

Ein intelligent gesteuertes Beruhigungsbecken zur Reduktion von künstlichen Pegelschwankungen in der Hasliaare

■ Steffen Schweizer, Johann Neuner, Max Ursin, Heinz Tscholl, Matthias Meyer

1. Einleitung

Verschiedene schweizerische Institutionen, wie das BAFU, VAW, EPFL und Eawag, haben in den letzten Jahren Studien über die Abflussregime der grösseren schweizerischen Flüsse hinsichtlich künstlicher Pegelschwankungen durchgeführt (Pfaundler & Keusen 2007, Minor & Möller 2007, Meile et al 2005). Die gebräuchlichen Indikatoren zur Beschreibung dieser Schwall-Sunk-Phänomene sind das Schwall-Sunk-Verhältnis, die Schwall-Sunk-Differenz, die Schwall- und Sunkraten sowie die Pegeldifferenz.

Da sich allerdings jeder Fluss oder Bach von anderen Fliessgewässern durch seine Morphologie, seine Korngrössenverteilung, sein Abflussregime, seine Wasserqualität, seine aquatische Lebensgemeinschaft und weitere Eigenschaften unterscheidet, sind die Auswirkungen von künstlichen Pegelschwankungen auf die Gewässerökologie jeweils gewässerspezifisch. Daher ist ein Vergleich von verschiedenen Flüssen oder Flussabschnitten anhand der oben genannten Schwall-Sunk-Indikatoren nicht eindeutig. Vielmehr müssen mögliche Störungen auf die Gewässerökologie funktional betrachtet werden, wie das regelmässige Auftreten von Sohlenbewegungen infolge Schwallabflüssen, die regelmässige Mobilisierung von Rollkies und Sand, das Stranden von Fischen, das Verdriften von Wirbellosen sowie die Behinderung der Fischwanderung aufgrund zu hoher Fliessgeschwindigkeiten bei der Wasserrückgabe. Mit einem Beruhigungsbecken können diese negativen Einwirkungen auf die aquatische Lebensgemeinschaft signifikant gedämpft werden.

Der Neubau eines grösseren Druckstollens sowie der Einbau einer neuen Turbine im Kraftwerk Innertkirchen I erhöhen die maximale Triebwassermenge von

heute 40 auf 65 m³/s (inklusive Kraftwerk Innertkirchen II auf 95 m³/s) und den jährlichen Energieertrag um 50 GWh. Um die Geschwindigkeit der bestehenden Pegelschwankungen nicht weiter zu akzentuieren, sondern um sie deutlich zu dämpfen, haben die KWO ein Beruhigungsbecken bei der Wasserrückgabe in Innertkirchen geplant. Auch eine Reduzierung des Schwall-Sunk-Verhältnisses ist trotz der Installation einer neuen Turbine an über 95% der Wintertage möglich.

Dieses ambitionierte Ziel wurde von den Umweltschutzorganisationen Grimselverein, WWF Schweiz und Pro Natura bereits in früheren Diskussionen angeregt. Eine gewässerökologische Optimierung des Beruhigungsbeckens wird zurzeit mit Vertretern der genannten Organisationen erörtert. An dieser Stelle sei noch erwähnt, dass es sich um das erste schweizerische Beruhigungsbecken handelt, das rein aus gewässerökologischen Überlegungen geplant wurde.

Im Folgenden werden die technischen und ökologischen Aspekte dieses Beruhigungsbeckens beschrieben und diskutiert.

2. Ist-Zustand der Aare unterhalb von Innertkirchen und weitere geplante Untersuchungen

2.1 Gebietsbeschreibung und Flusscharakteristiken

Die Aare entspringt den Aargletschern (Oberaar- und Unteraargletscher) auf rund 2000 m Höhe und durchfliesst daran anschliessend mehrere Speicherseen (Oberaar-, Grimsel- und Räterichsbodensee), wo der Grossteil des Aarewassers gefasst und in den Kraftwerken Grimsel, Handeck und Innertkirchen je nach Strombedarf turbinert wird. In Innertkirchen wird

das zur Stromerzeugung genutzte Wasser der Aare wieder zurückgegeben. Dies führt zu künstlichen Pegelschwankungen im Aareabschnitt zwischen der Wasserrückgabe in Innertkirchen und dem Brienzersee. Im Abschnitt zwischen der Wasserrückgabe und der Aareschlucht ist die Hasliaare etwa 25 m breit, kanalisiert und mit Buhnen verbaut. In der Aareschlucht ist die Flussmorphologie wieder ursprünglich, allerdings mit z.T. sehr starken seitlichen Begrenzungen durch die steil emporragenden Ufer. Auf der Strecke unterhalb der Schlucht ist die Aare ohne Buhnen kanalisiert: zwischen Schluchtausgang und Meiringen erreicht die Aare eine Breite von rund 25 m und bildet insgesamt vier alternierende Kiesbänke, unterhalb von Meiringen bis zum Brienzersee bedingt die kontinuierlich abnehmende Breite auf 18 m einen geraden Flusslauf mit homogener Struktur.

Die Fläche des Aare-Einzugsgebiets beträgt bei Brienzwiler 554 km², wovon 21% vergletschert sind und zu einem glazialen Abflussregime mit einem mittleren Jahresabfluss von 35 m³/s führen (hydrologischer Atlas der Schweiz). Das Sohlengefälle variiert zwischen 5 und 8 ‰.

Die Sohle der Aare ist eine natürliche Kieselsohle ohne Verbauungen mit einer typischen, groben Kornverteilung ($d_m = 13$ cm, $d_{90} = 32$ cm) und ausgeprägter Deckschichtbildung. Der kritische Abfluss zum Aufreissen der Deckschicht ist in einem physikalischen Modellversuch an der TU München (Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft Obernach) bestimmt worden und liegt im Bereich zwischen 150 und 180 m³/s (Hartlieb et al 2007) für den Abschnitt zwischen Wasserrückgabe und Aareschlucht. Da die Korngrössenverteilung, das Gefälle und die Breite der Aare bis zum Brienzer-



see nur geringfügig variieren, wird der kritische Abfluss für das Aufreissen der Deckschicht auch unterhalb der Aareschlucht in dieser Grössenordnung liegen.

