

Zeitschrift: Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria
Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband
Band: 113 (2021)
Heft: 1

Artikel: Die Schwall-Sunk-Sanierung der Hasliaare : erste Erfahrungen nach Inbetriebnahme und ökologische Wirkungskontrolle
Autor: Schweizer, Steffen / Lundsgaard-Hansen, Lucie / Meyer, Matthias
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-966173>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 11.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Die Schwall-Sunk-Sanierung der Hasliaare

Erste Erfahrungen nach Inbetriebnahme und ökologische Wirkungskontrolle

Steffen Schweizer, Lucie Lundsgaard-Hansen, Matthias Meyer, Sandro Schläppi, Benjamin Berger, Jan Baumgartner, Rafael Greter, Peter Büsser, Martin Flück, Kathrin Schwendemann

Zusammenfassung

Die Kraftwerke Oberhasli AG (KWO) betreiben 13 Kraftwerke im Grimsel- und Susten-gebiet mit einer jährlichen Stromproduktion von rund 2400 GWh/a. Die Wasserrückgabe in die Hasliaare erfolgt in Innertkirchen und verursacht auf einer Länge von rund 16 km künstliche Abflussschwankungen (Schwall-Sunk). Im Rahmen des Investitionsprogramms KWO plus wurden als Massnahmen zur Sanierung von Schwall-Sunk ein Speicherstollen, ein Beruhigungsbecken sowie Instream-Massnahmen in der Schwallstrecke festgelegt und zwischen 2013 und 2016 umgesetzt. Die Definition der Sanierungsmassnahmen und der ökologischen Ziele basierte dabei auf einer äusserst umfassenden ökologischen Defizit- und Ursachenanalyse. Während der Inbetriebnahme zeigte sich, dass beim Ausgleichsbecken noch verschiedene technische Anpassungen zur Optimierung der Steuerung nötig gewesen sind. Um die Zielerreichung der Massnahmen zu prüfen, wird eine Wirkungskontrolle eins, drei, fünf und zehn Jahre nach Abschluss der Massnahme durchgeführt. Die erste Wirkungskontrolle wurde zwischen 2016 und 2018 durchgeführt. Dabei konnte eine deutliche Verbesserung der gewässerökologischen Situation, insbesondere bei der Verdriftung und der Biomasse von Wirbellosen sowie bei der Produktivität von Fischen, festgestellt werden. Bis auf die Reduktion des Strandungsrisikos konnten alle ökologischen Zielvorgaben hinsichtlich Fische, Makrozoobenthos, Kolmation und Wassertemperatur erreicht oder teilweise übertroffen werden. Gemäss Einschätzung der Zentralen Leitstelle der KWO werden die mittlerweile umgesetzten Steuerungsoptimierungen dazu führen, dass künftig auch die Vorgaben hinsichtlich Pegelrückgangsraten eingehalten werden können. Im Abschnitt, in welchem zusätzlich zur Schwall-Sunk-Dämpfung noch Instream-Massnahmen erfolgten, konnten ähnliche Bestandsdichten von jungen Forellen wie in der hydrologisch naturnahen Lütschine nachgewiesen werden. Diese erfreuliche Entwicklung ist einerseits auf die Bildung von Jungfischhabitaten bei Sunk- und vor allem auch bei Schwallabfluss zurückzuführen. Andererseits führen die gedämpften Abflussänderungsraten zu längeren Reaktionszeiten, die die juvenilen Fische für den Habitatswechsel zwischen tiefem und hohem Abfluss nützen können.

(Schweizer et al., 2012a). Damit verbunden sind eine Leistungssteigerung von 240 MW sowie eine Erhöhung der Stromproduktion um 70 GWh/a mit der gleichen gesamthaft genutzten Wassermenge wie vor dem Kraftwerksausbau. Die Steigerung der Stromproduktion wird dabei mit dem Bau einer zusätzlichen Druckleitung und einer damit verbundenen Minimierung der Reibungsverluste erzielt. Grundsätzlich bewirkt die Erhöhung der Ausbauwassermenge von 70 auf 95 m³/s (Kraftwerke Innertkirchen 1 und 2) ohne entgegenwirkende Dämpfungsmassnahmen eine Vergrösserung der ökologischen Beeinträchtigungen durch Schwall und Sunk. Im Rahmen dieses Ausbauprojekts mussten daher Massnahmen zur Reduktion der Beeinträchtigungen durch Schwall-Sunk gemäss dem revidierten Gewässerschutzgesetz von 2011 umgesetzt werden.

1.2 Schwall-Sunk-Sanierungsmassnahme

Seit 2008 wurden die ökologischen Aspekte des Ausbauprojekts mit einem intensiven Untersuchungsprogramm analysiert und im Begleitprozess zu KWO plus mit Fachspezialisten, Amtsvertretern sowie Umweltschutzverbänden detailliert besprochen (Baumann, 2009; Baumann, 2010; Person, 2013; Person et al., 2013; Schweizer et al., 2012a; Schweizer et al., 2013b).

Auf Basis dieser Untersuchungen sowie der damals zur Verfügung stehenden Methodik (Vollzugshilfe «Schwall Sunk – Strategische Planung»; Baumann et al., 2012) erfolgten eine Defizit- und Ursachenanalyse sowie das daran anschliessende Variantenstudium (Baumann et al., 2012; Schweizer et al., 2013a; Schweizer et al., 2013c; Schweizer et al., 2016b). Als Massnahme zur Minderung der ökologischen Beeinträchtigungen des künstlichen Abflussregimes wurde die Errichtung eines 80 000 m³ fassenden Speichervolumens zwischen Turbinenausfluss und Wasserrückgabe festgelegt. Die Realisierung erfolgte in einer Kombination aus Speicher-

1. Einleitung

1.1 Situation

Die Kraftwerke Oberhasli AG (KWO) nutzt verschiedene Zuflüsse im Grimsel- und Sustengebiet für eine bedarfsgerechte Stromproduktion von jährlich 2400 GWh/a. Das zur Erzeugung elektrischer Energie genutzte Wasser wird in Innertkirchen in die Hasliaare zurückgegeben und führt dort zu künstlichen Abflussschwankungen. Die Schwallstrecke in der Hasliaare umfasst eine rund 0,7 km lange Gewässerstrecke mit Buhnen, rund die Hälfte dieses Abschnitts wurde mit sog. Instream-Massnahmen im Jahr 2015 morphologisch auf-

gewertet (Kap. 1.3 und Bild 1). Daran anschliessend fliesst die Hasliaare durch die Aareschlucht (1,9 km) und durch die Kiesbankstrecke in Meiringen (1,4 km). Bevor die Hasliaare in den Brienzersee mündet, durchfliesst sie einen 11,5 km langen und stark kanalisierten Abschnitt (Schweizer et al., 2016b).

