



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Energie BFE
Energieforschung und Cleantech

Schlussbericht vom 23. Mai 2020

Erweiterung des hydro-morphologischen Index der Diversität (HMID) zur Beurteilung der Habitatvielfalt in einer Restwasserstrecke



Inn bei Zernez im Kanton Graubünden (Photo Severin Stähly 2018)



EPFL



Datum: 23. Mai 2020

Ort: Bern

Subventionsgeberin:

Bundesamt für Energie BFE
Sektion Energieforschung und Cleantech
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Subventionsempfänger/innen:

Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL)
Laboratoire de Constructions Hydrauliques (LCH)
Station 18, CH-1015 Lausanne
www.lch.epfl.ch

Autor/in:

Anton Schleiss, EPFL-LCH, anton.schleiss@epfl.ch
Severin Stähly EPFL-LCH, severin.staehly@epfl.ch; sev.staehly@gmail.com

BFE-Projektbegleitung:

Dr. Michael Moser, michael.moser@bfe.admin.ch

BFE-Programmleitung:

Dr. Klaus Jorde, klaus.jorde@kjconsult.net

BFE-Vertragsnummer: SI/501673-01

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.



Zusammenfassung

Stauanlagen mit grossen Speichern beeinflussen oftmals das Abfluss- und Geschieberegime im Gewässerunterlauf. Dadurch kann die natürliche Dynamik, Morphologie und Ökologie von noch verbliebenen Auenlandschaften erheblich beeinträchtigt werden. In der Saane unterhalb der Staumauer Rossens (Kanton Fribourg) führten die jahrzehntelange Restwasserbewirtschaftung und die stark reduzierte Geschiebefracht zu einer mangelnden Abfluss- und Geschiebedynamik. Als zukünftige denkbare Gegenmassnahme wurde 2016 ein erstes künstliches Hochwasser an der Staumauer als Versuch ausgelöst und flussabwärts lokal mit Geschiebebeigaben kombiniert. Flussökologische und hydro-morphologische Aufnahmen wurden vor, während und nach dem künstlichen Hochwasser durchgeführt. Die ökologischen Aufnahmen in der Restwasserstrecke wurden mit Erhebungen in der Schwall-Sunk Strecke flussabwärts der Wasserrückgabe bei Hauterive sowie in der Sense, einem natürlich verbliebenen Zufluss der Saane, verglichen. Die gemessenen hydro-morphologischen Eigenschaften erlaubten zudem einen Vergleich mit den langjährigen Erfahrungen von künstlichen Hochwassern am Spöl (Kanton Graubünden) unterhalb der Staumauer Punt dal Gall. Dabei zeigte sich wie erwartet, dass die Sense als Referenzgewässer mit einem natürlichen Abfluss- und Geschieberegime und einem verzweigten Gerinne die höchste EPT-Vielfalt der Makroinvertebraten sowie die höchste hydro-morphologische Diversität aufweist. Demgegenüber ergaben sich in der Restwasserstrecke der Saane erheblich geringere Werte und eine noch grössere Reduktion in der Schwall-Sunk Strecke, obwohl beide Abschnitte eine mäandrierende Flussmorphologie haben. Selbst einzelne künstliche Hochwasser erhöhen kurzfristig die hydro-morphologische Diversität, insbesondere wenn genug Geschiebe vorhanden ist. Werden künstliche Hochwasser regelmässig abgegeben, kann ein nachhaltiger Nutzen erzielt werden. Je nach Art der Lebensräume sollten künstliche Hochwasser etwa alle 2 bis 5 Jahre ausgelöst werden, wenn nötig mit Geschiebebeigaben im Unterlauf. Dabei können Synergien mit begrenzten Stauraumspülungen im Bereich der Auslassorgane sowie mit dem Durchleiten von Trübströmen erzielt werden, so dass auch ausreichend Schwebstoffe wie bei einem natürlichen Hochwasser zur Verfügung stehen.

Résumé

Les barrages avec un large volume de rétention influencent souvent le débit et le régime sédimentaire des rivières en aval. Ils peuvent dégrader la dynamique naturelle, la morphologie et l'écologie des zones alluviales résiduelles. Des décades avec du débit résiduel résultent dans un flux de charriage réduit et un manque du dynamisme du système aquatique dans la rivière Sarine, en aval du barrage de Rossens (Canton Fribourg). Une première crue artificielle d'essais a été déclenchée par le barrage en 2016 comme possible future mesure de compensation et localement combinée avec de l'approvisionnement sédimentaire en aval. Des data de l'écologie et de l'hydro-morphologie ont été mesurés avant, pendant et après la crue artificielle. Les mesures écologiques dans le tronçon avec le débit résiduel ont été comparées avec celles du tronçon avec des marnages en aval de la centrale à Hauterive et avec une référence naturelle, la Singine, un affluent naturel de la Sarine. Les caractéristiques hydro-morphologiques mesurées ont également été comparées à l'étude longue terme du Spöl (Canton Grison) à l'aval du barrage de Punt dal Gall, où les crues artificielles sont déclenchées périodiquement depuis 2000. Les résultats montrent comme espéré que la Singine, l'écoulement de référence avec un régime naturel et un lit en tresse, héberge la plus grande diversité de macro-invertébrés EPT et la plus grande diversité hydro-morphologique. Par contre résultent des valeurs notamment réduites dans la Sarine avec un débit résiduel et une réduction encore plus grande dans le tronçon avec un débit des marnages, malgré les deux tronçons ont un lit de la rivière avec des méandres. Même des crues artificielles individuelles augmentent la diversité hydro-morphologique à court terme,



surtout lorsqu'il y a suffisamment de sédiments. Si elles sont déclenchées régulièrement, un avantage durable peut être atteint. Dépendant des habitats, une crue artificielle doit être déclenché environ tous les 2 à 5 ans et si nécessaire combiné avec d'approvisionnement sédimentaire en aval. À cet effet, des synergies avec l'ouverture des vidanges de fonds du réservoir en amont ainsi qu'avec le transit des courants de turbidité peuvent être obtenus, pour qu'il y a suffisamment des fins dans la rivière comme dans le cas d'une crue naturelle.

Summary

Dams with a large retention volume often affect the runoff and sediment regime in downstream rivers. Thus, the natural dynamics, morphology and ecology of the remaining floodplain can be significantly impacted. In the Saane River below the Rossens dam (Canton of Fribourg) decades of residual flow management and a significant reduction of the sediment flux caused an insufficient dynamic of the flow and the sediment regime. As possible future compensation measure, a first artificial test flood was triggered from the dam in 2016 and locally combined with sediment replenishment downstream. River ecology and hydro-morphological data were sampled before, during and after the artificial flood. The ecological data in the residual flow reach of the Sarine were compared with surveys in the hydropeaking reach downstream of the turbines at Hauterive and in the Sense, a tributary of the Saane with a natural flow regime. The measured hydro-morphological characteristics allowed the comparison with the long-term experience of artificial floods at Spöl (Canton of Graubünden) downstream of Punt dal Gall dam. The results showed, as expected, that the Sense as the reference river with a natural runoff and a braided river bed has the highest EPT diversity of macroinvertebrates and the highest hydro-morphological diversity. In contrast, the values in the residual flow reach of the Saane were significantly smaller and an even larger reduction was measured in the hydropeaking reach, despite both river reaches have a meandering river bed. Even single artificial floods increase the hydro-morphological diversity in short-term, especially when there is enough sediment available. If artificial floods are triggered on a regular basis, a sustainable advantage can be achieved. Depending on the type of habitats, an artificial flood should be released about every 2 to 5 years, if needed with sediment replenishment downstream. Thereby, synergies with reservoir flushing through the bottom outlets as well as with venting of turbidity currents could be obtained, assuring a sufficient availability of suspended solids as for natural floods.

Take-home messages

- The highest hydro-morphological and macroinvertebrate diversities in three investigated rivers were observed in a natural and undisturbed reach, followed by a reach with residual and finally with a hydropeaking flow regime.
- Sediment availability is mandatory to ensure a sustainable effect of an artificial flood release.
- Repetitive artificial flood events are needed in order to have a sustainable change in the residual flow reach downstream of a dam.



Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	3
Résumé	3
Summary	4
Take-home messages	4
Inhaltsverzeichnis	5
Abkürzungsverzeichnis	6
Vorwort	7
1 Einleitung	8
1.1 Ausgangslage und Hintergrund	8
1.2 Motivation und Ziel der Arbeit.....	10
1.3 Abweichung von der ursprünglichen Projektidee	11
2 Untersuchungsgebiete	12
2.1 Saane	12
2.2 Sense.....	13
2.3 Spöl.....	14
2.4 Charakterisierung der Gewässer.....	15
3 Vorgehen und Methode	16
3.1 Künstliche Hochwasser und Geschiebebeigaben	16
3.2 Hydro-morphologischer Index der Diversität (HMID)	18
3.3 Makroinvertebraten (aquatische Wirbellose)	18
4 Ergebnisse und Diskussion	20
4.1 Hydro-morphologischer Index der Diversität (HMID)	20
4.1.1 Saane	20
4.1.2 Spöl.....	21
4.2 Makroinvertebraten.....	22
5 Schlussfolgerungen	23
6 Praxisempfehlungen	25
7 Publikationen zum Forschungsprojekt	26
8 Literaturverzeichnis	27



Abkürzungsverzeichnis

BFE	Bundesamt für Energie
CNRS	Centre national de la recherche scientifique
CV	Variationskoeffizient
EAWAG	Eidgenössische Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz
EPFL	École Polytechnique Fédérale de Lausanne
EPT	Ephemeroptera, Plecoptera, Tricoptera
GSchG	Gewässerschutzgesetz
GSchV	Gewässerschutzverordnung
h	Abflusstiefe
HMID	Hydro-morphologischer Index der Diversität
LCH	Laboratoire de Constructions Hydrauliques
μ	Mittelwert
σ	Standardabweichung
Taxa	Einheiten innerhalb der biologischen Systematik, welcher aufgrund bestimmter Kriterien Gruppen von Lebewesen zugeordnet werden, z.B. Arten
UN-IHE	Institute for Water Education der Vereinten Nationen
v	Fliessgeschwindigkeit
ZHAW	Zürcher Hochschule für angewandte Wissenschaften



Vorwort

Dieser Bericht fasst die wesentlichen Resultate der Forschungsarbeit für die Praxis zusammen. Der Bericht dient als Vorlage einer Publikation, welche in einer Fachzeitschrift veröffentlicht wird (voraussichtlich Korrespondenz Wasserwirtschaft). Für die Detailresultate sei auf den vollständigen Dissertationsbericht *Hydraulic-morphological habitat assessment in rivers considering residual flow, sediment replenishment and artificial flood events* verwiesen, welcher unter <https://infoscience.epfl.ch/record/265753> heruntergeladen werden kann.



1 Einleitung

Im Rahmen der Energiestrategie 2050 soll die Elektrizitätsproduktion aus Wasserkraft in den kommenden Jahrzehnten massvoll ausgebaut werden. Insbesondere Speicherkraftwerke dienen als wichtiges, ausgleichendes Standbein in einem System mit hochvolatiler Stromerzeugung aus neuen erneuerbaren Quellen wie Wind und Sonne. Beide werden zurzeit stark gefördert und deren Ausbau spielt in der Energiestrategie eine zentrale Rolle. Zusätzlich laufen in den kommenden Jahrzehnten viele Konzessionen von Schweizer Wasserkraftwerken aus, und die 2011 im Gewässerschutzgesetz (GSchG) und in Gewässerschutzverordnung (GSchV) neu definierten Massnahmen müssen bei Konzessionserneuerungen ergriffen werden. Dabei handelt es sich neben dem Fischauf- und -abstieg auch um die Geschiebeproblematik sowie Massnahmen zur Verringerung von Schwall und Sunk. Des Weiteren sind die Kantone gefordert ihre Fliessgewässer zu revitalisieren.

