet den von faustgrossen Steinen (6.3 bis 20 cm Durchmesser) dominierten Lebensraum. Im Mikrolithal [Abbildung 13] herrscht Grobkies vor (2 bis 6.3 cm Durchmesser). Beide Habitats weisen

jedoch auch kleinere Anteile von feineren Kornfraktionen auf. Besiedelt werden Meso- und Mikrolithal von mittelgrossen bis kleinen Formen der typischen Steinfauna (u.a. Eintags-, Stein- und Köcherfliegenlarven, Kleinkrebse, Abbildung 14) und der Bewohner des Kieslückensystems (u.a. Zuckmückenlarven, Würmer, Jugendstadien von Insektenlarven) sowie von Jugendstadien der Makrolithal-Fauna.

Das Mikrolithal bildet das geeignete Laichsubstrat für die Kieslaicher unter den Fischen [Abbildung 15]. Forelle und Äsche bevorzugen tendenziell eher die kleineren Korngrößen dieses Habitattyps, während die Nase eher die grösseren wählt. Dabei müssen für die Laichablage neben dem Substrat auch die Fließgeschwindigkeit und die Wassertiefe sowie das Vorhandensein von Deckung stimmen. Die Eier werden in eine von den Weibchen mit der Schwanzflosse geschlagenen Laichgrube oder Laichmulde abgegeben und von den Männchen befruchtet. Im gut durchströmten Kiesbett verbleiben sie dort ein paar Wochen und entwickeln sich zu Embryonen. Diese halten sich ein paar weitere Wochen in den Hohlräumen des Kiesbettes auf, bevor sie dieses als Brütlinge verlassen.



Abbildung 12: Mesolithal. Foto: Fredy Elber, AquaPlus AG. | Figure 12 : Mésolithe. Photo : Fredy Elber, AquaPlus AG.



Abbildung 13: Mikrolithal. Foto: Fredy Elber, AquaPlus AG. | Figure 13 : Microlithique. Photo : Fredy Elber, AquaPlus AG.



Abbildung 14: Aussortierte Probe von Wasserwirbellosen des Meso- und des Mikrolithals. Foto: Fredy Elber, AquaPlus AG. | Figure 14 : Divers invertébrés aquatiques provenant du mésolithé et du microlithique. Photo : Fredy Elber, AquaPlus AG.



Abbildung 15: Laichplätze von Äschen. Foto: Mathieu Camenzind, AquaPlus AG. Figure 15 : Sites de frai de l'ombre. Photo : Mathieu Camenzind, AquaPlus AG.

### 3.4 Akal

Akal [Abbildung 16] nennt man den von Fein- und Mittelkies geprägten Lebensraum [Korndurchmesser 0.2 bis 2 cm]. Hier treten die eben genannten Formen oft in Jugendstadien auf und weiter die typischen, langgezogenen, schlanken Bewohner wie die Steinfliegenlarven der Gattung *Leuctra*.



Abbildung 16: Akal. Foto: Mathieu Camenzind, AquaPlus AG. | Figure 16 : Akal. Photo : Mathieu Camenzind, AquaPlus AG.

### 3.5 Psammal

Die nächstkleinere Steinfraktion ist das Psammal [Abbildung 17]. Es wird von Sand gebildet [0.063 bis 2 mm Durchmesser] und von sehr kleinen und sehr schlanken Tieren besiedelt. Typische Vertreter sind die Zuckmückenlarven aber auch Würmer [Wenigborster]. Es können auch Flussmuscheln oder grabende Eintagsfliegenlarven (z.B. *Ephemera vulgata*, die Gemeine Eintagsfliege) vorkommen.



Abbildung 17: Psammal. Foto: Fredy Elber, AquaPlus AG. | Figure 17 : Psammal. Photo : Fredy Elber, AquaPlus AG.

### 3.6 Psammopelal und Pelal

Sobald sich Schlammteilchen unter die Sandkörner mischen, spricht man vom Psammopelal und wenn nur noch Schlamm vorhanden ist vom Pelal [Abbildung 18, Korndurchmesser < 0.063 mm]. Diese beiden Lebensräume werden fast ausschliesslich von Zuckmückenlarven und Würmern bewohnt. Falls den feinen Fraktionen organisches Material beigemischt ist, besteht die Gefahr der Sauerstoffarmut aufgrund des bakteriellen Abbaus dieser Stoffe. Unter solchen Verhältnissen können höchstens noch Spezialisten existieren, die Hämoglobin in ihrer Körperflüssigkeit aufweisen und so den letzten Sauerstoff noch nutzen können [Abbildungen 19, 20]. Zu diesen Spezialisten zählen der Schlammröhrenwurm *Tubifex tubifex* sowie rot gefärbte Larven der Zuckmückengattung *Chironomus*.



Abbildung 18: Pelal. Foto: Fredy Elber, AquaPlus AG. | Figure 18 : Pelal. Photo : Fredy Elber, AquaPlus AG.

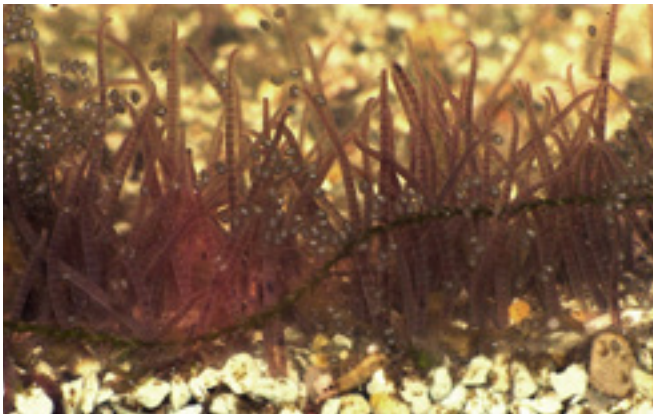


Abbildung 19: Schlammröhrenwurm: Tubifex sp.. Typischer Bewohner sauerstoffarmer Feinsedimente. Foto: Matthias Tilly, www.wikipedia.org. | Figure 19 : Ver tubulaire de boue : Tubifex sp.. Habitant typique des sédiments fins pauvres en oxygène. Photo : Matthias Tilly, www.wikipedia.org.



Abbildung 20: Rote Zuckmückenlarve der Gattung Chironomus. Typischer Bewohner sauerstoffarmer Sedimente. Foto: www.arcgis.com. | Figure 20 : Larve de chironomidé rouge du genre chironome. Habitant typique des sédiments pauvres en oxygène. Photo : www.arcgis.com.

### 3.7 Habitate im Längsverlauf eines Fliessgewässers

Im Längsverlauf eines Fliessgewässers finden sich die groben Sohlenkomponenten meist im Oberlauf sowie in

steilen Bereichen mit grosser Fliessgeschwindigkeit. Im Mittellauf sind die vorkommenden Steine bereits kleiner. Das Gefälle ist in der Regel gering und damit auch die Fliessgeschwindigkeiten. Im Unterlauf schliesslich ist das Sohlsubstrat noch feiner geworden. Das Gelände ist flach und die Strömungsgeschwindigkeit nur noch gering. Grundsätzlich können die unterschiedenen Habitate jedoch (mit Ausnahme des Megalithals) mehr oder weniger überall vorkommen. Aufgrund wasserbaulicher Massnahmen finden sich Steinbiotopie mittlerweile auch in Fliessgewässern mit natürlicherweise kiesiger oder sandiger Sohle.

## 4 Dynamik: Fluch und Segen

Die Gewässersohle stellt Lebensraum für zahlreiche Organismen dar. Teilweise dient sie lediglich für einzelne Stadien im Lebenslauf. So wie erwähnt für Kieslaicher unter den Fischen oder für Insekten, welche das Gewässer für die Fortpflanzung verlassen. Was jedoch als sicherer Ort oder Refugium erscheint, manifestiert sich bei Hochwasser (Abbildungen 21, 22), welche Geschiebetrieb auslösen, also die Gewässersohle in Bewegung setzen, als Todesfalle. Erst bewegen sich nur die kleineren Körner, bei steigendem Abfluss immer grössere bis sich schliesslich die gesamte Gewässersohle verschiebt. Natürliche Hochwasser kündigen sich normalerweise an: Der Abfluss nimmt zu, der Wasserpegel steigt und das Wasser wird trübe. Zeichen, die den mobilen Organismen im Gewässer signalisieren: Rette sich, wer kann! Das heisst: Ab in tiefere Regionen der Gewässersohle - in der Hoffnung, dass sich diese dort nicht bewegt - oder ab zum Ufer, wo die Fliessgeschwindigkeit aufgrund der grösseren Rauigkeit geringer als in der Flussmitte ist. Vor allem für Fische gibt es noch die Möglichkeit, in einen Zufluss einzusteigen und dort Zuflucht zu finden. Zuflüsse sind nämlich in der Regel aufgrund des kleineren Abflusses geringeren hydraulischen Kräften ausgesetzt als das Hauptgewässer.

Solche Fluchtreaktionen bzw. -strategien sind wichtig, insbesondere hinsichtlich des Verhaltens bei kleinen und mittleren Hochwassern. Sie hätten jedoch alleine vermutlich das Überleben der Tiere in einem so dynamischen System, wie es Fliessgewässer darstellen, nicht gesichert. Bei grossen Hochwassern werden nämlich leicht 90 und mehr Prozent der Gewässersohlenbewohner zerstört. Es braucht(e) also mehr. Da ist einmal die grosse Zahl an Nachkommen, die alle Gewässerorganismen erzeugen. Verluste sind damit von Beginn an eingerechnet. Weiter haben sich beispielsweise viele Insekten derart an hydrologische Geschehen im Gewässer angepasst, dass Zeiten mit gehäuft auftretenden Hochwassern - in unseren Breiten von ca. Juni bis September - bevorzugt ausserhalb des Gewässers verbracht und gerade für die Fortpflanzung genutzt werden. Idealerweise fliegen die Adulten zur Eiablage flussaufwärts



Abbildung 21: Dynamik im Fließgewässer ausgelöst durch unterschiedliche Abflüsse. Verhältnisse während und nach einem Hochwasser. Mitteldorfbach Oberägeri, Hochwasser 21.8.2005. Foto: Fredy Elber, AquaPlus AG. | Figure 21 : Dynamique dans un cours d'eau déclenchée par des écoulements différents. Conditions pendant et après une crue. Mitteldorfbach Oberägeri, crue du 21.8.2005. Photo : Fredy Elber, AquaPlus AG.



Abbildung 22: Dynamik im Fließgewässer ausgelöst durch unterschiedliche Abflüsse. Verhältnisse während und nach einem Hochwasser. Mitteldorfbach Oberägeri, 24.8.2005, nach dem Hochwasser vom 21.8.2005. Foto: Fredy Elber, AquaPlus AG. | Figure 22 : Dynamique dans un cours d'eau déclenchée par des écoulements différents. Conditions pendant et après une crue. Mitteldorfbach Oberägeri, 24.8.2005, après la crue du 21.8.2005. Photo : Fredy Elber, AquaPlus AG.

und kompensieren so die aufgrund der Strömung tendenziell stattfindende Abwärtsbewegung der Tiere. Man nennt diese Anpassung ans Fließgewässer auch den Kompensationsflug. Die Entwicklung vom Ei zur Larve und schliesslich zum Adulttier findet dann während der restlichen Zeit des Jahres statt. Und damit leichte Veränderungen im hydrologischen System aufgefangen werden können, verteilt sich der Ausflug bei einigen Insekten auch über einen längeren Zeitraum. Auch die Fließgewässerrische haben sich an die jahreszeitlich bedingten Veränderungen des Abflusses angepasst: Laichgeschäft und die Entwicklung vom Ei bis zum Jungfisch findet im Winterhalbjahr statt, wenn weniger Hochwasser auftreten.

Hochwasser haben zumindest für Bewohner der Gewässersohle auch ihr Gutes: Sie säubern die Gewässersohle von abgelagerten Schwebstoffen (Abbildungen 23, 24). Durch die Bewegung der Gewässersohle werden diese



Abbildung 23: Kolmatisierte Gewässersohle. Foto: Mathieu Camenzind, AquaPlus AG. | Figure 23 : Lit de cours d'eau affouillé. Photo : Mathieu Camenzind, AquaPlus AG.



Abbildung 24: Kolmatisierte Gewässersohle, entfernte Deckschicht. Foto: Mathieu Camenzind, AquaPlus AG. | Figure 23 : Lit de cours d'eau affouillé, couche superficielle enlevée. Photo : Mathieu Camenzind, AquaPlus AG.

mobilisiert und abgeschwemmt. Zurück bleibt ein reaktives Lückensystem, welches seine ökologische Funktion als Lebensraum wieder wahrnehmen kann. Kaum ist das Hochwasser durch, beginnt es wieder von Neuem: Schwebstoffe aus der fließenden Welle lagern sich auf der Gewässersohle ab (äussere Kolmation) oder dringen in diese ein (innere Kolmation) und verstopfen das Lückensystem. Lebensraum geht wieder verloren oder wird verändert. Beispielsweise wird auch die Sauerstoffversorgung tieferer Sohlenbereiche reduziert und die Infiltration ins Grundwasser zunehmend verringert.

## 5 Schwebstoffe - nur Probleme

Zugegeben, einfach ist es nicht, positive Seiten der Schwebstoffe zu finden. Vielleicht diese: Sie adsorbieren Schmutz- und Schadstoffen und wirken - irgendwo abgelagert - als diesbezügliche Senken. Im Übrigen gilt es, mit den Schwebstoffen so gut es geht umzugehen ...  
Nachfolgend unterscheiden wir zwischen Schwebstoffen in der fließenden Welle bzw. mobilisierten und abgelagerten bzw. sedimentierten. Die Herkunft mobilisierter Schwebstoffe ist in Tabelle 1 zusammengestellt.

### 5.1 Mobilisierte Schwebstoffe

Grundsätzlich sind die Auswirkungen von Schwebstoffen abhängig von der Schwebstoffkonzentration sowie der Expositionsdauer. Je grösser die Konzentration und je länger die Einwirkungszeit, desto problematischer sind die Verhältnisse für die Lebewesen. Jedoch können kleine, während langer Zeit wirkende Trübungen ähnliche Wirkungen zeigen wie grosse und kurze.

Bei den Fischen können neben Verhaltensänderungen (z.B. Abwanderung bzw. Meidung belasteter Bereiche) auch subletale (Verringertes Wachstum, schlechte Kondition, verringerte Nahrungsaufnahme, gestörtes Homing, physiologischer Stress, erhöhte Atemfrequenz, erhöhte Hustenrate) und letale Wirkungen (verzögertes und reduziertes Schlüpfen von Brütlingen, geringe bis hohe Mortalität) von Trübungen beobachtet werden. Generell sind Salmoniden (Forellenartige) gegenüber Trübungen wesentlich empfindlicher als andere Fischarten und Ei- sowie Larvalstadien reagieren wesentlich sensibler als Juvenil- und Adultfische. In der fließenden Welle üben Schwebstoffe auf Oberflächen und deren Bewohner (Algen, Wasserwirbellose) bei entsprechender Geschwindigkeit, Grösse und Form einen Sandstrahleffekt aus. Grössere und scharfkantige Partikel wirken dabei heftiger als kleinere und abgerundete. So «befreien» Hochwasser auch ohne Geschiebetrieb die Oberflächen mindestens teilweise von pflanzlichem Aufwuchs und tierischer Besiedlung.

Mobilisierte Schwebstoffe verursachen Trübungen im Gewässer (Abbildung 25). Diese beeinträchtigen die pflanzliche Produktion (Photosynthese) sowohl im Fließgewässer als auch im Mündungsgebiet stehender Gewässer.

Bei den tierischen Organismen werden optisch jagende Wasserwirbellose und Fische durch die Trübung beeinträchtigt. Sie haben einen erhöhten Such- und damit Energieaufwand, was zu einem reduzierten Wachstum und einer verminderten Fitness führen kann. Dies kommt ihrer Beute zugute.

Natürliche Ursachen	Unnatürliche Ursachen
Erosionsprozesse	Spülungen von Staubereichen
Schneeschnelze	Sandfang-Spülungen
Abschwemmungen bei Hochwasser	Schwall-Betrieb
Murgang	Baustellen im/am Gewässer
	Kieswerke
	Strassen- und Platzabwässer
	Siedlungsentwässerung
	Abschwemmungen aus der Landwirtschaft (Bewirtschaftung bis ans Gewässer, Kulturen ohne Bodendeckung)

Tabelle 1: Herkunft mobilisierter Schwebstoffe unterschieden zwischen natürlichen und anthropogenen Ursachen | Tableau 1 : Origine des matières en suspension mobilisées, différenciées entre les causes naturelles et anthropiques.

Filtrierer unter den Wasserwirbellosen sammeln mittels unterschiedlicher Technik Nahrungspartikel aus der fließenden Welle (Fangnetz wie z.B. bei einzelnen Köcherfliegenlarven (Abbildung 25), zu Fangeinrichtungen umgewandelte Körperteile wie bei Kriebelmückenlarven (Abbildung 26)). Während dies bei Seeausflüssen (mit Plankton angereichertes Wasser) oder auch unterhalb von Abwassereinleitungen (organische Partikel) aufgrund der Dichte dieser Partikel interessant ist, verstopfen anorganische Schwebstoffe die Filtriereinrichtungen. Auch hier wird der Aufwand der Nahrungsaufnahme erhöht bzw. der Energiegewinn eingeschränkt, so dass diese Organismen bei zu häufigem Auftreten von Trübungen verschwinden.



Abbildung 25: Trübung verursacht durch Baustelle. Foto: Fredy Elber, AquaPlus AG. Figure 25 : Turbidité causée par le chantier de construction. Photo : Fredy Elber, AquaPlus AG.

Einmal im Mündungsgebiet eines stehenden Gewässers angekommen, sedimentieren die Schwebstoffe. Bei Hochwasser, wenn eine hohe Schwebstoffdichte vorhanden ist, wirkt sich dies negativ auf die dort vorkommende Planktongemeinschaft aus. Die Schwebstoffe adsorbieren insbesondere an das Phytoplankton (koagulieren mit diesem), womit dieses schwerer wird und zusammen mit den Schwebstoffen auf den Gewässergrund absinkt. Je nach Stadium der Sukzession kann dies das Zurücksetzen einer Gemeinschaft auf eine frühere Sukzessionsstufe bedeuten. Beispielsweise wurde bei einem Hochwasser der Reuss im August 1987 im Urnersee die vorherrschende Kieselalge *Tabellaria fenestrata* (K-Strategie, Organismen mit geringer Reproduktionsrate, vergleichsweise grosse Organismen) mehr oder weniger aus der Wassersäule ausgewaschen. Daraufhin kamen, auch aufgrund des Nährstoffeintrages, kleine, grüne Flagellaten auf (r-Strategen bzw. Pionierarten, Organismen, welche sich rasch reproduzieren, vergleichsweise kleine Organismen), wie sie im Frühjahr typisch sind.

### 5.2 Sedimentierte Schwebstoffe

Die Auswirkungen sedimentierter Schwebstoffe auf den Gewässerboden wurden bereits oben erwähnt: Innere und



Abbildung 26: Fangnetz der Köcherfliegenlarve *Hydropsyche* sp.. Foto: Jakob Forster, [www.waldzeit.ch](http://www.waldzeit.ch). | Figure 26 : Fillet de capture de la larve de trichoptère *Hydropsyche* sp. Photo : Jakob Forster, [www.waldzeit.ch](http://www.waldzeit.ch).



Abbildung 27: *Simulium ornatum* mit Filtrierfächer; Kriebelmückenlarve. Foto: Rudolf & Elisabeth Hofer, [www.focusnatura.at](http://www.focusnatura.at). | Figure 27 : *Simulium ornatum* avec éventail filtrant ; larve de similies. Photo : Rudolf & Elisabeth Hofer ; [www.focusnatura.at](http://www.focusnatura.at).

äussere Kolmation mit den Folgen für die tierische Besiedlung sowohl in Fliessgewässern als auch im Mündungsgebiet stehender Gewässer.

Die sedimentierenden Partikel lagern sich auch auf Algen und Wasserpflanzen ab und schränken deren Photosynthese ein. Im Extremfall kommt es zum Absterben der pflanzlichen Organismen.

## 6 Komplexität und Menschgemachtes

Wie gezeigt, ist die ganze Dynamik um die Fliessgewässer eine komplexe Angelegenheit, auf die sich die verschiedenen Bewohner im Laufe der Evolution auf unterschiedliche Art erfolgreich angepasst haben. Die durch die Dynamik hervorgerufenen Veränderungen des Systems - diese können auch als Störungen bezeichnet werden - sind jedoch für dieses von entscheidender Bedeutung. Sie halten insbesondere die

Lebensgemeinschaft einigermaßen stabil, bzw. verhindern, dass sich sowohl bezüglich des Lebensraumes (z.B. eine vollständig kolmatisierte Gewässersohle) als auch der Biozönose eintönige Verhältnisse einstellen. Unter störungsfreien Bedingungen würde sich sonst bei einer Artengemeinschaft letztlich eine einzige Art durchsetzen - zumindest theoretisch. Anthropogene Veränderungen der Hydrologie und des Geschiebehaltens führen zu Eingriffen in die natürliche Dynamik bzw. zu zusätzlichen Störungen des Systems. Nehmen diese hinsichtlich Häufigkeit und Intensität einen Umfang an, der ausserhalb des natürlichen Schwankungsbereichs liegt (d.h. Über- oder Unterschreitung des Schwankungsbereichs), oder sind die Veränderungen einseitig gerichtet, leidet die Biozönose oder verändert sich, bzw. es kommt eine Gemeinschaft auf, die mit den neuen Bedingungen besser zurechtkommt. Beispielsweise nimmt die Individuendichte der Wasserwirbellosen bei zu häufigem Auftreten von Hochwasser deutlich ab; eine etwas weniger ausgeprägte Abnahme wird bezüglich der Artenzahl erwartet. Bei zu wenig Hochwasser (z.B. Restwasserverhältnisse bei Wasserkraftnutzung) bleibt die Gewässersohle stabil, die Individuendichte steigt zuerst und nimmt mit zunehmender Kolmation wieder ab; die Artenzahl sinkt schliesslich ebenfalls. Ausserdem verursachen in Restwasserstrecken seltene Hochwasser tendenziell einen grösseren Schaden bei den Lebensgemeinschaften, da der Grossteil der Tiere nicht an Hochwasser angepasst ist. Vorliegend betrachten wir lediglich die Auswirkungen anthropogener Eingriffe auf die Gewässersohle sowie die Schwebstoffe. Weitere anthropogene Einflüsse wie die Veränderung der Fliessgeschwindigkeit, der Temperatur oder der Wasserqualität tragen ebenfalls zur Veränderung von Biozönosen bei, werden hier jedoch nicht behandelt.

### • Verbauung der Gewässersohle

- a) Flächig verbaute Sohle
  - Betonsohle und verfugte bzw. gepflästerte Sohle (Abbildung 28): Zerstörter Lebensraum, bzw. es steht



Abbildung 28: Gepflästerte Sohle. Foto: Fredy Elber, AquaPlus AG. | Figure 28 : Fond pavé. Photo : Fredy Elber, AquaPlus AG.



Abbildung 29: Raubett. Foto: Fredy Elber, AquaPlus AG. | Figure 29 : Lit rugueux.  
Photo : Fredy Elber, AquaPlus AG.

nur «Oberfläche» als Lebensraum zur Verfügung. Keine Verbindung zum Lückenraum der Gewässersohle. Nur vereinzelt Organismen, diese sind vollständig den Kräften von Wasser und Geschiebe ausgesetzt.

– Raubett [Abbildung 29]: Grundsätzliche Veränderung des Lebensraumes. Makrolithal dominiert. Verbindung zum Lückensystem der Gewässersohle grösstenteils unterbunden. Geschiebetrieb fehlend, allenfalls bewegt sich auf dem Raubett aufliegendes Geschiebe. Stark eingeschränkter Lebensraum.

- b) Punktuelle Sohlensicherungen (Absturz, Schwelle, Rampe, [Abbildung 30]): Verhinderung bzw. Reduktion des Geschiebetriebes. Reduktion der Erosion. Verstärkung der Kolmation. Eingeschränkter Lebensraum, beeinträchtigte Migration.



Abbildung 30: Sohlentreppe. Foto: Fredy Elber, AquaPlus AG.  
Figure 30 : Lit en escalier. Photo : Fredy Elber, AquaPlus AG.

- c) Anreicherung der Gewässersohle mit größerem Substrat als natürlicherweise vorhanden zur Stabilisierung der Sohlenlage (meist Einbringen von Blöcken, Blockbelegung [Abbildung 31]). Veränderung des Lebensraumes, Dynamik bleibt jedoch weitgehend erhalten. Naturnahe Besiedlung der Gewässersohle.



Abbildung 31: Sohlenanreicherung mit Blöcken / Blockbelegung. Foto: Fredy Elber, AquaPlus AG. | Figure 31 : Enrichissement du fond avec des blocs / revêtement en blocs. Photo : Fredy Elber, AquaPlus AG.

- d) Kanalisierung: Es besteht die Gefahr, dass aufgrund der grösseren hydraulischen Kräfte vermehrt kleinere Korngrößen abgetragen werden. Es resultiert eine Gewässersohle mit groben Komponenten und geringer Strukturierung. In der Regel muss die Gewässersohle früher oder später befestigt werden, um eine übermässige Sohlenerosion zu verhindern oder zu stoppen. Starke Veränderung des Lebensraumes, Banalisierung

#### • Geschieberückhalt in einem Sammler

Aufgrund des Rückhalts gelangt kaum mehr Geschiebe ins Unterwasser. Bei Hochwasser findet dort jedoch Sohlen- und Ufererosion statt, welche einmal aufgrund der als Folge des Geschiebesammlers reduzierten «Beladung» des Wassers verstärkt in Erscheinung tritt [in Abhängigkeit der Fliessgeschwindigkeit werden Steinkörner zunehmender Grösse aus der Gewässersohle mobilisiert und abtransportiert] und schliesslich aufgrund der fehlenden Geschiebenachlieferung nicht mehr ausgeglichen wird. Dies mündet am Ende in den meisten Fällen in der Verbauung des Gewässers im Unterwasser mit den aufgezeigten Wirkungen auf die Biozönose. Mittlerweile wird bei der Planung von neuen Geschiebe-



Abbildung 32: Geschiebesammler. Foto: Fredy Elber, AquaPlus AG.  
Figure 32 : Dépotoir à alluvions. Photo : Fredy Elber, AquaPlus AG.



sammeln (Abbildung 32) bzw. der Sanierung von bestehenden darauf geachtet, dass so viel Geschiebe wie möglich weitergeleitet werden kann.