Seit Beginn des neuen Jahrtausends verfolgt die Kraftwerke Oberhasli AG das Investitionsprogramm KWO plus. Teil dieses Ausbauprojekts ist das Projekt «Tandem», bei dem die Ausbauwassermengen der Kraftwerksstufen Räterichsboden-Handeck und Handeck-Innertkirchen um jeweils 25 m³/s erhöht wurden

stollen (60 000 m³) und einem Rückhaltebecken (20 000 m³). Mit dieser Massnahme kann die Geschwindigkeit der künstlichen Abflussänderungen stark reduziert werden. Damit verbleibt den aquatischen Organismen eine deutlich längere Zeitspanne, um sich auf die neuen hydraulischen Bedingungen im Gewässer einstellen zu können.

Mit diesem Speichervolumen sollen folgende hydrologische Zielwerte im Winter erreicht werden:

- Schwallrate $< 0,7 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ min}^{-1}$ (95%-Perzentil der täglich maximal auftretenden Anstiegsraten)
- Sunkrate (bei Aareabfluss $< 8,1 \text{ m}^3/\text{s}$) $> -0,14 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ min}^{-1}$ (5%-Perzentil der täglich extremsten Rückgangsraten)

Als weitere Randbedingung soll das 5%-Perzentil des Sunkabflusses in der Aare bei mindestens $3 \text{ m}^3/\text{s}$ liegen.

Mit der Einhaltung dieser Zielwerte soll einerseits das Strandungsrisiko für Fische erheblich reduziert werden. Andererseits soll die Verdriftung von Wirbellosen damit deutlich gesenkt werden und die dauerbenetzte Fläche bei Sunkabfluss sollte den natürlichen Niedrigwasserbedingungen entsprechen (natürliches $Q_{347} = 2,4 \text{ m}^3/\text{s}$). Für die finanziellen Aufwände der Sanierungsmassnahme wurde ein Kostenteiler auf Basis der erwarteten ökologischen Wirkungen definiert. Der Anteil für den Kraftwerksausbau wurde der KWO zugewiesen (33 Prozent), während die Sanierung des Zustands vor Kraftwerkserweiterung auf den Netzzuschlagsfond (67 Prozent) fiel.

1.3 Instream-Massnahmen in der Musterstrecke

Neben den Massnahmen zur Verbesserung der hydrologischen Verhältnisse wurden

in der Schwallstrecke oberhalb der Aareschlucht auch morphologische Massnahmen auf einer Länge von 300 m im Gewässer (sog. Instream-Massnahmen) umgesetzt. Die Umsetzung dieser morphologischen Aufwertung erfolgte als Ersatz für den harten Uferverbau im Bereich des Beruhigungsbeckens und der Einmündung des Gadmerwassers (*Schwellenkorporation Innertkirchenn 2017*). Dieser Gewässerabschnitt wird nachfolgend als Musterstrecke bezeichnet.

Dabei kamen Belebtsteingruppen, Hakenbuhnen, Raubbäume, Wurzelstöcke und Holzverbauungen zum Einsatz (*Bild 1*). Bei der Planung dieser Instream-Massnahmen wurden die Abflusssituationen bei Sunk- und Schwall-Abfluss sowie die Hochwassersicherheit berücksichtigt. Diese Aspekte wurden von der Fachhochschule Rapperswil im Rahmen von physikalischen Modellversuchen untersucht (*Speerli und Schneider, 2013*). Im Winter 2014/15 erfolgte die Umsetzung der Massnahmen, daran anschliessend wurden mehrere Wirkungskontrollen durchgeführt (*Kap. 3*).

2. Technische Umsetzung und Inbetriebnahme der Sanierungsmassnahme

Im Jahr 2013 wurde mit den Bauarbeiten des Speicherstollens und des Beruhigungsbeckens begonnen. Bei der baulichen Umsetzung mussten verschiedene technische Herausforderungen wie beispielsweise Bauarbeiten im Grundwasser, Einbringen von Spundwänden bei einer hohen Anzahl von grossen Findlingen sowie technisches Neuland bei den Steuerorganen gemeistert werden. Auf Mitte 2016 wurden das Beruhigungsbecken und der Speicherstollen fertiggestellt.

Bei den umgesetzten Sanierungsmassnahmen (regulierbarer Speicherstollen und Beruhigungsbecken) handelt es sich um eine hochkomplexe Spezialanlage mit diversen technischen Organen, Eingangsgrössen und Randbedingungen zur Steuerung, wie beispielsweise (*vgl. Bild 2*):

- Zufluss aus dem Kraftwerk Innertkirchen 1 in den Speicherstollen ($V = 60\,000 \text{ m}^3$)
- Retentionszeit im Speicherstollen in Abhängigkeit vom Füllungsgrad des Stollens und des Zuflusses aus dem Kraftwerk Innertkirchen 1 (mehrere Minuten)
- Zufluss aus dem Speicherstollen in das Beruhigungsbecken ($V = 20\,000 \text{ m}^3$), gesteuert mit Segmentschützen (es kann auch Wasser vom Beruhigungsbecken in den Stollen fliessen)
- Zufluss aus dem Kraftwerk Innertkirchen 2 in das Beruhigungsbecken
- Wasserstand im Beruhigungsbecken
- Ändernde Strömungsbedingungen im Beruhigungsbecken in Abhängigkeit von den Punkten (c), (d) und (e) sowie den extra eingebrachten Störungselementen zur Strömungsberuhigung
- Abfluss im Vorfluter (Hasliaare)
- Ausfluss aus dem Beruhigungsbecken in die Hasliaare, gesteuert mit Regulierklappe und Segmentschützen (redundantes System für technischen Ausfall). Die Steuerung hängt dabei direkt von den Punkten (c), (d), (e), (f) und (g) ab.

