Schwall und Sunk: Auswirkungen auf die Gewässerökologie und mögliche Sanierungsmassnahmen

Andreas Bruder, Steffen Schweizer, Stefan Vollenweider, Diego Tonolla, Tobias Meile

Zusammenfassung

Die unnatürlichen Abflussschwankungen durch Schwall und Sunk aufgrund der Stromproduktion der Speicherkraftwerke führen zu vielfältigen Beeinträchtigungen der Gewässerökologie in der Schwallstrecke. Verschiedene Organismengruppen, Arten und Lebensstadien werden unterschiedlich stark durch Schwall und Sunk beeinträchtigt. Die neuen rechtlichen Vorgaben schreiben die Sanierung von wesentlichen Beeinträchtigungen vor; primär mit baulichen Massnahmen, auf Antrag der Kraftwerkbetreiber aber auch mit betrieblichen Massnahmen. Für die Erfassung der Beeinträchtigungen, die Festlegung des ökologischen Zielzustandes und die Planung der Sanierungsmassnahmen sind vielfältige gewässerökologische Untersuchungen notwendig. In einigen Schwallstrecken in der Schweiz und im Ausland wurden solche Untersuchungen schon durchgeführt. Die Erkenntnisse daraus und aus anderen Quellen sind in den vorliegenden Artikel eingeflossen.

1. Einleitung

Die intermittierende Stromproduktion von Speicherkraftwerken führt zu unnatürlichen Abflussschwankungen in der Schwallstrecke (Schwall und Sunk). Ein durch Schwall und Sunk beeinflusstes Abflussregime weist in der Regel folgende hydrologischen Eigenschaften auf *(Bild 1)*:

- Während Phasen mit keiner oder geringer Stromproduktion kann der Abfluss deutlich tiefer fallen als im natürlichen Zustand. Bei diesen Bedingungen ähnelt die Schwallstrecke einer Restwasserstrecke (Kapitel 3.5).
- Um Schwankungen im Stromnetz rasch ausgleichen zu können, wird die Stromproduktion relativ schnell hoch oder runter gefahren. Dies führt zu einer unnatürlich schnellen Zu- oder Abnahme des Abflusses unterhalb der Wasserrückgabe (Kapitel 3.2 resp. 3.4).
- In Zeiten mit hohem Strombedarf oder Situationen mit hohen Zuflüssen wird von den Speicherkraftwerken eine grosse Menge Strom erzeugt. Dadurch ergeben sich unnatürlich häufig hohe Abflüsse in der Schwallstrecke (Kapitel 3.3).
- Durch häufige Änderungen der Stromproduktion (in der Regel mehrmals pro Tag) ergibt sich eine unnatürlich hohe Variabilität des Abflusses (Kapitel 3.6).

Schwall und Sunk kann zu einer wesentlichen Beeinträchtigung der Qualität des Lebensraumes und zur direkten Schädigung von Fliessgewässerorganismen führen (Moog 1993, Baumann und Klaus 2003). Das revidierte Gewässerschutzgesetz und die entsprechende Verordnung (in Kraft seit Januar, respektive Juni 2011) regeln die Sanierung wesentlicher Beeinträchtigungen der einheimischen Tiere und Pflanzen sowie deren Lebensräume durch Schwall und Sunk (Art. 39a und 83a GSchG; Art. 41e,f und Anhang 4a GSchV). Die rechtlichen Vorgaben sehen für den Vollzug einen zweistufigen Planungsprozess vor:

- In einer ersten Phase bestimmen die Kantone welche schwallerzeugenden Wasserkraftwerke auf ihrem Gebiet in welchen Gewässerabschnitten wesentliche Beeinträchtigungen hervorrufen (Defizitanalyse; Baumann et al. 2012) und schlagen die Art der zu treffenden Sanierungsmassnahmen und die Fristen zu deren Umsetzung vor. Für die Sanierung sind bauliche Massnahmen vorgesehen. Auf Antrag der Kraftwerkbetreiber können aber auch betriebliche Massnahmen in Betracht gezogen werden. Die Massnahmen müssen mit den übrigen Interessen (z.B. Hochwasserschutz) und Planungen (z.B. Revitalisierungen) im Einzugsgebiet abgestimmt werden.
- In der zweiten Planungsphase müssen die betroffenen Kraftwerksbetreiber die vorgeschlagenen Massnahmenvarianten ausarbeiten und bewerten. Die Bewertung umfasst eine Aufwand/Wirkungsanalyse auf deren Grundlage der Kanton (nachdem er das BAFU angehört hat) die umzusetzende Massnahme verfügt (Bruder et al. 2012).

Dieser Artikel beschreibt die Auswirkungen von Schwall und Sunk auf die Gewässerökologie und zeigt Möglichkeiten zur Sanierung auf. Dabei ist zu beachten, dass die Zusammenstellung aufgrund der Komplexität des Themas und den laufenden Forschungsaktivitäten keinen Anspruch auf Vollständigkeit hat. Allerdings sollten sie die wesentlichsten Auswirkungen und Möglichkeiten nach heutigem Kenntnisstand umfassen.

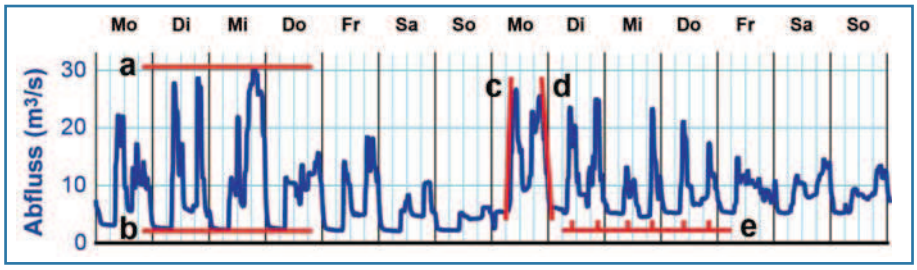

Bild 1. Schwallbeeinflusste Abflussgangline am Beispiel der Vispa bei Visp während zwei Wochen anfangs März 2012. Rot hervorgehoben sind die Parameter zur hydrologischen Beschreibung der Schwallereignisse: a: Maximalabfluss (Q_{max}), b: Minimalabfluss (Q_{min}), c: Schwallrate ($QR_{Schwall}$), d: Sunkrate (QR_{Sunk}), e: Häufigkeit der Schwallereignisse. Basierend auf hydrologischen Daten der Messstation des BAFU (BAFU Hydrologie 2012).