Der mittlere Abfluss von Gadmerwasser und Hasliaare beträgt vor der Wasserrückgabe in Innertkirchen im Winter $1 \text{ m}^3/\text{s}$ und im Sommer $13 \text{ m}^3/\text{s}$. Der maximale Triebwasserdurchfluss der beiden Kraftwerke beträgt heute $70 \text{ m}^3/\text{s}$ und nach der Aufwertung des Kraftwerks Innertkirchen I $95 \text{ m}^3/\text{s}$ (Bau eines grösseren Druckschachts zur Verringerung der Reibungsverluste und Einbau einer zusätzlichen Turbine). Eine Analyse der täglichen Maximalabflüsse der Jahre 1982–2007 zeigte, dass in diesem Zeitraum an insgesamt 32 Tagen ein Abfluss grösser als $150 \text{ m}^3/\text{s}$ (im Mittel 1.2 Ereignisse pro Jahr) und an 17 Tagen ein Abfluss grösser $180 \text{ m}^3/\text{s}$ (im Mittel 0.7 Ereignisse pro Jahr) beobachtet wurde. Um die grösstmöglichen Auswirkungen des

Kraftwerkausbaus auf die Sohlenstabilität abschätzen zu können, wurden die Tagesmaximalabflüsse für diesen Zeitraum pauschal für jeden Tag um $25 \text{ m}^3/\text{s}$ erhöht. Es zeigt sich, dass in dieser für die Sohlenstabilität ungünstigsten Prognose künftig 2.3 Ereignisse mit einem Abfluss grösser als $150 \text{ m}^3/\text{s}$ und 1.0 Ereignisse mit einem Abfluss grösser als $180 \text{ m}^3/\text{s}$ durchschnittlich pro Jahr auftreten werden. Aus gewässerökologischer Sicht ist diese geringe Zunahme an Ereignissen mit Sohlenbewegungen unbedenklich.

Im heutigen Zustand wird das abgearbeitete Wasser hinter den Kraftwerken Innertkirchen I und II der Aare wieder zurückgegeben: das aus dem Grimselgebiet stammende Wasser wird in das Gadmerwasser (kurz vor der Mündung in die Aare) (vgl. Bild 1) und das aus dem Sustengebiet stammende Wasser direkt in die Aare (kurz hinter der Mündung des Gadmerwassers) eingeleitet. Die Fließgeschwindigkeit des

turbinierten Wassers beträgt bei der Wasserrückgabe heute rund 3 m/s .

2.2 Schwall-Sunk-Indikatoren

Im Auftrag des Schweizerischen Wasserwirtschaftsverbandes wurde von der VAW und der EPFL eine Studie zur Standortbestimmung von kraftwerksbedingtem Schwall und Sunk in der Schweiz durchgeführt (VAW & EPFL 2006, Minor & Möller 2007). Da in den Wintermonaten der natürliche Basisabfluss bei den untersuchten Gewässern sehr gering ist und somit der Einfluss der kraftwerksbedingten Abflussschwankungen wesentlich grösser als im Sommer ausfällt, beschränkt sich die Studie auf Abflussmessungen in den Monaten Dezember, Januar und Februar. In dieser Studie wurde für die Aare am Pegel Brienzwiler festgestellt, dass das Schwall-Sunk-Verhältnis von 8:1 für den Zeitraum 1974–2004 an 95% der Wintertage und ein Schwall-Sunk-Verhältnis von 5:1 an 70% der Wintertage nicht überschritten wurde. Die mittleren Schwallraten lagen in diesem Zeitraum zwischen 0.15 und $0.25 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ und die mittleren Sunkraten zwischen 0.11 und $0.19 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ (VAW & EPFL 2006). In 99% aller aufgetretenen Pegelschwankungen lagen die Schwallraten unter $5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ (Herzog Ingenieure 2007).

Ein Jahr später erstellte das Bundesamt für Umwelt (BAFU) eine weitere hydrologische Datenanalyse zur Charakterisierung von Schwall-Sunk-Phänomenen (Pfaundler & Keusen 2007a, b). In dieser Studie wurden nur die Aareabflüsse (Brienzwiler) im Januar betrachtet. Zwischen 1993 und 2005 lagen die maximalen Pegelanstiegsraten zwischen 1 und 10 cm/min, die maximalen Pegelrückgangsraten zwischen 0.4 und 2 cm/min (Pfaundler & Keusen 2007a) und die mittlere tägliche Amplitude der Abflusstiefe bei 0.5 m (Herzog Ingenieure 2007).

Während der Schwallbetrieb die Kolmation der Flusssohle tendenziell verstärkt (da bei Schwall durch den sog. Vibrationseffekt mehr Feinmaterial in das Sediment eingetragen wird), wirken die geringere Schwebstofffracht (durch Sedimentation von suspendierten Partikeln in den verschiedenen Speicherseen) sowie das etwas häufigere Auftreten von Abflüssen, die zum Aufreissen der Deckschicht führen, entgegengerichtet (Meile et al 2005). Künftige Untersuchungen sollen zeigen, welcher Prozess dominiert.

Während der Wintermonate führt die Aare unterhalb der Wasserrückgabe auch trübes Wasser aus den Speicher-



Bild 1a. Rückgabe des aus dem Grimselgebiet stammenden Wassers (rechts) in das Gadmerwasser (links) unmittelbar vor der Mündung in die Aare.

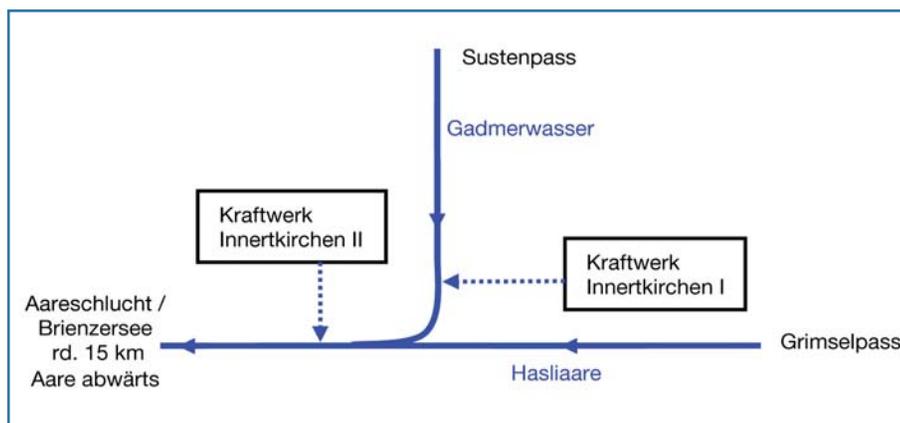


Bild 1b. Lageplan der Kraftwerke Innertkirchen I und II sowie deren Wasserrückgaben (blaue gestrichelte Pfeile) in das Gadmerwasser (Fließrichtung von oben nach unten) und in die Hasliaare (Fließrichtung von rechts nach links).

seen. Allerdings haben Absetzversuche gezeigt, dass die suspendierten Teilchen so klein sind, dass sie sich selbst nach einem Tag nicht absetzen. Somit dürfte die Trübung keinen grossen Effekt auf die Sohlenkolmation haben.