Mit induktiven Durchflussmessungen sowie der Rückrechnung des Durchflusses aus der erzeugten Leistung/Energiemenge lassen sich die Punkte (a) und (d) sehr präzise bestimmen. Aus den Messwerten des laufenden Betriebs sind auch die Re-

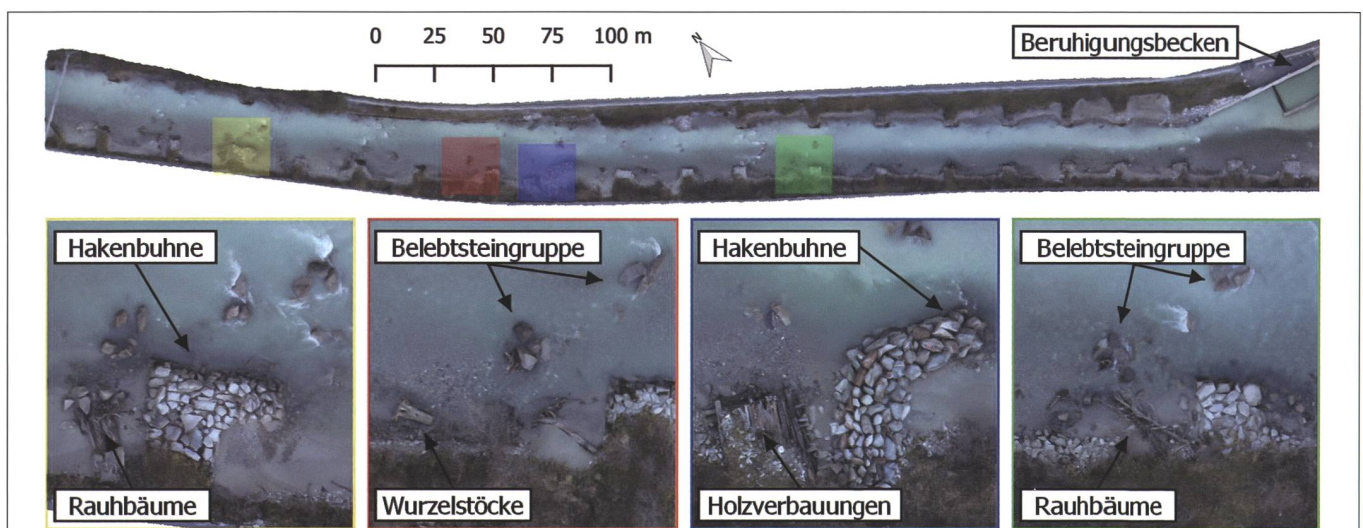


Bild 1: Illustration der Musterstrecke in der Hasliaare oberhalb der Aareschlucht.

Jahren nach Inbetriebnahme der schwall-
dämpfenden Massnahmen) gemacht. Die
erste Kampagne wurde zwischen 2016 und
2018 durchgeführt (vgl. Bild 3).

Im Rahmen der Wirkungskontrolle wird
einerseits die Einhaltung der festgelegten
hydrologischen Kenngrössen und anderer-
seits der gewässerökologische Zustand
anhand der Indikatoren der Vollzugshilfe
«Schwall Sunk – Strategische Planung»

(Baumann et al., 2012) beurteilt und mit
dem Zustand vor Umsetzung der Massnah-
me sowie dem prognostizierten Zielzustand
verglichen. Bei diesem Vergleich wurde zu-
dem der prognostizierte Zustand für den
theoretischen Fall des Ausbaus ohne Sa-
nierungsmassnahmen miteinbezogen.

Für die Wirkungskontrolle wurden in
den verschiedenen Gewässerabschnitten
(Buhnen-, Muster-, Kiesbank- und Kanal-

strecke) der Hasliaare umfangreiche öko-
logische Untersuchungen durchgeführt.
Zusätzlich zu den Probenahmestellen in
der Hasliaare erfolgten auch ökologische
Erhebungen in der Lüttschine (in einem ka-
naliserten und in einem morphologisch
naturnahen Abschnitt; Bild 3).

Aufgrund ihres naturnahen, glazialen
Abflussregimes sowie aufgrund ihrer der
Hasliaare vergleichbaren Gewässergrösse
und der Nähe der beiden Einzugsgebiete
eignet sich dieser Fluss sehr gut als Refe-
renzgewässer. Einzig die morphologisch
seitliche Begrenzung von Strasse und
Bahnlinie ist nicht natürlich. Um die Be-
deutung der Morphologie ausreichend be-
rücksichtigen zu können, wurden die öko-
logischen Erhebungen sowohl im kanali-
sierten als auch im naturnahen Abschnitt
der Lüttschine durchgeführt.

Die Hasliaare und die Lüttschine sind
gletschergeprägte Alpenflüsse mit sehr
harschen Lebensbedingungen (Gletscher-
trübung, sehr tiefe Wassertemperaturen,
sehr starke Hochwasser- und Geschiebe-
dynamik) für die aquatischen Organismen.
Insbesondere die Atlantische Forelle, als
höchste trophische Ebene, muss zudem
mit dem natürlicherweise sehr geringen
Nahrungsangebot auskommen. In der Voll-
zugshilfe «Schwall Sunk strategische Pla-
nung» (Baumann et al., 2012) wurden da-
gegen die Indikatoren F4 Reproduktion
Fische (Bewertung gemäss Schager und
Peter, 2004) und F5 Produktivität (Bewer-
tung gemäss Vuille 1997) für nival geprä-
gte Flüsse entwickelt und tragen den Ver-
hältnissen in der Hasliaare und Lüttschine
nicht ausreichend Rechnung. Daher wur-
den für diese beiden Indikatoren die Be-
wertungsklassen angepasst, indem die
fischökologischen Verhältnisse von der
morphologisch naturnahen Strecke der
Lüttschine als Referenz für die Definition
der Klasse sehr gut herangezogen wurden.
Insgesamt erfolgten zwei Befischungsk-
ampagnen in den Jahren 2017 und 2018,
bei denen das Vorkommen von Brütlingen,
Sömmerlingen und Jungfischen im natur-
nahen Abschnitt der Lüttschine erhoben
wurde (vier Befischungskampagnen von
Anfang April bis Mitte September 2017 so-
wie eine Kampagne Mitte Juni 2018). Für
die ökologische Wirkungskontrolle erfolg-
ten in der Muster-, Kiesbank- und Kanal-
strecke (Hasliaare) Befischungen sowie
zusätzlich auch in der Kanalstrecke der
Lüttschine (Tabelle 1). Dabei wurde je Al-
tersstadium (Tabelle 5) und je Gewässerab-
schnitt mindestens eine Erhebung durch-
geführt. Befischt wurden jeweils Gewässer-
abschnitte von 100 bis 200 m.

