Zeitschrift: Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria
Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband
Band: 105 (2013)
Heft: 4

Artikel: Schwall/Sunk-Sanierung in der Hasliaare
Autor: Schweizer, Steffen / Bieri, Martin / Tonolla, Diego
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-941563

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: 02.07.2025

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

Schwall/Sunk-Sanierung in der Hasliaare

Phase 2a: Konstruktion repräsentativer Abflussganglinien für künftige Zustände

Steffen Schweizer, Martin Bieri, Diego Tonolla, Judith Monney, Matthias Rouge, Pascal Stalder

Zusammenfassung

Basierend auf zahlreichen und umfassenden ökologischen Untersuchungen konnte die Vollzugshilfe des Bundesamts für Umwelt «Sanierung Schwall/Sunk – Strategische Planung» für die Hasliaare vollständig angewendet werden. Mehrere Indikatoren zeigten dabei eine Sanierungspflicht an. Unabhängig vom 2011 revidierten Gewässerschutzgesetz begann die Kraftwerke Oberhasli AG (KWO) vor mehreren Jahren mit der Planung zur Erweiterung der Zentrale Innertkirchen 1. Dieser Kraftwerksausbau würde ohne Gegenmassnahmen die künstlichen Pegelschwankungen prinzipiell verschärfen.

Wie die verschiedenen Untersuchungen zeigen, kann insbesondere mit einer Reduktion der Schwall- und Sunkraten eine ökologische Verbesserung erreicht werden. Technisch lässt sich dies mit einem zwischen Turbinenausfluss und Wasserrückgabe geschalteten Speicher umsetzen. Die Dämpfungsmöglichkeiten hängen dabei sowohl vom zur Verfügung stehenden Speichervolumen als auch von der Art der Speichersteuerung und den Durchflussmengen ab.

Im Fall der Hasliaare wurden drei Zustände hydrologisch untersucht: heutige Situation (I), künftig mit Kraftwerksausbau ohne (II), respektive mit (III) Zwischenspeicher. Ausgehend von den Winterabflüssen 2008–2012 (Szenario I) wurde in einem ersten Schritt der Einfluss des geplanten Kraftwerksausbaus auf das Betriebsregime abgeschätzt (Szenario II). Auf Basis dieser Ganglinie wurden Simulationsrechnungen für verschiedene Speichervolumina mit einem Volumen zwischen 50 000 und 100 000 m^3 (Szenarien IIIa–IIId) durchgeführt. Abschliessend wurden für alle Zustände die wichtigsten Schwallkennwerte (minimaler und maximaler Abfluss, Schwall- und Sunkrate) statistisch ausgewertet (95%- und 100%-Perzentile). Auf Basis dieser hydrologischen Ergebnisse liessen sich die ökologischen Auswirkungen von verschiedenen Szenarien gezielt abschätzen.

Abstract

Several intense ecological studies meeting the guidelines of the Swiss Federal Office for Environment FOEN on «Hydropeaking Mitigation – Strategic Planning» have been implemented into the case study of the Hasliaare River. This includes the application of multiple guideline indicators demonstrating the necessity for mitigation strategies of hydropeaking in this river. Prior to (and independent of) the changes in the water protection law (2011) the Kraftwerke Oberhasli (KWO) begun the planning to redesign the power station at Innertkirchen, thereby already integrating mitigation measures to decrease artificial fluctuations in the flow regime as a prerequisite for the expansion of the power station.

As demonstrated by the results of the studies, a reduction of the up- and down-ramping rates is expected to significantly improve ecological conditions. This can be accomplished with an increased storage volume between the power plant outlet and the Hasliaare river. The effectiveness of hydraulic dampening depends on the available volume, the production of electricity and the discharge in the Hasliaare river.

Three hydrological scenarios were considered: the status quo (I), future situation including an expanded power plant without storage (II), and with storage (III). Based on the winter flow rates from 2008–2012 (scenario I) first comparisons were made considering operational changes due to the expansion (scenario II). Based upon this hydrograph, simulations were done for a range of storage volumes between 50 000 and 100 000 m^3 (scenarios IIIa–IIId). Additionally, key hydropeaking related factors (minimum and maximum flow rate, up- and down-ramping rate) were determined statistically (95th and 100th percentiles). Based on these studies the forecast of ecological impacts for each scenario could be improved significantly.

1. Einleitung

Wasserkraftwerke mit grossen Speicherseen sind in der Lage, ihre Stromproduktion den Bedürfnissen des Strommarktes anzupassen. Dadurch ergibt sich häufig eine sehr unregelmässige Wasserrückgabe, die künstliche Pegelschwankungen (Schwall/Sunk) im Vorfluter (Schwallstrecke) zur Folge hat. Aus ökologischer Sicht sind vor allem die Geschwindigkeit der Abflusszu- und -abnahme (Schwall-/Sunkraten) sowie die minimal und maximal auftretenden Abflüsse in der Schwallstrecke entscheidend. Mit der 2011 in Kraft getretenen Revision des Gewässerschutzgesetzes (GSchG) sollen unter anderem die wesentlichen Beeinträchtigungen durch Schwall/Sunk behoben werden. Dafür sind in erster Linie bauliche Massnahmen (z.B. Beruhigungsbecken zur Reduktion der Schwall- und Sunkraten oder Direktableitung in ein grösseres Gewässer) geplant. Auf Antrag des Kraftwerkbetreibers sind allerdings auch betriebliche Massnahmen (Einhaltung von Grenzwerten bei der Wasserrückgabe) oder Kombinationen mit baulichen Sanierungen möglich.

2. Heutige gewässerökologische Situation in der Hasliaare (Zustand I)

Die Schwallstrecke

Unterhalb der Wasserrückgabe in Innertkirchen verläuft die Hasliaare bis zur Mündung in den Brienzersee als Schwallstrecke. Morphologisch lässt sich das Gewässer in vier unterschiedliche Abschnitte gliedern:

- Buhnenstrecke in Innertkirchen (Länge 0.7 km)
- Aareschlucht (Länge 1.9 km)

Bild 1. Seeforelle in der Hasliaare (Foto: D. Göz).

- Kiesbankstrecke in Meiringen (Länge 1.4 km)
- Kanal zwischen Meiringen und Brienzersee (Länge 11.5 km).

In der Schwallstrecke kommen Bach- und Seeforellen *(Bild 1)*, Groppen sowie vereinzelt Trüschen und Bachsaiblinge vor.

Maximale Betriebswassermenge heute und nach Kraftwerkserweiterung

Heute beträgt die maximal mögliche Betriebswassermenge in den Zentralen in Innertkirchen 70 m^3/s (40 m^3/s in Innertkirchen 1 und 30 m^3/s in Innertkirchen 2). Bereits vor mehreren Jahren begann die Kraftwerke Oberhasli AG (KWO) mit der Planung zur Erweiterung der Zentrale Innertkirchen 1 (*Schweizer* et al. 2012a). Mit dem Kraftwerksausbau wird die maximale Durchflussmenge auf 95 m^3/s erhöht (+25 m^3/s in Innertkirchen 1).

Ökologische und hydrologische Vorarbeiten für eine Defizitanalyse

Im Vorfeld der Kraftwerkserweiterung wurden zahlreiche gewässerökologische Untersuchungen zum Themenkomplex Schwall/Sunk in der Hasliaare durchgeführt (*Schweizer* et al. 2010, *Schweizer* et al. 2013a). Basierend auf den Erkenntnissen dieser Arbeiten lassen sich die heutigen Auswirkungen des künstlichen Abflussregimes auf die Gewässerökologie qualitativ und semiquantitativ beschreiben. Damit war auch eine vollständige Anwendung der Vollzugshilfe des Bundesamts für Umwelt (BAFU) «Sanierung Schwall/Sunk – Strategische Planung» möglich (*Baumann* et al. 2012). Die Bewertung der Indikatoren erfolgte durch ein Expertenteam (Limnex, *Büsser*, Eawag, EPFL-LCH, *Schneider* & *Jorde* Ecological Engineering) und wurde mit einer Begleitgruppe (BAFU und Amt für Wasser und Abfall des Kantons Berns) abgesprochen (*Schweizer* et al. 2013b).

Für die ökologische Bewertung wurde vor allem auf die Winterabflüsse zurückgegriffen, da in der Niedrigwasserperiode die stärksten Änderungen des Abflussregimes auftreten (*Schweizer* et al. 2013b). Seit 2008 bietet die KWO sogenannte Systemdienstleistungen an. Mit dieser Dienstleistung verpflichtet sich ein Kraftwerk, bei einem Stromüberschuss oder -mangel im Netz innerhalb kurzer Zeit regulatorisch einzugreifen. Im Fall der KWO hat dies zu markanten Änderungen im Betriebsregime geführt. Mit der geplanten Energiewende wird diese Art der Kraftwerkssteuerung tendenziell zunehmen. Aus diesen Gründen beschloss die Begleitgruppe, dass die winterlichen Abflüsse von 2008 bis 2012 für die ökologischen Beurteilungen als Grundlage verwendet werden.

Für die Konstruktion einer repräsentativen Abflussganglinie wurden die 95%- und 100%-Perzentile (basierend auf den täglichen Extremwerten) für den minimalen/maximalen Abfluss sowie für die Schwall- und Sunkrate bestimmt. Hinsichtlich dieser Kennwerte besteht nur für den minimalen Abfluss eine Regelung mit dem Kanton, die einen Mindestdurchfluss von 3 m^3/s (100%-Perzentil) in der Aare vorschreibt.

Auf der insgesamt rund 16 km langen Schwallstrecke verringern sich die Schwall- und Sunkraten (infolge grossmassstäblicher Fliesswiderstände) und erhöht sich der maximale Abfluss (infolge seitlicher Zuflüsse). In der Niedrigwasserperiode fallen die seitlichen Zuflüsse im Längsverlauf hingegen sehr gering aus, sodass sich der minimale Abfluss nur geringfügig erhöht *(Tabelle 1)*.

Ergebnisse der Defizitanalyse gemäss BAFU-Vollzugshilfe

Die Bewertung einzelner Indikatoren (F2 Stranden von Fischen, F3 Laichareale für Fische, F5 Fischereiliche Produktivität) basiert auf der o.g. repräsentativen Abflussganglinie. An insgesamt drei Stellen in der Schwallstrecke (Buhnen-, Kiesbank- und Kanalstrecke) wurde die Bewertung der BAFU-Vollzugshilfe vollständig durchgeführt. Insgesamt zeigen sieben Indikatoren einen guten oder sehr guten, drei einen mässigen und jeweils ein Indikator einen unbefriedigenden, bzw. einen schlechten Zustand an (Limnex 2012, *Schweizer* et al. 2013b). Mit der Klasse gelb (mässig) wurden die Indikatoren Biomasse des Makrozoobenthos (B1), Modulstufenkonzept Modul Fische (F1) sowie Stranden von Fischen (F2) beurteilt. Als ökologisch stark beeinflusst wurden die Indikatoren Fischereiliche Produktivität (F5) (unbefriedigend) und die Reproduktion der Fische (F4) (schlecht) eingeschätzt. Basierend auf den Aggregationsregeln des BAFU-Bewertungssystems liegt für die Gesamtbeurteilung somit eine wesentliche Beeinträchtigung durch Schwall und Sunk vor.

Bedeutung der Morphologie bei der Bewertung

Allerdings muss bei der Interpretation dieser Indikatoren auch der Einfluss der

	Wasserrückgabe bis zur Kiesbankstrecke	Wasserrückgabe bis zur Kanalstrecke
Fliesslänge [km]	3	12
Minimaler Abfluss Q_{min} [m^3/s]	+ 0.05	+ 0.10
Maximaler Abfluss Q_{max} [m^3/s]	+ 2.60	+ 3.20
Maximale Schwallrate ΔQ_{max} [-]	63 %	56 %
Minimale Sunkrate ΔQ_{min} [-]	52 %	31 %

Tabelle 1. Absolute und relative Veränderungen der hydrologischen Schwallkennwerte im Längsverlauf der Hasliaare aufgrund von Zuflüssen und grossmassstäblicher Fliesswiderstände (jeweils auf die 95%-Perzentile bezogen).

Morphologie berücksichtigt werden (*Bieri* 2012, *Person* et al. 2013). Die mässig bis stark eingeschränkte morphologische Vielfalt (vgl. *Bild 2*) lässt in der Hasliaare bei den Indikatoren F1, F4 und F5 auch bei einem natürlichen Abflussregime keine oder nur eine geringfügig bessere Bewertung zu (Limnex 2012). Im Rahmen der Hochwasserschutzkonzepte Innertkirchen und Meiringen bis Brienzersee sowie im Zuge des Investitionsprogramms KWO plus sind für die nächsten Jahre verschiedene morphologische Aufwertungen in der Schwallstrecke vorgesehen (*Schweizer* et al. 2012b). Für eine ökologisch wirksame Verbesserung der Indikatoren F1, F4 und F5 bedarf es in jedem Fall aber auch einer gleichzeitigen Sanierung des Abflussregimes.

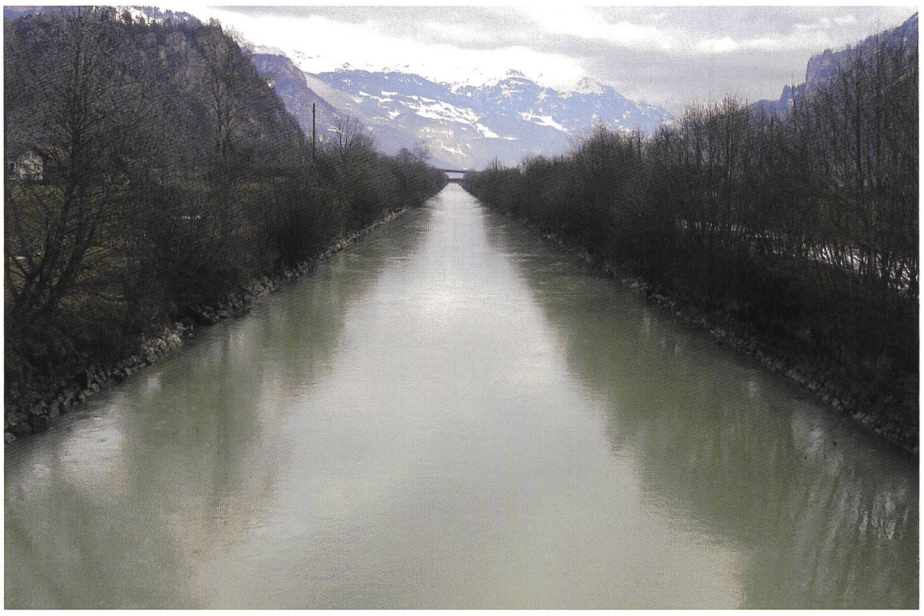


Bild 2. Kanalisierter Abschnitt der Hasliaare kurz oberhalb der Mündung in den Brienzersee, Blick flussaufwärts.

3. Ausarbeitung verschiedener Sanierungsoptionen (Phase 2 der S/S-Sanierung)

Liegt wie im Fall der Hasliaare eine wesentliche Beeinträchtigung des Abflussregimes vor, sieht der gesetzliche Vollzug der Schwall/Sunk-Sanierung eine Ausarbeitung verschiedener Massnahmenvarianten durch den Kraftwerksbetreiber vor (Phase 2). Die verschiedenen Varianten werden dann hinsichtlich finanziellem Aufwand und ihrer ökologischen Wirkung bewertet.

3.1 Variante 1: Direktableitung (verworfen)

Grundsätzlich könnte im Fall der Hasliaare das Abflussregime mit einer Direktableitung des turbinierten Wassers in den Brienzersee erfolgen. Diese Option erfordert allerdings einen über 16 km langen Stollen zwischen der bestehenden Wasserrückgabe in Innertkirchen und dem Brienzersee. Selbst bei einer Ausnützung des bestehenden Gefälles zur Stromproduktion wäre diese Sanierungsoption mit unverhältnismässig hohen Kosten verbunden. Daher konzentrierten sich die weiteren Abklärungen auf den Bau von Ausgleichspeichern zwischen Turbinenausfluss und Vorfluter.

3.2 Variante 2: Bau eines Ausgleichspeichers zwischen Krafwerksausfluss und Wasserrückgabe (weiterverfolgt)

Räumliche und wirtschaftliche Rahmenbedingungen

Im Bereich der Wasserrückgabe ist der für ein Beruhigungsbecken zur Verfügung stehende Raum eingeschränkt und ermöglicht daher nur ein relativ kleines Beckenvolumen von rund 18 000 m^3. Als zusätzliches Speichervolumen kommt somit nur ein unterirdischer Stollen zwischen dem Kraftwerk Innertkirchen 1 und der heutigen Wasserrückgabe in Betracht (*Schweizer* et al. 2013c). Unter Berücksichtigung des Kosten/Nutzen-Verhältnisses und den landschaftlichen Rahmenbedingungen für die Deponierung des Ausbruchmaterials ist ein zusätzliches unterirdisches Speichervolumen bis etwa 80 000 m^3 als realistisch zu betrachten.

Wirkung eines Ausgleichspeichers

Bei einer schnellen Steigerung der Stromproduktion kann ein Teil des turbinierten Wassers im Speicher zwischengelagert und auf diese Weise verzögert in die Schwallstrecke abgegeben werden (*Bild 3*). Im Vorfluter führt dies zu einer langsameren Abflusszunahme. Im entgegengesetzten Fall kann bei einer abrupten Reduktion der Stromproduktion Wasser aus dem Speicher verwendet werden, um den Abflussrückgang in der Schwallstrecke zu verlangsamen. Damit bleiben den Fischen und Wirbellosen längere Reaktionszeiten, um sich auf die Veränderungen des Abflusses einzustellen. Bei einer ausreichenden Dämpfung können sich die aquatischen Organismen rechtzeitig in die Sohle oder an eine andere Stelle im Gewässer zurückziehen. So kann zum Beispiel das Risiko des Strandens minimiert und die Anzahl abgeschwemmter Tiere deutlich reduziert werden (Limnex 2009).

Aufgrund der relativ hohen Betriebswassermenge und des beschränkten Speichervolumens ist es nicht möglich, den minimalen Abfluss über grössere Zeiträume aufzustocken oder länger andauernde Abflussspitzen mit Werten über 40 m^3/s zu reduzieren. Allerdings haben die umfangreichen gewässerökologischen Studien gezeigt, dass im Fall der Hasliaare eine ökologische Verbesserung mit einer Reduktion der Schwall- und Sunkraten erreicht werden kann (Limnex 2012, *Schweizer* et al. 2013b, 2013c).

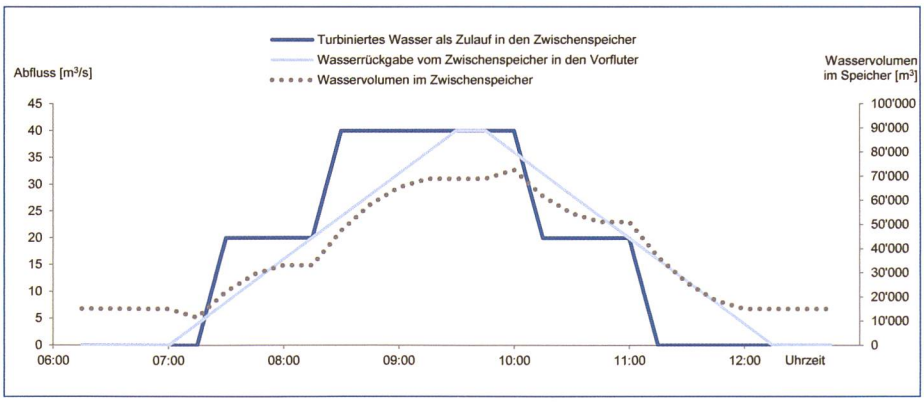


Bild 3. Schematische Darstellung der Wirkung eines zwischen Kraftwerk und Vorfluter geschalteten Ausgleichspeichers.

Konkrete Sanierungsplanung mit vier Varianten

Die hydrologische Wirkung eines Speichers hängt direkt vom zur Verfügung stehenden Volumen ab. Folgende realistische Massnahmenvarianten (Kap. 3.2) wurden näher untersucht:

- V_{IIIa} = 50 000 m³ (wie vor der Revision des GSchG vorgesehen; *Schweizer* et al. 2008) (Zustand IIIa)
- V_{IIIb} = 60 000 m³ (Zustand IIIb)
- V_{IIIc} = 80 000 m³ (Zustand IIIc)
- V_{IIId} = 100 000 m³ (Zustand IIId)

4. Abschätzung und Bewertung zukünftiger Zustände

Ziel der weiteren Untersuchungen war es, das Speichervolumen zu bestimmen, das bei einem verhältnismässigen Aufwand die Sanierungspflicht möglichst erfüllt. Allerdings bestehen aktuell noch Wissenslücken, um die Zusammenhänge zwischen Abflussregime, Morphologie und Gewässerökologie hinreichend genau beschreiben zu können, insbesondere für die Prognostizierung künftiger Zustände (*Bruder* et al. 2012a und 2012b). Daher musste bei den weiteren Schritten auf den heutigen Kenntnisstand und in bestimmten Fällen auf Vereinfachungen zurückgegriffen werden.

In *Bild 4* ist das Vorgehen schematisch dargestellt, um die ökologische Wirkung der verschiedenen Sanierungsvarianten möglichst gut abzuschätzen. Während die Stufen (a) und (b) bereits in Kap. 2 sowie in *Schweizer* et al. (2013b) beschrieben sind, wird das Vorgehen für die Schritte (c) und (d) in den beiden folgenden Unterkapiteln (4.1 und 4.2) detailliert dargestellt. Diese ersten vier Schritte sind eine wichtige Grundlage für eine abschliessende ökologische Bewertung (e) (*Schweizer* et al. 2013c).

4.1 Zustand II: Ausbau KW Innertkirchen 1 ohne Zwischenspeicher

Die Begleitgruppe und die Branchenvertreter diskutierten, welche Auswirkungen die Erhöhung der maximalen Betriebswassermenge auf das künftige Abflussregime haben könnte. In einem ersten Schritt wurde beschlossen, die Winterabflüsse der Jahre 2008 bis 2012 als Grundlage zu verwenden (Kap. 2). Daran anschliessend wurden verschiedene Varianten zur Simulation des künftigen Betriebsregimes näher untersucht (*Stalder* & *Rouge* 2012). Dabei wurden jeweils die täglichen Maximalabflüsse aus den Turbinen auf verschiedene Arten erhöht (Szenarien IIA–IID). Dies führte bei den Szenarien zu grösseren täglichen Betriebswassermengen. Da die daran anschliessende Datenanalyse ausschliesslich auf Extremwerte (95%- und 100%-Perzentile) fokussiert, konnte auf einen volumenneutralen Ausgleich, bzw. auf eine ausgeglichene Wasserbilanz bei den Szenarien verzichtet werden.

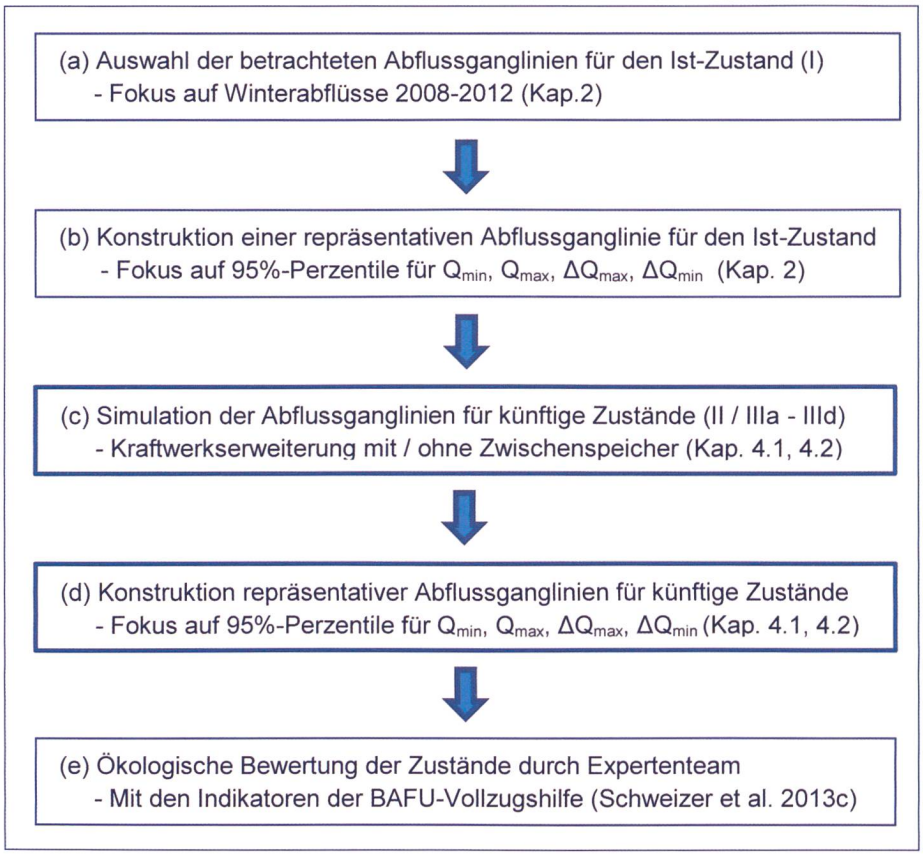


Bild 4. Mehrstufiges Vorgehen für eine Abschätzung der ökologischen Wirkung künftiger Zustände. Q_{min} = minimaler Abfluss, Q_{max} = maximaler Abfluss, ΔQ_{max} = Schwallrate, ΔQ_{min} = Sunkrate.

