

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 Kraftwerksbetreiber 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 Kraftwerksbetreiber 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.

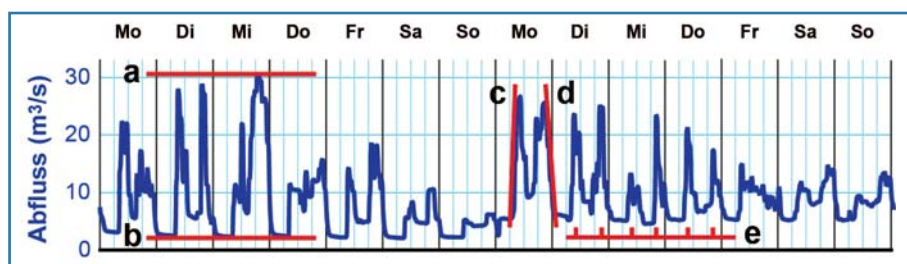


Bild 1. Schwallbeeinflusste Abflussgangline am Beispiel der Vispa bei Visp während zwei Wochen anfangs März 2012. Rot hervorgehoben sind die Parameter zur hydrologischen Beschreibung der Schwallereignisse: a: Maximalabfluss (Q_{max}), b: Minimalabfluss (Q_{min}), c: Schwallrate ($QR_{Schwall}$), d: Sunkrate (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 zusammenzustellen. Der nachfolgende Artikel in dieser Ausgabe von «Wasser Energie Luft» gibt einen Überblick über mögliche Prognoseansätze 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 Waserentnahme 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. Beispielfhaft 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 Pegelrückgangsrates 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 Tro-

ckenfallens ist auch abhängig von den Eigenschaften und Verhaltensweisen der Organismen. Neben dem Laich sind Brüt- 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 Rückzugsmöglichkeiten 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).

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 Bühnen oder alternierenden Kies-



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

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 Abflussextrême 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 Kraftwerksbetreiber 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 Vorschwals (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 m³/s pro Tag bereits ein Volumen von 86400 m³. Gerade während langen Sunkphasen (wie z.B. zwischen Weihnachten und Neujahr) bräuchte es riesige Speichervolumina, die

Bauliche Massnahmen	Beruhigungsbecken oder -kavernen ^{a)}
	Direktableitung des Schwals in einen See oder grösseren Fluss
	Morphologische Revitalisierungen
Betriebliche Massnahmen	Reduktion der Abflussextrême (Verringerung des Schwals, Erhöhung des Sunks)
	Reduktion der Abfluss- resp. Pegeländerungsraten
	Bildung eines Vorschwals
	Antizyklisches Turbinieren hintereinandergelegener Kraftwerke
^{a)} : zur Reduktion der Abfluss- resp. Pegeländerungsraten sowie Bildung eines Vorschwals. 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 400000 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 Schwall 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 Schwall sind jedoch die Auswirkungen auf die Wasserstandsschwankungen, 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 verlangsamer 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, Ribí 2012). Diese Massnahmen können neben einer geringen Dämpfung des Schwall 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 Wasserefassungen erhöht wird. Ausserdem können die Abflussänderungsraten durch langsames 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 hydropowering 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., Murphy, 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 Uferbauwerken 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 Lüttschine. 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 Projekts., 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