Der Artikel fasst einen Teil der Erkenntnisse eines Projekts der Eawag zusammen, das zum Ziel hatte, wissenschaftliche Grundlagen für die Sanierung gemäss Gewässerschutzgesetz zusammen zustellen. Der nachfolgende Artikel in dieser Ausgabe von «Wasser Energie Luft» gibt einen Überblick über mögliche Prognostizierungsansätze bei der Bewertung und Planung von Sanierungsmassnahmen (Bruder et al. 2012). Das Projekt wurde in enger Zusammenarbeit mit dem Bundesamt für Umwelt (BAFU) und Wasser-Agenda 21 durchgeführt. Das Projektteam vereinte ausserdem Experten eines Kraftwerkbetreibers (KWO) und zweier Planungsbüros (Limnex und Basler & Hofmann).

2. Grundlagen

Der Artikel basiert auf verschiedenen Grundlagen:

- Die aktuelle wissenschaftliche Fachliteratur
- Erkenntnisse aus Untersuchungen von Schwallstrecken und aus konkreten Sanierungsvorhaben (vgl. Bruder et al. 2012). Diese Untersuchungen wurden entweder im Rahmen von Kraftwerkserweiterungen (Kraftwerke Oberhasli, Kraftwerke Linth-Limmern, Kraftwerk Amsteg, Kraftwerk am Ijentalerbach und Kraftwerk Lagobianco) oder von Flussrenaturierungen (Alpenrhein und Ticino) durchgeführt. Die Auswahl dieser Projekte ermöglichte eine breite Abdeckung von Erkenntnissen aus verschiedenartigen Gewässern und Kraftwerksystemen.
- Diskussionen mit Experten aus Forschung und Praxis, die sich mit verschiedenen Bereichen der Auswirkungen und Sanierung von Schwall und Sunk befassen (Hydraulik, Gewässerökologie, Wasserbau, usw.) und zum Teil in die Sanierungsvorhaben involviert waren.

Der Artikel gibt damit einen Überblick über die aktuellsten Erkenntnisse aus Forschung und Praxis.

3. Auswirkungen von Schwall und Sunk auf die Gewässerökologie

3.1 Allgemeine Bemerkungen

Die Veränderung der Hydrologie einer Schwallstrecke durch Schwall und Sunk kann durch folgende Parameter charakterisiert werden (*Bild 1*; Baumann et al. 2012):

- minimaler und maximaler Abfluss (Q_{min} und Q_{max}),
- Schwall/Sunk-Verhältnis (Q_{max}/Q_{min}),
- Schwall/Sunk-Amplitude ($Q_{max} - Q_{min}$),
- Abfluss- und Pegeländerungsraten ($QR_{Schwall}$ und QR_{Sunk}, resp. $PR_{Schwall}$ und PR_{Sunk}),
- Häufigkeit und Dauer von Schwallereignissen.

Die Hydrologie wirkt sich auf die Hydraulik und das Sedimentregime aus und bestimmt gemeinsam mit der Morphologie die physikalischen Lebensbedingungen (Habitate) der Gewässerorganismen. Durch Schwall und Sunk können Prozesse ausgelöst werden, welche die Qualität der Habitate beeinträchtigen *(Tabelle 1)*. Dadurch werden Organismen direkt geschädigt und biologische Prozesse gestört (Fortpflanzung, Migration, Nahrungsnetze, usw.). Diese Auswirkungen führen längerfristig zu einer Reduktion der Abundanz und der Biomasse von sensiblen Arten und zu einer Verschiebung der Artenzusammensetzung hin zu eher resistenten Arten (z.B. strömungsliebende Arten).

3.2 Auswirkungen des Abflussanstieges

3.2.1 Rasche Zunahme der Fliessgeschwindigkeit

Durch die schnelle Abflusszunahme zu Beginn eines Schwalldurchganges nehmen die Fliessgeschwindigkeit, die Wassertiefe und somit die Scherkräfte auf der Substratoberfläche sehr schnell zu. Diese führen zur Verdriftung von Organismen, die nicht widerstehen oder rechtzeitig Refugien aufsuchen können. Ausserdem wird organisches Material ausgewaschen, das den Tieren als Nahrung dient (Moog

Hydrologische Effekte von Schwall und Sunk	Hydromorphologische Effekte von Schwall/Sunk	Negative Auswirkungen auf die Gewässerökologie
Rascher Abflussanstieg	Rasche Zunahme der Fliessgeschwindigkeit	Verdriftung
		Auswaschung von organischem Material das als Ressource dient
	Kurzfristige Veränderung der Wassertemperatur	Verdriftung
		Fluchtreaktion und Standortwechsel von Fischen
Hoher Abfluss	Hohe Fliessgeschwindigkeit	Reduktion der Wanderaktivität von migrierenden Fischen
		Höherer Energieaufwand und Exponierung durch Aufsuchen von Refugien
	Mobilisierung von Teilen der Gewässersohle	Abrasion von Organismen
		Mechanische Schädigung von Organismen
		Physiologischer Stress von Fischen
	Erhöhung der inneren Kolmation	Reduzierter Lebensraum
		Reduzierte Sauerstoffversorgung von Fischlaich
	Erhöhung der Trübung	Beeinträchtigung der Wanderaktivität und Jagd von Fischen
		Beeinträchtigung der Photosynthese
Rasche Abflussabnahme	Abnahme der benetzten Fläche	Stranden
		Blockieren in abgeschnittenen Gewässerbereichen
		Höherer Energieaufwand und Exponierung von Fischen durch Standortwechsel
	Aussedimentieren von Schwebstoffen	Reduktion der Habitateignung durch innere und äussere Kolmation
Tiefer Abfluss	Geringe Wassertiefe und Volumen	Reduzierter Lebensraum
		Schnelle Veränderung der physikalischen und chemischen Eigenschaften des Wassers
Hohe Variabilität des Abflusses	Unnatürliche Hydrologie	Veränderung der Habitateignung
		Verhaltensänderungen

Tabelle 1. Übersicht der negativen Auswirkungen von Schwall und Sunk auf die Gewässerökologie einer Schwallstrecke.

1993). Wenn zusätzlich das Sohlen-Substrat oder Teile davon in Bewegung kommen, tritt meistens auch eine sprunghafte Zunahme der Verdriftung auf (Baumann und Schälchli 2002, Jones et al. 2011). So wurde z.B. in der Reuss schon mit dem Einsetzen der Abrasion fädiger Aufwuchsalgen, die von verschiedenen Tieren als Habitat genutzt werden, eine sprunghafte Zunahme der Verdriftung festgestellt (BGF 2009).

