

Beurteilung von Massnahmen zur Reduktion von Schwall und Sunk

Fallbeispiel Hasliaare

Martin Bieri, Emilie Person, Armin Peter, Anton J. Schleiss

Zusammenfassung

Das revidierte Gewässerschutzgesetz schreibt für Schwall- und Sunk-beeinträchtigte Gewässer eine Sanierung des Abflussregimes vor. Um Massnahmen in komplexen Kraftwerkssystemen wirtschaftlich und ökologisch zu beurteilen, ist ein interdisziplinärer Ansatz sinnvoll. Der Betrieb des Kraftwerks wird mit dem Softwaretool Routing System simuliert. Daraus resultiert die Ganglinie im Fluss sowie die durch die zu testende Sanierungsmassnahme entstandenen Kosten. Die Beurteilung der Bachforellenhabitate berücksichtigt nebst den kritischen Entwicklungsstadien der Forelle auch den Einfluss der Gerinnemorphologie.

Résumé

La nouvelle loi pour la protection des eaux prescrit l'atténuation du marnage dans des cours d'eau exploités pour la production d'énergie hydraulique. Pour l'évaluation économique et écologique des mesures dans des aménagements d'accumulation complexe, une approche interdisciplinaire a été choisie. La gestion de l'aménagement hydro-électrique a été simulée avec le logiciel Routing System permettant de générer l'hydrogramme du cours d'eau et les couts liés aux mesures d'intervention. L'évaluation des habitats de la truite fario considère différents stades critiques du cycle de vie de la truite ainsi que la géomorphologie de la rivière.

Im KTI-Forschungsprojekt «Nachhaltige Nutzung der Wasserkraft – Innovative Massnahmen zur Reduktion der Schwall- und Sunkproblematik», das von der EAWAG und der EPFL gemeinsam angegangen wurde, konnte ein neuartiger integrativer Ansatz zur Modellierung und Beurteilung der Auswirkungen der Wasserkraftnutzung auf unterhalb liegende Fließgewässer erarbeitet, angewendet und wissenschaftlich publiziert werden (Person et al., 2013).

2. Fallstudie

Die Hasliaare zwischen Innertkirchen und Brienzensee in der Schweiz ist ein schwall-beeinträchtigtes alpines Gewässer unterhalb eines komplexen Wasserkraftwerks, bestehend aus mehreren Speichern und Zentralen (Bild 1). Das Einzugsgebiet der Hasliaare in Brienzwiler hat eine Fläche von ca. 554 km². Der mittlere Jahresabfluss in Brienzwiler beträgt 35 m³/s auf (Schweizer et al., 2008). Die Hasliaare ist als Forellen-

1. Einleitung

Die Wasserkraft ist die wichtigste erneuerbare Energiequelle weltweit. In Europa werden mehr als 40% des Stroms aus Wasserkraft im Alpenraum produziert. Speicherkraftwerke sind für die Erzeugung von Spitzenstrom und die Netzregulierung von zentraler Bedeutung (Schleiss, 2007). Die Wasserkraft wird in Zukunft mit grossen Herausforderungen konfrontiert, wie die durch den Klimawandel veränderte Wasserverfügbarkeit sowie neue rechtliche, politische und wirtschaftliche Rahmenbedingungen.

Der Betrieb von Speicherkraftwerken führt zu einer instationären Wasserabgabe in das unterhalb liegende Fließgewässer. Schwall und Sunk erzeugen erhebliche Veränderungen im Abflussregime des Vorfluters und beeinträchtigen somit das aquatische Ökosystem (Moog, 1993; Bunn und Arthington, 2002; Young et al., 2011). Obwohl bis heute die biotischen Beeinträchtigungen qualitativ nicht vollständig und quantitativ wenig verstanden werden, schreibt das neue Schweiz. Gewässerschutzgesetz eine Reduktion der negativen Auswirkungen von Schwall und

Sunk mit baulichen Massnahmen oder auf Kraftwerksantrag auch mit betrieblichen Massnahmen vor.

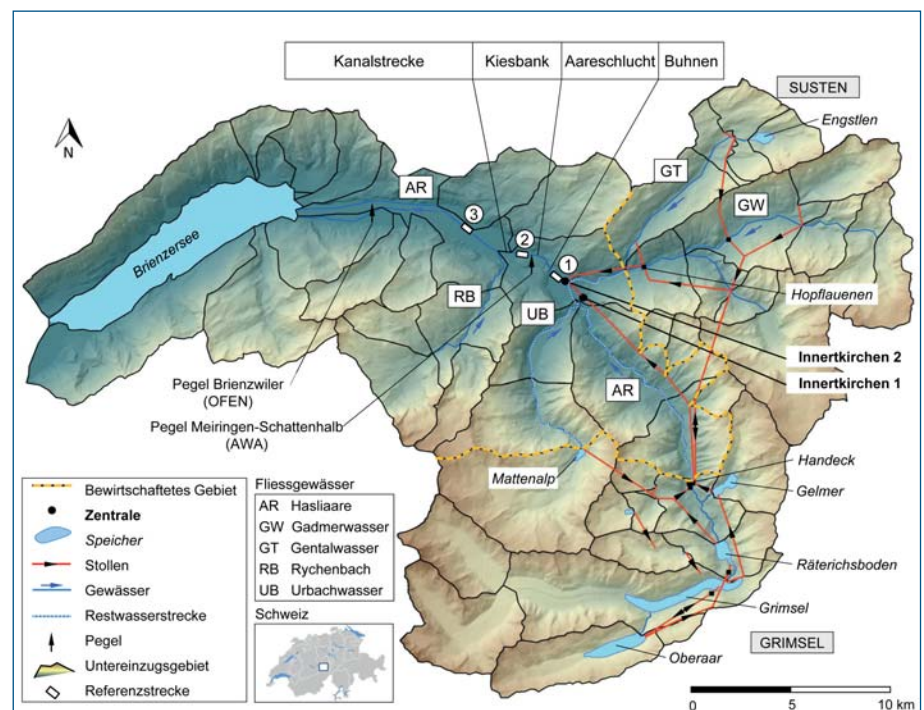


Bild 1. Karte des Einzugsgebietes der Hasliaare mit den Anlagen der Kraftwerke Oberhasli AG (KWO).

zone ausgewiesen, wobei die Bachforelle (*Salmo trutta fario*) die meistverbreitete Fischart ist (Haas und Peter, 2009).

Seit den 1930er-Jahren nahm der saisonale Wassertransfer vom Sommer in den Winter sowie die täglichen Abflussschwankungen durch die sukzessiven Kraftwerksausbauten stetig zu. Die Kraftwerke Oberhasli AG (KWO) bewirtschaftet heute rund 60% des Aareinzugsgebietes oberhalb des Brienzersees. In Innertkirchen wird das Grimselwasser von der Zentrale Innertkirchen 1 mit einer Ausbaupkapazität von 39 m³/s in die Hasliaare abgegeben. Das Wasser aus dem Sustengebiet wird via Zentrale Innertkirchen 2 als Laufwasser in die Hasliaare eingeleitet. Die KWO plant im Rahmen des Ausbaupvorhabens KWO plus nebst einer Vergrößerung des Grimselsees und dem Zubau des Umwälzwerks Grimsel 3 die Abflusskapazitäten der Zentralen Handeck 2 und Innertkirchen 1 (Tandem) um 25 m³/s zu erhöhen. Gleichzeitig sind mehrere ökologische Aufwertungsmassnahmen vorgesehen, wie zum Beispiel ein Beruhigungsbecken sowie ein Speicherstollen in Innertkirchen.

