

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 Wissensenerweiterungen 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 Win-

ter 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 Geschiebehalt 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 ausgewähl-

ten 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 m³/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).

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 m³/s, der natürliche Niedrigwasserabfluss Q_{347} 2.4 m³/s (basierend auf den Abflussdaten von 1913–1921) und das zweijährige Hochwasser 190 m³/s. Sohlenbewegungen treten bei Abflüssen oberhalb von 150 m³/s auf (Schweizer et al. 2010). Aufgrund des hohen Gletscheranteils von

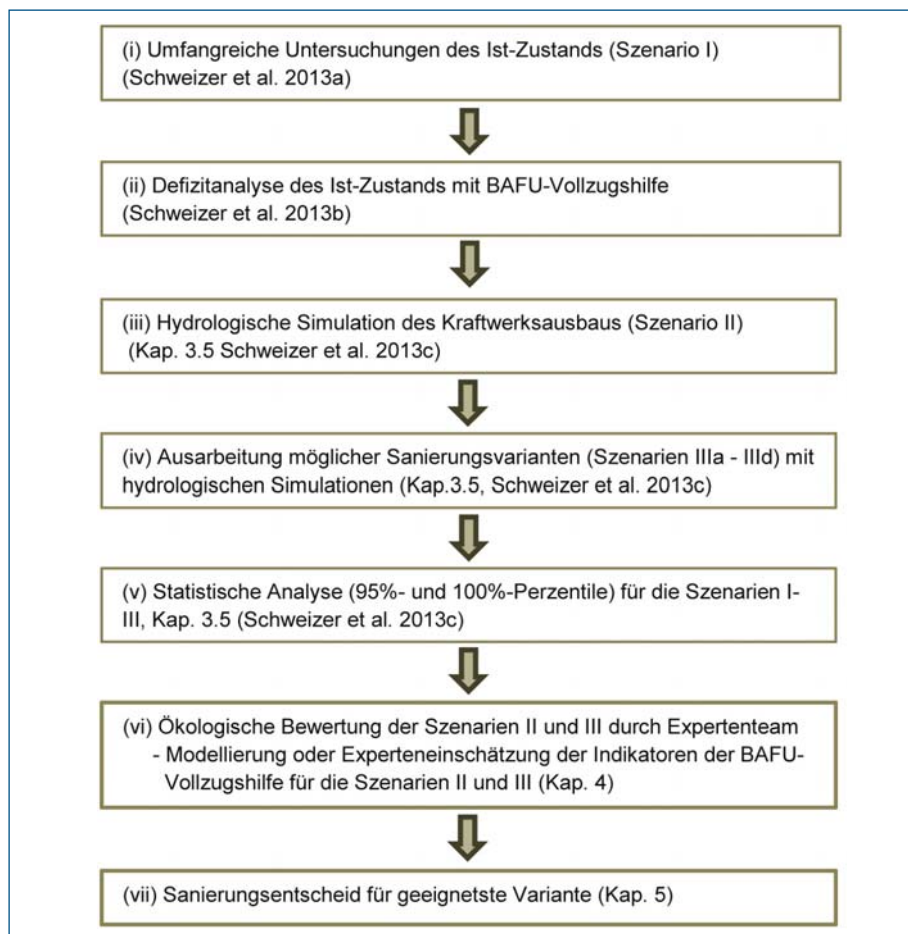


Bild 1. Arbeitsschritte bei der Sanierung Schwall/Sunk für die Fallstudie Hasliaare.

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 $40 \text{ m}^3/\text{s}$ und künftig $65 \text{ m}^3/\text{s}$ sowie im Kraftwerk Innertkirchen 2 (heute und künftig) $30 \text{ m}^3/\text{s}$. 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 $3 \text{ m}^3/\text{s}$.



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:

- Bühnenstrecke 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 Brienzensee (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 wesent-

liche 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 $34 \text{ m}^3/\text{s}$ (etwa 50% des heute maximal möglichen Kraftwerksdurchflusses) stufenweise erhöht. Eine vollständige Erhöhung um $25 \text{ m}^3/\text{s}$ erfolgte bei Kraftwerksdurchflüssen von $54 \text{ m}^3/\text{s}$ (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 turbinieren Wassers in den 16 km entfernten Brienzensee nicht weiterverfolgt.