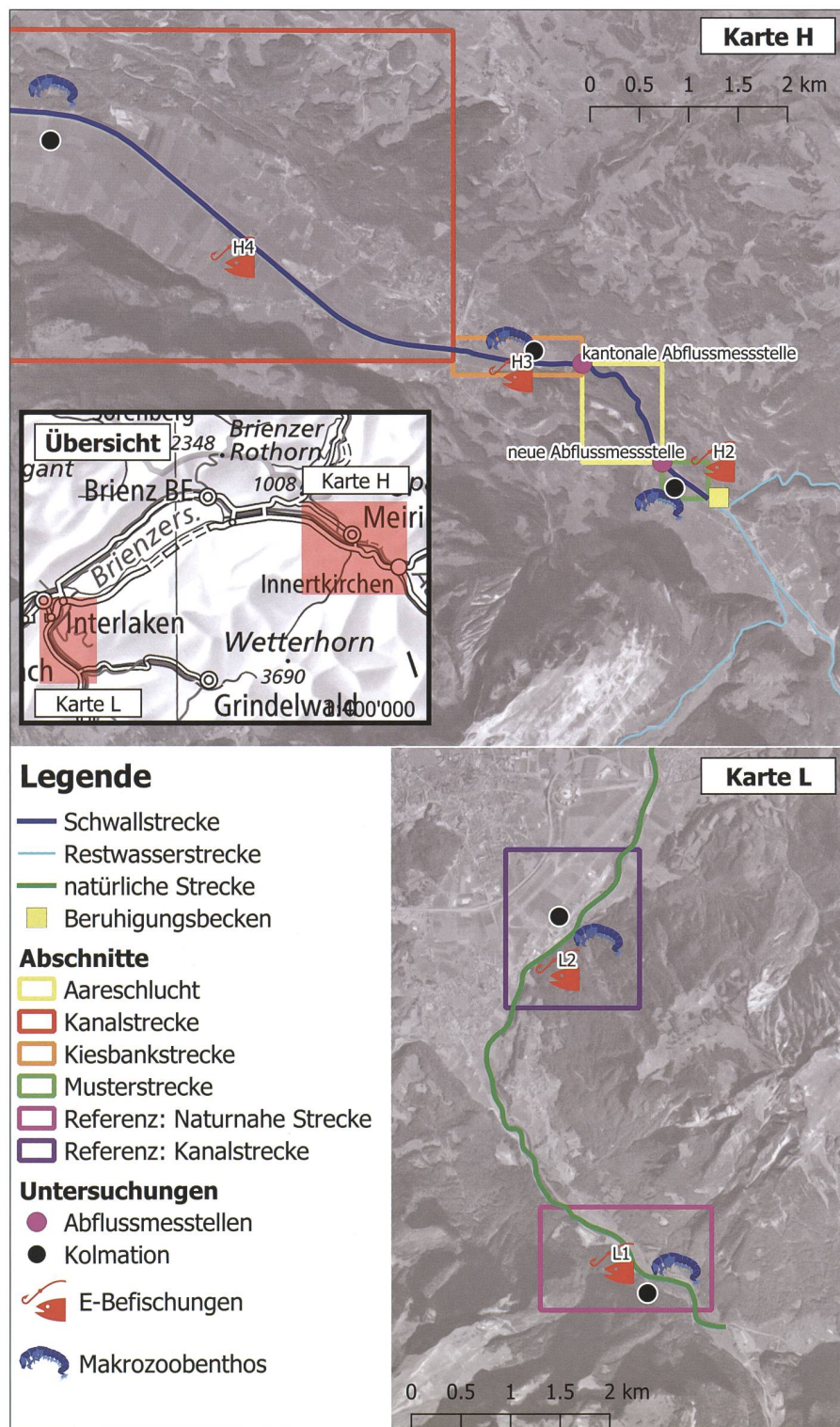


Bild 3: Kartographische Darstellung der gewässerökologischen Untersuchungs-
standorte. Die Messung der Wassertemperatur erfolgte am Pegel Brienzwiler
(ausserhalb Kartenausschnitt). Abkürzungen L1, L2, H2-H4 siehe Tabelle 1.

Abschnitt	Gewässer	Morphologie	Abflussregime
H2	Hasliaare	Buhnen- + Instream-Massnahmen (Musterstrecke)	Schwall-Sunk
H3	Hasliaare	Kiesbänke	Schwall-Sunk
H4	Hasliaare	Kanalisiert	Schwall-Sunk
L1	Lütschine	Naturnah	Natürlich / naturnah
L2	Lütschine	Kanalisiert	Natürlich / naturnah

Tabelle 1: Gewässerabschnitte der Befischungskampagne.

In den *Bildern 4* und *5* sind die angepassten Klasseneinteilungen für die Indikatoren *F4* und *F5* dargestellt. Die Anpassungen erfolgten in Absprache mit der Begleitgruppe. Wie oben beschrieben, dienen die Befischungsergebnisse des naturnahen Abschnitts der Lütschine als Definition für die Klasse blau. Analog zur Vollzugshilfe «Schwall Sunk Massnahmen» (*Tonolla et*

Klasse	Anzahl Brütlinge / (Vor)Sömmerlinge auf 200 m	Hergeleitet aus Befischungsdaten
Sehr gut	60	
Gut	30–59	↔ –50 %
Mässig	15–29	↔ –50 %
Unbefriedigend	7–14	↔ –50 %
Schlecht	<7	↔ –50 %

Klasse	Anzahl +1 auf 200 m	Hergeleitet aus Befischungsdaten
Sehr gut	35	
Gut	18–34	↔ –50 %
Mässig	9–17	↔ –50 %
Unbefriedigend	5–8	↔ –50 %
Schlecht	<5	↔ –50 %

Bild 4: Definition der Klasseneinteilungen für den Indikator *F4* Jungfische für Vorsömmerlinge (0*) und Juvenile (1*).

Klasse	JHE	
Sehr gut	> 40 kg	
Gut	20–40 kg	↔ –50 %
Mässig	10–20 kg	↔ –50 %
Unbefriedigend	5–10 kg	↔ –50 %
Schlecht	0–5 kg	↔ –50 %

Bild 5: Klasseneinteilung für den Indikator *F5* Produktivität.

al., 2017) wurden die übrigen Bewertungsstufen festgelegt. Bei jeder Halbierung der Fischdichte (Indikator *F4*), resp. des Jahreshektarertrags (Indikator *F5*) erfolgt ein Wechsel in die nächsttiefere Klasse.