Szenario IIA: Generelle Erhöhung der maximalen Tagesabflüsse um jeweils 25 m³/s

Diese Simulationsvariante geht davon aus, dass künftig in den Zentralen in Innertkirchen die Stromproduktion mindestens einmal am Tag wesentlich erhöht wird. Dadurch kommt es zu einem starken Anstieg der täglichen Maximalabflüsse (jeweils +25 m³/s) sowie der Schwallraten (+100%) *(Tabelle 3)*. In den tiefen Abflussbereichen (< 8.1 m³/s), bei denen ein Stranden von Fischen möglich ist, verbleiben die Sunkraten gegenüber heute unverändert.

Die hier vollzogenen Anpassungen sind als Grenzfall zu betrachten, da bei diesem Szenario alle täglichen Maximalabflüsse erhöht wurden, obwohl unter den damals bestehenden Kraftwerksbedingungen bereits deutlich höhere Stromproduktionen möglich gewesen wären. Daher kann davon ausgegangen werden, dass vom Kraftwerksbetrieb in der Mehrheit der Fälle auch künftig keine Erhöhungen in diesem Ausmass vorgenommen werden.

Szenario IIB: Generelle Erhöhung der maximalen Abflüsse um den Faktor 95/70

In dieser Variante wird davon ausgegangen, dass die aufgetretenen Maximalabflüsse entsprechend dem Ausbauverhältnis (künftig 95 m³/s, heute 70 m³/s = 95/70 = 1.35) höher ausfallen. Aus ökologischer Sicht handelt es sich auch hier um ein tendenziell pessimistisches Szenario, da wie beim Szenario IIA alle täglichen Maximalabflüsse erhöht werden. Insgesamt fallen die hydrologischen Kennwerte aber deutlich moderater aus als bei Szenario IIA *(Tabelle 3)*.

Szenario IIC: Beschreibung der künftigen Ganglinie mit einer Normalverteilung

Für dieses Szenario wurden die winterlichen Abflussganglinien von 2008 bis 2012 hinsichtlich Mittelwert, Standardabweichung und Anzahl der Wendepunkte im Abfluss statistisch ausgewertet. Mit diesen Parametern wurde eine Normalverteilung definiert, wobei die Standardabweichung um den Faktor 95/70 erhöht wurde. Wie die Werte in *Tabelle 3* zeigen, gab es bei diesem Ansatz nur einen vernachlässigbaren Effekt auf die maximalen Abflüsse. Aufgrund der Kantonsregelung

kann auch bei diesem Szenario davon ausgegangen werden, dass der minimale Abfluss in der Aare auch künftig 3.1 m^3/s (95%-Perzentil) betragen wird (Kap. 2). Im Vergleich mit den anderen Szenarien fällt die Sunkrate dagegen etwas höher aus. Der markanteste Unterschied zeigt sich bei der Schwallrate von 2.21 $m^3s^{-1}min^{-1}$. Dies ist darauf zurückzuführen, dass zwar die Anzahl der Wendepunkte in der künstlich generierten Abflussganglinie berücksichtigt, allerdings die in der Regel hohe Korrelation zwischen vor- und nachgängigen Abflusswerten nicht korrekt wiedergegeben wird. Dadurch ergeben sich in der Zeitreihe zufällige und z.T. sehr hohe Differenzen zwischen den einzelnen Werten, wodurch unrealistisch hohe Schwall- und auch Sunkraten resultieren.

Szenario IID: Abgestufte Erhöhung der maximalen Tagesabflüsse

Grundsätzlich kann das künftige Betriebsregime auch mit einer selektiven Erhöhung der maximalen Tagesabflüsse beschrieben werden *(Tabelle 2)*.

In Absprache mit der Begleitgruppe erfolgte eine Erhöhung der Abflüsse bei Betriebswassermengen von über 34 m^3/s, wenn in der Vergangenheit etwa 50% des damals möglichen Potenzials für die Stromproduktion ausgeschöpft wurde. Eine vollständige Erhöhung um 25 m^3/s wurde bei Abflüssen über 54 m^3/s vorgenommen (bei rund ¾ des in der Vergangenheit bestehenden Potenzials). Allerdings wurde die maximal mögliche Betriebswassermenge von 70 m^3/s seit 1990 nur zweimal erreicht und lag zwischen 2005 und 2012 stets unter 60 m^3/s. Damit dürfte diese Variante das künftige Betriebsregime tendenziell ebenfalls mit etwas zu hohen Maximalabflüssen beschreiben. Falls der künftige Strommarkt unerwartet zu höheren Durchflussmengen führen sollte, dürfte dieses Szenario das künftige Betriebsregime allerdings immer noch realistisch abbilden. Daher wurde gemeinsam mit dem Expertenteam und der Begleitgruppe beschlossen, die weiteren Untersuchungen mit Szenario IID fortzuführen.

Insgesamt fallen die 95%-Perzentile der maximalen Abflüsse und der Schwallraten etwas höher aus als bisher, während der Minimumabfluss und die Sunkraten unverändert bleiben *(Tabelle 3)*.

Gesamtabfluss der Zentralen Innertkirchen 1 und 2 [m^3/s]	Selektive Erhöhung [m^3/s]
< 34	+ 0
34 bis 39	+ 5
39 bis 44	+ 10
44 bis 49	+ 15
49 bis 54	+ 20
> 54	+ 25

Tabelle 2. Selektive Erhöhung der Maximalabflüsse für Szenario IID.

4.2 Zustand IIIa – IIId: Ausbau KW Innertkirchen 1 mit verschieden grossen Zwischenspeichern

Basierend auf den Abflussganglinien von Szenario IID wurden in einem nächsten Schritt verschiedene Speichervolumina zwischen den Zentralen in Innertkirchen und der Wasserrückgabe in die Aare geschaltet (Kap.3.2).

4.2.1 Technische und ökologische Aspekte der Beckensteuerung

Vorhersagezeit für Speichersteuerung

Aufgrund von netzregulierenden Dienstleistungen (Kap. 2) bestehen bei der Stromproduktion verlässliche Vorhersagezeiten von maximal 15 Minuten. Dementsprechend wird die künftige Speichersteuerung auf diese Prognosezeiträume zurückgreifen müssen.

Möglichkeiten der Speichersteuerung

Für die Beckensteuerung ist zu beachten, dass eine optimale Dämpfung der Schwallraten i.d.R. mit einer Verschärfung der Sunkraten einhergeht (LCH 2012). Beispielhaft lässt sich dieses Phänomen wie folgt erklären: Wird ein Speicher nach dem Turbinieren nur langsam entleert, so fehlt bei einer kurz darauffolgenden Turbiniersequenz das nötige Speichervolumen für eine weitere Dämpfung der Schwallraten.

Aufgrund dieser Rahmenbedingungen wurde ein zweistufiges Optimierungsverfahren gewählt, um das Potenzial der künftigen Beckensteuerung bereits heute möglichst realistisch abschätzen zu können.

Optimierung der Sunkraten (Stufe 1)

In einem ersten Schritt wurden die Sohlenbereiche identifiziert, wo Fische potenziell stranden können (*Bilder 5* und *6*). Im Fall der Hasliaare beschränken sich diese Bereiche auf wenige Stellen in der Kiesbankstrecke (*Schneider* & *Jorde* Ecological Engineering 2012). Grundsätzlich ist ein Stranden von Fischen nur möglich, wenn die Abflusstiefe am höchsten Punkt der Fischfalle unter 20 cm fällt (*Baumann* et al. 2012). Im Fall der betrachteten potenziellen Fischfallen entspricht dies einem Abfluss von $Q_{kritisch}$ = 8.1 m^3/s. Fällt der Abfluss unter diesen kritischen Wert, sollte die Pegelrückgangsrate geringer als 0.5 cm/min ausfallen, um den Fischen genügend Reaktionszeit zu geben (*Baumann* et al. 2012). Um diesen Grenzwert einzuhalten, darf der Abflussrückgang (Sunkrate) in der Kiesbankstrecke nicht schneller als mit –0.07 $m^3s^{-1}min^{-1}$ erfolgen. Unter Berücksichtigung der Dämpfungseffekte im Längsverlauf der Hasliaare *(Tabelle 1)* ergibt sich somit eine kritische Sunkrate von –0.14 $m^3s^{-1}min^{-1}$ bei der Wasserrückgabe in Innertkirchen. Entsprechend Gleichung (1) benötigt das vollständige Zurückfahren der Wasserrückgabe von 8.1 auf 3.1 m^3/s (Minimalabfluss, Kap. 2) eine Dauer ($T_{Herunterfahren}$) von etwa 36 Minuten *(Bild 7)*. Insgesamt werden dafür gemäss den Gleichungen (2) und (3) etwa 12 500 m^3 Wasser in die Aare abgegeben. Aus den Gleichungen (1) bis (3) lässt sich somit dasjenige Wasservolumen bestimmen, das im Speicher zurückgehalten werden sollte, um das Risiko von strandenden Fischen zu minimieren. Mit der Realisierung von morpho-

	Szenario I	Szenario IIA	Szenario IIB	Szenario IIC	Szenario IID
Minimaler Abfluss Q_{min} [m^3/s]	3.1	3.1	3.1	3.1	3.1
Maximaler Abfluss Q_{max} [m^3/s]	42.2	67.2	57.3	44.5	46.6
Maximale Schwallrate ΔQ_{max} [$m^3s^{-1}min^{-1}$]	1.36	2.80	1.71	2.21	1.43
Minimale Sunkrate* ΔQ_{min} [$m^3s^{-1}min^{-1}$]	-0.70	-0.70	-0.70	-1.10	-0.70

Tabelle 3. Schwallkennwerte in der Aare unterhalb der Wasserrückgabe in Innertkirchen für den Ist-Zustand (Szenario I) und die Szenarien IIA–IID (vgl. Text). Dargestellt sind jeweils die 95%-Perzentile der Winterabflüsse.
**** Bei der Sunkrate wurden nur Abflüsse < 8.1 m^3/s berücksichtigt, da nur in diesem tiefen Abflussbereich ein Risiko vorliegt, dass aquatische Organismen stranden (Kap. 4.2.1).***

logischen Aufwertungen in der Schwallstrecke (Kap. 2) würde der kritische Abfluss $Q_{kritisch}$ etwas höher als heute ausfallen und dementsprechend eine grössere Wassermenge für einen gedämpften Abflussrückgang erfordern.

$$T_{Herunterfahren} = \frac{Q_{kritisch} - Q_{Minimum}}{|\Delta Q_{Min}|} \quad (1)$$

$T_{Herunterfahren}$ = Dauer für langsames Herunterfahren der Wasserrückgabe, [min] $Q_{kritisch}$ = 8.1 m^3/s, $Q_{Minimum}$ = 3.1 m^3/s (95%-Perzentil), ΔQ_{min} = Sunkrate = -0.14 $m^3s^{-1}min^{-1}$.

Auf Minutenbasis lässt sich mit den Gleichungen (2) und (3) dasjenige Wasservolumen V_{Wasser} [m^3] bestimmen, das für diese sanfte Reduzierung der Wasserrückgabe nötig ist.

$$V_{Wasser} = \sum_{i=1}^{T_{Herunterfahren}} \{Q_i \cdot \Delta t\} \quad (2)$$

Mit Q_i = Abfluss [m^3/s] zum Zeitpunkt i [min], einer zeitlichen Auflösung von Δt = 1 Minute und mit:

$$Q_{i+1} = Q_i - |\Delta Q_{Min}| \quad (3)$$

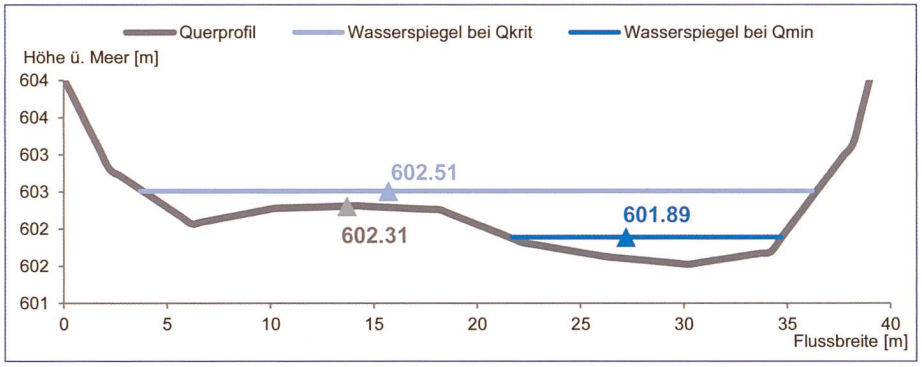


Bild 5. Querprofil der Hasliaare in der Kiesbankstrecke. Links vom grauen Dreieck befindet sich eine potenzielle Fischfalle. Der höchste Punkt der Fischfalle liegt bei 602.31 m ü.M. (graues Dreieck), 20 cm oberhalb davon (bei 602.51 m ü.M., hellblaues Dreieck) beträgt der Abfluss Q_{krit} = 8.1 m^3/s. Der Wasserstand beim minimalen Abfluss Q_{min} = 3.1 m^3/s (95%-Perzentil; Tabelle 3) liegt bei 601.89 m ü.M. (dunkelblaues Dreieck).

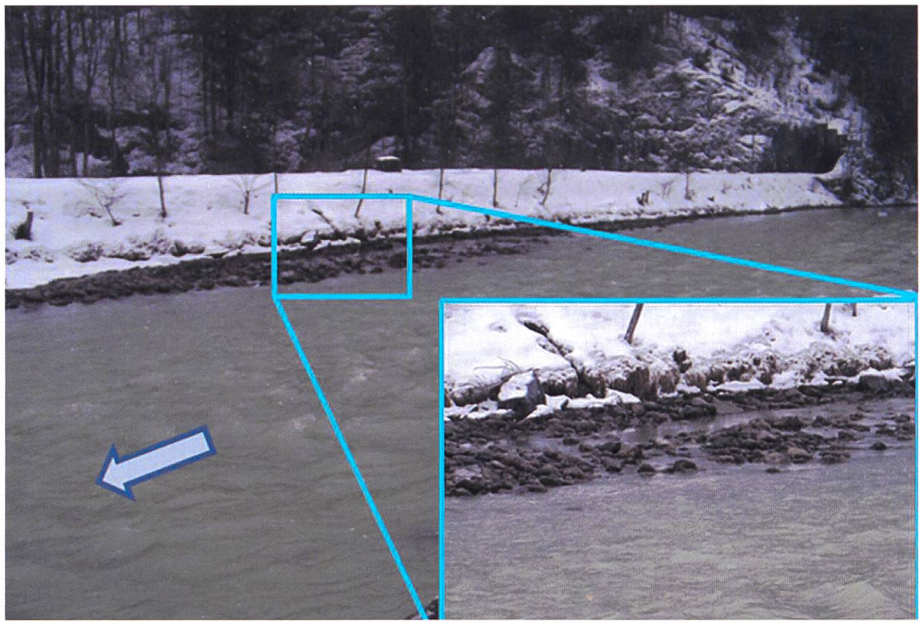


Bild 6. Potenzielle Fischfalle in der Hasliaare. Der blaue Pfeil gibt die Fliessrichtung an.

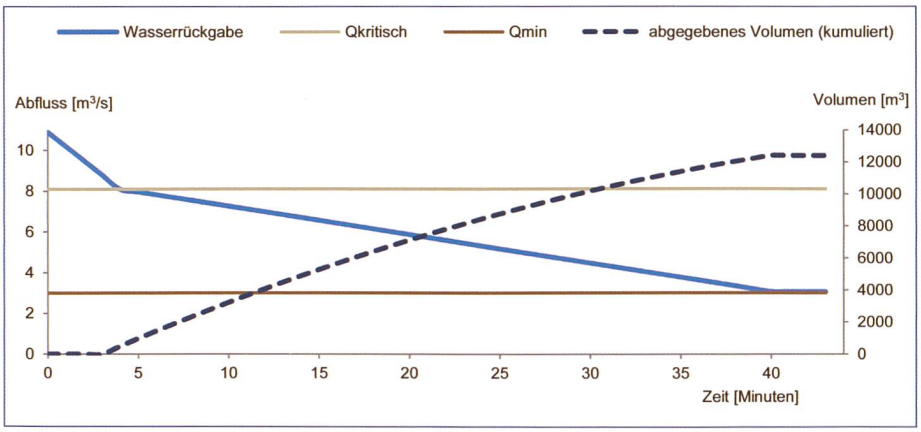


Bild 7. Schematische Darstellung der sanften Reduktion des Beckenausflusses (mit einer Sunkrate von –0.14 $m^3s^{-1}min^{-1}$) und der dabei kumulierten abgegebenen Wassermenge. Q_{min} = minimaler Abfluss mit 3.1 m^3/s (95%-Perzentil), $Q_{kritisch}$ = 8.1 m^3/s.

Optimierung der Schwallraten (Stufe 2)

Ausgehend von der Optimierung der Sunkraten kann in einem nächsten Schritt versucht werden, die Schwallraten möglichst stark zu dämpfen. Konkret wurde bei den anschliessenden Simulationen die Randbedingung eingefügt, dass stets ein Wasservolumen von 12 500 m^3 im Speicher für ein sanftes Zurückfahren zur Verfügung steht. Das restliche Volumen im Speicher stand dagegen ausschliesslich für die effiziente Dämpfung der Schwallraten zur Verfügung. Die so gewählte Steuerung des Zwischenspeichers entspricht zwar einer relativ starken Vereinfachung, ist allerdings nach heutigem Kenntnisstand angemessen genau und aus mathematischer Sicht grundsätzlich zulässig.

4.2.2 Ergebnisse für die verschiedenen Speichervolumina

Abhängig von der Grösse des Speichers können unterschiedlich starke Dämpfungen bei den Schwallraten erzielt werden *(Tabelle 4)*. Verglichen mit dem heutigen Zustand fallen bereits beim kleinsten betrachteten Volumen (Szenario IIIa) die Schwallraten mit 0.9 $m^3s^{-1}min^{-1}$ (95%-Perzentil) deutlich tiefer aus als heute. Mit einer Erhöhung der Speichervolumina lassen sich die Schwallraten dementsprechend weiter reduzieren.

Aufgrund der gewählten Vereinfachung bei den Speichersimulationen unterscheiden sich die Sunkraten zwischen den einzelnen Szenarien nicht. Allerdings können mit grösseren Speichervolumina auch bei künftigen morphologischen Aufwertungen strengere Kriterien bei den Sunkraten eingehalten werden (*Schweizer* et al. 2013c).

Diese hydrologischen Simulationen sind eine essenzielle Grundlage, um die ökologische Wirkung verschiedener Sanierungsmassnahmen abschätzen zu können.

Szenario	Volumen gesamt [m^3]	Volumen für Sunkdämpfung [m^3]	Volumen für Schwalldämpfung [m^3]	Schwallrate [$m^3s^{-1}min^{-1}$]	Sunkrate* [$m^3s^{-1}min^{-1}$]	Minimaler Abfluss [m^3/s]	Maximaler Abfluss [m^3/s]
IIIa	50'000	12'500	37'500	0.90	-0.14	3.1	46.5
IIIb	60'000	12'500	47'500	0.80	-0.14	3.1	46.5
IIIc	80'000	12'500	67'500	0.70	-0.14	3.1	46.4
IIId	100'000	12'500	87'500	0.52	-0.14	3.1	46.2

Tabelle 4. Schwallkennwerte unterhalb der Wasserrückgabe in Innertkirchen für die Szenarien IIIa–IIId (Kap.3.2 und 4.2), jeweils 95%-Perzentile der Winterabflüsse. Die entsprechenden Werte für die Szenarien I und II sind in Tabelle 3 dargestellt.
**** Bei der Sunkrate wurden nur Abflüsse < 8.1 m^3/s in der Aare berücksichtigt (vgl. 4.2.1).***

5. Diskussion

5.1 Betrachtung der Unsicherheiten hinsichtlich Betriebsregime

In Absprache mit Begleitgruppe und Expertenteam wurden folgende Annahmen hinsichtlich des Betriebsregimes getroffen:

- «Mit den Produktionsdaten von 2008 bis 2012 wird das künftige Betriebsregime (ohne Kraftwerkserweiterung) am besten wiedergegeben.»
  Da die Produktion von Sonnen- und Windenergie nicht planbar und nur beschränkt vorhersagbar ist, wird den Speicherkraftwerken auch künftig eine wichtige Funktion bei der Netzregulierung zukommen. Bereits seit 2008 bietet die KWO dafür notwendige Systemdienstleistungen an (Kap. 2). Aufgrund dieser Rahmenbedingungen dürften die Produktionsdaten von 2008 bis 2012 das künftige Betriebsregime (ohne Kraftwerkserweiterung) auf eine realistische Art und Weise beschreiben.
- «Aus ökologischer Sicht liegt der Fokus auf den winterlichen Abflüssen.»
  Während den Wintermonaten fallen die Änderungen des Abflussregimes und damit die Effekte auf die Lebensraumbedingungen am stärksten aus. Ausserdem finden in dieser Jahreszeit diverse gewässerökologische Schlüsselprozesse (u.a. Laichzeit der Salmoniden, Entwicklung von verschiedenen Arten der Wirbellosen) statt. In Absprache mit den Experten und den Begleitgruppenmitgliedern (Kap. 2) ist daher der Fokus der hydrologischen und ökologischen Abklärungen auf die Wintermonate zu legen. Für bestimmte Thematiken (z.B. Lebenszyklus der Fische) wurden bei der anschliessenden ökologischen Beurteilung allerdings auch die anderen Jahreszeiten miteinbezogen.
- «Der Einfluss der Kraftwerkserweiterung auf das künftige Betriebsregime wird mit einer abgestuften Erhöhung (Szenario IID) nicht unterschätzt.»
  Mit dem Einbau einer zusätzlichen Turbine in der Zentrale Innertkirchen 1 wird die maximal mögliche Betriebswassermenge um 25 m^3/s erhöht (Kap. 4.1). Die abgestufte Erhöhung der Abflüsse beginnt bereits, wenn in der Vergangenheit 50% des damals möglichen Potenzials für die Stromproduktion ausgeschöpft wurde. Die vollständige Erhöhung wird erreicht, wenn in den historischen Daten 75% des damals zur Verfügung stehenden Leistungsvermögens ausgenutzt wurde. Diese Anpassungen wurden vorgenommen, obwohl eine maximale (winterliche) Stromproduktion zuletzt im Jahr 2005 auftrat. Aus ökologischer Sicht beschreibt das Szenario IID das künftige Betriebsregime daher tendenziell etwas ungünstiger, als es aus heutiger Sicht zu erwarten wäre.

5.2 Betrachtung der Unsicherheiten hinsichtlich Speichersteuerung

Um die künftige Steuerung des Speichers so realistisch wie möglich simulieren zu können, wurden in Absprache mit Begleitgruppe und Expertenteam folgende Vereinfachungen vorgenommen:

- Die zeitliche Retention zwischen Turbinenausfluss und Speicherstollen und -becken von knapp 10 Minuten wird nicht berücksichtigt. Grundsätzlich wird das künftige Einbeziehen dieser zeitlichen Verzögerung eine effizientere Speichersteuerung erlauben.
- Das Bereitstellen eines Reservevolumens für absolute Extremfälle (z.B. Hochfahren der Stromproduktion von 0 auf 95 m^3/s innerhalb weniger Minuten) wurde bei den durchgeführten Simulationen nicht einbezogen. Allerdings wird bei der Feinplanung auch dieser Aspekt berücksichtigt und detailliert betrachtet.
- Aufgrund der Datengrundlage (Stromproduktion und Abflussdaten) wurde eine zeitliche Auflösung von 15 Minuten gewählt, die ausreichend genau sein dürfte, um die Effekte vom Schwallbetrieb adäquat beschreiben zu können.
- Aufgrund (noch) fehlender Kenntnisse über die genauen Zusammenhänge zwischen Abflussregime, Morphologie und Gewässerökologie (*Bruder* et al. 2012a, 2012b) konnten weitere Optimierungen bei der Steuerung des Speichers nicht berücksichtigt werden. Das umfangreiche Untersuchungsprogramm legt eine Fokussierung auf die Abflussgradienten (Dämpfung der Schwallraten im gesamten Abflussbereich sowie Reduktion der Sunkraten im tiefen Abflussbereich) nahe. Nach Inbetriebnahme des Zwischenspeichers müssen die angestrebten Grenzwerte und die ökologische Wirkungen in der Praxis überprüft werden. Aus ökologischer Sicht sind weitere Optimierungsmöglichkeiten in der Speichersteuerung denkbar, wie beispielsweise mit einem abgestuften Hochfahren der Wasserrückgabe (Vorschwall; Limnex 2009) oder saisonal variierenden Grenzwerten (z.B. während der Laichzeit).