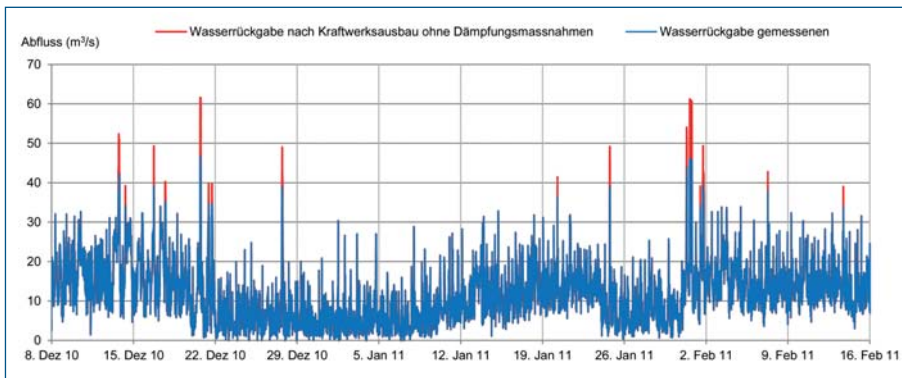


Bild 3. Gemessene (Zustand I) und simulierte Wasserrückgabe (Szenario II) in Innertkirchen für den Winter 2010/11.

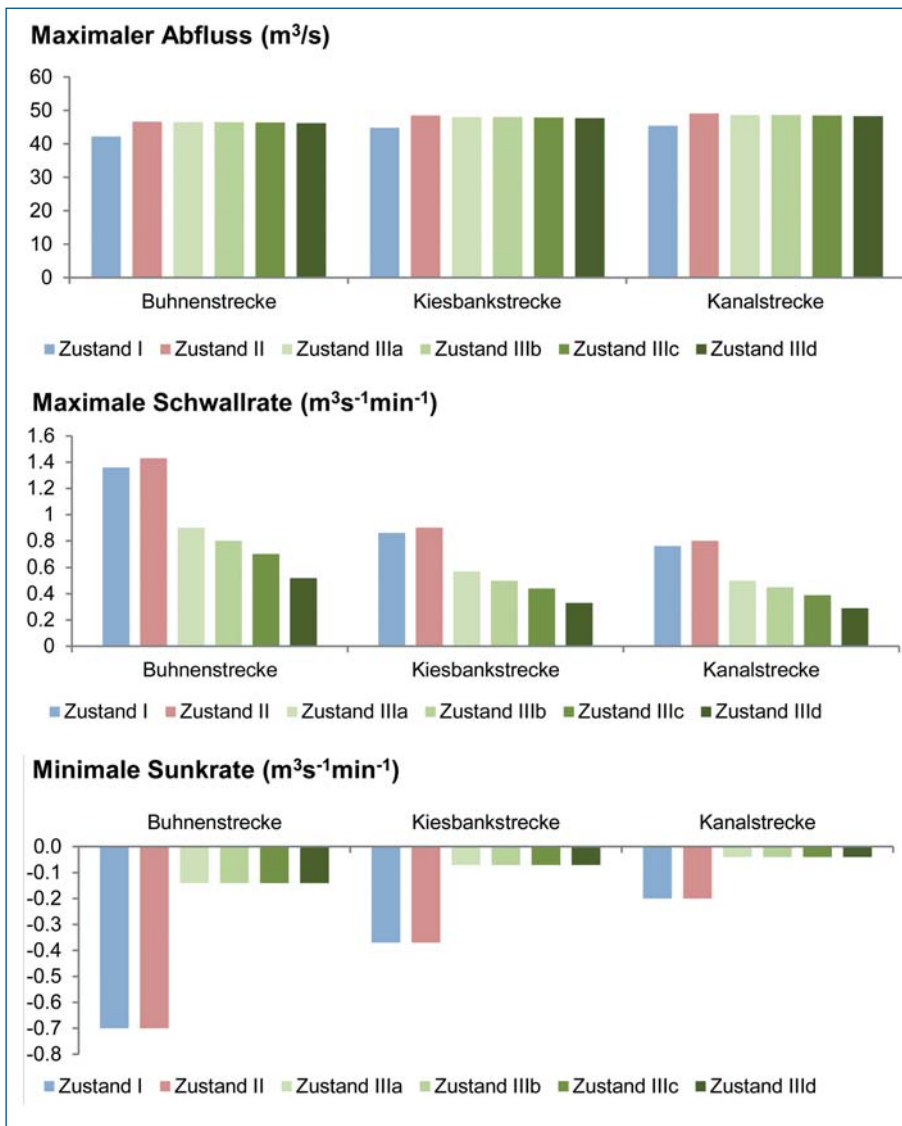


Bild 4. Darstellung der 95%-Perzentile des Maximalabflusses (oben), der maximalen Schwallrate (Mitte) und der minimalen Sunkrate (unten) für die Zustände/Szenarien I-III. Da die Sunkraten in negativen Werten angegeben sind, wird der Begriff «minimale Sunkrate» verwendet.

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 Ausbruchma-

terial 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 IIIId: 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 grossmasstäblichen 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 m³/s auf 46.6 m³/s und damit verbunden zu einer Steigerung der Schwallraten von heute 1.36 m³s⁻¹min⁻¹ auf 1.43 m³s⁻¹min⁻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 m³/s als auch die Sunkraten im tiefen Abflussbereich unterhalb von 8.1 m³/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 Grün.