Tiere reagieren auf die schnelle Abflusszunahme und versuchen sich in Refugien mit geringer Strömung zurückzuziehen. Fische suchen Schutz hinter groben Strukturelementen (Blöcke, Kolken oder Wurzeln, usw.) oder in Seitenarmen. Aufgrund ihrer geringeren Mobilität sind die Ausweichmöglichkeiten für Makroinvertebraten und juvenile Fische (Brüt- und Sömmerlinge) deutlich geringer als jene adulter Fische. Kleine und flexible Makroinvertebraten mit zylindrischer Körperform können jedoch in die Substratzwischenräume (das Interstitial) der Gewässersohle ausweichen (Baumann und Meile 2004, Fischnetz 2004, Bruno et al. 2009). Dabei werden nicht nur Unterschiede zwischen Arten sondern auch zwischen Lebensstadien deutlich. Im Experiment von Bruno et al. (2009) konnten kleine Larvenstadien von Eintags- und Steinfliegen ins Interstitial ausweichen, während grosse Stadien der gleichen Arten vermehrt verdriftet wurden. Fischlarven der Salmoniden entwickeln sich in relativ grobkörnigem Sediment (Bachforelle: 0.6 bis 13 cm Korngrösse; Fischnetz 2004) und sind dadurch etwas besser vor Verdriftung geschützt, solange das Sediment nicht in Bewegung kommt.

Das Ausmass der Verdriftung hängt von der Ausprägung der Schwallereignisse ab, wie der Höhe des Maximalabflusses und der Abflusszunahmerate. Schwallversuche in der Reuss haben gezeigt, dass die Menge verdrifteter Makroinvertebraten mit dem Schwall/Sunk-Verhältnis zunimmt und während dem täglichen Erstschwall am grössten ist (BGF 2009). Ausserdem war die Verdriftung während des Abflussanstieges höher als während des Maximalabflusses, während dessen sie innerhalb relativ kurzer Zeit (1–2 h) wieder zurück ging. Während des Abflussrückganges war die Verdriftung dann unbedeutend. In Versuchsrinnen konnten ähnliche Auswirkungen eines Schwalldurchgangs auf Äschenbrütlinge nachgewiesen werden (Schmutz 2012). Bei Schwallversuchen in der Linth und der Hasliaare war das Ausmass der Verdriftung auch von der Abflussanstiegsrate abhängig, wahrscheinlich weil diese die Reaktionszeiten bestimmt (Limnex 2006, Limnex 2009). Zusätzlich spielt die Morphologie der Schwallstrecke eine entscheidende Rolle für die Verdriftung, weil sie die Verbreitung von Refugien bestimmt und die Abflussanstiegsraten etwas dämpfen kann (Limnex 2009, Young et al. 2011).

3.2.2 Kurzfristige Veränderungen der Wassertemperatur

Der Einfluss des turbinierten Wassers auf die Wassertemperatur der Schwallstrecke wird durch die Jahreszeit, die Menge des eingeleiteten Wassers im Vergleich zur Restwassermenge und der Tiefe der Wasserentnahme aus den Speicherseen bestimmt. Abrupte Temperaturänderungen können auftreten, wenn sich die Temperatur von Betriebs- und dem Restwasser deutlich unterscheidet. Im Winter ist das Tiefenwasser von Speicherseen oftmals etwas wärmer als das Restwasser, wodurch sich bei dessen Einleitung die Wassertemperatur in der Schwallstrecke erhöht (Zolezzi et al. 2011). Der sprunghafte Anstieg der Wassertemperatur kann unabhängig von den hydrologischen Einflüssen zu einer verhaltensbedingten Verdriftung von Makroinvertebraten führen (Carolli et al. 2012) und die Fische zu Fluchtreaktionen und Standortwechseln veranlassen. Im Sommer verringert die Einleitung von Wasser aus Speicherseen tendenziell die Wassertemperatur in der Schwallstrecke. Da im Winter jedoch der natürliche Abfluss (und die Restwassermenge) in den meisten Flüssen geringer ist, dürften die Auswirkungen des eingeleiteten Wassers auf die Wassertemperatur in der Schwallstrecke dann grösser ausfallen.

3.3 Auswirkungen des hohen Abflusses

3.3.1 Hohe Fliessgeschwindigkeit

Durch die hohen Fliessgeschwindigkeiten während eines Schwalldurchganges wird die Aufwanderung von migrierenden Fischen deutlich erschwert. Im Alpenrhein legten mit Sendern markierte Seeforellen an Wochenenden bis zu 50% grössere Distanzen zurück als an den Wochentagen mit stärkeren Schwallereignissen (Mendez 2007). Die Tiere versuchen bei hohen Fliessgeschwindigkeiten in Refugien auszuweichen, was mit einem höheren Energieaufwand verbunden ist. Hinzu kommt, dass sie während den Standortwechseln gegenüber Frassfeinden (z.B. fischfressende Vögel) exponierter sind (Scruton et al. 2008).

3.3.2 Mobilisierung von Teilen der Gewässersohle

Ein Schwalldurchgang führt ab einem bestimmten Abfluss zu Resuspension und Transport von Feinsedimenten (Limnex 2006). Diese Schwebstofffracht kann zur Abrasion und mechanischen Schädigung von exponierten Organismen führen (Baumann und Schälchli 2002). Dies betrifft vor allem sesshafte Organismen wie Algen und darauf lebende Makroinvertebraten sowie besonders sensible Tiere (z.B. solche mit exponierten Kiemen; Fischnetz 2004, Jones et al. 2011). Die Schwebstofffracht erhöht generell den physiologischen Stress von Fischen (EIFAC 1965, Fischnetz 2004). Gemäss EIFAC (1965) sind bei einer Schwebstofffracht bis 25 mg/l keine negativen Auswirkungen des physiologischen Stresses zu erwarten, bis 80 mg/l geringe und ab 80 mg/l beträchtliche, die sich langfristig auch in der Biomasse niederschlagen können. Beispielhaft können die Untersuchungen in der Linth aufgeführt werden, während deren in einem Schwalldurchgang Schwebstoffgehalte zwischen 60 und 80 mg/l durchaus üblich waren; in einzelnen Messungen wurden auch Werte von deutlich über 100 mg/l nachgewiesen (Limnex 2006). Für die Belastung der Organismen ist aber auch die Häufigkeit und die Dauer von Ereignissen mit erhöhter Schwebstofffracht entscheidend.

Nehmen die Scherkräfte weiter zu, können auch Sedimente von grösseren Fraktionen in Bewegung geraten und die Organismen, die diese als Habitat nutzen, können geschädigt werden (Baumann und Meile 2004, Meile et al. 2005). Die Oberfläche des Substrates und die oberflächennahe Schicht sind die wichtigsten Lebensräume von Makroinvertebraten, Aufwuchsalgen und Makrophyten, aber auch der frühen Lebensstadien der Fische. Laich von Bachforellen zum Beispiel wird in 4–25 cm Tiefe im Substrat abgelegt (Peter 2012) und nach dem Schlüpfen verbringen die Brütlinge weitere ein bis zwei Monate im Kiesbett (Elliott 1994). Einige Makroinvertebratenarten können bei genügender Reaktionszeit der Bewegung der oberflächennahen Schicht ausweichen, in dem sie sich in die tiefen Zonen des Interstitials zurückziehen (Baumann und Meile 2004, Bruno et al. 2009).