Die künftige Steuerung muss automatisiert erfolgen und verschiedene Faktoren wie beispielsweise Betriebsregime, Speicherfüllung (Beruhigungsbecken und Stollen), aktuelle Wasserrückgabe und momentaner Abfluss in der Aare berücksichtigen. Bei einer künftigen Veränderung der morphologischen Verhältnisse in der Schwallstrecke (Kap. 2) ist eine Anpassung der anzustrebenden Grenzwerte wahrscheinlich (Kap. 4.2.1).

5.3 Grundlagen für eine möglichst objektive Auswahl der umzusetzenden Sanierungsvariante

Der letztliche Entscheid für oder gegen eine Sanierungsmassnahme hängt sowohl von den Kosten als auch von den erwarteten ökologischen Wirkungen ab. Während sich die finanziellen Aufwendungen relativ genau abschätzen lassen, bestehen relativ grosse Unsicherheiten hinsichtlich der ökologischen Effekte. Trotz bestehender Unsicherheiten bei den hydrologischen Simulationen (Kap. 5.1 und 5.2) ist es möglich, das künftige Abflussregime relativ

genau vorherzusagen. In einem nächsten Schritt können die Abflussganglinien der verschiedenen Szenarien als wichtige Grundlage für eine ökologische Bewertung verwendet werden (*Schweizer* et al. 2013c).

Wenn den lokalen Gegebenheiten (z.B. Betriebsregime, gewässerökologische Situation, wirtschaftliche und raumplanerische Rahmenbedingungen) ausreichend Rechnung getragen wird, kann das hier beschriebene Vorgehen auch bei anderen Sanierungsfällen angewendet werden.

Danksagung

Für die fachlich hervorragende Zusammenarbeit möchten sich die Autoren ganz herzlich bei *Manfred Kummer, Martin Huber Gysi, Daniel Hefti* (alle Bundesamt für Umwelt) und *Vinzenz Maurer* (Amt für Wasser und Abfall) bedanken. *Catherine Mathez* (BWU), *Bernhard Luder* (BAFU), *Matthias Meyer, Sandro Schläppi, Heinz Peter Tscholl, Oliver Kost, Jan Baumgartner, Daniel Fischlin* (alle KWO), *Peter Büsser, Stephanie Schmidlin* (Limnex), *Kurt Wächter* (Limnex), *Matthias Schneider* (SJE), *Jeff Tuhtan* (SJE) und *Michael Döring* (eQcharta) gebührt ein grosser Dank für die wertvollen Anmerkungen und für das kritische Durchlesen des Manuskripts.

Literatur

Baumann P., Kirchhofer A. und *Schälchli U.* (2012): Sanierung Schwall/Sunk – Strategische Planung. Ein Modul der Vollzugshilfe Renaturierung der Gewässer. Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Vollzug Nr. 1203.

Bieri M. (2012): Operation of Complex Hydropower Schemes and its Impact on the Flow Regime in the Downstream River System under Changing Scenarios. Diss. EPFL No 5433., Zürich, Schweiz.

Bruder A., Schweizer S., Vollenweider S., Tonolla D. und *Meile T.* (2012a): Schwall und Sunk: Auswirkungen auf die Gewässerökologie und mögliche Sanierungsmassnahmen. «Wasser Energie Luft» 2012 (4): 257–264.

Bruder A., Vollenweider S., Schweizer S., Tonolla D. und *Meile T.* (2012b): Schwall und Sunk: Planung und Bewertung von Sanierungsmassnahmen – Möglichkeiten und Empfehlungen aus wissenschaftlicher Sicht. «Wasser Energie Luft» 2012 (4): 265–273.

LCH (2012): Betrieb des Dämpfungsbeckens Innertkirchen. Bestimmung der Schwallkennwerte für die Hasliaare unter Berücksichtigung einer ökologisch optimalen Beckensteuerung. EPFL-LCH, Lausanne, Rapport LCH Nr. 13/2012, 15 Seiten. Bericht im Auftrag der KWO (Autoren: *Bieri M.* & *Meile T.*).

Limnex (2009): Schwall-Sunk in der Hasliaare. Gewässerökologische Untersuchungen von Hasliaare und Lütschine und Beurteilung der Schwall-Auswirkungen in je zwei Strecken und Szenarien. Bericht im Auftrag der KWO. (Autoren: Baumann P.,Wächter K. und Vogel U.).

Limnex (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 im Auftrag der KWO.(Autoren: *Baumann P., Schmidlin S., Wächter K., Peter A.* und *Büsser P.).*

Person E., Bieri M., Peter A. und *Schleis A.* (2013): Mitigation measures for fish habitat improvement in Alpine rivers affected by hydropower operations. Ecohydrology 2013, 20 Seiten.

Schneider & *Jorde* Ecological Engineering (2012): Casimir-Modellierungen zur Ermittlung der Indikatoren F2 und F3 in drei schwallbeeinflussten Strecken der Hasliaare für den Ist-Zustand und weitere Szenarien. Bericht im Auftrag der KWO. (Autoren: *Schneider M., Kopecki I.* und *Tuhtan J.).*

Schweizer S., Neuner J., Ursin M., Tscholl H. und *Meyer M.* (2008): Ein intelligent gesteuertes Beruhigungsbecken zur Reduktion von künstlichen Pegelschwankungen in der Hasliaare. «Wasser Energie Luft» 2008(3): 209–215.

Schweizer S., Neuner J. und *Heuberger N.* (2009): Bewertung von Schwall/Sunk – Herleitung eines ökologisch abgestützten Bewertungskonzepts. «Wasser Energie Luft 2009» (3): 194–202.

Schweizer S., Meyer M., Heuberger N., Brechbühl S. und *Ursin M.* (2010): Zahlreiche gewässerökologische Untersuchungen im Oberhasli. «Wasser Energie Luft» 2010(4): 289–300.

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

Schweizer S., Meyer M., Wagner T. und *Zeh Weissmann H.* (2012b): Gewässerökologische Aufwertungen im Rahmen der Restwassersanierung und der Ausbauvorhaben an der Grimsel. «Wasser Energie Luft» 2012(1): 30–39.

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

Schweizer S., Schmidlin S., Tonolla D., Büsser P., Meyer M., Monney J., Schläppi S., Schneider M., Tuhtan J. und *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): 200–207.

Schweizer S., Schmidlin S., Tonolla D., Büsser P., Maire A., Meyer M., Monney J., Schläppi S., Schneider M., Theiler Q., Tuhtan J. und *Wächter K.* (2013c): Schwall/Sunk-Sanierung in der Hasliaare – Phase 2b: Ökologische Bewertung von künftigen Zuständen. «Wasser Energie Luft» 2013(4): 275–285.

Stalder P. und *Rouge M.* (2012): Steuerung des Beruhigungsbeckens am Standort Innertkirchen. Schlussbericht des Desing-Projekts «Science et ingenierie de l'environment 2012. Betreuung Prof. Dr. *A. Schleiss* und Dr. *S. Schweizer.*

Anschrift des Verfassers
Steffen Schweizer
Kraftwerke Oberhasli AG
Grimselstrasse, CH-Innertkirchen
sste@kwo.ch
Tel. +41 33 982 20 19

Schwall/Sunk-Sanierung in der Hasliaare

Phase 2b: Ökologische Bewertung von künftigen Zuständen

Steffen Schweizer, Stephanie Schmidlin, Diego Tonolla, Peter Büsser, Adrien Maire, Matthias Meyer, Judith Monney, Sandro Schläppi, Matthias Schneider, Quentin Theiler, Jeff Tuhtan, Kurt Wächter

Zusammenfassung

Im Rahmen des Investitionsprogramms KWO plus plant die Kraftwerke Oberhasli AG eine Erweiterung der Zentrale Innertkirchen 1. Damit wird die heute maximal mögliche Wasserrückgabe in die Hasliaare von 70 m³/s auf künftig 95 m³/s erhöht. Im Vorfeld wurde daher die gewässerökologische Situation in dieser Schwallstrecke mit biologischen, hydraulischen und hydrologischen Erhebungen umfassend untersucht. Gemeinsam mit Fachexperten (Limnex AG, Eawag, Peter Büsser, Schneider & Jorde Engineering, EPFL-LCH) und Vertretern des Bundesamts für Umwelt (BAFU) und des Amts für Wasser und Abfall des Kantons Bern (AWA) wurde eine ökologische Defizitanalyse durchgeführt. Basis dafür war die (erstmalige) vollständige Anwendung der zwölf Bewertungsindikatoren der BAFU-Vollzugshilfe «Sanierung Schwall/Sunk». Insbesondere wurde dabei der Einfluss der Morphologie als erheblicher Faktor berücksichtigt.

Anschliessend wurden verschiedene Sanierungsvarianten ökologisch bewertet. Da für diese Phase der Schwall/Sunk-Sanierung (noch) keine Methodik entwickelt ist, wurde auf die bestehende Vollzugshilfe zurückgegriffen. Trotz verschiedener, methodischer, Unsicherheiten konnte schliesslich die Sanierungsmassnahme mit dem besten Kosten/Nutzen-Verhältnis transparent, nachvollziehbar und nach aktuellem Wissensstand identifiziert werden. Seit Frühjahr 2013 wird zwischen dem Kraftwerk in Innertkirchen und der Wasserrückgabe ein Zwischenspeicher (Beruhigungsbecken und Speicherstollen) mit einem Volumen von rund 80 000 m³ realisiert. Damit lassen sich die Pegeländerungsraten deutlich reduzieren und die Reaktionszeiten für die aquatischen Organismen werden verlängert.

Nach der Fertigstellung im Jahre 2016 wird ein umfassendes Monitoring durchgeführt. Dieser erste Sanierungsfall gemäss GSchG liegt insgesamt weit vor dem offiziellen Zeitplan des BAFU. Künftige Projekte können von den hier gewonnenen Erfahrungswerten und Wissenserweiterungen profitieren. Unabhängig von der Komplexität eines Sanierungsfalls lässt sich der hier beschriebene Ansatz anwenden: Beispielsweise wenn neben der hydrologischen Sanierung auch eine Erhöhung der maximalen Wasserrückgabe geplant ist oder wenn ein Zwischenspeicher sowohl zur Schwallsanierung als auch zur Pumpspeicherung ausgenützt werden soll.

Abstract

With the planed extension of the power station in Innertkirchen by the Kraftwerke Oberhasli AG (KWO) the maximum possible outflow from the turbines into the Hasliaare will increase from 70 m³/s to 95 m³/s.

For the identification of realistic measures to mitigate hydropeaking effects on aquatic organisms a comprehensive study including biological, hydraulic and hydrological aspects has been successfully finished.

This ecological deficit analysis of the actual state of the river was conducted with the support of an expert team (Limnex AG, Eawag, Peter Büsser, Schneider & Jorde Ecological Engineering, EPFL-LCH) and a group of representatives of the Federal Office for the Environment (FOEN) and the cantonal office of water and waste (Bern).

This deficit analysis is the first applying the complete FOEN's 12 hydropeaking indicator criteria., while taking impacts of the local river morphology into account (for a final evaluation).

The spectrum of mitigation measures was evaluated in terms of their hydrological and ecological efficiency. Despite the uncertainties in the ecological responses and the operation mode of the powerplant in the future, it was possible to identify the mitigation measure with the best cost-benefit-ratio: The construction of a storage of 80 000 m³ (retention basin and storage tunnel) between the power plant and downstream outlet allows the reduction of up and down-ramping rates in discharge significantly. This will provide longer response times for the aquatic organisms to move to adequate (refuge) habitats under different discharge conditions. After the realization of the mitigation measures (scheduled for 2016) a comprehensive monitoring program is scheduled to evaluate the expected ecological improvements. Overall experiences from this study are expected to stimulate and support other projects on hydropeaking mitigation.

1. Einleitung

Im letzten Jahrhundert wurden in den Alpen zahlreiche Speicherseen gebaut, um das zufliessende Wasser zurückzuhalten und es zu einem späteren Zeitpunkt bei Bedarf zur Stromproduktion zu verwenden. Mit Hilfe der Stauseen lässt sich ein Teil der Stromproduktion vom Sommer in den Winter verlagern, um damit auch in der kalten und niederschlagsarmen Jahreszeit regelmässig auftretende Engpässe im Stromnetz schliessen zu können.

Diese aus energiepolitischer Perspektive betrachteten Vorzüge sind allerdings mit sehr unregelmässigen Abflüssen aus den Kraftwerksturbinen verbunden. Wird das turbinierte Wasser direkt in den Vorfluter abgegeben, entstehen unterhalb der Wasserrückgabe künstliche Pegelschwankungen (Schwall/Sunk). Für die aquatischen Organismen kann dieses künstliche Abflussregime weitreichende Folgen nach sich ziehen (*Schweizer* et al. 2009, *Bruder* et al. 2012a und 2012b).

Die 2011 in Kraft getretene Revision des Gewässerschutzgesetzes (GSchG) sieht vor, dass die wesentlichen Beeinträchtigungen durch Schwall/Sunk bis zum Jahr 2030 behoben werden. Dafür sind in erster Linie bauliche Massnahmen (z.B. Beruhigungsbecken zur Reduktion der Geschwindigkeit von Abflusszu- oder -abnahme oder Direktableitung des turbinierten Wassers in ein grösseres Gewässer) geplant. Auf Antrag der Kraftwerksbetreiber können aber auch betriebliche Massnahmen (Einhaltung von Grenzwerten bei der Wasserrückgabe) oder eine Kombination aus baulichen und betrieblichen Sanierungsformen umgesetzt werden.

Die Kosten für die Sanierungsmassnahmen werden vom Stromkonsumenten durch eine Abgabe von 0.1 Rappen pro kWh getragen, wobei diese Beiträge auch für die Sanierung von Geschiebehaushalt und zur Wiederherstellung der Fischgängigkeit verwendet werden. Die Abgaben werden von der Swissgrid AG, der Betreiberin der Übertragungsnetze, verwaltet.

Die Umsetzung der Schwall/Sunk-Sanierung ist in insgesamt vier Phasen gegliedert: Defizitanalyse des Ist-Zustands bis Ende 2014 (Phase 1), Variantenstudium von möglichen Sanierungsmassnahmen (Phase 2), Umsetzung der ausgewählten Sanierungsmassnahme(n) (Phase 3) und Erfolgskontrolle nach der Umsetzung (Phase 4).

In der vom BAFU herausgegebenen Vollzugshilfe «Sanierung Schwall/Sunk – Strategische Planung» (*Baumann* et al. 2012) werden insgesamt zwölf Indikatoren beschrieben, mit denen bestimmt werden kann, ob in einem Fliessgewässer eine wesentliche Beeinträchtigung durch Schwall/Sunk vorliegt (Phase 1). Zur Unterstützung der Kraftwerksinhaber und der Behörden (Kanton und Bund) wird vom BAFU aktuell eine einheitliche Methodik erarbeitet, um die ökologische Wirkung künftiger Sanierungsmassnahmen bewerten zu können (Veröffentlichung für Sommer 2014 vorgesehen).

Im Rahmen des Investitionsprogramms KWO plus erweitert die Kraftwerke Oberhasli AG (KWO) unter anderem das Kraftwerk Innertkirchen 1 (Projekt «Tandem»; *Schweizer* et al. 2012). Zur Erhöhung der Stromproduktion und der Leistung wird in dieser Zentrale eine zusätzliche Turbine mit einem Maximaldurchfluss von 25 m^3/s eingebaut. Ohne Gegenmassnahmen würde diese Kraftwerkserweiterung zu einer Verschärfung der künstlichen Pegelschwankungen führen. Daher wurden bereits im Vorfeld und somit mehrere Jahre vor der Revision des GSchG zahlreiche gewässerökologische Untersuchungen durchgeführt (*Schweizer* et al. 2013a, 2013b) sowie die Wirkung möglicher Dämpfungsmassnahmen analysiert (Schweizer et al. 2008, 2013c).

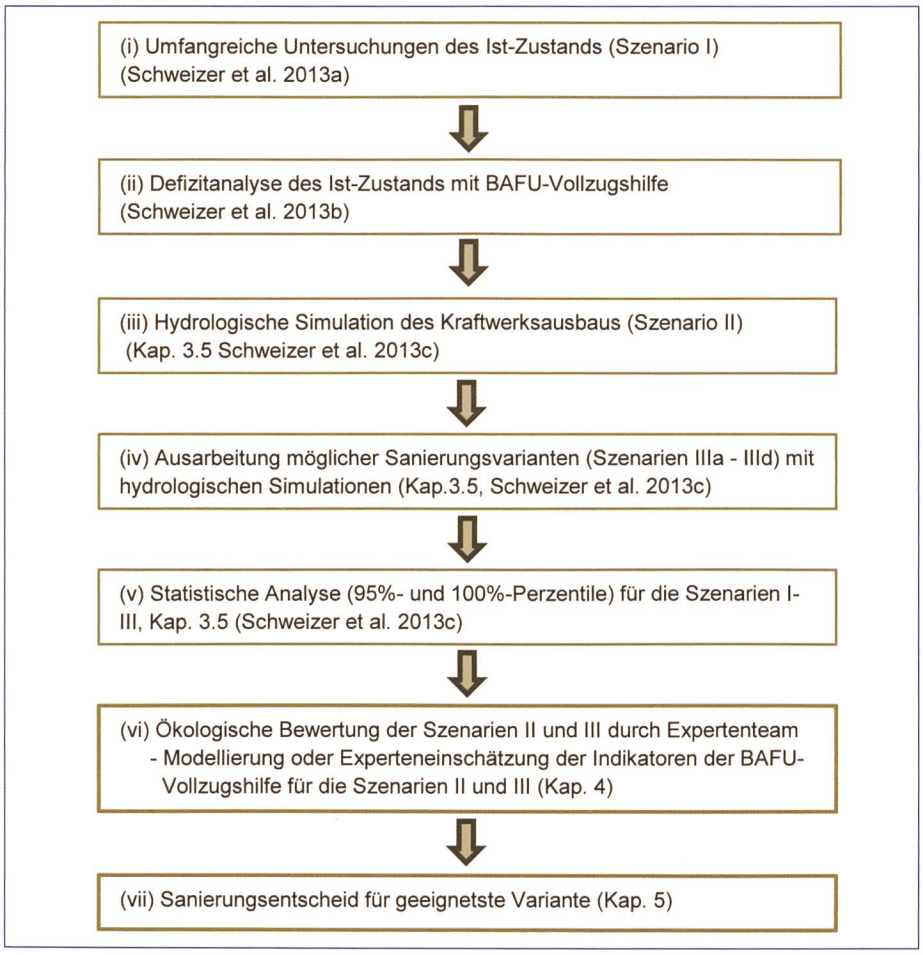


Bild 1. Arbeitsschritte bei der Sanierung Schwall/Sunk für die Fallstudie Hasliaare.

2. Vorgehensweise bei der Sanierung von Schwall/Sunk in der Hasliaare

In *Bild 1* sind die verschiedenen Arbeitsschritte, die bei der Fallstudie Hasliaare durchlaufen wurden, dargestellt. Die sehr gute Datengrundlage (i) ermöglichte eine vollständige Defizitanalyse gemäss BAFU-Vollzugshilfe (ii). Mit hydrologischen Simulationen konnte das künftige Betriebsregime der Zentralen in Innertkirchen für die Wintermonate abgeschätzt werden (iii). Anschliessend wurden verschiedene Sanierungsvarianten weiterverfolgt, die zu einer Verbesserung der gewässerökologischen Situation in der Hasliaare führen dürften. Für die ausgewählten Szenarien wurden hydrologische Modellrechnungen der Winterabflüsse vorgenommen (iv) und aus diesen Simulationsergebnissen die 95%- und die 100%-Perzentile der wichtigsten Schwallkennwerte ermittelt (v). Auf Basis dieser Grundlagen wurden die ökologischen Auswirkungen für jedes Szenario von einem Expertenteam beurteilt. Dafür wurden die 12 Indikatoren der Vollzugshilfe herangezogen (vi). Abschliessend wurde in der Begleitgruppe die Sanierungsvariante bestimmt, die aus heutiger Sicht hinsichtlich Kosten und ökologischer Wirkung am besten abschneidet (vii).

Diese mehrstufige Herangehensweise orientierte sich am aktuellen Kenntnisstand in der komplexen Thematik «Schwall/Sunk». Die intensive Zusammenarbeit von Experten und Amtsvertretern (Kap. 3.3) ermöglichte, dass trotz bestehender Wissenslücken über die quantitativen und qualitativen Zusammenhänge von Abflussregime, Morphologie sowie aquatischer Flora und Fauna künftige Zustände möglichst objektiv bewertet werden konnten.

3. Grundlagen

3.1 Abflussregime der Hasliaare

In Innertkirchen beträgt der mittlere jährliche Abfluss 35 m^3/s, der natürliche Niedrigwasserabfluss Q_{347} 2.4 m^3/s (basierend auf den Abflussdaten von 1913–1921) und das zweijährige Hochwasser 190 m^3/s. Sohlenbewegungen treten bei Abflüssen oberhalb von 150 m^3/s auf (*Schweizer* et al. 2010). Aufgrund des hohen Gletscheranteils von

rund 20% würde ohne Kraftwerkseinfluss ein glazio-nivales Abflussregime für die Hasliaare resultieren.

Die maximalen Wassermengen, die in die Hasliaare zurückgegeben werden können, betragen im Kraftwerk Innertkirchen 1 heute 40 m^3/s und künftig 65 m^3/s sowie im Kraftwerk Innertkirchen 2 (heute und künftig) 30 m^3/s. Hinsichtlich Schwall/Sunk treten die grössten Beeinträchtigungen des Abflussregimes im Winter auf. Während der natürlichen Niedrigwasserperiode bewirken vor allem die unnatürlich schnellen Anstiege der Pegel sowie die Erhöhung der Abflussspitzen negative Folgen für die aquatischen Organismen (*Schweizer* et al. 2013a). Während heute keine Grenzwerte für den maximalen Abfluss und die Schwall- und Sunkraten eingehalten werden müssen, regelt eine Vereinbarung zwischen der KWO und dem Kanton den Minimalabfluss in der Aare. Demzufolge liegt der Abfluss in der Hasliaare stets bei mindestens 3 m^3/s.

Bild 2. Kiesbank- und Kanalstrecke in Meiringen (Fliessrichtung von links unten nach rechts oben).

3.2 Die Schwallstrecke und die Lütschine als Referenzgewässer

Die Schwallstrecke lässt sich in vier morphologisch unterschiedliche Abschnitte gliedern:

- Buhnenstrecke in Innertkirchen (Länge 0.7 km, Breite 27 m)
- Aareschlucht (Länge 1.9 km, Breite z.T. kleiner als 10 m)
- Kiesbankstrecke in Meiringen (Länge 1.4 km, Breite 34 m, *Bild 2*)
- Kanal zwischen Meiringen und Brienzersee (Länge 11.5 km, Breite 20 m, *Bild 2*)

Aufgrund der sehr hohen Beschattung und einer ausgeprägten seitlichen Einengung in der Aareschlucht konzentrierten sich die Bewertungen auf die übrigen drei Streckenabschnitte. Grundsätzlich kann die Schwallstrecke in diesen Abschnitten als morphologisch stark beeinträchtigt charakterisiert werden. Im Rahmen von Hochwasserschutzprojekten und Ausgleichsmassnahmen für das Investitionsprogramm KWO plus (*Schweizer* et al. 2012) sind verschiedene morphologische Aufwertungen in der Schwallstrecke geplant.

Neben der Schwallstrecke erfolgten auch eingehende Untersuchungen in der benachbarten und hydrologisch nur geringfügig beeinflussten Lütschine, die aufgrund ihrer Ähnlichkeit hinsichtlich Vergletscherung, dem natürlichen Abflussregime und der Morphologie (Kanal- und Kiesbankstrecken) als Referenzgewässer gut geeignet ist.