Bereits im 19. Jahrhundert musste das ursprünglich verzweigte Gerinne der Hasliaare mit räumlich variablem Gefälle, Fließgeschwindigkeit und Fliesstiefe (Mesohabitatstypen) aus Gründen des Hochwasserschutzes und der Landnutzung einer meist monotonen, kanalisierten Gewässermorphologie weichen. Zwischen

der Wasserrückgabe in Innertkirchen und der Aareschlucht wurden beidseitig Bühnen eingebaut (650 m). Unterhalb der Aareschlucht (1.4 km) befindet sich eine Kiesbankstrecke (1.3 km) gefolgt von einer monotonen Kanalstrecke (11 km), die bis zum Brienzensee führt.

Abflussmessreihen der Hasliaare sind zwischen 1925–1929 und 1974–2012 für den Pegel Brienzwiler (BAFU) und seit September 2006 für den Pegel Meiringen-Schattenhalb (Kanton Bern, AWA) erhältlich (Bild 1). Zwischen 1974 und 2004 wurde während 5% der Tage im Jahr in Brienzwiler ein Schwall/Sunk-Verhältnis Q_{max}/Q_{min} grösser als 8:1 gemessen (VAWLCH, 2006). Die hydrologischen und morphologischen Eingriffe führten zu einer Reduktion der Biomassen. Diskussionen über eine Sanierung der Hasliaare morphologischer und hydrologischer Art sind im Gange. Das Einzugsgebiet der Hasliaare ist darum als Fallstudie zur Untersuchung der Zusammenhänge zwischen hydrologischen, hydraulischen, wirtschaftlichen sowie ökologischen Einflussgrössen sehr gut geeignet.

3. Beurteilungsmethode

Die im Rahmen des KTI-Forschungsprojekts erarbeitete Methode beinhaltet ein Betriebssimulationstool für Speicherkraftwerke, ein 2D-hydrodynamisches Modell der Schwallstrecke sowie ein Fischhabitatsmodell (Bild 2) zur Beurteilung der Wirtschaftlichkeit und der Habitatsbedin-

gungen der definierten Massnahmen zur Reduktion von Schwall und Sunk.

Ein heuristischer Modellierungsansatz wurde im Simulationsprogramm Routing System zur Optimierung des Betriebs von Kraftwerkskomplexen verwendet (Bieri, 2012). Im Rahmen der Fallstudie der Kraftwerke Oberhasli – und trotz der Komplexität des Systems – konnte der Einfluss der Klimaänderung, Veränderungen im Strommarkt, Ausbaupvorhaben sowie ökologische Randbedingungen untersucht werden. Prinzipiell können Flexibilitätssteigerungen durch den Zubau von Turbinen- sowie Pumpspeicherkapazitäten den künftigen zu erwartenden natürlichen Zuflussrückgang weitgehend kompensieren, sofern gleichzeitig die Variabilität der Stromnachfrage und somit der Strompreise zunimmt. Mehrere betriebliche und bauliche Massnahmen zur Verminderung der Auswirkungen von Schwall und Sunk sind im Modell implementiert und simuliert sowie deren resultierende Ganglinien und Kosten bestimmt worden.

Fischbiologische Untersuchungen ermöglichten es, die resultierenden Ganglinien mit einem gewässerspezifischen Habitatsmodell zu bewerten, indem für vier Referenzmorphologien die Habitatseignung für drei Entwicklungsstadien der Bachforelle bestimmt wurde. Stationäre und dynamische Indikatoren quantifizieren die Habitatseignung, was eine Kosten-Nutzen-Beurteilung der Schwall-sanierungsmassnahmen erlaubt. Im vorliegenden Fall handelt es sich um eine wissenschaftliche Arbeit, die teilweise praxisrelevante und gewässerspezifische Randbedingungen vernachlässigt.

4. Massnahmen zur Reduktion von Schwall und Sunk

Bei den Massnahmen zur Reduktion von Schwall und Sunk wird zwischen baulichen und betrieblichen unterschieden. Im Gegensatz zu letzteren beeinflussen erstere den Kraftwerksbetrieb nicht. Im Rahmen der Forschungsarbeit wurden folgende Szenarien evaluiert (Tabelle 1):

- Reduzierter Spitzenabfluss: Q_{max} der Zentralen Innertkirchen 1 und 2 wurde um 90%, 80% respektive 70% reduziert (Tabelle 1, Szenario D).
- Limitiertes Schwall/Sunk-Verhältnis: Die Zentralen Innertkirchen 1 und 2 wurden so betrieben, dass Q_{max}/Q_{min} von 12:1, 8:1 respektive 5:1 wenn immer technisch möglich eingehalten wurde (Tabelle 1, Szenario E).
- Wasserabgabe in einen Kanal oder direkt in den See: Das Turbinenwasser

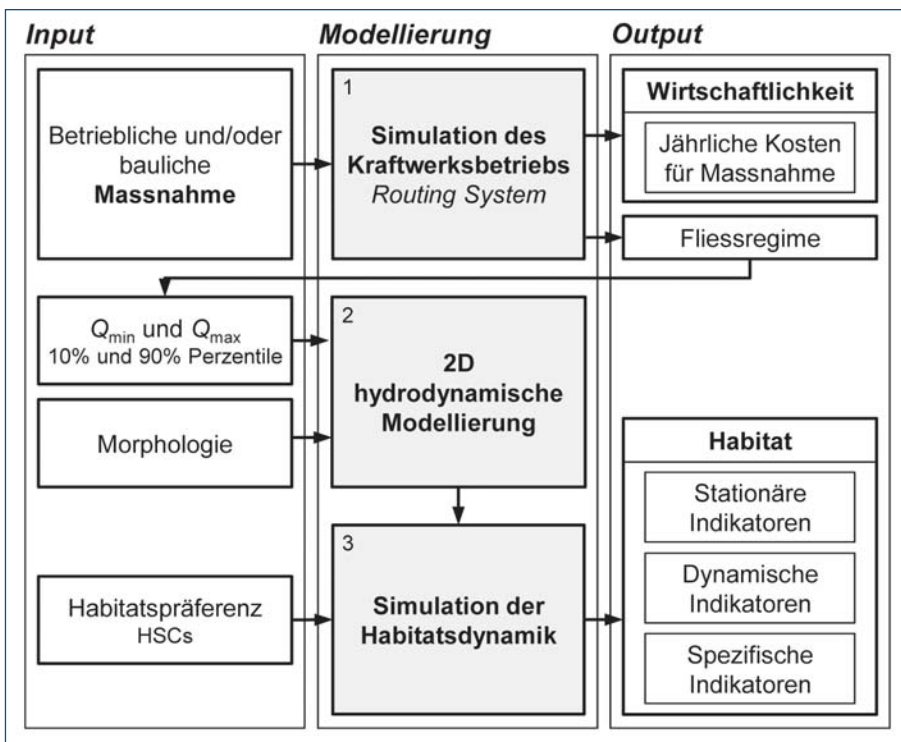


Bild 2. Bewertungsmethode für Schwallsanierungsmassnahmen unterhalb von Speicherkraftwerken.

der Zentralen Innertkirchen 1 und 2 wurde nicht in die Hasliaare, sondern über einen Stollen direkt in den Brienersee abgegeben (Tabelle 1, Szenario F).