3.3.3 Erhöhung der inneren Kolmation

Die Schwebstofffracht beeinflusst zusammen mit der Sohlenschubspannung, dem hydraulischen Gradienten der Sickerströmung und der Korngrösse des Sohlenmaterials auch die Entwicklung der inne-

ren Kolmation (vgl. Kapitel 3.4.2). Diese Einflussgrössen (ausser der Korngrösse) werden während einem Schwalldurchgang erhöht und führen zu einem verstärkten Eintrag von Feinpartikeln in die Gewässersohle und damit zu einer stärkeren inneren Kolmation (Baumann et al. 2012). Durch die innere Kolmation werden Substratzwischenräume verringert und für Makroinvertebraten weniger gut geeignet oder teilweise nicht mehr zugänglich. Auch kann die Durchströmung der Substratzwischenräume und so deren Versorgung mit Sauerstoff abnehmen, was den Reproduktionserfolg von kieslaichenden Fischen beeinträchtigt (Fischnetz 2004).

3.3.4 Erhöhung der Trübung

Die Einleitung von trübem Wasser aus den Speicherseen kann zusätzlich zur Resuspension die Menge von partikulären Stoffen in der Schwallstrecke erhöhen (z.B. während dem Winter in der Hasliaare; Anselmetti et al. 2007). Auch in der Rhone wird die Schwebstofffracht durch den Kraftwerkbetrieb deutlich erhöht und spiegelt die Abflussschwankungen wieder (Portmann et al. 2004). Die resultierende Trübung kann die Wanderaktivität von Fischen (Fischnetz 2004) und die Nahrungsaufnahme der auf Sicht jagenden Tiere (z.B. die meisten Salmoniden) einschränken. Die Trübung reduziert ausserdem die einfallende Lichtmenge für substratbewohnende Pflanzen und verringert so deren Photosyntheserate und Wachstum (Lloyd et al. 1987). Viele Pflanzen haben jedoch die Möglichkeit, bei reduzierter Lichtmenge die Effizienz der Photosynthese zu erhöhen (Parkhill und Gulliver 2002).

3.4 Auswirkungen der Abflussabnahme

3.4.1 Abnahme der benetzten Fläche

Während der Abflussabnahme fallen die Gewässerbereiche der Wasserwechselzone (Fläche der Uferzone zwischen maximalem und minimalem Abfluss) trocken und Organismen, die der Wasserlinie nicht folgen können, stranden. Gestrandete Organismen sind durch Austrocknen, Gefrieren und terrestrische Frassfeinde gefährdet. Das Ausmass des Strandens wird primär durch die Pegelrückgangsrate und die Gewässermorphologie bestimmt (Young et al. 2011, Nagrodski et al. 2012). In Abschnitten mit vielfältiger Morphologie ist die Gefahr des Strandens in der Regel höher als in kanalisierten Abschnitten, da die Neigung der Uferzone geringer ist und die Tiere beim Abflussrückgang eine grössere Distanz zurücklegen müssen, aber auch weil Vertiefungen in der Uferzone als Fallen wirken können *(Bild 2)*. Generell ist die Gefahr des Strandens bei gröberem Substrat grösser, aufgrund der Bildung von Wasserflächen in Vertiefungen und dem vorwiegend vertikalen Rückzug des Wassers im Vergleich zu feinem Substrat (Hunter 1992).

Die Gefahr des Strandens und Trockenfallens ist auch abhängig von den Eigenschaften und Verhaltensweisen der Organismen. Neben dem Laich sind Brut- und Sömmerlinge der Bachforellen und Äschen u.a. besonders gefährdet, da sie sich im Vergleich zu adulten Fischen näher an der Substratoberfläche und in seichten Bereichen der Uferzone aufhalten und weniger gute Schwimmer sind (Hunter 1992, Baumann und Klaus 2003).

In morphologisch vielfältigen Abschnitten sind bei Schwall die Nebengerinne (Seitenarme, Überschwemmungsflächen, Senken, usw.) mit dem Hauptgerinne verbunden. Tiere können dann aktiv oder passiv Nebengerinne erreichen, die bei Sunk wieder abgetrennt werden, wodurch die Tiere darin blockiert werden. Aufgrund des fehlenden Wasseraustausches können sich die physikalischen, chemischen und biologischen Bedingungen im Nebengerinne deutlich ändern (u.a. Sauerstoffabnahme, Temperaturveränderung, Anreicherung von chemischen Stoffen, weniger Rückzugmöglichkeiten vor Fressfeinden bis hin zum Austrocknen), wodurch die darin blockierten Organismen die Dauer bis zur erneuten Anbindung an das Hauptgerinne teilweise nicht überleben (Hunter 1992).

Bild 2. Kiesbank in der Hasliaare bei Meiringen nach einem Schwalldurchgang. Klar ersichtlich sind Wasserlachen, in denen Fische und Makroinvertebraten blockiert werden können.

3.4.2 Aussedimentieren von Schwebstoffen

Die Schwebstoffe, die während höheren Abflüssen in der Schwallstrecke transportiert werden, sedimentieren während dem Abflussrückgang aus und tragen zur Kolmation der Gewässersohle bei (Schälchli 1993). Man unterscheidet dabei zwischen innerer Kolmation, bei der sich die Feinsedimente in den Substratzwischenräumen ablagern (vgl. Kapitel 3.3.3) und äusserer Kolmation, als Folge einer Ablagerung der Feinsedimente auf der Substratoberfläche. Die innere Kolmation beeinträchtigt die Qualität des Substratzwischenraumes als Habitat (z.B. durch verringerte Sauerstoffzufuhr; Fischnetz 2004) und Refugium des Makrozoobenthos (Bruno et al. 2009). Durch die äussere Kolmation wird den Organismen der Zugang zu stabilem Substrat erschwert, oder sie können durch Feinsedimente bedeckt werden (Jones et al. 2011).

3.5 Auswirkungen des tiefen Abflusses

Generell ähneln die Bedingungen während Phasen mit tiefem Abfluss jenen einer Restwasserstrecke. Bereits ab einer geringen morphologischen Vielfalt (z.B. mit Buhnen oder alternierenden Kies-

bänke) kann dies zu einer Verringerung der benetzten Breite, der Wassertiefen und Fliessgeschwindigkeiten führen. Insbesondere für Fische ändern sich dadurch die Habitateigenschaften und –eignungen (z.B. für Jungfische; Fischnetz 2004). Entsprechend den Problemen von Restwasserstrecken wirken sich auch chemische und physikalische Einflüsse aus dem Einzugsgebiet stärker auf geringe Wassermengen aus. Die Erwärmung durch Sonneneinstrahlung aber auch die Abkühlung vollzieht sich schneller als bei hohem Abfluss und Einträge von Nähr- und Schadstoffen aus dem Zwischeneinzugsgebiet erreichen höhere Konzentrationen. Es ist jedoch zu erwarten, dass ihre Wirkung nur bei längeren Phasen mit tiefem Abfluss eine wesentliche Rolle für die Organismen spielen dürfte. Bereits beim nächsten Schwallereignis dürften sich die physikalischen und chemischen Beeinträchtigungen entschärfen. Sofern die Wassertiefe es erlaubt, profitieren migrierende Fische bei ihrer Aufwärtswanderung von Sunkphasen und legen in dieser Zeit die grössten Distanzen zurück (Mendez 2007).