Schwall und Sunk: Planung und Bewertung von Sanierungsmassnahmen

Möglichkeiten und Empfehlungen aus wissenschaftlicher Sicht

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

Zusammenfassung

Die neuen rechtlichen Vorgaben im Gewässerschutz schreiben die Sanierung wesentlicher gewässerökologischer Beeinträchtigungen durch Schwall und Sunk vor. Für die Auswahl und Planung von Sanierungsmassnahmen ist die Prognostizierung ihrer Auswirkungen auf die Gewässerökologie notwendig. Das entsprechende Vorgehen unterscheidet sich von jenem zur Defizitanalyse oder der Erfolgskontrolle, die direkt im Gewässer durchgeführt werden. Basierend auf einer Auswertung von Fallstudien, der Literatur und Expertenwissen schlagen wir zur Prognostizierung ein Indikatorenset vor, das die wichtigsten hydrologischen Eigenschaften und Ökosystemkomponenten einer Schwallstrecke abdeckt. Die Auswirkungen von Sanierungsmassnahmen auf diese Indikatoren können mit Schwallversuchen, physikalischen und numerischen Modellen sowie Expertenwissen prognostiziert werden. Für die Sanierungsplanung ebenfalls entscheidend sind: der lokale Kontext, die Gewässer-morphologie, die Koordination mit anderen Renaturierungsbestrebungen, die Erfolgskontrollen sowie die Partizipation während Sanierungsprojekten. Ausserdem bestehen immer noch Bereiche der Prognostizierung und Sanierungsplanung, die durch gezielte Forschungsprojekte verbessert werden müssen.

1. Einleitung

Am 1. Januar 2011 ist das revidierte Gewässerschutzgesetz und am 1. Juni 2011 die entsprechende Verordnung in Kraft getreten. Sie enthalten neue Vorgaben zur Sanierung von wesentlichen 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). Der Vollzug sieht einen Planungsprozess mit zwei Phasen vor (vgl. Bruder et al. 2012).

Während in der ersten Phase die betroffenen Flussstrecken und Kraftwerke identifiziert werden, sollen in der zweiten Phase die Sanierungsplanung durch die Kraftwerksbetreiber ausgearbeitet und verschiedene Massnahmen basierend auf einer Aufwand/Wirkungsanalyse bewertet werden. Die Finanzierung der Massnahmen zur Sanierung der Beeinträchtigung der Fliessgewässer durch die Wasserkraftnutzung (neben der Sanierung von

Schwall und Sunk auch jene des Geschlechts und der Fischwanderung) soll über einen Zuschlag auf die Übertragungskosten der Hochspannungsnetze von 0.1 Rp./kWh geschehen (Art. 15b EnG)¹. Eine grosse Herausforderung bei der Aufwand/Wirkungsanalyse besteht darin, die Auswirkungen einer Massnahme auf die Gewässerökologie zu prognostizieren.

In der Schweiz, in Europa und den USA sind diverse Bestrebungen zur Reduzierung der Beeinträchtigungen von Schwall und Sunk in Planung oder bereits umgesetzt. Die Auswertung dieser Bestrebungen bietet eine wertvolle Grundlage für zukünftige Sanierungsprojekte. Ein Projekt der Eawag hatte zum Ziel, diese Erfahrungen zu analysieren und daraus Empfehlungen für die Wirkungsabschätzung von Sanierungsmassnahmen abzuleiten. Die Arbeit erfolgte in Zusammenarbeit mit dem Bundesamt für Umwelt (BAFU) und Wasser-Agenda 21 und wurde durch ein Projektteam betreut, das zusätzlich Ver-

treter eines Kraftwerksbetreibers (KWO) und von zwei Planungsbüros (Limnex und Basler & Hofmann) einbezog.

Der vorliegende Artikel fasst die Erkenntnisse dieser Analyse bezüglich der Prognostizierung der Auswirkungen von Sanierungsmassnahmen zusammen. Erkenntnisse zu den Auswirkungen von Schwall und Sunk auf die Gewässerökologie und eine Beschreibung von Sanierungsmassnahmen sind im vorangehenden Artikel dieser Ausgabe von «Wasser Energie Luft» beschrieben (Bruder et al. 2012).

2. Vorgehen und Fallstudien

Im Rahmen des Projektes wurden sieben Fallstudien detailliert untersucht (Tabelle 1, siehe Seite 266 und 267). Die jeweiligen Projektgrundlagen und Resultate lagen anhand von Berichten vor und wurden mit Hilfe der wissenschaftlichen Literatur analysiert und interpretiert. In Interviews mit beteiligten Experten wurden zusätzliche Erfahrungen erschlossen. Die untersuchten Fallstudien (Kraftwerke Oberhasli, Kraftwerke Linth-Limmern, Kraftwerk Amsteg, Kraftwerk Lagobianco, Kraftwerk am Ijentalerbach, Renaturierungen des Alpenrheins und des Ticinos) umfassen Sanierungsprojekte mit unterschiedlichen Rahmenbedingungen in Bezug auf die Grösse und Komplexität der Kraftwerksysteme und Schwallstrecken sowie auf die jeweiligen Sanierungsmöglichkeiten. Dabei ist zu beachten, dass die Fallbeispiele keinen direkten Zusammenhang zu den neuen rechtlichen Vorgaben haben, da ihre Planung bereits früher begonnen hat. Ausserdem sind die ausgewerteten Sanierungsprojekte unterschiedlich weit fortgeschritten; einige wurden schon gebaut, während andere noch in Planung sind (Tabelle 1).