3.3 Experten- und Begleitgruppe

Um sowohl die heutige Situation als auch künftige Szenarien mit Kraftwerksausbau und verschiedenen schwalldämpfenden Massnahmen (Kap. 3.5) beurteilen zu können, wurden die gewässerökologisch relevanten Aspekte von einem Expertenteam (Limnex, Eawag, *Büsser*, EPFL-LCH, *Schneider* & *Jorde* Ecological Engineering) untersucht. Ausserdem wurden diese Arbeiten in einer Begleitgruppe mit Vertretern vom Amt für Wasser und Abfall des Kantons Bern (*Judith Monney* und *Vinzenz Maurer*) und vom Bundesamt für Umwelt (*Manfred Kummer, Diego Tonolla, Martin Huber-Gysi* und *Daniel Hefti*) besprochen und koordiniert. Nachdem die wichtigsten Abklärungen durchgeführt waren und alle relevanten Untersuchungsergebnisse vorlagen, wurden im Rahmen eines Expertenworkshops die verschiedenen Szenarien anhand der BAFU-Vollzugshilfe gemeinsam bewertet. Dabei wurde für jeden Indikator eine Gesamtbewertung über die drei Gewässerabschnitte (vgl. Kap. 3.2) von den Experten gemeinsam festgelegt.

3.4 Aufnahme des Ist-Zustands (Szenario I)

Für den heutigen Zustand bieten die umfassenden Untersuchungen zu den Aspekten Fischfauna, Makrozoobenthos (MZB), Wasserpflanzen, Lebensräume, Hydraulik und Hydrologie eine solide Grundlage, um alle zwölf Indikatoren der Vollzugshilfe anzuwenden (*Schweizer* et al. 2013a). Die vollständige Bewertung zeigte eine wesentliche Beeinträchtigung durch Schwall/Sunk an (*Schweizer* et al. 2013b).

3.5 Hydrologische Simulationen für fiktive Zustände (Szenarien II und III)

Um auch Szenarien mit Kraftwerksausbau (Szenario II) und mögliche Sanierungsmassnahmen (Szenarien IIIa-d) ökologisch beurteilen zu können, wurden verschiedene Abflusssimulationen auf Basis der Winterabflüsse von 2008 bis 2012 durchgeführt (*Schweizer* et al. 2013c).

Kraftwerksausbau (Szenario II)

In Absprache mit der Begleitgruppe (Kap. 3.3) wurde in einem ersten Schritt versucht, die Auswirkungen des Kraftwerksausbaus (Kap. 3.1) auf das künftige Abflussregime abzuschätzen. Dafür wurden die historischen Abflussspitzen oberhalb von 34 m^3/s (etwa 50% des heute maximal möglichen Kraftwerksdurchflusses) stufenweise erhöht. Eine vollständige Erhöhung um 25 m^3/s erfolgte bei Kraftwerksdurchflüssen von 54 m^3/s (etwa 75% der heutigen Kapazität) (*Bild 3*; *Schweizer* et al. 2013c).

Sanierungsvarianten

Anschliessend wurden verschiedene bauliche Massnahmen zur Dämpfung des künftigen Abflussregimes geprüft. Aufgrund unverhältnismässiger Kosten wurde eine Direktableitung des turbinierten Wassers in den 16 km entfernten Brienzersee nicht weiterverfolgt.

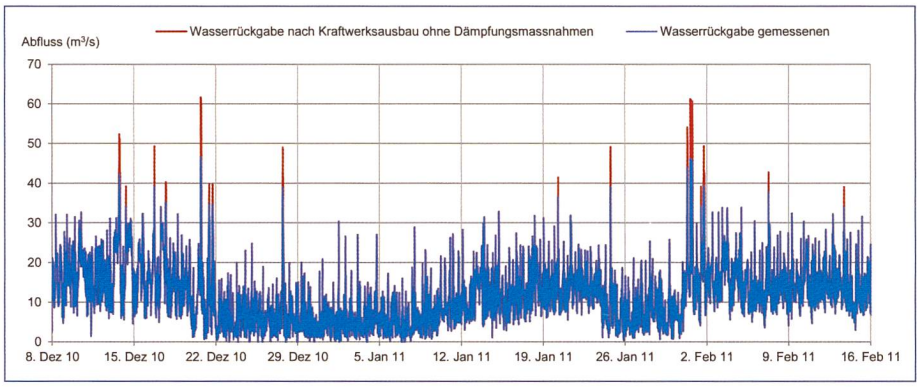


Bild 3. Gemessene (Zustand I) und simulierte Wasserrückgabe (Szenario II) in Innertkirchen für den Winter 2010/11.

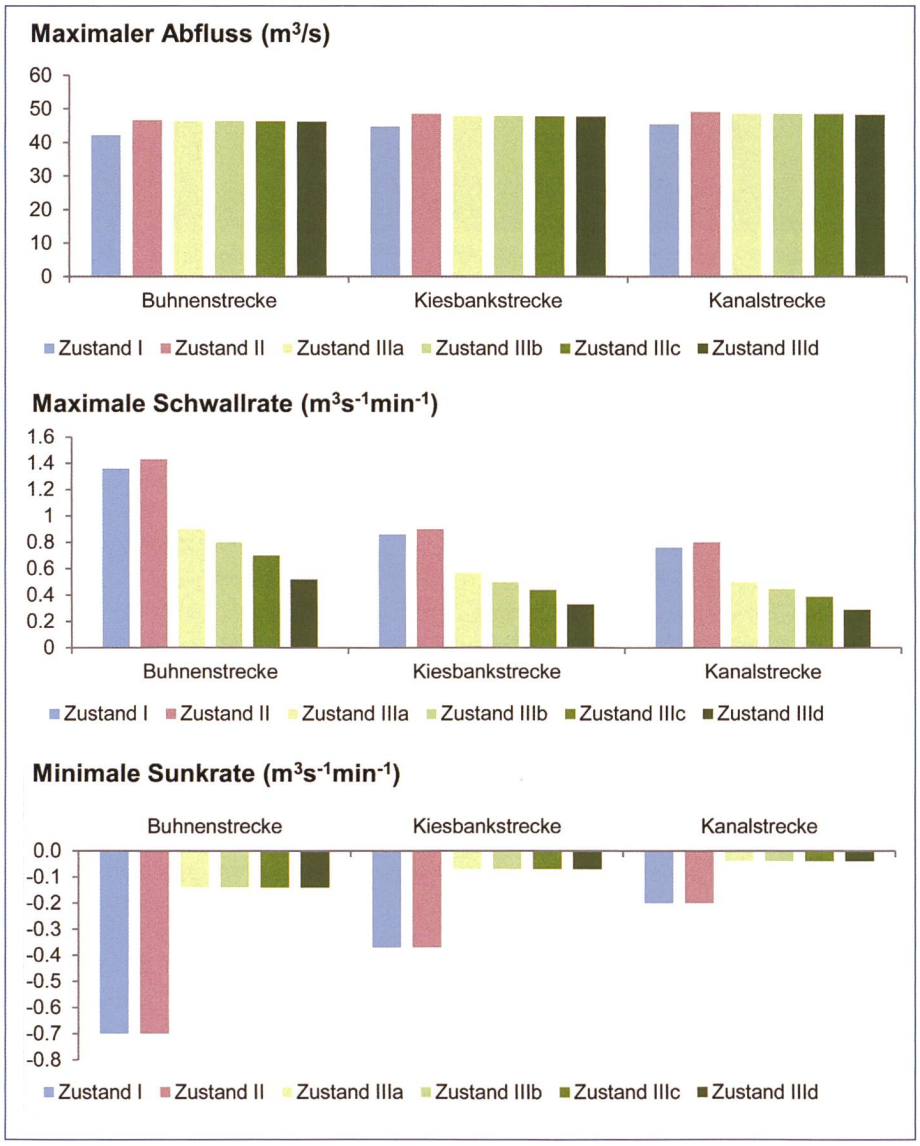


Bild 4. Darstellung der 95%-Perzentile des Maximalabflusses (oben), der maximalen Schwallrate (Mitte) und der minimalen Sunkrate (unten) für die Zustände/Szenarien I-III. Da die Sunkraten in negativen Werten angegeben sind, wird der Begriff «minimale Sunkrate» verwendet.

Somit konzentrierten sich die weiteren Abklärungen auf die Errichtung eines Speichers zwischen Turbinenausfluss und Rückgabe in die Hasliaare. In Abhängigkeit des Speichervolumens und der Turbinenausflüsse lassen sich Schwall- und Sunkraten unterschiedlich stark abdämpfen. Eine Dämpfung grösserer Abflussspitzen würde im Fall der Hasliaare ein sehr grosses Speichervolumen benötigen. Dessen Realisierung wäre ebenfalls mit unverhältnismässig hohen Kosten und zusätzlich ausgeprägten landschaftlichen Eingriffen (Deponierung von grossen Kubaturen an Ausbruchmaterial für die Bereitstellung unterirdischer Speicher) verbunden. Der Bau eines oberirdischen Speichers in Form eines Beruhigungsbeckens ist aufgrund der intensiven landwirtschaftlichen Nutzung im Talboden auf 18 000 m³ limitiert (Kap. 5).

Die gewässerökologischen Untersuchungen fokussierten sich daher auf die Möglichkeit zur Dämpfung der Schwall- und Sunkraten, auf die ein wesentlicher Teil der hydrologischen Beeinträchtigung zurückzuführen ist (*Schweizer* et al. 2013b). Unter Berücksichtigung der wirtschaftlichen und technischen Rahmenbedingungen wurden daher die Dämpfungswirkungen von insgesamt vier unterschiedlichen Varianten untersucht:

- Szenario IIIa: V = 50 000 m³
- Szenario IIIb: V = 60 000 m³
- Szenario IIIc: V = 80 000 m³
- Szenario IIId: V = 100 000 m³

Für jedes Speichervolumen wurde eine Simulation gerechnet, um die maximale Dämpfung der Schwall- und Sunkraten zu bestimmen (*Schweizer* et al. 2013c). Als Kraftwerksausfluss wurde dabei jeweils die konstruierte Abflussganglinie von Szenario II verwendet.

Statistische Analyse der Schwallkennwerte

Um die einzelnen Abflussganglinien der verschiedenen Szenarien miteinander vergleichen zu können, wurden jeweils die 95%- sowie die 100%-Perzentile für die wichtigsten hydrologischen Kennwerte statistisch bestimmt. Infolge von seitlichen Zuflüssen und grossmassstäblichen Fliesswiderständen in der Schwallstrecke kommt es im Längsverlauf zwischen Innertkirchen und Brienzwiler zu Veränderungen der folgenden Schwallkennwerte

- Maximalabfluss Q_{max}: leichte Erhöhung um bis zu 3.2 m³/s
- Maximale Schwallrate ΔQ_{max}: markante Reduktion um bis zu 44%
- Minimale Sunkrate ΔQ_{min}: deutliche Reduktion um bis zu 69%

Aufgrund der geringen Zuflüsse im Winter wurde der minimale Abfluss Q_{min} für alle Zustände und alle Abschnitte auf 3.1 m³/s (95%-Perzentil) festgesetzt (LCH 2010, LCH 2012, *Schweizer* et al. 2013c; *Bild 4*).

4. Ökologische Bewertung künftiger Zustände (Szenarien II und III)

In den folgenden Unterkapiteln wird mehrfach auf die Bewertung des Ist-Zustands (Szenario I) verwiesen. Eine detaillierte Beschreibung der Defizitanalyse findet sich in *Schweizer* et al. (2013b).

4.1 Betrachtung methodisch bedingter Unsicherheiten

Die ökologischen Auswirkungen der künstlichen Pegelschwankungen hängen direkt von den morphologischen Verhältnissen ab (*Schweizer* et al. 2009, *Person* et al. 2013, *Tabelle 1*).

Im Fall der Hasliaare ist es trotz dem umfangreichen Untersuchungsprogramm nicht möglich, den jeweiligen Einfluss von Abflussregime und Flussform für jeden Indikator eindeutig abzugrenzen. Hinzu kommen weitere Unschärfen hinsichtlich der Bewertungsmethodik (u.a. Ort/Zeitpunkt von Probenahmen, natürliche Variabilität, Aggregation der zwölf Indikatoren zu einer Gesamtbewertung) und Annahmen, die das künftige Betriebsregime und die Steuerungsmöglichkeiten des Zwischenspeichers betreffen.

Für die Abschätzung künftiger Zustände können quantifizierbare, bzw. modellierbare und nicht quantifizierbare Indikatoren unterschieden werden (Tabelle 1). Eine Anwendung der nicht modellierbaren Indikatoren kann nur über Experteneinschätzungen erfolgen, die sich auf Analogieschlüssen, Erfahrungswerten und Literaturrecherchen abstützen. Dies führt zu weiteren Unsicherheiten in der ökologischen Bewertung.

4.2 Szenario II – Kraftwerksausbau ohne schwalldämpfende Massnahmen

Die in Kap. 3.5 beschriebene Simulation des künftigen Betriebsregimes führt in der Buhnenstrecke zu einer moderaten Anhebung der winterlichen Maximalabflüsse von heute 42.2 m^3/s auf 46.6 m^3/s und damit verbunden zu einer Steigerung der Schwallraten von heute 1.36 $m^3s^{-1}min^{-1}$ auf 1.43 $m^3s^{-1}min^{-1}$ (jeweils 95%-Perzentile für die Buhnenstrecke, *Bild 4*). Im Gegensatz dazu wird die Kraftwerkserweiterung keinen Einfluss auf die tiefen Abflussbereiche ausüben, so dass sowohl der Minimalabfluss von 3.1 m^3/s als auch die Sunkraten im tiefen Abflussbereich unterhalb von 8.1 m^3/s (s.u.) unverändert gegenüber der heutigen Situation bleiben.

Abiotische Indikatoren (A1, Q1, H1)

Da es im Fall des Kraftwerksausbaus zu keinen Veränderungen des minimalen Abflusses (Indikator A1 Mindestabfluss) kommt, werden die Anforderungen für diesen Indikator heute wie auch künftig eingehalten werden *(Tabelle 2)*.

Die zukünftige Variabilität der Wassertemperatur wurde durch die zu erwartenden Mischungsverhältnisse von Betriebswasser und Restwasser (oberhalb der Zentralen Innertkirchen 1 und 2) abgeschätzt. Die Bewertung des Indikators Q1 Wassertemperatur ergab für die Zustände I und II jeweils die Klasse G rün.

In Absprache mit der Begleitgruppe und dem Expertenteam wurden für die Anwendung des Indikators H1 Innere Kolmation die im Feld erhobenen Daten als Grundlage verwendet. Die Einflussfaktoren Schwebstoffkonzentration, Sohlenschubspannung, hydraulischer Gradient und Korngrössenverteilung, die für die Prozesse der Kolmatierung und Dekolmatierung relevant sind (*Baumann* et al. 2012), ändern sich nicht mit den einzelnen Szenarien. Daher beurteilten die Experten die Sohlenverhältnisse entsprechend dem Ist-Zustand mit einer schwachen bis mittleren Kolmation (Klasse Grün).

Indikatoren des Makrozoobenthos (B1–B4)

Wie die Driftversuche von 2008 gezeigt haben, dürften insbesondere die höheren Schwallraten eine verstärkte Wirkung auf das Abschwemmen von Wasserwirbellosen ausüben (Limnex 2009, 2012) und damit v.a. die Biomasse (Indikator B1 Biomasse MZB) langfristig tendenziell reduzieren. Beim Szenario II wird von einer eher geringen Erhöhung der Schwallraten (und auch der Maximalabflüsse) ausgegangen. Die heutigen Biomassen ergeben sowohl für die Buhnen- als auch für die Kiesbankstrecke die Klasse Gelb, wobei diese Abschnitte nur knapp die Anforderungen für die Klasse grün verfehlen. Daher wird von den Experten keine Herabstufung in die Klasse Orange für diese beiden Abschnitte erwartet *(Tabelle 2)*.

Die Ergebnisse aus der Kanalstrecke wurden für die Bewertung nicht berücksichtigt, da hier die lokale Dominanz einzelner Taxa das Ergebnis tendenziell verzerrt. Gesamthaft resultierte daher für den Indikator B1 die Gesamtbewertung Klasse Gelb sowohl für den Ist-Zustand als auch für Szenario II.

Indikator	Prognostizierbarkeit	Anmerkungen zur Prognostizierbarkeit	Sensitiv hinsichtlich Morphologie	Sensitiv hinsichtlich Abflussregime	Sensitivität hinsichtlich Schwallparametern
A1 Mindestabfluss	Q	Sofern künftiges Abflussregime bekannt	Nicht	Mittel/Hoch	Q_{min}
Q1 Wassertemperatur	Q	Sofern künftiges Abfluss- und Betriebsregime bekannt	Niedrig	Hoch	ΔQ_{max}, ΔQ_{max}, Q_{max}, Q_{min}
H1 Innere Kolmation	Q / E	Bewertung erfolgte durch Experten	Mittel	Niedrig/Mittel	Q_{max}
B1 Biomasse MZB	E		Hoch	Hoch	ΔQ_{max},, Q_{max}
B2 MSK-Modul MZB	E		Hoch	Mittel	ΔQ_{max},, Q_{max}
B3 Längenzonation MZB	E		Hoch	Mittel/Hoch	ΔQ_{max},, Q_{max}
B4 EPT-Familien MZB	E		Hoch	Hoch	ΔQ_{max},, Q_{max}
F1 MSK-Modul Fische	E		Sehr hoch	Mittel	ΔQ_{max}, ΔQ_{min},, Q_{max}, Q_{min}
F2 Stranden von Fischen	Q	Sofern künftiges Abflussregime bekannt	Sehr hoch	Sehr hoch	ΔQ_{min}
F3 Laichareale der Fische	Q	Sofern künftiges Abflussregime bekannt	Hoch	Sehr hoch	Q_{max}, Q_{min}
F4 Reproduktion der Fischfauna	E		Sehr hoch	Hoch	ΔQ_{max}, ΔQ_{min}, Q_{max}
F5 Fischereiliche Produktivität	E		Sehr hoch	Mittel	ΔQ_{max}, ΔQ_{min}, Q_{max}

Tabelle 1. Beurteilung der BAFU-Indikatoren bei der Fallstudie Hasliaare. MZB = Makrozoobenthos, MSK = Modulstufenkonzept, EPT = Eintags-, Stein- und Köcherfliegenlarven; Q = Quantifizierbar, E = Abschätzung durch Experten; Q_{min} = minimaler Abfluss, Q_{max} = maximaler Abfluss, ΔQ_{max} = maximale Schwallrate, ΔQ_{min} = minimale Sunkrate.

Für den heutigen Zustand entsprachen sowohl der Index zur Beschreibung der standortgerechten Vielfältigkeit (B2 MSK-Modul MZB) als auch die Diversität von Eintags-, Stein- und Köcherfliegenlarven (B4 EPT-Familien MZB) bei allen betrachteten Abschnitten (und in den Referenzstrecken der Lütschine) den Vorgaben für Klasse Grün. Mit den etwas höheren Maximalabflüssen und Schwallraten wird beim Szenario II der hydraulische Stress ansteigen und damit auch die Wahrscheinlichkeit, dass empfindliche Familien verschwinden können. Daher wurden die Indikatoren B2 und B4 für das Szenario II auf die Klasse Gelb herabgestuft.

Häufig führen die höheren Fliessgeschwindigkeiten während den Schwallphasen dazu, dass auf Strömung empfindlich reagierende Arten verschwinden und die Entwicklung strömungsliebender Arten dagegen tendenziell begünstigt wird («Rhithralisierung»; *Céréghino* et al. 2002). Wird die Lütschine als Referenz zur Beschreibung der standorttypischen Artenvielfalt herangezogen, resultiert für die Hasliaare im heutigen Zustand die Bewertungsklasse Blau. Da der hydraulische Stress im Szenario II etwas zunimmt, können schwächere Rhithralisierungseffekte nicht ausgeschlossen werden. Daher stuften die Experten den Indikator B3 Längenzonation MZB für das Szenario II auf die Klasse «gut» (Grün) herab.

Indikator	Szenario I	Szenario II	Szenario IIIa / IIIb	Szenario IIIc / IIId
H1 Innere Kolmation				
A1 Mindestabfluss				
Q1 Wassertemperatur				
B1 Biomasse MZB				
B2 MSK-Modul MZB				
B3 Längenzonation MZB				
B4 EPT-Familien MZB				
F1 MSK-Modul Fische				
F2 Stranden von Fischen				
F3 Laichareale der Fische				
F4 Reproduktion der Fischfauna				
F5 Fischereiliche Produktivität				

Tabelle 2. Bewertung der verschiedenen Zustände anhand der BAFU-Vollzugshilfe. Szenarien I bis III siehe Kap. 3.4 und 3.5. Bedeutung der Farben: Rot = schlecht, Orange = unbefriedigend, Gelb = mässig, Grün = gut, Blau = sehr gut.

Indikatoren der Fischfauna (F1–F5)

Der Indikator F1 MSK-Modul Fische wird anhand der Parameter Artenspektrum, Deformationen, Populationsstruktur und Fischdichte bestimmt (*Schager* & *Peter* 2004). Während für die heutige Situation die ersten beiden Aspekte ohne Defizit bewertet werden, zeigen die beiden letzten Aspekte eine methodisch maximale Abweichung zu einem natürlichen Zustand an. Allerdings muss hierbei auch der Einfluss der relativ eintönigen Morphologie auf das Lebensraumangebot mitberücksichtigt werden (*Schweizer* et al. 2013b). Da von den moderaten Erhöhungen der Schwallraten und des Maximalabflusses keine Verschlechterung hinsichtlich der Aspekte Artenspektrum und Deformationen erwartet wird, wurde dieser Indikator für die Zustände I und II mit der Klasse Gelb bewertet *(Tabelle 2)*.

Für die Bewertung des Indikators F2 Stranden von Fischen werden die Aspekte Pegelrückgangsrate, trockenfallende Fläche bei Sunkabfluss sowie die Beobachtung von tatsächlich gestrandeten Fischen berücksichtigt. Die Beurteilung dieser Parameter erfolgt ausschliesslich bei tiefen Abflussverhältnissen, im Fall der Hasliaare unterhalb von 8.1 m^3/s (*Schweizer* et al. 2013c). Da mit dem Szenario II künftig keine Veränderungen im Niedrigwasserbereich auftreten (s.o.), wurde dieser Indikator entsprechend dem Zustand I mit Gelb bewertet (*Schweizer* et al. 2013b).

Bei der Anwendung des Indikators F3 Laichareale der Fische werden die Parameter vorhandenes Laichsubstrat, überflossene Sohlenbereiche bei Sunkabfluss sowie stabile Flächen des Flusssediments bei Schwallabfluss betrachtet. Die Beurteilung dieser Aspekte variiert nur unwesentlich zwischen den Zuständen I und II, so dass die Experten für beide Zustände diesen Indikator mit der Klasse Grün bewerteten.

Die Bewertung des Indikators F4 Reproduktion der Fischfauna erfolgt über die Anzahl gefangener Sömmerlinge je Sohlenfläche. Die Abfischungen der Eawag (*Haas* & *Peter* 2009, *Person* et al. 2013) ergaben für alle Abschnitte in der Schwallstrecke sehr tiefe Werte, sodass der heutige Zustand mit der Signalfarbe Rot bewertet wurde. Die tiefste Bewertungsklasse wurde für das Szenario II übernommen.

Allerdings muss bei diesem Indikator auch der Einfluss der Morphologie als erheblicher Faktor mitberücksichtigt werden. Aufgrund der relativ eintönigen Flussform fehlen in der Schwallstrecke insbesondere Flachufer, die als Lebensräume für Jungfische infrage kommen. Die hydraulische Modellierung mit CASiMiR (www.casimir-software.de, *Jorde* 1997, *Schneider* 2001) zeigte, dass in allen Abschnitten nur bei relativ tiefen Abflüssen zwischen fünf und 20 m^3/s geeignete Lebensräume für juvenile Bachforellen vorhanden sind (*Person* et al. 2013). Da die natürlichen mittleren Monatsabflüsse während der Entwicklung der Jungfische deutlich darüber liegen (z.B. Mai mit 45 m^3/s), würden selbst bei einem natürlichen Abflussregime keine geeigneten Habitate für juvenile Bachforellen existieren. Bei der Gesamtbeurteilung wurde entsprechend den Vorgaben der Vollzugshilfe dieser Indikator daher nicht voll berücksichtigt. Entsprechendes gilt für die Indikatoren F1 und F5 (siehe unten), die ebenfalls sehr stark von der Morphologie beeinflusst werden.

Für den Indikator F5 Fischereiliche Produktivität werden die Aspekte fischereiliche Zonierung, Wassertemperatur, Lebensräume, Abflussregime und Verfügbarkeit der Nährtiere berücksichtigt. Bei den vier erstgenannten Faktoren ergeben sich keine Unterschiede zwischen den Beurteilungen der Zustände I und II. Dagegen nimmt die Verfügbarkeit der Nährtiere für das Szenario II tendenziell etwas ab (s.o. Indikator B1). Bei der Anwendung des Indikators wurde die Wertefunktion den Gegebenheiten der Hasliaare (hohe Vergletscherung mit generell geringer Produktivität) angepasst (Details in *Schweizer* et al. 2013b). Insgesamt wurde eine relativ niedrige fischereiliche Produktivität bestimmt, die für beide Zustände (I und II) die Bewertungsklasse Orange zur Folge hat.