Im Gegensatz zu den Indikatoren *F4* und *F5* berücksichtigen die Indikatoren des Makrozoobenthos (*B1* Biomasse, *B2* IBCH, *B3* Längszonation, *B4* EPT) bereits die unterschiedlichen Abflussregimes, resp. ziehen auch glazial geprägte Abflussregimes explizit in die Beurteilung mit ein. Daher erfolgten für diese Indikatoren keine Anpassungen gegenüber der Vollzugshilfe (*Baumann et al.*, 2012). Allerdings wurden auch die Ergebnisse der Beprobungen der Lütschine bei der Interpretation der Wirkungskontrolle im Sinne eines Quervergleichs berücksichtigt.

4. Ergebnisse der Wirkungskontrolle

4.1 Hydrologische Kennwerte

Wie in *Kap. 1.2* beschrieben, sollen mit den hydrologischen Zielwerten die Verdriftung und das Strandrungsrisiko massgeblich verringert werden sowie die dauerbenetzte Fläche bei Sunkabfluss den natürlichen Niedrigwasserbedingungen entsprechen. Als Datengrundlage für die Wirkungskontrolle wurden die Turbinendurchflüsse, der Ausfluss aus dem Beruhigungsbecken sowie die Pegel in der Schwallstrecke verwendet (*Bild 3*). Die statistische Auswertung (Percentile) erfolgte auf Tagesextremwerten für die Parameter Schwall- und Sunkrate sowie Sunkabfluss für die Winterperioden 2016/17 und 2017/18 (zeitliche Auflösung der Abflussdaten 15 Minuten). In den *Bildern 6a* bis *6c* sind jeweils die 5%- , resp. 95%-Percentile für diese hydrologischen Kennwerte dargestellt.

Sunkabfluss

Für die Wintersaisons 2016/17 und 2017/18 lag das 5%-Percentil (entspricht hydrologisch dem Abfluss Q_{347}) bei 3, resp. knapp $5 \text{ m}^3/\text{s}$ und somit etwas über dem natürlichen Niedrigwasserabfluss Q_{347} von $2,4 \text{ m}^3/\text{s}$. Somit wurde in diesen Wintersaisons der Zielwert von einem Mindestabfluss von $3 \text{ m}^3/\text{s}$ für das 5%-Percentil

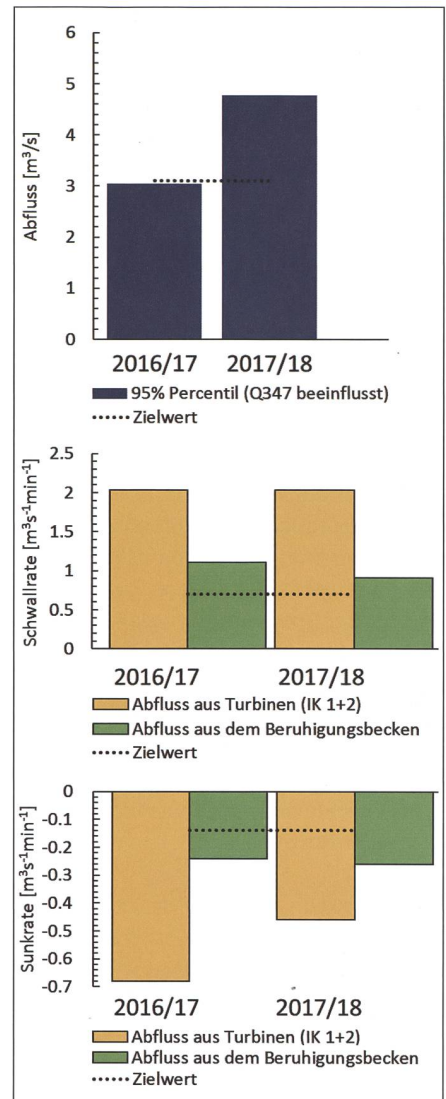


Bild 6: Statistische Auswertung der Winterabflüsse (20. November bis 10. März für die Wintersaisons 16/17 und 17/18) – 2a = Sunkabfluss, 2b = Schwallrate, 2c = Sunkrate (für den Abflussbereich zwischen 8 und $3 \text{ m}^3/\text{s}$). Die jeweiligen Zielwerte sind mit einer gestrichelten Linie dargestellt.

eingehalten. Allerdings unterschritt der Minimalabfluss an wenigen Tagen diesen Zielwert deutlich. Entsprechende Abklärungen ergaben, dass dies auf fehlerhafte Abflussmessungen beim Beckenausfluss und beim Pegel Aareschlucht (*Kap. 2*) zurückzuführen ist. Nach Einschätzung der Steuerungsspezialisten ist mit den genaueren Abflussmessungen das Einhalten der Zielvorgaben künftig möglich (*vgl. auch Kap. 5*).

Schwallrate

Das 95%-Percentil der 15-minütlichen Erhöhungen der Turbinenausflüsse aus den Kraftwerken Innertkirchen 1 und 2 lag in den betrachteten Wintersaisons bei rund $2 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ min}^{-1}$. Mit den Speicherorganen konnten die 95%-Percentile der Schwall-

raten beim Beckenausfluss auf 1,1 (2016/17), resp. auf $0,9 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ min}^{-1}$ (2017/18) sehr stark gedämpft werden. Damit konnte der Zielwert für das 95%-Perzentil von $0,7 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ min}^{-1}$ nicht vollständig erreicht werden. Auch für diesen Schwallkennwert werden von den Steuerungsspezialisten deutliche Verbesserungen mit genaueren Abflusswerten erwartet (Kap. 2).

Sunkrate

Die Auswertung der Rückgangsraten zeigte, dass für die beiden betrachteten Wintersaisons die 5%-Perzentile unterhalb der Turbinen bei $-0,5$, resp. bei $-0,7 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ min}^{-1}$ liegen. Mit den Speicherorganen konnten die entsprechenden Perzentilwerte auf rund $-0,25 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ min}^{-1}$ ebenfalls deutlich reduziert werden. Wie beim Sunkabfluss und bei der Schwallrate wurden damit die Zielvorgaben nicht vollständig erreicht. Auch für die Sunkraten werden genauere Abflusswerte ein Einhalten der Zielvorgaben künftig ermöglichen (Kap. 2).

4.2 Ergebnisse und Bewertung der Indikatoren

4.2.1 Vergleich der Zustände vor und nach Umsetzung der Schwallanierung

In *Tabelle 2* werden die Bewertungen für verschiedene Zustände vor und nach Sanierung dargestellt. Dafür wurde eine Gesamtbetrachtung über alle Abschnitte in der Hasliaare vorgenommen.