¹ Diese Finanzierungsmöglichkeit ist nur für Kraftwerke mit laufenden Konzessionen vorgesehen.

	Kraftwerke Oberhasli	Kraftwerke Linth-Limmern	Kraftwerk Amsteg
Hydrologische Zielwerte	Abflussänderungsraten	Maximaler Abfluss, Abflussänderungsraten	Schwall/Sunk-Verhältnis, Abflussänderungsraten
Ökologische Zielwerte	Höhere Biomasse und Diversität des MZB, bessere Reproduktion der Fische, Minimierung des Strandens von Fischen (insbesondere bei morphologischen Aufwertungen)	Bessere Reproduktion der Bachforelle	Bessere Bedingungen für Fische, MZB und Algen bez. Arten und Biomasse
Limitierend für das Erreichen der ökologischen Zielwerte	Vernetzung, Verdriftung, verfügbare Laichfläche, morphologische Vielfalt	Verfügbare Laichfläche, morphologische Vielfalt	Verdriftung, morphologische Vielfalt
Vorgesehene Sanierungsmassnahmen	Beruhigungsbecken (-stollen)	Beruhigungsbecken, betriebliche Massnahmen, morphologische Aufwertungen	Beruhigungsstollen, morphologische Aufwertungen
Weitere diskutierte Massnahmen	Ableitung in den Brienzersee	Ableitung in einen grösseren Flussabschnitt	Keine
Prognostizierungsansätze	Schwallversuche, zweidimensionale numerische Modelle, physikalische Modelle, Expertenbeurteilung	Schwallversuche, eindimensionale numerische Modelle	Schwallversuche, eindimensionale numerische Modelle
Prognostizierte Indikatoren	Hydraulik, Verdriftung, Substratbewegungen, Habitatverfügbarkeit, Temperatur, Laichareale, Reproduktion der Fische, Fisch-, MZB-diversität und Biomasse, Stranden, fischereiliche Produktivität, Längenzonation des MZB, innere Kolmation	Abfluss, Verdriftung, Substratbewegungen, Laichareale, Geschiebetransport, Strömungsverhältnisse, Trübung, Morphologie	Abfluss, Verdriftung, Stranden
Stand der Sanierung	Planung im Genehmigungsverfahren, Baubeginn 2013	Bau abgeschlossen, Betrieb noch nicht vollständig umgestellt	Bau abgeschlossen, Betrieb noch nicht vollständig umgestellt

Tabelle 1. Beschreibung der untersuchten Fallstudien und ihrer Vorgehensweise zur Sanierung von Schwall und Sunk. MZB = Makro-

Mit dem Ziel, die ersten Erkenntnisse aus dieser Analyse wissenschaftlich zu diskutieren und weiter zu entwickeln, wurde ein internationaler Expertenworkshop durchgeführt. Die anwesenden Experten vereinten unterschiedliche Fachbereiche (Ökologie, Hydraulik, Modellierung) und Erfahrungen aus den meisten Ländern, in denen die Schwall/Sunk-Problematik relevant ist und die Sanierung zur Zeit angegangen wird².