1.1 Ausgangslage und Hintergrund

Fliessgewässer und Auenlandschaften sind Lebensräume, charakterisiert durch eine grosse Dynamik. Diese Dynamik ist gekennzeichnet durch das Abfluss- und Geschieberegime, welche durch saisonale Bedingungen und Einzugsgebietseigenschaften bestimmt werden. Dadurch werden Ökologie und Morphologie in Fluss- und Auenlandschaften massgebend beeinflusst (Poff et al., 1997; Wohl et al., 2015). Die natürliche Dynamik im Abfluss- und Geschieberegime ist deshalb ein wichtiger Faktor für die ökologische Funktionsweise eines Gewässers (Moyle & Mount 2007). Diese Dynamik im Gewässersystem ist durch periodische Hochwasser charakterisiert, welche mit dem Transport und der Umlagerung von Geschiebe und Schwemmmholz für eine sich dauernd wandelnde und vielfältige Habitatstruktur sowohl im aquatischen als auch im terrestrischen Lebensraum sorgt. Diese dynamische Habitatvielfalt ist der Lebensraum für ein breites Spektrum an Pflanzen- und Tierarten. Sie sind deshalb von zentraler Bedeutung für die Aufrechterhaltung der Biodiversität. Gemäss dem Bundesamt für Umwelt (BAFU) wurden seit 1850 in der Schweiz 70 % aller Auen stark beeinträchtigt. Die verbleibenden Auenlandschaften werden im Bundesinventar der Auen von nationaler Bedeutung seit 1992 geschützt und aufgewertet. Zurzeit sind 326 Objekte darin erfasst (Stand: Mai 2019). Obwohl die im Aueninventar erfassten Gebiete nur einem Anteil von etwa 0.3 % der Landesfläche entsprechen, leben rund 10 % der heimischen Fauna ausschliesslich und 42 % gelegentlich in Auen (Rust-Dubié et al., 2006).

Flüsse und Flussauen werden weltweit anthropogen genutzt. Staueseen sind für die Erzeugung von erneuerbarer Wasserkraft, für die Wasserversorgung und die Bewässerung der Landwirtschaft, sowie für den Hochwasserschutz und die Überbrückung von Trockenperioden lebenswichtige Infrastrukturbauten (Schleiss, 2016). Diese Nutzung des Wassers beeinflusst das Abfluss- und Geschieberegime und somit die natürliche Dynamik. Grosse Stauhaltungen unterbrechen nicht nur die Sedimentdynamik, sondern verringern auch die Häufigkeit sowie die Abflussspitzen von Hochwasserereignissen. Unterhalb von Wasserkraftwerken kann auch der schnell ansteigende und abfallende Wasserpegel, das heisst Schwall und Sunk, zum Problem für Wasserlebewesen werden. Diese Problematik betreffend Habitatverfügbarkeit und fehlender Dynamik in der Auenlandschaft sind in Abbildung 1 verdeutlicht. Sie zeigt am Beispiel der Saane, wie sich das dynamische Auensystem, gut erkennbar an den weissen Kiesflächen, seit der Fertigstellung der Staumauer Rossens im Jahre 1948 verändert hat.



Abbildung 1: Zeitliche Veränderung der Saane zwischen Rossens und Hauterive, bedingt durch die Staumauer Rossens, welche 1948 gebaut wurde und den Geyerzersee bildet. Wegen fehlendem Geschiebe hat sich die Saane eingetieft und seine Dynamik als verzweigtes Gerinne über die ganze Talsohle verloren. Dadurch verringerte sich die Interaktion mit der Auenlandschaft. Die Kiesbänke (weisse Flächen) wurden von der Vegetation überwachsen, Quelle Luftbilder: Swissimage Geodata © Swisstopo



Dem Fehlen von natürlichen Hochwassern und Geschiebe, kann mit künstlichen Hochwassern in Kombination mit Geschiebeschüttungen als mögliche Massnahme entgegnet werden. Dies kann zu einer Verminderung der oben beschriebenen Defizite führen (Robinson et al., 2018; Stähly et al., 2018). Die Ziele von künstlichen Hochwassern und Geschiebeschüttungen sind die Aufwertung aquatischer und terrestrischer Lebensräume für Fische, Makroinvertebraten und Pflanzen sowie die Beseitigung von Geschiebedefiziten und fortschreitender Sohleneintiefungen (Döring et al., 2018). Gemäss dem revidierten Gewässerschutzgesetz (GSchG) müssen in der Schweiz unter anderem die natürlichen Funktionen sowie das Geschieberegime in den Flüssen saniert werden (Art. 36a & 43a GSchG). Aufgrund der Erfahrungen beim Fliessgewässer Spöl im Schweizerischen Nationalpark unterhalb der Staumauer Punt dal Gall (Robinson, 2012), wurden künstliche Hochwasser als mögliche Massnahmen zur Aufwertung von Auenwälder im Rahmen eines Forschungsprojektes untersucht (Döring et al., 2018). Dabei werden die Auslassorgane wie Hochwasserentlastung und Grundablass einer Talsperre geöffnet und der Fluss falls nötig unterhalb mit Geschiebe angereichert.

In diesem Zusammenhang sind Mess- und Planungsindikatoren für die Erhebung des Ist-Zustandes aber auch für den Vergleich von möglichen Szenarien unabdingbar. Der Hydro-Morphologische Index der Diversität (HMID, siehe Gleichung 1) gibt einen Hinweis auf das potenzielle Vorkommen unterschiedlicher hydraulischen Habitate, basiert auf der Häufigkeitsteilung von Fliessstiehen (h) und -geschwindigkeiten (v) in einem Flussabschnitt. Die Vorteile dieser Methode sind, dass die Datenerhebung verglichen mit anderen Indikatoren sehr objektiv erfolgt und die Daten auch aus numerischen Simulationen generiert werden können. Dies erlaubt die Anwendung des Indexes als Instrument zur Beurteilung von Varianten von Flussbauprojekten. Der HMID besteht aus dem Variationskoeffizienten der Fliesstiefe und -geschwindigkeit und ist wie folgt definiert (Gostner et al., 2013):

$$HMID_{Site} = \prod_i (1 + CV_i)^2 = \left(1 + \frac{\sigma_h}{\mu_h}\right)^2 \cdot \left(1 + \frac{\sigma_v}{\mu_v}\right)^2 \quad (1)$$

mit CV = Variationskoeffizient [-]; μ = Mittelwert; σ = Standardabweichung; h = Fliesstiefe; v = Fliessgeschwindigkeit.

Erfahrungen zeigten, dass bei kanalisierten Gerinnen, ein HMID Wert von unter 5 und bei verzweigten Flüssen von über 9 erreicht wird (Gostner et al., 2013, Gostner, 2019). Die Anwendung des HMID im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird im Absatz 3.2 erläutert.

1.2 Motivation und Ziel der Arbeit

Der HMID wurde für Gewässer entwickelt deren Abflussregime nicht durch anthropogene Eingriffe beeinflusst ist. Natürliche zeitliche Schwankungen des Abflusses können berücksichtigt werden. Hingegen stellt sich die Frage wie Gewässerstrecken, deren Abflussregime durch Kraftwerksbetrieb beeinträchtigt ist, mit dem HMID beurteilt werden können. In dieser Arbeit wurden deshalb mehrere Flussabschnitte mit unterschiedlichen hydrologischen Bedingungen (Restwasser, Schwall und Sunk) und ein Fluss mit einem natürlichen Abflussregime sowohl mit dem HMID als auch Makrobenthos-Beprobungen untersucht und verglichen. Das Ziel ist es zu zeigen, wie die unterschiedlichen hydrologischen Bedingungen sich auf die Habitatvielfalt und die Gewässerökologie auswirken. Dies erlaubt es mögliche Hinweise für Massnahmen zur Verbesserung des Abflussregimes zu geben.



1.3 Abweichung von der ursprünglichen Projektidee

Gemäss dem Unterstützungsgesuch war vorgesehen, den HMID mit einem Korrekturfaktor zu ergänzen, damit die Beeinflussung des Abflussregimes durch den Kraftwerkbetrieb berücksichtigt werden kann. In einem ersten Ansatz wurden die charakteristischen Werte wie d_{90} oder d_{10} der Kornverteilung des Sohlsubstrates im jeweiligen Flussabschnitt als Korrekturfaktor untersucht. Damit sollten allenfalls Hinweise auf die Geschiebedynamik erhalten werden. Es wurde jedoch festgestellt dass die Kornverteilung alleine in den untersuchten Gewässern kein schlüssiges Kriterium ist. In der Saane, welche trotz Restwasserregime durch ein Mäanderregime gekennzeichnet ist, variiert die Kornverteilung stark von Ort zu Ort. Es konnte keine Tendenz zur Abpflästerung festgestellt werden, wie dies etwa in kanalisierten Gewässern mit Restwasserregime auftritt. Zudem wurde die Form der Dauerkurven untersucht um einen „Flussfaktor“ zu definieren, welcher das Abflussregime charakterisiert. Als möglicher Ansatz wurden einerseits die kumulative Steigung und andererseits das Flächenintegral unter der Dauerkurve analysiert. Es konnte aber keinen schlüssigen Korrekturfaktor für den HMID gefunden werden um die Beeinflussung des Abflussregimes zu berücksichtigen. Beim Flächenintegral der Dauerkurve sind durch Schwall und Sunk verursachte Abflussschwankungen schwierig von Abflüssen in der Hochwasserperiode zu unterscheiden. Die kumulative Steigung der Dauerkurve hängt vom Maximum- und Minimumabfluss ab. Deshalb wurde ein Ansatz mit verschiedenen Quantilen der Abflussdauerkurven untersucht (z.B. q_{99} , q_{95} , q_{15} , q_5). Um diesen vielversprechenden Ansatz zu verfolgen, war leider die Datengrundlage in den drei Untersuchungsgebieten zu gering. Für eine quantitative Beurteilung wäre eine umfassende Analyse von zahlreichen Jahresganglinien von mehreren Gewässern mit Restwasser, Schwall und Sunk und natürlichem Abflussregime notwendig gewesen, was im begrenzten Zeitraum dieser Forschungsarbeit nicht möglich war. In der Diskussion mit Experten und der Begleitgruppe wurde das Ziel deshalb überarbeitet um mindestens qualitative Aussagen machen zu können. Da die hydraulisch-morphologischen Voraussetzungen, wie Abflussdynamik und Habitatvielfalt einen direkten Einfluss auf die im Fluss lebenden Organismen hat, wurde es als sinnvoll betrachtet, den HMID in Relation mit ökologischen Daten (TAXA) und dem Abflussregime zu untersuchen. Dies war möglich, da im Zuge des künstlichen Hochwassers von Projektpartnern biologische Aufnahmen in der Saane gemacht wurden. Zudem ergab sich mit dem künstlichen Hochwasser im Spöl von 2018 eine einmalige und nicht vorhergesehene Gelegenheit, die Beobachtungen mit dem künstlichen Hochwasser an der Saane von 2016 mit einem anderen Flusssystem (Gebirgsfluss) zu vergleichen. Insbesondere dieses Ereignis bewegte uns dazu, neben den erwähnten Schwierigkeiten, die ursprüngliche Idee der Erweiterung des HMIDs zurückzustellen. Am Spöl werden künstliche Hochwasser seit Jahrzehnten ökologisch untersucht, jedoch liegt deren Fokus nicht auf dem Geschiebe und der Habitatvielfalt. Die Arbeiten am Spöl wurden deshalb in Zusammenarbeit mit der Forschungsgruppe der EAWAG um Dr. Chris Robinson geplant und die Erkenntnisse und Resultate der Forschungsgruppe zur Verfügung gestellt. Diese Neuausrichtung konnte sich zudem auch auf die verstärkte Zusammenarbeit mit der Forschungsgruppe für River Basin Management am UN-IHE Institute in Delft abstützen. Im Weiteren besteht ein Kontakt mit der Forschungsgruppe von Prof. Piégay am CNRS in Lyon, welche zurzeit der Einfluss der Korngrößenverteilung auf die Habitatvielfalt näher untersucht.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass trotz der Abweichung von der ursprünglichen Projektidee, der Zusammenhang zwischen dem HMID und den ökologischen Kennwerten in Abhängigkeit des vorherrschenden Abflussregimes für die drei untersuchten Gewässer aufgezeigt werden konnte. Damit konnte wissenschaftlich ein neuartiger Beitrag geleistet werden.