2.3 Wassertemperatur

Die langjährige mittlere Wassertemperatur der Aare bei Brienzwiler beträgt rund 6 °C mit Extremwerten, die zwischen 0.3 °C und 12.4 °C schwanken können (BAFU 2007). Aufgrund der Kanalisierung der Aare zwischen Wasserrückgabe und Aareschlucht (und zwischen Aareschlucht und Brienzensee) und der hohen Fließgeschwindigkeit bei der Wasserrückgabe kann eine rasche Durchmischung und somit eine relativ homogene Verteilung der Wassertemperatur in der Aare angenommen werden. Dabei hängt die Wassertemperatur vom Verhältnis zwischen Triebwasser und nicht gefasstem Wasser ab. Der grösste Einfluss des Kraftwerkbetriebs auf die Wassertemperatur tritt im Sommer auf, wenn das nicht gefasste Wasser der Aare relativ warm ist und bei der Rückgabe durch das kalte Wasser aus den Speicherseen abgekühlt wird.

2.4 Makrozoobenthos

Seit 1986 wurden und werden an verschiedenen Abschnitten der Aare zwischen Innertkirchen und Brienzensee Makrozoobenthos-Proben aufgenommen. Aufgrund der wiederholten Beprobungen kann die Datengrundlage für diesen Aareabschnitt als sehr gut bezeichnet werden. Beim Vergleich der Daten ist allerdings zu beachten, dass die Probennahmen nicht zum jeweils gleichen Zeitpunkt des Jahres, nicht an derselben Stelle und nicht mit dem gleichen Sammelaufwand durchgeführt wurden.

Als Referenzstrecke für erste Vergleiche wurde die Aare oberhalb von Innertkirchen (Restwasserstrecke ohne künstliche Pegelschwankungen) gewählt. Ausserdem werden derzeit auch MZB-Proben an der Lütschine erhoben, um einen Vergleich zu einem hydrologisch und morphologisch natürlichen Flussabschnitt ziehen zu können.

Die Auswertung der Proben zeigt, dass die aquatische Wirbellosenfauna unterhalb der Aareschlucht artenreich und ähnlich zu derjenigen oberhalb von Innertkirchen (Referenzstrecke ohne künstliche Pegelschwankungen) ist. In der mit Bühnen verbauten Strecke zwischen der Wasserrückgabe Innertkirchen und der Aareschlucht war die Artenvielfalt dagegen geringer (Tabelle 1).

Der Rückgang der Artenvielfalt in dieser begrädigten Strecke unterhalb der Wasserrückgabe kann sowohl auf die Gewässermorphologie als auch auf die künstlichen Pegelschwankungen, die in diesem Abschnitt wesentlich ausgeprägter als im Aareabschnitt unterhalb der Schlucht auftreten, zurückgeführt werden. Die äusserst geringe Artenvielfalt der Probe von 2005 war allerdings hauptsächlich vom extremen Hochwasserereignis im August 2005 sowie von den dadurch notwendigen Baggerarbeiten im Gewässer bedingt. Im Hinblick auf die Auswirkungen der künstlichen Pegelschwankungen auf die Gewässerökologie bedeutet dies, dass die Schwall-Sunk-Effekte auf die Artenvielfalt des Makrozoobenthos nur auf der etwa 500 m langen Strecke zwischen der Wasserrückgabestelle und dem Eingang der Aareschlucht beschränkt sind. Wird die zweite Probe von 2006 herangezogen, kann eine sehr rasche Wiederbesiedlung der Invertebraten beobachtet werden – und dies trotz künstlicher Pegelschwankungen. Bereits 2006 sind auf dieser Strecke keine signifikanten Unterschiede in der Artenvielfalt zur Referenzstrecke festzustellen (Tabelle 1).

Da in der Referenzstrecke und im Aareabschnitt unterhalb der Schlucht eine ähnliche Artenvielfalt nachgewiesen ist, kann davon ausgegangen werden, dass keine Schwall-Sunk-Effekte auf die Biodiversität der Wirbellosen in der Aare unterhalb der Schlucht wirksam sind. Allerdings wurde in der Schwallstrecke eine tiefere Biomasse (2 g/m²) als oberhalb von Innertkirchen (2–8 g/m²) gemessen. Bei diesem Vergleich muss aber der verminderte Effekt der Trübung auf die aquatische Produktivität berücksichtigt werden.

Aufgrund der längeren Fließstrecke und der rauen Morphologie innerhalb

der Schlucht schwächen sich die künstlichen Pegelschwankungen flussabwärts kontinuierlich ab.

2.5 Fische

Die Aare als Lebensraum für Fische ist in früheren Studien gut untersucht und beschrieben worden (Peter Büsser 1994). Von zentraler Bedeutung ist in diesem Abschnitt der Aare die Laichwanderung und Fortpflanzung der Seeforelle. Es gelingt den aus dem Brienzensee aufsteigenden Seeforellen auch die kanalisierte Strecke ab Ende der Aareschlucht bis zur Wasserrückgabe zu überwinden und weiter aufzusteigen. Durch die Pachtvereinigung Oberhasli wird der Seeforellen-Laichfang oberhalb von Innertkirchen seit vielen Jahren durchgeführt. Dabei konnten zwischen 2000 und 2005 jeden Herbst 11–15 Männchen und 13–21 Weibchen gefangen werden. Seit Jahrzehnten bewegt sich das Fangergebnis in dieser Grössenordnung. Die Anzahl der gesamthaft aufgestiegenen Fische wurde nie festgestellt, es handelt sich dabei nach Büsser (1994) zweifellos um ein Mehrfaches des Fangergebnisses.