3. Ansätze zur Prognostizierung der Auswirkungen von Sanierungsmassnahmen

Die Bewertung von Sanierungsmassnahmen setzt die Prognostizierung ihrer Auswirkungen auf die Gewässerökologie voraus. Die Prognostizierung ist nicht einfach, da die Wirkungszusammenhänge zwischen Hydrologie, Hydraulik, Morphologie, Wasserqualität und Ökologie äusserst komplex sind. Für die Planung, Durchführung und Interpretation der gewässerökologischen Untersuchungen ist eine Expertenbeurteilung unumgänglich. In den untersuchten Fallstudien wurden verschiedene Prognostizierungsansätze

angewendet, welche nachfolgend erläutert werden. Diese bieten wichtige Grundlagen für die Expertenbeurteilung.

3.1 Schwallversuche

Mit Schwallversuchen kann der Abfluss in der Schwallstrecke durch eine Anpassung der eingeleiteten Wassermenge so variiert werden, dass Schwallereignisse mit unterschiedlicher Ausprägung (Schwall/Sunk-Verhältnis, Abflussänderungsraten, maximaler und minimaler Abfluss usw.) nachgebildet werden können (Limnex 2006; Limnex 2009; Schweizer et al. 2010). Damit können die Auswirkungen von Sanierungsmassnahmen auf die Hydrologie der Schwallstrecke simuliert und kurzfristige Auswirkungen auf die Gewässerökologie unter zukünftigen (z.B. sanierten) Abflussbedingungen untersucht werden. Schwallversuche bieten dementsprechend Erkenntnisse unter sehr realitätsnahen Bedingungen (lokale Organismen, Grössenordnungen der Prozesse, usw.). Längerfristige Auswirkungen (z.B. Veränderung der Biomasse oder Artenvielfalt) können zwar aus Schwallversuchen mit fundierten Kenntnissen der Gewässeröko-



Bild 1. Physikalisches Modell der Einleitung des geplanten Beruhigungsbeckens der Kraftwerke Oberhasli AG in die Hasliaare. Oben links ist ein Teil des Beruhigungsbeckens und oben rechts das Ende der Restwasserstrecke zu sehen. Die Fliessrichtung ist auf diesem Bild von oben nach unten.

² Aus der Schweiz, Österreich, Frankreich, Italien, Deutschland, Norwegen und den USA.

Kraftwerk Lagobianco	Kraftwerk am Ijentalerbach	Renaturierung des Alpenrheins	Renaturierung des Ticinos
Maximaler Abfluss, Abflussänderungsraten	Minimaler Abfluss	Maximaler Abfluss, Abflussänderungsraten	Schwall/Sunk-Verhältnis, Abflussänderungsraten
Allgemein bessere Bedingungen für die Gewässerökologie	Repräsentative Fischpopulationen	Repräsentative Fischpopulationen	Noch nicht bestimmt (allgemein besserer ökologischer Zustand)
Verdriftung, morphologische Vielfalt	Habitatverfügbarkeit, minimaler Abfluss	Verfügbare Laichfläche, morphologische Vielfalt	Verdriftung, Stranden, morphologische Vielfalt, verfügbare Laichfläche
Direkte Ableitung in einen See, morphologische Aufwertungen	Betriebliche Massnahmen	Noch keine	Noch keine
Keine	Keine	Beruhigungsbecken, morphologische Aufwertungen	Beruhigungsbecken, morphologische Aufwertungen, betriebliche Massnahmen
Eindimensionale numerische Modelle für die Seen	Zweidimensionale numerische Modelle	Zweidimensionale numerische Modelle	Eindimensionale numerische Modelle
Temperatur, Partikelkonzentration, Strömung und Diffusion in den Speicherseen	Abfluss, Habitatverfügbarkeit	Abfluss, Habitatverfügbarkeit	Abfluss
Planung im Genehmigungsverfahren	Umgesetzt	Defizitanalyse durchgeführt	Defizitanalyse durchgeführt, Massnahmen vorgeschlagen

zoobenthos.

logie abgeleitet, jedoch nicht direkt erhoben, bzw. prognostiziert werden.