2 Untersuchungsgebiete

2.1 Saane

Die Saane hat ihren Ursprung unterhalb des Sanetschhorns auf etwa 2500 m ü. M. und erstreckt sich über 126 km durch die Kantone Wallis, Bern, Waadt und Fribourg und mündet bei Wileroltigen (463 m ü. M.) in die Aare. Sie entwässert ein Einzugsgebiet von rund 1900 km². Die Bogenstaumauer Rossens ist die vierte von sechs Talsperren entlang der Saane und bildet mit ihren 83 m Höhe seit 1948 den Gixerzersee. Mit einem Volumen von 200 Mio. m³ gehört der Gixerzersee zu den 5 grössten Stauseen der Schweiz. Im Kraftwerk Huterive werden im jährlichen Mittel etwa 230 GWh elektrischer Strom produziert. Durch diese Wasserentnahme entsteht eine gut 13 km lange Restwasserstrecke in der Auenlandschaft unterhalb der Staumauer Rossens (Abb. 2a).

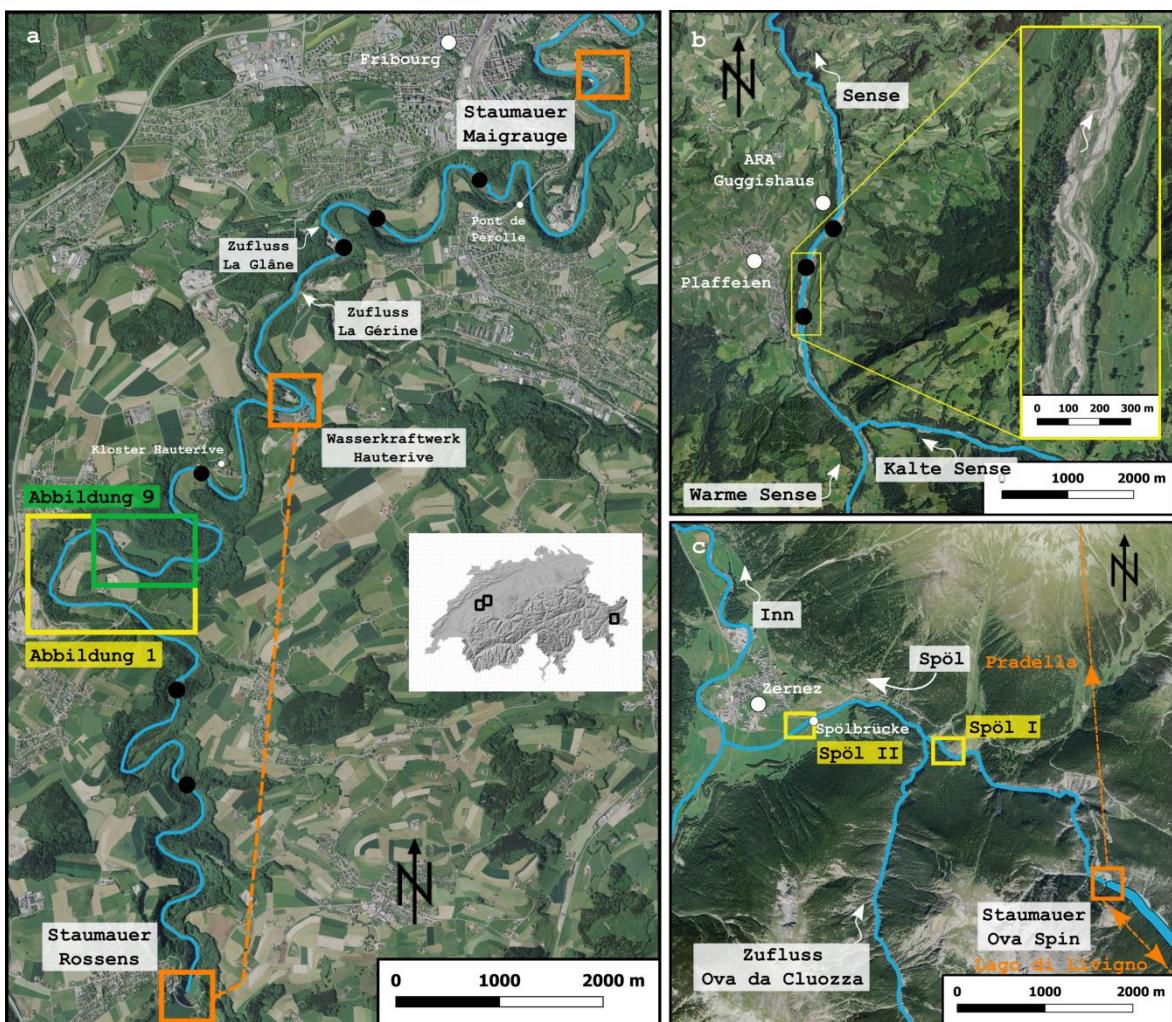


Abbildung 2: Übersichtskarte der untersuchten Gewässer. (a) Saane zwischen Rossens und Fribourg, charakterisiert durch die Restwasserstrecke (Rossens bis Huterive) und die Schwall-Sunk Strecke (Huterive bis Fribourg), die schwarzen Kreise markieren die Stellen der Makroinvertebratenbeprobungen in beiden untersuchten Abschnitten. (b) Das verzweigte Gerinne der Sense auf Höhe Plaffeien. Die Sense ist charakterisiert durch ihr natürliches Geschiebe- und Abflussregime und ein Zufluss der Saane. (c) Der Spöl zwischen der Staumauer Ova Spin und Zernez. Seit dem Jahr 2000 werden von der Staumauer Ova Spin regelmässig künstliche Hochwasser ausgelöst. Quelle Luftbilder: Swissimage Geodata © Swisstopo

Die Dotiermengen von $2.5 \text{ m}^3/\text{s}$ im Winter und $3.5 \text{ m}^3/\text{s}$ im Sommer führen zu einer Abflussbreite von ca. $20\text{--}35 \text{ m}$ bei einem Sohlgefälle von 0.3% . Aufgrund des Geschieberückhaltes durch den Stauteich besteht auf diesem Abschnitt ein Geschiebedefizit, weshalb stellenweise der Molassefels zum Vorschein kommt. Die vermehrte Abwesenheit von Hochwasserereignissen unterstützt das Wachstum von Algen im Flussbett. Abbildung 1 zeigt die Entwicklung der Restwasserstrecke seit dem Bau der Staumauer. Unterhalb der Wasserkraftzentrale münden die Gérine und die Glâne in die Saane. Erstere transportiert viel Geschiebe. Auf Höhe der Stadt Fribourg mündet die Saane in den Pérollesee. Die Ausbauwassermenge der Zentrale Hauterive beträgt $75 \text{ m}^3/\text{s}$. In diesem Flussabschnitt herrscht ein Schwall und Sunk Betrieb, charakterisiert durch den unterschiedlichen Stromverbrauch zwischen Tag und Nacht und Wochen- respektive Wochenendtagen. Das Abflussregime der Saane (französisch Sarine) ist aus Abbildung 3 ersichtlich.

2.2 Sense

Die Sense erstreckt sich über 36 km und entwässert ein Einzugsgebiet von 435 km^2 . Bei Laupen mündet sie in die Saane. Sie ist der natürlichste verzweigte Fluss der Schweiz und fliesst grösstenteils in einer 100 m bis lokal 500 m breiten Schlucht. In dieser Studie wurde ein 3.5 km langer Abschnitt bei Plaffeien (830 m ü. M.) untersucht. Dieser Abschnitt hat ein bis zu 200 m breites, verzweigtes Gerinne. Das naturnahe Abfluss- und Geschieberegime gewährleistet eine dynamische Auenlandschaft in der Sense (Abb. 2b). Verglichen mit den Abflussregimen in der geographisch benachbarten Saane (Abb. 3) ist der naturnahe Charakter deutlich erkennbar (Abb. 4). Das Regenereignis, welches am 9. April 2014 zu erhöhtem Abfluss in der Sense führte ist im Abfluss der Saane nicht erkennbar.

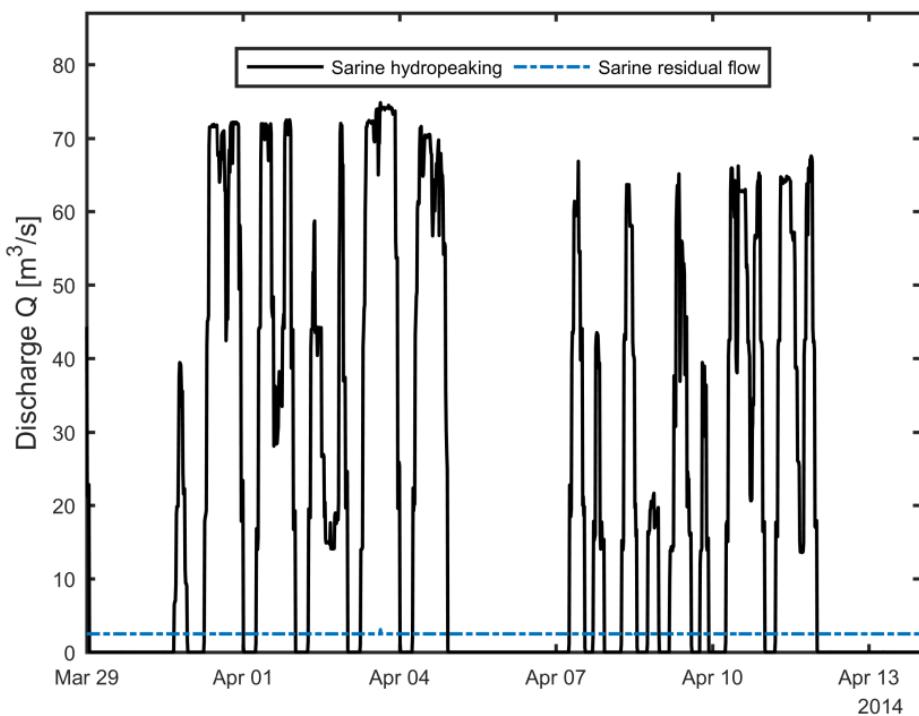


Abbildung 3: Abflussregime der Saane (Sarine) im April 2014. Die gestrichelte blaue Linie charakterisiert die Restwasserstrecke zwischen Rossens und Hauterive mit $2.5\text{--}3.5 \text{ m}^3/\text{s}$, die ausgezogene schwarze Linie die Schwall-Sunk Strecke zwischen Hauterive und dem Pérollesee. Die Daten beziehen sich auf den Betrieb des Grundablasses resp. der Dotierzentrale der Staumauer Rossens (Restwasserstrecke) und den Turbinierbetrieb der Kraftwerkszentrale in Hauterive (Schwall-Sunk Strecke). Datenquelle: Betreiberfirma Groupe e.