• **Stau**

Stau reduziert die Fliessgeschwindigkeit und führt zur Ablagerung von Geschiebe und Schwebstoffen und damit zur Kolmation der Gewässersohle [siehe dazu weiter oben]. Je stärker die Kolmation ist, desto grössere Hochwasser sind für die Säuberung der Gewässersohle notwendig. Staubereiche müssen von Zeit zu Zeit gespült werden. Dies verursacht künstliche Hochwasser, führt zu Geschiebetrieb oder zumindest zur Trübung des Wassers. Je nach Ausmass des Staus findet auch ein relevanter Geschieberückhalt mit den oben aufgeführten Auswirkungen statt.

• **Kiesentnahmen**

Kiesentnahmen führen bei selektiver Entnahme zur Veränderung der Zusammensetzung der Gewässersohle [Sohle wird fein- bzw. grobkörniger]. Ist die Entnahme generell zu gross, d.h. wird in der Bilanz mehr Geschiebe entnommen als nachgeliefert, fehlt im Unterwasser Geschiebe [siehe oben]. Es bilden sich keine Kiesbänke mehr bzw. vorhandene werden mit der Zeit erodiert und die Sohle tieft sich ein.

• **Schwall-Sunk**

Schwallereignisse stellen künstliche Hochwasser dar [Abbildung 33, 34]. Der Abfluss steigt in der Regel rasch an und die Signale eines nahenden Hochwassers - ansteigender Wasserspiegel, Trübung - treffen bei den vorhandenen Organismen zu kurz vor dem beeinträchtigenden Ereignis, der Schwallwelle, ein. Eine Flucht ist nicht mehr möglich oder erschwert. Je nach Grösse wird Geschiebetrieb verursacht. Ausserdem kann es beim Ausbleiben von Geschiebetrieb zur Kolmation der Gewässersohle kommen.

• **Restwasser**

Aufgrund der Wasserausleitung fehlen zumindest die kleinen, oft aber auch die mittleren Hochwasser. Die Gewässersohle kolmatiert, und es kann zur Vertümpelung kommen [Abbildung 35]. D.h. Abschnitte mit normalerweise fliessendem Wasser weisen grössere Bereiche mit stehendem Wasser auf. Damit verschwinden hier Organismen, die auf fliessendes Wasser angewiesen sind. Bei ausreichendem Vorhandensein von Nährstoffen besteht aufgrund der während längerer Zeit stabilen Verhältnisse ausserdem die Gefahr der Veralgung.



Abbildung 33: Sunk-Situation. Foto: Fredy Elber, AquaPlus AG. | Figure 33 : Effet d'éclosée [débit d'éclosée]. Photo : Fredy Elber, AquaPlus AG.



Abbildung 34: Schwall-Situation. Foto: Fredy Elber, AquaPlus AG. | Figure 34 : Effet d'éclosée [débit plancher]. Photo : Fredy Elber, AquaPlus AG.



Abbildung 35: Restwasserstrecke mit Vertümpelungstendenz und Kolmation. Foto: Fredy Elber, AquaPlus AG. | Figure 35 : Tronçon d'eau résiduel avec tendance au colmatage et au limonage. Photo : Fredy Elber, AquaPlus AG.

## 7 Lösungen gefunden und dann?

Ist ein Problem und seine Ursache erkannt, steht in den meisten Fällen auch der Weg zur Lösung offen. Oftmals entscheidet die Prioritätensetzung, ob dieser Weg dann auch beschritten wird. Dies trifft auch auf die vorher aufgeführten Eingriffe in den Geschiebehalt zu. Wo ist der Mensch bereit, geschaffene Probleme auf «seine» Kosten zu eliminieren bzw. zu reduzieren? Wo ist er bereit, der

Natur mehr Raum zu lassen oder diese weniger zu nutzen? Bezüglich des Geschiebes hat der Bund die Sanierung des Geschiebehaushaltes der Fliessgewässer eingeleitet [Gewässerschutzverordnung Art. 42a, 42b, 42c]. Die Geschiebeführung soll wieder vergleichbar mit dem naturnahen Zustand des Gewässers werden. Die morphologischen Strukturen und die morphologische Dynamik des Gewässers darf nicht nachteilig verändert werden. Zudem stellt

mittlerweile das Thema Geschiebe bei jedem Wasserbauprojekt einen zentralen Punkt dar, so dass zumindest bei aktuellen Projekten davon ausgegangen werden darf, dass die Geschiebeproblematik Beachtung findet. Auch hinsichtlich der Kiesentnahme [GSchV Art. 43], der Spülung von Stauräumen [GSchV Art. 42], Schwall-Sunk [GSchV Art. 41e, 41f, 41g] und Restwasser [Gewässerschutzgesetz Art. 31ff], welche alle einen Bezug zu

### Generell

- Zeitpunkt von Aktivitäten im Gewässer aufgrund ökologischer Aspekte wählen oder diese zumindest berücksichtigen

### Spülungen (Staubecken/Sandfang)

- Abklärungen zu Art und Menge der abzuschwemmenden Sedimente und deren Schadstoffgehalte
- Berücksichtigung von Laichzeit, Aufwuchszeit und spezifischen Gegebenheiten
- Spülungen möglichst bei natürlicherweise hohen Abflüssen durchführen zur Vermeidung zusätzlicher Störungen
- Langsame Erhöhung des Abflusses zur Verminderung der Abschwemmung / Abdrift von Organismen und deren Nahrungsgrundlagen (z. B. Laub, Detritus)
- Ausreichende Nachspülung zur Vermeidung / Verminderung der Kolmation
- Entwicklung eines Spülkonzeptes mit u.a. Definition der maximal zulässigen Konzentration an Schwebstoffen und der Dauer der Spülung
- Umsetzung mit fachlicher Begleitung (u.a. Trübungsmessungen, Kontrollen der Kolmation, Ermittlung der Auswirkungen auf Fische und Wasserwirbellose)

### Schwall-Betrieb

- Schwall/Sunk-Sanierung
- Schwalldämpfung

### Wasserbau

- Entwässerungsplanung
- Wasserhaltung / Bauen im Trockenem
- Berücksichtigung von Laichzeit, Aufwuchszeit und spezifischen Gegebenheiten
- Aktiver Schutz von Organismen (z.B. Abfischen)
- Einsatz von Absetzbecken
- Umweltbaubegleitung UBB / Kontrolle
- Trübungsmessungen installieren

### Kiesentnahme

- Möglichst im Trockenem
- Berücksichtigung von Laichzeit, Aufwuchszeit und spezifischen Gegebenheiten

### Strassen- und Platzentwässerung

- Versickerung anstreben
- Einsatz von Absetzbecken; Wasserrückhalt z. B. in Becken

### Siedlungsentwässerung

- Planung für Gewässerschutz bei Regenwetter (STORM)
- Vermeidung von Entlastungen
- Absetzbecken, Rückhaltebecken
- Einleitung in weniger problematische Abschnitte

### Landwirtschaft

- Ausscheidung eines ausreichend grossen Gewässerraumes
- Wahl der angebauten Kultur

Tabelle 2: Massnahmen zur Verhinderung oder Dämpfung von Trübungen im Gewässer und damit zur Verhinderung von negativen Auswirkungen auf Gewässerorganismen bei unterschiedlichen anthropogenen Einflüssen. | Tableau 2 : Mesures pour prévenir ou atténuer la turbidité dans le cours d'eau et ainsi prévenir les impacts négatifs sur les organismes aquatiques en cas de différentes influences anthropiques.

Geschiebe oder Schwebstoffen haben, bestehen rechtliche Vorgaben, um die Schädigung von Organismen zumindest zu reduzieren.

Auf dem Papier scheinen die Lösungen also gefunden. In der Umsetzung hapert's dann schon etwas mehr. Insbesondere das Tempo der Sanierungen lässt zu wünschen übrig. Dies hängt auch mit der Herangehensweise zusammen: Problem- oder lösungsorientiert. Muss ich die letzte Ursache des Problems für dessen Lösung kennen, oder bin ich bereit, ohne detaillierteste Problemanalyse Massnahmen zu treffen, um eine zumindest wesentliche Verbesserung herbeizuführen? Der Ruf nach immer mehr Studien mit der Absicht, Massnahmen zu verzögern, soll hier nicht thematisiert werden. Die für Verbesserungen der Situation erforderlichen Massnahmen sind meist mindestens hinsichtlich der Ausrichtung klar und werden zum Glück mancherorts schon angewendet [Tabelle 2].

Zusammen mit Erfolgskontrollen, welche die Basis allfälliger Korrekturen bilden, wären Umsetzungen von objektspezifischen Massnahmen, um die es meist geht, oft deutlich rascher möglich, als es aktuell der Fall ist. Es resultiert in aller Regel zeitnah ein ökologischer Gewinn, welcher bei Bedarf mittels wiederum spezifischer Anpassungen gesteigert werden kann. «Fehler» werden bei einem solchen Vorgehen bewusst in Kauf genommen. Sie helfen das System zu verstehen und zu optimieren. Probieren geht definitiv nicht immer über Studieren. Doch mit Studieren allein werden keine Probleme gelöst.

**Kontaktadresse**

Fredy Elber  
 AquaPlus AG  
 Gotthardstrasse 30  
 6300 Zug  
[fredy.elber@aquaplus.ch](mailto:fredy.elber@aquaplus.ch)



«Mein Team für mehr Biodiversität»

Hanspeter Latour, OHS Wildblumenbotschafter

Wildblumen



[www.hauenstein.ch](http://www.hauenstein.ch) | [info@hauenstein.ch](mailto:info@hauenstein.ch) | 044 879 17 19

# Einfluss der Klimaerwärmung auf den Sedimenttransport in Fließgewässern

Aurelian Schumacher  
 Andrea Kristin Bachmann  
 Jürg Speerli

## Zusammenfassung

Der Sedimenttransport ist zentral für die natürliche Funktion eines Fließgewässers. Im vorliegenden Artikel werden die Feststoffe kategorisiert, wobei die Sedimente (Geschiebe und Schwebstoffe) im Vordergrund stehen. Es werden Grundlagen des Sedimenttransportes erläutert und der Sedimenttransport in Wildbächen sowie Bächen und Flüssen beschrieben.

Durch die Klimaerwärmung sind in der Schweiz diverse Einflussfaktoren betroffen, die für den Sedimenttransport relevant sind. Der Niederschlag wird häufiger als Regen und seltener in Form von Schnee auftreten. Die Extreme werden zunehmen: Intensivere Niederschläge und längere und intensivere Trockenperioden. Die Hochwassersaison wird von früher bis später im Jahr andauern.

Zumindest bis zum kompletten Abschmelzen der Gletscher werden durch freigelegte Gletscherfelder und auftauenden Permafrost mehr Sedimente und Wasser v. a. in die Oberläufe eingetragen – z. B. durch Hangrutschungen und durch Sedimenttransport auch in tiefere Gebiete. Dies wird zu mehr Sedimentablagerungen in flacheren Strecken und durch den vermehrten Eintrag in Talflüsse zu umfangreicheren Sedimentumlagerung führen. Trotz genereller Zunahme der meisten Parameter (z. B. Sedimentaufbereitung, -eintrag, und -umlagerungen) wird es aufgrund der topographischen und klimatischen Vielfalt der Schweiz auch Gewässer[abschnitte] mit rückgängigem Sedimenttransport geben.

## Keywords

Klima[wandel, -erwärmung], Feststoffe, Sediment[transport], Geschiebe, Fließgewässer

## Influence du réchauffement climatique sur le transport des sédiments dans les cours d'eau

### Résumé

Le transport des sédiments est essentiel à la fonction naturelle d'un cours d'eau. Dans cet article, les matières solides sont classées par catégorie, les sédiments (charriage et matières en suspension) étant le point central. Les principes de base du transport des sédiments sont expliqués et le transport des sédiments dans les torrents ainsi que dans les ruisseaux et les rivières est décrit.

En Suisse, le réchauffement climatique affecte divers facteurs pertinents pour le transport des sédiments. Les précipitations se produiront plus fréquemment sous forme de pluie et moins fréquemment sous forme de neige. Les extrêmes vont augmenter : des précipitations plus intenses et des périodes sèches plus longues et plus intenses.

La saison des crues commencera plus tôt et finira plus tard. Au moins jusqu'à la fonte complète des glaciers, davantage de sédiments et d'eau seront transportés par les glaciers exposés et le dégel du pergélisol, notamment dans les cours supérieurs d'un cours d'eau - par exemple par des glissements de terrain et le transport de sédiments vers les zones en aval. Cela conduira à un dépôt plus important de sédiments dans les tronçons plus plats et, en raison de l'apport accru dans les rivières en plaine, à une redistribution plus importante des sédiments. En dépit d'une augmentation générale de la plupart des paramètres [par exemple le traitement, l'apport et la redistribution des sédiments], il y aura également des [tronçons de] cours d'eau avec un transport de sédiments plus faible en raison de la diversité topographique et climatique de la Suisse.

**Mots-clés**

Changement / réchauffement climatique, matières solides, [transport de] sédiments, charriage, cours d'eau.

**Gli effetti del riscaldamento climatico sul trasporto solido nei corsi d'acqua**

**Riassunto**

Il trasporto dei sedimenti è fondamentale per assicurare le funzioni naturali di un corso d'acqua. In questo articolo, il trasporto solido viene categorizzato, con i sedimenti [materiale solido di fondo e in sospensione] in primo piano. Vengono spiegate le basi del trasporto di sedimenti e ne viene descritto il funzionamento nei torrenti, nei piccoli corsi d'acqua e nei fiumi.

In Svizzera, il riscaldamento del clima ha conseguenze su diversi fattori rilevanti per il trasporto dei sedimenti. Le precipitazioni si presenteranno più frequentemente sotto forma di pioggia e meno frequentemente sotto forma di neve. Inoltre, gli eventi estremi aumenteranno: precipitazioni più intense e periodi di siccità più lunghi e intensi. La stagione delle piene inizierà prima e si concluderà più tardi durante l'anno.

Dai ghiacciai esposti, fino al loro completo scioglimento, e dal permafrost che si scioglie le tratte iniziali dei corsi d'acqua trasporteranno più sedimenti e acqua - per esempio attraverso le frane e il conseguente trasporto dei sedimenti verso valle. Questo porterà a una maggiore deposizione di sedimenti nei tratti meno ripidi e, a causa del maggiore apporto nei fiumi dei fondovalle, a una mobilitazione e redistribuzione importanti del materiale solido. Nonostante un aumento generale della maggior parte dei parametri [per esempio la disponibilità, l'apporto e la mobilitazione], ci saranno anche corsi d'acqua, o alcune

tratte, con un ridotto trasporto di sedimenti a causa della diversità topografica e climatica della Svizzera.

**Parole chiave**

Cambiamento climatico e riscaldamento globale, Materiale solido, Trasporto di sedimenti, Corsi d'acqua.

**1 Einleitung**

Der vorliegende Artikel basiert auf den Erkenntnissen aus den Arbeiten für den Bericht *Auswirkungen des Klimawandels auf den Sedimenttransport* im Rahmen des Projektes Hydro-CH2018 im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt BAFU [SPEERLI ET AL. 2020]. Die Autoren fassen die aus ihrer Sicht für die Leserschaft der Ingenieurbiologie relevanten Punkte zusammen.

**2 Grundlagen**

**2.1 Feststoffe**

Feststoffe im Wasser können in drei Kategorien unterteilt werden: Sedimente, Schwimmstoffe und gelöste Stoffe [Abbildung 1]. Hauptunterscheidungsmerkmal ist die Transportart: Sedimente weisen eine höhere Dichte als Wasser auf und sinken ohne Strömung ab, Schwimmstoffe, wie z. B. Schwemmholz, halten sich aufgrund der im Verhältnis zum Wasser geringeren Dichte an der Oberfläche und gelöste Stoffe sind mehr oder weniger gleichmässig im Wasser verteilt. Der vorliegende Artikel behandelt die Sedimente.

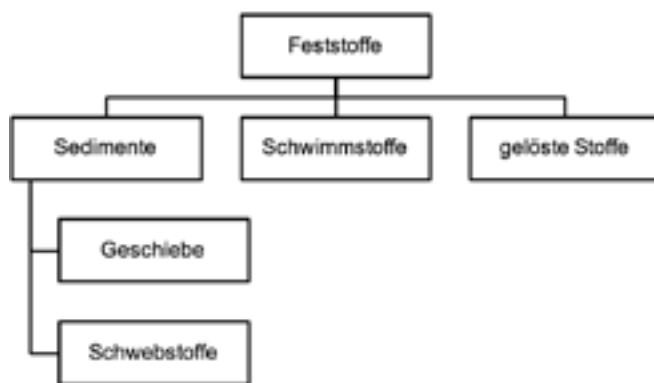


Abbildung 1: Einteilung der Feststoffe [BEZZOLA 2017]. | Figure 1 : Classification des solides [BEZZOLA 2017].

Die Sedimente unterteilen sich in zwei Kategorien. Das Geschiebe ist jener Teil der Sedimente, welcher nahe an der Sohle eines Fließgewässers transportiert wird. Das Geschiebe besteht aus verschieden grossen Körnern, welche im Wildbachsystem als grosse Blöcke ihren Weg beginnen und im Verlauf des Transportes zerkleinert werden. Schwebstoffe sind die kleinsten und feinsten Bestandteile der Sedimente. Sie entstehen durch die Zerkleinerung der

grösseren Geschiebebestandteile oder werden als Verwitterungsprodukt und durch Erosion aus dem Festgestein gelöst. Durch turbulente Strömungen werden sie aufgrund ihrer kleinen Sinkgeschwindigkeit abgehoben und so über eine grössere Distanz über der Sohle schwebend transportiert [BEZZOLA 2017].

### 2.2 Transport

Der Sedimenttransport hängt wesentlich vom Abfluss und dem Gefälle eines Fliessgewässers sowie der Verfügbarkeit von Sedimenten ab. Durch erhöhten Abfluss wirken grössere Kräfte auf die Sedimente und sie werden von der Sohle gelöst und vom Wasser stromabwärts transportiert. Es entsteht eine Erosion an der Sohle. Reduziert sich der Abfluss, werden auch die Kräfte auf die Sedimentbestandteile kleiner und das Geschiebe und die Schwebstoffe sinken zurück auf die Sohle und führen dort zu Auflandungen. In Abbildung 2 sind die wichtigsten Einflussfaktoren für den Sedimenttransport in Form einer Waage dargestellt. Wenn die Waage bzw. das Gerinne im Ausgangszustand im Gleichgewicht ist und man beispielsweise die Korngrösse

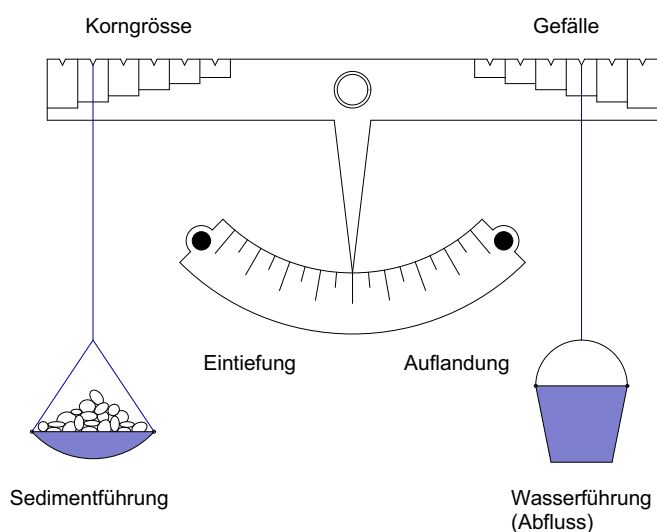


Abbildung 2: Sedimentwaage nach LANE [1955]. | Figure 2 : Échelle des sédiments selon LANE [1955].

und/oder die Sedimentführung erhöht, ergibt sich eine Auflandung. Erhöht man hingegen das Gefälle und/oder den Abfluss, tiefte sich das Gerinne ein. Der Geschiebetransport ist vor allem für die morphologische Gestalt von Sohle und Ufer verantwortlich. Der Schwebstofftransport beeinflusst massgeblich die Kolmationsprozesse, die Feinmaterialablagerungen auf dem Vorland und die Verlandung von Auengewässern. Unter Kolmation versteht man das Verfüllen des Porenvolumens des Sohlenmaterials durch Feinstmaterialien, was zu einer temporären oder dauerhaften Abnahme der Durchlässigkeit der Sohle führt und damit den freien Austausch

zwischen Fliessgewässer und Grundwasser behindert oder unterbindet.

Bezüglich Geschiebetransport können drei Fälle unterschieden werden: Geschiebedefizit, Geschiebeüberschuss und Geschiebegleichgewicht. Beim Geschiebedefizit wird weniger, beim Geschiebeüberschuss mehr Geschiebe vom Oberwasser in den betreffenden Gewässerabschnitt eingetragen als darin transportiert werden kann und beim Geschiebegleichgewicht wird gleichviel Geschiebe zu- wie abgeführt [SCHÄLCHLI, ABEGG + HUNZINGER 2005].

### 2.3 Von den Bergen in die Ebene

Man unterscheidet zwischen dem Sedimenttransport in Wildbächen (vorwiegend alpines Gebiet) und in Bächen und Flüssen (vorwiegend voralpines Gebiet und Mittelland). In Abbildung 3 sind die relevanten Grössen und Zusammenhänge dargestellt.

- Im alpinen Gebiet oder dem Oberlauf bringen meistens viele relativ kleine Zubringer bei hohen Längsgefällen und starker Strömung jedoch verhältnismässig kleinen Abflüssen viel grobe bis sehr grobe Sedimente mit und lagern kaum Material ab. Allfällige Ablagerungen sind in der Regel sehr grob.
- In den Voralpen oder im Mittellauf nehmen die Anzahl der Zuflüsse, das Gefälle und die Strömung ab, der Abfluss hingegen zu. Der seitliche Sedimenteintrag nimmt ab und wird feiner, dafür nehmen die Ablagerungen zu und weisen mittlere Korngrössen auf.
- Im Mittelland oder Unterlauf liegen typischerweise flache,

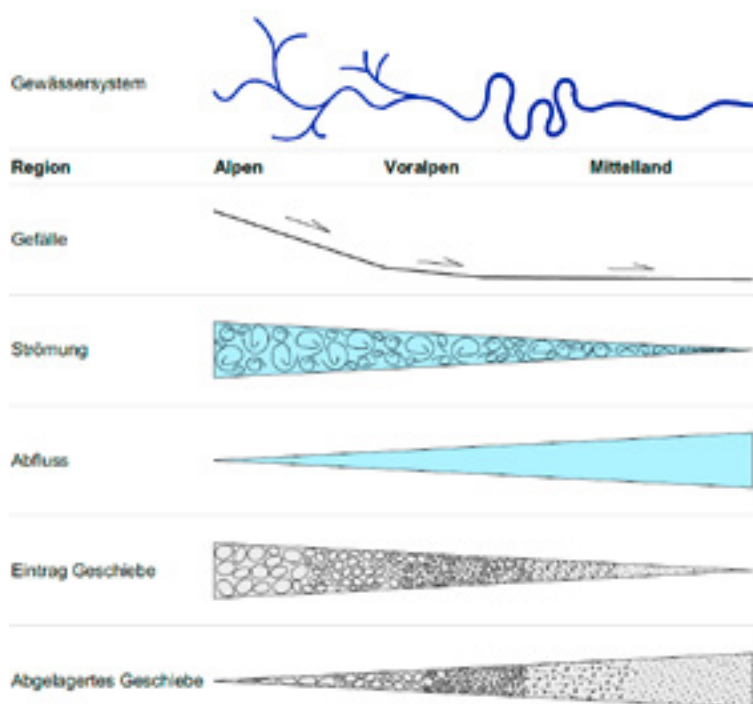


Abbildung 3: Transport und Ablagerung von Sedimenten entlang eines Fliessgewässers [eigene Darstellung nach BAFU 2017]. | Figure 3 : Transport et dépôt de sédiments le long d'un cours d'eau [représentation propre d'après OFEV 2017].

oft künstlich gestreckte Gerinne mit wenigen oder keinen Zuflüssen, eher schwacher Strömung, jedoch mit hohen Abflüssen. Es werden wenige und höchstens noch feine Sedimente aus dem Oberlauf (kaum noch seitlich) eingetragen, dafür wird viel, hauptsächlich feines Material abgelagert.

Entscheidender als die Gebietsbezeichnungen Alpen, Voralpen und Mittelland ist die Abgrenzung zwischen steilen und flachen Fliessgewässern. Erstere sind fast immer Wildbäche und transportieren relativ zum Abfluss viel Sedimente, letztere sind meistens Bäche oder Flüsse. Der kritische Punkt ist der Gefällsknick beim Übergang von steilen zu flachen Strecken. Das von oben eingetragene Material kann nicht vollständig weitertransportiert werden und führt im Gerinne – oder wenn der Gefällsknick bei einer Mündung liegt im Gerinne des unterstrom liegenden Gewässers – zu Auflandungen.