3.2 Physikalische Modelle

Physikalische Modelle von Sanierungsmassnahmen (Bild 1) oder Schwallstrecken (z.B. Versuchsrinnen³) eignen sich zur gezielten Untersuchung der Auswirkungen von Sanierungsmassnahmen auf kleinräumige Eigenschaften und Prozesse in der Schwallstrecke. Solche Untersuchungen umfassen beispielsweise die Wirkung von Elementen der Gewässermorphologie auf die Hydraulik oder das Stranden von Tieren während Schwallereignissen. Physikalische Modelle eignen sich aber in der Regel nicht für die Abbildung von komplexen und grossskaligen Prozessen in der Schwallstrecke (Sedimentdynamik, Interaktionen der Organismen, usw.).

3.3 Numerische Modelle

Mit numerischen Modellen können die Auswirkungen der Abflussbedingungen auf die Hydraulik und das Sedimentregime der Schwallstreckesimuliert werden. Dabei ist je nach morphologischer Vielfalt der Schwallstrecke die Anwendung von eindimensionalen (mit Querprofilen) oder zweidimen-

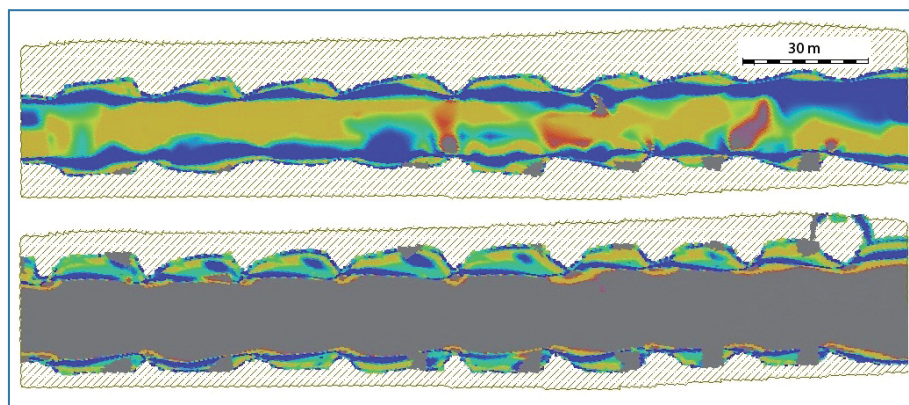


Bild 2. Beispielhafte Darstellung der Habitateignung einer Bühnenstrecke für Fließgewässerorganismen mit dem Habitatmodell CASiMiR bei tiefem (oben) und hohem (unten) Abfluss. Die Habitateignung nimmt von grau über rot, gelb, grün und blau zu. Folgende hydromorphologische Eigenschaften wurden berücksichtigt: Wassertiefe, Fließgeschwindigkeit, Korngrösse. Der Vergleich zeigt deutlich die geringe Habitateignung der Flussmitte bei hohem Abfluss und die verbleibenden Habitate in der Uferzone. Die schattierten Flächen liegen oberhalb des Wasserspiegels und wurden nicht in die Simulation einbezogen, Grafik: D. Tanno.

sionalen (mit Rasterelementen) Modellen notwendig. Die Resultate der hydraulischen Modelle können mit Hilfe von Habitatmodellen (z.B. CASiMiR; Bild 2) zur quantitativen Abschätzung der Habitateignung (Einbezug von Wassertiefe, Fließgeschwindigkeit, Korngrösse, usw.) und deren Veränderung

für verschiedene Organismengruppen oder -arten verwendet werden (Zurwerra und Bur 2009, IRKA 2012). Die Verlässlichkeit der Aussagen solcher Modelle hängt von der Qualität der zugrundeliegenden Daten ab (Morphologie der Schwallstrecke, Habitatansprüche der Organismen usw.). Diese

³ Zum Beispiel die Anlage HyTEC der Universität für Bodenkultur Wien.

sollten deshalb mit hoher Auflösung in der jeweiligen Schwallstrecke erhoben werden. Für Schwallstrecken mit geringer morphologischer Vielfalt kann der Modellierungsaufwand jedoch ohne bedeutenden Informationsverlust reduziert werden (z.B. durch die Verwendung von größeren Rasterelementen oder eindimensionalen hydraulischen Modellen).