Es wird vermutet, dass die Seeforellen ihr Wanderverhalten bis zu einem gewissen Grad anpassen und sich tagsüber vor der Strömung in geeignete Nischen (Blöcke, Bühnen) zurückziehen können und über Nacht oder an den Wochenenden etappenweise aufwandern. Ausserdem wirkt die Wasserrückgabe mit ihrer starken, auf das linke Ufer gerichteten Strömung nachteilig auf den Fischaufstieg. Der Einstieg der Seeforellen ins Gadmerwasser ist zeitweise verunmöglicht (vgl. Bild 1). Eine 300 m lange und für eine natürliche Verlaichung der Seeforelle günstige Strecke des Gadmerwassers liegt unmittelbar

Probestelle	Probejahr	Anzahl Taxa Steinfliegen	Anzahl Taxa Eintagsfliegen	Anzahl Taxa Köcherfliegen	Anzahl Taxa Total
Aare oberhalb Innertkirchen (unverbaut, keine künstlichen Pegelschwankungen – Referenzstrecke)	1993	7	7	0	14
	1994	6	3	6	15
	2005	8	7	6	21
	2006	6	4	6	16
Unterhalb Wasserrückgabe Innertkirchen	2005	0	0	3	3
	2006	3	4	4	11
	2006	10	4	4	18
Unterhalb Aareschlucht (Meiringen)	1986	4	4	4	12
	1994	6	6	4	16
	2002	14	10	5	29
	2005	7	6	3	16
	2006	9	7	4	18
Unterhalb Aareschlucht (Unterbach)	2006	10	3	5	18
	2006	10	6	5	21

Tabelle 1. Anzahl gefundener Stein-, Eintags- und Köcherfliegenlarven bei den verschiedenen Makrozoobenthos-Beprobungen.

1986: Probenahme H. Marrer, 1993: Datenbank Schweiz. Zentrum für die Kartographie der Fauna – Autor Landolt, 1994: Probenahme Emch+Berger (P. Büsser und H. Berner-Fankhauser), 2002: Datenbank Schweiz. Zentrum für die Kartographie der Fauna – Autor P. Stucki, 2005 und 2006: Aqwatera (V. Lubini & C. Meier).

bar oberhalb der Wasserrückgabe. Hier konnte noch keine natürliche Verlaichung von Seeforellen beobachtet werden.

Die seitlichen Begrenzungen der Aare bedingen, dass nur unterhalb der Aareschlucht bei Meiringen vereinzelt Kiesbänke als Gewässerstrukturen auftreten. Aufgrund der relativ geringen Pegeländerungsraten (vgl. 2.2) und der beschriebenen Gewässermorphologie ist ein Stranden von Fischen in diesem Abschnitt der Aare bisher noch nicht beobachtet worden.

2.6 Aktuelle und geplante Untersuchungen

Um die Auswirkungen der künstlichen Pegelschwankungen auf die Verdriftung von Invertebraten zu untersuchen, wurden im März und April 2008 an zwei morphologisch unterschiedlichen Stellen in der Aare (Kiesbankstrecke Meiringen, kanalisierte Strecke bei Brienzwiler) aufwendige Driftmessungen durchgeführt. Dabei wurde am ersten Termin die maximal mögliche Schwallrate gefahren, während am zweiten Termin (4 Wochen später) die Situation mit Beruhigungsbecken simuliert wurde. Die ersten Auswertungen deuten darauf hin, dass sich die Driftdichte bei einem sanfteren Abflussanstieg deutlich reduzieren lässt, wobei auch die Morphologie einen massgeblichen Einfluss auf die Driftdichte hat. Jeweils etwas oberhalb der Messstellen wurde auch die Sohlenbesiedlung in allen vorhandenen Teil-Lebensräumen (Habitaten) qualitativ und quantitativ aufgenommen (Limnex 2008).

Die allgemeinen gewässerökologischen Auswirkungen von Schwall und Sunk sind bisher noch nicht umfassend untersucht worden. In der einschlägigen Literatur finden sich nur vereinzelte Arbeiten, die sich intensiv mit diesem Thema auseinandergesetzt haben. Um beste-

hende allgemeine Lücken zu schliessen und um auch konkrete Ergebnisse für die Aare zu bekommen, beteiligt sich die KWO an insgesamt drei Forschungsarbeiten innerhalb des Forschungsprojekts «Integrales Flussgebietsmanagement» (Nachfolgeprojekt des «Rhone-Thur-Projekts»). Innerhalb dieser Dissertationen werden der Einfluss der künstlichen Pegelschwankungen auf die Fische und deren Habitate untersucht sowie das Verhalten der Fische bei verschiedenen Abflüssen und die Aufwanderung der Seeforelle mittels Radiotelemetrie bestimmt. Ausserdem werden konkrete Möglichkeiten zur Verbesserung der Habitatsbedingungen bei Schwall und Sunk (z.B. Rückzugsmöglichkeiten wie Uferbuchten und Zuflüsse) ausgearbeitet. In einem letzten Schritt sollen die an der Aare gewonnenen Forschungsergebnisse verallgemeinert und anwendungsorientiert für die Praxis aufbereitet werden, so dass diese Erkenntnisse auch für andere Schwall-Sunk-beeinflusste Gewässer zur Verfügung stehen. Die Arbeiten beginnen voraussichtlich im Herbst 2008.

3. Technische Daten des Beruhigungsbeckens und des Kraftwerkbetriebs

3.1 Technische Daten des Beruhigungsbeckens

Das Beruhigungsbecken ist in Innertkirchen direkt bei der heutigen Wasserrückgabe geplant (Bild 2). Das Becken wird seitlich von den Flüssen Aare und Gadmerwasser sowie von den Gleisen der Meiringen-Innertkirchen-Bahn begrenzt (Bild 2 und 3). Auch die vertikale Ausdehnung des Beckens ist aufgrund des Aare-niveaus und der Höhenlage der Turbinen im Kraftwerk Innertkirchen II vorgegeben. Unter Berücksichtigung dieser Voraussetzungen kann ein maximales Speichervolumen von ca. 22 000 m³ für das Becken erzielt werden. Ausserdem können in dem rund 1.6 km langen Unterwasserstollen noch zusätzliche 25 000 m³ an Speichervolumen genutzt werden.