#### 2.4 Sedimenttransport in Wildbächen

Die Sedimente in Wildbächen entstehen an den Hängen der Berge sowie steiler Hügel und werden über ein oder mehrere Gerinne in ein Gewässer transportiert (Abbildung 4). In diesem Gewässer (Bach, Fluss, See) endet die Betrachtung des Sedimenttransportes für die Wildbäche.

An den Hängen des Gebirges werden die Sedimente durch Erosion aufbereitet. Das Material gelangt über den Oberflächenabfluss in ein Gerinne und wird dort zerkleinert und weitertransportiert. Aus Hangrutschungen, Murgängen und weiteren Erosionsprozessen kann zusätzliches Material ins Gerinnesystem gelangen. In diesem Gerinnesystem wird das Material verlagert und nach einem Hochwasser im Bereich der abgeflachten Strecken abgelagert. Beim Durchgang eines neuen Hochwassers werden die Sedimente weitertransportiert und auf einem Schwemmkegel oder Delta abgelagert oder direkt bis ins nächste Gewässer transportiert (SPREAFICO ET AL. 2005). Der Geschiebetransport in Wildbächen findet in der Regel nur bei mittleren bis grossen Hochwasserereignissen statt und ist dann sehr umfangreich (SCHÄLCHLI, ABEGG + HUNZINGER 2005).

#### 2.5 Sedimenttransport in Bächen und Flüssen

Die Sedimenttransportprozesse in Bächen sind vergleichbar mit denjenigen in Flüssen, Hauptunterschied ist die Grösse der Gewässer. Im vorliegenden Artikel werden die Prozesse für Bäche und Flüsse oberstrom von Seen gemeinsam beschrieben.

Nach dem Sedimenteintrag von (Wild-)Bächen in einen Fluss werden die Sedimente im Flusssystem weitertransportiert (Abbildung 5). Weitere Sedimentquellen für das Flusssystem sind Hangrutsche und kleinere Flüsse und Bäche im Einzugsgebiet. Der Transport im Flusssystem ist analog zum Wildbachsystem stark vom Abfluss und den

Strömungsbedingungen im Gerinne abhängig. Die Geometrie, das Längsgefälle und die Beschaffenheit der Böschungen und der Sohle des Gerinnes beeinflussen bei einem Hochwasser die Fliesstiefe und die Fließgeschwindigkeit. Diese Faktoren ergeben die Abflusskapazität des Gerinnes und somit dessen Sedimenttransportkapazität. Es kann ein Ablagerungs-, Gleichgewichts- oder Erosionszustand vorliegen. Je nach Zustand wird die Flusssohle beeinflusst und es ändert sich infolgedessen die Gerinnegeometrie. Dies hat einen erneuten Einfluss auf den Zustand des Gerinnes. So entsteht eine komplexe Wechselwirkung zwischen Abfluss, Gerinneform und Sedimenttransport (SPREAFICO ET AL. 2005).

Beim Durchgang eines Hochwassers wird das Material in grösseren Mengen erodiert und transportiert und lagert sich nach dem Durchgang der Hochwasserwelle im Gerinne ab. Durch diese Prozesse werden die Sedimente in den Flusssystemen nach und nach ins nächste Gewässer transportiert und lagern sich dort auf einem Schwemmkegel ab oder werden weiter in dieses Gewässer eingetragen.

### 3 Auswirkungen der Klimaerwärmung auf die Einflussfaktoren des Sedimenttransportes

Die Klimaerwärmung führt in der Schweiz zu einer Zunahme der durchschnittlichen Temperatur sowie der Temperaturmaxima, zu grösseren Niederschlagsintensitäten, einer Zunahme der Verdunstung und zum Abschmelzen der Gletscher und dem Ansteigen der Permafrostgrenze. Jedoch sind die Veränderungen des Klimas insbesondere auf regionaler Ebene sehr schwer vorherzusagen. Im Winter nehmen die Niederschläge tendenziell zu und im Sommer ab. Es wird erwartet, dass der mittlere Abfluss in den Schweizer Gewässern abnehmen wird. Es ist vor allem im Südtessin und im Mittelland vermehrt mit Trockenperioden zu rechnen. Die Anzahl sehr heisser Sommertage wird sich bis 2060 voraussichtlich von einem auf drei bis 17 Tage erhöhen während die Nullgradgrenze um 400 bis 650 m aufsteigen wird (NCCS 2018).

#### 3.1 Niederschläge

Aufgrund der grossen regionalen, saisonalen und jährlichen Variabilität des Niederschlags können aus den vorhandenen Messungen keine statistisch signifikanten Aussagen bezüglich einer Niederschlagsentwicklung gemacht werden (PERROUD UND BADER 2013). Durch die Erhöhung der Temperaturen kann die Atmosphäre mehr Wasserdampf aufnehmen. Dies kann zu einer Erhöhung der Niederschlagsintensität führen, wodurch grössere Hochwasser resultieren können. Der stärkste jährliche Eintagesniederschlag wird im Sommer wie auch im Winter um rund 10% zunehmen (NCCS 2018).

#### 3.1 Abflussregime

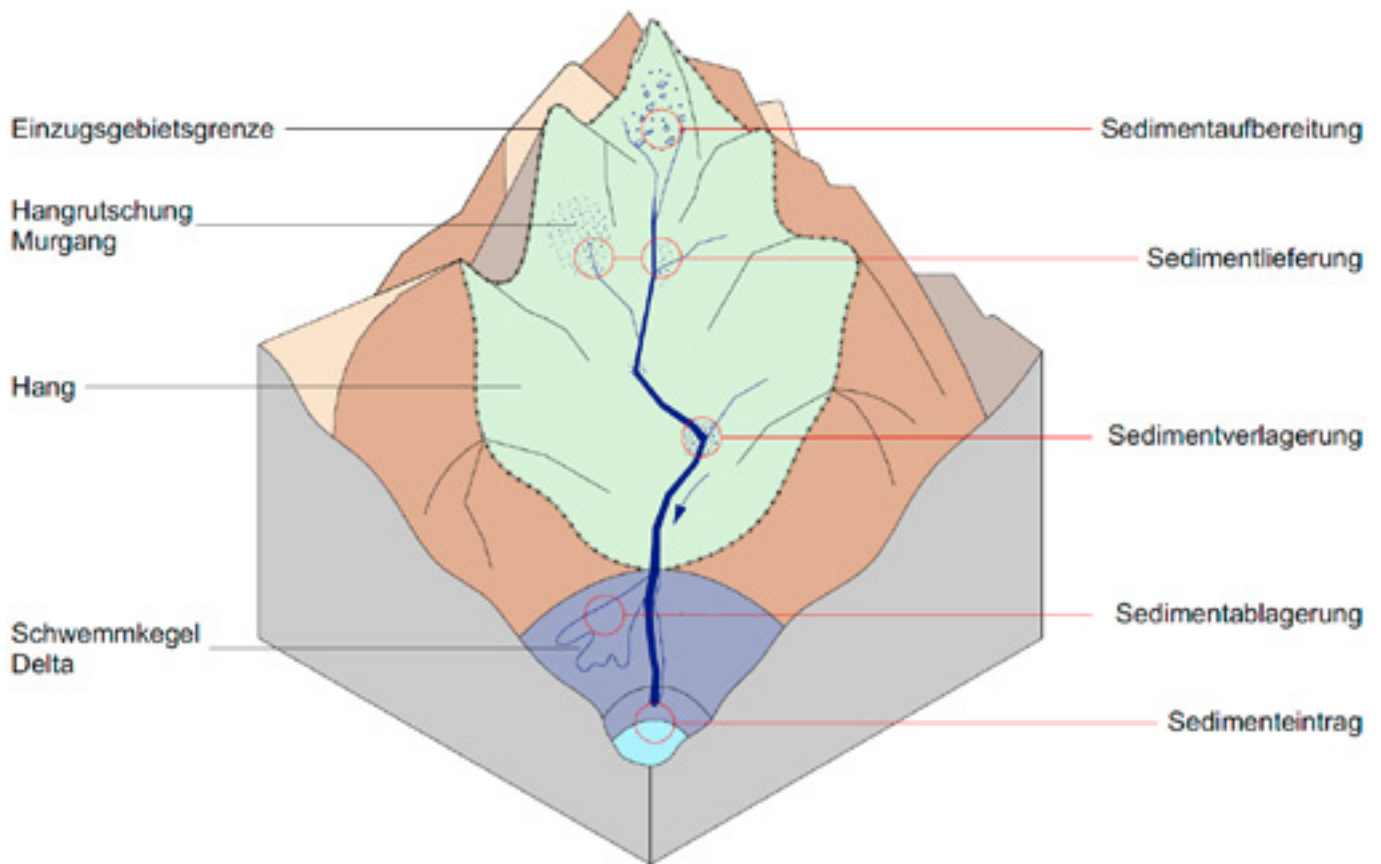


Abbildung 4: Sedimentherkunft und -transport im alpinen Gebiet bis in ein Gewässer. Zeichnungsidee: SPREAFICO ET AL. (2005). | Figure 4 : Origine et transport des sédiments dans la région alpine jusqu'à un cours d'eau. Idée de dessin : SPREAFICO ET AL. (2005).

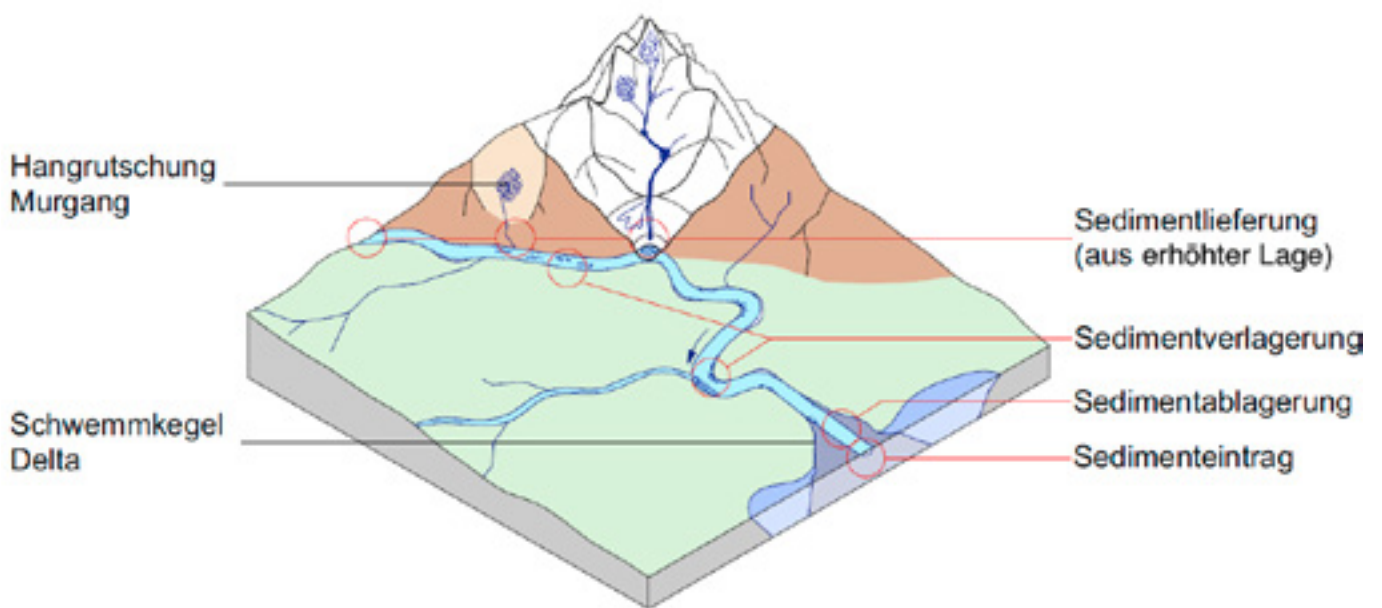


Abbildung 5: Sedimentherkunft und -transport in einem Fluss. | Figure 5 : Origine et transport des sédiments dans une rivière.



Durch die erhöhten Temperaturen im Winter wird der Niederschlag seltener in Schneeform gespeichert und das Regenwasser gelangt schneller in die Gewässer [KOHs 2007]. Die grossen Abflüsse treten somit nicht mehr nur im Sommer und Spätsommer auf, sondern können auch früher oder später im Jahr erfolgen [OCCC 2007].

### 3.2.1 Niedrigwasser

Niedrigwasserabflüsse werden sowohl im Sommer wie auch im Herbst ausgeprägter ausfallen [KOHs 2007], d. h. werden häufiger und über längere Perioden von früher bis später im Jahr als heute auftreten. Die Niedrigwasserabflüsse werden zudem noch tiefer ausfallen.

### 3.2.2 Hochwasser

Das Auftreten von extremen Hochwasserereignissen in kleineren und mittleren Einzugsgebieten ist meist unerwartet, somit kann eine Aussage zu deren Auftreten nur sehr generell gemacht werden [NAEF UND WERNLI 2016]. Aufgrund der topographischen Vielfalt in der Schweiz gibt es regional starke Unterschiede in den Abflussregimes bzw. hochwasserverursachenden Prozessen. Die verschiedenen Gebietstypen werden sich mit der Klimaerwärmung unterschiedlich entwickeln. Die KOHs [2007] unterschied drei Gebiete:

- Unterhalb 1'500 m ü. M.: Zunahme der Winter-Hochwasserspitzen, generelle Abnahme der Sommer-Hochwasser, jedoch weiterhin starke Gewitterereignisse, die v. a. kleinere Einzugsgebiete betreffen.
- (Nord-)Alpen über 1'500 m ü. M.: Höhere Winterabflüsse, kleine Frühjahrs-Schmelzhochwasser mit grösseren Spitzen.
- Alpensüdseite: Grössere Hochwasser in Winter und Frühjahr, kleinere Abflussspitzen im Sommer, Jahreshochwasser weiterhin im Herbst, jedoch eher noch grösser.

In den Jahreszeiten ohne explizite Nennung werden keine grossen Änderungen erwartet. In einer Studie unterschieden KÖPLIN ET AL. [2014] fünf Regimetypen (mit jeweiligem Beispielgewässer in Klammern):

- Pluvial (Urtenen): Höhere Winterhochwasser und Zunahme mittlerer Jahreshochwasser, stärkere Saisonabhängigkeit.
- Nivo-pluvial (Kleine Emme): Hochwassersaison verschiebt sich von Spätsommer in Herbst/Winter und wird länger, mittlere Jahreshochwasser nehmen nur leicht zu.
- Nival alpin (Muota): Hochwassersaison verschiebt sich von Spätsommer in Herbst und wird länger, Zunahme mittlerer Jahreshochwasser.
- Glazial (Chärstelenbach): Schwächere Saisonabhängig-

keit und Zunahme mittlerer Jahreshochwasser.

- Südalpin (Moesa): Schwächere Saisonabhängigkeit, leichte Zunahme mittlerer Jahreshochwasser bis ca. 2050, dann leichte Abnahme.

Gesamthaft wird mit einer Zunahme sowohl der mittleren Jahreshochwasser als auch der Maximalhochwasser gerechnet.

### 3.2.3 Gletscher

Modellrechnungen zeigen, dass die Gletscher bis zum Ende des 21. Jahrhunderts einen starken Rückgang erfahren werden. Ab diesem Zeitpunkt werden die meisten Einzugsgebiete in der Schweiz eisfrei sein. Dies hat einen direkten Einfluss auf den Abfluss in den Gewässern [FUNK ET AL. 2011].

Durch den Rückgang der Gletscher kann mehr Geschiebe mobilisiert werden. Durch grosse Regenereignisse, Hangrutschungen, Felsstürze und Murgänge wird dieses Material ins Tal verfrachtet. Solche Massenbewegungen können Flutwellen in Stauseen auslösen. Insbesondere bei einem vollen Stausee werden die Unterlieger und die Stauanlage durch die Flutwelle gefährdet und das Flussbett allenfalls stark verändert [PROCLIM-, OCCC UND NfS KLIMA 2003].

Der Gletscherrückgang hat ausserdem zur Folge, dass sich je nach Topografie Seen im Gletschervorfeld bilden wie z. B. der Favergessee beim Plaine-Morte-Gletscher [SRF.CH]. Diese haben oft instabile Ufer und der Wasserstand schwankt teils stark. Dies kann ein Ausbrechen der Wassermassen provozieren, was wiederum zu Hochwasser mit Überschwemmungen und gar Murgängen führen kann [MARTY ET AL. 2009].

### 3.3 Permafrost

Das Eis in den Permafrostböden hält oft grosse Mengen an Schutt oder Fels zusammen. Taut der Boden auf, können die Gesteinsmassen je nach Topografie ins Rutschen geraten und ins Tal stürzen, wie z. B. seit 2009 wiederholt am Spreitgraben in Guttannen [SPREITGRABEN.CH] oder der Bergsturz von Bondo 2017 an der Nordflanke des Piz Cengalo, der mehrere Murgänge im Val Bondasca ausgelöst und acht Menschenleben gefordert hat [GR.CH].

## 4 Auswirkungen der Klimaerwärmung auf den Sedimenttransport

Die zu erwartenden Veränderungen auf den Sedimenttransport sind in Abbildung 6 summarisch grafisch dargestellt. Daraus ist ersichtlich, dass bei allen dargestellten Parametern mit einer künftigen Zunahme zu rechnen ist. Einzige Ausnahme sind die Sedimentausträge aus natürlichen Seen, die sich nicht ändern werden.



Abbildung 6: Prognostizierte Veränderungen an einem Beispiel-Gewässersystem. | Figure 6: Modifications pronostiquées dans un exemple de système de cours d'eau.

#### 4.1 Wildbäche

Wildbäche, welche sich direkt unterstrom von Gletschern befinden, sind stark von der Schnee- und Eisschmelze bestimmt. Durch den Rückgang der Gletscher wird der Abfluss in diesen Gewässern direkt beeinflusst. Die Jahresabflüsse werden in diesen Bächen durch die Gletscherschmelze zunehmen. Nach dem Abschmelzen der Gletscher wird der Abfluss jedoch wieder stark abnehmen. Die Abflüsse werden dann nicht mehr von den Gletschern beeinflusst [LEITUNGSGRUPPE NFP 61 2015].

Durch den erhöhten Abfluss aus den Gletschern und die freiwerdenden, erodierbaren Seitenmoränen und Flächen wird auch mehr Geschiebe in den Gewässern unterstrom der Gletscher transportiert. Dies kann sowohl in Form von Geschiebetransport wie auch in Form von Hangrutschungen und Felsstürzen erfolgen.

Hangrutschungen und Felsstürze sind hangabwärts gerichtete Massenbewegungen aus Locker- oder Felsmaterial. Wasser kann ein auslösender Faktor bei Hanginstabilitäten sein. Werden die Winter aufgrund des Klimawandels wärmer und niederschlagsreicher, so wird während dieser Jahreszeit der Boden gesättigt. Dadurch kann der Boden instabil werden und Hangrutschungen und Felsstürze können häufiger auftreten [MARTY ET AL. 2009]. Murgänge traten in einem von STOFFEL UND BENISTON [2006] untersuchten Gebiet vermehrt in feuchten Perioden und aufgrund heftiger aber örtlich begrenzter Gewitter auf.

Aus Simulationen folgerten STOFFEL UND BENISTON [2006],

dass Murgangereignisse in Zukunft nicht häufiger auftreten würden. Die Sommer würden zunehmend trocken sein und die Niederschläge hauptsächlich im Frühling und Herbst auftreten. In trockenen Sommern könnten die wenigen Niederschlagsereignisse jedoch viel extremer ausfallen, was zu grösseren Murgangereignissen führen kann.

#### 4.2 Bäche und Flüsse oberstrom von Seen

In den Bächen und Flüssen vor den Seen wird der Sedimenttransport zunehmen, weil die Wildbäche in diese Fließgewässer münden. So werden mehr Sedimente in diese Bäche und Flüsse eingebracht und weitertransportiert. Da aber heute schon beim Gefällsknick am Übergang von steilen zu flachen Gewässern nicht immer und überall alle eingetragenen Sedimente vollständig weitertransportiert werden können, wird sich diese bestehende Problematik noch deutlich akzentuieren. Bereits bestehende Defizite in puncto Schutz vor Hochwasser werden sich verschärfen und an heute unproblematischen Stellen können neue Defizite entstehen. Der Sedimenttransport in diesen Gewässern wird durch bestehende Entnahmen, Geschiebesammler und Sperren weiterhin beeinflusst bleiben.

#### 4.3 Flüsse unterstrom von Seen

Flüsse, welche einem See entspringen, werden keinen erhöhten Sedimenttransport haben. Erst wenn der erste bedeutende Zufluss mit Sedimenttransport in diese Flüsse einmündet, werden mehr Sedimente geführt.

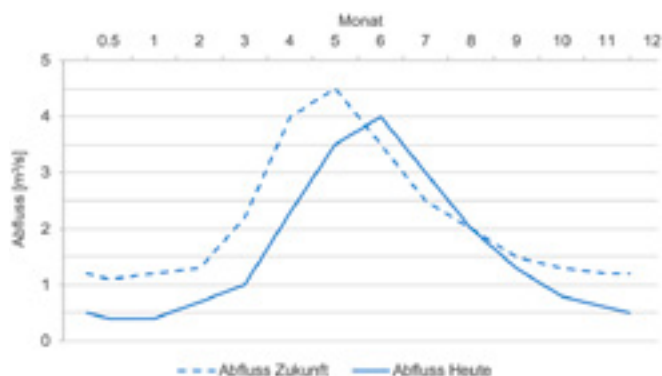


Abbildung 7: Heutige und zukünftige mittlere Monatsabflüsse für einen alpinen Beispielbach mit vergletschertem Einzugsgebiet, dargestellt in einer Jahresganglinie. Figure 7 : Débits mensuels moyens actuels et futurs pour un exemple de ruisseau alpin avec un bassin versant glacière, représentés par un hydrogramme annuel.

#### 4.4 Abfluss- und Sedimenttransportregime

In Abbildung 7 werden für einen alpinen Beispielbach mit einem teilvergletscherten Einzugsgebiet das heutige und zukünftige Abflussregime in einer Jahresganglinie dargestellt. Die Berechnungen erfolgten mit dem hydrologischen Modell PREVAH [VIVIROLI ET AL. 2009]. Die durchgezogene blaue Linie beschreibt die berechneten heutigen mittleren monatlichen Abflüsse. Die gestrichelte blaue Linie zeigt die entsprechenden zukünftigen monatlichen Abflüsse, welche die Mittelwerte von 39 Klimaszenarien für die Periode 2071 bis 2100 darstellen [BRUNNER ET AL. 2019]. In diesem Beispiel tragen die Gletscher im Einzugsgebiet im Frühling noch wesentlich zum mittleren zukünftigen Abfluss bei.

Um die Auswirkungen der Klimaerwärmung auf den zukünftigen Sedimenttransport für dieses Beispielgebiet aufzuzeigen, werden die täglichen Abflüsse der Grösse nach geordnet und in Form einer Dauerkurve dargestellt [Abbildung 8]. Die Dauerkurve zeigt, an wie vielen Tagen im Jahr ein bestimmter Abfluss überschritten wird. Für diesen alpinen Beispielbach wird angenommen, dass bei einem Abfluss grösser als 5 m³/s der Sedimenttransport einsetzt. Dies bedeutet, dass Sedimentumlagerungen nur stattfinden, wenn der Abfluss im Gerinne grösser ist als 5 m³/s. Durch die grösseren, häufigeren und länger andauernden Hochwasserabflüsse in der Zukunft wird an mehr Tagen im Jahr ein Abfluss von mehr als 5 m³/s herrschen – vgl. die blauen Linien, die sich auf die linke Skala beziehen. Somit wird auch an mehr Tagen im Jahr Geschiebe transportiert – vgl. die grünen Linien, die sich auf die rechte Skala beziehen.

Dies ist allerdings nur ein Beispiel. Aufgrund der verschiedenen bestehenden Abflussregimes in den vielfältigen Gewässern der Schweiz werden sich für jedes Gewässer spezifische Änderungen des Abfluss- und Sedimenttransportregimes ergeben.

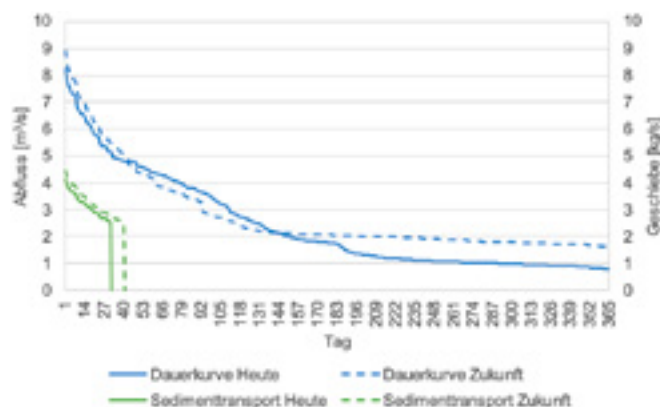


Abbildung 8: Heutige und zukünftige mittlere Tagesabflüsse für einen alpinen Beispielbach, dargestellt in einer Dauerkurve. | Figure 8 : Débits quotidiens moyens actuels et futurs pour un exemple de ruisseau alpin, représentés par une courbe de durée.