Aus den Vergleichen der Zustände vor und nach Umsetzung der Sanierung (inkl. Kraftwerkausbau) sind aus ökologischer Sicht folgende zentrale Aspekte zu nennen:

- Bei der Massnahmenwahl lag der Fokus vor allem auf den Indikatoren *B1*, *F2* und *F5*, bei denen eine entscheidende ökologische Verbesserung erwartet wurde.
- Bis auf den Indikator *F2* konnten die vor der Sanierung prognostizierten Zielwerte für alle Indikatoren erreicht werden. Die mässige Bewertung des Indikators *F2* ergibt sich aufgrund des nicht vollständigen Erreichens des Zielwerts für die Sunkraten, welche auf noch bestehende technische Mängel zurückzuführen und mit Verbesserungen der Beckensteuerung behebbar sind (Kap. 2).
- Bei den Indikatoren *B1* und *F5* konnte eine Verbesserung um eine, resp. um zwei Klassen erreicht werden.
- Der Kraftwerksausbau ohne Sanierungsmassnahmen hätte gegenüber der heutigen Situation bei vier Indikatoren (*B1*, *B2*, *B4*, *F5*) eine Verschlechterung der Bewertung zur Folge gehabt.

Indikator	Zustand vor Sanierung	Prognostizierter Zustand mit Ausbau ohne Sanierung	Prognostizierter Zustand mit Ausbau und Sanierung	Zustand 1-Jahres-Monitoring ohne Instream-Massnahmen	Zustand 1-Jahres-Monitoring für den Abschnitt mit Instream-Massnahmen
A1 Mindestabfluss					
K1 Kolmation					
Q1 Wassertemperatur					
B1 Biomasse MZB					
B2 MSK Modul MZB					
B3 Längen-Zonation MZB					
B4 EPT					
F1 MSK Modul Fische					
F2 Stranden von Fischen*					
F3 Laichareale Fische					
F4 Jungfische (Sömmerlinge)					
F4 Jungfische (1+)					
F5 Produktivität Fische					

Tabelle 2: Bewertung der verschiedenen Indikatoren für die Zustände vor Sanierung und nach Sanierung (1-Jahres-Monitoring) sowie für die vor der Sanierung prognostizierten Zustände.

Indikator	Schwallstrecke				Referenz	
	Buhnenstrecke	Musterstrecke	Kiesbankstrecke	Kanalstrecke	Lütschine naturnah	Lütschine kanalisiert
A1 Mindestabfluss						
K1 Kolmation						
Q1 Wassertemperatur						
B1 Biomasse MZB						
B2 MSK Modul MZB						
B3 Längen-Zonation MZB						
B4 EPT						
F1 MSK Modul Fische						
F2 Stranden von Fischen						
F3 Laichareale Fische						
F4 Jungfische (Sömmerlinge)						
F4 Jungfische (1+)						
F5 Produktivität Fische						

Tabelle 3: Bewertung der Indikatoren für den Zustand nach Umsetzung der Sanierungsmassnahme. MZB=Makrozoobenthos, MSK=Modulstufenkonzept, EPT=Anzahl an gefundenen Familien von Eintags-, Stein- und Köcherfliegenlarven. Farbenerklärung: Blau=sehr gut, grün=gut, gelb=mässig, orange=unbefriedigend, rot=schlecht, grau=für diesen Abschnitt nicht erhoben.

- Bereits bei der im Vorfeld durchgeführten Defizit- und Ursachenanalyse zeigte sich, dass die morphologischen Defizite in der Schwallstrecke keine Verbesserung des Indikators *F4* erlauben – unabhängig vom Abflussregime. Mit den Instream-Massnahmen in der Musterstrecke und den Schwalldämpfungsmassnahmen konnten die morphologischen und hydrologischen Defizite soweit behoben werden, dass für Sömmerlinge und Jungfische sogar eine gute Bewertung erreicht wird.

4.2.2 Vergleich der einzelnen Abschnittsbewertungen

Für die verschiedenen Abschnitte in der Schwallstrecke ergibt sich für die überwiegende Mehrheit der Indikatoren ein einheitliches Bild. Kleinere Unterschiede finden sich bei den Indikatoren *B3* und *F5*, die allerdings im Bereich der Methodenunschärfe liegen. Einzig beim Indikator *F4* zeigen sich grössere Unterschiede, die auf die morphologischen Aufwertungen zurückzuführen sind. Mit den Instream-Massnahmen konnten sich Lebensräume für

Jungfische ausbilden, die auch bei höheren Abflüssen geeignet sind. Die Dämpfung der Änderungsraten führt offensichtlich zu ausreichenden Reaktionszeiten, die die Sömmerlinge und Jungfische benötigen, um ihren Standort im Gewässer zwischen Sunk und Schwallabfluss wechseln zu können. Der gleiche ökologische, resp. morphologische Effekt ist auch beim Quervergleich von kanalisiertem und naturnahem Abschnitt in der Lutschine zu beobachten.

5. Diskussion und Schlussfolgerung der ersten Wirkungskontrolle

5.1 Technische und hydrologische Aspekte

Wie in Kap. 2 detailliert beschrieben, handelt es sich bei den Sanierungsmassnahmen um eine hochkomplexe technische Spezialanfertigung, die im Laufe der ersten Betriebsjahre mehrere Anpassungen bei der Steuerung und der baulichen Konfiguration erforderte. Ohne diese technischen Optimierungen konnten die hydrologischen Zielvorgaben hinsichtlich Änderungsraten nicht vollständig eingehalten werden. Nach aktuellem Stand sind die Optimierungsarbeiten nun abgeschlossen und werden gemäss Steuerungsspezialisten ein Einhalten der hydrologischen Zielwerte künftig erlauben. Entsprechend sollte bei der Umsetzung von anderen Schwallanierungsmassnahmen ein Augenmerk auf die Steuerung und auf die Genauigkeit von Ab- und Durchflussmessungen gelegt werden.

5.2 Ökologische Aspekte

Vergleich mit Prognose vor der Sanierung

Bereits bei der ersten Wirkungskontrolle wurden in der gesamten Schwallstrecke deutliche ökologische Verbesserungen beobachtet. Die Biomasse des Makrozoobenthos (Indikator B1) konnte sich um zwei und die Produktivität der Fische (Indikator F5) um eine Klasse verbessern. Insgesamt konnten die ökologischen Zielwerte, die vor der Umsetzung der Schwallanierung prognostiziert wurden, bis auf den Indikator F2 erfüllt werden. Auch der Indikator F2 (Stranden von Fischen) wird sich nach aktuellem Kenntnisstand mit den technischen Steuerungsoptimierungen künftig um zwei Klassen auf die Bewertung sehr gut verbessern.