Bei dem Ausfluss des Wassers aus dem Becken werden mit in Reihe geschalteten Mikroturbinen nochmals 2 GWh/a (entspricht etwa der Jahresarbeit von zwei grossen Windrädern) erzeugt. Die Mikroturbinen sind in Siphons eingebaut und das höher liegende Beckenwasser wird über den Siphon an das niedriger liegende Flusswasser zurückgegeben. Dadurch wird auch eine wesentlich sanftere Wasserrückgabe gewährleistet, die das Aufwärtswandern von Fischen erleichtert.

Das über die Mikroturbinen abfließende Wasser wird zunächst, getrennt durch eine Leitbühne, parallel zur Aare geführt, um den Geschiebehalt in diesem Streckenabschnitt nicht signifikant zu verändern (in Bild 3 noch nicht eingezeichnet). Die optimale Lage und Anordnung der Leitbühne sowie die Gewährleistung der Hochwassersicherheit nach dem Bau des Beruhigungsbeckens wurde in einem physikalischen Modellversuch der Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft der TU München bestimmt (Hartlieb et al 2007) (Bild 4).

Die Steuerung des Beckens basiert auf einer Einsatzprognose der Kraftwerke (auf Basis des erwarteten Strombedarfs) und erlaubt so einen sehr effizienten Einsatz des Beckens. Die verschiedenen Phänomene der künstlichen Pegelschwankungen werden so deutlich reduziert. Zum Beispiel wird das Becken bei einer vorhergesagten Zunahme des Strombedarfs geleert und damit der Abfluss in der Aare sanft erhöht. So wird die Aare bereits im Vorfeld auf den Schwall «vorbereitet». Bei Eintreffen des Schwalls aus den Kraftwerken muss nur noch die Differenz aus Zu-

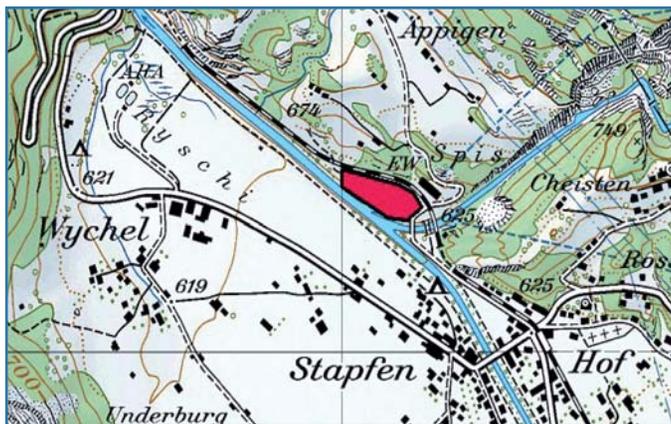


Bild 2. Kartenausschnitt mit Standort des geplanten Beruhigungsbeckens © 2008 swisstopo (JD072732).



Bild 3. Schematische Darstellung des geplanten Beruhigungsbeckens zwischen Aare, Gadmerwasser und der Meiringen-Innertkirchen-Bahn.

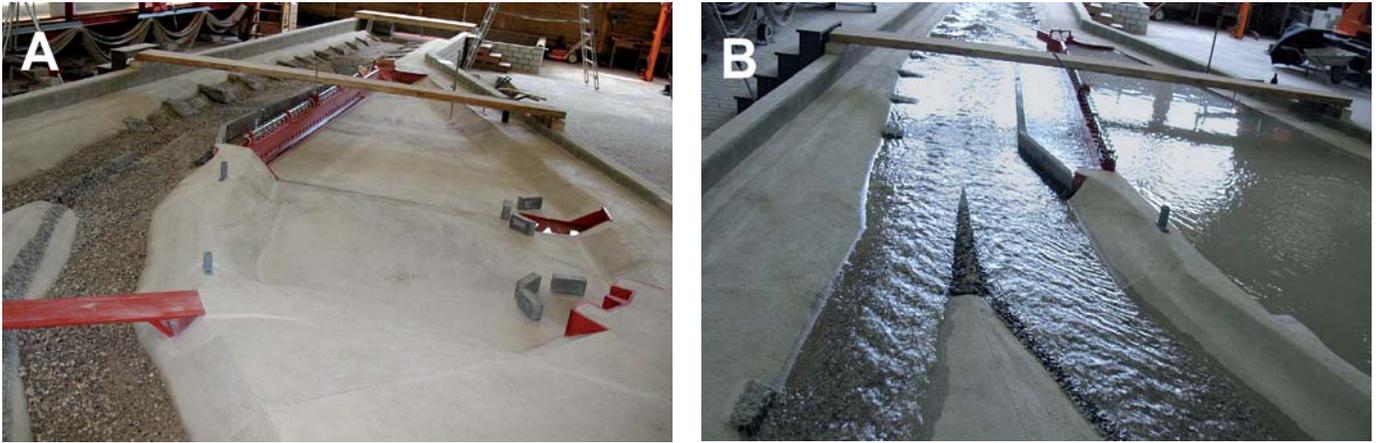


Bild 4. Physikalisches Modell der Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft der TU München (Obernach). A: Modellierte Aare, Gadmerwasser und Beruhigungsbecken ohne Abfluss; B: Modellierte Aare, Gadmerwasser und Beruhigungsbecken bei Hochwasserabfluss.

fluss zum Becken und erhöhtem Abfluss in der Aare im Becken zurückgehalten werden. Das wirksame Retentionsvolumen des Beckens wird dadurch deutlich erhöht.

3.2 Technische Daten des Kraftwerkbetriebs

Die einzelnen Kraftwerke der KWO sind durch ein komplexes Stollensystem miteinander verbunden. Die beiden untersten Kraftwerke Innertkirchen I und II sind von den Gegebenheiten bei den weiter oberliegenden Kraftwerken abhängig. Zur Erzeugung eines maximalen Schwall müssen beide Kraftwerke in Innertkirchen unter Vollast gefahren werden.