## 5 Quellenverzeichnis

### 5.1 Literatur

- BAFU (HRSG.). 2017. Bundesamt für Umwelt. Geschiebe- und Habitatsdynamik. Merkblatt-Sammlung Wasserbau und Ökologie. Bern.
- BEZZOLA G. R. 2017. Vorlesungsmanuskript Flussbau. Fassung HS 2017. Professur für Wasserbau. ETH Zürich.
- BRUNNER M., BJÖRNSÉN GURUNG A., SPEERLI J., KYTZIA S., BIELER S., SCHWERE D. UND STÄHLI M. 2019. Hydro-CH2018 Wasserspeicher. Welchen Beitrag leisten Mehrzweckspeicher zur Verminderung zukünftiger Wasserknappheit? WSL und HSR. Birmensdorf und Rapperswil. 25.04.2019.
- FUNK M., BAUDER A., FARINOTTI D., USSELMANN S. UND GABBI J. 2011. Gletscher- und Abflussveränderungen im Zeitraum 1900–2100 in sieben Einzugsgebieten der Schweiz. VAW-Teilprojekt von CCHydro. VAW ETH Zürich. Mai 2011.
- KOHS. 2007. Kommission für Hochwasserschutz, Wasserbau und Gewässerpflege. Auswirkungen der Klimaänderung auf den Hochwasserschutz in der Schweiz. Ein Standortpapier der KOHS. Wasser Energie Luft. Heft 1/2007. S. 55-60. Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband. Baden.
- KÖPLIN N., SCHÄDLER B., VIVIROLI D UND WEINGARTNER R. 2014. Seasonality and magnitude of floods in Switzerland under future climate change. Hydrological Processes. Jahrgang 28, Nr. 4. S. 2567–2578. John Wiley & Sons, Ltd. Hoboken. 15.02.2014. Online-Publikation bereits 19.04.2013.
- LANE E. W. 1955. The Importance of Fluvial Morphology in Hydraulic Engineering. Proceedings ASCE, Journal of the Hydraulics Division 81, paper no. 745. S. 1-17. New York. Zit. in BEZZOLA [2017].

- LEITUNGSGRUPPE NFP 61 (HRSG.). 2015. Nachhaltige Wassernutzung in der Schweiz – NFP 61 weist Wege in die Zukunft. Gesamtsynthese im Rahmen des Nationalen Forschungsprogramms NFP 61 «Nachhaltige Wassernutzung». Schweizerischer Nationalfonds. Bern.
- MARTY C., PHILLIPS M., LEHNING M., WILHELM C. UND BAUDER A. 2009. Klimaänderung und Naturgefahren in Graubünden. Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen. 7/2009. S. 201–209. Schweizerischer Forstverein. Zürich.
- NAEF F. UND WERNLI H. 2016. Starkniederschläge und Hochwasser. BAFU-Projekt 2006-02060/1614/03. ETH Zürich und Hybest GmbH Zürich. April 2016. [Originalsprache Englisch – ungeachtet des deutschen Titels.]
- NCCS (HRSG.). 2018. National Centre for Climate Services. CH2018 – Klimaszenarien für die Schweiz. Zürich.
- OcCC. 2007. Organe consultatif sur les changements climatiques. Klimaänderung und die Schweiz 2050. Erwartete Auswirkungen auf Umwelt, Gesellschaft und Wirtschaft. Bern. März 2007.
- PERROUD M. UND BADER S. 2013. Klimaänderung in der Schweiz. Indikatoren zu Ursachen, Auswirkungen, Massnahmen. Umwelt-Zustand Nr. 1308. Bundesamt für Umwelt, Bern und Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie, Zürich.
- PROCLIM-, OcCC UND NFS KLIMA. 2003. Forum for Climate and Global Change, Organe consultatif sur les changements climatiques und Nationaler Forschungsschwerpunkt Klima. Wasserkraft und Klimawandel in der Schweiz. Vision 2030. Climate Talk – Dialog zwischen Wissenschaft und Wirtschaft. Tagungsunterlage. Bern. 29.10.2003.
- SCHÄLCHLI, ABEGG + HUNZINGER. 2005. [Mitarbeit Hunziker, Zarn & Partner.] Geschiebe- und Schwebstoffproblematik in Schweizer Fliessgewässern. Zürich. 03.11.2005.
- SPEERLI J., BACHMANN A. K., BIELER S., SCHUMACHER A., GYSIN S. 2020. Auswirkungen des Klimawandels auf den Sedimenttransport. Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt [BAFU], Bern, Schweiz.
- SPREAFICO M., LEHMANN C., JAKOB A. UND GRASSO A. 2005. Feststoffbeobachtung in der Schweiz. Ein Tätigkeitsgebiet der Landeshydrologie. Berichte des BWG, Serie Wasser Nr. 8. Bundesamt für Wasser und Geologie. Bern.
- STOFFEL M. UND BENISTON M. 2006. On the incidence of debris flows from the early Little Ice Age to a future greenhouse climate: A case study from the Swiss Alps. Geophysical Research Letters. Jahrgang 33, Nr. 16. American Geophysical Union. Washington, D.C.

- VIVIROLI D., ZAPPA M., GURTZ J. UND WEINGARTNER R. 2009. An introduction to the hydrological modelling system PREVAH and its pre- and post-processing tools. Environmental Modelling & Software. Jahrgang 24, Nr. 10. S. 1209–1222. Elsevier Amsterdam.

## 5.2 Online

- [https://www.gr.ch/DE/institutionen/verwaltung/bvfd/awn/dokumentenliste\\_afw/20170828\\_Kurzbericht\\_Expertengruppe\\_20171215\\_dt.pdf](https://www.gr.ch/DE/institutionen/verwaltung/bvfd/awn/dokumentenliste_afw/20170828_Kurzbericht_Expertengruppe_20171215_dt.pdf) [09.08.2019]
- <https://www.spreitgraben.ch/cms/hintergrund.html> [09.08.2019]
- <https://www.srf.ch/news/panorama/gletschersee-auf-der-plaine-morte-ist-uebergeschwappt> [09.08.2019]

Die Autor:innen danken dem BAFU für die Möglichkeit, sich im Rahmen von Hydro-CH2018 in dieses Thema vertieft haben zu dürfen.

## Kontaktadresse

Aurelian Schumacher  
Hürststrasse 96  
8046 Zürich  
[aurelian.schumacher@gmail.com](mailto:aurelian.schumacher@gmail.com)



Andrea Kristin Bachmann  
Ingenieurbüro Speerli GmbH  
Fuchsberg 11  
8846 Willerzell  
[bachmann@iswb.ch](mailto:bachmann@iswb.ch)



Dr. Jürg Speerli  
Ingenieurbüro Speerli GmbH  
Fuchsberg 11  
8846 Willerzell  
[speerli@iswb.ch](mailto:speerli@iswb.ch)



# Simulation der Morphodynamik von Fließgewässern

David Vetsch  
Lukas Vonwiller  
Davide Vanzo



Auf die Wurzeln kommt es an...

**Samen und Pflanzen für die Hangsicherung** zusammengestellt nach Wurzelprofilen und Erosionsschutzwirkung.  
Objektbesichtigung kostenlos  
Lieferung ganze Schweiz und EU

**schutzfilisur**  
100 Jahre Samen Pflanzen AG

Schutz Filisur, Samen u. Pflanzen AG, CH-7477 Filisur  
Tel. 081 410 40 00, Fax. 081 410 40 77  
samenpflanzen@schutzfilisur.ch

## Zusammenfassung

Die Gewässerrenaturierung in der Schweiz ist eine grosse Herausforderung für Fachleute. Zur Planung werden Werkzeuge benötigt, welche eine Voraussage der entworfenen Massnahmen erlauben und somit den Variantenentscheid unterstützen. Dafür eignen sich insbesondere numerische Modelle für morphodynamische Simulationen von Fließgewässern. Der vorliegende Beitrag gibt einen Überblick über verschiedene Modellansätze zur Simulation des Geschiebe- und Schwebstofftransports und der dadurch hervorgerufenen Sohlenveränderungen anhand der frei verfügbaren Simulationsumgebung BASEMENT. Dabei wird auf die Unterschiede von 1D und 2D Modellen, Einkorn- und Mehrkornmodellen und die speziellen Modellansätze bei 2D Modellen für die Simulation von flussmorphologischen Strukturen wie alternierenden Bänken und Kolken sowie von Seitenerosionsprozessen eingegangen. Zudem wird die Rolle der Modellvereinfachungen im Hinblick auf die Erstellung von robusten und aussagekräftigen numerischen Modellen kurz beleuchtet. Der Beitrag soll Anwender, und diejenigen die es noch werden möchten, für die Bedeutung einer sorgfältigen Modellbildung sensibilisieren und dazu ermuntern, sich den vermeintlich grossen Herausforderungen bei der Simulation der Morphodynamik von Fließgewässern zu stellen.

## Keywords

Numerische 1D und 2D Modelle, Geschiebe- und Schwebstofftransport, Modellbildung.

## Simulation de la morphodynamique des cours d'eau

### Résumé

La renaturation des cours d'eau en Suisse est un défi majeur pour les experts. Pour la planification, il est nécessaire de disposer d'outils permettant de prédire les mesures projetées et donc de soutenir le choix des variantes. Les modèles numériques pour les simulations morphodynamiques des cours d'eau sont particulièrement adaptés à cet effet. Cet article donne une vue d'ensemble de différentes approches de modèles pour la simulation du transport de la charge de fond et des matières en suspension, ainsi que des changements qui en résultent dans les lits des cours d'eau en utilisant l'environnement de simulation librement disponible BASEMENT. Les différences entre les modèles 1D et 2D, les modèles monograins et multigrains, les approches spéciales des modèles 2D pour la simulation des structures morphologiques des rivières telles que les berges alternées et l'affouillement ainsi que les processus d'érosion latérale sont discutés. En outre, le rôle des simplifications de mo-

dèles dans la production de modèles numériques robustes et informatifs est brièvement souligné. Ce document a pour objectif de sensibiliser les utilisateurs, et ceux qui voudraient le devenir, à l'importance d'une modélisation soignée et de les encourager à relever les grands défis supposés de la simulation de la morphodynamique des cours d'eau.

### Mots-clés

Modèles numériques 1D et 2D, transport de la charge de fond et des matières en suspension, modélisation.

## Simulazione della morfodinamica fluviale dei corsi d'acqua

### Riassunto

La rinaturazione dei corsi d'acqua in Svizzera è una grande sfida per gli esperti. Per la pianificazione, sono necessari strumenti che permettono la previsione degli effetti delle misure previste e quindi supportano la decisione sulle varianti. I modelli numerici per le simulazioni morfodinamiche fluviali sono particolarmente adatti a questo scopo. Sulla base del software di simulazione liberamente disponibile BASEMENT, questo articolo fornisce una panoramica dei diversi approcci modellistici per la simulazione del trasporto di materiale solido di fondo e in sospensione e dei loro effetti sull'evoluzione dell'alveo. Vengono discusse le differenze tra i modelli 1D e 2D, i modelli con una misura o più granulometrie e gli approcci speciali dei modelli 2D per la simulazione delle strutture morfologiche dei fiumi, come i banchi alternati, le erosioni locali del fondo e i processi di erosione laterale. Inoltre, il ruolo delle semplificazioni del modello nella produzione di modelli numerici robusti e informativi è brevemente evidenziato. L'articolo ha lo scopo di sensibilizzare gli utenti, e coloro che vorrebbero diventarlo, sull'importanza di un'attenta modellazione e di incoraggiarli ad affrontare le supposte grandi sfide nella simulazione della morfodinamica fluviale.

### Parole chiave

Modelli numerici 1D e 2D, Trasporto di materiale solido di fondo e in sospensione, Modellazione numerica

## 1. Einleitung

Die Renaturierung der schweizerischen Gewässer ist eine herausfordernde Aufgabe und wird auch noch kommende Generationen von Fachleuten in der Praxis wie auch in der Forschung beschäftigen (Di Giulio et al. 2017). Eine zentrale Rolle spielt dabei der Transport von Geschiebe und Schwebstoffen. Deren Ablagerung und Umlagerung im Gewässerraum entlang der Fließstrecke kann zu einer stetigen Veränderung der Gestalt eines Fließgewässers führen. Letzteres wird in der Fachsprache als Morphodynamik bezeichnet.

Für die Beurteilung der Hochwassersicherheit und zur Prognose der morphodynamischen Entwicklung von Fließgewässern werden seit gut vierzig Jahren numerische Simulationsmodelle verwendet. Grundsätzlich werden ein- (1D) und zweidimensionale (2D) Modelle unterschieden. Die Anwendung von 2D Modellen war anfänglich aufgrund der benötigten Rechenleistung nur eingeschränkt möglich, hat sich jedoch in den vergangenen Jahrzehnten begleitet durch die stetig zunehmende Leistung der Prozessoren immer mehr verbreitet. Heutzutage werden 2D Modelle standardmässig für die Erstellung von Hochwassergefahrenkarten eingesetzt. In jüngerer Zeit werden numerische Modelle auch vermehrt zur Berechnung der Habitatseigenschaften und somit zur Beurteilung und Vorhersage von Lebensräumen für Tiere und Pflanzen verwendet. Eine aktuelle Anwendung ist z.B. die Untersuchung der Auswirkungen von Schwall und Sunk auf Fischhabitate (Bürgler et al. 2019).

Werkzeuge zur Simulation von Geschiebetransport oder der Ausbreitung von Schwebstoffen und der dadurch hervorgerufenen Sohlenveränderungen (Veränderungen der Gerinnesohle) gibt es mittlerweile viele. Dennoch birgt die Modellierung der involvierten Prozesse nach wie vor grosse Herausforderungen in Wissenschaft und Praxis. Ein auf Schweizer Verhältnisse zugeschnittenes Werkzeug bietet die Simulationsumgebung BASEMENT (Vetsch et al. 2020), welche an der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) der ETH Zürich seit 2002 entwickelt und stetig erweitert wird. Die sehr vielseitig einsetzbare Software beinhaltet unter anderem ein 1D und 2D Modell zur Simulation von Hydro- und Morphodynamik, ein 3D Grundwassermodell sowie ein Modell zur Berücksichtigung des Einflusses von aufkommender Vegetation. Zur Steigerung der Berechnungseffizienz wird die Verwendung von Mehrkern- oder Grafikprozessoren unterstützt (Vanzo et al. 2021). Die Software ist frei verfügbar ([www.basement.ethz.ch](http://www.basement.ethz.ch)) und ist in eine Simulationsumgebung integriert, die vollumfänglich auf freier oder frei verfügbarer Software besteht. Im vorliegenden Beitrag wird kurz auf die wesentlichen Aspekte bei der 1D und 2D Modellierung von Geschiebe- und Schwebstofftransport mit der Software BASEMENT eingegangen.

## 2. Fähigkeiten der Modellansätze

### Ein- und zweidimensionale Modelle

Bei BASEMENT werden zur Simulation der Hydrodynamik die 1D- oder 2D Flachwassergleichungen gelöst, was die Modellierung von instationären Strömungen in offenen Gerinnen ermöglicht. Dabei wird der Fließwiderstand durch ein quadratisches Widerstandsgesetz berücksichtigt, woraus sich auch die Schleppkraft, resp. die Sohlenschubspannung, für den Geschiebetransport ergibt.

Die Untersuchung von längeren Gewässerabschnitten bis auf Einzugsgebietsgrösse und langen Zeiträumen erfolgt bevorzugt mit effizienten 1D Modellen. Bei 1D Modellen wird das Gerinne mit Querprofilen dargestellt, was nach wie vor die gängigste geometrische Datengrundlage für Fließgewässer ist. Die berechneten Grössen wie etwa Fließgeschwindigkeit und Wasserspiegellage stellen einen mittleren Wert über das Querprofil dar. Passend dazu werden auch die Sohlenveränderungen über das Querprofil gemittelt. Ein wesentliches Ergebnis von morphodynamischen 1D Simulationen ist somit die Veränderungen der mittleren Sohlenlage entlang der Fließstrecke. Im Vergleich zu einem 2D Modell reduzieren diese Vereinfachungen den Berechnungsaufwand deutlich. Beim 2D Modell wird das Berechnungsgebiet mit einem Gitter bestehend aus mehreren Zellen unterteilt, wodurch die Strömung und der Sedimenttransport im gesamten Gewässerraum zusammenhängend modelliert werden kann. Somit lassen sich auch die Veränderungen der Flusssohle und des Fließquerschnitts quer zur Hauptströmungsrichtung berechnen. Die Simulation von morphologischen Strukturen, wie etwa Kiesbänken, hängt direkt von der gewählten Zellgrösse ab. Es liegt im Wesen des 2D Modells, dass gegenüber dem 1D Modell der Detailgrad der abgebildeten Prozesse grösser und die räumliche und zeitliche Ausdehnung von Simulationen kleiner ist (vgl. Tabelle. 1).

### Geschiebe- und Schwebstofftransport

Der bettbildende Sedimenttransport in Fließgewässern kann separat als Geschiebe- und Schwebstofftransport modelliert werden. Mit dieser Trennung wird der Tatsache Rechnung getragen, dass die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Geschiebe- und Schwebstoffen unterschiedlich sein kann. Der Geschiebetransport findet vornehmlich an der Flusssohle statt. Zur Simulation der Sohlenveränderungen aufgrund der örtlich variierenden Transportkapazität wird die Exner-Gleichung verwendet. Dabei wird die lokale Transportkapazität mit einer empirischen Geschiebetransportformel, wie etwa der Formel von Meyer-Peter und Müller (1949), in Abhängigkeit der Sohlenschubspannung berechnet. Der Transport von Feinmaterial mit der Strömung in der Wassersäule wird als Schwebstofftransport (oder Suspensionstransport) bezeichnet. Zur Simulation werden die zeitliche und räumliche Veränderung der über die Abflusstiefe mittleren Schwebstoffkonzentration mit einer Transportgleichung berechnet. Die Ausbreitung der Schwebstoffe wird massgeblich durch das Strömungsfeld, resp. die Verteilung der Fließgeschwindigkeit im Gewässerraum gesteuert. Schwebstoffe können in Funktion der Sinkgeschwindigkeit und der Sohlenschubspannung aus der Gerinnesohle in die Strömung aufgenommen oder umgekehrt abgesetzt werden.

### Einkorn- und Mehrkornmodelle

Beim Einkornmodell wird das transportierte Sediment durch einen charakteristischen Korndurchmesser abgebildet. Dafür wird häufig der mittlere Durchmesser der Korngrössenverteilung verwendet, wobei je nach gewählter Geschiebetransportformel das Verfahren zur Bestimmung des charakteristischen Korndurchmessers variieren kann. Folglich bleibt bei einer Simulation mit einem Einkornmodell die Korngrösse

	1D	2D
<b>Hydrodynamik</b>	Grössen variieren nur in Hauptströmungsrichtung, gemittelt über Querprofil	Grössen variieren in der Ebene, gemittelt über die Fliesstiefe
<b>Morphodynamik</b>	Fokus auf mittlere Sohlenveränderungen entlang der Fliesstrecke	lokal unterschiedliche Sohlenveränderungen, wie Bänke und Kolke
<b>Geschiebetransport</b>	Variation nur in Hauptströmungsrichtung, bei herkömmlichen Modellen gemittelte Sohlenveränderungen über das Querprofil	Abbildung von flussmorphologischen Strukturen unter Verwendung von speziellen Ansätzen wie Quergefällleeffekt, Kurveneffekt und Böschungskollaps
<b>Schwebstofftransport</b>	bei herkömmlichen Modellen Variation nur in Hauptströmungsrichtung	Ausbreitung in der Ebene, Anwendung von Turbulenzmodellen
<b>Einkornmodell</b>	konstanter Korndurchmesser entlang der Fliesstrecke	konstanter Korndurchmesser entlang der Fliesstrecke
<b>Mehrkornmodell</b>	Sortiereffekte und variabler Korndurchmesser entlang der Fliesstrecke	zusätzlich zu 1D: Sortiereffekte und variabler Korndurchmesser quer zur Hauptströmungsrichtung

Tabelle 1: Merkmale der verschiedenen Modellansätze bei 1D und 2D Modellen. | Tableau 1 : Caractéristiques des différentes approches de modélisation dans les modèles 1D et 2D.

im Berechnungsgebiet zeitlich und örtlich konstant. Dennoch lassen sich damit effizient grundlegende Aussagen zur Sohlenveränderung machen.

Wie der Name schon vermuten lässt, erlaubt ein Mehrkornmodell die Simulation von fraktioniertem Geschiebetransport. Dazu muss die Korngrößenverteilung des transportierten Sediments in verschiedene Korngrößenklassen unterteilt werden. Zur Simulation der örtlichen und zeitlichen Veränderung der Korngrößenverteilung wird die Exner-Gleichung erweitert und je Korngrößenklasse eine Erhaltungsgleichung eingeführt, womit der Berechnungsaufwand gegenüber einem Einkornmodell deutlich zunimmt. Aufgrund der unterschiedlichen Korngrößen wird beim Geschiebetransport davon ausgegangen, dass die gröberen Körner stärker der Strömung ausgesetzt sind und zudem den Transport der kleineren Körner hindern. Um diese Effekte zu berücksichtigen stehen wiederum verschiedene Transportformeln, wie etwa die von Hunziker [1995], zur Verfügung. Auch die Veränderung der vertikalen Korngrößenverteilung kann berücksichtigt werden. Dazu wird die Gerinnesohle in eine Austauschschicht und eine darunter liegende Substratschicht aufgeteilt, was auch als Hirano-Modell bezeichnet wird. Damit lässt sich die Bildung einer Deckschicht, wo die Sedimente an der Gerinnesohle deutlich gröber sind als im Substrat, gut nachbilden. Jedoch hat das Hirano-Modell auch klare Einschränkungen, insbesondere bei Situationen mit stark ausgeprägter Auflandung oder wo feineres Sediment über eine mehr oder weniger statische Deckschicht transportiert wird. Je nach Verhältnissen können diese Einschränkungen mit Behelfsansätzen überwunden werden. Hinsichtlich eines robusten und generellen Modellansatzes besteht jedoch nach wie vor Forschungsbedarf.

### 3. Dynamik von flussmorphologischen Strukturen

Die Schönheit der Morphodynamik in Fließgewässern zeigt sich insbesondere in der Entstehung und Veränderung von flussmorphologischen Strukturen wie Bänken und Kolken in verzweigten Flüssen [Abbildung 1]. Die zugrundeliegenden Prozesse sind dabei häufig dreidimensional und erfordern spezielle Ansätze in einem 2D Modell.

Die Abbildung der seitlichen Erosion ist insbesondere in aufgeweiteten Flussabschnitten relevant. Dazu sind insbesondere drei Modellansätze entscheidend [Vonwiller et al. 2018]: (i) Der Effekt des Quergefälles (quer zur Hauptströmungsrichtung), der die Ablenkung des Geschiebetransports aufgrund einer seitlich geneigten Flusssohle berücksichtigt, (ii) der gravitationsinduzierte Böschungskollaps, der das Abrutschen der Böschung bei Überschreiten der kritischen Böschungsneigung simuliert und (iii) die Anpassung der kritischen Sohlenschubspannung für den Transportbeginn aufgrund des lokalen Gefälles in Fließrichtung, um der

erleichterten bzw. erschwerten Mobilisierung von Geschiebematerial auf einer geneigten Fläche Rechnung zu tragen. Für den gravitationsinduzierten Böschungskollaps wird ein einfacher, rein geometrischer Ansatz verwendet, welcher der Tatsache gerecht wird, dass das Wissen über die Beschaffenheit des am Ufer anstehenden Sediments und der stabilisierenden Wirkung des Bewuchses beschränkt ist [Abbildung 2].



Abbildung 1: Ein Fluss mit viel Dynamik – der Tagliamento in Norditalien [Foto: VAW] | Figure 1 : Une rivière avec beaucoup de dynamique – le Tagliamento dans le nord de l'Italie [Photo : VAW].



Abbildung 2: Seitenerosion im verzweigten Abschnitt der Moesa bei Cabbio [Foto: VAW] | Figure 2 : Érosion latérale dans la section ramifiée de la Moesa près de Cabbio [Photo : VAW].



Bei einer Krümmung des Flusslaufs, z.B. bei Mäandern, kommt es zu einer dreidimensionalen Ablenkung der Strömung quer zur Hauptströmungsrichtung und es bilden sich Sekundärströmungen aus. Aufgrund der Strömungsblenkung wird auch der Geschiebetransport in Richtung der Kurveninnenseite abgelenkt, was als Kurveneffekt bezeichnet wird [Abbildung 3]. In der Simulation lässt sich der Kurveneffekt anhand eines empirischen Ansatzes in Funktion des Kurvenradius und der Abflusstiefe berechnen [siehe z.B. Vonwiller 2018]. An der Kurveninnenseite dämpft der Kurveneffekt den Quergefälleeffekt, wodurch eine stationäre Kurvenbank entsteht.

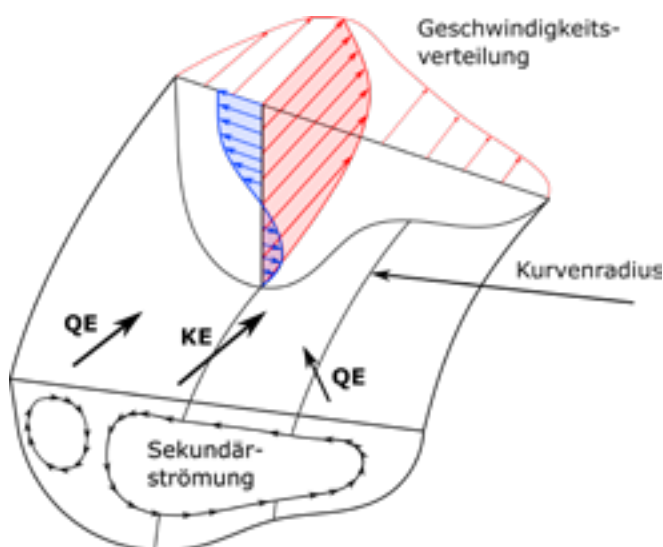


Abbildung 3: Kurvenströmung mit Ablenkung des Geschiebetransport aufgrund des Kurveneffekts [KE] und des Quergefälleffekts [QE] | Figure 3 : Ecoulement en courbe avec dérivation du transport de charge due à l'effet de courbe [KE] et à l'effet de pente transversale [QE].