- Kraftwerksausbau KWO plus ohne Kompensationsmassnahmen: Das Kraftwerk wurde so simuliert wie vorgesehen mit KWO plus, jedoch ohne das geplante Beruhigungsbecken. Besonders relevant ist die Erhöhung der Turbinenkapazität der Zentrale Innertkirchen 1 um 25 m³/s (Tabelle 1, Szenario G).
- Ausbauprojekt KWO plus mit Brienerseerkraftwerk: Ein Pumpspeicherkraftwerk zwischen Räterichsboden und Brienersee von 124 m³/s Turbinen- und 100 m³/s Pumpenkapazität wurde implementiert. Gleichzeitig wurde versucht, ein Schwall/Sunk-Verhältnis von 2:1 in der Hasliaare einzuhalten (Tabelle 1, Szenario H).
- Ausgleichsbecken: Verschiedene Rückhaltevolumina zwischen 50 000 und 1 000 000 m³ wurden unterhalb der Turbinenauslässe der Zentralen Innertkirchen 1 und 2 eingesetzt, unabhängig der realen Platzverhältnisse (Tabelle 1, Szenario I). Das Becken wurde so gesteuert, dass die Schwall/Sunk-Verhältnisse möglichst tief ausfielen.

Die Auswahl der Szenarien wurde anhand systematischer Kriterien vorgenommen, die eine direkte Anwendung im Projektgebiet mangels Berücksichtigung lokaler Gegebenheiten teilweise ausschliessen. So wäre zum Beispiel eine direkte Einleitung des Turbinenwassers in den Brienersee (Szenario F) nur über einen 16 km langen Stollen möglich, was unverhältnismässige Kostenfolgen hätte. Auch die Planung für den Bau eines Pumpspeicherkraftwerks zwischen Brienersee und Räterichsbodensee wird aus ungünstigen politischen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen aktuell nicht vorangetrieben. Generell sollen die Szenarien einen Überblick über möglichst verschiedene Massnahmen geben.

5. Simulation des Kraftwerksbetriebs

Die hydrologisch-hydraulische Modellierungssoftware Routing System wurde zur Simulation von hydrologischen Prozessen in hochalpinen Einzugsgebieten sowie zur Optimierung des Kraftwerksbetriebs entwickelt (García Hernández et al., 2007). Verschiedene Klima-, Strommarkt-, Kraftwerksausbau- und Ökologieszenarien wurden untersucht. Die täglichen Ab-

flussschwankungen sind dominiert vom Kraftwerksbetrieb. Darum wurden für die wirtschaftliche Bewertung der Szenarien der Zeitraum von 2005 bis 2009 und ein Strompreisszenario mit einem ausgeglichenen Produktionsmix gewählt. Systemdienstleistungen, die erst in den vergangenen Jahren aktuell wurden, sind somit nur teilweise abgebildet. Die Simulation des heutigen Kraftwerkkomplexes ohne Betriebseinschränkungen diente als Referenzszenario (Tabelle 1, Szenario C). Wirtschaftliche Einbussen durch betriebliche Massnahmen werden als Abweichungen zum Referenzszenario angegeben. Für die baulichen Massnahmen wurde versucht, sowohl die Kapital- als auch die Unterhaltskosten zu berücksichtigen. Es handelt sich um eine erste grobe Kosten-schätzung.

Routing System simulierte auch die Ganglinie in Innertkirchen. Die Schwall- Q_{max} und Sunkwerte Q_{min} wurden in der vorliegenden Studie als 10%- sowie 90%-Perzentile der kritischen Monate bestimmt. Die simulierten Ganglinien wurden den gemessenen vor (1926–29) und nach (2009) der Kraftwerkinbetriebnahme gegenübergestellt.

6. Hydrodynamische Modellierung

Die Modellierung der Habitatsbedingungen der gemessenen und simulierten Ganglinien wurde für vier verschiedene Morphologien direkt unterhalb der Wasserrückgabe in Innertkirchen durchgeführt. Die vorhandenen Bühnen-, Kiesbank- und Kanalstrecken (Bild 4a, b und c) unterscheiden sich durch Fließbreite und -tiefe sowie Sohlsubstrat. Eine vierte Morphologie eines verzweigten Gerinnes eines alpinen Fließgewässers, jene des Vorderrheins bei Illanz (Bild 4d), wurde als potenzielle Flussrevitalisierung untersucht. Der mittlere Abfluss, das Abflussregime und die Fischregion dieses morphologisch wenig beeinträchtigten Teilstücks entsprechen ungefähr jenen der Hasliaare in Innertkirchen. Alle vier Morphologien wurden topografisch vermessen, was in einem digitalen Geländemodell mit einer Gitternetzgröße von 0.5 m resultierte. Die Fließgeschwindigkeiten zu Modellkalibrierung sowie Substrat wurden ebenfalls aufgezeichnet. Mit dem 2D-hydrodynamischen Modellsatz HYDRO_AS-2D (Tolossa et al., 2009) wurden Fliesstiefe und -geschwindigkeit für Abflüsse zwischen 3 und 100 m³/s und sämtliche Zellen der vier Flussabschnitte bestimmt.

7. Simulation der Habitatsdynamik

Zur Bewertung der Bachforellenhabitate in Bezug auf Schwall und Sunk wurde das Fischmodul von CASiMiR mit Präferenzkurven aus Feldarbeit in der Hasliaare für Adulten, Juvenile (YOY) und das Laiichen kombiniert. Für jede Zelle der vier Morphologien und für sämtliche Abflüsse wurde der Suitability Index (SI) bestimmt. Dabei handelt es sich um einen Indikator für die Habitatsqualität, der jeweils zwischen 0 (tief) und 1 (hoch) liegt und von der Fliesstiefe, der Fließgeschwindigkeit sowie dem Sohlsubstrat abhängt. Um jedoch die dynamischen Habitatsbedingungen zu evaluieren, wurden insgesamt vier Indikatoren wie folgt definiert:

Als *Suitable Area* (SA) [m²] wird nur jene Fläche bezeichnet, die eine Habitatsqualität von mindestens SI_{lim} aufweist. In dieser Studie wurde der Grenzwert SI_{lim} auf 0.5 festgelegt. Zudem wurden nur Fliesstiefen H von entwicklungsspezifischen mindestens H_{lim} berücksichtigt (5 cm für Juvenile und 10 cm für Adulte und Verlaichung):

$$SA(Q) = \sum_{i=1}^n A_i |_{SI_i(Q) \geq SI_{lim} \text{ und } H_i(Q) \geq H_{lim}} \quad (1)$$

wobei A_i [m²] die Fläche der Zelle i ist, $SI_i(Q)$ [-] der Suitability Index des Abfluss Q , SI_{lim} der Grenzwert des Suitability Index, $H_i(Q)$ die Fliesstiefe bei Abfluss Q und H_{lim} der Grenzwert der Fliesstiefe.