3.4 Kombination von Prognostizierungsansätzen

Für eine aussagekräftige Abschätzung der Auswirkungen von Sanierungsmassnahmen auf die Gewässerökologie sind in der Regel eine Kombination verschiedener Prognostizierungsansätze und umfangreiche Untersuchungen in der Schwallstrecke notwendig. Vor allem die Kombination von Schwallversuchen mit numerischen Modellen dürfte in vielen Fällen ein geeignetes Vorgehen sein, da es quantitative Aussagen für repräsentative Abschnitte der Schwallstrecke basierend auf realistischen Abflussbedingungen ermöglicht.

4. Indikatoren zur Prognostizierung der Auswirkung von Sanierungsmassnahmen

Für die Prognostizierung der Auswirkungen von Sanierungsmassnahmen eignen sich Indikatoren (Schweizer et al. 2009), die mit den obengenannten Ansätzen prognostiziert werden können. Biotische Indikatoren beschreiben den Zustand der Lebensgemeinschaft (z.B. Biomasse und Diversität der Tiere und Pflanzen) und abiotische Indikatoren beschreiben die Eigenschaften und zeitliche Veränderung ihrer Habitate (z.B. Fließgeschwindigkeit, Wassertiefe, Sohlenschubspannung, benetzte Fläche).

4.1 Notwendigkeit unterschiedlicher Indikatorensets

Da mit Defizitanalysen (Beurteilung des Ist-Zustandes) und Erfolgskontrollen die aktuellen Beeinträchtigungen der Gewässerökologie vor und nach der Realisierung einer Sanierungsmassnahme in der Schwallstrecke erfasst werden sollen, können sie direkt in der Schwallstrecke durchgeführt werden (Baumann et al. 2012). Für eine möglichst gute Vergleichbarkeit dieser Untersuchungen sollten die gleichen oder ähnliche Indikatoren verwendet werden (Bild 3). Für die Beurteilung der Auswirkungen von Sanierungsmassnahmen muss der Zustand der Gewässerökologie jedoch für zukünftige Abflussbedingungen prognostiziert werden können. Einige Indikatoren eignen sich nur bedingt für beide Vorgehensweisen (also für die direkte Erhebung und die Prognostizierung). Deshalb benötigen diese Vorgehensweisen unterschiedliche Indikatorensets (Bild 3). Zum Beispiel kann die Biomasse von Fischen und des Makrozoobenthos für die Defizitanalyse oder die Erfolgskontrolle direkt im Fließgewässer gemessen werden (Baumann et al. 2012), ihre Abschätzung unter zukünftigen Bedingungen ist jedoch schwierig weil sie von vielen Einflussgrößen abhängig ist.

4.2 Indikatorenset für die Bewertung von Sanierungsmassnahmen

Für eine umfassende Beschreibung der Auswirkungen von Sanierungsmassnahmen auf das Ökosystem muss das Indikatorenset die unterschiedlichen hydrologischen Eigenschaften von Schwall und Sunk sowie die verschiedenen Ökosystemkomponenten der Schwallstrecke ab-

decken. Basierend auf den Erkenntnissen aus den Fallbeispielen, der Literatur und Diskussionen mit Experten wurden Indikatoren ausgewählt und während dem Expertenworkshop (vgl. Kapitel 2) bezüglich ihrer Sensibilität auf Schwall und Sunk sowie ihrer Prognostizierbarkeit mit verfügbaren Methoden bewertet. Die Indikatoren, welche in beiden Kriterien hohe Werte erzielten, wurden anschliessend in einer Matrix zu einem Indikatorenset zusammengestellt (Tabelle 2). In dieser Matrix werden folgende typischen hydrologischen Eigenschaften von Schwall und Sunk unterschieden (vgl. Bruder et al. 2012):

- der Abflussanstieg
- der hohe Abfluss
- die Abflussabnahme
- der tiefe Abfluss
- und die hohe Variabilität des Abflusses.

Die Ökosystemkomponenten umfassen die wichtigsten Elemente zur Beschreibung der Habitateigenschaften und der Organismengruppen (Tabelle 2).