#### 4. Modellvereinfachungen und -kalibrierung

Die in den vorangehenden Kapiteln beschriebenen Modellansätze basieren auf physikalisch hergeleiteten Erhaltungsgleichungen. Zur Förderung von spezifischen Anwendungen und mit dem Hintergrund, den Berechnungsaufwand zu reduzieren, wurden Vereinfachungen eingeführt. Diese Vereinfachungen sind vorwiegend semi-empirische Ansätze, welche anhand von Laborversuchen entwickelt wurden, wie etwa diejenigen für den Fliesswiderstand oder den Geschiebetransport. Beim Aufbau eines Modells sind weitere Vereinfachungen aufgrund der Datengrundlage sowie der notwendigen Diskretisierung der Daten und des Berechnungsgebiets kaum zu vermeiden.

Die grösste Herausforderung besteht für den Modellierer/in nun darin, ein möglichst aussagekräftiges Modell für eine vorliegende Fragestellung aufzubauen. Vorausgesetzt, dass die Datengrundlage kritisch bereinigt wurde und hinsichtlich der Fragestellung passende Modellansätze gewählt wurden,

kann mit der Kalibrierung des Modells begonnen werden. Dabei werden für eine ausgewählte Situation bestimmte Modellparameter variiert, um eine zufriedenstellende Übereinstimmung mit Vergleichsdaten zu erzielen. Zum Vergleich können Messdaten oder mithilfe empirischer Ansätze berechnete Werte herangezogen werden. Ein naheliegendes Beispiel ist die Kalibrierung der Hydrodynamik, bei welcher für eine bestimmte Situation vorwiegend die Rauheitsbeiwerte variiert werden und folglich die simulierte Wasserspiegellage mit Messwerten (z.B. Hochwasserspurten) verglichen wird.

Die Kalibrierung von morphodynamischen Modellen gestaltet sich deutlich schwieriger. Die Auswahl an möglichen Stellgrössen für die Kalibrierung ist gross und umfasst nicht nur die Parameter der semi-empirischen Ansätze, sondern auch die Diskretisierung der Korngrössenverteilung und die Geschiebefracht am Zuflussrand. Zudem ist die Definition des Ausgangszustands häufig nicht trivial und erfordert vorbereitende Simulationen. Es müssen somit viele Annahmen getroffen werden, was weniger erfahrenen Modellierer/innen oft schwerfällt. Deshalb ist eine schrittweise Steigerung der Komplexität der Modelle eine empfehlenswerte Herangehensweise, unabhängig von der Erfahrung der Modellierer/innen oder des Modellierers. Zum Beispiel kann mit einem Einkornmodell begonnen und dann ein Mehrkornmodell mit 2 oder 3 Korngrössenklassen, usw., aufgesetzt werden. Oft lässt sich mit einem einfacheren Modell schneller eine erfolgreiche Simulation durchführen und die getroffenen Annahmen können so effizient überprüft, hinterfragt und gegebenenfalls angepasst werden.

Bei komplexeren morphodynamischen Fragestellungen bietet es sich an, für vorliegende Verhältnisse (Abfluss, Gefälle, Korngrössenverteilung, etc.) ein numerisches Laborexperiment mit vereinfachter Geometrie aufzubauen. Dies ermöglicht einen direkten Vergleich mit empirischen und analytischen Ansätzen und erleichtert die Einstellung von passenden Modellparametern. Ein Beispiel dazu ist die Simulation von alternierenden Bänken, welche mit dem Ansatz zur Berücksichtigung des Quergefälleffekts kalibriert werden kann. Dazu wird das Ausmass der simulierten Bänke und Kolke mit analytischen Ansätzen oder mit Ansätzen von Laborexperimenten verglichen, z.B. Zarn [1997].

Um die Aussagekraft eines kalibrierten Modells über das relevante Abflussspektrum zu prüfen, wird im Anschluss an die Kalibrierung eine Validierung durchgeführt. Dabei wird eine deutlich unterschiedliche Situation unter Beibehaltung der kalibrierten Parameter simuliert. Sind keine Daten für eine Validierung vorhanden oder bei generell spärlicher Datengrundlage wird empfohlen, die Robustheit des Modells anhand einer Sensitivitätsanalyse (erweiterte Variation möglicher Stellgrössen, einschliesslich der Zellengrösse des Berechnungsgitters) zu untersuchen.

## 5. Fazit und Ausblick

Heutige und zukünftige Technologien erlauben die Erhebung einer immer detaillierteren Datengrundlage, insbesondere der Topographie, und zunehmend effizientere Simulationen. Ein höherer Detailgrad bedeutet aber nicht zwingend, dass ein aussagekräftigeres Modell entsteht und die Qualität der Resultate steigt. Eine gute Datengrundlage ist wünschenswert, kann aber auch dazu verleiten, die Aussagekraft eines Modells falsch einzuschätzen.

Die numerische Modellierung besteht nicht allein aus der Wahl einer Simulationssoftware, der Aufbereitung der Datengrundlage, dem Aufsetzen des Modells und dem Ausführen der Simulation. Ein wesentlicher, wenn nicht sogar der wichtigste Bestandteil ist die Modellbildung an sich. Die Modellbildung ist ein übergeordnetes, konzeptionelles Vorgehen, welches einerseits die Beurteilung der Situation und der Datengrundlage beinhaltet. Andererseits umfasst die Modellbildung die Wahl eines geeigneten numerischen Modells, dessen Detailgrad im Sinne von berücksichtigten Prozessen und der Diskretisierung der Ausgangsdaten auf die Fragestellung und die vorhandene Datengrundlage abgestimmt sein sollte. Diese Vorgehensweise unterstützt folglich eine stimmige Kalibrierung, Validierung oder Sensitivitätsanalyse der verwendeten Modellansätze.

Der vorliegende Beitrag gibt einen kurzen Überblick über die relevanten Modelle sowie Ansätze und möchte die geeignete Anwenderin und den geeigneten Anwender für eine sorgfältige Modellbildung motivieren. Letztere geht Hand in Hand mit der Erstellung von robusten und aussagekräftigen numerischen Modellen und erlaubt es, den vermeintlich grossen Herausforderungen bei der Simulation der Morphodynamik von Fließgewässern entgegenzutreten.

## Verdankung

Die Entwicklung der Software BASEMENT wird vom Schweizer Bundesamt für Umwelt (BAFU) finanziell unterstützt.

## Literaturverzeichnis

Alle Quellen sind ohne Einschränkungen zugänglich.

- Bürgler, M., Wicki, T., Vanzo, D., Boes, R. & Vetsch, D. 2019. Hydronumerischen 1D und 2D Modelle – Eignung zur Beurteilung der Auswirkungen von Schwall und Sunk. Wasser, Energie, Luft 111(3): 159-164.
- Di Giulio, M., Franca, M. J., Scheidegger, Ch., Schleiss, A., Vetsch, D. & Weber, Ch. 2017. Sediment- und Habitatsdynamik in Fließgewässern. In: Geschiebe- und Habitatsdynamik. Merkblatt-Sammlung Wasserbau und Ökologie. Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern. Einleitung.
- Hunziker, R. 1995. Fraktionsweiser Geschiebetransport. Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie Nr. 138. <https://vaw.ethz.ch/das-institut/publikationen/vaw-mitteilungen/1990-1999>.
- Meyer-Peter, E. & Müller, R. 1949. Eine Formel zur Berechnung des Geschiebetriebs. Schweizerische Bauzeitung, 67, doi: 10.5169/seals-83975
- Vanzo, D., Peter, S., Vonwiller, L., Bürgler, M., Weberndorfer, M., Siviglia, A., Conde, D. & Vetsch, D.F. 2021. BASEMENT v3: A modular freeware for river process modelling over multiple computational backends. Environmental Modelling and Software, 143, art. no. 105102, doi: 10.1016/j.envsoft.2021.105102.
- Vetsch, D., Bürgler, M., Gerke, E., Kammerer, S. & Boes, R. 2020. BASEMENT – Softwareumgebung zur numerischen Modellierung der Hydro- und Morphodynamik in Fließgewässern. Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, 72(7), 281-290, doi: 10.1007/s00506-020-00677-6.
- Vonwiller, L. 2018. Numerical Modeling of Morphological Response of Gravel-Bed Rivers to Sediment Supply. Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie Nr. 246. <https://vaw.ethz.ch/das-institut/publikationen/vaw-mitteilungen/2010-2019>.
- Vonwiller, L., Vetsch, D.F., Boes, R.M. 2018. Modeling Streambank and Artificial Gravel Deposit Erosion for Sediment Replenishment. Water 10, no. 4: 508. <https://doi.org/10.3390/w10040508>
- Zarn, B. 1997. Einfluss der Flussbettbreite auf die Wechselwirkung zwischen Abfluss, Morphologie und Geschiebetransportkapazität. Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie Nr. 154. <https://vaw.ethz.ch/das-institut/publikationen/vaw-mitteilungen/1990-1999>.

**Kontaktadressen**

Dr. David Vetsch  
 ETH Zürich  
 Versuchsanstalt für Wasserbau,  
 Hydrologie und Glaziologie  
 Hönggerbergring 26  
 8093 Zürich



Dr. Lukas Vonwiller  
 Wasser & Morphologie  
 Engineering GmbH  
 Bachwiesenstrasse 143  
 8047 Zürich



Dr. Davide Vanzo  
 ETH Zürich  
 Versuchsanstalt für Wasserbau,  
 Hydrologie und Glaziologie  
 Hönggerbergring 26  
 8093 Zürich



**EICHENBERGER REVITAL SA**

Wir führen, entwickeln und realisieren Wasserbauprojekte mit Leidenschaft und suchen in Chur



**Gesamtprojektleiter Revitalisierung 80-100%**

Idealerweise Bauingenieur FH/ETH (BSc/MSc) m/w

**Aufgabenschwerpunkte**

- Projekt- und Gesamtleitung von interdisziplinären Revitalisierungsprojekten
- Mitwirkung und Führung von partizipativen Projektentwicklungen
- Führung und Mitbearbeitung anspruchsvoller Wasserbauprojekte in den Bereichen Revitalisierung, Hochwasserschutz und Wildbachverbau von der Konzeption bis zur Realisierung
- Projektcontrolling

**Ihr Profil**

- Lösungsorientiert, teamfähig, selbstständig und qualitätsbewusst
- Erfahrung in der Projektleitung im Bereich Wasserbau
- Kommunikative Persönlichkeit mit guter schriftlicher Ausdrucksweise

**Angebot**

- Führende Mitwirkung bei der Gestaltung von zukünftigen Flusslandschaften in der Südostschweiz
- Unterstützung und Förderung durch langjährig erfahrenes und hochmotiviertes Team
- Sehr interessante Entwicklungsperspektiven

Auskünfte: R. Eichenberger 079 778 37 88  
 Wir freuen uns auf Ihre Bewerbung an [info@eichenberger-revital.ch](mailto:info@eichenberger-revital.ch)

# Erfahrungen aus und Grenzen von physikalischen Murgangversuchen

Andrea Kristin Bachmann  
Jürg Speerli  
Aurelian Schumacher

## Zusammenfassung

Murgangereignisse haben in der Schweiz in den letzten Jahrzehnten zugenommen. Daher werden neben raumplanerischen auch bauliche Massnahmen zum Schutz von Siedlungen und Infrastruktur immer wichtiger. Für die Auslegung und Dimensionierung von baulichen Massnahmen müssen die Fliesseigenschaften von Murgängen und die Dimensionierungsgrössen im Projektperimeter bekannt sein. Ebenso sollte ein Prozessverständnis für Murgangereignisse im betreffenden Gewässer vorhanden sein.

Der folgende Artikel beruht auf den Erfahrungen von zahlreichen durchgeführten physikalischen Murgangversuchen an der HSR Hochschule für Technik Rapperswil (heute OST Ostschweizer Fachhochschule). Der methodische Ansatz für physikalische Murgangversuche wird detailliert beschrieben. Erkenntnisse zu Fliesseigenschaften von viskosen Murgängen, zur Interaktion von Murgängen mit Geschiebesammlern und Ausleitbauwerken werden aufgezeigt sowie einige Dimensionierungsempfehlungen gegeben.

## Keywords

Physikalische Murgangversuche, viskose Murgänge, Fliesseigenschaften, Schutzbauwerke, Ausleitung, Geschiebesammler, Ringnetzbarrieren, Zielgrössen

## Expériences et limites des essais physiques de laves torrentielles

### Résumé

Les laves torrentielles ont augmenté en Suisse au cours des dernières décennies. C'est pourquoi, outre l'aménagement du territoire, les mesures structurelles visant à protéger les zones résidentielles et les infrastructures revêtent une importance croissante. Pour la conception et le dimensionnement des mesures structurelles, les caractéristiques d'écoulement des laves torrentielles et les dimensionnements dans le périmètre du projet doivent être connues. De même, une compréhension du processus des laves torrentielles dans le cours d'eau concerné doit être disponible. L'article suivant est basé sur les expériences de nombreux essais physiques de laves torrentielles effectués à la HSR Hochschule für Technik Rapperswil (aujourd'hui OST Ostschweizer Fachhochschule). L'approche méthodologique des essais physiques de laves torrentielles est décrite en détail. Les résultats sur les propriétés d'écoulement des laves torrentielles visqueuses, sur l'interaction des laves torrentielles avec les dépotoirs à alluvions et les ouvrages de dérivation sont présentés et quelques recommandations de dimensionnement sont données.

**Mots-clés**

Essais physiques de laves torrentielles, laves torrentielles visqueuses, propriétés d'écoulement, ouvrages de protection, dérivation, dépotoirs à alluvions, barrières formées de filets à anneaux, tailles cibles.

**Esperienze e limiti dei test fisici sui flussi di detriti****Riassunto**

Negli ultimi decenni gli eventi di flusso di detriti in Svizzera sono aumentati. Pertanto, oltre alla pianificazione territoriale, le misure strutturali per la protezione degli insediamenti e delle infrastrutture stanno diventando sempre più importanti. Per la progettazione e il dimensionamento delle misure strutturali, è necessario conoscere le caratteristiche di flusso delle colate detritiche e le dimensioni di dimensionamento nel perimetro del progetto. Allo stesso modo, dovrebbe esserci una buona comprensione dei processi degli eventi di flusso di detrito nel corso d'acqua interessato.

Il seguente articolo si basa sull'esperienza di numerosi test fisici di flusso di detriti eseguiti in laboratorio alla HSR Hochschule für Technik Rapperswil (ora OST Ostschweizer Fachhochschule). L'approccio metodologico per le prove fisiche di flusso di detriti è descritto in dettaglio. Vengono presentati i risultati sulle proprietà di flusso dei flussi di detriti viscosi e sull'interazione dei flussi di detriti con le camere di ritenuta del materiale e le opere di deviazione. Vengono inoltre date alcune raccomandazioni per il dimensionamento.

**Parole chiave**

Test fisici sui flussi di detrito, Flusso di detrito viscoso, Proprietà di flusso, Opere di protezione, Deviazione, Camera di ritenuta, Reti paratassi ad anelli, Dimensionamento.

**1 Einleitung**

Die Gefahr von Murgangereignissen wird in der Schweiz immer präsenter. Nicht nur die Klimaerwärmung und die damit steigende Permafrostgrenze erhöhen die Wahrscheinlichkeit von Murgangereignissen. Allein im August 2005 wurden mehr als 50 Murgangereignisse dokumentiert. Bezüglich der grösseren Murgangereignisse vom August 2005 konnte ein gewisser Schwerpunkt im Berner Oberland festgestellt werden (Bezzola und Hegg 2007), wo beispielsweise im Rotlauigraben, Glyssibach und Trachtbach grössere Murgangereignisse auftraten.

Da viele Murgänge besiedelte Gebiete und/oder bedeutende Infrastrukturanlagen in Mitleidenschaft gezogen haben bzw. gefährden, nimmt die Bedeutung von Schutzbauwerken zu. Für die Projektierung und den Bau solcher Schutzbauwerke müssen die komplexen Murgangprozesse bestmöglich bekannt sein und die Fliesseigenschaften der Murgänge abgeschätzt werden können.

Heute können noch nicht alle Problemstellungen rund um Murgänge und deren Schutzbauwerke numerisch gelöst werden. Hier können physikalische Murgangversuche bei komplexen Fragestellungen weiterhelfen. In diesen physikalischen Modellen kann beispielsweise das geplante Schutzbauwerk ins Gerinne, bzw. in die vorhandene Umgebung eingebaut werden. Für verschiedene Murgangsszenarien kann dann dieses Schutzbauwerk untersucht, der Nachweis der Funktionalität erbracht und das Bauwerk gegebenenfalls optimiert werden. Mittels physikalischen Murgangversuchen können die komplexen Murgangprozesse besser verstanden werden, erhöhen somit die Planungssicherheit und helfen bei der Wahl des optimalen Schutzsystems.

In diesem Artikel werden mit physikalischen Murgangversuchen experimentelle Laborversuche viskoser Murgänge verstanden. Mit hydraulischen Modellversuchen werden experimentelle Laborversuche mit Wasser, Geschiebe und allenfalls Schwemmholz bezeichnet.

**2 Grundlagen****2.1 Topografie und Gerinne**

Für die Erstellung des physikalischen Modells sind genügend genaue Daten der Topografie und des Gerinnes unerlässlich. Eine gute Grundlage bieten die LiDAR-Daten von Swisstopo [swisstopo.admin.ch]. Diese Daten weisen eine sehr hohe Genauigkeit auf und sind vor allem für flache Gebiete seitlich der Gewässer geeignet. Die Genauigkeit im Gerinnebereich ist jedoch oftmals mangelhaft, da die Sohle und die seitlichen Böschungen oft nur ungenügend erfasst werden. Durch die Vermaschung der Punktdaten gehen weitere Informationen verloren. Auch überhängende Bereiche können mit den LiDAR-Aufnahmen nicht erfasst werden.

Eine Verbesserung der LiDAR-Aufnahmen kann mittels Fotogrammetrie und einer Drohne erzielt werden. Die Drohne fliegt in einer vorgegebenen Höhe ein definiertes Raster ab und schiesst dabei Einzelfotos, welche dann softwaremässig zu einem Gesamtbild zusammengesetzt werden (Abbildung 1a). Dieses Gesamtbild wird anschliessend von einem Programm in ein Punkteraster umgerechnet. Zur Kontrolle der Lage im Koordinatensystem werden Vermessungspunkte angegeben. Aus diesem Punkteraster kann anschliessend eine Dreiecksvermaschung berechnet und somit ein digitales Geländemodell erstellt werden (Abbildung 1b). Mit dieser Methode können verschiedenste Bereiche besser und genauer erfasst werden, wie beispielsweise überhängende Partien. Beim Fellbach war es so möglich, die Wasserfälle zu erfassen. Um die Gerinnegeometrie zu dokumentieren, werden jedoch auch Querprofilaufnahmen mittels Tachymeter benötigt. Nur mit diesen Aufnahmen kann die Geometrie in einem Gewässer auch im Sohlenbereich genügend genau erfasst werden.

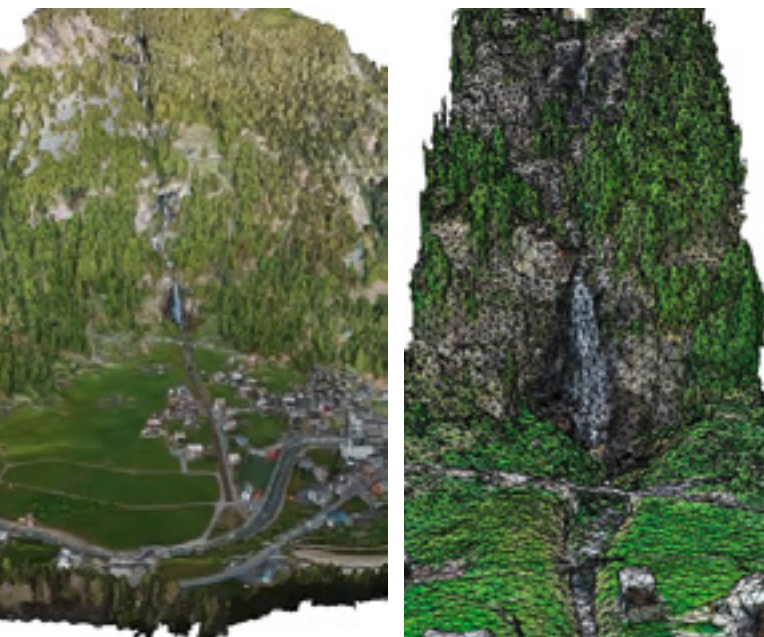


Abbildung 1: Mit Drohnenfotos generiertes digitales Geländemodell der Fellbach-Wasserfälle sowie des Schwemmkegels des Fellbachs inkl. der Wildbachschale im Dorfbereich von Saas-Balen. Links: Auf den Drohnenaufnahmen basiertes 3D-Geländemodell, Rechts: Dreiecksvermaschung. | Figure 1 : Modèle digital de terrain, généré à partir de photographies prises par drone des chutes d'eau de Fellbach et du cône alluvial de Fellbach, y compris la cuvette du torrent, dans la zone du village de Saas-Balen. Gauche : Modèle de terrain 3D basé sur les photographies prises par drone, Droite : maillage triangulaire.

## 2.2 Kornverteilung

Für die Modellierung von Murgängen muss die Kornverteilung der Sedimente, die im Ereignisfall mobilisiert werden können, bekannt sein. Die Kornverteilung der Kies- und Steinfraktion kann mit der Linienzahlanalyse nach Fehr [1987] bestimmt und mit Volumenproben für das Feinma-

terial ergänzt werden. Daraus wird die Kornverteilung für die Murgangmischung ermittelt [Speerli et al 2008]. Es ist jedoch nicht immer möglich, diese aufwendigen Felduntersuchungen durchzuführen, weshalb vereinfacht auch auf eine bekannte Kornverteilung aus vorherigen Projekten zurückgegriffen werden kann. Bei Untersuchungen zu Schutzbauwerken muss das erwartete Grösstkorn und der Anteil dieses Kornes in der Murgangmasse festgelegt werden, da dieses Grösstkorn für Verkläusungsprozesse am Schutzbauwerk massgebend ist.

## 3 Methodischer Ansatz

### 3.1 Fließprozesse bei Murgängen

Bei einem Murgangereignis können verschiedene Prozesse auftreten: viskoses und granulares Fließen, Erosion, Transport und Ablagerung sowie Wasserinfiltration in den Untergrund [Speerli et al 2008]. Im physikalischen Modell können nicht alle diese Prozesse modelliert werden. Coussot [1994] sowie Coussot und Laigle [1994] haben für viskose Murgänge Ähnlichkeitsgesetze hergeleitet, die bei physikalischen Murganguntersuchungen zu berücksichtigen sind. Analog zu hydraulischen Modellversuchen in rauen Verhältnissen [Moody-Diagramm] werden mit dem Froud'schen Ähnlichkeitsgesetz Abflusstiefe, Geschwindigkeit der Murfront sowie der Murgangabfluss von Modell- auf Naturwerte oder auch umgekehrt skaliert. Das Froud'sche Ähnlichkeitsgesetz beruht darauf, dass das Verhältnis zwischen Trägheits- und Schwerkraften im Modell gleich gross ist wie in der Natur.

### 3.2 Murgang-Modellmischung

Zusätzlich zu Sand, Kies und Steinen werden bei viskosen Murgangmodellierungen auch Ton- und Kalksteinmehl verwendet, um viskose Murgangabflüsse im Modell zu generieren.

### 3.3 Zielgrössen

Physikalische Murgangmodelluntersuchungen unterscheiden sich in einigen Punkten von hydraulischen Modelluntersuchungen. Bei Beachtung des Froud'schen Ähnlichkeitsgesetzes stellen sich im hydraulischen Modell die jeweils richtigen Fließverhältnisse ein. Zudem können bei einem hydraulischen Modell die Abflusstiefen und Fließgeschwindigkeiten an vorgegebenen Stellen im Modell einfach messtechnisch erfasst werden. Vergangene Ereignisse können dann nachgebildet und so das Modell kalibriert werden.

Bei den physikalischen Murgangversuchen ist dies anders. Die Modelle können aufgrund der Komplexität der Murgangmischung nicht auf ein Ereignis kalibriert werden. Dies auch, weil oft die Datengrundlagen von Murgangereignissen fehlen. Man stützt sich auf Augenzeugenberichte und

allenfalls auf Fotos während und nach dem Ereignis. Im Sinne einer Kalibrierung werden Zielgrößen durch Fachspezialisten wie beispielsweise Geomorphologen aufgrund von bisherigen Ereignissen und Feldbegehungen vorgegeben. Diese Zielgrößen werden für verschiedene Murgangereignisse wie beispielsweise ein hundert- und dreihundertjähriges Ereignis definiert. Als Zielgrößen werden typischerweise die möglichen Schubgrößen wie Fronthöhen, Abflussspitzen und Fließgeschwindigkeiten der Murgänge im untersuchten Perimeter verwendet. Diese Zielgrößen sind abhängig vom Einzugsgebiet, den Gerinneneigungen, den Gerinnebreiten, der vorhandenen Geschiebezusammensetzung und den Materialdepots, welche bei einem Ereignis aktiviert werden können.

### 3.4 Vorversuche und Sensitivitätsversuche

Die Modell-Murgangmischung und die Zuflussbedingungen werden in Vorversuchen variiert, bis die vorgängig definierten Zielgrößen an den festgelegten Stellen im physikalischen Modell nachgebildet werden können. Eine wichtige Größe bildet dabei der Wasseranteil.

In Sensitivitätsversuchen wird die Zusammensetzung des Murgangmaterials [Wasseranteil, Kornverteilung der Kies- und Steinfraction sowie das Grösstkorn] variiert, um zu untersuchen, wie dadurch die Fliesseigenschaften beeinflusst werden. Weiter kann mit diesem Ansatz die Robustheit eines Bauwerks bei ändernden Randbedingungen aufgezeigt werden.

Murgänge können mit dieser Vorgehensweise qualitativ nachgebildet und die Funktionalität von Bauwerken untersucht werden. Es ist jedoch zu beachten, dass mit der Murgangmodellierung die Zielgrößen nicht bestätigt werden können, da sie als Eingangsparameter festgelegt werden.