4.3 Szenarien IIIa–IIId – Ausbau KW Innertkirchen 1 mit schwalldämpfenden Massnahmen

Mit den betrachteten Speichervolumina ist es im Winter weder möglich, die minimalen Abflüsse zu erhöhen noch die maximalen Abflüsse zu reduzieren *(Bild 4)*. Allerdings

können sowohl die Schwall- als auch die Sunkraten in Abhängigkeit des Speichervolumens deutlich reduziert werden. In der Buhnenstrecke kann beispielsweise das 95%-Perzentil der Schwallraten von heute 1.36 $m^3s^{-1}min^{-1}$ auf 0.90 $m^3s^{-1}min^{-1}$ beim Szenario IIIa und auf 0.70 $m^3s^{-1}min^{-1}$ beim Szenario IIIc verringert werden.

Grundsätzlich verlängert eine gedämpfte Änderung des Abflusses die Reaktionszeiten für die aquatische Fauna. Die Tiere können sich in diesem Fall den neuen Abflussbedingungen besser anpassen und bei Bedarf in andere Bereiche im Gewässer oder in die Sohle ausweichen.

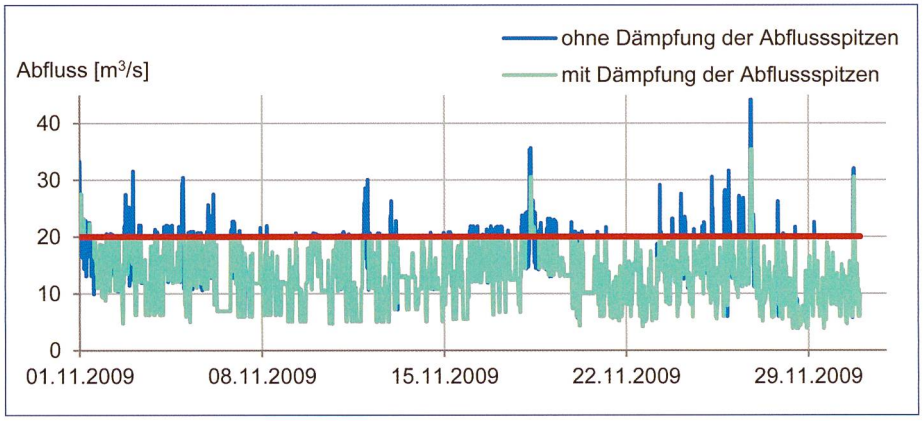


Bild 5. Reduktion des maximalen Abflusses in der Hasliaare im November 2009 zur Verbesserung der Laichbedingungen von Salmoniden (Maire & Theiler 2013). Unterhalb der roten Linie treten günstige Laichbedingungen für die Forellen auf.

Abiotische Indikatoren (A1, Q1, H1)

Dank der Vereinbarung mit dem Kanton werden auch mit den Szenarien IIIa–IIId die Vorgaben von Indikator A1 Minimalabfluss eingehalten *(Tabelle 2)*. Trotz gedämpfter Schwall- und Sunkraten und einer damit verbundenen zeitlichen Verzögerung bei den Änderungen der Wassertemperatur wird keine Klassenverbesserung des Indikators Q1 Wassertemperatur erreicht (Limnex 2012). Auch für den Indikator H1 Kolmation werden keine Veränderungen angenommen, sodass alle abiotischen Indikatoren mit der Klasse Grün bewertet werden.

Indikatoren des Makrozoobenthos (B1–B4)

Wie die Driftversuche von 2008 (Limnex 2009) gezeigt haben, lässt sich das Abschwemmen von Wirbellosen mit einer verlangsamten Abflusszunahme deutlich reduzieren. Hingegen wurde beim Abfluss im Bereich zwischen 40 und 50 m^3/s keine erhöhte Drift gemessen.

Zurzeit ist es allerdings nicht möglich, die genauen Zusammenhänge zwischen der Entwicklung des Makrozoobenthos (MZB), der Verdriftung und weiteren Faktoren wie z.B. Lebensräume oder Wasserqualität zu quantifizieren. Daher muss die ökologische Bewertung für die Indikatoren B1–B4 auf Expertenwissen, Erfahrungswerte, Literaturrecherchen und Analogieschlüsse zurückgreifen.

Zur Abschätzung des Indikators B1 Biomasse MZB wurde davon ausgegangen, dass eine Reduktion der Drift zu einer insgesamt höheren Biomasse an Insektenlarven führt. Die Drift in der Hasliaare hängt ihrerseits sowohl von der Schwallrate (s.o.) als auch von der Morphologie ab (Limnex 2009, *Schweizer* et al. 2010). So wurde bei den Driftversuchen eine deutlich geringere Abschwemmung an Insekten in der Kiesbankstrecke nachgewiesen als in der Kanalstrecke. Auf Basis dieser Grundlagen und der grossen Zahl an Felduntersuchungen wurde der Indikator B1 mit der Klasse Grün für die Szenarien IIIa und IIIb und mit der Klasse Blau für die Szenarien IIIc und IIId bewertet *(Tabelle 2)*.

Grundsätzlich dürften ähnliche Schlussfolgerungen für die Indikatoren B2 MSK-Modul MZB, B3 Längenzonation MZB und B4 EPT-Familien MZB zulässig sein. Das heisst, dass auch hinsichtlich standortgerechter Artenzusammensetzung und Artenvielfalt gewisse Verbesserungen gegenüber dem heutigen Zustand möglich sind. Aufgrund der sehr hohen Anforderungen für einen Klassenwechsel *(Tabelle 3)* verbleiben die Indikatoren B2 und B4 wie für den Ist-Zustand in der Klasse Grün, der Indikator B3 in der Klasse Blau.

Indikatoren der Fischfauna (F1–F5)

Ohne morphologische Aufwertungen werden keine Veränderungen hinsichtlich der Aspekte Artenspektrum, Deformationen, Populationsstruktur und Fischdichte erwartet. Daher wurden die Indikatoren F1 MSK-Modul Fische und F4 Reproduktion der Fischfauna entsprechend den Zuständen I und II mit der Klasse Gelb, resp. Rot bewertet *(Tabelle 2)*.

Bereits mit einem Volumen von 50 000 m^3 (Szenario IIIa) können die Anforderungen hinsichtlich der Pegelrückgangsrate für den Indikator F2 Stranden der Fische erfüllt werden. Daher wurden die Szenarien IIIa und IIIb mit der Klasse grün bewertet. Mit der Realisierung von morphologischen Aufwertungen in der Schwallstrecke werden sich die hydraulischen Verhältnisse in diesen Abschnitten ändern. Dies wird dazu führen, dass strengere Grenzwerte für die Sunkraten nötig sein werden, um unter den neuen Gegebenheiten die Anforderungen des Indikators F2 (hinsichtlich Pegelrückgangsraten) weiterhin einhalten zu können (*Schweizer* et al. 2013c). Ab einem Speichervolumen von 80 000 m^3 kann davon ausgegangen werden, dass die Anforderungen hinsichtlich der Sunkraten auch bei morphologischen Verbesserungen (z.B. Aufweitungen) eingehalten werden können. Daher wurden die Szenarien IIIc und IIId mit der Klasse Blau (sehr gut) bewertet.

Verglichen mit den Szenarien I und II führt das Abflussregime der Szenarien IIIa–IIId zu keinen Veränderungen bei der Bewertung des Indikators F3 Laichareale von Fischen. Somit wurde dieser Indikator für alle Szenarien mit der Klasse Grün bewertet. Grundsätzlich sollten bei einer umfassenden Beurteilung der Verlaichung auch die Parameter Fliessgeschwindigkeit und Abflusstiefe während der Paarungszeit berücksichtigt werden *(Tabelle 3)*. In der Regel benötigen die Bach- und Seeforellen über mehrere Stunden günstige Abflussbedingungen, um ihre Paarung ungestört zu vollenden. In der Kiesbankstrecke müssen dafür die Abflüsse unterhalb von 20 m^3/s liegen (*Bieri* 2012, *Person* et al. 2013). Im November treten i.d.R. eher kleinere Schwallspitzen auf, die bereits mit einem Speichervolumen von 80 000 m^3 so herabgesetzt werden können, dass für über 90% der Laichzeit geeignete Bedingungen für die Paarung gegeben sind (*Bild 5*; *Maire & Theiler* 2013).

Gegenüber dem heutigen Zustand ändert sich bei den Eingangsgrössen für den Indikator F5 Fischereiliche Produktivität nur die Verfügbarkeit an Nährtieren, die der Biomasse des MZB entspricht. Die für die Szenarien IIIa–IIId prognostizierte Erhöhung der Nahrungsverfügbarkeit führt beim Indikator F5 für die Szenarien IIIa–IIId zu einem Wechsel in die Bewertungsklasse Gelb.

4.4 Gesamtbewertung der verschiedenen Szenarien

Die abschliessende Bewertung für jedes

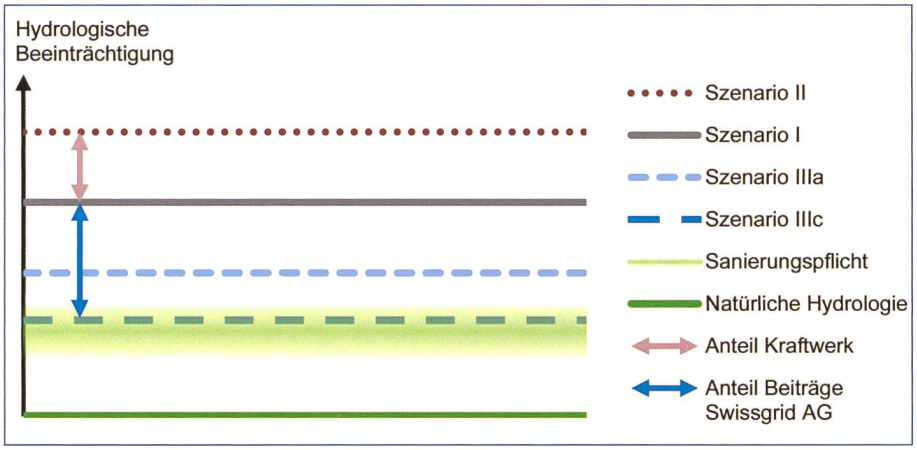


Bild 6. Schematische Darstellung zur Ermittlung des Kostenteilers. Die Y-Achse zeigt dabei die ökologische Beeinträchtigung durch Schwall/Sunk. Das Niveau Sanierungspflicht ist etwas breiter dargestellt, da hier neben ökologischen Kriterien auch die Verhältnismässigkeit mitberücksichtigt werden muss.

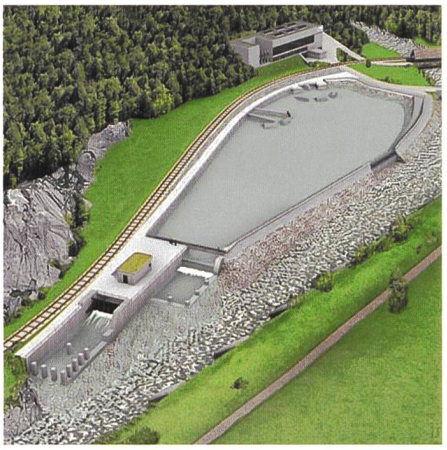


Bild 7. Illustration des künftigen Beruhigungsbeckens in Innertkirchen.

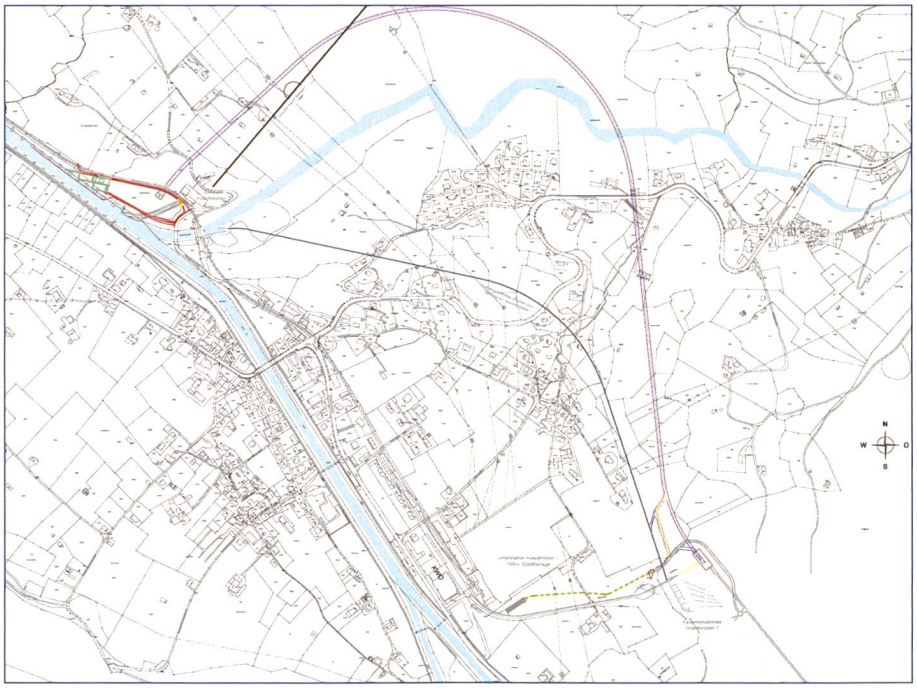


Bild 8. Verlauf des heutigen (blaue Linie) Stollens und des künftigen Speicherstollens (violette Linie, mit deutlicher Laufverlängerung gegenüber heute) sowie Lage des Beruhigungsbeckens (rote Linie).

Szenario wurde gemeinsam in einem Workshop mit der Begleitgruppe und dem Expertenteam durchgeführt. Aufgrund methodisch bedingter Unsicherheiten (Kap. 4.1) konnte keine «exakte» Gesamtbewertung (z.B. Szenario I: Klasse Gelb, Szenario II: Klasse Orange) vorgenommen werden. Stattdessen wurde versucht, die Beurteilung der verschiedenen Szenarien in Form einer Synthese verbal zusammenzufassen:

- «Für den heutigen Zustand liegt eine wesentliche Beeinträchtigung durch Schwall/Sunk vor.»
- «Der Kraftwerksausbau (Szenario II) führt zu einer leichten Verschlechterung, da insgesamt drei Indikatoren (B2, B3 und B4) eine Klasse schlechter als Szenario I abschneiden.»
- «Mit den Szenarien IIIa (V = 50 000 m^3) und IIIb (V = 60 000 m^3) kann die durch den Kraftwerksausbau verursachte Verschlechterung mehr als kompensiert werden. Es resultiert für beide Szenarien gegenüber heute eine leichte Verbesserung, da insgesamt drei Indikatoren (B1, F2 und F5) eine Klasse besser als Szenario I abschneiden.»
- «Für die Szenarien IIIc (V = 80 000 m^3) und IIId (V = 100 000 m^3) wird eine leichte bis mässige Verbesserung gegenüber heute erwartet, da insgesamt ein Indikator (F5) eine Klasse besser und zwei Indikatoren (B1 und F2) zwei Klassen besser als Szenario I abschneiden».
- «Mit der bestehenden Morphologie kann mit den Szenarien IIIa–IIId keine Verbesserung für die Indikatoren F1 und F4 erreicht werden. Bei einer deutlichen Aufwertung der Morphologie (insbesondere bzgl. Habitate für Jungfische) ist mit zunehmendem Beckenvolumen eine Verbesserung möglich.»

Diese zusammenfassenden Erkenntnisse bildeten die Grundlage sowohl für die Festlegung der umzusetzenden Sanierungsvariante als auch für eine möglichst objektive Herleitung eines Kostenteilers. Der von der KWO zu tragende Anteil entspricht dabei der ökologischen Verschlechterung, die durch den Kraftwerksausbau (Szenario II) gegenüber dem Ist-Zustand (Szenario I) resultiert. Allerdings können trotz Kraftwerksausbau mit dem Bereitstellen eines Zwischenspeichers (Szenarien IIIa–IIId) ökologische Verbesserung gegenüber dem heutigen Zustand erreicht werden (siehe oben). Diese ökologische Aufwertung berechtigt grundsätzlich zu Beiträgen der Swissgrid AG (Kap. 1). Rechnerisch lassen sich die entsprechenden Beiträge aus der Differenz zwischen Ist-Zustand und dem gewählten Szenario (IIIa, IIIb, IIIc oder IIId) ableiten. *Bild 6* stellt das angewendete Prinzip vereinfacht dar.

5. Auswahl und Kurzbeschrieb der umzusetzenden Sanierungsvariante

Auf Basis der oben beschriebenen Grundlagen wurde von den Vertretern des BAFU und des AWA die Sanierungsvariante IIIc (80 000 m^3) für die Umsetzung ausgewählt (*Bild 7* und *8*). Ausschlaggebend für diesen Entscheid waren folgende Aspekte:

- Zwischen der Sanierungsvariante IIIb und IIIc wird eine ökologische Verbesserung erwartet (Indikatoren B1 und F2).

Indikator	Bemerkungen zu den einzelnen Indikatoren
A1 Mindestabfluss	A1 ist ökologisch aussagekräftig für die Quantifizierung der Lebensräume bei Niedrigwasser und bei einem Vergleich mit dem natürlichen Q_{347}.
Q1 Wassertemperatur	Bewertung reagiert sensitiv auf das Messintervall.
H1 Kolmation	Feldmessungen, biologische Versuche (z.B. Laichboxen) und Vergleich mit Grundwasserpegeln sind für eine ökologische Beurteilung aussagekräftiger als H1.
Indikatoren MZB	Methodisch bedingte Unsicherheiten bei den Probenahmen sind unvermeidbar, können aber durch eine ausreichende Anzahl von Probenahmen quantifiziert werden. Sofern möglich sollten geeignete Referenzgewässer miteinbezogen werden.
B1 Biomasse MZB	Wenige schwere Tiere in einer Probe können die Bewertung dominieren.
B2 MSK-Modul MZB	Für gletscherbeeinflusste Schwallstrecken scheint die Wertefunktion tendenziell zu streng, da die Klasse blau auch in Referenzgewässern selten erreicht wird (Limnex 2012).
B3 Längenzonation MZB	Wenn möglich, sollte die Definition der Flussregion anhand eines Referenzgewässers erfolgen.
B4 EPT-Familien MZB	Siehe Indikator B2.
F1 MSK-Modul Fische	Der Einfluss der Morphologie muss mitberücksichtigt werden.
F2 Stranden von Fischen	Bei der Wertefunktion sollten zusätzlich die Klassen gelb und orange eingefügt werden. Zu prüfen ist, ob für F2 auch die Rückgangsrate der benetzten Breite / Fläche, die Korngrösse sowie eine saisonale Betrachtung berücksichtigt werden können. Die Anzahl von gestrandeten Fischen hängt auch von der Fischdichte ab.
F3 Laichareale der Fische	Biologische und physikalische Feldversuche vergrössern die Aussagekraft (Schweizer et al. 2013b). Zusätzlich können auch die Habitatsbedingungen während der Paarungzeit berücksichtigt werden. I.d.R. benötigen die Fische ein mehrstündiges Zeitfenster mit günstigen Bedingungen. Der Einfluss des Kraftwerkbetriebs auf die Korngrössenverteilung kann mit hydraulischen Simulationen bestimmt werden.
F4 Reproduktion der Fischfauna	Der Einfluss der Morphologie muss mitberücksichtigt werden. Die Betrachtung aller Lebenszyklen ist empfehlenswert.
F5 Fischereiliche Produktivität	Im Fall von Gletscher geprägten Fliessgewässern ist eine Anpassung der Wertefunktion nötig. U.U. ist die Betrachtung der Fischbiomasse besser geeignet.

Tabelle 3. Bei der Defizitanalyse gewonnene Erfahrungswerte.

Indikator	Bemerkungen zu den verschiedenen gewässerökologischen Aspekten
Mindestabfluss	Siehe A1 in Tabelle 3.
Wassertemperatur	Die Effekte von häufigen Änderungen der Wassertemperatur auf den Stoffwechsel und auf das Verhalten aquatischer Organismen könnte noch detaillierter untersucht werden. Auch wären zusätzliche Abklärungen zum Einfluss der Trübung (evtl. als eigenständiger Indikator) zu überprüfen.
Innere Kolmation	Der Zusammenhang zwischen Schwallregime und Kolmation bedarf einer wissenschaftlichen Vertiefung.
Biomasse MZB	Für eine semi-quantitative Prognose dieses Indikators ist die Beschreibung der Wirkungsgefüge • von Hydrologie und Morphologie auf die Verdriftung des MZB sowie • von der Verdriftung des MZB auf die Gesamtbiomasse /-abundanz nötig. Detaillierte Driftversuche und Probenahmen an verschiedenen Gewässersystemen könnten zu einem besseren Verständnis beitragen. Dabei sollten sich die Untersuchungen über längere Zeiträume erstrecken, damit nach einem Driftversuch eine ausreichende Wiederbesiedlung des MZB möglich ist.
Artenvielfalt MZB	Die Sensitivität einzelner Arten auf das Abflussregime könnte mit Literaturrecherchen und konkreten Grundlagenforschungen untersucht werden. Zusätzlich könnte die Mobilität ausgewählter Arten erforscht werden, um bei Habitatsmodellen auch instationäre Verhältnisse (z.B. bei Trockenfallen von Gewässerabschnitten) berücksichtigen zu können.
Standorttypische Gemeinschaft MZB	Siehe Indikator Artenvielfalt MZB.
Artenvielfalt Fische	Die Sensitivität ausgewählter Fischarten auf das Abflussregime könnte detailliert untersucht werden.
Lebenszyklen der Leitart(en)	Mit der Untersuchung aller Lebenszyklen kann das fischökologische Potenzial (Populationsstruktur, Biomasse und Fischdichte) möglichst objektiv bewertet werden.
Laichaktivität	Die Habitatsbedingungen während der Paarungszeit sollten mitbeurteilt werden (z.B. wie viele Zeitfenster mit günstigen Bedingungen stehen den Fischen während der Laichzeit zur Verfügung?).
Entwicklung des Laichs	Siehe F3 in Tabelle 3.
Jungfische	Detaillierte Untersuchungen zur Verdriftung, zum Stranden und zur Mobilität von Jungfischen könnten die Aussagekraft von Habitatsmodellen deutlich erhöhen. Beim Stranden von Fischen sollte auch die vorhandene Fischdichte mitberücksichtigt werden.

Tabelle 4. Anregungen für eine Bewertungsmethode zur Beschreibung künftiger Zustände.

Bild 9a und 9b. Illustrationen zu Beginn der Bauarbeiten am Beruhigungsbecken.

- Verglichen mit den Varianten IIIa und IIIb treten bei der Variante IIIc unterproportionale Zusatzkosten auf.
- Aufgrund einer neuen Linienführung des Speicherstollens ist eine Realisierung der Variante IIId mit deutlich höheren Zusatzkosten (verglichen mit Szenario IIIc) verbunden, ohne dass damit ein ökologischer Mehrwert erwartet wird.
- Mit Variante IIIc können auch die Anforderungen bei künftigen morphologischen Aufwertungen in der Schwallstrecke erfüllt werden (Kap.4.3).
- Mit Variante IIIc dürfte ein ausreichender Handlungsspielraum bestehen, um die bestehenden Unsicherheiten (z.B. bzgl. künftigem Betriebsregime) ausreichend abzufedern.

Da bei der Wasserrückgabe in Innertkirchen nur eine begrenzte Fläche für den Bau eines Beruhigungsbeckens zur Verfügung steht, kann oberirdisch ein Speichervolumen von maximal 18000 m^3 erreicht werden. Das restliche Volumen wird daher unterirdisch, in Form eines Speicherstollens mit Drosselklappen umgesetzt. Künftig wird das Kraftwerk Innertkirchen 1 das turbinierte Wasser über diesen Speicherstollen in das Beruhigungsbecken leiten, während die Zentrale Innertkirchen 2 direkt in das Beruhigungsbecken entwässert. Die Wasserrückgabe in die Aare erfolgt mit zwei regelbaren Organen am Auslauf des Beruhigungsbeckens *(Bild 7)*.

6. Diskussion

6.1 Indikatoren für die Bewertung des Ist-Zustands

Wie in *Tabelle 1* beschrieben, reagieren die zwölf Indikatoren unterschiedlich sensitiv auf die morphologischen und hydrologischen Verhältnisse. Methodisch bedingte Redundanzen traten zwischen den Indikatoren B2 und B4 (teilweise auch mit B3), zwischen B1 und F5 sowie zwischen F1 und F4 auf. In Absprache mit den Experten und den Behördenvertretern wurde die Methodik bei den Indikatoren H1, B3, F2, F3 und F5 entsprechend den Gegebenheiten (sehr feine Trübstoffe, hoher Gletscheranteil, relativ grobes Sohlensubstrat, geringe natürliche Fischproduktivität) in der Hasliaare angepasst (*Schweizer* et al. 2013b).