Der *Suitable Habitat Ratio* (SHR) [-] stellt SA der effektiv benetzten Fläche WA_{eff} [m²] für Q gegenüber. WA_{eff} berücksichtigt nur die benetzte Fläche mit Wassertiefen von mindestens H_{lim} und ist somit tiefer oder gleich WA_{tot} .

$$SHR(Q) = \frac{SA(Q)}{WA_{eff}(Q)} \quad (2)$$

Der *Wetted Habitat Loss* (WHL) [-] weist das ökologisch wertvolle Habitat ($SI \geq SI_{lim}$) aus, das beim Abflusswechsel von Q_1 zu Q_2 verlorengeht ($SI < SI_{lim}$) und somit unbeständig ist:

$$WHL(Q_1, Q_2) = \frac{\sum_{i=1}^n A_i |_{SI_i(Q_1) \geq SI_{lim} \text{ und } SI_i(Q_2) < SI_{lim} \text{ und } H_i(Q_2) \geq H_{lim}}}{SA(Q_1)} \quad (3)$$

Der *Drained Area Ratio* (DAR) [-] beziffert den Anteil an ökologisch wertvollem Ha-

bitat ($SI \geq SI_{lim}$), das beim Abflusswechsel von Q_1 zu Q_2 trockenfällt ($H < H_{lim}$):

$$DAR(Q_1, Q_2) = \frac{\sum_{i=1}^n A_i |_{SI_1(Q_1) \geq SI_{lim} \text{ und } H_1(Q_2) < H_{lim}}}{SA(Q_1)} \quad (4)$$

Bild 3a zeigt für die stationären Abflüsse Q_{min} und Q_{max} das ökologisch wertvolle Habitat (blau) in einem fiktiven Gerinneabschnitt. Um die fluktuierenden Bedingungen (Bild 3b) zu berücksichtigen wird das ökologisch wertvolle Habitat für Q_{min} und Q_{max} überlagert. Dies erlaubt für beide Zustände, das beständige (grün), das unbeständige (gelb) sowie das trockenfallende Habitat (rot) zu bestimmen. Ersteres ist somit bei Q_{min} wie auch Q_{max} vorhanden, wobei letzteres nur bei Abflussrückgang auftreten kann. Für jede simulierte Ganglinie (Q_{min} und Q_{max}) wurden die stationären und dynamischen Habitatsbedingungen der drei Entwicklungsstadien der Bachferle für die vier Morphologien mit den entsprechenden Indikatoren bestimmt.

8. Abflussregime

Die natürlichen Abflussschwankungen in Brienzwiler variierten vor der Inbetriebnahme des Kraftwerkkomplexes (Tabelle 1, Szenario A) im August zwischen 80 und 60 m³/s. Im November traten nur geringe Schwankungen auf. Das Mittel beträgt für die Periode 1926–29 14 m³/s. In Meiringen-Schattenhalb variierte der Abfluss (Tabelle 1, Szenario B) im November zwischen

27 und 9 m³/s und im August zwischen 70 und 37 m³/s. Die mit Routing System simulierten Werte für das Szenario ohne Betriebseinschränkungen (Tabelle 1, Szenario C) hat grössere Fluktuationen als der heutige Zustand. Der rein marktorientierte Betrieb (theoretische Annahme) kann häufiges und plötzliches An- und Runterfahren der Turbinen zur Folge haben. Der heutige Betrieb hingegen ist dank den zu erbringenden Systemdienstleistungen deutlich ausgeglichener gestaltet. Das Szenario C diente als Referenzszenario für die Bewertung der Massnahmen.

Eine Reduktion der Spitzenabflüsse der Zentralen Innertkirchen 1 und 2 (Tabelle 1, Szenario D) hat nur eine Auswirkung auf das Schwall/Sunk-Verhältnis bis ca. 80%. Zu grosse Einschränkungen, zum Beispiel 70%, beeinträchtigen den Betrieb der oberhalb liegenden Zentralen Handeck und Hopflauen. Das Fehlen von ausreichend Speichervolumen im Falle der Letzteren kann das Anspringen der Auslassorgane des Ausgleichsbeckens in Hopflauen und somit zusätzliche unkontrollierte Abflussschwankungen zur Folge haben. Die vorgegebenen Schwall/Sunk-Verhältnisse (Tabelle 1, Szenario E) können im Sommer problemlos und im Winter während ca. 75% der Tage eingehalten werden. Wobei die Untersuchungen an der Aare gezeigt haben, dass vor allem eine Dämpfung der Abflussgradienten ökologisch wirksam ist.

Eine Umleitung des Turbinenwassers direkt in den Brienzensee (Tabelle 1, Szenario F) belässt in der Hasliaare im

November und August einen mittleren Abfluss von 6 m³/s. Unter den theoretischen Annahmen, dass keine Revisionen anfallen, immer genügend Zufluss vorhanden ist und eine Stromproduktion ohne Systemdienstleistungen gefahren wird, würde das Ausbauprojekt KWO plus ohne ökologische Aufwertungsmassnahmen (Tabelle 1, Szenario G) den Spitzenabfluss im November und August auf 93 respektive 94 m³/s erhöhen. Das Niedrigwasser im Sommer würde zudem etwas verringert. Das Pumpspeicherwerk Brienzensee (Tabelle 1, Szenario H) könnte mit Betriebseinschränkungen in Innertkirchen die Schwankungen zwischen 40 und 10 m³/s im November und 48 und 22 m³/s im August beschränken. Um den Spitzenabfluss zu reduzieren resp. das Niedrigwasser zu erhöhen, ist ein Rückhaltebecken (Tabelle 1, Szenario I) von mindestens 100 000 m³ Volumen erforderlich. Die erzielten Werte der baulichen Massnahmen sind meist besser als jene der betrieblichen. Zusätzlich erlauben die baulichen Massnahmen eine gedämpftere Wasserrückgabe, womit höhere Reaktionszeiten für die aquatische Fauna erreicht werden können.

In wieweit eine Reduktion des Schwall/Sunk-Verhältnisses oder des maximalen Abflusses ökologisch effektiv wirksam wäre, wurde hier nicht quantifiziert. Wie verschiedene Untersuchungen in der Hasliaare gezeigt haben (Schweizer et al. 2010), dürfte ein sehr grosses ökologisches Potenzial in der Reduktion von Schwall- und Sunkraten liegen.