## 4 Physikalisches Modell

Sind die Grundlagen für den Modellbau gesammelt und die Zielgrößen festgelegt, kann das Modell geplant und gebaut werden. Die Modelle, welche an der HSR Hochschule für Technik Rapperswil [heute DST Ostschweizer Fachhochschule] erstellt wurden, hatten meistens einen Massstab von 1:50.

Für den Modellbau werden ein Podest und eine Umrandung gebaut. Aus den Geländeaufnahmen generierte Querprofile werden verwendet, um das Gerinne und die anschliessende Topografie zu erstellen. Zwischen die Querprofile aus Pavatex o. ä. wird ein Füllmaterial eingebracht, welches als Untergrund für den Mörtelüberzug dient. Der Überzug bildet die Oberfläche des Geländes und des Gerinnes nach. Vertikale Bereiche werden mit Reliefprofilen nachgebildet. In Abbildung 2a ist das Fellbachmodell während dem Bau abgebildet, in Abbildung 2b fliesst ein Murgang während einem Versuch durch das fertige Modell.

Die Herstellung der Murgangmasse ist aufwendig. Einzelne Komponenten der Mischung müssen bereits am Tag vor den Versuchen mit Wasser zusammengemischt werden, um die Feinstanteile im Wasser quellen zu lassen. Die Kies- und Sandfraktionen müssen in einem Ofen getrocknet, anhand der Kornverteilung abgewogen und für den Versuchstag bereitgestellt werden. Am Versuchstag werden die Bestandteile der Mischung in einem Zwangsmischer zusammengeführt. Nach einem Versuch verändert sich der Wassergehalt in der Murgangmischung und da der Wassergehalt ein zentraler Faktor für die Fliesseigenschaften eines Murgangs ist, kann die Masse nur einmal verwendet werden und wird nach einem Versuch entsorgt.

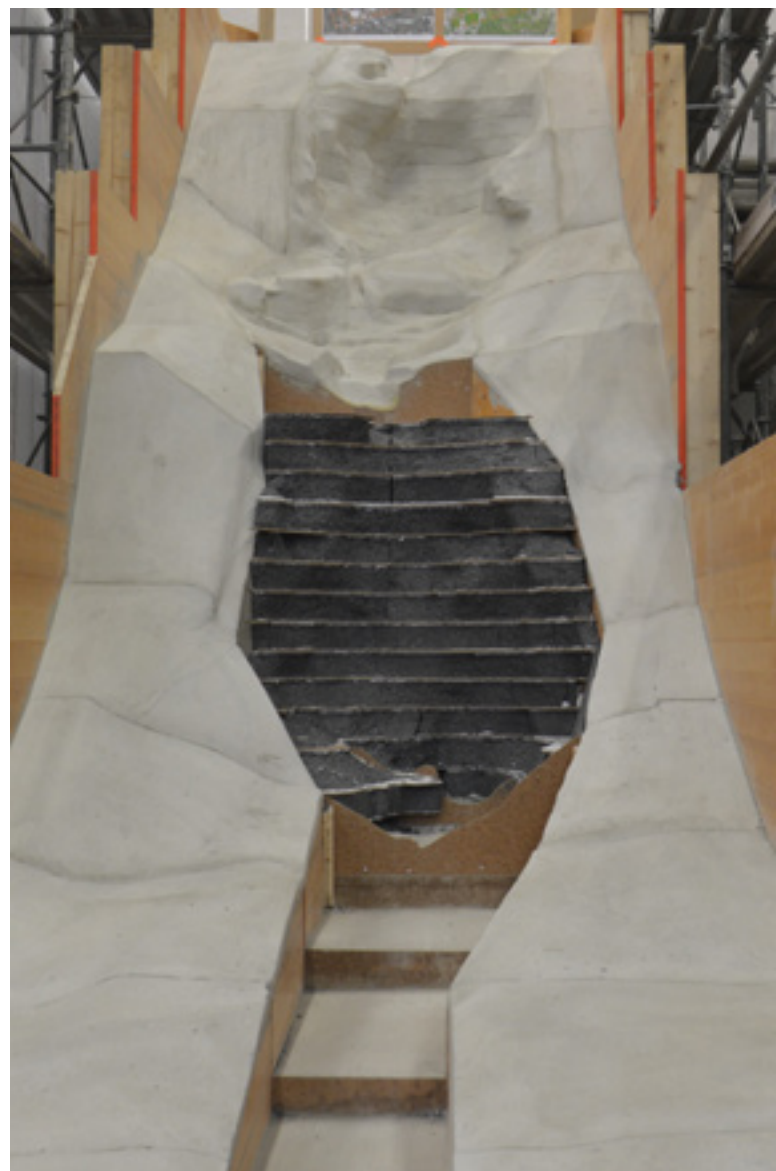


Abbildung 2a: Detailmodellierung eines physikalischen Modells mit Hilfe von Querprofilen in den flachen Gewässerabschnitten und Reliefprofilen in den steilen am Beispiel des Fellbachs in Saas-Balen. | Figure 2a : Modélisation détaillée d'un modèle physique utilisant des profils transversaux dans les sections plats et des profils en relief dans les sections abruptes, en prenant pour exemple le Fellbach à Saas-Balen.



Abbildung 2b: Nachbildung eines Murgangereignisses im Fellbach-Modell. Die Messsensoren sind an Alu-Profilen über dem Gerinne montiert.  
Figure 2b : Reproduction d'un événement de lave torrentielle dans le modèle du Fellbach. Les capteurs sont montés sur des profil en aluminium au-dessus du lit.

Die vorbereitete Murgangmasse wird oberhalb des Modells in einem speziellen Tank eingebracht. Die Murgangmasse wird anschliessend aus dem Tank über einen Kugelschieber ins Modell geleitet. Ein Teil der Masse durchfliesst das Modell und wird unterhalb des Modells in einem Auffangtank aufgefangen, ein Teil der Masse verbleibt im Modell. Mittels Messsensoren (Echolote und Laser) können im Modell verschiedene Parameter wie beispielsweise die Murfronthöhe messtechnisch erfasst werden. Mit der Fliesszeit zwischen zwei Messprofilen und der bekannten Distanz zwischen den Messprofilen kann die Fliessgeschwindigkeit der Murfront hergeleitet werden (Speerli et al 2010). Da die Gerinnegeometrie ebenfalls bekannt ist, kann die Abflussspitze im Gerinne berechnet werden. Der Murgangversuch wird aus verschiedenen Blickwinkeln mit Videokameras aufgezeichnet. Diese Aufnahmen sind bei der Datenauswertung nützlich und können für Projektpräsentationen verwendet werden.

## 5 Erkenntnisse

### 5.1 Gestalt der Murgänge

In der Murfront befinden sich in der Regel grosse Steine und Blöcke. Dies ist bei Naturaufnahmen von Murgangereignissen im Illgraben gut zu erkennen (Abbildung 3a). Eine Murfront mit grossen Steinen kann auch im Modell nachgebildet werden (Abbildung 3b, Abbildung 4 und Abbildung 5). Wie in der Natur bilden sich auch im physikalischen Modellversuch auf frei fliessenden Strecken Levées seitlich des Murgangabflusses (Abbildung 6).



Abbildung 3: Links: Murgangereignis im Illgraben (WSL 2016). In der Front sind die grossen Blöcke gut ersichtlich. Rechts: Modellmurgang für die Illgraben-Untersuchung. Auch im Modellmurgang sind die grossen Blöcke in der Front vorhanden. Die Aufnahme stammt aus den Vorversuchen in einer geraden Rinne. Blick bei beiden Fotos gegen die Fliessrichtung. | Figure 3 : Gauche : Événement de lave torrentielle dans l'illgraben (WSL 2016). Les grands blocs sont clairement visibles à l'avant. Droite : Modèle de lave torrentielle pour l'examen de l'illgraben. Les grands blocs sont également présents à l'avant de la modélisation. La photo a été prise lors d'essais préliminaires dans un canal droit. Vue dans le sens contraire de l'écoulement pour les deux photos.

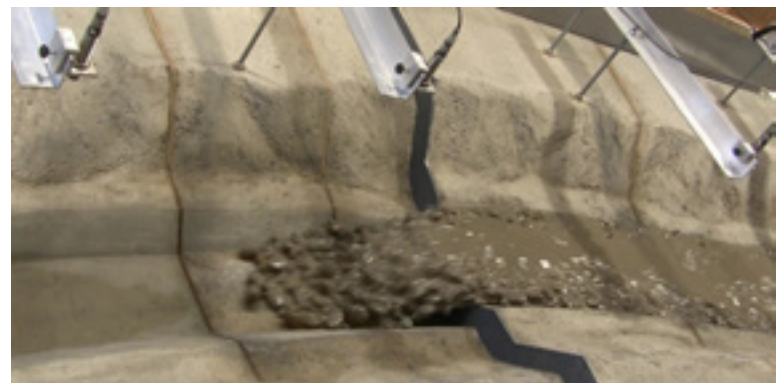


Abbildung 4: Abfluss eines Murgangs über eine Wildbachsperre im Illgraben-Modell (Fliessrichtung von rechts nach links). Die grossen Blöcke sind wiederum gut erkennbar. Die Echolote an den Alu-Profilen dienen zur Messung der Murfronthöhe und Erfassung der Fliesszeit zwischen zwei Profilen. | Figure 4 : Ecoulement d'une lave torrentielle sur un barrage torrent dans le modèle Illgraben (sens de l'écoulement de droite à gauche). Les grands blocs sont à nouveau clairement visibles. Les sondes acoustiques sur les profil en aluminium sont utilisés pour mesurer la hauteur du front de la coulée et pour enregistrer le temps d'écoulement entre deux profils.





Abbildung 5: Murgangereignis im Illgraben-Modell, links kurz vor und rechts während der Pfywald Ausleitung. Ein Teil des Abflusses fließt durch das Dosierbauwerk im Gerinne weiter, der andere Teil wird über die Ausleitung in den Pfywald geführt. Blick gegen Fließrichtung. | Figure 5 : Événement de lave torrentielle dans le modèle de l'Illgraben, gauche peu avant et droite pendant la dérivation. Une partie de la coulée continue de s'écouler à travers l'ouvrage de dosage dans le canal, l'autre partie est conduite via la dérivation dans le Pfywald. Vue dans le sens contraire de l'écoulement.



Abbildung 6: Murgangabfluss im Überleitkanal und Rückhalteraum beim Glyssibach-Modell. Auf der frei fließenden Strecke bilden sich Levées auf beiden Seiten des Murgangs. | Figure 6 : Ecoulement d'une lave torrentielle dans le canal de déversement et la zone de rétention dans le modèle de Glyssibach. Sur la section à écoulement libre, des levées se forment de part et d'autre de la lave torrentielle.

## 5.2 Fliesseigenschaften

Die Fliesseigenschaften von Murgängen, wie Spitzenabfluss sowie Geschwindigkeit und Höhe der Murfront, sind für die Auslegung und Dimensionierung von Schutzbauwerken wichtige Parameter. Im Folgenden wird auf die Beeinflussung der Fließgeschwindigkeit der Murfront infolge einer Wasserfallkaskade und einer flexiblen Ringnetzbarriere eingegangen.

### Fellbach

Für den Fellbach in Saas-Balen wurde der Einfluss einer Wasserfallkaskade auf die Fliesseigenschaften eines Murgangs untersucht. Die Modellversuche haben gezeigt, dass die Fließgeschwindigkeit des Murgangs unterhalb der Wasserfallkaskade praktisch unabhängig ist von der Geschwindigkeit oberhalb der Kaskade [Bachmann et al 2020]. Der Grund liegt darin, dass sich der Murgang unterhalb des untersten Wasserfalls zuerst wieder neu aufbauen muss, bevor er beschleunigt und stromabwärts fließt. Dort sind die Fliesseigenschaften primär von der Gerinnegeometrie, der Rauheit und der Längsneigung des Gerinnes abhängig [siehe auch Videofilm der OST 2021].

### Flexible Ringnetzbarrieren (Murgangnetze)

Murgänge können in Wildbächen mit flexiblen Murgangbarrieren aus Ringnetzen zurückgehalten werden [Wendeler 2008]. Solche Murgangnetze wurden an verschiedenen Orten in der Schweiz eingesetzt, beispielsweise am Louwenenbach, Hasliberg [Abbildung 7a]. Für die Dimensionierung von Multi-Level-Barrieren stellte sich die Frage, wie sich die Geschwindigkeit nach dem Überströmen einer bereits gefüllten Ringnetzbarriere entwickelt [Abb. 7b bis Abbildung 7d]. Die physikalische Murganguntersuchung hat ergeben, dass die Geschwindigkeit der Murfront stromabwärts des Murgangnetzes gleich oder leicht reduziert ist und mit zunehmender Fließstrecke wieder ein ähnliches Ausmass annimmt wie die Fließgeschwindigkeit stromaufwärts des Murgangnetzes [Speerli et al 2010].

### 5.3 Geschiebesammler, Ausleit- und Dosierbauwerke

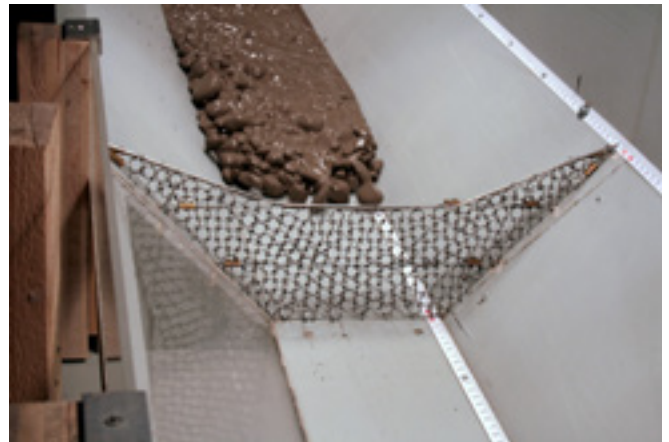
Geschieberückhaltebecken, Ausleit- und Dosierbauwerke werden so ausgelegt, dass fluviale Ereignisse inkl. Geschiebetransport und kleine Murgangereignisse durchgeleitet werden. Erst wenn die Abfluss- und Transportkapazität im Unterlauf erreicht ist, sollen mittlere bis grosse Murgangereignisse zurückgehalten, ausgeleitet oder dosiert werden. Mit diesem Konzept kann der Unterhaltsaufwand optimiert werden.

Die Geometrie der Öffnung beim Abschluss-, Ausleit- oder Dosierbauwerk muss dementsprechend so ausgelegt werden, dass kleine Ereignisse durchgeleitet werden. Bei mittleren und grossen Ereignissen soll die Durchlassöffnung verklausen, womit Murgangmasse zurückgehalten, bzw. ausgeleitet wird. Im Falle eines Dosierbauwerks wird der Abfluss unterhalb des Dosierbauwerks auf die Gerinnekapazität limitiert und der restliche Abfluss ausgeleitet [Abbildung 5b].

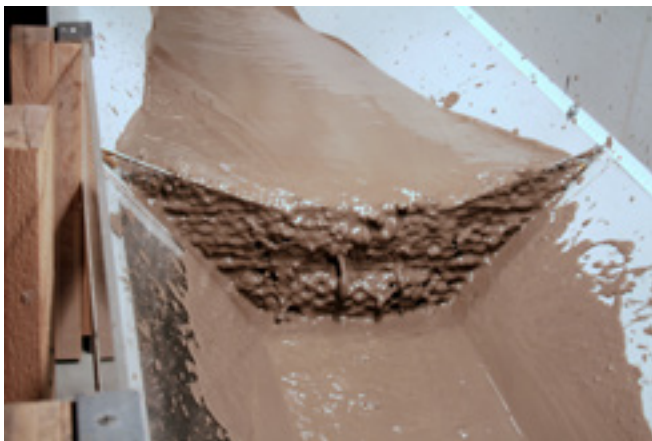
Verschiedene Modelluntersuchungen (Glyssibach, Lambbach, Fellbach) haben gezeigt, dass die horizontale Öffnungsweite ca. 1.5 bis 2 Mal dem Grösstkorn in der Kornverteilung entsprechen muss, dass von einem Verklausen ausgegan-



a)



b)



c)



d)

Abbildung 7: a) 13 Murgangnetze [Multi-Level-Barrieren] im Louwenenbach bilden ein Rückhaltevolumen von fast 10'000 m<sup>3</sup>. b) Murschub oberhalb der Ringnetzbarriere, c) durch einen Murschub verfüllte Ringnetzbarriere und d) Überströmen einer bereits verfüllten Ringnetzbarriere. | Figure 7 : a) 13 filets de retenue pour lave torrentielle [barrières à plusieurs niveaux] dans le Louwenenbach forment un volume de rétention de près de 10'000 m<sup>3</sup>. b) cisaillement de la lave torrentielle audessus de la barrière formée de filets et anneaux, c) barrière remplie par un cisaillement de la lave torrentielle et d) débordement d'une barrière déjà remplie.

gen werden kann. Für die geometrische Auslegung solcher Bauwerke muss eine Bemessungskornverteilung, bzw. ein Bemessungskorn  $d_{max}$  festgelegt werden. Die vertikale Höhe der Öffnung soll nicht grösser sein als die Höhe der Murfront. Ereignen sich in Natur Murgänge, bei welchen beispielsweise das Grösstkorn deutlich kleiner ist als für die Modellversuche angenommen, besteht die Gefahr, dass der Murgang nicht zurückgehalten, bzw. ausgeleitet werden kann. Ist das Grösstkorn jedoch deutlich grösser, kann bereits bei kleineren Ereignissen ein Rückhalt erfolgen, wodurch die Unterhaltskosten für die Leerung eines Sammlers und Instandstellungen höher ausfallen. Die Bestimmung des Bemessungsgrösstkorns ist aufgrund der Unsicherheiten eine der grössten Herausforderungen bei der Auslegung solcher Bauwerke, bzw. für deren robuste Funktionalität.

#### **Geschiebesammler Roossi am Lambbach als Beispiel für ein Abschlussbauwerk**

Aufgrund der Exposition des Einzugsgebietes und des grossen Sedimentaufkommens in den Schutthängen sind im Lambbach in Brienz (BE) grössere Murgangereignisse zu erwarten.

Der Geschiebesammler Roossi am Lambbach ist ein wichtiges Element des Schutzkonzeptes für die Gemeinden Brienz, Schwanden und Hofstetten. Das Abschlussbauwerk soll fluviale Ereignisse und kleinere Murschübe mit einem Volumen bis ca. 20'000 m<sup>3</sup> ohne nennenswerten Rückhalt durchleiten und grosse Murschübe mit einem Volumen von über ca. 40'000 m<sup>3</sup> zurückhalten. Das verfügbare Rückhaltevolumen ist jedoch zu klein, als das Grossereignisse vollständig zurückgehalten werden können. Bei solchen Ereignissen wird das Abschlussbauwerk kontrolliert überströmt. Die Modelluntersuchung hat neben der geometrischen Auslegung der Grundöffnung weitere wichtige Erkenntnisse geliefert, welche in Abbildung 8 hervorgehoben sind.

Die Geometrie der Öffnungen wurde so festgelegt, dass die Breite das Zweifache des Grösstkorns beträgt und die Höhe der untersten Öffnungen in etwa der massgebenden Murschübhöhe entspricht (Abbildung 8). Abbildung 9 zeigt die verklebten Öffnungen beim Abschlussbauwerk nach einem Modellversuch und Abbildung 10 das Abschlussbauwerk im Bauzustand.

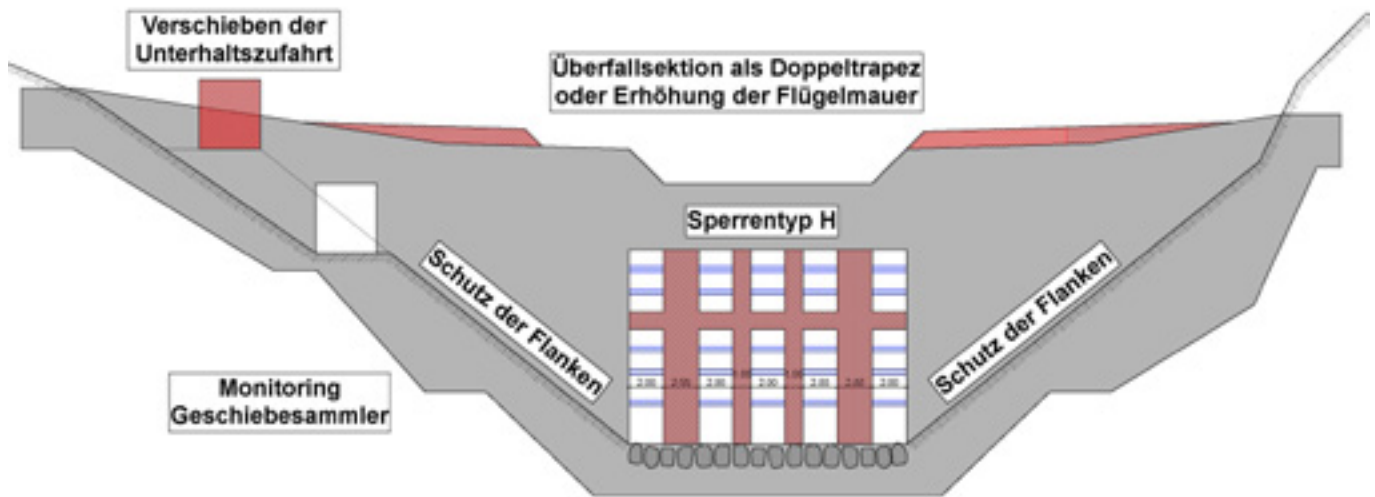


Abbildung 8: Optimiertes Abschlussbauwerk Roossi mit den empfohlenen Anpassungen [rot]. | Figure 8 : Ouvrage de fermeture Roossi optimisé avec les ajustements recommandés [rouge].



Abbildung 9: Abschlussbauwerk Roossi nach einem Versuch im Modell. Es erfolgte eine Verklauung der Öffnungen. Blick vom Unterwasser auf das Abschlussbauwerk. Figure 9 : Ouvrage de fermeture Roossi après un essai dans le modèle. Les ouvertures étaient bla-quées. Vue depuis l'aval vers l'ouvrage de fermeture.

### Ausleitbauwerk am Glyssibach

Nach dem Murgangereignis vom August 2005 wurden im Siedlungsgebiet von Brienz Blöcke mit einem Durchmesser von bis zu 3 m angetroffen. Im Gerinne oberhalb des Siedlungsgebietes wurden Blöcke mit Durchmessern von 5 bis 6 m transportiert.

Das Ausleitbauwerk soll grosse Murgänge fast vollständig in einen Ablagerungsraum ausleiten und verhindern, dass die grossen Gesteinsblöcke ins Siedlungsgebiet gelangen. Hingegen sollen kleine Murgänge durch das Ausleitbauwerk fließen und im Gerinne des Glyssibachs verbleiben, um häufige Übersarungen des Ablagerungsraumes zu vermeiden. Für das Ausleitbauwerk wurde folgende Trenncharakteristik festgelegt: Murgänge, bei welchen die grössten Blöcke in der Front kleiner als 1.2 m sind, sollen durchs Ausleitbauwerk hindurch geleitet werden. Murgänge, bei welchen die Blöcke in der Front im Bereich von 1.5 bis 6 m gross sind, sollen die Bauwerksöffnungen verklauen und in den Ablagerungsraum ausgeleitet werden.



Abbildung 10: Abschlussbauwerk Roossi im Bau, Sommer 2021. Figure 10 : Ouvrage de fermeture Roossi en construction, été 2021.

Das Ausleitbauwerk am Glyssibach besteht aus drei Grundöffnungen, welche eine Breite von 3 m und eine Höhe von 2.5 m haben (Abbildung 11). Der lichte Abstand zwischen den über den Grundöffnungen liegenden horizontalen Rohren beträgt 0.6 m. Die Krone der Überfallsektion liegt 9 m über der Sohle. Abbildung 12 zeigt das Ausleitbauwerk im Modell im Massstab 1:50 sowie als ausgeführtes Bauwerk in Natur.

### Dosiersystem am Illgraben

Der Illgraben ist mit mehreren Murgangereignissen pro Jahr einer der aktivsten Wildbäche in den Alpen. Die Abflusskapazität des bestehenden Grabens auf dem Kegel ist zu klein, um mittlere und grössere Murgänge schadlos in den Rotten (die Rhone) zu transportieren. Als Schutzmassnahme wird eine teilweise Ausleitung derjenigen Murgänge angestrebt, die im Siedlungsbereich Schäden verursachen

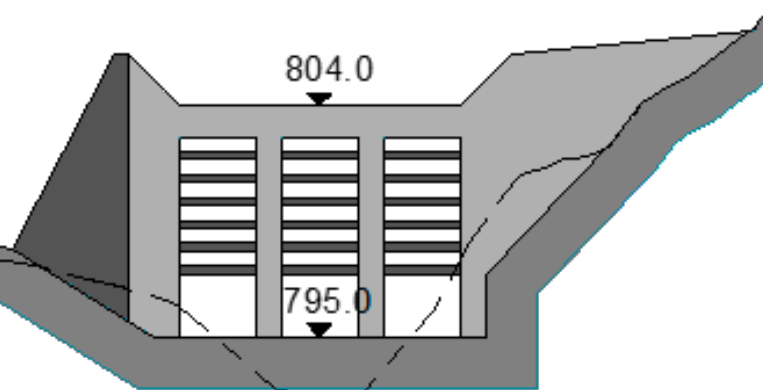


Abbildung 11: Aufgrund der physikalischen Murgangversuche entworfenes Ausleitbauwerk am Glyssibach. Blick in Fließrichtung. | Figure 11 : Ouvrage de dérivation sur le Glyssibach conçu sur la base des essais physiques de la lave torrentielle. Vue dans le sens de l'écoulement.

würden. Im Schutzkonzept ist ein Dosierbauwerk in der Kurve am Kegelhals vorgesehen (Abbildung 13). Durch die Trägheit der Murfront und die Dosierung in den bestehenden Gräben wird angestrebt, dass Murgänge, welche die Abflusskapazität des Unterlaufs überschreiten, teilweise in den Pfywald ausgeleitet werden (Abbildung 5b). Häufige Ereignisse, die keine Schäden verursachen, sollen weiterhin ohne Ausleitung in den Rotten fließen.