Diese Zusammenfassung der methodischen Aspekte verdeutlicht, dass die Vollzugshilfe nur von Experten mit ausreichender Erfahrung und guten lokalen Kenntnissen angewendet werden sollte. Trotz allenfalls nötiger methodischer Anpassungen eignet sich die BAFU-Vollzugshilfe sehr gut, um die aktuelle gewässerökologische Situation umfassend zu beschreiben und um Sanierungsansätze effizient abzuleiten. In *Tabelle 3* sind die in dieser Fallstudie gewonnenen Erfahrungswerte und die daraus abgeleiteten Empfehlungen in aller Kürze zusammengefasst.

6.2 Indikatoren für die Bewertung künftiger Zustände

Während das bestehende Indikatorenset zur Beurteilung des Ist-Zustands entwickelt wurde, erfordert das in Phase 2 vorgesehene Variantenstudium (Kap. 1) eine Bewertungsmethodik, deren Indikatoren auch für künftige Zustände prognostizierbar (oder zumindest semi-quantitativ abschätzbar) sind. Konkret müssen Veränderungen im Abflussregime aber u.U. auch in den morphologischen Verhältnissen der Schwallstrecke objektiv und ausreichend genau berücksichtigt werden können. Grundsätzlich sind mit einer Vorhersage von künftigen Zuständen zusätzliche Unsicherheiten (z.B. künftiges Betriebsregime, künftige Steuerung von Zwischenspeichern) verbunden. Ungeachtet dessen, erfordert der ambitionierte Zeitplan zur Sanierung von Schwall/Sunk eine möglichst nachvollziehbare, transparente und dem aktuellen Wissensstand entsprechende Bewertung zukünftiger Varianten. Daher wird seit dem Frühling 2013 die bestehende Bewertungsmethode vom BAFU weiterentwickelt, um den o.g. Ansprüchen möglichst gerecht zu werden (Veröffentlichung geplant für Sommer 2014). Ohne in diese methodische Weiterentwicklung eingreifen zu wollen, erlauben sich die Autoren, basierend auf den gewonnenen Erfahrungswerten, konkrete Anregungen in Form einer Diskussionsgrundlage zu formulieren *(Tabelle 4)*.

6.3 Fallstudie Hasliaare

Aufgrund der sehr guten Datengrundlage und des Einbezugs von Experten und Vertretern der Behörden konnte die Massnahmenplanung für die Sanierung der Hasliaare bereits vor dem offiziellen Zeitplan transparent und nach aktuellem Wissensstand umgesetzt werden. Dafür wurde ein stufenweises Verfahren gewählt (Kap. 2), wobei jeder Arbeitsschritt im Begleitgremium diskutiert und festgelegt wurde. Grundsätzlich dürfte sich dieses Vorgehen auch für andere Sanierungsfälle eignen, sofern auf die lokalen Gegebenheiten eingegangen und die Methodik dementsprechend angepasst wird.

Mit den Sanierungsvarianten können die Bewertungen der Indikatoren B1, F2 und F5 um eine, resp. zwei Klassen verbessert werden. Bei den übrigen Indikatoren liegt entweder bereits heute eine zufriedenstellende Situation (B2, B3, B4, F3, H1, A1, Q1) vor oder die morphologischen Defizite sind so stark, dass selbst bei einer deutlichen hydrologischen Aufwertung keine oder nur eine geringfügige Verbesserung zu erwarten ist (F1, F4, F5). Da in den nächsten Jahren verschiedene morphologische Aufwertungen in der Hasliaare umgesetzt werden sollen, wurden auch diese künftigen Rahmenbedingungen bei der Auswahl der umzusetzenden Sanierungsvariante mitberücksichtigt.

Um einen sachlich fundierten Variantenvergleich durchführen zu können, waren im Vorfeld zahlreiche und umfassende gewässerökologische Untersuchun-

gen nötig. Dabei waren in verschiedenen Bereichen auch immer wieder ökologische Pionierarbeiten erforderlich.

7. Ausblick

Die Bautätigkeiten für das Beruhigungsbecken und den Speicherstollen wurden im Frühjahr 2013 aufgenommen *(Bild 9)*. Die Inbetriebnahme erfolgt voraussichtlich im Jahr 2016. Anschliessend werden die gewässerökologischen Reaktionen mit einem umfassenden Monitoringprogramm nach einem, drei, fünf und zehn Jahr(en) dokumentiert.

Unabhängig von der Komplexität eines konkreten Sanierungsfalls eignet sich das hier beschriebene Vorgehen. Beispielsweise können mit diesem Ansatz Fälle mit oder ohne Kraftwerksausbau untersucht und bewertet werden. Ebenfalls erlaubt die vorgestellte Methodik, den Kostenteiler für den Fall zu bestimmen, bei dem ein Zwischenspeicher neben der hydrologischen Sanierung auch zur Pumpspeicherung eingesetzt werden soll.

Sowohl die bisher gewonnenen als auch die künftigen Erfahrungswerte können auf Anfrage für andere Sanierungsfälle zur Verfügung gestellt werden.

Danksagung

Die in dieser Publikation beschriebenen Arbeiten basieren zu einem grossen Teil auf den Vorarbeiten, Untersuchungen, Erfahrungen und dem einmaligen Wissen von *Peter Baumann*. Nicht nur in diesem Projekt verbleibt eine grosse Lücke im Fachbereich der Gewässerökologie.

Für die sehr konstruktive Zusammenarbeit möchten sich die Autoren ganz herzlich bei *Manfred Kummer, Martin Huber Gysi, Daniel Hefti* (alle Bundesamt für Umwelt) und *Vinzenz Maurer* (Amt für Wasser und Abfall des Kantons Bern) bedanken. *Catherine Mathez* (BWU), *Bernhard Luder* (BAFU), *Heinz-Peter Tscholl, Oliver Kost, Jan Baumgartner, Daniel Fischlin* (alle KWO) und *Michael Döring* (eQcharta) gebührt ein grosser Dank für das kritische Durchlesen des Manuskripts.

Literatur

Bieri M. (2012): Operation of Complex Hydropower Schemes and its Impact on the Flow Regime in the Downstream River System under Changing Scenarios. Diss. EPFL No 5433., Zürich, Schweiz.

Baumann P., Kirchhofer A. und *Schälchli U.* (2012): Sanierung Schwall/Sunk – Strategische Planung. Ein Modul der Vollzugshilfe Renaturierung der Gewässer. Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Vollzug Nr. 1203: 126 S.

Bruder A., Schweizer S., Vollenweider S., Tonolla D. und *Meile T.* (2012a): Schwall und Sunk: Auswirkungen auf die Gewässerökologie und mögliche Sanierungsmassnahmen. «Wasser Energie Luft» 2012(4): 257–264.

Bruder A., Vollenweider S., Schweizer S. und *Meile T.* (2012b): Schwall und Sunk: Planung und Bewertung von Sanierungsmassnahmen – Möglichkeiten und Empfehlungen aus wissenschaftlicher Sicht. «Wasser Energie Luft» 2012(4): 265–273.

Céréghino R., Cugny P. und *Lavandier P.* (2002): Influence of intermittent hydropeaking on the longitudinal zonation patterns of benthic invertebrates in a mountain stream. Internat. Rev. Hydrobiol. 87: 47–60.

Haas R. & *Peter A.* (2009): Lebensraum Hasliaare 2009 – eine fischökologische Zustandserhebung zwischen Innertkirchen und Brienzersee. Eawag Kastanienbaum. KTI-Projekt: Nachhaltige Nutzung der Wasserkraft – Innovative Massnahmen zur Reduzierung der Schwall-Sunk-Problematik.

Jorde K. (1997): Ökologisch begründete, dynamische Mindestwasserregelungen bei Ausleitungskraftwerken. Dissertation, University of Stuttgart, Stuttgart, Germany.

LCH (2010): Abschätzung der dämpfenden Wirkung von grossmassstäblichen Uferrauheiten auf Schwall- und Sunkerscheinungen in der Hasliaare. EPFL-LCH, Lausanne, Rapport LCH Nr. 25/2010, 12 Seiten. Bericht im Auftrag der KWO (Autoren: *Bieri M.* & *Meile T.*).

LCH (2012): Betrieb des Dämpfungsbeckens Innertkirchen. Bestimmung der Schwallkennwerte für die Hasliaare unter Berücksichtigung einer ökologisch optimalen Beckensteuerung. EPFL-LCH, Lausanne, Rapport LCH Nr. 13/2012, 15 Seiten. Bericht im Auftrag der KWO (Autoren: *Bieri M.* & *Meile T.*).

Limnex (2009): Schwall-Sunk in der Hasliaare. Gewässerökologische Untersuchungen von Hasliaare und Lütschine und Beurteilung der Schwall-Auswirkungen in je zwei Strecken und Szenarien. Bericht im Auftrag der KWO. (Autoren: *Baumann P., Wächter K.* und *Vogel U.*).

Limnex (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 im Auftrag der KWO. (Autoren: *Baumann P., Schmidlin S., Wächter K., Peter A.* und *Büsser P.*).

Maire A. & *Theiler Q.* (2013): Management of a retention basin to mitigate effects of hydropeaking. Final Report des Desing-Projekts «Science et ingenierie de l'environment 2013. Betreuung Prof. Dr. *P. Perona* und Dr. *S. Schweizer*.

Person E., Bieri M., Peter A. und *Schleiss A.* (2013): Mitigation measures for fish habitat improvement in Alpine rivers affected by hydropower operations. Ecohydrology 2013, 20 Seiten.

Schager E. & *Peter A.* (2004): Fische Stufe F. Methoden zur Untersuchung und Beurteilung der Fliessgewässer. Mitteilungen zum Gewässerschutz Nr. 44. BUWAL: 63 S.

Schneider M. (2001): Habitat und Abflussmodellierung für Fliessgewässer mit unscharfen Berechnungsansätzen. Dissertation, University of Stuttgart, Stuttgart, Germany.

Schneider & *Jorde* Ecological Engineering (2012): Casimir-Modellierungen zur Ermittlung der Indikatoren F2 und F3 in drei schwallbeeinflussten Strecken der Hasliaare für den Ist-Zustand und weitere Szenarien. Bericht im Auftrag der KWO (Autoren: *Schneider M., Kopecki I.* und *Tuhtan J.*)

Schweizer S., Neuner J., Ursin M., Tscholl H. und *Meyer M.* (2008): Ein intelligent gesteuertes Beruhigungsbecken zur Reduktion von künstlichen Pegelschwankungen in der Hasliaare. «Wasser Energie Luft» 2008 (3): 209–215.

Schweizer S., Neuner J. und *Heuberger N.* (2009): Bewertung von Schwall/Sunk – Herleitung eines ökologisch abgestützten Bewertungskonzepts. «Wasser Energie Luft» 2009 (3): 194–202.

Schweizer S., Meyer M., Heuberger N., Brechbühl S. und *Ursin M.* (2010): Zahlreiche gewässerökologische Untersuchungen im Oberhasli. «Wasser Energie Luft» 2010 (4): 289–300.

Schweizer S., Zeh Weissmann H. und *Ursin M.* (2012): Der Begleitgruppenprozess zu den Ausbauprojekten und zur Restwassersanierung im Oberhasli. «Wasser Energie Luft» 2012(1): 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): 191–199.

Schweizer S., Schmidlin S., Tonolla D., Büsser P., Meyer M., Monney J., Schläppi S., Schneider M., Tuhtan J. und *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): 200–207.

Schweizer S., Bieri M., Tonolla D., Monney J., Rouge M. und *Stalder P.* (2013c): Schwall/Sunk-Sanierung in der Hasliaare – Phase 2a: Konstruktion repräsentativer Abflussganglinien für künftige Zustände. «Wasser Energie Luft» 2013 (4): 267–274.

Anschrift des Verfassers
Steffen Schweizer
Kraftwerke Oberhasli AG
Grimselstrasse, CH-Innertkirchen
sste@kwo.ch
Tel. +41 33 982 20 19

Schwall/Sunk-Sanierung in der Hasliaare

Beurteilung der ökologischen Auswirkungen von künstlichen Pegelschwankungen auf die Makroinvertebratenfauna anhand von physikalischen Habitatmodellen

David Tanno, Steffen Schweizer, Christopher Robinson

Zusammenfassung

Wasserkraftwerke mit einem Speichersee sind in der Lage, Strom flexibel zu produzieren, entsprechend Bedarf und Nachfrage. Damit können einerseits Netzschwankungen effizient ausgeglichen und andererseits notwendige saisonale Verschiebungen in der Energiegewinnung bewältigt werden. Allerdings führt diese bedeutende Flexibilität in der Stromproduktion zu einer unregelmässigen Wasserrückgabe in den Vorfluter, was zu künstlichen Pegelschwankungen, bzw. Schwall/Sunk im Gewässer unterhalb der Zentrale(n) führt. Diese künstlichen Pegelschwankungen bewirken eine signifikante Verringerung der bewohnbaren Lebensräume für Fische und Wasserkleintiere (Makrozoobenthos).

Die Revision des Gewässerschutzgesetzes von 2011 sieht eine Sanierung des Abflussregimes in Schwallstrecken vor. Computergestützte, physikalische Habitatmodelle sind ein effizienter Ansatz, um die Veränderungen der verfügbaren Lebensräume unter verschiedenen Abflussbedingungen zu simulieren. Auf diese Weise liefern diese Modelle wichtige Informationen für die Abschätzung der ökologischen Auswirkungen verschiedener Sanierungsmassnahmen und sind daher eine wichtige Unterstützung bei der Auswahl von Dämpfungsmassnahmen. In dieser Fallstudie wurden die Habitateignungen in der Schwallstrecke der Hasliaare für die Biomasse von Wasserinsekten mit dem physikalischen Habitatmodell CASiMiR simuliert und beurteilt.

1. Einleitung

Wasserkraftwerke mit einem Speichersee können flexibel Strom produzieren. Dies führt in den meisten Fällen zu einer unregelmässigen Abgabe von Wasser in den Vorfluter und damit zu künstlichen Pegelschwankungen, bzw. Schwall/Sunk unterhalb der Wasserrückgabe. Diese künstlichen Pegelschwankungen führen zu unnatürlichen Veränderungen von physikalischen Parametern wie Wassertiefe, Fliessgeschwindigkeit, Wassertemperatur und -trübung und haben daher weitreichende Konsequenzen für die aquatischen Organismen. Neben den Fischen sind auch die Wasserkleintiere (hauptsächlich Stein-, Eintags- und Köcherfliegenlarven) vom unnatürlichen Abflussregime in der Schwallstrecke beeinflusst.

Während dem unnatürlich schnellen Abflussanstieg und den häufig unnatürlich hohen Abflussspitzen kann ein Grossteil des Makrozoobenthos (Gemeinschaft der von Auge erkennbaren wirbellosen Kleintiere) verdriftet werden (*Bruno* et al. 2010). Dadurch werden die Biomasse und die Abundanz (Häufigkeit) des Makrozoobenthos erheblich reduziert. Während den immer wiederkehrenden hohen Abflüssen treten regelmässig hohe hydraulische Belastungen auf. Längerfristig kann dies dazu führen, dass strömungsliebende Arten unter den Wirbellosen tendenziell begünstigt werden. Andererseits können auf eine verstärkte Strömung empfindlich reagierende Arten verschwinden (*Cereghino* & *Lavandier* 1998; *Cereghino* et al. 2002).

Im Rahmen des revidierten Gewässerschutzgesetzes müssen die negativen Auswirkungen von Schwall/Sunk reduziert werden, und zwar in dem Mass, dass (mit verhältnismässigem Aufwand) für Tiere, Pflanzen und ihre Lebensräume keine wesentlichen Beeinträchtigung mehr bestehen (vgl. Artikel 39a GSchG). Es ist vorgesehen, dass die Sanierung mit baulichen Massnahmen (z.B. Speichervolumen oder Direktableitungen in Seen) erfolgt. Auf Antrag der Kraftwerksbetreiber können auch betriebliche Massnahmen (z.B. Reduktion der Abflussspitzen und der Schwall- und Sunkraten, Erhöhung der minimalen Abflüsse) umgesetzt werden (*Bruder* et al. 2012a). Im Zusammenhang mit bisherigen Sanierungsprojekten wurden i.d.R. physikalische Habitatmodelle eingesetzt, mit welchen die Qualität und Quantität der Lebensräume (Habitate) berechnet werden können. Die verschiedenen Tiere und ihre unterschiedlichen Lebensstadien benötigen bestimmte hydraulische Bedingungen und Habitatsstrukturen (Fliessgeschwindigkeit, Abflusstiefe, Korngrösse), um sich in einem Gewässer etablieren zu können. Das Angebot der Habitate hängt dabei direkt vom Abfluss ab. Die hydraulischen Modelle können für verschiedene Abflüsse die zur Verfügung stehenden Lebensräume quantifizieren (*Bruder* et al. 2012b). Diese Modelle sind seit den 1980er-Jahren in Gebrauch und wurden in vielen Fällen für Restwasseruntersuchungen verwendet. Seit kürzerer Zeit werden diese auch für Schwallstrecken angewendet. Meistens liegt bei den Habitatmodellierungen der Fokus bei den Fischen. Bisher wurden in der Schweiz nur an zwei Stellen die Habitate für das Makrozoobenthos in einer Schwallstrecke modelliert: Am Alpenrhein (Mastrils, Buchs und Koblach; www.alpenrhein.net) und in der Hasliaare. In diesem Beitrag werden die Resultate der Habitatmodellierung für das Makrozoobenthos in der Hasliaare exemplarisch vorgestellt.

2. Morphologie und Schwallbetrieb in der Hasliaare

Die Hasliaare entspringt dem Oberaar- und Unteraargletscher auf ca. 2000 m und fliesst anschliessend durch mehrere Speicherseen (Oberaar-, Grimsel- und Räterichsbodensee), wo der Grossteil des zufliessenden Wassers für die Stromproduktion gefasst wird. Unterhalb der Stauseen fliesst die Aare als Restwasserstrecke, bis in Innertkirchen das turbinierte Wasser zurückgegeben wird. Dies führt zu künstlichen Pegelschwankungen von

der Wasserrückgabe in Innertkirchen bis zur Mündung in den Brienzersee (*Schweizer* et al. 2013). Auf dieser Schwallstrecke kommen folgende Flussmorphologien vor:

- Buhnenstrecke im Raum Innertkirchen,
- Aareschlucht zwischen Innertkirchen und Meiringen,
- Kiesbankstrecke im Raum Meiringen
- Kanalstrecke zwischen Meiringen und der Mündung in den Brienzersee.

Zur Beschreibung des Abflussregimes in der Hasliaare stehen neben den Pegeln «Brienzwiler» und «Schattenhalb/Aareschlucht» auch die Angaben der turbinierten Wassermengen in Innertkirchen (jeweils mit 15 Minuten Zeitauflösung) zur Verfügung.

Heute ist theoretisch eine maximale Wasserrückgabe von 70 m^3/s möglich, mit dem Ausbau des Kraftwerks Innertkirchen 1 im Rahmen des KWO plus Projekts «Tandem» künftig 95 m^3/s (*Schweizer* et al. 2012). Im Winter treten diese maximalen Abflüsse nur in absoluten Extremsituationen auf. So beträgt der winterliche Maximalabfluss der letzten sieben Jahre 60 m^3/s (Limnex 2012).

Aufgrund der geringen natürlichen Zuflüsse sind die Auswirkungen der künstlichen Pegelschwankungen in der Winterzeit am grössten. Während der Schnee- und Gletscherschmelze, wenn ein Grossteil des zufliessenden Wassers wegen voller Speicherseen nicht mehr zwischengelagert werden kann, sind die Effekte von Schwall/Sunk auf das Abflussregime und auf das Makrozoobenthos i.d.R. weniger stark ausgeprägt (*Bieri* 2012).

Für die aquatische Fauna sind neben den absoluten auftretenden Minimal- und Maximalabflüssen vor allem auch die meist kurzfristigen Änderungsraten von entscheidender Bedeutung. Mit statistischen und hydraulischen Analysen können die Dämpfungseffekte, die in der Buhnenstrecke und insbesondere in der Aareschlucht auftreten, beschrieben werden (LCH 2010, LCH 2012, Limnex 2009). Der Einfluss auf die Abflussspitzen ist dabei in der Regel vernachlässigbar, während sich der Abflussanstieg (Schwallrate) um rund 56% und der Abflussrückgang um rund 31% zwischen Innertkirchen und Brienzwiler deutlich verringert (LCH 2012). *Tabelle 1* gibt einen Überblick über die wichtigsten Schwallkennwerte bei der Wasserrückgabe in Innertkirchen und am Pegel Brienzwiler.

3. Methoden

Um die Qualität und Quantität der Lebensräume bei verschiedenen Abflüssen abschätzen zu können, wurde das Habitat-Modell CASiMiR (*Jorde* 1997, *Schneider* 2001, www.casimir-software.de) eingesetzt. Neben der Gerinnegeometrie und hydraulischen Berechnungen müssen dafür auch die Präferenzen von aquatischen Organismen bekannt sein oder zumindest nach dem aktuellen Wissensstand abgeschätzt werden. *Bild 1* zeigt schematisch wie vorgegangen wurde, um aus den verschiedenen Informationen in Abhängigkeit des Abflusses letztlich die Lebensräume der aquatischen Organismen modellieren zu können. Die vollständige Prozedur ist detailliert in *Tanno* (2012) beschrieben.

3.1 Messung der Gerinnegeometrie und hydraulische Modellierung

Die Gerinnegeometrie der drei Teststrecken (Buhnenstrecke, Kiesbankstrecke und Kanalstrecke) wurde mit einer Kombination von Tachymetrie und GPS Echo-Soundern, jeweils mit einer Rasterzellengrösse von 0.5 m, aufgenommen. Daraus wurde ein dreidimensionales Höhenmodell erstellt, welches als Input für die 2D hydraulische Modellierung verwendet wurde. Die Abflusstiefe und Fliessgeschwindigkeit für jede Rasterzelle des Modells wurden mit dem 2D hydrodynamischen Modell HYDRO_AS-2D bei 30 verschiedenen Abflüssen (3–100 m^3/s) simuliert. Detailliertere Angaben zur hydraulischen Modellierung finden sich in *Person* et al. (2013).

3.2 Biologische Datenerhebung im Gewässer

In der Regel sind die Präferenzen (bzgl. Fliessgeschwindigkeit, Abflusstiefe, Sohlensubstrat, Wasserqualität) nur für einzelne Insektenarten bekannt, wobei sich diese von Gewässer zu Gewässer unterscheiden können. Summenwerte für das Makrozoobenthos wie z.B. Häufigkeit, Biomasse oder Artenvielfalt sind häufig von den direkten Lebensbedingungen ab-

	Maximalabfluss (m^3/s)	Minimalabfluss (m^3/s)	Maximale Schwallrate ($m^3/s*min$)	Maximale Sunkrate ($m^3/s*min$) bei Abflüssen < 8 m^3/s
Wasserrückgabe Innertkirchen	42.2	3.1	1.36	0.70
Pegel Brienzwiler	45.4	3.1	0.76	0.22

Tabelle 1. Die wichtigsten Schwallkennwerte (jeweils 95%-Perzentile für die Winterabflüsse von 2009–2012) für die Hasliaare bei der Wasserrückgabe in Innertkirchen (unter Berücksichtigung des Zwischeneinzugsgebiets) und am Pegel Brienzwiler (rund 10 km unterhalb der Wasserrückgabe). Aus ökologischer Sicht (Stranden von Organismen) sind vor allem Abflüsse < 8 m^3/s relevant.