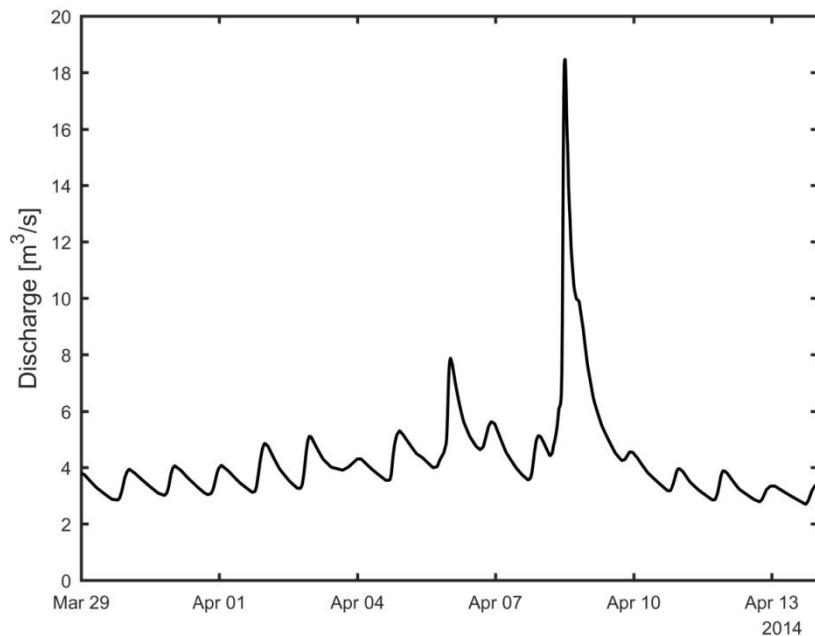


Abbildung 4: Abflussregime der Sense im April 2014. Die Daten stammen von der Abflussstation Nr. 2179 des Bundes in Thörishaus und wurden aufgrund der Einzugsgebiete mit dem Faktor 0.44 korrigiert, damit der Abfluss in etwa demjenigen der Sense in Plaffeien entspricht.

2.3 Spöl

Der Spöl befindet sich am südöstlichen Ende der Schweiz und entspringt unterhalb des Piz Ursera (3031 m ü. M.) im Kanton Graubünden und entwässert ein Einzugsgebiet von 345 km^2 . Bei Zernez mündet der Spöl in den Inn, ein Zufluss der Donau, welche ins Schwarze Meer mündet. Entlang des Spöls gibt es zwei Staufen, die zur Wasserkraftproduktion gebaut wurden. Auf 1805 m ü. M. liegt der 164 Mio. m^3 grosse Lago di Livigno, welcher mit dem rund 6 Mio m^3 grossen Ausgleichsbecken Lai da Ova Spin auf 1630 m ü. M. als Pumpspeicherkraftwerk funktioniert. Zusätzlich münden mehrere Überleitungen ins Becken Lai da Ova Spin. Von da wird Wasser in die Kraftwerkszentrale Pradella auf 1141 m ü. M. weitergeleitet, wo das Wasser in den Inn zurückgegeben wird. In der Gewässerstrecke unterhalb der Staumauer Ova Spin, wurden zwei Orte hydro-morphologisch untersucht, nämlich Spöl I und Spöl II (Abb. 2c). Der Gewässerabschnitt Spöl I ist 10-15 m breit und befindet sich in einer Schlucht mit steilen Felswänden und einem Sohlgefälle von knapp 2 %. Der Spöl II hat eine verzweigte Flussmorphologie und ist etwa 25 m breit und befindet sich in offenem Gelände mit einem Sohlgefälle von etwa 1 %. Der Restwasserabfluss unterhalb der Staumauer Ova Spin beträgt 0.9 m^3/s im Sommer und 0.3 m^3/s im Winter. Unterhalb von Untersuchungsperimeter Spöl I mündet der Seitenbach Ova da Cluozza in den Spöl. Dieser bringt eine beträchtliche Menge Geschiebe und kleinere natürliche Hochwasserereignisse in den unteren Teil des Spöls. Seit dem Jahr 2000, werden regelmässig (typischerweise einmal pro Jahr) künstliche Hochwasser von beiden Staumauern ausgelöst um die hydrodynamischen Verhältnisse im Spöl zu verbessern. Das Abflussregime im Spöl entspricht dem Regime der Restwasserstrecke der Saane, mit vereinzelten künstlichen Hochwasserspitzen (siehe Abb. 5).

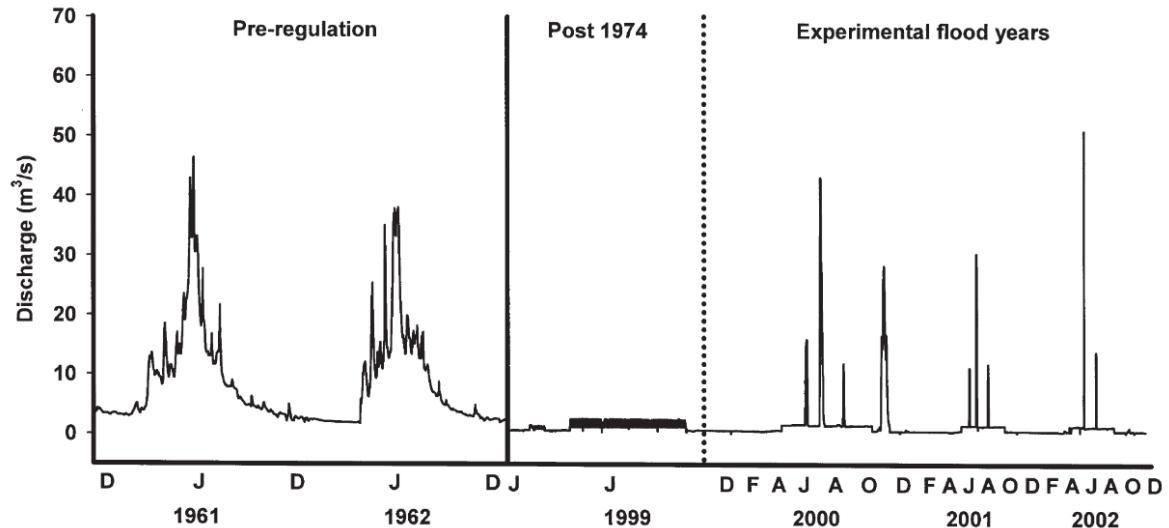


Abbildung 5: Abflussregime im oberen Abschnitt des Spöls, Vor dem Bau der Staumauer Punt dal Gall (Pre-regulation), kurz nach dem Bau der Staumauer (Post 1974) und seit der Einführung der regelmässigen, künstlichen Hochwasserereignisse (Experimental flood years). Abbildung aus Robinson et al. (2003).

2.4 Charakterisierung der Gewässer

Die Gewässerregime können mittels ihrer Abflussdauerkurve charakterisiert werden. Als typisch für Restwasserstrecken (residual flow) wurde der Abfluss der Saane zwischen Rossens und Hauterive genommen, für den Schwall und Sunk die Saane unterhalb von Hauterive und als natürlicher Abfluss, die Sense (Abb. 6). Dabei ist ersichtlich, dass in der Sense noch Hochwasserabflüsse vorkommen. In der Restwasserstrecke der Saane (Sarine I) herrscht ein konstanter Abfluss, wobei der konzessionsbedingte Unterschied zwischen Sommer und Winterabfluss gut erkennbar ist. Das Schwall und Sunk Regime der Saane (Sarine III) ist charakterisiert durch die Stromproduktion (siehe Abbildung 3). Erste Versuche, die Abflussdauerkurven basierend auf der Differenz der minimalen und maximalen Abflüsse respektive mit den Steigungen der Kurven dimensionslos zu charakterisieren waren nicht zielführend. Deshalb wurden die Flüsse nach „natürliches Regime“, „Swall-Sunk Regime“ und „Restwasser Regime“ unterschieden und zum Vergleich mit dem jährlichen Hochwasser kalibriert.

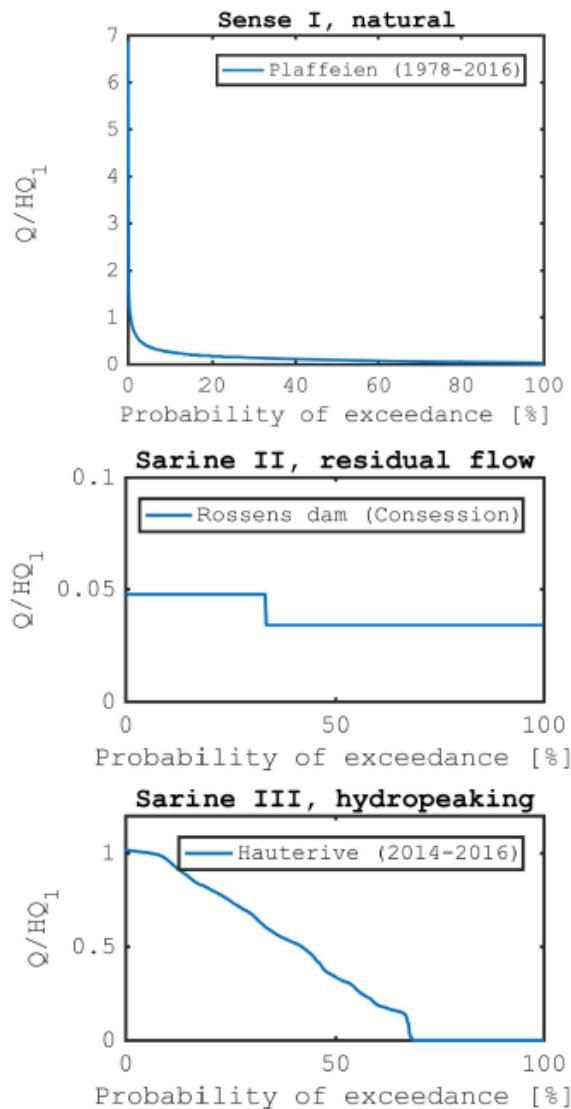


Abbildung 6: Abflussdauerlinien für einen Fluss mit einem natürlichen Abflussregime (Sense I, natural), einer Restwasserstrecke (Sarine II, residual flow) und einem Schwall-Sunk Regime (Sarine III, hydropeaking). Die Abflusswerte Q sind mit einem ein-jährlichen Hochwasserabfluss HQ_1 normiert. Das HQ_1 für die Sense basiert auf den Abflussmessungen der Abflusstation Nr. 2179 des Bundesamts für Umwelt in Thörishaus, jenes der Saane von der Station Nr. 2119 in Fribourg.