3.6 Hohe Variabilität des Abflusses

Neben den kurzfristigen Auswirkungen eines Schwalldurchgangs beeinflusst Schwall und Sunk das Abflussregime der Schwallstrecke. Natürliche Abflussschwankungen (in Abhängigkeit von Niederschlag und Schnee-, resp. Gletscherschmelze) und Hochwasserereignisse sind wichtige Eigenschaften der Fliessgewässer, welche die räumliche Anordnung und zeitliche Verfügbarkeit von Habitaten mit bestimmten Ausprägungen beeinflussen (Poff et al. 1997, Young et al. 2011). Durch Schwall und Sunk wird jedoch die Häufigkeit und Intensität der Abflussschwankungen deutlich erhöht. Hinzu kommen noch die regelmässigen physikalischen und chemischen Änderungen des Wassers sowie Beeinträchtigungen der Lebensbedingungen in und auf der Sohle. Diese Effekte führen zwangsläufig zu einem physiologischen Stress der aquatischen Organismen. Dies kann ein weiterer Grund für das Verschwinden bestimmter Arten oder für die Reduktion ihrer Abundanzen und Biomassen in Schwallstrecken darstellen.

4. Mögliche Sanierungsmassnahmen

Die Dämpfung der hydrologischen Auswirkungen von Schwall und Sunk (Reduktion der Abflussextreme und –änderungsraten; *Bild 1*) kann erreicht werden, indem das Verhältnis zwischen dem Volumen des eingeleiteten Wassers (pro Zeiteinheit) und dem des Gewässers, in welches das Wasser eingeleitet wird, reduziert wird. Dieser Effekt kann grundsätzlich mit baulichen oder betrieblichen Massnahmen erreicht werden *(Tabelle 2)*. Bauliche Massnahmen basieren darauf, a) ein Volumen bereitzustellen, in dem das turbinierte Wasser aufgefangen wird (Beruhigungsbecken und -stollen, Überflutungsflächen, Bewässerungskanäle, usw.) und dann über einen längeren Zeitraum in die Schwallstrecke geleitet wird, oder b) das turbinierte Wasser in ein Gewässer mit einem grösseren Volumen oder Abfluss umzuleiten (z.B. einen See oder grösseren Fluss). Betriebliche Massnahmen erreichen diese Dämpfung, indem die Betriebsweise der Kraftwerke entsprechend angepasst wird.

Die rechtlichen Vorgaben sehen explizit die Sanierung mit baulichen Massnahmen vor, da sie die Stromproduktion und Regulierfunktion der Kraftwerke im Gegensatz zu betrieblichen Massnahmen nicht einschränken. Für eine lange Betriebsdauer und unter Einbezug der Bereitstellung von notwendigem Ersatz für Stromquellen mit kurzfristiger Reaktionszeit liegen die Kosten baulicher Massnahmen auch um einen Faktor 1.3 bis 3.5 tiefer als jene von betrieblichen Massnahmen (Minor und Möller 2007, Schmocker et al. 2007). Dennoch ist in gewissen Fällen eine Kombination mit betrieblichen Massnahmen aus gewässerökologischer Sicht sinnvoll. Diese können auf Antrag der Kraftwerkbetreiber in die Auswahl einbezogen werden. Für die Auswahl und Planung von Sanierungsmassnahmen sind vielfältige Untersuchungen der Gewässerökologie und eine möglichst gute Prognostizierung der Auswirkungen der Sanierungsmassnahmen notwendig (Bruder et al. 2012).

4.1 Bauliche Sanierungsmassnahmen

4.1.1 Beruhigungsbecken, -kavernen und Überflutungsflächen

Mit Beruhigungsbecken, respektive -kavernen oder Überflutungsflächen kann der Schwall aufgefangen und gedämpft in den Fluss eingeleitet werden *(Bild 3)*. Die vielfältigen Möglichkeiten zur Steuerung dieser Massnahmen erlauben eine gewisse Flexibilität für die Ausgestaltung des verbleibenden Schwallregimes, z.B. Gestaltung eines Vorschwalles (BGF 2009, Werlen 2011), Reduktion von Abflussänderungsraten, bei grossen Volumina: Brechen der Maximalabflüsse. Eine gewässerökologisch optimale Steuerung von Beruhigungsbecken und –kavernen hängt grundsätzlich von folgenden Faktoren ab:

- Für die Schwall/Sunk-Dämpfung zur Verfügung stehendes Speichervolumen
- Betriebseigenschaften des Kraftwerks (Ausbauwassermenge, aktuelles und künftiges Betriebsregime, Systemdienstleistungen, Revisionsarbeiten, usw.)
- Gewässerökologische Defizite
- Morphologie der Schwallstrecke

Eine Erhöhung des heutigen Minimalabflusses ist aus ökologischer Sicht vor allem in der natürlichen Niedrigwasserperiode im Winter entscheidend. Dabei ist zu beachten, dass die Erhöhung des Minimalabflusses über mehrere Monate sichergestellt werden muss (z.B. zum Verhindern des Trockenfallens von Laichgruben). Soll diese kontinuierliche Erhöhung des Minimalabflusses ausschliesslich über ein Beruhigungsbecken und/oder –kaverne erfolgen, bedarf es sehr grosser Speichervolumina. Zum Beispiel benötigt die Erhöhung des Minimalabflusses in der Schwallstrecke um 1 m^3/s pro Tag bereits ein Volumen von 86 400 m^3. Gerade während langen Sunkphasen (wie z.B. zwischen Weihnachten und Neujahr) bräuchte es riesige Speichervolumina, die

Bauliche Massnahmen	Beruhigungsbecken oder -kavernen[a)]
	Direktableitung des Schwalls in einen See oder grösseren Fluss
	Morphologische Revitalisierungen
Betriebliche Massnahmen	Reduktion der Abflussextreme (Verringerung des Schwalls, Erhöhung des Sunks)
	Reduktion der Abfluss- resp. Pegeländerungsraten
	Bildung eines Vorschwalls
	Antizyklisches Turbinieren hintereinandergelegener Kraftwerke

[a)]: zur Reduktion der Abfluss- resp. Pegeländerungsraten sowie Bildung eines Vorschwalls. Bei genügend grossem Volumen können auch die Maximalabflüsse reduziert werden.