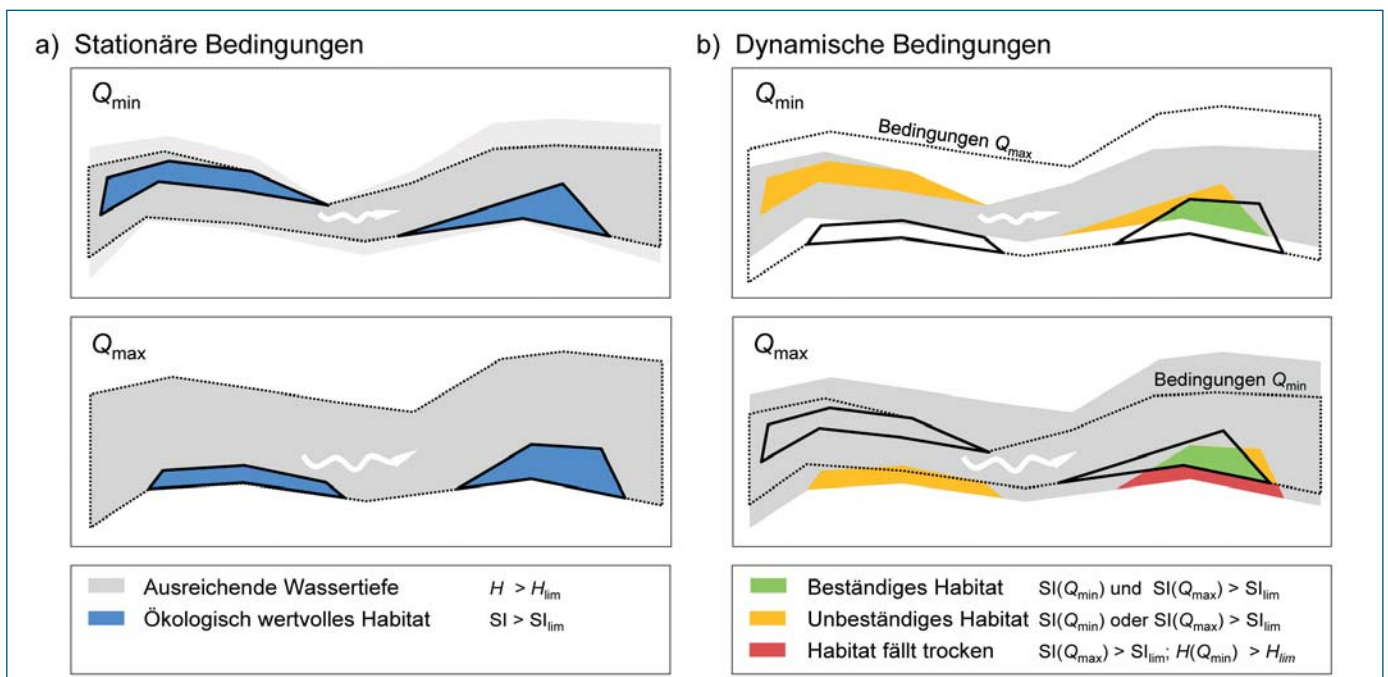


Bild 3. Schematische Bestimmung der stationären (a) und dynamischen (b) Habitatsbedingungen für Q_{max} und Q_{min} an einem fiktiven Gerinneabschnitt.










Szenario	Abfluss Nov. Abfluss Aug. Ertragsausfall			
	Q_{max} [m ³ /s]	Q_{max} [m ³ /s]	[%]	
	Q_{min} [m ³ /s]	Q_{min} [m ³ /s]		
A  Gemessene Ganglinie in Brienzwiler vor Kraftwerk (1926-29)	A	14	80	-
B  Gemessene Ganglinie in Meiringen-Schattenhalb mit Kraftwerk (2009)	B	27	70	-
C  Simulierte Ganglinie (2005-09) ohne Betriebseinschränkungen	C	68	73	0.0%
D  Simulierte Ganglinie (2005-09) mit reduziertem Spitzenabfluss der Zentralen Innertkirchen 1 und 2 von ...	90% D1	62	66	2.4%
	80% D2	58	61	4.9%
	70% D3	62	61	7.2%
E  Simulierte Ganglinie (2005-09) mit limitiertem Schwall/Sunk-Verhältnis von ...	12 : 1 F1	61	69	0.6%
	8 : 1 F2	60	70	1.7%
	5 : 1 F3	56	69	3.3%
F  Simulierte Ganglinie (2005-09) nur Restwasser	G	6	6	nicht bestimmt
G  Simulierte Ganglinie (2005-09) des Ausbauprojekts KWO plus	H	93	94	0.0%
H  Simulierte Ganglinie (2005-09) des Ausbauprojekts KWO plus mit dem Brienzsee-Kraftwerk (2:1)	I	40	48	8.0%
	1'000 J1	41	64	3.8%
	700 J2	43	68	2.8%
	400 J3	48	71	1.9%
	100 J4	68	73	0.9%
I  Simulierte Ganglinie (2005-09) mit Rückhaltebecken unterhalb der Zentralen Innertkirchen 1 und 2 von $V_{basin} = \dots$ [10 ³ m ³]	50 J5	68	73	0.7%
		5	27	

Tabelle 1. Szenarien mit Spitzenabfluss und Niedrigwasser (Q_{max} und Q_{min} als 90%- resp. 10%-Perzentile der 10'-Abflussreihen) der gemessenen und simulierten Ganglinien in Innertkirchen (ausser für A und B) für November und August sowie der jährliche relative Ertragsausfall infolge der betrieblichen und baulichen Massnahmen.

9. Wirtschaftlichkeit des Kraftwerkbetriebs

Die hier ausgewiesene Wirtschaftlichkeit beruht auf sehr stark vereinfachten Annahmen, die einen ersten quantitativen Vergleich zwischen den verschiedenen Szenarien erlauben sollen. Wie aus *Tabelle 1* ersichtlich ist, ergibt eine Reduktion der Spitzenabflüsse um 2.4% und um 7.2% die grössten Ertragsausfälle (*Tabelle 1*, Szenario D). Eine Limitierung des Schwall/Sunk-Verhältnis Q_{max}/Q_{min} auf 12:1 bewirkt 0.7% Ertragsausfall, bei 5:1 wären es 3.3% (*Tabelle 1*, Szenario E). Das Pumpspeicherkraftwerk Brienzsee mit reduziertem Schwall/Sunk-Verhältnis in der Hasliaare würde den jährlichen Ertrag um 8% reduzieren (*Tabelle 1*, Szenario H). Ein Rückhaltebecken von

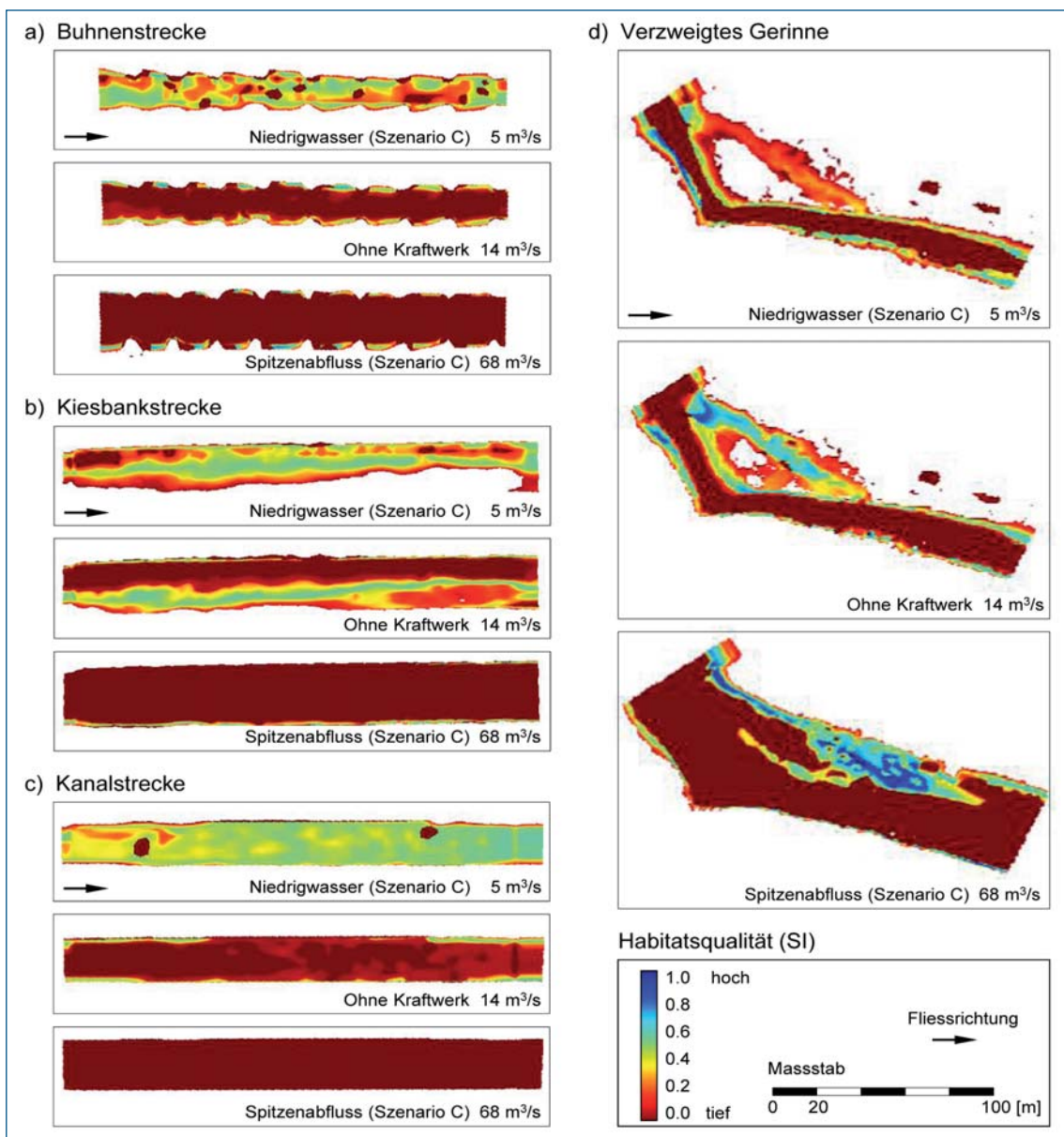
50 000 m³ hätte jährliche Ertragseinbußen von rund 0.7% und ein Volumen von 1 Mio. m³ von 3.8% zur Folge (*Tabelle 1*, Szenario I). Anstatt Ausgleichsbecken im Freien müssten bei fehlendem Platz auch Kavernen oder Stollen in Betracht gezogen werden. Grosse unterirdische Rückhaltevolumina für eine Reduktion der Schwallspitzen sind mit enorm hohen Kosten verbunden. Hinzu kommen landschaftliche Eingriffe bei der Deponierung des Ausbruchmaterials.