3 Vorgehen und Methode

3.1 Künstliche Hochwasser und Geschiebebeigaben

In der Saane wurde im September 2016 ein künstliches Hochwasser von der Staumauer Rossens über einen Zeitraum von etwa 36 Stunden ausgelöst (Döring et al., 2018; Stähly et al., 2019). Der Spitzenabfluss von $195 \text{ m}^3/\text{s}$ wurde während zwei Stunden beibehalten. Das entspricht in etwa einem Hochwasser mit einer Wiederkehrperiode von einem Jahr unter natürlichen Bedingungen vor dem Bau der Staumauer. Am Spül wurden die Auswirkungen des künstlichen Hochwassers vom September

2018 untersucht. Der Spitzenabfluss lag bei rund $26 \text{ m}^3/\text{s}$, was unter natürlichen Bedingungen einer Wiederkehrperiode von weniger als einem Jahr entspricht (HQ_1 ca. $35 \text{ m}^3/\text{s}$).

Insgesamt wurden 1000 m^3 Flussablagerungen aus der bewaldeten Auenebene neben der Saane entnommen und in vier Depots alternierend am linken und rechten Flussufer angeordnet (Abb. 7). Verschiedene Methoden von Geschiebebeigaben wurden vorgängig in einer grossangelegten Laborstudie auf ihre Auswirkungen auf die Geomorphologie in relativ steilen Gewässern (1.5% Sohlengenfälle) untersucht und optimiert (Battisacco et al., 2016; Battisacco, 2016). Laborresultate zeigten, dass die Schüttungen in vier alternierenden Depots (I-IV) zu einer Ablagerung in lokalen Ansammlungen führt, was in der Realität der Bildung von Kiesbänken gleichkommt. Diese erzeugen wertvollem Lebensraum und führen zu einer erhöhten hydraulischen und terrestrischen Habitatdiversität. Der Aushub wurde nicht sortiert, womit die Korngrößenverteilung der Geschiebebeigabe jener der Flusssohle entspricht, mit den charakteristischen Korngrößen $d_m = 57 \text{ mm}$ und $d_{90} = 113 \text{ mm}$. Etwa hälftig für diese beiden Korngrößen, wurden 489 Steine der beiden Korngrößen mit einem Sensor (Radio Frequency Identification - Passive Integrated Transponder RFID-PIT) ausgerüstet. Mittels einer selbstgefertigten mobilen Antenne, konnten die markierten Steine nach dem Durchgang des künstlichen Hochwassers im Flussbett gefunden und ihre Position bestimmt werden (Schneider et al., 2010; Stähly et al., 2019).

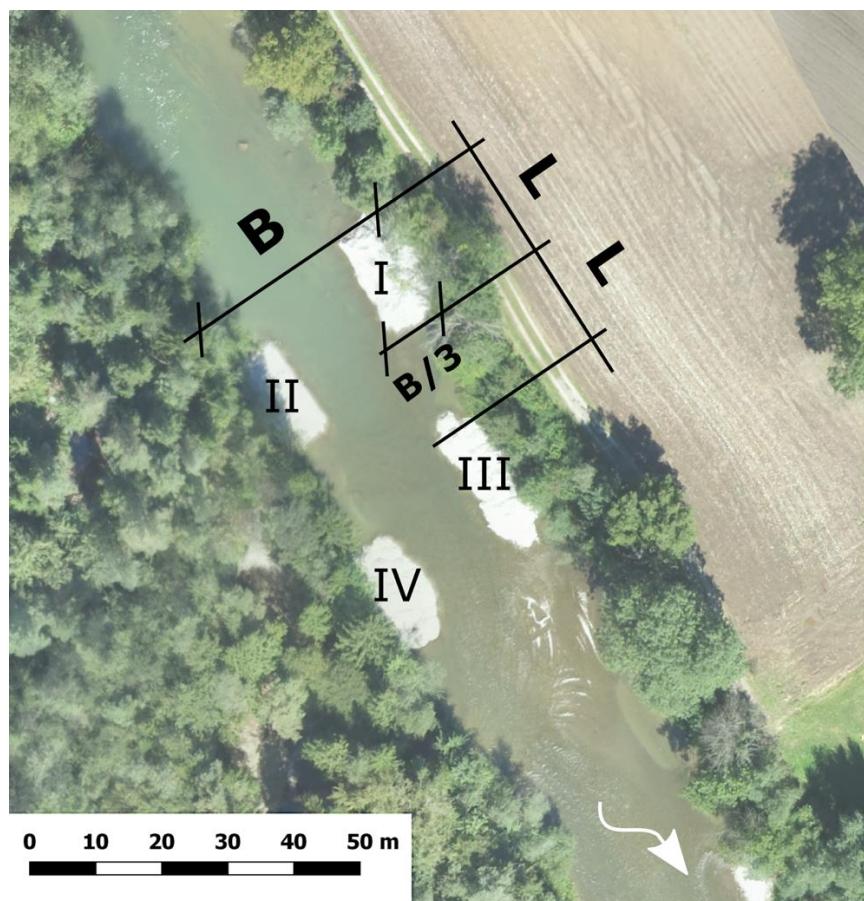


Abbildung 7: Geschiebeschüttungen angeordnet als vier alternierende Bänke (I-IV) entlang der Flussufer. Das Geschiebe wurde von der angrenzenden Flussaue ausgebaggert. Total wurden 1000 m^3 Geschiebe beigegeben, 250 m^3 pro Depot. L: Länge; B: Breite. Quelle Luftbild: Swissimage Geodata © Swisstopo

3.2 Hydro-morphologischer Index der Diversität (HMID)

Der hydro-morphologische Index der Diversität ist ein einfach anzuwendender quantitativer Index zur Beurteilung der hydraulischen Habitatvielfalt in einem Fluss (Gostner et al., 2013; Gostner, 2019; Stähly et al., 2019). Er basiert auf den statistischen Grössen Standardabweichung (σ) und Mittelwert (μ) von Abflusstiefe (h) und Fliessgeschwindigkeit (v) in einem Gewässerabschnitt (siehe Gleichung 1). Alle Messwerte aus einem Flussabschnitt fliessen in die Berechnung des HMID mit ein, welcher normalerweise zwischen 1 und 15 liegt. Ist der Wert unter 5, kann auf eine verarmte Morphologie und somit geringe Habitatvielfalt geschlossen werden. Ist er über 9, befinden sich im betrachteten Gewässer mit naturnaher Morphologie eine grosse Anzahl an verschiedenen hydraulischen Habitaten, z.B. Totarme, Becken und Schnellen.

Die Feldmessungen wurden entlang von 9 (Saane), 10 (Spöl) oder 18 (Sense) Querprofilen durchgeführt. Sowohl die Abstände zwischen den Messpunkten, als auch die Abstände zwischen den Querprofilen waren jeweils konstant. Die Fliessgeschwindigkeit wurde auf 40 % der Abflusstiefe vom Gewässerbett mit einem Flowtracker Hand-ADV von SonTek gemessen (30 s Messzeit bei 1 Hz, bis maximal 4.5 m/s Fliessgeschwindigkeit bei 1 % Messgenauigkeit; Abb. 8). In der Saane und im Spöl wurde entlang derselben Querprofile vor und nach dem künstlichen Hochwasser gemessen.

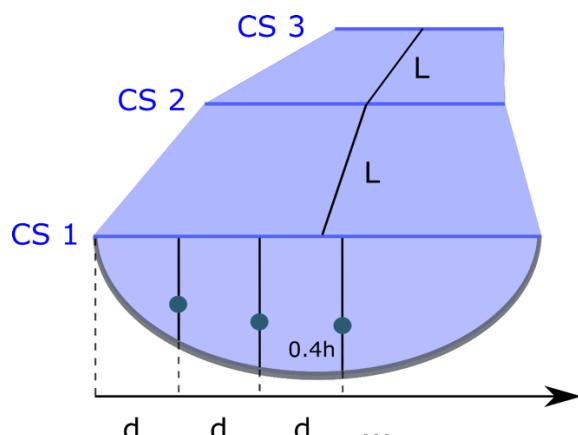


Abbildung 8: Messschema der Abflusstiefen- und Fliessgeschwindigkeitsmessungen. Die Querprofile (CS) haben einen Abstand L entlang der Flussmitte, die Abstände zwischen den Messpunkten im Querprofil beträgt d. An jedem Messpunkt wurde die Fliessgeschwindigkeit auf 40 % der Abflusstiefe vom Gewässerbett gemessen.

3.3 Makroinvertebraten (aquatische Wirbellose)

Sowohl in der Restwasserstrecke als auch im Abschnitt mit Schwall-Sunk in der Saane wurden die Daten zur Beurteilung der Makroinvertebraten während allen vier Jahreszeiten vor dem künstlichen Hochwasser gesammelt (schwarze Kreise in Abb. 2, Tab. 1). Zwei Wochen (Herbst) und zwei Monate (Winter) nach dem künstlichen Hochwasser wurden an denselben Stellen nochmals Makroinvertebraten ermittelt. Gleichzeitig wurde auch an der Sense beprobt um einen Vergleich mit einem natürlichen Fliessgewässer zu gewährleisten. Alle Proben erfolgten quantitativ mittels Hess Sampler und die Bestimmung auf Familienniveau.

Die Zusammensetzung dieser Makroinvertebraten wurde mittels vier Indikatoren ausgewertet: Shannon-Diversitäts-Index (2), Simpson-Diversitäts-Index (3), Taxareichtum (4) und den EPT-Vielfalt (5). EPT steht für Ephemeroptera (Eintagsfliegen), Plecoptera (Steinfliegen) und Trichoptera (Köcherfliegen) und bewertet den Anteil der Anzahl dieser Individuen in der Probe. Der EPT wird als wichtiger



Indikator erachtet, da dieser sehr sensitiv auf die Wasserqualität und Habitatvielfalt reagiert und deshalb Auskunft über den Gesundheitszustand des Flusssystems geben kann. Die beiden Diversitätsindizes weisen darauf hin wie vielfältig ein Lebensraum ist, basierend auf Anzahl Taxa und Gleichverteilung der Individuen.

$$\text{Shannon - Index} = - \left(\sum_{i=1}^S p_i \cdot \ln(p_i) \right) \quad (2)$$

$$\text{mit } p_i = \frac{n_i}{N}$$

$$\text{Simpson - Index} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^S n_i \cdot (n_i - 1)}{N \cdot (N - 1)} \quad (3)$$

$$\text{Taxareichtum} = \frac{S}{\sqrt{N}} \quad (4)$$

$$EPT = \frac{n_{EPT}}{N} \quad (5)$$

wobei:

N = Gesamtanzahl der Individuen

n_{EPT} = Gesamtanzahl der EPT-Individuen

n_i = Zahl der Individuen eines Taxons i

p_i = Individuen einer Taxa im Verhältnis zur gesamten Anzahl Individuen

S = Anzahl Taxa

Die Makroinvertebraten wurden vor dem künstlichen Hochwasser während einem hydrologischen Jahr saisonal beprobt (Herbst 2015, Winter 2016, Frühling 2016, Sommer 2016) und nach dem Hochwasser wiederum in zwei Saisons (Herbst 2016, Winter 2016) erhoben. Vor dem künstlichen Hochwasser wurden im Restwasserabschnitt der Saane insgesamt 10'152, in der Schwall-Sunk Strecke 4'303 und in der benachbarten Sense 3'115 Individuen/m² ausgezählt und auf Familienniveau identifiziert. Das detaillierte Messverfahren und die Ergebnisse sind in Döring et al. (2018) erläutert (siehe Tab. 1). Die Anzahl der Individuen ist im Restwasserabschnitt der Saane dabei etwa drei Mal so hoch, wie in der natürlichen Sense. Die Anzahl Taxa in der Sense ist grösstenteils an das natürliche dynamische hydrologische Regime angepasst, was aus dem hohen Anteil Vertreter der Stein- und Eintagsfliegen ersichtlich ist (Plecoptera und Ephemeroptera, mit 45.5 % bzw. 20.3 % relativer Anteil). Im Restwasserabschnitt der Saane wurden eine Anzahl Taxa gefunden, die hauptsächlich an statische hydrologische Bedingungen angepasst sind. Die Bachflohkrebse zum Beispiel haben einen relativen Anteil von 34.4 % (Amphipoda, fast ausschliesslich Familie Gammaridae; Döring et al., 2018). Steinfliegen sind nur gerade mit einem kleinen Anteil von 0.2 % vertreten. Die kleinsten EPT Individuendichte wurde in der Schwall-Sunk Strecke der Saane gefunden (Tab. 1). Während in der Sense im zweiten Halbjahr 2016 deutlich höhere Individuendichten gefunden wurden, blieb deren Dichte im Restwasserabschnitt der Saane beinahe konstant und nahm in der Schwall-Sunk Strecke ebenfalls deutlich zu. Die starke Zunahme der Individuendichte in der Schwall-Sunk Strecke ist ausschliesslich auf die Gammaridae zurückzuführen (8'551 vor und 19'882 nach dem Hochwasser – bei nur halb soviel Beprobungen!).