Tabelle 2. Mögliche Massnahmen zur Sanierung von Schwall und Sunk. Innerhalb dieser Massnahmentypen sind unterschiedliche Ausgestaltungen möglich.

Bild 3. Bestehendes Ausgleichsbecken im Vinschgau, Südtirol – das sich prinzipiell auch für eine Schwall/Sunk-Dämpfung eignen würde. Das Becken hat ein Volumen von 400 000 m³.

in den meisten Fällen mit extrem hohen Kosten verbunden wären. Das benötigte Speichervolumen zur Reduktion des Maximalabflusses (z.B. zum Verhindern von Sedimentumlagerungen in Laicharealen) lässt sich auf die gleiche Weise abschätzen (vgl. Baumann et al. 2012).

Die Kosten für Beruhigungsbecken variieren je nach lokalen Begebenheiten. Eine Gegenüberstellung mehrerer Becken in der Schweiz hat einen Mittelwert von CHF 70.– pro m³ für Becken mit einem Volumen über 100 000 m³ ergeben (Schmocker et al. 2007). Für kleinere Becken ergaben sich Kosten von bis zu mehreren CHF 100.– pro m³. Erwartungsgemäss variierten die Kosten auch mit unterschiedlicher Bauweise sehr stark. Hinzu kommen enorme Schwierigkeiten zur Deckung des Landbedarfs oder wenn sich die Beckenstandorte z.B. in Bereichen mit hohen Grundwasserständen befinden oder die Hochwassersicherheit gewässermorphologische Anpassungen bedarf. Die Landknappheit wurde dementsprechend auch in den meisten untersuchten Kraftwerkserweiterungen als limitierender Faktor bei der Planung von Beruhigungsbecken angeführt. Voraussichtlich kann daher in vielen Fällen eine Erhöhung des Speichervolumens nur mittels Kavernen erfolgen. Der Landbedarf für Kavernen (z.B. Deponien für Ausbruchmaterial) ist deutlich geringer, die Kosten für ihren Bau liegen jedoch ein Vielfaches über jenen von Beruhigungsbecken. Die Kosten für Speichervolumina müssen in Zusammenhang mit der gesetzlich erwähnten Verhältnismässigkeit betrachtet werden und dürften in vielen Fällen die Obergrenze des Speichervolumens definieren.

4.1.2 Direktableitung des Schwalls in einen See oder grösseres Fliessgewässer

Die Ableitung des turbinierten Wassers in einen See oder ein grösseres Fliessgewässer kann die Abflussschwankungen durch deren grosse Volumina resp. Abfluss in der Regel viel stärker dämpfen, als wenn es direkt in die Schwallstrecke eingeleitet würde. Ein bekanntes Beispiel für dieses Vorgehen ist die geplante Sanierung des Poschiavino durch eine Direktableitung in den Lago di Poschiavo (Lagobianco AG 2011). Bei einer Einleitung des Schwalls sind jedoch die Auswirkungen auf die Wasserstandschwankungen, auf die Sedimentstabilität und auf das Mischverhalten des Sees einzubeziehen (Bonalumi et al. 2012). Solche Sanierungsmassnahmen sind nur sinnvoll, wenn sich ein See oder grosser Fluss in der Nähe der Wasserrückgabe befindet. Ansonsten dürften die baulichen Investitionen und die Beeinträchtigung des Landschaftsbildes zu gross werden.

4.1.3 Revitalisierungen

Mit Revitalisierungen (morphologische Aufwertungen) der Schwallstrecke können einige hydrologische Auswirkungen von Schwall und Sunk etwas gedämpft werden (vgl. Bruder et al. 2012). Durch die grössere Gewässerbreite, die Bildung von Bereichen mit verlangsamter Strömung und die Anbindung von Seitengewässern wird in der Regel der maximale Schwallabfluss geringfügig reduziert und die Pegeländerungsraten etwas abgeschwächt (Meile et al. 2005, LCH 2010). Die Schaf-

fung von Uferflächen mit geringer Neigung vergrössert jedoch auch die Wasserwechselzone, was die Gefährdung durch Stranden erhöhen kann (falls nicht gleichzeitig die Sunkraten verringert werden). Für Schwallstrecken, die nur geringfügig aufgeweitet werden können, wurden bauliche Massnahmen untersucht, die zum Ziel hatten, die Uferbereiche mit kleinräumigen Ausbuchtungen aufzurauen (Meile 2007, Ribi 2012). Diese Massnahmen können neben einer geringen Dämpfung des Schwalls auch Rückzugsmöglichkeiten für Fische und bei geeigneter Bauweise auch Habitate für Jungfische schaffen.

Aufgrund ihrer geringen Wirkung zur Dämpfung von Schwall und Sunk können Revitalisierungen in den meisten Fällen jedoch nicht als alleinstehende Sanierungsmassnahmen angesehen werden. Ihre positiven Auswirkungen auf die Habitatverfügbarkeit für Gewässerorganismen und die Attraktivität als Erholungsraum für Besucher können Schwallstrecken dennoch deutlich aufwerten. Der grosse Einfluss der Morphologie auf die Gewässerökologie von Schwallstrecken unterstreicht die Bedeutung einer koordinierten Planung von Schwall/Sunk-Sanierungsmassnahmen und Revitalisierungen, damit eine wesentliche ökologische Verbesserung erreicht werden kann (Bruder et al. 2012).

4.2 Betriebliche Sanierungsmassnahmen

Eine Reduktion von Schwall und Sunk kann auch durch eine entsprechende Ausrichtung des Kraftwerkbetriebs erreicht werden. Dabei kann die maximale Menge des turbinierten Wassers beschränkt und so die Schwallspitzen verringert werden. Der Sunkabfluss kann optimiert werden, indem der minimale Abfluss durch eine Anpassung der Wasserrückgabe oder der Wasserfassungen erhöht wird. Ausserdem können die Abflussänderungsraten durch langsameres an- und zurückfahren der Turbinen verringert werden. Wird der Schwall und Sunk durch mehrere Kraftwerkzentralen verursacht, bieten sich weitere Möglichkeiten zur Sanierung. Der Betrieb der Kraftwerke kann zum Beispiel so ausgerichtet werden, dass flussabwärts liegende Kraftwerke während der Sunkphase von oberhalb liegenden Kraftwerken produzieren und einleiten und so deren Restwassermenge aufbessern (antizyklisches Turbinieren).