10. Laichhabitat der Bachforelle

Für sämtliche Szenarien (*Tabelle 1*) wurden für die drei Entwicklungsstadien der Bachforelle sowie die vier Morphologien das ökologisch wertvolle Habitat und dessen Beständigkeit bei Schwall und Sunk be-

stimmt. Im Folgenden werden nur die Resultate für das Laichen in der Kanalstrecke sowie im verzweigten Gerinne erläutert.

Bild 4 zeigt die Habitatsbedingungen für das Laichen der Bachforelle respektive die verfügbaren Laichplätze für die vier Referenzmorphologien für das Niedrigwasser (5 m³/s) und den theoretischen Spitzenabfluss (68 m³/s) im November des simulierten Szenario C sowie den mittleren Abfluss ohne Kraftwerk für 1926–29 (14 m³/s). Die Bühnenstrecke (*Bild 4a*) hat einen konzentrierten Abfluss mit hohen Fliesstiefen und -geschwindigkeiten in der Gerinnemitte. Die Kiesbankstrecke (*Bild 4b*) zeigt ein differenzierteres Strömungsbild mit Seichtwasserzonen am rechten Ufer. Die Kanalstrecke (*Bild 4c*) ist äussert monoton, und es tritt nur für



**Bild 4. Habita-
tatsqualität
anhand des
Suitability Index
(SI) für das Laichen
der Bachforelle
im November für
die Bühnen- (a),
Kiesbank- (b) und
Kanalstrecke (c)
sowie das ver-
zweigte Gerinne (d)
für Niedrigwasser
(5 m³/s) und Spitze-
nabfluss (68 m³/s)
des simulierten
Szenario C sowie
für das nicht
bewirtschaftete
Einzugsgebiet
des Szenario A
(14 m³/s).**

ganz tiefe Abflüsse ökologisch wertvolles Laichhabitat auf. Das verzweigte Gerinne (Bild 4d) lässt höhere Variabilität als die vorhandenen Hasliaaremorphologien zu. Im Speziellen an der Kurveninnenseite entsteht ökologisch wertvolles Laichhabitat. Für die Bühnen- und Kanalstrecke nimmt die Habitatsqualität mit zunehmendem Abfluss ab, ab 8 m³/s sogar drastisch. Für die natürlich belassene Morphologie sind die ökologisch wertvollen Laichflächen über den gesamten Abflussbereich ziemlich konstant.

Bild 5 zeigt die vorhandenen Laichhabitate bei einem Abflusswechsel von Q_{max} nach Q_{min} . In der Kanalstrecke ergibt sich weder für die Ganglinie des simulierten Normalbetriebs (Szenario C) noch mit einem Rückhaltebecken (Szenario I1) stabiles, ökologisch wertvolles Habitat. Beim verzweigten Gerinne kann für das Szenario mit Rückhaltebecken dank des erhöhten Niedrigwassers und dem tieferen Spit-

zenabfluss beständiges Laichhabitat gefunden werden.

Die Fläche und die Beständigkeit der Laichhabitate der Bachforelle für die verschiedenen Szenarien sind in Bild 6 ersichtlich. Die *Suitable Habitat Ratio*-Werte liegen unter 30% der effektiv benetzten Fläche WA_{eff} . Szenarien A und G ohne Kraftwerk respektive ohne Turbinenwasser in der Hasliaare erzeugen beständiges Ablachhabitat für alle untersuchten Morphologien. Das verzweigte Gerinne (Bild 6b) erlaubt als einzige Morphologie für die simulierten schwallereduzierenden Massnahmen beständiges Ablachhabitat, so zum Beispiel für das Pumpspeicherwerk Brienersee (Szenario H) und das Rückhaltebecken (Szenario I1). Bühnen-, Kiesbank- und Kanalstrecke (Bild 6a) haben alle höhere *Suitable Habitat Ratio*-Werte für Q_{min} als für Q_{max} , wo Habitat nur spärlich oder gar nicht vorhanden ist. Das verzweigte Gerinne (Bild 6d) hat leicht höhere *Suitable Habitat Ratio*-Werte

für Q_{max} , ausgenommen für KWO plus (Szenario G) mit einem theoretischen Spitzenabfluss von 93 m³/s. Unter Annahme von Abflusswechseln zwischen den 10%- und 90%-Perzentilen ist das meiste Ablachhabitat, abgesehen von den Szenarien A und F, unbeständig oder fällt trocken. In der Praxis wäre das Trockenfallen mit den vorhandenen, respektive vorgegebenen Restwassermengen zu evaluieren.

Allerdings kann eine Bewertung von Massnahmen nicht ausschliesslich mit der aufgezeigten Methode erfolgen. Für die Verlaichung günstige Bedingungen hinsichtlich Fliesstiefe und -geschwindigkeit sind zum Beispiel nur für mehrstündige Zeitfenster nötig. Nach dem Ablachen gelten neue Randbedingungen. So darf die Laichgrube nicht trockenfallen und Sohlbewegungen müssen vermieden werden. Um eine genauere Beurteilung der Laichhabitate vornehmen zu können, müsste die gesamte Ganglinie und nicht lediglich