Das Kraftwerk Innertkirchen II kann allerdings nur auf ein relativ kleines Speichervolumen (effektiv 50 000 m³) in Hopflauen zurückgreifen. Dabei beschränken sich die Zuleitungen zum Ausgleichsbecken Hopflauen auf eine Pump-Verbindung mit Handeck mit max. 20 m³/s, auf den Druckstollen von der Fassung Leimboden mit max. 2 m³/s (im Winter 0 m³/s) und auf den natürlichen Zufluss aus dem Gadmerwasser, der im Winter auf unterhalb 1 m³/s sinkt. Somit ergibt sich im Winter folgende Situation bei Vollast im Kraftwerk Innertkirchen II: dem Hopflauer Ausgleichsbecken werden 30 m³/s entnommen, während ihm maximal 21 m³/s zugeführt werden können, d.h. die maximale Entleerungszeit beträgt 50 000 m³ / 9 m³/s = 92 Minuten. Also kann das Kraftwerk Innertkirchen II im Winter maximal 92 Minuten unter Vollast betrieben werden. Das geplante Beruhigungsbecken könnte bei diesem Extremszenario die Wasserabgabe in die Aare um maximal 9.3 m³/s reduzieren.

Durch Revisionen in den einzelnen Kraftwerken wird der Betrieb in Innert-

kirchen zusätzlich eingeschränkt. In den Wintermonaten (aus ökologischer und hydrologischer Sicht die heikelste Zeit) der letzten 27 Jahre wurden im Schnitt nur an 15% der Tage keine Revisionen durchgeführt. Durchschnittlich lag an jedem zweiten Tag die maximale Wasserrückgabe in Innertkirchen unter 59 m³/s (82%).

Diese Einschränkungen verdeutlichen, dass nach einem Ausbau des Kraftwerks Innertkirchen I die maximale Menge an turbinierem Wasser während den Wintermonaten nur vereinzelt gefahren werden kann. Ökonomische Überlegungen, die die Wahrscheinlichkeit von maximalen Wasserrückgaben noch weiter reduzieren, sind hier nicht miteinbezogen worden.

4. Auswirkungen des Beckens

4.1 Verminderung verschiedener Schwall-Sunk-Indikatoren

Nach dem Bau des Beruhigungsbeckens wird das Schwall-Sunk-Verhältnis der Hasliaare unterhalb von Innertkirchen in den Wintermonaten von heute maximal 8:1 auf maximal 5:1 reduziert werden (für 95% der Tage im Winter – vgl. VAW et al 2006) – und dies trotz kurzfristig höherer Mengen an Triebwasser infolge der Aufwertung des Kraftwerks Innertkirchen I. Damit würde die Hasliaare zum Beispiel den strengen Kriterien der EU-Wasserrahmenrichtlinie nach österreichischer Interpretation genügen.

Da das Beruhigungsbecken auf Basis von 30-minütigen Strombedarfsprognosen gesteuert wird, kann der Anstieg und Rückgang des Wasserspiegels um die Hälfte verlangsamt, die Schwall- (Bild 5) und Sunkraten deutlich reduziert und die Änderungsraten der Wasserwechselzonen gesenkt werden (Herzog Ingenieure 2007). Die positive Veränderung dieser Schwall-

Sunk-Indikatoren erhöht die Reaktions- und Fluchtzeiten für die aquatischen Organismen (vgl. Kap. 2.6).

4.2 Gewässerökologische Verbesserungen

Mit dem Einsatz von Mikroturbinen beim Auslass des Beckenwassers in die Aare wird ein «sanfteres» Einleiten des Triebwassers in die Aare erreicht. Zusammen mit der Entflechtung des klaren Gadmerwassers vom trüben Triebwasser wird so der untere Abschnitt des Gadmerwassers mit hervorragenden Laichgründen für die bedrohte Seeforelle wieder zugänglich gemacht. Auch die heute bereits genutzten Laichgründe oberhalb von Innertkirchen sind für die Seeforellen dank der sanfteren Wasserrückgabe leichter zu erreichen. Gegenwärtig wird versucht, die Wasserbauten und die zukünftigen Strömungsverhältnisse fischökologisch zu optimieren, um den aufsteigenden Bach- und Seeforellen den Einstieg ins Gadmerwasser und den Aareabschnitt oberhalb der Wasserrückgabe zu erleichtern.

Es ist sehr wahrscheinlich, dass infolge der im Abschnitt 4.1 beschriebenen Schwalldämpfungen sich auch die Gewässerökologie der Aare im Abschnitt zwischen Innertkirchen und Brienersee verbessern wird. So deuten erste orientierende Messungen der Invertebratendrift darauf hin, dass sich die Drift mit einem Beruhigungsbecken infolge der längeren Fluchtzeiten deutlich reduzieren lässt (Kap. 2.6, Limnex 2008).

5. Rolle der Umweltschutzorganisationen

In den letzten Jahren wurde von verschiedenen Umweltschutzorganisationen auf die Auswirkungen der künstlichen Pegelschwankungen auf die Gewässerökologie

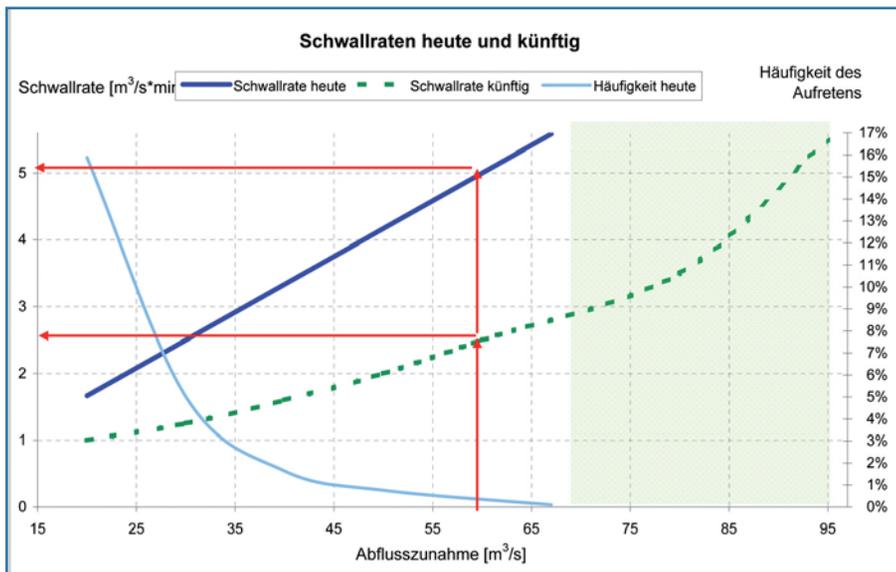


Bild 5. Schwallraten in der Aare in Abhängigkeit vom Abflussanstieg für den heutigen (blaue Kurve) und für den künftigen Zustand nach Bau des Beruhigungsbeckens (grüne Kurve). Die hellblaue Linie beschreibt die heutigen Häufigkeiten der verschiedenen Abflusszunahmen. Die grün hinterlegte Diagrammfläche markiert den zukünftigen Bereich der möglichen Abflusszunahmen (aus Herzog Ingenieure 2007).