Betriebliche Massnahmen (aber in geringerem Ausmass auch die Steuerung von Beruhigungsbecken und -kavernen) bieten die Möglichkeit, die Dämpfung von Schwall und Sunk der Empfindlichkeit der Fliessgewässerorganismen anzupassen. Diese unterscheidet sich zwischen Arten und Lebensstadien und somit im Jahresverlauf. Zum Beispiel reagieren Makroinvertebraten sowie Laich und Brütlinge der Fische am empfindlichsten auf Sedimentumlagerungen oder Verdriftung, weil sie sich im oder direkt auf dem Substrat aufhalten und letztere ausserdem schwache Schwimmer sind (vgl. Kapitel 3.2 und 3.3). Dies betrifft vor allem die Wintermonate, wenn natürlicherweise aufgrund der geringen Hochwasser eher stabile Verhältnisse in der Sohle herrschen. Im Sommer kann eine schwächere Dämpfung von Schwall und Sunk in Betracht gezogen werden, falls die dann vorhandenen Lebensstadien weniger empfindlich sind.

5. Schlussfolgerungen

Schwall und Sunk beeinträchtigt die meisten abiotischen (z.B. Habitate) und biotischen (Organismen und Prozesse) Komponenten der betroffenen Ökosysteme. Diese Komponenten sind durch vielfältige Interaktionen verbunden, wodurch die Auswirkungen von Schwall und Sunk auf die Gewässerökologie äusserst komplex sind. Für die Erfassung der Beeinträchtigungen und für die Planung der Sanierungsmassnahmen ist es daher notwendig, alle wichtigen Organismengruppen, Arten und Lebensstadien aber auch die verschiedenen hydromorphologischen Eigenschaften der Schwallstrecke zu untersuchen (Baumann et al. 2012). Damit kann auch die Artenzusammensetzung und Populationsstruktur der Organismen der Schwallstrecke abgeschätzt und die Erarbeitung von spezifischen (bezüglich Arten und Lebensstadien) ökologischen Zielwerten von Schwall und Sunk unterstützt werden.

Ökologisch begründete und gewässerspezifische Zielwerte bieten eine wichtige Grundlage für die Planung von Sanierungsmassnahmen. Die Bewertung verschiedener Sanierungsmassnahmen soll neben einer Abschätzung der Auswirkungen von Sanierungsmassnahmen auf die Gewässerökologie auch den Aufwand (Kosten, notwendige Landfläche, Beeinträchtigungen des Landschaftsbildes, usw.) und sekundäre Nutzungsmöglichkeiten einbeziehen und in ein Verhältnis setzen (Bruder et al. 2012). Beruhigungsbecken können zum Beispiel bei entsprechender Bauweise und Dimensionierung als zusätzliches Speichervolumen für Pumpspeicherkraftwerke, zur direkten Stromproduktion (z.B. mit Mikroturbinen; Schweizer et al. 2008) oder für anderweitige Nutzungen des geschaffenen Wasserkörpers (z.B. als Erholungsraum, Biotop, usw.; Heller et al. 2010) dienen.

Die Erkenntnisse aus diesem Projekt machen deutlich, dass die Erfassung der Auswirkungen von Schwall und Sunk auf die Gewässerökologie sowie die Planung und Bewertung von Sanierungsmassnahmen mit einem grossen Aufwand verbunden ist. Dieser ist aber aufgrund der Komplexität des Ökosystems und aufgrund der hohen Kosten von Sanierungsmassnahmen und der notwendigen Anpassungen, falls die Sanierungsziele nicht erreicht werden, gerechtfertigt.

Danksagung

Wir bedanken uns herzlich bei folgenden Personen für Diskussionen und Auskünfte. Aus dem Projektteam: M. Kummer, I. Schmidli, M. Huber-Gysi (alle BAFU), A. Wüest und A. Peter (beide Eawag) sowie P. Baumann (posthum). Sowie für Auskünfte im Zusammenhang mit den Fallstudien: Dr. M. Schneider (Schneider und Jorde Engineering), Dr. B. Polli (Büro für Jagd und Fischerei, Kt. Tessin), L. Jaun (Amt für Umwelt, Kt. Uri), Dr. N. Semadeni (Axpo), R. Mendez (Axpo), J. Grünenfelder (Ecowert), J. Ortlepp (Hydra), F. Binder (FMB Engineering) und W. Dönni (Fischwerk). Und bei SEL AG – Südtiroler Elektrizitätsaktiengesellschaft für die Erlaubnis die Abbildung des Ausgleichsbeckens Schluderns zu veröffentlichen und für die Durchsicht des Manuskripts.

Literatur

Anselmetti, F., R. Bühler, D. Finger, S. Girardclos, A. Lancini, C. Rellstab und *M. Sturm* (2007). Effects of Alpine hydropower dams on particle transport and lacustrine sedimentation. Aquatic Sciences 69, 179–189.

Baumann, P. und *U. Schälchli* (2002). Trübung und Schwall im Alpenrhein. «Wasser Energie Luft» 94 (11/12), 307–315.

Baumann, P. und *I. Klaus* (2003). Gewässerökologische Auswirkungen des Schwallbetriebes: Ergebnisse einer Literaturstudie. Mitteilungen zur Fischerei, Nr. 75. Herausgegeben vom Bundesamt für Umwelt, Bern. 116 S.

Baumann, P. und *T. Meile* (2004). Makrozoobenthos und Hydraulik in ausgewählten Querprofilen der Rhone. «Wasser Energie Luft» 96 (11/12), 320–325.

Baumann, P., A. Kirchhofer und *U. Schälchli* (2012). Sanierung Schwall/Sunk – Strategische Planung. Ein Modul der Vollzugshilfe Renaturierung der Gewässer. Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Vollzug Nr. 1203. 128 S.

BGF, Büro für Gewässer und Fischereifragen AG (2009). Erneuerung Kraftwerk Amsteg. Ge-