Abbildung 13a zeigt das ursprünglich vorgesehene Ausleitsystem und Abbildung 13b die optimierte Geometrie mit den Empfehlungen zur Umsetzung. Insgesamt wurden sechs Varianten im Modellversuch getestet und weiterentwickelt, bis die Geometrie die Vorgaben betreffend Funktionalität erfüllte. Entscheidend für eine günstige Anströmung von Bresche und Schlitzsperre ist deren Ausrichtung und Position in der Kurve. Bresche und Schlitzsperre sollen nicht in der Verlängerung der Zuleitung verlaufen, sondern leicht abgewinkelt und etwas weiter unten in der Kurve positioniert sein. Eine Kurvenüberhöhung auf der Aussenseite erhöht die Trennschärfe. Auf den ersten 16 m der Bresche ist die rechtseitige Leitwand ohne Böschung auszuführen. Es hat sich gezeigt, dass aufgrund der Kurvensituation auch kleinere Murgänge Material am Anfang der Bresche ablagern können. Es ist daher sicherzustellen, dass solches Material mit einem Monitoring rasch erkannt und die Bresche bei Bedarf rechtzeitig geräumt wird, damit der Anspringpunkt der Ausleitung langfristig nicht verändert wird. Weitere Informationen zu dieser physikalischen Murgangmodellierung wie auch zu numerischen Modellierungen am Illgraben sind in Berger et al [2014] und Berger et al [2016] zu finden.

#### 5.4 Schwemmholz

Schwemmholz kann sowohl im hydraulischen Modellversuch wie auch im physikalischen Murgangversuch nicht korrekt nachgebildet werden, da die Elastizitätseigenschaf-



Abbildung 12: Ausleitbauwerk am Glyssibach oben im Modell und unten in Natur. Blick gegen die Fließrichtung. | Figure 12 : Ouvrage de dérivation sur le Glyssibach haute modélisé et en bas dans la nature. Vue dans le sens contraire de l'écoulement.

ten im Modell und Natur verschieden sind. Für das Prozessverständnis werden auch bei physikalischen Murgangversuchen trotzdem Schwemmholzversuche durchgeführt. Das Schwemmholz kann jedoch nicht der Murgangmasse beigegeben werden, sondern muss im Modell ins Gerinne gelegt werden und wird dann durch den Murgang mitgerissen. Diese Versuche müssen mit Vorsicht interpretiert werden, können aber trotzdem wichtige Erkenntnisse zum Design eines Schutzkonzeptes beitragen.

## 6 Fazit

Mit dem Ansatz von Zielgrößen, Vorversuchen und Sensitivitätsversuchen sowie der eigentlichen Modelluntersuchung können qualitativ hochwertige Aussagen zu den Fliesseigenschaften von Murgängen sowie zur Funktionalität und möglichen Optimierungen von Bauwerken gemacht werden. Physikalische Murgangversuche tragen wesentlich zum Verständnis der Fließprozesse bei, insbesondere auch in der Interaktion mit Schutzbauwerken.

Wie hydraulische Modellversuche können auch physikalische Murgangmodelle einen wichtigen Beitrag im Mitwirkungsprozess leisten, indem Vertreter der Behörde(n) und der lokalen Bevölkerung das Modell besichtigen und einen

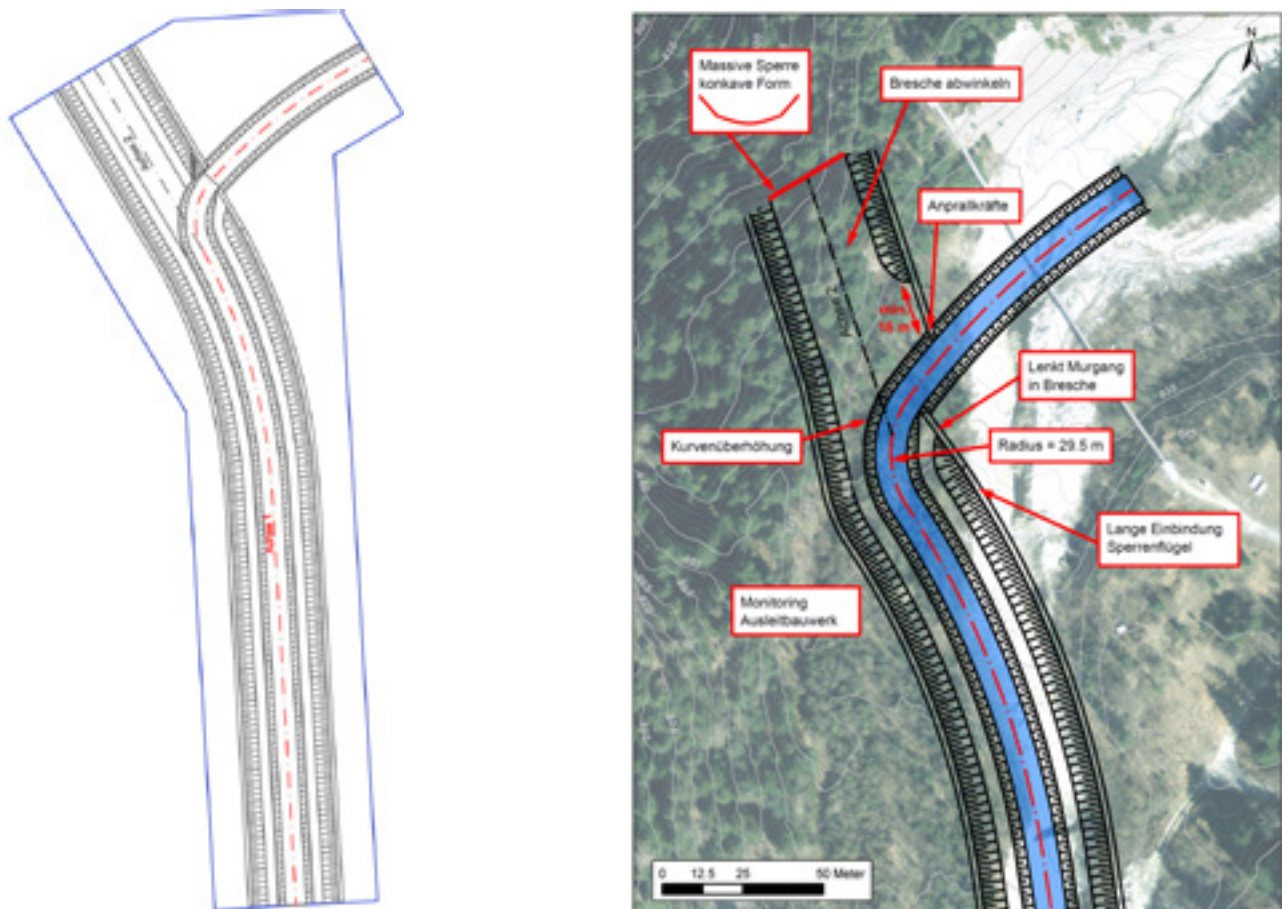


Abbildung 13: Ausleitsystem am Illgraben. Links ursprüngliche Geometrie, rechts optimierte Geometrie. Fließrichtung in den Bildern von unten nach oben.  
 Figure 13 : Système de dérivation sur l'Illgraben. Gauche géométrie originale, droite géométrie optimisée. Sens d'écoulement des images de bas en haut.

Murgangversuch mitverfolgen können. Dies kann wesentlich zur Akzeptanz eines Schutzkonzeptes in einer Gemeinde beitragen.

Die Grenzen der physikalischen Murgangmodellierung sind durch den vorhandenen Platz in der Versuchshalle, in der beschränkt maximal zu modellierenden Murgangmasse sowie im aufwendigen Herstellungsprozess der Murgangmasse definiert. Zudem wird die Untersuchung dadurch verteuert, dass die Murgangmasse nur einmal verwendet werden kann.

Ein grösserer Modellmassstabsfaktor könnte die Grenzen etwas entschärfen. Es stellt sich jedoch die Frage, ob dann die Skalierbarkeit noch gegeben ist.

## 7 Quellenverzeichnis

### 7.1 Literatur

- Bachmann, A.K., Speerli, J., Berger, C., Zimmermann, F., Clausen, W. [2021]. Einfluss der Fellbach-Wasserfälle auf das Fliessverhalten von Murgängen und auf mögliche Schutzmassnahmen. Tagungsband Wasserbau-Symposium 2020 «Wasserbau in Zeiten von Energiewende, Gewässerschutz und Klimawandel», 193-201, Zürich.
- Berger, C., Ulrich, M., Lauber, G., Speerli, J. [2014]. Hochwasserschutz Illgraben: Ausleitbauwerk für grosse Murgänge. Tagungsband Internationales Symposium «Wasser- und Flussbau im Alpenraum», 453-462, Zürich.
- Berger, C., Christen, M., Speerli, J., Lauber, G., Ulrich, M., McArdell, B. W. [2016]. A comparison of physical and computer-based debris flow modelling of a deflection structure at Illgraben, Switzerland. Proc. Int. Symp. Interpraevent, 212-220, Lucerne.
- Bezzola G. R., Hegg C. (Hrsg.) 2007: Ereignisanalyse Hochwasser 2005, Teil 1 – Prozesse, Schäden und erste Einordnung. Bundesamt für Umwelt BAFU, Eidgenössische Forschungsanstalt WSL. Umwelt-Wissen Nr. 0707.

- Coussot P. [1994]. Lois d'écoulement des laves torrentielles boueuses. La Houille Blanche 49: 38-43.
- Coussot, P., Laigle, D. [1994]. Etude des laves torrentielles sur modèle réduit en similitude des phénomènes naturels. La Houille Blanche 49: 44-49.
- Fehr, R. [1987]. Einfache Bestimmung der Korngrößenverteilung von Geschiebematerial mit Hilfe der Linienzahlanalyse. Schweizer Ingenieur und Architekt 105 (Heft 38): 1104-1109, Zürich.
- Speerli, J., Grob, M., Künzi, R., Wyss, P., Zimmermann, M., Pozzi, A. [2008]. Glyssibach Brienz, Switzerland: Flood and debris flow event on August 22/23, 2005 – Protection measures against future floods and debris flows. Proc. Int. Symp. Interpraevent, 384-385, Dornbirn.
- Speerli, J., Hersperger, R., Wendeler, C., Roth, A. [2010]. Physical modelling of debris flows over flexible ring net barriers. In: S. M. Springman, J. Laue, L.J. Seward (eds), Proc. 7th International Conference on Physical Modelling in Geotechnics, Institute for Geotechnical Engineering, 1285-1290, Zürich.
- Wendeler C. [2008]. Murgangrückhalt in Wildbächen – Grundlagen zu Planung und Berechnung von flexiblen Barrieren. ETH-Diss. Nr. 17916, Zürich.

## 7.2 Online

- Swisstopo [2021] <https://www.swisstopo.admin.ch/de/wissen-fakten/geoinformation/lidar-daten.html>
- OST [2021]. [https://www.youtube.com/watch?v=\\_gP\\_3xC9JjM](https://www.youtube.com/watch?v=_gP_3xC9JjM)
- WSL [2016]. [https://www.youtube.com/watch?v=--\\_9qp-seVHQ](https://www.youtube.com/watch?v=--_9qp-seVHQ)

## Kontaktadresse

Andrea Kristin Bachmann  
Ingenieurbüro Speerli GmbH  
Fuchsberg 11  
8846 Willerzell  
bachmann@iswb.ch



Dr. Jürg Speerli  
Ingenieurbüro Speerli GmbH  
Fuchsberg 11  
8846 Willerzell



Aurelian Schumacher  
Hürststrasse 96  
8046 Zürich  
aurelian.schumacher@gmail.com



# Geschiebe und Schwebstoffe berücksichtigen in kleinen und mittleren Gewässerprojekten; Berichte aus der und für die Praxis.

Martin Schibli  
Daniel Zimmermann

## Zusammenfassung

Seit jeher ist bekannt, dass bei der Gefährdung durch Gewässer nicht nur Wasser, sondern auch das damit transportierte Geschiebe eine massgebende Rolle spielen kann. Traditionellerweise wird dieser Gefährdung hauptsächlich mit Geschieberückhalt und -entnahmen begegnet. Eher wenig bewusst ist man sich, dass auch ein Geschiebemanagement zu Problemen führen kann. Das Geschiebe spielt also in vielen Gewässern eine komplexe Rolle. In der Gesetzgebung wird verlangt, dass bei der Renaturierung von Gewässern auch der Geschiebehaushalt «wiederhergestellt» werden soll. Die fachgerechte Umsetzung solcher Massnahmen erfordert ein hohes geschiebetechnisches Fachwissen. Darum stellt der Kanton Zürich den betroffenen Gemeinden eine Fachperson zur Verfügung, welche sie in dieser Thematik berät und begleitet. Erste Beratungen haben gezeigt, dass eine fachliche Unterstützung bei den Gemeinden grundsätzlich begrüsst wird. Erfahrungsgemäss wird das Wissen über den Geschiebetransport resp. -haushalt auf kommunaler Ebene noch zu wenig berücksichtigt. Althergebrachte, «bewährte Lösungen» stehen weiterhin im Vordergrund. Der Beizug einer «Fachperson Geschiebe» auch bei kleinen kommunalen Wasserbauprojekten oder für Optimierungen im Unterhalt hat sich bereits öfters bewährt. Mit Alleingängen im «konventionellen Stil» können die Ansprüche an einen zeitgemässen Wasserbau, insbesondere hinsichtlich Geschiebe, nicht mehr optimal erfüllt werden. Auch eine Zusammenarbeit von lokalen Ingenieuren mit ausgewiesenen Geschiebefachleuten kann durchaus befruchtend sein und zu einer Win-Win-Win-Situation führen.

## Keywords

Geschiebe, Geschiebesanierung, Geschiebehaushalt, Geschiebesammler

## Considérer le charriage et les matières en suspension dans les projets de cours d'eau de petite et moyenne taille ; rapports de et pour la pratique

## Résumé

On sait depuis longtemps que non seulement l'eau, mais aussi le charriage, peuvent jouer un rôle décisif dans les risques posés par les cours d'eau. Traditionnellement, ce risque est principalement contré par la rétention et l'enlèvement des matériaux charriés. On est peu conscient du fait qu'un manque de charriage peut également entraîner des problèmes. Le charriage joue donc un rôle complexe dans de nombreuses cours d'eau.

La législation exige que le régime de charriage soit « rétabli » lors des renaturations de cours d'eau. La mise en œuvre professionnelle de ces mesures nécessite un haut niveau d'expertise en matière de connaissances sur les sédiments. C'est pourquoi le canton de Zurich met à la disposition des communes concernées un expert qui les conseille et les soutient dans ce domaine. Les premières consultations ont montré que le soutien technique est généralement bien apprécié par les communes.

L'expérience a montré que l'on accorde trop peu d'attention aux connaissances sur le transport et le régime de charriage au niveau communal. Les « solutions traditionnelles et éprouvées » viennent toujours au premier plan. L'intervention d'un « expert en charriage », même pour de petits projets d'aménagement hydraulique communal ou pour l'optimisation de l'entretien, a déjà fait ses preuves à de nombreuses reprises. Faire cavalier seul dans le « style conventionnel » n'est plus le meilleur moyen de répondre aux exigences de l'aménagement hydraulique moderne, notamment en ce qui concerne le charriage. La coopération entre les ingénieurs locaux et les experts en charriage peut également être fructueuse et aboutir à une situation win-win-win.

#### Mots-clés

Charriage, assainissement du charriage, régime de charriage, dépotoir à alluvions.

### Tenere conto del materiale solido di fondo e in sospensione in progetti fluviali piccoli e medi; rapporti da e per la pratica

#### Riassunto

Si è sempre saputo che non solo l'acqua, ma anche il materiale da essa trasportato può giocare un ruolo decisivo nei pericoli posti dai corsi d'acqua. Tradizionalmente, questo pericolo viene contrastato principalmente con la ritenzione e l'estrazione di sedimenti. C'è poca consapevolezza del fatto che anche una mancanza di materiale solido in alveo può portare a dei problemi. Il trasporto solido ha quindi un ruolo complesso in molti corsi d'acqua.

La legislazione richiede che anche il trasporto solido di materiale di fondo venga "ripristinato" quando i corsi d'acqua vengono rinaturati. L'implementazione professionale di tali misure richiede un alto livello di competenza e specializzazione. Per questo motivo, il Cantone di Zurigo mette a disposizione dei Comuni interessati uno specialista che li consiglia e li sostiene in questo ambito. I primi incontri hanno mostrato che il sostegno degli esperti è general-

mente ben accetto da parte dei Comuni.

L'esperienza ha dimostrato che la conoscenza del trasporto solido e della sua gestione non è ancora sufficientemente presa in considerazione a livello comunale. Le "soluzioni tradizionali e collaudate" sono ancora in primo piano. Il coinvolgimento di un "esperto del trasporto solido", anche per piccoli progetti di ingegneria idraulica comunale o per l'ottimizzazione della manutenzione, ha già dimostrato il suo valore molte volte. Scegliere da soli lo "stile convenzionale" non è più il modo migliore per soddisfare le richieste dell'ingegneria idraulica moderna, specialmente per quanto riguarda il materiale solido. La cooperazione tra gli ingegneri locali e gli esperti del trasporto solido può anche essere fruttuosa e portare a una situazione win-win-win.

#### Parole chiave

Materiale solido, Risanamento del trasporto solido, Camere di ritenuta

### Geschiebesanierung auf Gemeindeebene

Seit jeher ist bekannt, dass bei der Gefährdung durch Gewässer nicht nur das Wasser, sondern auch das damit transportierte Geschiebe eine massgebende Rolle spielen kann. Direkt spürbar wird dies insbesondere bei Murgängen, Übersarungen und Schlammablagerungen. Traditionellerweise wird dieser Gefährdung hauptsächlich mit Geschieberückhalt und -entnahmen begegnet. Seit man sich jedoch vertiefter mit dem Thema Geschiebetransport beschäftigt hat, wurde klar, dass das Geschiebe in den Gewässern eine wesentlich komplexere Rolle spielt. So kann neben einem Überschuss an Geschiebe auch ein Geschiebemangel zu einer Gefährdung führen. Zudem bildet die Gewässersohle einen speziellen Lebensraum, dessen Dynamik und Struktur massgeblich durch das Geschiebe resp. den Geschiebetransport geprägt wird. Die bisherigen Erfahrungen mit kommunalen Kleinprojekten an Gewässern haben gezeigt, dass die damit betrauten, oft lokalen Ingenieure als «Allgemeinpraktiker» mit der Geschiebethematik vielfach nicht genügend vertraut oder zumindest nicht mehr auf dem aktuellen Stand der Kenntnisse sind. Zudem ist die Ansicht, klassische Geschiebesammler resp. -entnahmen seien das einzige – oder sicher das beste – Heilmittel gegen Hochwasser- resp. Auflandungen, in der Bevölkerung noch stark verankert. Entsprechend geniessen solche Projekte (vielleicht aber auch wegen der meist weniger aufwendigen Planung) oft eine breitere Unterstützung als zeitgemässe, jedoch weniger verbreitete Ansätze zur Optimierung des Geschiebehaushalts. Schlechte Erfahrungen mit Wasserbauprojekten, in denen dem Geschiebe zu wenig Beachtung geschenkt



wurde, verstärken sicher auch noch den Ruf nach dessen «Eliminierung».

Durch die Revision der Gewässerschutzgesetzgebung mit der Verpflichtung, Gewässer aufzuwerten, geschieberelevante Anlagen hinsichtlich ihrer Beeinträchtigung der Gewässer zu prüfen und gegebenenfalls Sanierungsmassnahmen einzuleiten, wird die Thematik «Geschiebehaushalt» nun auch auf kommunaler Ebene vermehrt ins Bewusstsein der Leute gerückt.

### Geschiebeberatung im Kanton Zürich

Im Kanton Zürich wurden für die strategische Planung zur Sanierung des Geschiebehaushalts rund 650 Anlagen untersucht. Davon führen 58 zu einer starken Beeinträchtigung des Geschiebehaushalts und sind sanierungspflichtig. Die Verfügungen dazu wurden erlassen, entsprechende Massnahmen müssen bis 2030 umgesetzt werden. Neben diesen wurden rund 300 weitere geschieberelevante Anlagen festgestellt, davon über 60 mit wesentlicher Beeinträchtigung des Geschiebehaushalts. Deren Sanierung muss priorisiert werden.

Die fachgerechte Umsetzung von Sanierungsmassnahmen erfordert ein hohes geschiebetechnisches Fachwissen. Darum stellt der Kanton Zürich den betroffenen Gemeinden eine externe Fachperson zur Verfügung, welche sie in dieser Thematik berät und begleitet. Die eigentliche Planung und Umsetzung der Massnahmen bleibt jedoch Aufgabe der Gemeinde [Messner, AWEL 2019].

Erste Erfahrungen haben gezeigt, dass eine fachliche Unterstützung bei den Zuständigen der Gemeinden grundsätzlich begrüsst wird. Oft werden, ohne Aufwand und Nutzen gross zu hinterfragen, die bestehenden Geschiebesammler in altbewährter Weise bewirtschaftet und unterhalten. Das drohende Risiko, durch eigenmächtige Änderungen eine verstärkte Gefährdung zu verursachen, führt oft zur Beibehaltung des Status Quo. In der Beratung durch Geschiebespezialisten werden die unterschiedlichen Aspekte in Bezug auf den Geschiebehaushalt beleuchtet und die verschiedenen Interessen gegeneinander abgewogen. In einigen Fällen zeigt es sich, dass eine vertiefere Untersuchung des Geschiebetriebs notwendig wird, um nachhaltige Lösungen zu finden. Oft kann jedoch direkt «im Feld» beurteilt werden, ob und in welcher Form eine Geschiebebewirtschaftung notwendig ist, resp. Sinn macht. Vielfach können allein durch Optimierungen im Unterhalt die verschiedenen Interessen berücksichtigt und «unter einen Hut» gebracht werden. Oft resultieren längerfristig sogar Einsparungen für die Gemeinde.

Eher wenig bewusst ist man sich, dass auch ein Geschiebemangel zu Problemen führen kann. Wasser tendiert zur Geschiebeaufnahme, bis seine Transportkapazität erreicht ist. Fehlt ihm dieses Geschiebe (zB infolge Geschiebeent-

nahmen), versucht der Bach, dieses aus seiner Sohle zu mobilisieren. Die dadurch verursachte Sohlenabsenkung kann zur Unterspülung von Ufer, Hangfuss und Kunstbauten, wie zB Brückenfundamenten führen. Die Ablagerung des mobilisierten Geschiebes in flacheren Abschnitten gehört dann wieder zu den bekannten Erscheinungen – und führt u.U. zum Wunsch nach weiteren Geschiebeentnahmen.

Neben den Problemen für den Menschen führt ein gestörter Geschiebehaushalt auch zur Beeinträchtigung des Lebensraums Gewässer. Fehlende Kiesablagerungen verhindern zB das Laichen von Forellen. Verschiedene Lebewesen benötigen Steine, Sand oder Schlamm zum Überleben. Sie wiederum bilden die Nahrungsgrundlagen für andere Tiere im und am Wasser. Diese Zusammenhänge werden jedoch in anderen Beiträgen [M. Nitsche et al., BAFU / F. Elber et al., AquaPlus] vertiefter erläutert.

### Geschiebesanierung am Dürrbach, Schübelbach (SZ)

In Schübelbach [SZ] wurden im Rahmen der strategischen Planung zur Sanierung des Geschiebehaushalts zwei Geschiebesammler am Dürrbach als sanierungsbedürftig eingestuft.

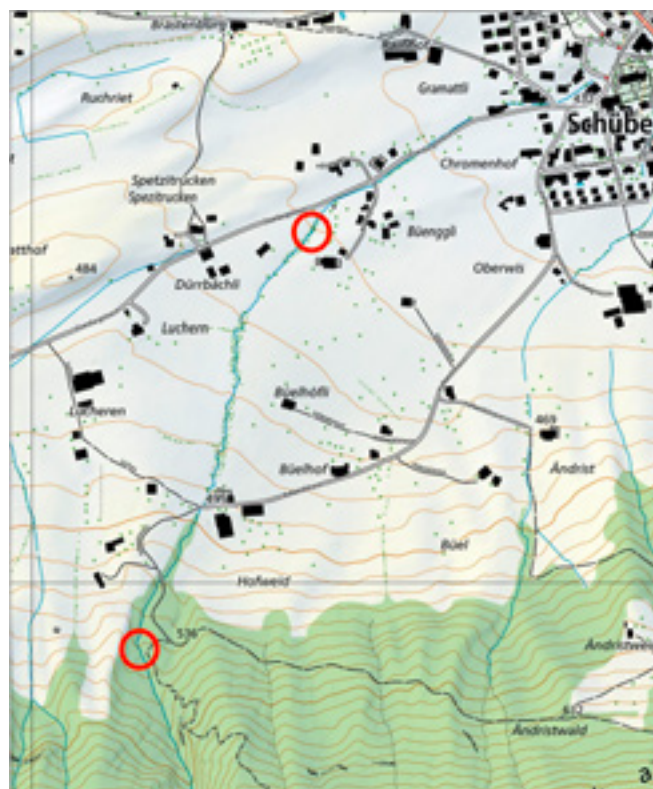


Abbildung 1: Lage der Geschiebesammler am Dürrbach [Basisplan: <https://map.geo.sz.ch>] Rot: Geschiebesammler | Figure 1 : Emplacement du dépotoir à alluvions sur le Dürrbach [plan de base : <https://map.geo.sz.ch>] Rouge : dépotoir à alluvions.