Lesebeispiel (rote Pfeile): Bei einer Abflusszunahme von 60 m³/s werden heute Schwallraten von 5 m³/s*min und künftig von 2.5 m³/s*min erzeugt.

wiederholt hingewiesen. So ergaben sich auch verschiedene Diskussionen zwischen Vertretern der KWO und den Umweltschutzorganisationen WWF Schweiz und Pro Natura und des Grimselvereins (Bild 6). Daraus resultierte der Entschluss der KWO, im Zuge der Aufwertung des Kraftwerks Innertkirchen I ein Beruhigungsbecken zur Reduktion der Schwall- und Sunkraten sowie der künftigen Pegelschwankungen zu planen. Nachdem die räumlichen Möglichkeiten abgesteckt waren, wurden die hydraulischen und morphologischen Aspekte des Beruhigungsbeckens in einem physikalischen Modellversuch an der Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft in Oberrach (Deutschland) untersucht und optimiert (Hartlieb et al 2007, Kap. 3). Bei einem Besuch dieser Versuchsanstalt im Januar 2008 wurde den Vertretern von Umweltschutzorganisationen (U. Eichenberger, A. Knutti, C. Meyer) sowie des Kantons Bern (I. Schmidli, N. Hählen) und der Schwellenkooperation der Gemeinde Innertkirchen (A. Banholzer) das physikalische Modell vorgeführt. Bei der daran anschliessenden Diskussion wurden die gewässerökologischen Auswirkungen der hier beschriebenen Projekte (Aufwertung Kraftwerk Innertkirchen I und Bau eines Beruhigungsbeckens) ausführlich beleuchtet und besprochen. Grundsätzlich begrüßen die Umweltschutzorganisationen den Bau des Beruhigungsbeckens. Sie äussern allerdings noch Bedenken bezüglich der Grösse des

Beckens – auch, weil allgemein bezüglich Schwall-Sunk noch einige Aspekte genauer erforscht werden müssen. Um Antworten auf noch allgemeine offene Fragen zu diesem Thema zu erhalten und um die spezielle Situation in der Aare genauer zu untersuchen, beteiligt sich die KWO an insgesamt 3 Forschungsarbeiten, die an der Eawag und an der EPFL zu diesem Thema durchgeführt werden (siehe Kapitel 2.6).

In die künftige Detailplanung des Beruhigungsbeckens werden sowohl die Umweltschutzorganisationen als auch die Vertreter vom Kanton Bern und der Gemeinde Innertkirchen direkt miteinbezogen werden.

Der unermüdliche Einsatz der Umweltschutzorganisationen hat schliesslich zur Planung des ersten Beruhigungsbeckens in der Schweiz, das vorwiegend aus ökologischen Gründen gebaut werden soll, geführt – auch wenn der Handlungsbedarf bei der Schwall-Problematik erst in den letzten Jahren richtig erkannt wurde (und erste Projekte in Angriff genommen werden) sowie die rechtlichen Grundlagen nicht so genau definiert sind, wie z.B. bei den Restwasservorschriften.

6. Diskussion

Das geplante Beruhigungsbecken wird mehrere wichtige Aspekte der gewässerökologischen Situation in der Aare zwischen Innertkirchen und Brienzensee aufwerten. So können künftig die Schwall- und Sunkraten deutlich reduziert und der An-

stieg und Rückgang des Wasserspiegels um die Hälfte verlangsamt werden. Dies erhöht die Reaktions- und Fluchtzeiten für die aquatische Lebensgemeinschaft und kann dadurch die Invertebratendrift verringern. Ausserdem wird an über 95% der Wintertage das Schwall-Sunk-Verhältnis deutlich reduziert werden.

Das Beckenvolumen ist durch die örtlichen Gegebenheiten vorgegeben. Durch eine gezielte Steuerung des Beckens auf Basis einer Einsatzprognose der Kraftwerke kann das Beckenvolumen aber effizienter genutzt werden (siehe Kap. 3). Wegen der bestehenden Buhnen und der relativ rauen Aareschlucht ist auch eine Erhöhung der Makrorauigkeit zur Schwallabämpfung (Meile et al 2005) nur unterhalb der Aareschlucht möglich. Allerdings fehlt auf einem Grossteil der Flussstrecke der dazu benötigte Raum.

Bei der Planung des Beckens wird neben den hydraulischen, gewässerökologischen und ökonomischen Aspekten auch die ästhetische Einbindung in die Landschaft berücksichtigt (Bild 3).

Zur Beurteilung und Optimierung der hydraulischen und sedimentologischen Verhältnisse im Bereich des Ausgleichbeckens wurden von der Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft Oberrach hydraulische Modellversuche durchgeführt. Anhand dieser physikalischen Modellversuche konnten ein stabiler Geschiebehalt und eine verbesserte Hochwassersicherheit für Abflüsse bis 380 m³/s (wie bisher) nachgewiesen werden (Hartlieb et al 2007).

Um die grösstmöglichen Auswirkungen des Kraftwerksausbaus (Erhöhung der Ausbauwassermengen um 25 m³/s) auf die Sohlenstabilität abschätzen zu können, wurden die Tagesmaximalabflüsse für die letzten 26 Jahre pauschal für jeden Tag um 25 m³/s erhöht. Es zeigt sich, dass in dieser für die Sohlenstabilität ungünstigsten Prognose künftig 2.3 (heute 1.2) Ereignisse mit einem Abfluss grösser als 150 m³/s und 1.0 Ereignisse (heute 0.7) mit einem Abfluss grösser als 180 m³/s auftreten werden. Aus gewässerökologischer Sicht ist diese geringe Zunahme an Ereignissen mit Sohlenbewegungen unbedenklich, wenn nicht sogar aus Gründen der Dynamik und der Dekolmation erwünscht.