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, Sohlen-schubspannung, hydraulischer Gradient

und Korngrößenverteilung, die für die Prozesse der Kolmation und Dekolmation 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 _{min} , 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 entsprechen sowohl der Index zur Beschreibung der standortgerechten Vielfaltigkeit (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.

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 Pegelrückgangsrates, trockenfallende Fläche bei Sunkabfluss sowie die Beobachtung von tatsächlich gestrandeten Fischen berücksichtigt. Die Beurteilung dieser Pa-

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

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.

rameter erfolgt ausschliesslich bei tiefen Abflussverhältnissen, im Fall der Hasliaare unterhalb von 8.1 m³/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 m³/s geeignete Lebensräume für juve-

nile 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 m³/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 Vergleichen 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 $1.36 \text{ m}^3\text{s}^{-1}\text{min}^{-1}$ auf $0.90 \text{ m}^3\text{s}^{-1}\text{min}^{-1}$ beim Szenario IIIa und auf $0.70 \text{ m}^3\text{s}^{-1}\text{min}^{-1}$ 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.

Abiotische Indikatoren (A1, Q1, H1)

Dank der Vereinbarung mit dem Kanton werden auch mit den Szenarien IIIa–IIIId 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 $50 \text{ m}^3/\text{s}$ 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 Ka-

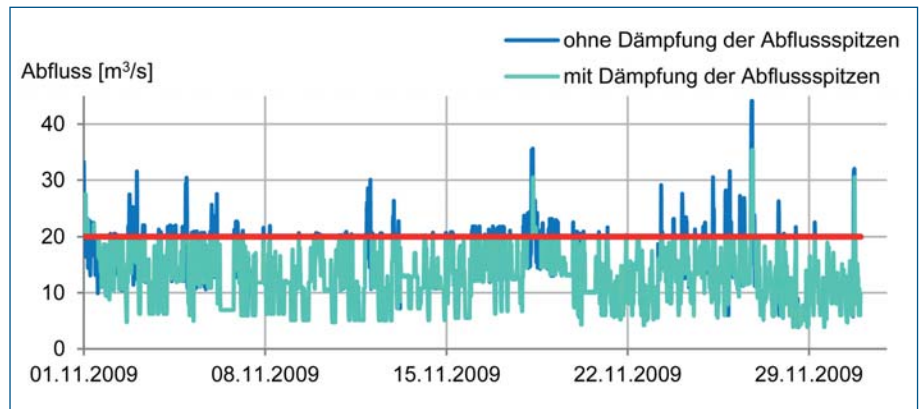


Bild 5. Reduktion des maximalen Abflusses in der Hasliaare im November 2009 zur Verbesserung der Laichbedingungen von Salmoniden (Maire & Theiler 2013). Unterhalb der roten Linie treten günstige Laichbedingungen für die Forellen auf.

nalstrecke. 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 IIIId 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 $50\,000 \text{ m}^3$ (Szenario IIIa) können die Anforderungen hinsichtlich der Pegelrückgangsraten 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 $80\,000 \text{ m}^3$ 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 IIIId mit der Klasse Blau (sehr gut) bewertet.

Verglichen mit den Szenarien I und II führt das Abflussregime der Szenarien IIIa–IIIId 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 $20 \text{ m}^3/\text{s}$ liegen (Bieri 2012, Person et al. 2013). Im November treten i.d.R. eher kleinere Schwallspitzen auf, die bereits mit einem Speichervolumen von $80\,000 \text{ m}^3$ 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–IIIId prognostizierte Erhöhung der Nahrungsverfügbarkeit führt beim Indikator F5 für die Szenarien IIIa–IIIId zu einem Wechsel in die Bewertungsklasse Gelb.