4.2.1 Indikatoren zur Prognostizierung der Hydromorphologie, Wassertemperatur und Trübung

Für die Prognostizierung der Auswirkungen auf die Hydrologie eignen sich spezifische hydrologische Indizes wie minimaler und maximaler Abfluss, Schwall/Sunk-Verhältnis und –Amplitude, Abfluss- und Pegeländerungsraten sowie die Häufigkeit und Dauer von Schwallereignissen (Bruder et al. 2012). Für das Sedimentregime sind Prozesse wie Resuspension und Sedimentation von Partikeln, Sedimenttransport, Mobilisierung der Gewässersohle und Kolmation der Gewässersohle zu untersuchen. Die Ausprägung dieser Indizes und Prozesse in der Schwallstrecke kann mit Schwallversuchen und zweidimensionalen Modellen prognostiziert werden (z.B. Rousselot et al. 2012). Die Veränderungen der Wassertemperatur und der Trübung werden hauptsächlich durch die Menge und den zeitlichen Verlauf der Wasserabgabe bestimmt und können relativ einfach mit eindimensionalen hydraulischen Modellen oder dem Mischungsverhältnis zwischen dem turbinierten Wasser und dem Basisabfluss (i. d. R. Restwasser aus dem Zwischeneinzugsgebiet) prognostiziert werden. Für die Trübung sind jedoch einige Prozesse des Sedimentregimes (z.B. Resuspension und Sedimentation von Schwebstoffen) zu berücksichtigen. Die Werte der Trübung und der Wassertemperatur während des tiefen Abflusses, bzw. des Basisabflusses, können als Vergleichswerte für die anderen hy-

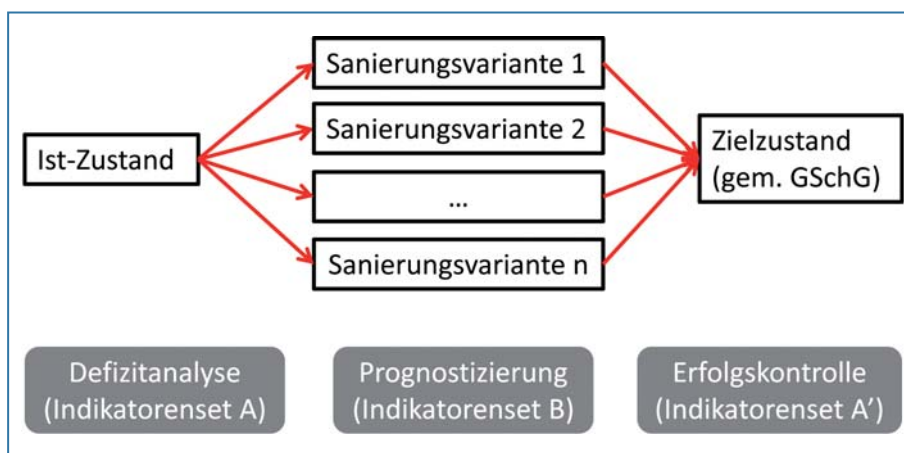


Bild 3. Schematische Darstellung der Aufgaben der unterschiedlichen Indikatorensets. Für die Defizitanalyse und die Erfolgskontrolle sollten die gleichen oder ähnlichen Indikatorensets verwendet werden, für die Prognostizierung sind z.T. andere Indikatoren notwendig.

		Hydrologische Eigenschaften				
		Tiefer Abfluss	Abflussanstieg	Hoher Abfluss	Abflussabnahme	Hohe Variabilität des Abflusses
Ökosystemkomponenten	Hydrologie	Hydrologische Indizes ^{a)}	Hydrologische Indizes ^{a)}	Hydrologische Indizes ^{a)}	Hydrologische Indizes ^{a)}	Hydrologische Indizes ^{a)}
	Sedimentregime	Sedimentregime ^{b)}	Sedimentregime ^{b)}	Sedimentregime ^{b)}	Sedimentregime ^{b)}	Sedimentregime ^{b)}
	Trübung	Trübung ^{c)}	Trübung	Trübung	Trübung	Trübung
	Wassertemperatur	Wassertemperatur ^{c)}	Wassertemperatur	Wassertemperatur	Wassertemperatur	Wassertemperatur
	Habitat	Ausprägung der Wasserwechselzone ^{d)}	^{d)}	Ausprägung der Wasserwechselzone ^{d)}	^{d)}	Ausprägung der Wasserwechselzone ^{d)}
	Fische	Trockenfallen von Laicharealen	Verdriftung	Instabilität von Laicharealen, Verdriftung	Stranden	Biomasse/Abundanz ^{d)}
	Makrozoobenthos	Ausprägung der Wasserwechselzone	Verdriftung	Verdriftung, Ausprägung der Wasserwechselzone	Stranden	EPT- Familien Makrozoobenthos ^{d)}
	Ufervegetation	Ausprägung der Wasserwechselzone	Nicht relevant	Sedimentregime ^{b)} , Ausprägung der Wasserwechselzone	Nicht relevant	Sedimentregime ^{b)} , Ausprägung der Wasserwechselzone