Beurteilung abiotische Aspekte und Makrozoobenthos

Insgesamt ergibt sich damit eine gute Situation bei den abiotischen Indikatoren (alle Klasse gut) sowie ein guter bis sehr guter Zustand hinsichtlich der Bewertung des

Makrozoobenthos, dessen Zusammensetzung in etwa den Verhältnissen in der morphologisch und hydrologisch naturnahen Lutschine entspricht.

Fischökologische Aspekte

Wird die künftig optimierte Beckensteuerung miteinbezogen, erreichen auch alle fischökologischen Indikatoren die 2012 prognostizierten Zielwerte (Indikatoren F1 bis F4), resp. übertreffen diese sogar (Indikator F5). Bereits in der Defizit- und Ursachenanalyse zeigte sich, dass die morphologischen Defizite in der Schwallstrecke bereits bei einem Abfluss von 20 m³/s zu einem vollständigen Verschwinden der Jungfischhabitate führen und daher keine Verbesserung des Indikators F4 zu erwarten sei, resp. dies nur mit zusätzlichen morphologischen Aufwertungen zu erreichen wäre. Die im Zuge des Beckenbaus umgesetzten Instream-Massnahmen fokussierten daher auf einer Verbesserung der Lebensbedingungen für juvenile Fische, resp. der Errichtung von Jungfischhabitaten, die auch bei Schwallabfluss für diese Altersklasse geeignet sind (strömungsberuhigt, relativ geringe Wassertiefe, kiesige Sohle). Bei der Planung musste der Umstand berücksichtigt werden, dass sich zwischen Schwall- und Sunkabfluss die geeigneten Stellen für die Jungfische verschieben. Daher muss den juvenilen Forellen zusätzlich auch ausreichend Zeit für diese Standortwechsel gegeben werden. Wie die Ergebnisse der Befischungskampagnen in der Musterstrecke zeigen, genügt die Dämpfung der Schwall- und Sunkraten, damit die Jungfische ihre Standorte zwischen niedrigem und hohem Abfluss wechseln können. Letztlich konnten in der Musterstrecke erfreulicherweise – wenn auch etwas überraschend – sogar vergleichbare Jungfischdichten wie in der naturnahen Lutschine beobachtet werden. Die hohen Bestandsdichten in der Restwasserstrecke dürften dabei auch eine Rolle spielen, da sie eine Zuwanderung in die Musterstrecke begünstigen. In Anbetracht der 2-jährigen Befischungsergebnisse wurde der Indikator F4 für die Musterstrecke mit der Klasse gut bewertet und übertraf somit die Prognose vor Umsetzung der Massnahmen um drei Klassen. Aus fischökologischer Sicht sind die Verbesserungen der fischökologischen Aspekte (F2, F4 und F5) sehr wertvoll und äusserst ermutigend.

Gesamtblick

Insgesamt zeigen die Ergebnisse der Einjahres-Wirkungskontrolle eine sehr positive Tendenz und ein Beseitigen der wesentli-

chen Beeinträchtigungen, die auf Schwall und Sunk zurückzuführen sind. Für eine abschliessende Bewertung der Sanierungsmassnahmen müssen zusätzlich die Ergebnisse der künftigen Wirkungskontrollen und die natürlichen Populationsschwankungen miteinbezogen werden. Im Rückblick traten hinsichtlich der Einjahres-Wirkungskontrolle zwei Herausforderungen auf:

1. Bei der Bewertung musste die Wechselwirkung zwischen Hydrologie und Morphologie angemessen berücksichtigt werden.
2. Die Bewertungsmethodik der Indikatoren F4 Jungfische (Schager & Peter, 2004) und F5 Produktivität Fische (Vuille, 1997) musste den Gegebenheiten eines alpinen Gewässers angepasst werden (vgl. Bild 4 und 5).

Für diese Herausforderungen wurden zwei Gewässerabschnitte der hydrologisch unbeflussenden Lutschine (kanalisiert, resp. naturnahe Morphologie, vgl. Bild 3) als Referenzgewässer herangezogen. Damit konnten die o.g. Herausforderungen pragmatisch und fachlich fundiert gelöst werden.

5.3 Morphologische Aspekte

Aus wasserbaulicher Sicht haben sich die morphologischen Aufwertungen bewährt: Die Strukturen sind bei Hochwasserereignissen stabil, es treten keine grossflächigen Versandungen auf, dank der Belebteingruppen haben sich neue Pool-Riffel-Sequenzen im Gerinne etabliert und die Habitatsvielfalt hat deutlich zugenommen (Frei, 2015). Im Spätherbst 2019 erfolgten bei sehr tiefen Abflüssen (infolge Nichtproduktion bei den Kraftwerken Innertkirchen 1 und 2) kleinere morphologische Anpassungen in der Musterstrecke, um die Habitatsbedingungen für Jungfische weiter zu verbessern. Als Grundlage für die Detailplanung dienten dabei die Befischungsergebnisse, die für die verschiedenen Bühnenfelder erhoben wurden sowie weitere Abklärungen durch die ZHAW (Döring et al., 2016).

6. Ausblick

Die ökologischen Untersuchungen werden in den nächsten Jahren fortgeführt. Vorgesehen sind weitere Wirkungskontrollen, jeweils drei, fünf und zehn Jahre nach Umsetzung der Sanierungsmassnahmen.

Aktuell laufen zusätzliche Untersuchungen im Rahmen einer erweiterten Wirkungskontrolle (Schweizer et al., 2019), die über die hier beschriebene Wirkungskontrolle hinausgehen. Dabei werden folgende Themen detailliert untersucht:

- Bestimmung des Zeitpunkts für die Emergenz der Bachforellen aus der Sohle (inklusive Larvengrösse, Vorhandensein des Dottersacks sowie Schwimmstärke; Meyer et al., 2018)

- Strandrungsversuche mit Bachforellenlarven (Wildfang) in der Hasliaare analog zu den Strandrungsversuchen in Lunz (Auer et al., 2014)
- Versuche zur Verdriftung von Wirbellosen im Winter, Frühling und Herbst

Aus den Untersuchungsergebnissen der Wirkungskontrollen (allgemein und erweitert) können wertvolle Erfahrungswerte und Erkenntnisse für künftige Sanierungsfälle gewonnen und abgeleitet werden.

Quellen:

Auer S., Fohler N., Zeiringer B., Führer S. & Schmutz S. (2014): Experimentelle Untersuchungen zur Schwallproblematik. Drift und Stranden von Äschen und Bachforellen während der ersten Lebensstadien. BOKU, Wien.