Tabelle 1: Rohdaten der Makroinvertebraten-Beprobungen in den drei untersuchten Flussabschnitten. Taxa und Individuendichten sind jeweils allen Hess-Sampler Einzelproben berechnet worden. Die Individuendichten sind in Individuen / m² ausgewiesen (Zahlen aus Döring et al. 2018).

Fluss Abflussregime	Sense natürlich	Saane Restwasser	Saane Schwall/Sunk
VOR künstlichem Hochwasser			
Datum 1	30.10.15	02.11.15	07.11.15
Datum 2	14.01.16	15.01.16	30.01.16
Datum 3	22.06.16	29.06.16	03.07.16
Datum 4	11.08.16	12.08.16	03.08.16
Anzahl Taxa	50	61	46
Individuenzahl	15'138	49'338	20'912
Individuenzahl EPT	10'234	9'657	2'462
Anzahl Individuen	m ⁻²	3'115	10'152
Aanzahl EPT Individuen	m ⁻²	2'106	1'987
NACH künstlichem Hochwasser			
Datum 1	19.09.16	16.09.16	18.09.16
Datum 2	04.11.16	11.11.16	12.11.16
Anzahl Taxa	42	43	39
Individuenzahl	16'481	22'353	31'053
Individuenzahl EPT	12'994	3'561	3'462
Individuendichte	m ⁻²	6'782	9'199
Individuendichte EPT	m ⁻²	5'347	1'465

4 Ergebnisse und Diskussion

4.1 Hydro-morphologischer Index der Diversität (HMID)

4.1.1 Saane

Von den 489 mit RFID PIT Sensoren ausgerüsteten Steinen, wurden nach dem künstlichen Hochwasser 277 gefunden und der Einflussperimeter der Geschiebeschüttungen konnte definiert werden (Abb. 9). Dieser erstreckte sich über ca. 400 m und umfasste drei Querprofile in welchen Aufnahmen für die HMID Berechnung gemacht wurden (CS2-CS4 in Abb. 9). Aus diesem Grund wurde der untersuchte Flussabschnitt unterteilt in eine Strecke welche von der Geschiebeschüttung beeinflusst wurde sowie dem restlichen unbeeinflussten Flussabschnitt. Für beide Abschnitte wurde dann sowohl vor als auch nach dem Hochwasser der HMID berechnet, was in die Werte HMID_{Geschiebe} und HMID_{Fluss} resultierte (Tab. 2).

Die HMID Werte erhöhten sich in der Restwasserstrecke der Saane. Im durch die Geschiebeschüttungen beeinflussten Abschnitt ergab sich eine Zunahme des HMID von 5.6 auf 7.7 also um 36 %. Unterhalb hat er um 18 % zugenommen, resultiert aber in einem höheren absoluten HMID von 10.6. Sowohl die Variation der Abflusstiefe als auch die der Fliessgeschwindigkeit haben sich im Flussabschnitt mit Geschiebebeigaben nach dem künstlichen Hochwasser erhöht. Gleichzeitig haben sich die Mittelwerte verringert. Im restlichen Flussabschnitt haben sich auch die Mittelwerte sowie die Variation verringert (v) oder haben sich nicht verändert (h).

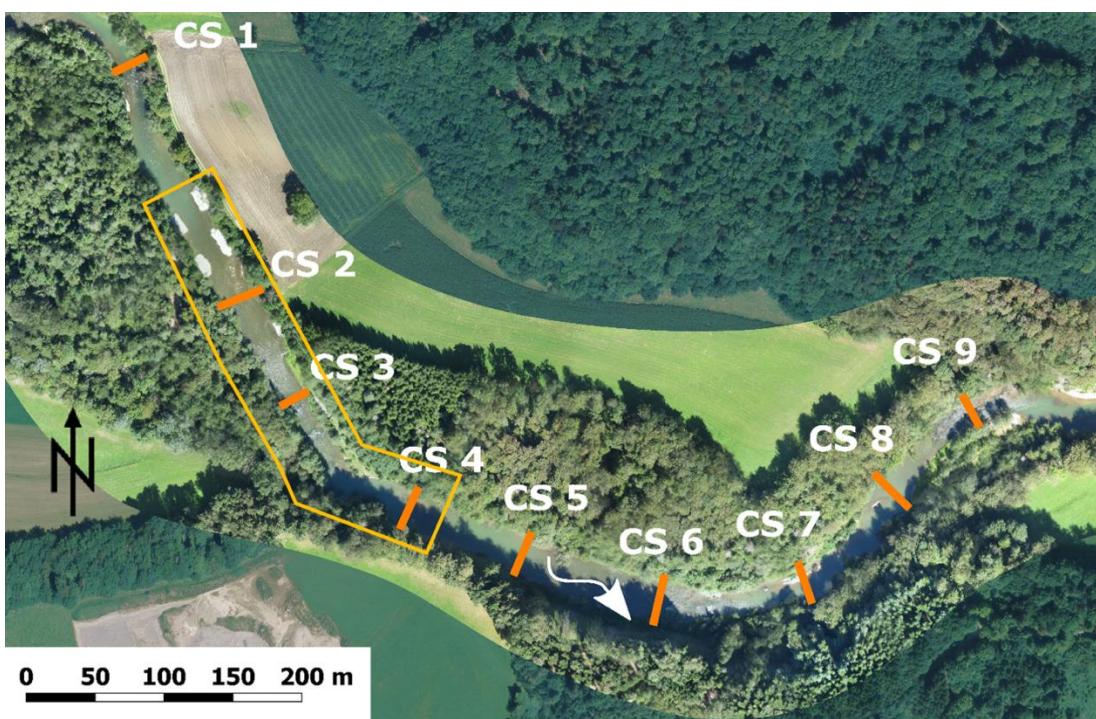


Abbildung 9: Definition des Einflussperimeters der Geschiebeschüttungen (Orange markiertes Gebiet), bestimmt durch die RFID PIT Sensoren. Der Einflussperimeter umfasst drei Querprofile (CS2-CS4), im restlichen Flussabschnitt unterhalb wurde entlang von sechs Querprofilen Daten aufgenommen (CS1 und CS5-CS9). Daraus wurden die zwei HMIDs für beide Abschnitte berechnet (Tab. 2). Quelle Luftbild: Swissimage Geodata © Swisstopo

4.1.2 Spöl

Im Spöl war die Veränderung von kleinerem Ausmass. Im steileren Schluchtabschnitt (Spöl I), nahm der HMID um ca. 11 % ab, während er im unteren Abschnitt (Spöl II), wo der Fluss sich verbreitert und ein verzweigtes Gerinne entsteht, um 9 % erhöhte. Der HMID im oberen Flussabschnitt ist sowohl vor als auch nach dem künstlichen Hochwasser grösser als im unteren. In beiden Spölabschnitten ist keine wirkliche Veränderung der Fliesstiefenvariabilität zu erkennen. Zudem nehmen die Fliessgeschwindigkeitsmittelwerte zu. Wie in der Saane ist ein Unterschied in der Veränderung der Fliessgeschwindigkeitsvariationen zu erkennen. Im Spölabschnitt I nimmt sie ab und im Spölabschnitt II zu. Wie bei der Saane ist die Geschiebezufluss ein Hauptunterschied zwischen den beiden Flussabschnitten.



Tabelle 2: Auswertungen der hydraulischen Habitate im Restwasserabschnitt der Saane und im Spöl. Die Daten aus dem Abschnitt Saane mit Restwasser wurden in zwei Gruppen aufgeteilt, der HMID_{Geschiebe} beinhaltet alles Messwerte, welche im Einflussperimeter der Geschiebeschüttungen lagen; HMID_{Fluss} diejenigen im Flussabschnitt unterhalb. h = Fließtiefe, v = Fließgeschwindigkeit, μ = Mittelwert, σ = Standardabweichung.

		HMID _{Geschiebe}		HMID _{Fluss}	
		Vor	Nach	Vor	Nach
Saane Restwasser					
Messungen	[-]	71	58	136	134
μ_h	[m]	0.40	0.38	0.55	0.49
σ_h	[m]	0.18	0.23	0.33	0.34
μ_v	[m/s]	0.45	0.42	0.42	0.38
σ_v	[m/s]	0.28	0.31	0.37	0.35
HMID	[-]	5.6	7.7	9	10.6
Veränderung	[%]		+36 %		+18 %
Spöl I					
Messungen	[-]		90	107	
μ_h	[m]		0.25	0.21	
σ_h	[m]		0.15	0.13	
μ_v	[m/s]		0.50	0.52	
σ_v	[m/s]		0.34	0.30	
HMID	[-]		7.2	6.4	
Veränderung	[%]				-11 %
Spöl II					
Messungen	[-]		90	104	
μ_h	[m]		0.25	0.20	
σ_h	[m]		0.12	0.11	
μ_v	[m/s]		0.74	0.78	
σ_v	[m/s]		0.40	0.43	
HMID	[-]		5.3	5.7	
Veränderung	[%]				+9 %

4.2 Makroinvertebraten

Die Sense, mit dem natürlichen Abflussregime, hat sowohl den höchsten HMID Wert, als auch den deutlich höchsten Wert bei der Artenvielfalt und der EPT-Vielfalt (Tab. 3). Die Diversitätsindizes hingegen sind in der Restwasserstrecke der Saane in etwa gleich hoch. Das ist anhand der schwarzen Pfeile in Abbildung 10 gut ersichtlich. Vergleicht man die vier ausgewerteten Indizes, schneidet die Sense mit einem natürlichen Abflussregime und verzweigten Gerinne generell am besten ab, gefolgt von der Restwasserstrecke der Saane und der Schwall und Sunk Strecke der Saane, beide mit einer mäandrierenden Morphologie.