4.4 Gesamtbewertung der verschiedenen Szenarien

Die abschliessende Bewertung für jedes

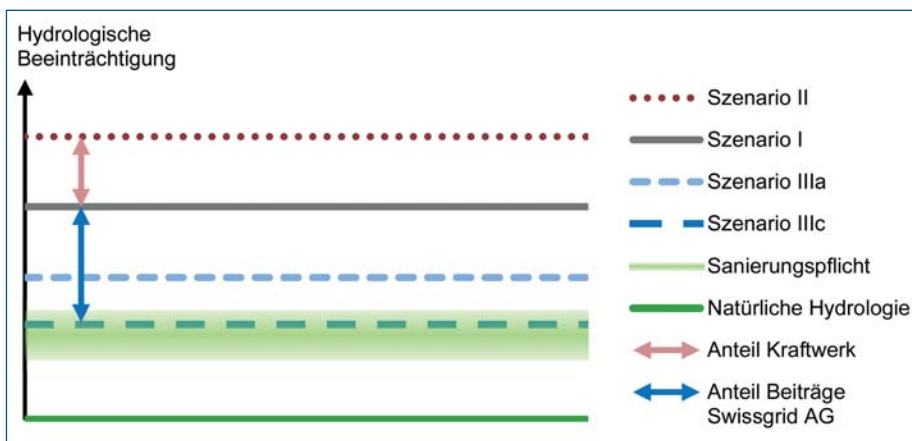


Bild 6. Schematische Darstellung zur Ermittlung des Kostenteilers. Die Y-Achse zeigt dabei die ökologische Beeinträchtigung durch Schwall/Sunk. Das Niveau Sanierungspflicht ist etwas breiter dargestellt, da hier neben ökologischen Kriterien auch die Verhältnismässigkeit mitberücksichtigt werden muss.

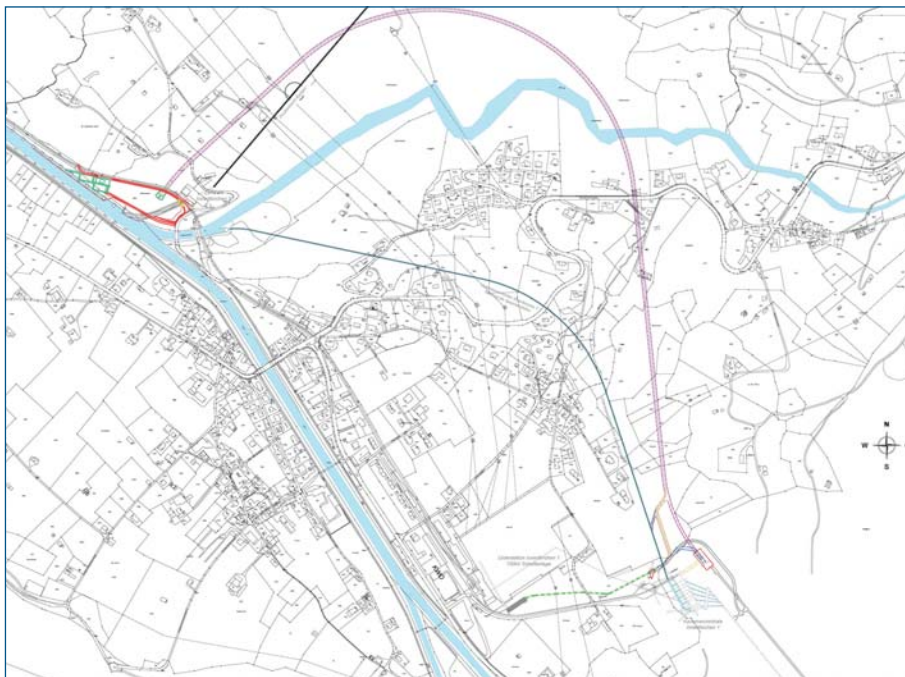


Bild 8. Verlauf des heutigen (blaue Linie) Stollens und des künftigen Speicherstollens (violette Linie, mit deutlicher Laufverlängerung gegenüber heute) sowie Lage des Beruhigungsbeckens (rote Linie).

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 ($V = 50\,000\text{ m}^3$) und IIIb ($V = 60\,000\text{ m}^3$) 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 ($V = 80\,000\text{ m}^3$) und IIId ($V = 100\,000\text{ m}^3$) 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.»



Bild 7. Illustration des künftigen Beruhigungsbeckens in Innertkirchen.

- «Mit der bestehenden Morphologie kann mit den Szenarien IIIa–IIIc 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–IIIc) 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 Kurzbeschreibung der umzusetzenden Sanierungsvariante

Auf Basis der oben beschriebenen Grundlagen wurde von den Vertretern des BAFU und des AWA die Sanierungsvariante IIIc ($80\,000\text{ m}^3$) 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 Paarungszeit 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 <ul style="list-style-type: none"> • 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 IIIc 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. künftigen 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 m³ erreicht werden. Das restliche Volumen wird daher unterirdisch, in Form eines Speicherstollens mit Drosselklappen umgesetzt. Künftig wird das Kraftwerk Innertkirchen 1 das turbinierete 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 Sohlenssubstrat, 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 Sanierungsfalles 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 Hydro-power Schemes and its Impact on the Flow Regime in the Downstream River System under Changing Scenarios. Diss. EPFL No 5433., Zürich, Schweiz.
Baumann P., *Kirchofer 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: Aus-

wirkungen 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 Brienzensee. 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 ingénierie de l'environnement 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 hydro-power operations. *Ecologyhydrology* 2013, 20 Seiten.

Schager E. & *Peter A.* (2004): Fische Stufe F. Me-

thoden 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.*, *Kopeckil 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