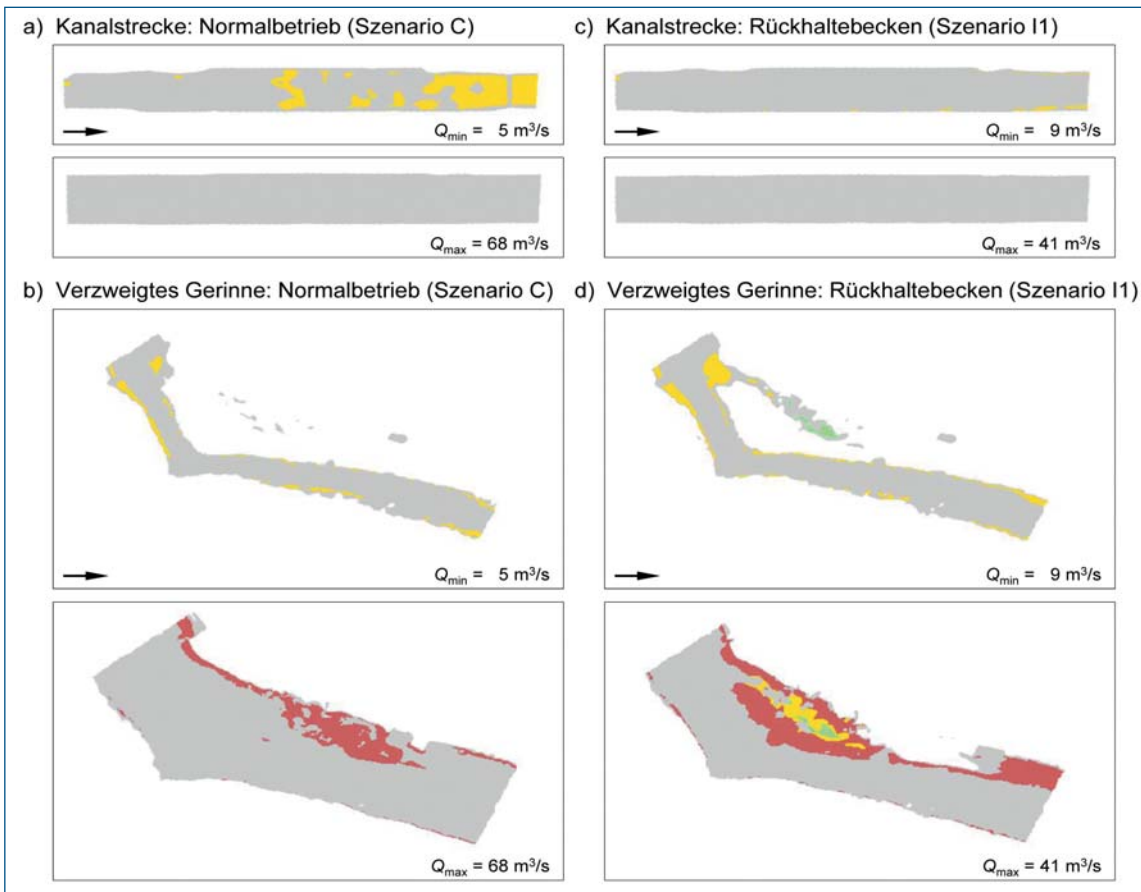


Bild 5. Dynamische Habitatbedingungen für das Laichen der Bachforelle im November (grün = beständig; gelb = unbeständig; rot = fällt trocken) für den Wechsel von Niedrigwasser (Q_{min}) zu Spitzenabfluss (Q_{max}) und umgekehrt der Szenarien C (simulierter Normalbetrieb) und I1 (Einbau eines Rückhaltebeckens mit einem Volumen von 1 Mio m^3) für die Kanalstrecke (a, c) und das verzweigte Gerinne (b, d).

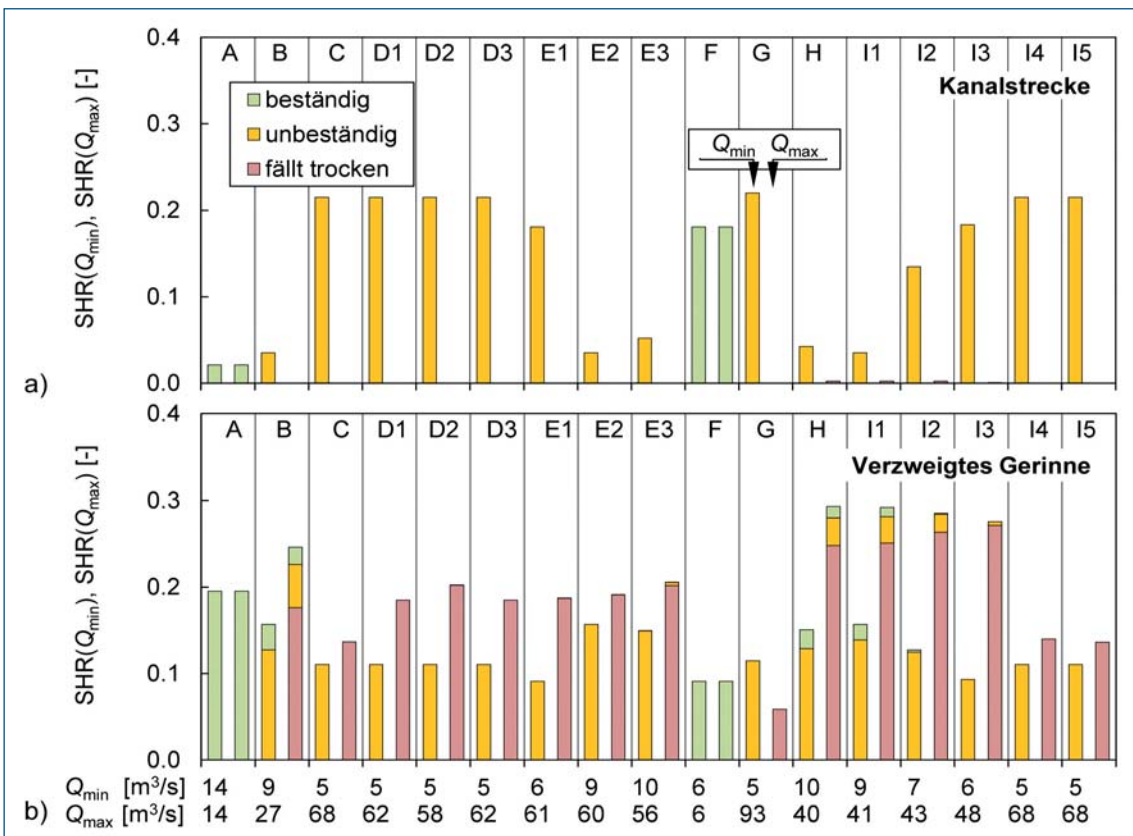


Bild 6. Suitability Habitat Ratio (SHR) für das Laichen der Bachforelle im November (grün = beständig; gelb = unbeständig; rot = fällt trocken) für den Wechsel von Niedrigwasser (Q_{min}) zu Spitzenabfluss (Q_{max}) und umgekehrt der gemessenen und simulierten Ganglinien (Tabelle 1) für die Kanalstrecke (a) und das verzweigte Gerinne (b).

die Extremwerte berücksichtigt werden. Eine Auswertung der *Suitable Habitat Ratio*-Werte für das relevante Zeitfenster ist somit für eine abschliessende Bewertung einer Massnahme in einem nächsten Schritt unabdingbar. Gewisse dynamische

Parameter sind zudem nicht abhängig vom Kraftwerksbetrieb. So hängt die Korngrößenverteilung des Laichsubstrats massgeblich von der Anzahl und Magnitude der auftretenden Hochwasser und des Geschiebeeintrags und -transports ab.

11. Schlussfolgerungen

Der angewandte interdisziplinäre Ansatz beinhaltet einerseits die Simulation des Kraftwerkbetriebs zu Bestimmung der Ganglinie sowie der durch die Sanierungsmaßnahmen anfallenden Kosten. Ande-

rerseits werden die Fischhabitate für die kritischen Entwicklungsstadien sowie für verschiedene Morphologien unter wechselnden Abflussbedingungen bestimmt. Die wirtschaftlichen Auswirkungen von Massnahmen zur Reduktion von Schwall und Sunk bei komplexen Speicherkraftanlagen können nur mit einem effizienten Simulationswerkzeug, wie zum Beispiel Routing System, evaluiert werden. Für die ökologische Beurteilung sind rein hydraulische Grössen unzureichend, und Habitatemodelle mit geeigneten Datensätzen und Berücksichtigung der dynamischen Bedingungen, wie z.B. CASiMiR, werden benötigt (Smokorowski et al., 2011).