Baumann P., Kirchhofer A. & Schälchli U. (2012): Sanierung Schwall/Sunk – Strategische Planung. Ein Modul der Vollzugshilfe Renaturierung der Gewässer. Bundesamt für Umwelt, Bern.

Döring M., Tonolla D. & Bucher A. (2016): Erfolgskontrolle von strukturellen Aufwertungen an der Musterstrecke Hasliaare. Bericht im Auftrag des Fischereiinspektorats (BE), unveröffentlicht.

Frei J. (2015). Erfolgskontrolle einer Gewässerkontrolle für den Lebensraum der Forelle. Bachelorarbeit, ZHAW Departement N, Wädenswil.

Baumann P. (2009): Schwall/Sunk in der Hasliaare. Gewässerökologische Untersuchung von Hasliaare und Lutschine. Beurteilung der Schwall Auswirkungen in je zwei Strecken und Szenarien. Bericht von Limnex im Auftrag der KWO, unveröffentlicht.

Baumann P. (2010): Schwall/Sunk in der Hasliaare – Anhang. Resultate von zusätzlichen Feldaufnahmen und Auswertungen sowie Zusammenstellung von Rohdaten als Ergänzung zum Bericht von Baumann (2009). Bericht von Limnex im Auftrag der KWO, unveröffentlicht.

Baumann P., Schmidlin S., Wächter K., Peter A. & Büsser P. (2012): Schwall-Sunk Bewertung der KWO-Zentralen in Innertkirchen. Bewertung des Ist-Zustands und Varianten zur Bewertung eines zukünftigen Zustands nach Realisierung des Aufbauprojekts KWO plus (mit und ohne Speichervolumen zur S/S-Dämpfung). Bericht von Limnex im Auftrag der KWO, unveröffentlicht.

Meyer M., Greter R., Schweizer S., Baumgartner J., Schläppi S. & Büsser P. (2018): Untersuchungen zum Emergenzzeitraum von *Salmo trutta* in der Hasliaare in 2018. Fachbericht im Auftrag des Bundesamts für Umwelt, unveröffentlicht.

Person E. (2013): Impact of Hydropeaking on Fish and

their Habitat. Thèse No 5812 (2013), école polytechnique fédérale de Lausanne.

Person E., Bieri M., Peter A. & Schleiss A.J. (2013): Mitigation measures for fish habitat improvement in Alpine rivers affected by hydropower operations. *Ecohydrology*, 7(2): S. 580–599.

Schager E. & Peter A. (2004): Methoden zur Untersuchung und Beurteilung der Fliessgewässer. *Fische Stufe F. Mitteilungen zum Gewässerschutz* (44), 63S. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern.

Schweizer S., Zeh Weissmann H. & Ursin M. (2012a): Der Begleitgruppenprozess zu den Ausbauprojekten und zur Restwassersanierung im Oberhasli. «Wasser Energie Luft» 2012(1): S. 11–17.

Schweizer S., Schmidlin S., Tonolla D., Büsser P., Meyer M., Monney J., Schläppi S. & Wächter K. (2013a). Schwall/Sunk-Sanierung in der Hasliaare – Phase 1a: Gewässerökologische Bestandsaufnahme. «Wasser Energie Luft» 2013(3): S. 191–199.

Schweizer S., Schmidlin S., Tonolla D., Büsser P., Meyer M., Monney J., Schläppi S., Schneider M., Tuhtan J. & Wächter K. (2013b): Schwall/Sunk Sanierung in der Hasliaare – Phase 1b: Ökologische Bewertung des Ist-Zustands anhand der 12 Indikatoren der aktuellen BAFU-Vollzugshilfe. «Wasser Energie Luft» 2013 (3): S. 200–207.

Schweizer S., Schmidlin S., Tonolla D., Büsser P., Maire A., Meyer M., Monney J., Schläppi S., Schneider M., Theiler Q., Tuhtan J. & Wächter K. (2013c): Schwall/Sunk-Sanierung in der Hasliaare – Phase 2b: Ökologische Bewertung von künftigen Zuständen. «Wasser Energie Luft» 2013(4): S. 277–287.

Schweizer S., Grand R., Frei J., Schläppi S., Meyer M., Döring M., Müller W., Flück M., Bettler M. & Herzog B. (2016a) Instream Measures in einer alpinen Schwallstrecke – eine erste Bilanz von der Hasliaare. *Ingenieurbiologie* 1/16: S. 89–93.

Schweizer S., Schmidlin S., Bieri M., Büsser P., Meyer M., Money J., Schläppi S., Schneider M., Tonolla D.,

Tuhtan J. & Wächter K. (2016b): Die erste Schwall-Sanierung der Schweiz: Die Hasliaare als Fallbeispiel. *WasserWirtschaft* 2016(1): S. 10–15.

Schweizer S., Meyer M., Greter R., Schläppi S., Baumgartner J., Berger B., Lundsgaard-Hansen L., Büsser P. & Flück M. (2019): «Monitoring Plus» – Was können wir aus der Schwallsanierung der Hasliaare lernen? *WasserWirtschaft* 2019(2–3): S. 12–18.

Schwellenkorporation Innertkirchen (2017): Hochwasserschutz Innertkirchen, Einweihung im Oktober 2017, gefunden am 17.11.2020 unter <https://www.schwellenkorporation-innertkirchen.ch/einweihung-hws-info-presse/>.

Speerli J. & Schneider L. (2013): Modellversuche OptiFlux – Strukturverbesserungen in Talflüssen. Zwischen- und Schlussbericht, gefunden am 17.11.2020 unter <https://www.vol.be.ch/vol/de/index/natur/fischerei/publikationen.html>.

Tonolla D., Chaix O., Meile T., Zurwerra A., Büsser P., Oppliger S. & Essyad K. (2017): Schwall-Sunk-Massnahmen. Ein Modul der Vollzugshilfe Renaturierung der Gewässer. Bundesamt für Umwelt, Bern.

Vuille T. (1997): Fischereiliches Ertragsvermögen der Patengewässer im Kanton Bern. Bericht des kantonalen Fischereiinspektorats, Münsingen.

Schlusswort:

Für Rückfragen zu den Bewertungen der biologischen Indikatoren können auf Anfrage weitergehende Berichte oder Daten kommentiert herausgegeben werden.

Kontakt:

Steffen Schweizer
Dr. sc. ETHZ Umweltnaturwissenschaften
Diplom-Geoökologe
Leiter Fachstelle Ökologie KWO
Telefon direkt +41 33 982 20 19
Mobile +41 76 491 61 29
sste@kwo.ch