Mit dem sanfteren Einleiten des Triebwassers in die Aare sowie der Entflechtung des klaren Gadmerwasser vom trüben Triebwasser wird der untere Abschnitt des Gadmerwassers mit hervorragenden Laichgründen für die bedrohte Seeforelle wieder zugänglich gemacht.

Auch die heute bereits genutzten Laichgründe oberhalb von Innertkirchen sind für die Seeforellen dank der sanfteren Wasserrückgabe künftig leichter zu erreichen. Ausserdem schafft der Bau dieses Beruhigungsbeckens eine wichtige Voraussetzung für eine nachhaltigere Nutzung der Aare unterhalb von Innertkirchen. Im vor kurzem initiierten Projekt «Integraler Hochwasserschutz Aare Meiringen bis Brienz» werden weitere Massnahmen (z.B. lokale Aufweitungen, Anbindung von ehemaligen Altarmen,...) zur Aufwertung der Gewässerökologie diskutiert werden.

Um die gewässerökologische Situation noch besser verstehen zu können, sind verschiedene Forschungsarbeiten geplant, in denen der Einfluss der künstlichen Pegelschwankungen auf die Fische, das Benthos und auf die Habitatsverteilung untersucht wird. Daraus können gegebenenfalls in einem späteren Schritt noch weitere Verbesserungen für die aquatische Lebensgemeinschaft durch bauliche Eingriffe direkt an der Aare und am Gadmerwasser resultieren.

Abschliessend sollte noch bedacht werden, wie viele Kleinwasserkraftwerke, Photovoltaikanlagen und/oder Windpärke nötig sind, um einen Energieertrag von 50 GWh/a zu erzielen, und wie gross in diesem Fall die ökologischen Beeinträchtigungen ausfallen würden.

Literatur

BAFU (Herausgeber) (2007): Hydrologisches Jahrbuch der Schweiz 2005. Umwelt-Wissen Nr. 0713. Bundesamt für Umwelt, Bern. 502 S.
Büsser P. (1994): Register 4: Fisch- und Gewässerökologie. Register 9: Grundlagen Fisch- und Gewässerökologie. In: Grimsel-West, Umwelt. Zusatzuntersuchungen – Wasserführung in Seen und Aare. Verfasser: Emch + Berger, im Auftrag der KWO. Unveröffentlicht.
Günther A. (1971): Die kritische mittlere Sohlschubspannung bei Geschiebemischungen unter Berücksichtigung der Deckschichtbildung und der turbulenzbedingten Sohlschubspannungsschwankung. Mitteilung Nr. 3 der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH Zürich.
Hartlieb A., Sperer A. und Rutschmann P. (2007): Ausgleichsbecken Innertkirchen. Zwischenbericht zum Modellversuch. Studie der Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft der Technischen Universität München.
 Herzog Ingenieure (2007): Umweltverträglichkeitsbericht Aufwertung Kraftwerk Innertkirchen 1, 2te Etappe. Fachbereich Hydraulik der Oberflächengewässer. Unveröffentlicht.
 Limnex (2008): Biologische Untersuchungen



Bild 6. Gemeinsame Untersuchung des Invertebratenbestandes in der Aare bei Meiringen (unterhalb der Aareschlucht) vom 16. Mai 2007. Mitarbeiter der KWO, Vertreter der Umweltschutzorganisationen WWF Schweiz, Pro Natura und Grimselverein diskutieren die Funde mit einer Expertin für Invertebraten (Dr. V. Lubini).

und Begleitmessungen in der Hasliaare. Limnex-Studie, Zürich. Fertigstellung des Berichts voraussichtlich Ende 2008.

Meile T., Fette M. und Baumann P. (2005): Synthesebericht Schwall/Sunk. Publikation des Rhone-Thur-Projekts.

Minor H.-E. und Möller G. (2007): Schwall und Sunk, technisch-ökonomische Situation in den grösseren Flussgebieten der Schweiz. Wasser Energie Luft 99 (1): 19–24.

Pfaundler M. und Keusen M. (2007a): Veränderungen von Schwall-Sunk. Hydrologische Datenanalyse zur Charakterisierung von Schwall/Sunk-Phänomenen in der Schweiz. Umwelt-Wissen Nr. 0712. Bundesamt für Umwelt, Bern. 110 Seiten.

Pfaundler M. und Keusen M. (2007b): Charakterisierung und Veränderungen von Schwall-Sunk-Phänomenen in der Schweiz – eine hydrologische Datenanalyse. Wasser Energie Luft 99 (1): 25–30.

Pfaundler M., Keusen M. (2007): Veränderungen von Schwall-Sunk. Hydrologische Datenanalyse zur Charakterisierung von Schwall-Sunk-Phänomenen in der Schweiz. Umwelt-Wissen Nr. 0712. Bundesamt für Umwelt, Bern. 110 Seiten.

Schluchter S. (2006): Beruhigungsbecken der KWO. Dynamische Simulation des Beruhigungsbeckens Innertkirchen. Diplomarbeit der Berner Fachhochschule, Technik und Informatik, 73 Seiten.

VAW, ETH Zürich und LCH, EPF Lausanne (2006): Kraftwerksbedingter Schwall und Sunk, eine Standortbestimmung. Studie im Auftrag des Schweizerischen Wasserwirtschafts-

verbandes. Bericht VAW 4232-LCH 05, <http://www.sww.ch/downloads.cfm>.

Anschrift der Verfasser

Dr. *Steffen Schweizer* (Gewässerökologe)
 Dr. *Johann Neuner* (Bauingenieur)
 Dr. *Heinz Peter Tscholl* (Ökologe, Forstingenieur)
 Max Ursin (Assistent der Geschäftsleitung, Bauingenieur) und *Matthias Meyer* (Praktikant bei der KWO)
 Kraftwerke Oberhasli AG, Grimselstrasse 19
 CH-3862 Innertkirchen
 Tel. +41 (0)33 982 20 19, sste@kwo.ch