wässerökologisch verträgliche Ausgestaltung des Schwallregimes. Schlussbericht zuhanden SBB (Autoren: H. Marrer und M. Spörri). 134 S.
Bonalumi, M., F. S. Anselmetti, A. Wüest und *M. Schmid* (2012). Modeling of temperature and turbidity in a natural lake and a reservoir connected by pumped-storage operations. Water Resources Research 48, doi:10.1029/2012WR011844.
Bruder, A., S. Vollenweider, S. Schweizer, D. Tonolla und *T. Meile* (2012). Schwall und Sunk: Planung und Bewertung von Sanierungsmassnahmen – Möglichkeiten und Empfehlungen aus wissenschaftlicher Sicht. «Wasser Energie Luft», 104 (4) 265–272.
Bruno, M. C., B. Maiolini, M. Carolli und *L. Silveri* (2009). Impact of hydropeaking on hyporheic invertebrates in an Alpine stream (Trentino, Italy). Annales de Limnologie – International Journal of Limnology 45, 157–170.
Carolli, M., M. C. Bruno, A. Siviglia und *B. Maiolini* (2012). Responses of benthic invertebrates to abrupt changes of temperature in flume simulations. River Research and Applications 28 (6), 678–691.
EIFAC (1965). Water quality criteria for European freshwater fish. Report on finely divided solids and inland fisheries. European Inland Fisheries Advisory Commission (EIFAC), technical paper No. 1. International Journal of Air and Water Pollution 9, 151–168.
Elliott, J. M. (1994). Quantitative ecology and the brown trout. Oxford University Press, Oxford, UK.
Fischnetz (2004). Dem Fischrückgang auf der Spur. Schlussbericht des Projekts Netzwerk Fischrückgang Schweiz – «Fischnetz». 184 S.
Heller, P., E. F. R. Bollaert und *A. J. Schleiss* (2010). Comprehensive system analysis of a multipurpose run-of-river power plant with holistic qualitative assessment. International Journal of River Basin Management 8 (3–4), 295–304.
Hunter M. A. (1992). Hydropower flow fluctuations and salmonids: a review of the biological effects, mechanical causes, and options for mitigation. Technical Report Nr. 119. Department of Fisheries, State of Washington, Olympia WA, USA. 58 S.
Jones, J. I., J. F., Muphy, A. L. Collins, D. A. Sear, P. S. Naden und *P. D. Armitage* (2011). The impact of fine sediment on macro-invertebrates. River Research and Application 27. 1055–1071.
Lagobianco AG (2011). Konzessionsgenehmigungsgesuch für das Projekt Lagobianco. Informationsbroschüre der Labobianco AG, Poschiavo.
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 (Autor: Bieri M.). 12 S.
Limnex (2006). Schwallversuche in der Linth. Ökologische Auswirkungen von schwalldämpfenden Massnahmen. Bericht z. H. Amt für Umweltschutz, Kanton Glarus. 95 S.
Limnex (2009): Schwall/Sunk in der Hasliaare. Gewässerökologische Untersuchung von Hasliaare und Lütschine. Beurteilung der Schwall-Auswirkungen in je zwei Strecken und Szenarien. Bericht im Auftrag der KWO. 41 S.
Lloyd, D. S., J. P. Koenings und *J. D. Laperriere* (1987). Effects of turbidity on fresh waters of Alaska. North American Journal of Fisheries Management 7 (1), 18–33.
Meile, T., M. Fette und *P. Baumann* (2005). Synthesebericht Schwall/Sunk. Publikation des Rhone-Thur Projekts. Eawag, Kastanienbaum. 48 S.
Meile, T. (2007). Influence of macro-roughness of walls on steady and unsteady flow in a channel. Dissertation. EPFL, Lausanne. 414 S.
Mendez, R. (2007). Laichwanderung der Seeforelle im Alpenrhein. Diplomarbeit. Eawag, Kastanienbaum. 70 S.
Minor, H.-E. und *G. Möller* (2007). Schwall und Sunk, technisch-ökonomische Situation in den grösseren Flussgebieten der Schweiz. «Wasser Energie Luft» 99 (1), 19–24.
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.
Nagrodski, A., G. D. Raby, C. T. Hasler, M. K. Taylor und *S. J. Cooke* (2012). Fish stranding in freshwater systems: Sources, consequences, and mitigation. Journal of Environmental Management 103, 133–141.
Parkhill, K. L. und *J. S. Gulliver* (2002). Effects of inorganic sediment on whole-stream productivity. Hydrobiologia 472, 5–17.
Peter, A. (2012). Forellenhabitat und Sedimenttransport in Gebirgsflüssen in Zeiten des Klimawandels. Vortrag an der Fachtagung «Herausforderungen einer nachhaltigen Wasserwirtschaft» der Eawag vom 14. September 2012 in Dübendorf.
Poff, N. L., J. D. Allan, M. B. Bain, J. R. Karr, K. L. Preestegard, B. D. Richter, R. E. Sparks und *J. C. Stromberg* (1997). The natural flow regime. BioScience 47 (11), 769–784.
Portmann, M., P. Baumann und *B. Imhof* (2004). Schwebstoffhaushalt und Trübung der Rhone. Publikation des Rhone-Thur Projektes., EAWAG, Kastanienbaum, 42 S.
Ribi, J.-M. (2012). Etude expérimentale de refuges à poissons aménagés dans les berges de rivières soumises aux éclusées hydroélectriques. Dissertation. EPFL, Lausanne. 196 S.
Schälchli U. (1993). Die Kolmation von Fliessgewässersohlen: Prozesse und Berechnungsgrundlagen. Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich Nr. 124.
Schmocker, L., M. Wickenhäuser, G. Möller und *H.-E. Minor* (2007). Machbarkeit und Kosten der Schwallreduktion in der Schweiz. VAW-ETH Zürich und LCH-EPF Lausanne. VAW Bericht Nr. 4250. 90 S.
Schmutz, S. (2012). Hydropeaking impacts and solutions – new research methods in Austria (HyTec Lunz). Vortrag an der Fachtagung «International Workshop on Hydropeaking» der Alpenkonvention vom 19. Juni 2012 in Dübendorf.
Schweizer, S., J. Neuner, M. Ursin, H. Tscholl und *M. Meyer* (2008). Ein intelligent gesteuertes Beruhigungsbecken zur Reduktion von künstlichen Pegelschwankungen in der Hasliaare. «Wasser Energie Luft» 100 (3), 209–215.
Scruton, D., C. Pennell, L. Ollerhead, K. Alfredsen, M. Stickler, A. Harby, M. Robertson, K. Clarke und *L. LeDrew* (2008). A synopsis of «hydropeaking» studies on the response of juvenile Atlantic salmon to experimental flow alteration. Hydrobiologia 609 (1), 263–275.
Werlen, K. (2011). Schwall/Sunk: Optimales Abflussregime für Wasserkraftwerke. «Wasser Energie Luft» 103 (1), 21–24.
Young, P. S., J. J. Cech Jr. und *L. C. Thompson* (2011). Hydropower-related pulsed flow impacts on stream fishes: a brief review, conceptual model, knowledge gaps, and research needs. Reviews of Fish Biology and Fisheries 21 (4), 713–731.
Zolezzi, G., A. Siviglia, M. Toffolon und *B. Maiolini* (2011). Thermopeaking in Alpine streams: event characterization and time scales. Ecohydrology 4 (4), 564–576.

Anschrift der Verfasser

Andreas Bruder, Eawag
Überlandstrasse 133, CH-8600 Dübendorf
andreas.bruder@eawag.ch

Stefan Vollenweider, Wasser-Agenda 21
Überlandstrasse 133, CH-8600 Dübendorf

Steffen Schweizer, KWO AG
Grimselstrasse, CH-3862 Innertkirchen

Diego Tonolla, Bundesamt für Umwelt
Abteilung Wasser, Sektion OMW, BAFU
CH-3003 Bern

Tobias Meile, Basler & Hofmann West AG
Industriestrasse 1, CH-3052 Zollikofen