Die definierten Indikatoren zeigen im Fall der Hasliaare, dass Abflusskorrekturen zur Reduktion von Schwall und Sunk nur gemeinsam mit morphologischen Anpassungen zu einer Aufwertung des aquatischen Lebensraums führen. Der natürliche mittlere Monatsabfluss der Hasliaare liegt im August bei rund 80 m³/s. Trotzdem weisen die vorhandenen Buhnen-, Kiesbank- und Kanalstrecken für Ganglinien mit Schwall bereits über 20 m³/s grosse Habitatedefizite für alle Entwicklungsstadien der Bachforelle auf. Ein verzweigtes Gerinne würde bereits mit einer Reduktion von Schwall und Sunk durch geeignete Massnahmen ausreichend ökologisch wertvolles und beständiges Habitat für die Bachforelle aufweisen. Eine sehr kostenintensive Reduktion des Maximalabflusses dürfte somit nur bei einer gleichzeitigen morphologischen Aufwertung wirksam sein.

Betriebliche Einschränkungen, wie zum Beispiel eine Begrenzung des Maximalturbinenabflusses oder eines limitierten Schwall/Sunk-Verhältnisses, haben meist erhebliche Ertragseinbussen zur Folge und schlagen sich in einem unausgewogenen Kosten-Nutzen-Verhältnis nieder. Aus wirtschaftlicher, aber auch aus ökologischer Sicht sind Speichervolumen unterhalb der Wasserrückgabe von Kraftwerken zu bevorzugen. Zur Aufwertung des Abflussregimes können Kraftwerkserweiterungen mit ökologischen Aufwertungsmassnahmen für besonders sensitive Teilstücke kombiniert werden.

In der vorliegenden Studie wurden bewusst nur der Maximal- und Minimalabfluss der Ganglinie mit Schwall und Sunk betrachtet. In einem weiteren Schritt kann die Analyse zum Beispiel auf Pegelanstiegs- (Drift von Makroinvertebraten) und Pegelrückgangsraten (Stranden von Jungfischen) sowie auf Frequenz und Dauer der Schwallereignisse erweitert werden. Dabei

muss das Verhalten der Individuen (Lernfähigkeit der Fische) sowie ein intelligenter Betrieb der Massnahme (zum Beispiel Vorschwall, Minimalwerte für kritische Abflüsse, Temperaturen und Tageszeit) kombiniert betrachtet werden. Der Ansatz kann auf andere aquatische Lebewesen erweitert werden. Zudem sollten Kriterien wie Längs- und Quervernetzung, physikalische (Wassertemperatur, Sedimenttransport) und chemische Bedingungen in die Beurteilung miteinbezogen werden. Wie in der Wegleitung des Bundesamtes für Umwelt (Baumann et al., 2012) bereits enthalten, müssen die ökologischen Bewertungskriterien je nach Indikatorlebewesen demnach angepasst werden.

Die entwickelte Methode ist für eine erste Beurteilung von Schwallsanierungsmassnahmen unterhalb von Speicherkraftwerken geeignet. Die Flexibilität der Methode erlaubt Betreibern, Behörden und Wissenschaftlern eine ökologisch-ökonomische Modellierung und somit die Möglichkeit einer zielgerichteten Sanierung von Schwall und Sunk.

Danksagung

Das Forschungsprojekt (9676.1 PFIW-IW) wurde von der Kommission für Technologie und Innovation (KTI) und der Kraftwerke Oberhasli AG (KWO) sowie weiteren privaten und öffentlichen Partnern finanziert. Spezieller Dank gebührt Dr. Steffen Schweizer, Leiter der Abteilung Gewässerökologie der KWO, der das Projekt stets mit Rat und Tat begleitet hat.

Literatur

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

Bieri, M. 2012. Operation of Complex Hydropower Schemes and its Impact on the Flow Regime in the Downstream River System under Changing Scenarios. Doktorarbeit 5433, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.

Bunn, S.E., Arthington, A. H. 2002. Basic principles and ecological consequences of altered flow regimes for aquatic biodiversity. *Environmental Management* 30(4): 492–507.

García Hernández, J., Jordan, F., Dubois, J., Boillat, J.-L. 2007. Routing System II – Flow modelling in hydraulic systems. Communication 32 du Laboratoire de Constructions Hydrauliques. LCH – EPFL, Lausanne.

Haas, R., Peter, A. 2009. Lebensraum Hasliaare 2009: Eine fischökologische Zustandserhebung zwischen Innertkirchen und Brienzensee. KTI-Projekt: Nachhaltige Nutzung der Wasserkraft – Innovative Massnahmen zur Reduktion der

Schwall- und Sunkproblematik. EAWAG, Kastanienbaum.

Moog, O. 1993. Quantification of daily peak hydropower effects on aquatic fauna and management to minimize environmental impacts. *Regulated Rivers: Research & Management* 8(1-2): 5–14.

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

Schleiss, A.J. 2007. L'hydraulique suisse: Un grand potentiel de croissance par l'augmentation de la puissance. *Bulletin SEV/VSE* 07(2): 24–29.

Schweizer, S., Neuner, J., Ursin, M., Tscholl, H., Meyer, M. 2008. Ein intelligent gesteuertes Beruhigungsbecken zur Reduktion von künstlichen Pegelschwankungen in der Hasliaare. «Wasser Energie Luft» 100(3): 209–215.

Schweizer, S., Meyer, M., Heuberger, N., Brechbühl, S., Ursin, M. 2010. Zahlreiche gewässerökologische Untersuchungen im Oberhasli. «Wasser Energie Luft» 102(4): 289–300.

Smokorowski, K.E., Metcalfe, R.A., Finucan, S.D., Jones, N., Marty, J., Power, M., Pyrcce, R.S., Steele, R. 2011. Ecosystem level assessment of environmentally based flow restrictions for maintaining ecosystem integrity: A comparison of a modified peaking versus unaltered river. *Ecohydrology* 4(6): 791–806.

Tolossa, H.G., Tuhtan, J., Schneider, M., Wieprecht, S. 2009. Comparison of 2D-hydrodynamic-models in river reaches of ecological importance: HYDRO_AS-2D and SRH-W. 33rd IAHR World Congress, Vancouver, Kanada: 604–611.

VAW-LCH 2006. Kraftwerksbedingter Schwall und Sunk, Eine Standortbestimmung. VAW 4232, LCH 05-2006, ETHZ und EPFL. Zürich und Lausanne.

Young, P., Cech, J., Thompson, L. 2011. Hydropower-related pulsed-flow impacts on stream fishes: A brief review, conceptual model, knowledge gaps and research needs. *Reviews in Fish Biology and Fisheries* 21(4): 713–731.

Anschrift der Verfasser

Martin Bieri, Pöyry Energy AG, Hardturmstrasse 161, CH-8035 Zürich martin.bieri@poyry.com

Emilie Person, Armin Peter, EAWAG Seestrasse 79, CH-6047 Kastanienbaum emilie.person@eawag.ch, armin.peter@eawag.ch

Anton J. Schleiss, LCH-EPFL Station 18, CH-1015 Lausanne anton.schleiss@epfl.ch