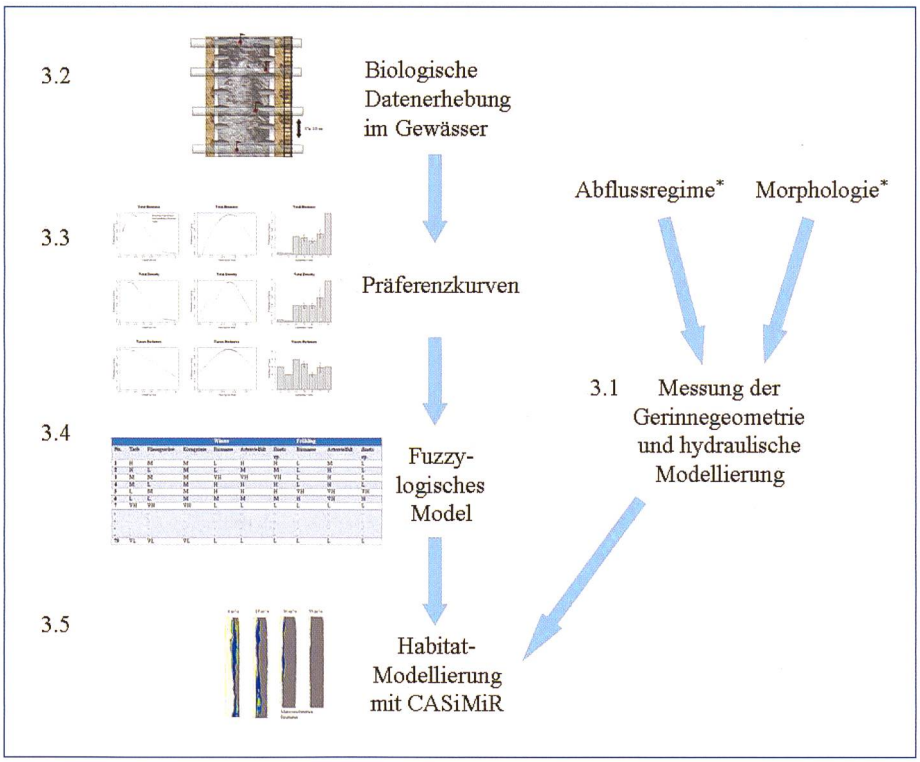


Bild 1. Schematisches Vorgehen bei den Modellierungen. Bei mit * indizierten Bereichen bestehen Optionen zur Dämpfung von Schwall/Sunk-Effekten.

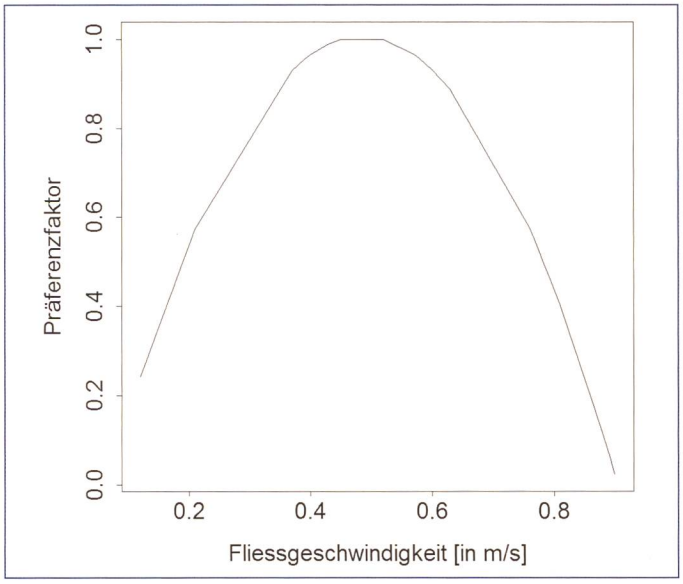


Bild 2. Beispiel einer Fliessgeschwindigkeits-Präferenzkurve für die Makrozoobenthos-Biomasse im Frühling.

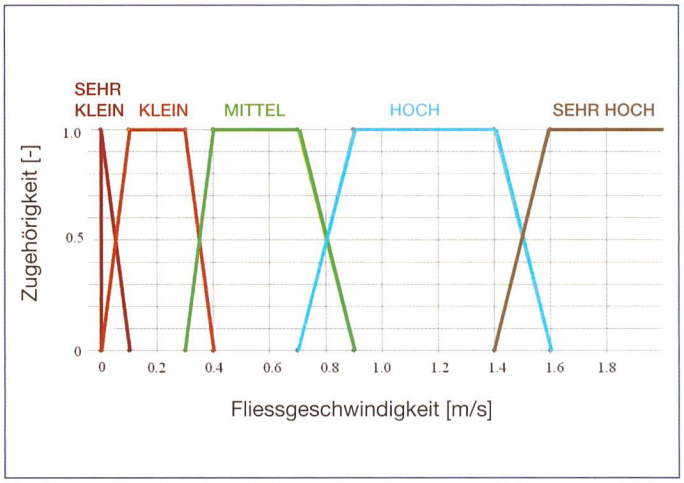


Bild 3. Einteilung der Fuzzy Klassen für Fliessgeschwindigkeit für Biomasse im Winter. Eine Fliessgeschwindigkeit von 0.4 m/s würde zur Menge «mittel» gehören, während eine Fliessgeschwindigkeit von 0.8 m/s zu 50% in die Menge «mittel» und zu 50% in die Menge «hoch» gehört.

hängig, aber nur in Einzelfällen sind diese Präferenzen abgeschätzt oder quantifiziert. Deshalb sind mit dem heutigen Wissensstand Felduntersuchungen im betroffen Gewässer erforderlich.

Mit dem Abfluss verändern sich die Lebensräume hinsichtlich Fliessgeschwindigkeit und Abflusstiefe. Bei einem Schwall/Sunk-Abflussregime treten diese Änderungen des Lebensraums häufig täglich auf. Um trotzdem die Präferenzen der einzelnen Arten oder von Summenwerten (s.o.) möglichst gut abschätzen zu können, empfiehlt es sich, zusätzlich auch ein Referenzgewässer mit ähnlichen ökologischen Eigenschaften (Morphologie, Wasserqualität, Gewässergrösse) aber ohne künstliche Pegelschwankungen zu beproben.

Im Dezember 2011 und im Mai 2012 wurden in der Restwasserstrecke Makrozoobenthosproben genommen (je 20 Probennahmestellen), in der Schwallstrecke während tief gehaltenem Abfluss (in Absprache mit der KWO) im Februar 2012 (36 Probennahmestellen). Die Probennahme erfolgte mittels Hess-Sampler. An jeder Probennahmestelle wurden ebenfalls physikalische Parameter wie Abflusstiefe, Fliessgeschwindigkeit und Korngrösse gemessen. Die Korngrösse wurde dabei in neun Grössenklassen eingeteilt, die von tonigem Substrat bis Felsuntergrund reichten. Im Labor wurden die Benthosproben ausgezählt und bestimmt. Die Biomasse wurde mittels Körperlängen-Trockenmassen Beziehungen bestimmt (*Burgherr* & *Meyer* 1997).

3.3 Präferenzkurven für das Makrozoobenthos

Die erhobenen Felddaten (Kap. 3.2) sind die Grundlagen, um Korrelationen, bzw. Präferenzkurven zwischen den biologischen (Biomasse als Summenwert) und physikalischen (Abflusstiefe, Fliessgeschwindigkeit, Sohlensubstrat) Daten abzuleiten. Mit der Jahreszeit ändern sich sowohl die biologischen (z.B. Körpergrösse und -gewicht, Artenverteilung, Emergenz = Insektenlarven verlassen das Gewässer als erwachsenes Tier zur Fortpflanzung) als auch die physikalischen Kenngrössen (z.B. Wassertemperatur, Trübung, Basisabfluss). Daher muss für jede Saison eine eigene Präferenzkurve erstellt werden.

Zur Bestimmung der Korrelationen wurden generalisierte lineare Regressions-Modelle (GLM) mit Polynomen zweiter Ordnung verwendet. Zum Beispiel für die Abflusstiefe h:

$$Biomasse = a + b_1 \cdot h + b_2 \cdot h^2 + e$$

Mit dem y-Achsenabschnitt a, den Regressionkoeffizienten b_1 und b_2 und dem Fehlerterm e.

Dabei wurden die biologischen Zielwerte normiert (jeweils durch den höchsten Wert der jeweiligen Präferenzkurve geteilt), sodass auf der y-Achse Werte zwischen 0 und 1 resultierten. Diese Prozedur entspricht der IFIM Methode nach *Bovee* (1982). Da die Korngrösse in Klassen (1–9) erfasst wurde, wurden die Präferenzen als Histogramm dargestellt, aber ebenfalls nach der IFIM Methode normalisiert.

Die so erstellten Präferenzkurven *(Bild 2)* sind die Grundlage für die Formulierung sogenannter Fuzzy Regeln (Kap. 3.4), die vom CASiMiR-Modell für die letztliche Habitatmodellierung (Kap. 3.5) benötigt werden.

3.4 Fuzzy logische Modellierung

Fuzzy Logik ist eine Erweiterung der klassischen Mengenlehre, bei der die einzelnen Mengen überlappen (*Zadeh* 1965). Somit kann ein Wert teilweise zu der einen, teilweise zu einer anderen Menge gehören. In der Habitatsimulationssoftware CASiMiR (*Jorde* 1997, *Schneider* 2001) wird dieser Ansatz für die Modellierung von Habitatsansprüchen von Fliessgewässerorganismen verwendet. Die dabei verwendeten Fuzzy Regeln werden in einem linguistischen Regelwerk formuliert, zum Beispiel:

Wenn Abflusstiefe «klein» und Fliessgeschwindigkeit «mittel» und Korngrösse «mittel» dann ist Habitateignung «hoch».

Um die Fuzzy Regeln zu bestimmen, müssen in einem ersten Schritt die unscharfen Fuzzy-Mengen definiert werden. Dabei werden die Skalen der physikalischen Variablen in sich überschneidende Bereiche eingeteilt, die für Fliessgeschwindigkeit und Abflusstiefe in insgesamt fünf Klassen (sehr klein, klein, mittel, hoch und sehr hoch) und für die Korngrösse in drei Klassen (klein, mittel, hoch) unterteilt werden *(Bild 3, Tabelle 2)*. Aus methodischen Gründen unterscheiden sich die einzelnen Klasseneinteilungen zwischen den Jahreszeiten.

Basierend auf den Ergebnissen der Präferenzkurven wurden den jeweiligen Fuzzy-Klassen für Abflusstiefe und Fliessgeschwindigkeit sogenannte Eignungswerte zugeteilt (*Tabelle 2*, vgl. *Eberstaller* et al. 2012):

- 0 für ungeeignet,
- 1 für mittel geeignet
- 2 für sehr gut geeignet

Für die Korngrösse wurde nur zwi-

Habitat Variable	Fuzzy Menge	Eignungswerte Biomasse (Winter)	Eignungswerte Biomasse (Frühling)
Abflusstiefe [m]	SK	0	0
	K	1	2
	M	2	0
	H	0	0
	SH	0	0
Fliessgeschwindigkeit [m/s]	SK	0	0
	K	1	1
	M	2	2
	H	0	0
	SH	0	0
Korngrösse [m]	K	0	0
	M	1	1
	H	0	0

Tabelle 2. Eignungswerte für Biomasse im Winter und im Frühling. SK = Sehr Klein, K = Klein, M = Mittel, H = Hoch und SH = Sehr Hoch.

				Winter	Frühling
Nr.	Tiefe	Fliessgeschw.	Korngrösse	Biomasse	Biomasse
1	H	M	M	K	K
2	H	K	M	K	K
3	M	M	M	SH	K
4	M	K	M	H	K
5	K	M	M	H	SH
6	K	K	M	M	H
7	SH	SH	H	K	K
.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.
75	SK	SK	H	K	K

Tabelle 3. Fuzzy-Regeln für Biomasse im Winter und im Frühling. SK = Sehr Klein, K = Klein, M = Mittel, H = Hoch, SH = Sehr Hoch.

schen ungeeignet (0) und geeignet (1) unterschieden.

Da je fünf Mengen für Abflusstiefe und Fliessgeschwindigkeit und drei für Korngrösse definiert wurden, ergibt sich für alle Kombinationen ein Regelwerk mit 5·5·3 = 75 Regeln. Für alle diese Regeln muss schliesslich noch eine Gesamteignung, wie im oben gezeigten Regel-Beispiel, bestimmt werden. Dies wird durch die Multiplikation der drei Eignungswerte erreicht (*Neary* 2006). Beispielhaft ergibt sich für die o.g. Stelle folgendes Produkt: «Kleine Abflusstiefe» (Eignung = 1) × «Mittlere Fliessgeschwindigkeit» (Eignung = 2) × «mittlere Korngrösse» (Eignung = 1) = Gesamteignung 2.

Um die Gesamteignung verbal zu beschreiben, gelten folgende Klasseneinteilungen

- Gesamteignung 0 → Gesamteignung «Klein»
- Gesamteignung 1 → Gesamteignung «Mittel»
- Gesamteignung 2 → Gesamteignung «Hoch»
- Gesamteignung 4 → Gesamteignung «Sehr hoch»

In einem letzten Schritt können nun die insgesamt 75 Fuzzy-Regeln für die einzelnen Jahreszeiten analog *Tabelle 3* formuliert werden.

3.5 Habitat-Modellierung mit CASiMiR

Wie aus *Bild 1* ersichtlich ist, wird für die Habitat-Modellierung in CASiMiR (*Jorde* 1997, *Schneider* 2001) zusätzlich zu den Lebensraumansprüchen (vgl. Kap. 3.2-3.4) auch ein hydraulisches Modell eines Flussabschnitts benötigt, mit dem die Abflusstiefe und die Fliessgeschwindigkeit bei verschiedenen Abflüssen berechnet werden können (3.1). Die Korngrösse ist von den Feldaufnahmen (Kap. 3.1) bekannt. Im Fall der Hasliaare lag das zweidimensionale Modell für die Buhnen-, die Kiesbank- und die Kanalstrecke mit jeweils einer Abschnittslänge von ca. 150 Meter vor (*Person* et al. 2013).

In einem Zwischenschritt berechnet CASiMiR den Erfüllungsgrad jeder Regel und daraus ergibt sich ein Habitateignungsindex (HSI) zwischen 0 (ungeeignet) und 1 (geeignet). Dieser Zwischenschritt wird detailliert von *Schneider* (2001) beschrieben.

Basierend auf einer statistischen Analyse von Abflussdaten der Messstation bei Brienzwiler 2009–2012 wurden die Abflüsse für die Simulationen gewählt. Für die Wintersituation: 4 m^3/s als Sunkabfluss, 15 m^3/s und 30 m^3/s als Bereich in dem sich die meisten Abflüsse (ca. 53%) befinden, und 55 m^3/s als extreme Schwallspitze. Die Extremwerte (Sunk und Schwallspitze) kamen dabei sehr selten vor und im Durchschnitt nicht länger als zwei Stunden.

Für die Frühlingssituation wurden infolge der einsetzenden Schneeschmelze höhere Abflüsse gewählt: 15 m^3/s als Basisabfluss, 30 m^3/s und 45 m^3/s als Bereich mit den häufigsten Abflüssen (ca. 50%) und 60 m^3/s als Abflussspitze.

Für die betrachtete Zielgrösse Makrozoobenthos-Biomasse wurde zusätzlich das Habitatangebot, mit dem sogenannten «Weighted Useable Area» (WUA, *Bovee* 1982), als integraler Wert berechnet. Das WUA ist die flächengewichtete Summe der Habitateignungen eines Abschnitts und gibt einen gewissen Hinweis darauf, wie viele «wertvolle» Lebensräume vorhanden sind. Dafür wird in einem ersten Schritt für jede Zelle im hydraulischen Modell das Produkt aus Zellenfläche (A) und dem dortigen Habitateignungsindex (HSI) berechnet. Anschliessend wird die Summe aller Produkte bestimmt. Je höher der Wert, desto mehr geeignete Lebensräume finden sich im untersuchten Flussabschnitt. WUA wird als Funktion des Abflusses dargestellt (*Bild 5* & *7*).

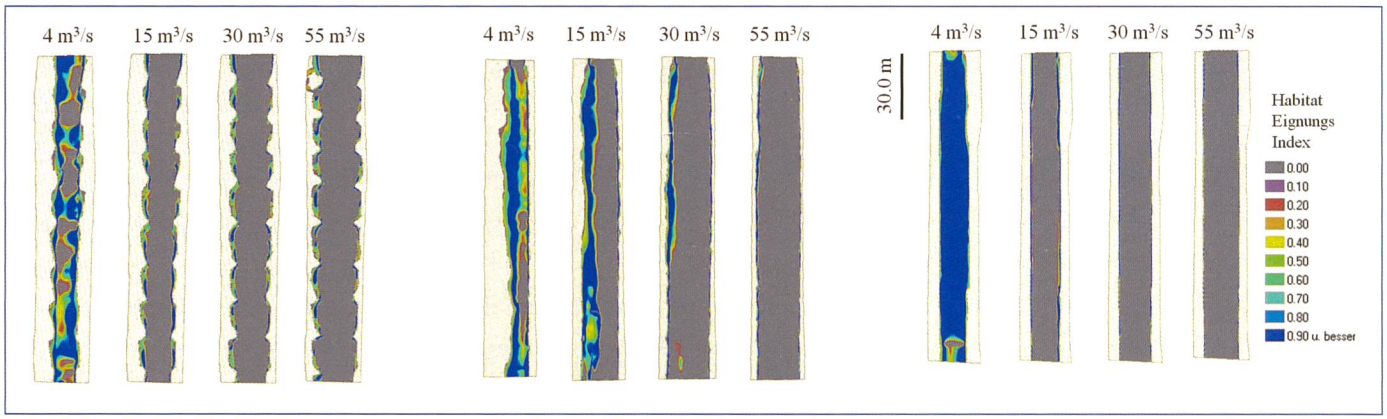


Bild 4. Habitateignungskarten berechnet mit CASiMiR für die drei Morphologietypen Buhnenstrecke (links), Kiesbankstrecke (Mitte) und Kanalstrecke (rechts) bei verschiedenen Abflüssen im Winter. Der Habitateignungsindex liegt zwischen 0 und 1. Grau eingefärbte Flächen bedeuten dabei eine sehr niedrige Eignung, rot bis grün eine mittlere und blau eine hohe Habitateignung.

4. Resultate

Die Berechnungen in CASiMiR zeigen, dass die Lebensraumbedingungen für die Biomasse des Makrozoobenthos sehr stark von der Höhe des Abflusses, der Saison aber auch von der Morphologie abhängen.

4.1 Biomasse des Makrozoobenthos im Winter

Im Winter liegen die natürlichen Abflüsse in der Schwallstrecke zwischen 2.5 und rund 10 m³/s (5%- und 95%-Perzentil der Abflüsse von 1913–1921). Durch die Speicherung in den Stauseen der KWO erfolgt eine saisonale Verschiebung von Teilen der Sommerabflüsse in den Winter. Heute liegen die Abflüsse in 90% der Fälle zwischen 3 m³/s und rund 40 m³/s und über 50% liegen zwischen 15 und 30 m³/s.

Bei niedrigen Abflüssen finden sich in allen betrachteten Abschnitten relativ grosse Flächen mit mittlerer bis guter Eignung *(Bild 4)* für die Entwicklung einer hohen Biomasse an Makrozoobenthos. Abflüsse über 30 m³/s treten im Winter nur gelegentlich und nicht über allzu lange Zeit auf. Deshalb spielen bei diesen Abflussverhältnissen die Lebensraumbedingungen gesamthaft gesehen eher eine untergeordnete Rolle. Allerdings kann bei höheren Abflüssen von einer Zunahme der Verdriftung von Wirbellosen ausgegangen werden, die die Biomasse des Makrozoobenthos zu einem gewissen Grad reduzieren dürfte.

Aufgrund der homogenen Fliessbedingungen in der Kanalstrecke wirken sich in diesem Abschnitt die Änderungen der Lebensraumbedingungen am stärksten aus. Bereits bei Abflüssen von 15 m³/s werden nur noch minimale Bereiche direkt an der Uferlinie mit mittlerer bis guter Eignung ausgeschieden *(Bild 4)*.

In der Kiesbankstrecke liegen Flächen mit mittlerer oder guter Eignung bis zu Abflüssen von 30 m³/s vor. Diese Flächen liegen bei niedrigen Abflüssen jedoch in der Niedrigwasserrinne, während sie sich bei höheren Abflüssen auf den dann überströmten Kiesbänken befinden *(Bild 4)*. Dieses Phänomen zeigt sich auch in dem zweiten Maximum der WUA-Kurve (bei ca. 15 m³/s) in *Bild 5*. Allerdings gibt es schmale Bereiche auf der Kiesbank, die sowohl bei Sunk als auch bei Schwall gute Eignungen anzeigen.

Auch in der Buhnenstrecke nehmen die Flächen mit mittlerer oder guter Eignung mit steigendem Abfluss ab. Doch liegen die geeigneten Flächen sowohl bei tiefen als auch bei höheren Abflüssen im Strömungsschatten der Buhnen.

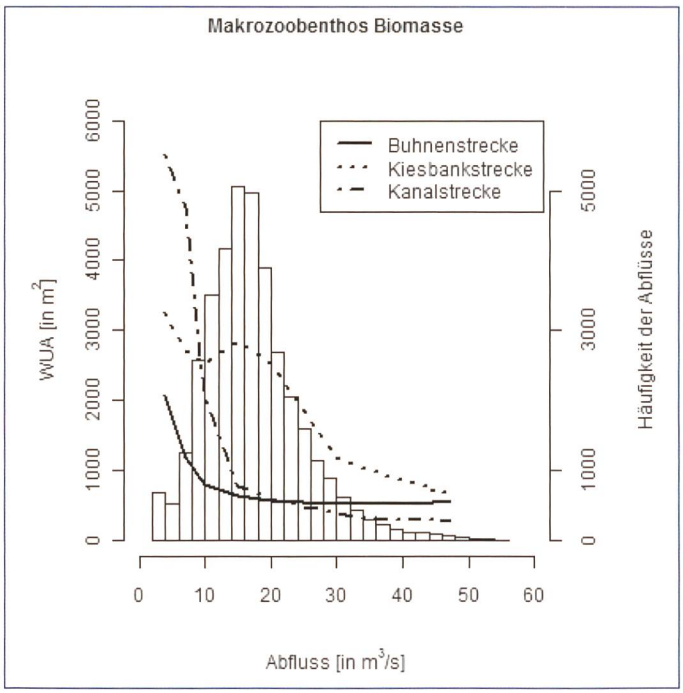


Bild 5. Weighted Useable Area (WUA) für die Makrozoobenthos-Biomasse im Winter als Funktion des Abflusses. Je höher das WUA, desto mehr geeignete Habitate stehen zur Verfügung (Linien). Die Balken zeigen die Häufigkeitsverteilung (auf 15-Minutenbasis) der Abflüsse in den Wintern 2009–2012.

4.2 Frühling

Im Frühling liegen die natürlichen Abflüsse in der Schwallstrecke zwischen 2.5 und 42.2 m³/s (5%- und 95%-Perzentil der Abflüsse von 1913–1921). Generell sind die Abflüsse aufgrund der Schneeschmelze deutlich höher als im Winter. Da das Gadmertal (⅓ des KWO-Einzugsgebiets) über keine Speicherseen verfügt, fallen permanent hohe Schmelzwasser an, sodass der Basisabfluss deutlich erhöht ist (zwischen 13 und 40 m³/s). Durch die (natürlicherweise auftretenden) höheren Basisabflüsse im Frühling erhöhen sich auch die Abflusstiefen und Fliessgeschwindigkeiten, welche das Habitatangebot stark reduzieren.

Verglichen mit den Verhältnissen im Winter zeigen die Modellsimulationen eine deutliche Verschärfung der Lebensraumbedingungen für den Frühling an.

In der Kanal- und in der Buhnenstrecke liegen selbst beim Basisabfluss von 15–20 m³/s so gut wie keine geeigneten Flächen mehr vor *(Bild 6)*. In der Kiesbankstrecke sind die geeigneten Flächen im Frühling etwas kleiner als im Winter (tief-

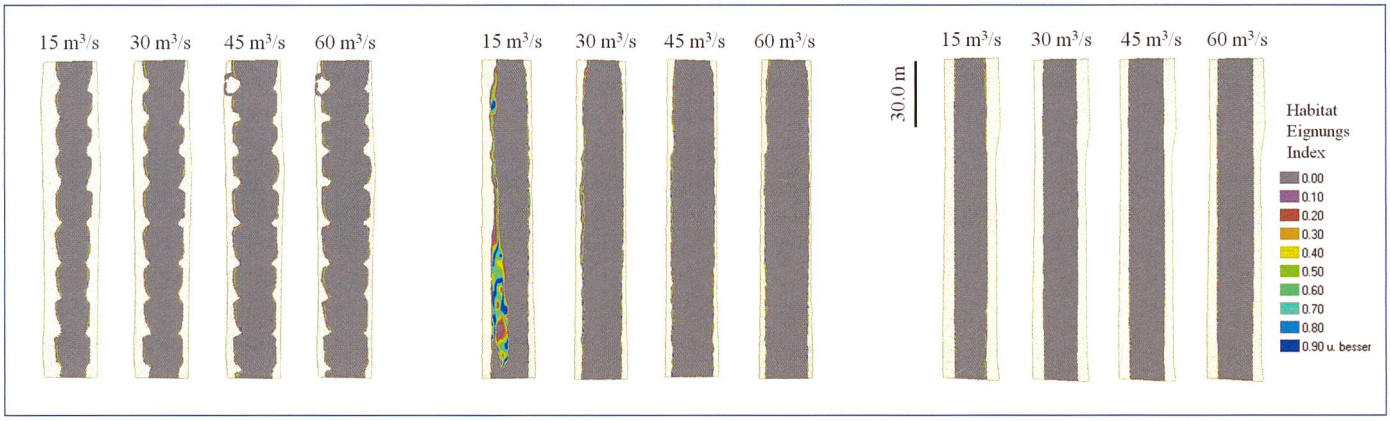


Bild 6. Habitateignungskarten berechnet mit CASiMiR für die drei Morphologietypen Buhnenstrecke (links), Kiesbankstrecke (Mitte) und Kanalstrecke (rechts) bei verschiedenen Abflüssen im Frühling. Der Habitateignungsindex liegt zwischen 0 und 1. Grau eingefärbte Flächen bedeuten dabei eine sehr niedrige Eignung, rot bis grün eine mittlere und blau eine hohe Habitateignung.