Tabelle 3: Auswertungen der ökologischen Habitate in der Saane und der Sense vor und nach dem künstlichen Hochwasser. * Die HMID Daten im Saaneabschnitt mit Schwall-Sunk wurden nur einmal gemessen und dies vor dem Hochwasser. Für Abb. 10 wurden diese Werte um 18 % erhöht. **Es handelt sich um einen anderen Abschnitt als jener, der mit dem Spöl verglichen wurde (beim Kloster in Houterive), wo sich ein HMID von 8 ergab.

Fluss Abflussregime	Sense Natürlich	Saane Restwasser	Saane Schwall- Sunk
HMID VOR künstlichem Hochwasser	10.3	8.00**	6.11*
Ökologische Resultate VOR künstlichem Hochwasser			
Shannon-Diversitätsindex	2.10	2.18	1.80
Simpson-Diversitätsindex	0.82	0.82	0.75
Artenvielfalt	0.41	0.27	0.32
EPT-Vielfalt	0.68	0.20	0.12
Ökologische Resultate NACH künstlichem Hochwasser			
Shannon-Diversitätsindex	2.18	1.44	1.30
Simpson-Diversitätsindex	0.81	0.54	0.56
Artenvielfalt	0.33	0.29	0.22
EPT-Vielfalt	0.79	0.16	0.11

Die beiden Diversitätsindizes verringerten sich durch das Hochwasser in beiden untersuchten Strecken der Saane deutlich (graue Pfeile in Abb. 10, Tab. 3). Die EPT-Vielfalt nahm in beiden untersuchten Gewässerabschnitten der Saane leicht ab. Die Artenvielfalt hingegen erhöhte sich in der Restwassertrecke leicht und reduzierte sich in der Schwall-Sunk Strecke deutlich. Gleichfalls verringerten sie sich auch in der Sense deutlich (Abb. 10, Tab. 3). Dies ist höchstwahrscheinlich auf den Unterschied der Jahreszeiten der Beprobungen zurückzuführen. Der EPT Wert der Sense steigerte sich in derselben Zeit um 16 %, die Anzahl gezählter Individuen, sowie die Diversitätsindizes blieben praktisch konstant. In den beiden untersuchten Abschnitten der Saane nahmen sie über den gleichen Zeitraum jedoch deutlich ab (graue Pfeile in Abb. 10). Der HMID erhöhte sich der Saane in derselben Zeit um 18 %.

5 Schlussfolgerungen

Die natürlich verbliebene Sense ist ein Zufluss der durch Wasserkraft beeinträchtigten Saane, die ein angrenzendes Einzugsgebiet entwässert. Ein Vergleich der beiden Flüsse ist deshalb zulässig, weil sie in derselben Höhenregion liegen, mit einem ähnlichen lokalen Klima, welches das natürliche Abflussregime und die lokale Ökologie bestimmt. Die EPT Vielfalt scheint ein geeigneter ökologischer Indikator zu sein, auch wenn die Bestimmungstiefe auf der Familie und nicht der Art lag. Er korreliert sowohl mit dem HMID als auch dem Abflussregime. Daraus bestätigt sich wie erwartet, dass ein unbeeinträchtigter Fluss wie die Sense mit einem natürlichen dynamischen Abflussregime, eine hohe hydro-morphologische Vielfalt und den höchsten EPT Anteil aufweist. Selbst in einer natürlichen mäandrierenden Morphologie reduzieren das Restwasserregime und insbesondere das Schwall und Sunk Regime diese Werte erheblich und führen zu einer – verglichen mit den anderen Abschnitten – verarmten hydro-morphologischen und EPT Vielfalt.

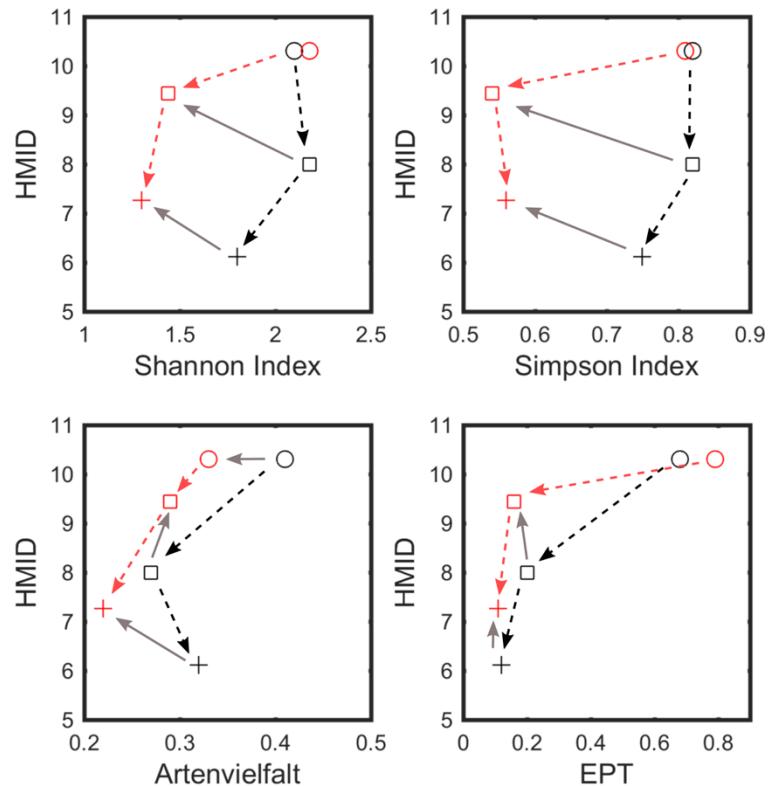


Abbildung 10: Vergleich der Veränderungen der vier Makroinvertebraten-Indikatoren mit dem HMIID für die drei unterschiedlichen Abflussregime. ○ = Sense (natürliches Regime), □ = Saane (Restwasserregime), + = Saane (Schwall-Sunk Regime). Die schwarzen Symbole entsprechen den Messungen vor dem Hochwasser, die roten danach. Die Symbole sind mit Pfeilen und gestrichelten Linien mit abnehmendem HMIID Werte miteinander verbunden. Die Veränderungen der drei Flüsse vor und nach dem Hochwasser sind mit grauen Pfeilen hervorgehoben. Die HMIID Werte im Restwasserabschnitt der Saane haben sich durch das künstliche Hochwasser um 18 % erhöht (Tab.2).

Die Veränderungen von Anzahl und Zusammensetzung der Makroinvertebraten durch das künstliche Hochwasser waren im Restwasserabschnitt deutlich ausgeprägter als in der Strecke mit Schwall und Sunk (Tab. 1). Dies kann damit begründet werden, dass die Organismen durch Schwall und Sunk starken, täglichen Abfluss- und Pegelschwankungen ausgesetzt sind und somit etwas angepasster sein könnten. Natürliche Hochwasser durch die Seitenzuflüsse Gérine und Glâne fördern diesen Effekt zusätzlich. Außerdem liegt die Schwall-Sunk Strecke ca. 13 km flussabwärts, unterhalb der Restwasserstrecke, so dass das künstliche Hochwasser durch die Retentionseffekte im Gewässerraum abgeschwächt wurde. Wie bereits erwähnt, wurden in der Restwasserstrecke der Saane hauptsächlich *Gammaridae* vorgefunden, welche beim künstlichen Hochwasser ausgeschwemmt wurden (Döring et al., 2018). Ähnliche Studien am Spöl haben gezeigt, dass die Anzahl Makroinvertebraten und deren Diversitätsindizes in Restwasserstrecken nach künstlichen Hochwasser kurzfristig zurückgehen, sich jedoch zwischen den jeweiligen künstlichen Hochwassern wieder erholen (Robinson et al., 2018). Mit wiederkehrenden künstlichen Hochwasserereignissen könnte die Zusammensetzung der vorkommenden Makroinvertebraten somit positiv beeinflusst werden. Seit dem ersten künstlichen Hochwasser 2016 in der Saane wurde jedoch bis heute kein zweites ausgelöst. Auswirkungen werden seit 2017 in Rahmen eines Monitoringprogrammes der Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften (ZHAW) untersucht.



Ein Vergleich mit dem Spöl betreffend geomorphologischen Veränderungen zeigt, dass ein erstes künstliches Hochwasser grosse Auswirkungen auf die hydro-morphologische Vielfalt eines Flusses mit einem Restwasserregime hat. Dabei darf das Geschiebeaufkommen auf keinen Fall begrenzend sein, da somit auch das Risiko einer Verarmung der Habitatdiversität durch Tiefenerosion entsteht. Bei wiederkehrenden künstlichen Hochwassern, ist es gut möglich, dass sich der Fluss auf einem neuen stark verbesserten Zustand einpendelt und sich der HMID durch ein weiteres künstliches Hochwasser nicht mehr wesentlich verändert (siehe Spöl). Die geringeren Veränderungen des Spöls sind zusätzlich durch die kleinere Jährlichkeit der künstlichen Hochwasserspitze begründet. Die ermittelten Veränderungen von -11 % und +9 % sollten jedoch mit Vorsicht interpretiert werden, da die Messgenauigkeit im seichten Wasser (weniger als 20 cm) bei etwa 10 % liegt (Korngrösse vs. Fliesstiefe). Trotzdem zeigt die Tendenz klar die Notwendigkeit von ausreichendem Geschiebevorkommen, denn im Gegensatz zum oberen, wird der untere Abschnitt des Spöls vom Ova da Cluozza mit Geschiebe versorgt. Deshalb dürfen Geschiebebeigaben bei Flussaufwertungsmassnahmen nicht vernachlässigt werden.

6 Praxisempfehlungen

Das untersuchte Konzept von künstlichen Hochwassern und nach Möglichkeit kombiniert mit Geschiebeschüttungen kann zur Aufwertung von Restwasserstrecken unterhalb von Stauanlagen in den Alpen und Voralpen erfolgreich angewendet werden. Entscheidend sind dabei die Wiederkehrperiode, die Dauer und die Abflussspitze der künstlichen Hochwasser. Um einen dynamischen Fluss und eine intakte Flussaue bestmöglich zu erhalten, sollte sich die Frequenz von Hochwassern an den lokalen Pionierpflanzen orientieren. Ein öko-morphologisch wirksames Hochwasser sollte dabei eine Jährlichkeit von etwa 2 bis 5 Jahren aufweisen damit Pionierpflanzen, wie die Deutsche Tamariske, eine typische Pionierpflanze der Sense, die viel Licht brauchen, nicht verdrängt werden (Gostner et al., 2017). Bei solchen Hochwassern werden Veränderungen im Flussbett jedoch nicht am Flusslauf erwartet, was in von Menschen genutzten Gebieten wegen den Uferbefestigungen meist eine Randbedingung darstellt. Für Veränderungen des Flusslaufs ohne Ufersicherungen wären etwa Hochwasserspitzen mit einer Wiederkehrperiode von 10 Jahren oder mehr nötig. Sobald sich bereits ein widerstandsfähiger Wald entwickeln hat, wie es an der Saane unterhalb der Staumauer Rossens der Fall ist, müssen Bäume und Wurzelstöcke in der vormaligen Aue vor dem künstlichen Hochwasser mechanisch entfernt werden, um die Erosion zu begünstigen, sofern man die seitliche Flussdynamik wieder vergrössern möchte. Dabei gilt es zu beachten, dass die Transportkapazität des Hochwassers und das Sedimentvorkommen im Fluss in etwa gleich sein sollten, ansonsten sinkt die Flussohle eintieft und die geomorphologische Variabilität verarmt. Mit Geschiebeschüttungen kann dem allenfalls begegnet werden.