Abbildung 2: oberer Geschiebeablagerungsplatz am Dürrbach. |  
Figure 2 : Emplacement de dépôt des sédiments en amont sur le Dürrbach.

Da die Gemeinde ein Hochwasserschutz-Gesamtkonzept über alle kommunalen Gewässer am erarbeiten war, wurde als Grundlage für entsprechende Massnahmen am Dürrbach ein vertiefter Bericht zur Geschiebesanierung in Auftrag gegeben. Dieser orientierte sich eng an der Vollzugshilfe Renaturierung der Gewässer, Modul Geschiebehaushalt – Massnahmen, Entwurf V15 vom 08.11.2018 [Hunzinger, BAFU 2018].

Beim Dürrbach handelt es sich um einen Wildbach mit einer tendenziell geraden Gerinneform. Insbesondere in den Arbeitsschritten 1-3 der Vollzugshilfe [Referenzzustand, Geschiebefracht, Sanierungsziel] konnte somit auf detaillierte Geschieberechnungen verzichtet werden. Der Referenzzustand wurde u.a. mit Hilfe historischer Karten festgelegt und der Zielzustand anhand der «erforderlichen Frachten» resp. der aufgrund der Transportkapazität im Unterlauf «zulässigen Frachten» definiert. Hier zeigte es sich, dass «irreversible Veränderungen am Gewässersystem» [im konkreten Fall die Folgen der Gewässerkorrekturen und Entwässerungsmassnahmen in der Linthebene] berücksichtigt werden müssen und dem Hochwasserschutz eine zentrale Rolle zugestanden werden kann. Mit Hilfe einer Geschiebebilanzierung, basierend auf den Transportkapazitäten einzelner Gewässerabschnitte, wurde die Wirkung der beiden Geschiebesammler auf verschiedene Abflussszenarien [bettbildende Abflüsse, Hochwasserereignisse] untersucht.

Es zeigte sich, dass der Einfluss des oberen Sammlers auf den Geschiebehaushalt des Dürrbachs als gering eingestuft werden muss. Seine Funktion beschränkt sich hauptsächlich auf den Rückhalt grösserer Blocksteine aus dem



Abbildung 3: unterer Geschiebeablagerungsplatz am Dürrbach. |  
Figure 3 : Emplacement de dépôt des sédiments en aval sur le Dürrbach.

Einzugsgebiet, welche direkt am Hangfuss liegende Gebäude massiv beschädigen könnten. Das Geschiebe, das den Geschiebesammler passiert, genügt jedoch, um die Ziele zu erreichen resp. den naturnahen Zustand zu erhalten. Für diesen Sammler besteht demnach aus ökologischer Hinsicht kein Sanierungsbedarf, aus Gründen des Hochwasserschutzes sollte er jedoch weiterhin in angemessenem Rahmen unterhalten werden.

Der untere Sammler blockiert den natürlichen Geschiebetransport bei Abflüssen kleiner als HQ30 mehr oder weniger vollständig, insbesondere bei bettbildenden Abflüssen. Grundsätzlich besteht für diesen Sammler Sanierungsbedarf, da die natürliche Funktion des Dürrbachs als Fischgewässer verbessert resp. mindestens abschnittsweise wiederhergestellt werden muss. Spätestens im Dorfbereich ist aber eine Geschiebezufuhr aus Gründen des Hochwasserschutzes [Auflandungen] nicht mehr erwünscht. Daher sind Massnahmen zur Sanierung des Geschiebehaushalts unter gleichzeitiger Sicherstellung eines angemessenen Hochwasserschutzes zu planen [resp. vice versa].

### **Erfahrungen mit dem Geschiebesammler Flibach, Weesen**

Im Rahmen der Sanierung des Flibachs im Jahre 2006 wurde das Gerinne im Siedlungsgebiet vollständig saniert und ein zweiter Geschiebesammler gebaut. Die ausgeführten Massnahmen hatten zum Ziel, den Hochwasserschutz im Siedlungsgebiet von Weesen bis zu einem 100-jährlichen Ereignis sicherzustellen und die ökologische Funktionalität des Flibachs soweit wie möglich wiederherzustellen. Nachfolgend werden die Planungsschritte für den Geschiebesammler chronologisch beschrieben:

### Abschätzung des Geschiebeaufkommens und -transports für $HQ_{30}$ und $HQ_{100}$

Das Geschiebeaufkommen wurde mittels Begehungen (Profilaufnahmen und Abschätzung des Mobilisierung- und Ablagerungspotentials pro charakteristischem Abschnitt) und Berechnungen (Geschiebetransportkapazität pro Abschnitt und Jährlichkeit) abgeschätzt. Die angewandte Methodik lehnt sich an das Handbuch «Empfehlung zur Abschätzung von Feststofffrachten in Wildbächen» an [Lehmann, 1996].

Bei steilen Bächen wie beim Flibach werden die Transportkapazitätsformeln von Smart/Jaeggi [1984] und Rickenmann [2014] verwendet. Bei flacheren Gewässern oder über dem Schwemmkegel kann der Ansatz von Meyer-Peter/Müller zur Anwendung kommen. Wichtige Eingangsgrößen für alle drei Ansätze sind eine gewässertypische Hochwasser-Abflussganglinie und die zu erwartende Kornverteilung im laufenden Geschiebe. Ersteres kann aufgrund von Abflussmessdaten vom Gewässer selber oder benachbarten Messstationen mit vergleichbarer Abflusscharakteristik, von Ereignisdokumentationen oder mittels eines Schätzverfahrens z.B. nach Kölla [Lehmann, 1996] abgeleitet werden. Die Kornverteilung lässt sich mit der Linienzahlanalyse nach Fehr oder mit dem vereinfachten Ansatz für Wildbäche nach Böll [1997] ermitteln.

Beim Flibachprojekt wurde zudem eine Sensitivitätsanalyse unter Einbezug eines Starkniederschlags mit hoher Abflussspitze und kurzer Gangliniendauer ( $HQ_{100} = 60 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $t = 6\text{h}$ ) sowie einem langanhaltenden Regenerereignis ( $HQ_{\text{Dim}} = 7 \text{ m}^3/\text{s}$  konstant,  $t = 72\text{h}$ ) durchgeführt. Das Langzeitszenario bewirkt im Einzugsgebiet des Flibachs ein erhöhtes Risiko an grossräumigen Rutschungen. Weiter wurden die Unsicherheiten bei der Wirkung der Wildbachsperrern berücksichtigt. Das Resultat der Untersuchung zeigte einen Streubereich des zu erwartenden Geschiebeeintrags in die Projektstrecke von 33'000–46'000  $\text{m}^3$ . Weil die hohen Werte nur mit der Gleichzeitigkeit eines grossen Hangrutsches und/oder einem teilweise Versagen der Sperrern erreicht wird, dürfte die Wahrscheinlichkeit eines hohen Geschiebeeintrags mit einem gleichzeitigen 100-jährlichen Abflussereignis seltener als 1/100 sein. Entsprechend wurde für das Bauprojekt bzw. für die Dimensionierung des Geschieberückhalts der untere Grenzwert der Volumenabschätzung herangezogen: 33'000–35'000  $\text{m}^3$ .

### Abschätzung des erforderlichen Rückhaltevolumens

Danach stellte sich die Frage, wieviel Geschiebe muss wirklich zurückgehalten werden, bzw. wieviel Geschiebe vermag der Flibach im neuen Gerinne ohne ergänzende Rückhaltmassnahmen schadlos abzuleiten. Zur Beantwortung dieser Frage wurde die Stelle ermittelt, bei welcher ein allfälliger Geschiebeausbruch hohe Schäden verursachen

würde. Beim Flibach befindet sich diese Schlüsselstelle im Bereich der Kantonsstrassenbrücke. Dort beträgt die Transportkapazität noch ca. 10'000  $\text{m}^3$ . Aufgrund dieser Randbedingung wurde das erforderliche Rückhaltevolumen auf 23'000 bis 25'000  $\text{m}^3$  festgelegt.

### Ausbildung und Dimensionierung des Geschiebeablagerungsplatzes

Das grundsätzliche Ziel der Gerinnesanierung war, die geforderte Hochwassersicherheit zu gewährleisten und die ökologische Funktionalität so weit wie möglich wiederherzustellen. Deshalb versuchten wir einen Rückhalt zu entwickeln, welcher ohne Rückhaltesperren oder -pfähle auskommt. Die Ablagerung soll alleine durch eine Gefällsreduktion und Sohlenverbreiterung ausgelöst werden. Das Geschiebe soll sich so lange ablagern, bis auf dem Schwemmkegel das kritische Verlandungsgefälle erreicht bzw. bis die vom Gefälle direkt abhängige Transportkapazität wieder positiv wird. In einem ersten Schritt haben wir das Ablagerungsvolumen mit den oben erwähnten Transportkapazitätsformeln berechnet und in einem zweiten Schritt die Berechnungsergebnisse mit physikalischen Modellversuchen an der HSR Rapperswil (neu OST) überprüft. Neben dem Ablagerungsverhalten konnten auch das Einlaufbauwerk (Blockrampe  $J=20\%$ ) und die nach dem Ablagerungsplatz folgende Rampenkaskade modelliert und auf deren Stabilität überprüft werden. Die Modellresultate bestätigten das abgeschätzte Ablagerungsvolumen. Bei den steilen Rampen zeigten die physikalischen Modellversuche eine deutlich höhere Belastung am Rampenfuss und einen grösseren Kolk als mit empirischen Ansätzen berechnet, entsprechend wurde dieser deutlich verstärkt und verlängert. Insbesondere betrifft dies die Rampe unmittelbar talseitig des Sammlers. Würde diese kollabieren, käme es zu einer sofortigen Entleerung des im Sammler abgelagerten Geschiebes. So ist auch bei Geschiebeablagerungsplätzen ohne Rückhaltesperren auf eine stabile Sohlenlage im Bereich des Auslaufbauwerks zu achten. Ein wesentlicher Vorteil eines nach unten offenen Geschiebeablagerungsplatzes ist, dass Feingeschiebe und Sediment zu einem grossen Teil durchgespült werden, weil kein Einstau bzw. keine Seebildung erfolgt. Primär werden grössere Komponenten zurückgehalten, welche im unteren Abschnitt wegen reduzierter Transportkapazität Probleme verursachen könnten. Der gegen unten offene Sammler wird sich bei kleineren und mittleren Ablagerungen auch wieder selbsttätig entleeren. Dies reduziert den Unterhaltsaufwand. Ein Nachteil ist, dass ein solcher Ablagerungsplatz für gleiches Rückhaltevolumen mehr Raum benötigt als ein Geschiebesammler mit einer Rückhaltesperre.



Abbildung 4: Geschiebeablagerungsplatz Schlifeli am Flibach in Weesen in Flussrichtung. | Figure 4 : Emplacement de dépôt des sédiments Schlifeli sur le Flibach à Weesen dans le sens d'écoulement.



Abbildung 5: Geschiebeablagerungsplatz Schlifeli am Flibach in Weesen aus Drahtsicht. | Figure 5 : Emplacement de dépôt des sédiments Schlifeli sur le Flibach à Weesen, vue par un drone.

### Erfahrungen mit dem Sammler

Seit Inbetriebnahme des Sammlers hat sich noch kein Ereignis grösser  $HQ_{30}$  ereignet, welches zu einer Überlastung des weiter oben liegenden Geschiebesammlers Mietsack und damit zu einer massgebenden Beschickung des neuen Geschiebeablagerungsplatzes geführt hätte. Im neuen Sammler hat sich in der Zwischenzeit eine naturnahe Sohlenmorphologie mit verzweigtem Gerinne ausgebildet. Im Rahmen einer Abfischung konnten zahlreiche Forellen in diversen Grössen festgestellt werden. Bei häufigen Hochwasserereignissen wirkt der neue Geschiebeablagerungsplatz eher als Umlagerungsstrecke, entsprechend häufig ändern sich auch die Fliesswege. Der Sammler musste seit

Inbetriebnahme noch nie geleert werden. Aufkommende Bestockung stabilisiert die Kiesbänke und wird bis zu einer Stammdicke von ca. 5-6 cm toleriert. Der naturnahe Ablagerungsplatz ist bei Erholungssuchenden beliebt, sei es zum «Sönnele» oder für Kinder mit Affinität für den Wasserbau.

### Auswirkungen auf die Deltaentwicklung im Unterlauf

Bei häufigen Hochwasserereignissen transportiert der Flibach das Geschiebe in reduziertem Umfang weiterhin bis zum See und bildet ein Delta. Dieses musste seit Inbetriebnahme einmal bewirtschaftet werden, weil sich eine rückschreitende Auflandungstendenz abzeichnete. In Zusammenarbeit mit den Fachstellen des Kantons St. Gallen und der Gemeinde wurde eine Zielmorphologie für das Delta festgelegt, welche nach einem Eingriff die ökologische Funktion und den Erholungswert auch bereits unmittelbar danach gewährleistet. Durch die Entnahmen wurde somit eine gezielte Morphologie geschaffen. Nach Abschluss des Eingriffs wurde der bearbeitete Bereich mit GPS vermessen und ein 2d-Geländemodell erstellt. Bei zukünftigen Bewirtschaftungsmassnahmen kann dieses Geländemodell einer Unternehmung übergeben werden, welche die Zielmorphologie mit einem GPS-gesteuerten Bagger «wiederherstellen» kann. Dies vereinfacht das Bewilligungsverfahren und ermöglicht eine ausgewogene Bewirtschaftung, welche von allen massgebenden Interessenvertretern getragen wird. Anpassungen aufgrund gemachter Erfahrungen können mit geringem Aufwand in das Geländemodell integriert und bei einem nächsten Eingriff umgesetzt werden.

### Erfahrungen bei anderen Geschiebeablagerungsplätzen

#### Rückhaltesperre mit Dammbalken (Beispiel Schänis)

Der Rückhalt ist sehr effektiv, womit die angestrebte Hochwassersicherheit gewährleistet ist. Durch den Einstau bei hohen Abflüssen oder infolge eines durch Schwemmh Holz belegten Auslaufs werden jedoch auch Sand und Feingeschiebe zurückgehalten. Die Durchgängigkeit für Feststoffe ist damit deutlich eingeschränkt. Bei solchen Bauwerken ist zu prüfen, ob der Balkenabstand vergrössert werden kann, um während des Ereignisses die Durchgängigkeit für unproblematisches Feingeschiebe sowie eine selbsttätige Entleerung nach grösseren Hochwasserereignissen zu ermöglichen. Bei diesem Beispiel münden zwei Bäche in den Sammler. Der grössere bringt deutlich mehr Geschiebe, fällt jedoch oft trocken. Der kleinere (Mühlebach) führt permanent Wasser und häufig auch Feinsedimente. Letzterer kann im Sammler selbsttätig jedoch kaum eine Niederwasserrinne schaffen. So versickert ein Grossteil des Wassers im Sammler, v.a. in den trockenen Sommermonaten, und das Feinsediment kumuliert sich. Bei Sammlern, welche zwei Bäche mit unter-



Abbildung 6: Geschiebeablagerungsplatz Rappenbach/Mühlebach in Schönis aus Drohnensicht. | Figure 6 : Emplacement de dépôt des sédiments Rappenbach/Mühlebach à Schönis, vue par un drone.



Abbildung 7: Geschiebeablagerungsplatz Rappenbach/Mühlebach in Schönis: Dambalkensperre. | Figure 7 : Emplacement de dépôt des sédiments Rappenbach/Mühlebach in Schönis : barrage en poutres.

schiedlichen Abflussregimen fassen, sollte geprüft werden, ob für das kleinere Gewässer am Rande des Geschiebesammlers eine vorgeformte Niederwasserrinne bis in den Unterlauf geführt werden kann, oder dass die Einmündung so nah wie möglich am Auslaufbauwerk positioniert wird, um die wertvolle Durchgängigkeit für Wasser und Feinsedimente zu gewährleisten.

### Schlitzsperre mit vorgelagertem Pfahlrechen (Beispiel Uznach)

Beim Geschiebesammler Ernetschwilerbach wurde ein Verengungsbauwerk und davor ein Stabrechen für den Rückhalt von Schwemmholz eingebaut. Dieser Sammler ist bis zu einem gewissen Grad durchgängig. Er erfordert aber regelmässigen Unterhalt, denn sobald sich grössere Schwemmholzmengen ansammeln, bilden diese eine Sperre und halten auch das für den Unterlauf unproblematische Sediment und feineres Geschiebe zurück. In der Folge kommt es zu einer Auswaschung des nachfolgenden Gerinnes und damit zu einer

Verarmung des aquatischen Lebensraums. Diese Bauweise lässt eine Dotierung von geeignetem Geschiebe zu, indem bei Leerung triagiert wird und das geeignete Material talseitig des Stabrechens zur Wiedermobilisierung seitlich angeschüttet werden kann. Das Ablagerungsverhalten wird beobachtet. Falls sich zeigen sollte, dass die Stababstände zu gering sind, können einzelne Stäbe mit einem Greifer entnommen werden. Gleichwohl muss erwähnt werden, dass Anpassungen infolge gemachter Erfahrungen nicht ganz einfach sind, weil die Variabilität der Ereignisabläufe relativ gross ist und sich diese unterschiedlich auf das Ablagerungsverhalten auswirken (Langzeit-, Kurzzeitereignisse, grosser vs. kleiner Schwemmholzanfall, etc.). Entsprechend sollte die Wirkungskontrolle über eine längere Beobachtungsdauer erfolgen.



Abbildung 8: Geschiebeablagerungsplatz Ernetschwilerbach in Uznach aus Drohnensicht. | Figure 8 : Emplacement de dépôt des sédiments Ernetschwilerbach à Uznach, vue par un drone.



Abbildung 9: Geschiebeablagerungsplatz Ernetschwilerbach in Uznach: Verengungsbauwerk mit Pfahlrechen. | Figure 9 : Emplacement de dépôt des sédiments Ernetschwilerbach à Uznach : ouvrage de rétrécissement avec râteau à pieux.

## Literaturverzeichnis

- Messner S. [2019]: Geschiebesanierung schafft wertvolle Lebensräume. [www.umweltschutz.zh.ch/zup](http://www.umweltschutz.zh.ch/zup); ZUP Nr. 95
- Hunzinger L. et al. [2018]: Vollzugshilfe Renaturierung der Gewässer, Modul Geschiebehaushalt - Massnahmen [BAFU, Entwurf V15 vom 08.11.2018]
- Zollinger M. [1983]: Die Vorgänge in einem Geschiebeablagerungsplatz: Ihre Morphologie und die Möglichkeiten einer Steuerung, Diss. ETH Nr. 7419, Zürich 1983
- Lehmann Ch. et al., Arbeitsgruppe für operative Hydrologie [1996]: Empfehlungen zur Abschätzung von Feststofffrachten in Wildbächen Teil 1 u. Teil 2, Handbuch, Mitteilung Nr. 4, Landeshydrologie und -geologie, 3003 Bern
- Böll, A. [1997]: Wildbach- und Hangverbau, Berichte der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, Nr. 343, 123p.
- Rickenmann, D. [2014]: Methoden zur quantitativen Beurteilung von Gerinneprozessen in Wildbächen, WSL Berichte, Nr. 9, 105p.
- Jäggi, M. [1984]: Bestimmung der Feststofftransportkapazität in Steilgerinnen, Symposium Interpraevent, 10p.

## Kontaktadresse

Martin Schibli  
c/o Niederer + Pozzi Umwelt AG  
Burgerrietstrasse 13  
8730 Uznach  
055 285 91 80  
[Martin.Schibli@nipo.ch](mailto:Martin.Schibli@nipo.ch)



Daniel Zimmermann  
c/o Niederer + Pozzi Umwelt AG  
Burgerrietstrasse 13  
8730 Uznach  
055 285 91 80  
[Daniel.Zimmermann@nipo.ch](mailto:Daniel.Zimmermann@nipo.ch)



**Begrünungen Hunn**  
Mit der Natur als Partner

Begrünungen  
Samerplatten  
Sedumplatten

Erosionsschutz  
und  
Böschungsbegrünung

Begrünungen Hunn AG  
Pilatusstrasse 14, 5630 Muri  
[www.begruenungen-hunn.ch](http://www.begruenungen-hunn.ch)

# Impressum

---

## **Mitteilungsblatt für die Mitglieder des Vereins für Ingenieurbiologie**

Heft Nr. 4/2021, 31. Jahrgang  
Erscheint viermal jährlich  
ISSN 1422-008

### **Herausgeber / Editeur:**

Verein für Ingenieurbiologie  
c/o OST Ostschweizer Fachhochschule  
ILF Institut für Landschaft und Freiraum  
Oberseestrasse 10, CH-8640 Rapperswil  
Tel.: +41 58 257 48 97  
E-Mail: [sekretariat@ingenieurbiologie.ch](mailto:sekretariat@ingenieurbiologie.ch)

### **Internet-Adresse / Adresse internet:**

<http://www.ingenieurbiologie.ch>

### **Druck / Impression:**

Vögeli AG, Langnau i. E.

### **Verantwortlicher Redaktor / Rédacteur responsable:**

Robert Bänziger  
Bänziger Kocher Ingenieure AG  
Dorfstrasse 9  
CH-8155 Niederhasli  
Tel: +41 44 850 02 81  
E-Mail: [robert.baenziger@bk-ing.ch](mailto:robert.baenziger@bk-ing.ch)

### **Redaktionsausschuss / Comité de rédaction:**

Robert Bänziger  
Tel.: + 41 44 850 11 81  
E-Mail: [Robert.Baenziger@bk-ing.ch](mailto:Robert.Baenziger@bk-ing.ch)

Monika La Poutré  
Tel.: + 43 650 8615215  
E-Mail: [m.stampfer@gmx.at](mailto:m.stampfer@gmx.at)

Christian Rickli  
Tel: +41 44 739 24 03  
E-Mail: [christian.rickli@wsl.ch](mailto:christian.rickli@wsl.ch)

Roland Scheibli  
Tel.: + 41 43 259 27 64  
E-Mail: [roland.scheibli@bd.zh.ch](mailto:roland.scheibli@bd.zh.ch)

### **Lektorat / Lectorat:**

Martin Huber  
Tel.: + 41 32 671 22 87  
E-Mail: [martin.huber@bsb-partner.ch](mailto:martin.huber@bsb-partner.ch)

### **Übersetzungen / Traductions:**

Rolf T. Studer  
E-Mail: [rolf.studer@mail.com](mailto:rolf.studer@mail.com)

### **Sekretariat / Secrétariat:**

Verein für Ingenieurbiologie  
c/o OST Ostschweizer Fachhochschule  
ILF-Institut für Landschaft und Freiraum  
Oberseestrasse 10, CH-8640 Rapperswil  
Tel.: +41 58 257 48 97  
E-Mail: [sekretariat@ingenieurbiologie.ch](mailto:sekretariat@ingenieurbiologie.ch)

**Weitere Exemplare dieses Heftes können zum  
Stückpreis von Fr. 20.- beim Sekretariat bezogen werden.**

# Inserate Annonces



INGENIEURBIOLOGIE  
GÉNIE BIOLOGIQUE  
INGEGNERIA NATURALISTICA  
INSCHENIERA BIOLOGICA

Verein für Ingenieurbiologie  
c/o OST Ostschweizer Fachhochschule  
ILF Institut für Landschaft und Freiraum  
Oberseestrasse 10, CH-8640 Rapperswil  
Tel.: +41 58 257 48 97  
E-Mail: sekretariat@ingenieurbiologie.ch

## Inseratentarif für Mitteilungsblatt / Tarif d'insertion dans le bulletin

Der vorliegende Tarif ist gültig für eine Ausgabennummer.

Le present tarif comprend l'insertion pour une parution.

1 Seite Fr. 1125.- 2/3 Seite Fr. 825.- 1/2 Seite Fr. 600.-

1/3 Seite Fr. 450.- 1/4 Seite Fr. 375.- 1/8 Seite Fr. 225.-

Separate Werbebeilage beim Versand: 1 A4-Seite Fr. 1000.-

jede weitere A4-Seite Fr. 300.-

**Inseratenannahme: Verein für Ingenieurbiologie c/o OST Ostschweizer  
Fachhochschule ILF, Institut für Landschaft und Freiraum, Oberseestrasse 10,  
8640 Rapperswil, Tel. +41 58 257 48 97,  
sekretariat@ingenieurbiologie.ch**

Link auf der Internetseite des Vereins / Liens sur la page de l'Association:

Fr. 750.- pro Jahr/par an

Oder gratis bei Inseraten im Mitteilungsblatt im Wert von mindestens

Fr. 750.- pro Jahr.

Ou gratuit pour des annonces dans le bulletin d'une valeur d'au moins Fr. 750.-  
par an.



Europäische Föderation für Ingenieurbiologie  
Federazione Europea l'Ingegn Naturalistica  
Europ. Federation for Soil Bioengineering  
Fedetacion Europea de Ingeniarta def Palufe

Giovanni de Cesare  
EPFL ENAC IIC PL-LCH  
GC A3 495 (Bâtiment GC)  
Station 18, CH-1015 Lausanne  
Tel. +41 21 69 32517  
Mail: giovanni.decesare@epfl.ch

## Nächste Ausgaben Prochaines éditions

### Themen

Gewässerpreis/Mitgliederversammlung  
Geländestabilisierung und Aufforstungen  
Wildbäche: ein Blick über die Grenzen  
Wasserbau mit ökologischer Zielsetzung

### Redaktion

Roland Scheibli  
Christian Rickli  
Monika Stampfer  
Robert Bänziger

**Fachbeiträge sind gemäss den redaktionellen Richtlinien zu verfassen und bis zum Redaktionsschluss dem/der  
zuständigen Redaktor/in einzureichen.**