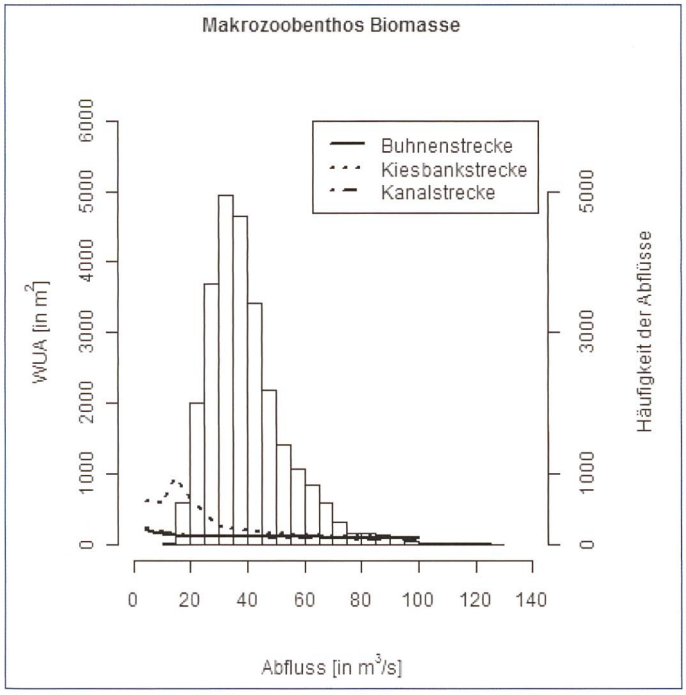


Bild 7. Weighted Useable Area (WUA) für die Makrozoobenthos-Biomasse im Frühling als Funktion des Abflusses. Je höher das WUA, desto mehr geeignete Habitate stehen zur Verfügung (Linien). Die Balken zeigen die Häufigkeitsverteilung (auf 15-Minutenbasis) der Abflüsse in für die Frühlingssituationen 2009–2011.

ere WUA-Werte). Allerdings liegen diese Flächen nur auf den zu dieser Jahreszeit permanent überströmten Kiesbänken und nicht in der Niederwasserrinne *(Bild 6)*. Die geeigneten Flächen verschwinden jedoch bei Abflüssen von ca. 30 m³/s, die im Frühjahr recht häufig auftreten.

5. Diskussion

5.1 Methodenkritik

Die Präferenzkurven sind ein nützliches Werkzeug, um einen generellen Eindruck von den Ansprüchen der Wirbellosen zu erhalten. Allerdings ist dies mit relativ grossen Unsicherheiten verbunden. So wurden bei dieser Fallstudie teilweise Daten aus der Schwallstrecke verwendet, bei denen die physikalischen Parameter Abflusstiefe und Fliessgeschwindigkeit mit den verschiedenen Abflüssen sehr stark schwanken. Daher wurde der Schwerpunkt bei den Probenahmen auf die Restwasserstrecke gelegt, wo keine künstlichen Pegelschwankungen auftreten. Die Restwasserstrecke führt jedoch ganzjährig klares Wasser und das Temperaturregime ist gegenüber dem natürlichen Zustand verändert. Aus diesem Grund eignet sie sich nur bedingt als Referenzstrecke. Eine weitere Unsicherheit in der Erstellung der Präferenzkurven liegt in der Tatsache, dass die Interaktion der einzelnen Parameter wie Fliessgeschwindigkeit, Abflusstiefe und Korngrösse nicht genügend integriert werden kann (z.B. *Mouton* et al. 2007). Als eine weitere Unsicherheit in der hier vorgestellten Fallstudie ist das Hochwasser im Herbst 2011 zu nennen, das einen gewissen Einfluss auf die Besiedlung des Makrozoobenthos gehabt haben dürfte. Trotz dieser allgemeinen und fallspezifischen Unsicherheiten dürften die hier erstellten Präferenzkurven eine relativ gute Beschreibung der Lebensraumansprüche der Wirbellosen in der Hasliaare geben und eine solide Basis für das Ableiten der Fuzzy-Logischen Regeln im Modell darstellen.

5.2 Saisonale Effekte

Die Habitateignungskarten (*Bild 4* & *6*) und die WUA-Kurven (*Bild 5* & *7*) zeigen, dass generell nur bei niedrigen Abflüssen relativ viele Flächen eine gute oder mittlere Eignung anzeigen.

Bedingungen Winter

Vor der Verschiebung des Abflussregimes vom Sommer in den Winter lag der Abfluss im Winter relativ konstant auf tiefem Niveau (ca. 4 m³/s). Durch die saisonale Verschiebung des Abflussregimes treten diese niedrigen Abflüsse nur noch gelegentlich auf. Ein Grossteil der Abflüsse befindet sich heute zwischen 15 und 30 m³/s. Aufgrund der hohen Fliessgeschwindigkeiten und Abflusstiefen ist der Bereich in der Hauptrinne für die Wirbellosen grösstenteils ungeeignet. Allerdings tritt eine erhöhte Verdriftung von Wirbellosen erst bei höheren Abflüssen und bei schnellen Abflussanstiegen auf (Limnex 2009, 2012).

Bedingungen Frühling

Bedingt durch die im Frühling einsetzende Schneeschmelze liegen die Abflüsse deutlich über denen im Winter. Rund ein Drittel des Einzugsgebiets der KWO fällt auf das Gadmertal (Sustengebiet). Hier gibt es keine grossen Stauseen, sodass das Schmelzwasser aus diesem Gebiet permanent turbiniert wird und einen relativ hohen Basisabfluss in der Schwallstrecke bewirkt, der in der Grössenordnung des natürlichen Basisabfluss von 15 m³/s liegt.

Mit der Jahreszeit ändern sich neben den Abflussbedingungen auch die Lebensraumansprüche der Insektenlarven, da sich deren Lebenszyklus ändert. Im Frühling stehen die Invertebraten kurz

vor dem Emergieren (d.h. die Tiere verlassen das Wasser als adulte Insekten, um sich fortzupflanzen). Die meisten untersuchten Arten bevorzugen deshalb im Frühling seichte, aber gut durchströmte Lebensräume. Solche Habitate sind in der Schwallstrecke selbst bei den natürlich auftretenden Basisabflüssen jedoch nur sehr vereinzelt vorhanden, was sich auch in den Habitateignungskarten und WUA-Kurven zeigt (*Bild 6* & *7*). Daraus lässt sich schliessen, dass im Frühjahr nicht der Schwallbetrieb alleine das Angebot der geeigneten Lebensräume stark reduziert, sondern dies vor allem auf die stark eingeengte und begradigte Morphologie zurück zu führen ist.

5.3 Morphologie

Buhnenstrecke

Durch die Buhnen wird der Abfluss bei diesem Morphologietyp auf die Flussmitte konzentriert. Dadurch entstehen in der Flussmitte bereits bei Abflüssen von über 10 m^3/s hydraulisch harsche Bedingungen, die für die Invertebraten ungeeignet sind. Im Strömungsschatten hinter den Buhnen bilden sich aber einige Refugien mit guter oder mittlerer Eignung, die zumindest im Winter auch bei höheren Abflüssen bestehen bleiben. Allerdings lagert sich hinter den Buhnen regelmässig Sand ab, welcher für die meisten Wirbellosen kein günstiges Substrat darstellt (*Gore* et al. 2001).

Kiesbankstrecke

Bei mittleren Abflussverhältnissen (15–30 m^3/s) finden sich in diesem Flussabschnitt im Vergleich zu den anderen beiden Morphologietypen deutlich mehr Flächen an geeigneten Lebensräumen. Allerdings verschieben sich diese Stellen mit steigendem Abfluss von der Niedrigwasserrinne auf die Kiesbänke. Diese stellen den dort lebenden Wirbellosen Refugien zur Verfügung und können so bis zu einem gewissen Grad die Auswirkungen von erhöhten Schwällen puffern. Doch auch dieser Morphologietyp stösst an seine Grenzen, da bei Abflüssen von über 30 m^3/s, wie sie im Frühling auch natürlicherweise auftreten würden, geeignete Flächen verschwinden.

Kanalstrecke

Die Abflussrinne in der Kanalstrecke ist insgesamt weniger breit als bei den anderen beiden Morphologietypen. Aufgrund der ebenen Sohle ergeben sich relativ homogene Fliessbedingungen und nur grössere Blöcke können abschnittsweise eine gewisse Strömungsvariabilität verursachen. Bereits bei Abflüssen von 15 m^3/s gibt es aufgrund des Blockwurfs nur noch einen sehr schmalen Uferstreifen mit geeigneten Lebensräumen. Über 99% der Fläche werden dagegen als ungeeignet klassifiziert.

Künftige Änderungen der Morphologie

Im Rahmen des Hochwasserschutzprojekts Aare Meiringen bis Brienzersee werden aktuell morphologische Aufwertungen diskutiert. Die Aare ist heute zwischen Meiringen und Brienzersee von der Zentralbahn (linker Damm) und der Nationalstrasse (rechts der Aare) begrenzt. Daher sind nur punktuelle Aufweitungen im Raum Meiringen und im Mündungsbereich wahrscheinlich. Zusätzlich ist geplant, die Vorländer in der Kanalstrecke abzusenken und soweit es die Hochwassersicherheit und der Geschiebehaushalt zulassen, auch strukturelle Verbesserungen (z.B. alternierende und inklinante Buhnen) im Gerinne vorzunehmen. Inwieweit dies zur Erhöhung geeigneter Habitatsflächen führt, müssen künftige Untersuchungen noch zeigen.

5.3 Vergleich mit anderen Flüssen

Im Vergleich zu anderen Fliessgewässern dieser Höhenlage erreicht die Makrozoobenthos-Biomasse (Indikator B1, *Baumann* et al. 2012) für die Buhnenstrecke und die Kiesbankstrecke rund 60% der Sollbiomasse (Bewertung: mässig) und für die Kanalstreck rund 90% (Bewertung: sehr gut, Limnex 2012). Als Referenz für die Berechnung der Biomass-Sollwerte wurden Daten aus über 70 österreichischen Flüssen verwendet (*Dückelmann* 2001).

Ausserdem wurden für die Abklärungen zu Schwall/Sunk in der Hasliaare auch Probenahmen in der benachbarten Lütschine durchgeführt. Die Lütschine entwässert die Jungfrauregion und fliesst in Interlaken in den Brienzersee. Ihr Einzugsgebiet ist hinsichtlich Vergletscherung, Höhenlage und Grösse mit dem der Hasliaare sehr gut vergleichbar und es treten keine künstlichen Pegelschwankungen auf. Auch verläuft die Lütschine in ihrem Unterlauf sowohl in Abschnitten mit Kiesbänken als auch in vollständig kanalisierten Abschnitten. Die Biomassen in der Lütschine zeigen ein bezüglich Morphologie spiegelverkehrtes Bild: Hier sind hohe Biomassen (über 100% des Sollwerts) in der Kiesbankstrecke gefunden worden, während in der Kanalstrecke die Biomassen nur rund 60% des Sollwerts betragen. Allerdings ist es möglich, dass die Probenahmen in der Lütschine durch flussaufwärts durchgeführte Baggerarbeiten etwas beeinflusst sind (Limnex 2012).

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Biomasse der Wirbellosen in der Hasliaare gegenüber dem Erwartungswert reduziert ist.

5.4 Methodisch bedingte Unsicherheiten

Neben der natürlichen Variabilität, die zur Unsicherheit beiträgt, werfen sich schon bei der Probenahme generelle Fragen auf, z.B.:

- Welche Stellen werden beprobt?
- Wann werden die Probenahmen durchgeführt?
- Werden grosse Tiere, wie z.B. Steinfliegenlarven gefunden, die einen grossen Einfluss auf die Gesamtbiomasse haben?
- Sind zusätzliche Ereignisse zu beachten (z.B. Bauarbeiten, Hochwasserereignisse)?

Aufgrund dieser Unsicherheiten ist eine klare Aufteilung der Einflüsse von Abflussregime und Morphologie auf die Gewässerökologie nur bedingt möglich. Auf jeden Fall dürften die hier genannten Aspekte einen wesentlichen Einfluss auf die eher überraschend hohen Biomassen in der Kanalstrecke der Hasliaare haben.

5.5 Gesamtbeurteilung

Durch Schwall/Sunk wird das natürliche Abflussregime künstlich verändert. Dies wirkt sich auch auf die hydraulischen Bedingungen aus. Mit der CASiMiR-Modellierung werden die biologischen Ansprüche mitberücksichtigt und erlauben so, die Änderungen in der Habitatsverteilung quantitativ zu beschreiben.

Die Folge der saisonalen Speicherung ist eine deutliche Erhöhung der winterlichen Abflüsse. Bei der bestehenden Morphologie hat dies für die Invertebraten eine deutliche Reduktion von geeigneten Lebensräumen zur Folge. Für die Verdriftung von Wirbellosen ist neben der Abflussmenge auch die Schwallrate von grosser Bedeutung. Ohne Schwalldämpfende Massnahmen kann von einem gewissen Verlust durch Verdriftung ausgegangen werden, wie auch schon in diversen wissenschaftlichen Untersuchungen gezeigt werden konnte (z.B. *Bruno* et al. 2010). Daher kann davon ausgegangen werden, dass im Winter neben der Morphologie auch das künstliche Abflussregime einen signifikanten Einfluss auf die Gemeinschaft der Invertebraten ausübt.

Im Frühling liegen die heutigen

Abflüsse im Bereich des natürlichen Abflussregimes. Deshalb wirkt sich in dieser Jahreszeit vor allem die relativ eintönige Morphologie negativ auf die Gemeinschaft der Invertebraten aus.

Über beide Jahreszeiten hinweg schneidet die Kiesbankstrecke gewässerökologisch am günstigsten ab. Dies ist auf die vielfältigere Struktur und auf die höhere Flussbreite zurück zu führen. Ausserdem wirkt die Aareschlucht puffernd auf Abflussanstieg und -reduktion, so dass hier die Schwall- und Sunkraten auf rund die Hälfte gegenüber der Buhnenstrecke reduziert werden.

Zusätzlich zur Biomasse wurden auch noch andere Parameter modelliert, wie die Häufigkeit von einzelnen Leitarten (z.B. *Baetis* sp. oder *Rhitrogena* sp.) und die Artenvielfalt der Wirbellosenfauna (*Tanno* 2012). Diese Resultate werden in diesem Artikel nicht dargestellt, flossen aber in die hier vorgestellten Schlussfolgerungen massgeblich mit ein.

6. Ausblick und Praxisrelevanz

Physikalische Habitatmodelle stellen ein wichtiges Unterstützungstool bei Sanierungsprojekten von Fliessgewässern dar. Sie werden mittlerweile routinemässig bei Restwasseruntersuchungen eingesetzt, können aber auch bei Schwall/Sunk-Untersuchungen wichtige Erkenntnisse liefern. Diese Werkzeuge können helfen die Effekte von Schwall/Sunk auf das Lebensraumangebot zu quantifizieren und die Auswirkungen von zukünftigen Sanierungsszenarien besser abzuschätzen. Allerdings sollten weitere Untersuchungen mit Habitatmodellen auch die Schwall- und Sunkraten berücksichtigen. Für das Makrozoobenthos sind in diesem Zusammenhang noch einige Fragen offen. Bezüglich allgemeiner Lebensraumansprüche, Reaktionszeiten und Mobilität des Makrozoobenthos besteht noch grosser Forschungsbedarf.

Im Frühjahr 2016 wird der Bau des Beruhigungsbecken und der Speicherkaverne Innertkirchen zur Minderung der Auswirkungen von Schwall/Sunk abgeschlossen sein. Insbesondere die Schwall- und die Sunkraten können mit diesen Speichermöglichkeiten deutlich reduziert werden. Die künftig längeren Reaktionszeiten dürften die Verdriftung von Wirbellosen erheblich verringern.

Danksagung

Wir danken all jenen Personen, die an der Durchführung dieses Projekts mitgeholfen haben: *Peter Baumann* (Limnex AG), *Matthias Meyer* (KWO), *Matthias Schneider* und *Ianina Kopecki* (*Schneider & Jorde* Ecological Engineering GmbH, Deutschland), Prof. *Craig Thompson* (Western Wyoming Community College, USA), *Andreas Bruder* (EAWAG), *Emilie Person* (EAWAG), *Armin Peter* (EAWAG), *Roman Alther* (EAWAG) und *Stephanie Schmidlin* (Limnex AG).

Literatur

Bieri, M.P. (2012): Operation of Complex Hydropower Schemes and its Impact on the Flow Regime in the Downstream River System under Changing Scenarios. Doktorarbeit Nr. 5433, EPFL. Lausanne.

Bruder, A., Schweizer, S., Vollenweider, S., Tonolla, D., Meile, T. (2012): Schwall und Sunk: Auswirkungen auf die Gewässerökologie und mögliche Sanierungsmassnahmen. «Wasser Energie Luft» 104 (4) 257–264.

Bruder, A., Vollenweider, S., Schweizer, S., Tonolla, D., Meile, T. (2012): Schwall und Sunk: Planung und Bewertung von Sanierungsmassnahmen – Möglichkeiten und Empfehlungen aus wissenschaftlicher Sicht. «Wasser Energie Luft» 104 (4) 265–272.

Bruno, M.C., Maiolini, B., Carolli, M., Silveri, L. (2010): Short time-scale impacts of hydropeaking on benthic invertebrates in an Alpine stream (Trentino, Italy). Limnologica 40 (4): 281–290.

Cereghino, R., Cugny , P., Lavandier, P: (2002). Influence of intermittent hydropeaking on the longitudinal zonation patterns of benthic invertebrates in a mountain stream. International Review of Hydrobiology 87 (1): 47–60.

Cereghino, R., Lavandier, P: (1998). Influence of hypolimnetic hydropeaking on the distribution and population dynamics of Ephemeroptera in a mountain stream. Freshwater Biology 40 (2): 385–399.

Dückelmann, H. (2001): Seehöhen-Biomassen-Beziehung des Makrozoobenthos in österreichischen Fliessgewässern. Diplomarbeit, Universität für Bodenkultur Wien, 81 Seiten.

Eberstaller, J., Frangez, C., Baumann, P., Schneider, M., Kopecki, I. (2012): Alpenrhein D6: Quantitative Analyse von Schwall/Sunk-Ganglinien für unterschiedliche Anforderungsprofile. Arbeitspaket 2 – Adaptierung der Präferenzkurven, Definition von Eingangsparametern für die Habitatmodellierung. Im Auftrag der Internationalen Regierungskomission Alpenrhein (IRKA).

Jorde, K. (1997): Ökologisch begründete, dynamische Mindestwasserregelungen bei Ausleitungskraftwerken. Doktorarbeit, Universität Stuttgart, Stuttgart.

LCH (2010): Abschwächung Schwall – Abschätzung der dämpfenden Wirkung von grossmassstäblichen Uferrauheiten auf Schwall- und Sunkerscheinungen in der Hasliaare. Rapport LCH Nr. 25/2010. Lausanne. Bericht im Auftrag der KWO, Autoren: *T. Meile* und *M. Bieri*.

LCH (2012): Betrieb des Dämpfungsbecken Innertkirchen. Rapport LCH Nr. 13/2012, Lausanne. Bericht im Auftrag der KWO, Autor: *M. Bieri*.

Limnex (2009): Schwall/Sunk in der Hasliaare – Gewässerökologische Untersuchung von Hasliaare und Lütschine – Beurteilung der Schwall-Auswirkungen in je zwei Strecken und Szenarien. Interner Bericht. Zürich.

Limnex (2012): Schwall/Sunk-Bewertung der KWO-Zentralen in Innertkirchen. Bericht im Auftrag der KWO. Autoren: *P. Baumann, P. Büsser, A. Peter, S. Schmidlin, K. Wächter*.

Neary, J.P. (2006): Use of Physical Habitat Structure to Assess Stream Suitability for Brown Trout: A Case Study of Three Upland Scotish Streams. Dissertation, University of Stirling, Scotland.

Person, E., Bieri, M., Peter, A., Schleiss, A. J. (2013): Mitigation measures for fish habitat improvement in Alpine rivers affected by hydropower operations. Ecohydrology (2013).

Schneider, M. (2001): Habitat und Abflussmodellierung für Fliessgewässer mit unscharfen Berechnungsansätzen. Doktorarbeit, Universität Stuttgart, Stuttgart.

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

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

Tanno, D. (2012): Physical habitat modeling for the assessment of macroinvertebrate response to hydropeaking. Master Thesis, Universität Zürich/EAWAG.

Anschrift der Verfasser:
David Tanno, M.Sc., Limnex AG
Neumarktplatz 18, CH-5200 Brugg
david.tanno@limnex.ch
Dr. *Steffen Schweizer*, Kraftwerke Oberhasli AG
Grimselstrasse 19, CH-3862 Innertkirchen
sste@kwo.ch
PD Dr. *Christopher Robinson*, EAWAG
Überlandstrasse 133, CH-8600 Dübendorf
christopher.robinson@eawag.ch

Rey AUTOMATION

Erfolg besteht darin, dass man genau die Fähigkeiten besitzt, die im Moment gefragt sind. Henry Ford

H.P. REY AG
POSTSTRASSE 5 / CH-9536 SCHWARZENBACH

Telefon +41 71 929 57 00
Fax +41 71 929 57 49

info@rey-automation.ch

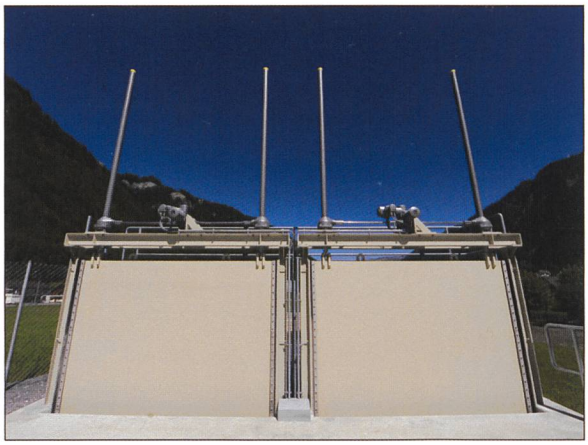
www.rey-automation.ch

H. ERNE METALLBAU AG

VERTRAUEN IN STAHL
www.h-erne.ch info@h-erne.ch

Steiächerweg 12
CH-5316 Leuggern

Engineering, Fertigung und Montage



- Tafel-, Segment- und Rollschützen
- Drucktore / -türen
- Stauklappen
- Fein- und Grobrechen
- Dammbalken
- Druckrohrleitungen in Stahl
- Panzerungen in Stahl
- Revisionen an Stahlwasserbauteilen

STAHLWASSERBAU - UMWELTTECHNIK - STAHL-/METALLBAU

Mit uns bleiben Sie in Bewegung.
Umfassend, unkompliziert und schnell.

schenker
mehr als hydraulik

- Revisionen und Neuanfertigungen von Hydraulik-Zylindern
- Aus- und Einbauservice vor Ort
- Pumpenrevisionen für jedes Fördermedium

Schenker Hydraulik AG
Aarauerstrasse 35 | 5018 Erlinsbach | Tel. 062 857 35 00 | **www.schenker-hydraulik.ch**

Hydraulische Lösungen - alles aus einer Hand

Planen - entwickeln - produzieren

Als innovatives Schweizer Traditionsunternehmen sind wir spezialisiert auf hydraulische Steuerungs- und Antriebstechnik. Ob grosse, komplexe Herausforderungen oder Einzelkomponenten: Jeder Auftrag ist für uns der Wichtigste.
Bei Fragen, Anliegen oder Projekten freut es uns, für Sie da zu sein.

Oelhydraulik Hagenbuch AG, Rischring 1, CH-6030 Ebikon, Tel. +41 (0)41 444 12 00, Fax +41 (0)41 444 12 01
ohe@hagenbuch.ch, www.hagenbuch.ch, www.hydraulikshop.ch

OHE
Oelhydraulik Hagenbuch AG