Wenn immer möglich, sollte das künstliche Hochwasser dann ausgelöst werden, wenn ein natürliches Hochwasser in den Stausee fliesst. Mit Öffnen der Tiefauslässe könnten dabei auch Trübströme durchgeleitet werden. Dies reduziert nicht nur die Verlandung des Stausees, sondern reichert das künstliche Hochwasser mit Feinsedimenten an, welche einen wertvollen Nährstoffeintrag in die Auen bewirken können. Beim Durchleiten von Trübeströmen ergeben sich normalerweise Feinsedimentkonzentrationen, welche denjenigen eines natürlichen Hochwassers entsprechen oder diese nur unwe sentlich übersteigen. Somit kann eine Win-win-Situation zwischen Erhalt des Stauseevolumens und der Nachhaltigkeit der Flussauen unterhalb erreicht werden. Es muss jedoch vorgängig abgeklärt werden, ob die Sedimente im Stauraum nicht kontaminiert sind.



7 Publikationen zum Forschungsprojekt

Publikationen

- Döring M., Tonolla D., Robinson C.T., Schleiss A.J., Stähly, S., Gufler, C., Geilhausen M. & Di Cugno, N. (2018). Künstliches Hochwasser an der Saane - Eine Massnahme zum nachhaltigen Auenmanagement. *Wasser Energie Luft*, Vol. 110, pp. 119-127.
- Stähly, S., Franca, M. J., Robinson, C. T., & Schleiss, A. J. (2019). Sediment replenishment combined with an artificial flood improves river habitats downstream of a dam. *Scientific Reports*, 9(1), 5176. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-41575-6>
- Stähly, S., Gostner, W., Franca, M. J., Robinson, C. T., & Schleiss, A. J. (2019). Sampling sufficiency for determining hydraulic habitat diversity. *Journal of Ecohydraulics*. <https://doi.org/10.1080/24705357.2019.1576021>

Konferenzbeiträge

- Stähly S., Gostner W., Franca M.J., Robinson C. T. & Schleiss, A.J. (2018). ANALYSIS OF THE SENSITIVITY OF THE HYDROMORPHOLOGICAL INDEX OF DIVERSITY, HMID. In *Proceedings of the 8th International Symposium on Environmental Hydraulics* (ISEH 2018), pp. 95-98, 4.-8. Juni 2018, Notre Dame, Vereinigte Staaten.
- Stähly S., Maître A., Franca M.J., Robinson C.T. & Schleiss A.J. (2018). Experiments with sediment replenishment in a residual flow reach: Comparison of field data with laboratory experiments. In *E3S Web of Conferences*, Vol. 40, 5.-8. September 2018, Lyon, Frankreich. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20184002022>.
- Stähly S., Robinson C.T. & Schleiss A.J. (2018). Aufwertung der Habitatvielfalt in einer Restwasserstrecke mittels eines künstlichen Hochwassers und Geschiebebeigaben - Vergleich von Feldversuchen mit Laborexperimenten, In *Proceedings 19. Wasserbausymposium*, 18.-20. September 2018, Graz, Österreich.
- Stähly, S., Franca, M. J., Robinson, C. T., & Schleiss, A. J. (2019). Erosion Processes of a Novel Configuration of Sediment Replenishment During an Artificial Flood. In *Proceedings of the 38th IAHR World Congress*, pp. 6394-6402, 1.-6. September 2019, Panama Stadt, Panama. doi: [10.3850/38WC092019-0848](https://doi.org/10.3850/38WC092019-0848)
- Stähly, S. (2019). Artificial Floods in Residual Flow Reaches – How do they Affect Hydraulic Habitats? In *Proceedings of the 38th IAHR World Congress*, pp. 4012-4030, 1.-6. September 2019, Panama Stadt, Panama. doi: [10.3850/38WC092019-0848](https://doi.org/10.3850/38WC092019-0848)

Poster

- Stähly S., Franca M.J., Robinson C.T. & Schleiss A.J. (2018). Event analysis of an artificial flood combined with sediment replenishment in a residual flow reach in a Swiss river using RFID PIT tags. In *EGU General Assembly Conference Abstracts*, Vol. 20, p. 7008, 7.-12. April 2018, Wien, Österreich. DOI: [10.13140/RG.2.2.36711.96166](https://doi.org/10.13140/RG.2.2.36711.96166).
- Stähly S., Maître A., Franca M.J., Robinson C.T. & Schleiss A.J. (2018). Experiments with sediment replenishment in a residual flow reach: Comparison of field data with laboratory experiments. In *E3S Web of Conferences*, Vol. 40, 5.-8. September 2018, Lyon, Frankreich. DOI: [10.1051/e3sconf/20184002023](https://doi.org/10.1051/e3sconf/20184002023).
- Stähly S., Franca M.J., Robinson C.T. & Schleiss A.J. (2018). Increase of habitat diversity due to an artificial flood and sediment replenishment in a residual flow reach. In *PhD Symposium 'Nature for Water'*, 1.-2. Oktober 2018, Delft, Niederlande. DOI: [10.13140/RG.2.2.17404.80002](https://doi.org/10.13140/RG.2.2.17404.80002).



Stähly S., Maître A., Robinson C.T. & Schleiss A.J. (2018). Künstliches Hochwasser und Geschiebebeschüttungen in der Saane. *SCCER-SoE Science Report 2018*, Task 2.3, p. 91, 28. September 2018, Zürich, Schweiz. DOI: 10.13140/RG.2.2.23494.73284.

Vorträge

Data sufficiency analysis for computing the hydro-morphological index of diversity (HMID), EcoMeetIng, 22. Februar 2018, Bozen, Italien.

Analysis of the Sensitivity of the Hydro-morphological Index of Diversity (HMID), 8th International Symposium on Environmental Hydraulics, 4. Juni 2018, Notre Dame, USA.

Sediment replenishment at the Sarine river, 4th SCCER-SoE Annual Conference, 14 September 2018, Horw, Schweiz.

How a combination of sediment replenishment and environmental flow can restore habitat diversity in the Sarine River in western Switzerland, IHE Delft mini-Symposium on Environmental Flows, 12. November 2018, Delft, Niederlande.

Geschiebebeigaben und ein künstliches Hochwasser zur Aufwertung der Habitatvielfalt in einer Restwasserstrecke, EcoMeetIng, 22. Februar 2019, Stuttgart, Deutschland.

8 Literaturverzeichnis

Allan, J. D., & Castillo, M. M. (2007). Stream ecology: Structure and function of running waters: Second edition. *Stream Ecology: Structure and Function of Running Waters: Second Edition*. Dordrecht, The Netherlands: Springer. <https://doi.org/10.1007-978-1-4020-5583-6>

Battisacco, E. (2016). Replenishment of sediment downstream of dams: erosion and transport processes. EPFL Ph.D Thesis No. 7293 and Communication 67 of Laboratory of Hydraulic Constructions (Ed. A. Schleiss), Ecole polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL). Lausanne. <https://doi.org/10.5075/epfl-thesis-7239>

Battisacco, E., Franca, M. J., & Schleiss, A. J. (2016). Sediment replenishment: Influence of the geometrical configuration on the morphological evolution of channel-bed. *Water Resources Research*, 52(11), 8879–8894. <https://doi.org/10.1002/2016WR019157>

Döring, M., Tonolla, D., Robinson, C. T., Schleiss, A. J., Stähly, S., Gufler, C., Geilhausen, M., Di Cugno, N. (2018). Künstliches Hochwasser an der Saane – Eine Massnahme zum nachhaltigen Auenmanagement. *Wasser Energie Luft*, 2, 119–127.

Gostner, W. (2019). Über die Beurteilung der Fliessgewässerlebensräume mittels quantitativer Indizes. *Korrespondenz Wasserwirtschaft*, 12(8), 452-457.

Gostner, W., Paternolli, M., Schleiss, A. J., Scheidegger, C., & Werth, S. (2017). Gravel bar inundation frequency: an important parameter for understanding riparian corridor dynamics. *Aquatic Sciences*, 79(4), 825-839.

Gostner, W., Alp, M., Schleiss, A. J., & Robinson, C. T. (2013). The hydro-morphological index of diversity: A tool for describing habitat heterogeneity in river engineering projects. *Hydrobiologia*, 712(1), 43–60. <https://doi.org/10.1007/s10750-012-1288-5>

Moyle, P. B., & Mount, J. F. (2007). Homogenous rivers, homogenous faunas. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104(14), 5711-5712.



- Poff, N. L., Allan, J. D., Bain, M. B., Karr, J. R., Prestegaard, K. L., Richter, B. D., Sparks, R. E., Stromberg, J. C. (1997). The Natural Flow Regime. *BioScience*, 47(11), 769–784. <https://doi.org/10.2307/1313099>
- Robinson, C. T., Uehlinger, U., & Monaghan, M. T. (2003). Effects of a multi-year experimental flood regime on macroinvertebrates downstream of a reservoir. *Aquatic Sciences*, 65(3), 210-222.
- Robinson, C. T. (2012). Long-term changes in community assembly, resistance, and resilience following experimental floods. *Ecological Applications : A Publication of the Ecological Society of America*, 22(7), 1949–1961. <https://doi.org/10.1890/11-1042.1>
- Robinson, C. T., Siebers, A. R., & Ortlepp, J. (2018). Long-term ecological responses of the River Spöl to experimental floods. *Freshwater Science*, 433–447. <https://doi.org/10.1086/699481>
- Rust-Dubié, C., Schneider, K., & Walter, T. (2006). *Fauna der Schweizer Alpen*. Bern, Switzerland: Haupt Verlag AG.
- Schleiss, A. (2016). Talsperren und Speicher als lebenswichtige Infrastrukturanlagen für den weltweiten Wohlstand. *WasserWirtschaft*, 106(6), 12–15.
- Schneider, J., Hegglin, R., Meier, S., Turowski, J. M., Nitsche, M., & Rickenmann, D. (2010). Studying sediment transport in mountain rivers by mobile and stationary RFID antennas. *River Flow*, 1723–1730. Retrieved from <http://www.wsl.ch/wsl/info/mitarbeitende/turowski/pdf/10748.pdf%5Cnpapers3://publication/uuid/51383AF6-AB28-4756-A250-BDB40F9E15D0>
- Stähly, S., Franca, M. J., Robinson, C. T., & Schleiss, A. J. (2019). Sediment replenishment combined with an artificial flood improves river habitats downstream of a dam. *Scientific Reports*, 9(1), 5176. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-41575-6>
- Stähly, S., Gostner, W., Franca, M. J., Robinson, C. T., & Schleiss, A. J. (2019). Sampling sufficiency for determining hydraulic habitat diversity. *Journal of Ecohydraulics*, 3(2), 130-144. <https://doi.org/10.1080/24705357.2019.1576021>
- Stähly, S., Maître, A., Franca, M. J., Robinson, C. T., & Schleiss, A. J. (2018). Experiments with sediment replenishment in a residual flow reach: Comparison of field data with laboratory experiments. In A. Paquier & N. Rivière (Eds.), *9th International Conference on Fluvial Hydraulics River Flow 2018* (Vol. 40, p. 2022). <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20184002022>
- Wohl, E., Bledsoe, B. P., Jacobson, R. B., Poff, N. L., Rathburn, S. L., Walters, D. M., & Wilcox, A. C. (2015). The natural sediment regime in rivers: Broadening the foundation for ecosystem management. *BioScience*. <https://doi.org/10.1093/biosci/biv002>