^{a)} Hydrologische Indizes umfassen: minimaler und maximaler Abfluss, Schwall/Sunk-Verhältnis, Schwall/Sunk-Amplitude, Abfluss- und Pegeländerungsraten sowie Häufigkeit und Dauer von Schwallereignissen.
^{b)} Das Sedimentregime umfasst Prozesse wie Resuspension, Sedimentation, Sedimenttransport, Mobilisierung der Gewässersohle, Kolmation, usw.
^{c)} Als Referenzwerte für die Auswirkungen der anderen hydrologischen Eigenschaften von Schwall und Sunk notwendig.
^{d)} Die Beschreibung dieser Ökosystemkomponenten wird mit Habitatmodellierungen (Berücksichtigung der absoluten Abflusswerte und der Änderungsraten) unterstützt.

Tabelle 2. Indikatorenset zur Beschreibung der Auswirkungen von Schwall und Sunk auf die abiotischen und biotischen Ökosystemkomponenten in Schwallstrecken. Orange hinterlegte Indikatoren werden stark durch die jeweiligen Schwall/Sunk-Eigenschaften beeinflusst und sind gut prognostizierbar. Gelb hinterlegte Indikatoren werden schwächer beeinflusst und/oder sind weniger gut prognostizierbar. EPT = Ephemeroptera, Plecoptera, Trichoptera (Insektenordnungen).

drologischen Eigenschaften von Schwall und Sunk verwendet werden.

4.2.2 Indikatoren zur Prognostizierung der Habitatentwicklung

Schwallereignisse (und Sanierungsmassnahmen) haben einen entscheidenden Einfluss auf die Verteilung und Qualität von Habitaten. Die minimal und maximal verfügbare Fläche der Schwallstrecke zur Besiedlung durch Organismen kann durch die benetzte Fläche und mit Hilfe einer Abschätzung der Wasserwechselzone (Fläche der Uferzone zwischen maximalem und minimalem Abfluss) prognostiziert werden (Abschätzung mit Schwallversuchen, Feldbegehungen, hydraulischen Modellierungen, usw.). Eine quantitative Abschätzung der Eignung der benetzten Fläche als Habitat kann durch Habitatmodelle erreicht werden, die auf zweidimensionalen hydraulischen Modellen basieren und für alle relevanten Organismengruppen erstellt werden sollten (Bild 2).

4.2.3 Indikatoren zur Prognostizierung der Entwicklung wichtiger Organismengruppen

Für die wichtigsten Organismengruppen (Fische, Makroinvertebraten, Algen, usw.) sollten neben ihren Habitaten einzelne Prozesse und ihre Beeinflussung durch die hydrologischen Eigenschaften noch spezifisch untersucht werden. Diese Prozesse umfassen das Trockenfallen und die Instabilität der Laichareale von Fischen, sowie die Verdriftung und das Stranden von Fischen und Makroinvertebraten. Für die Ufervegetation sind primär die Ausdehnung der benetzten Fläche und die Prozesse während dem Abflussmaximum entscheidend (z.B. Sedimentumlagerungen). Prozesse, die während Abflussänderungen auftreten, dürften für die Ufervegetation eher unbedeutend sein. Für alle Organismengruppen können die relevanten Prozesse während Schwallversuchen untersucht und mit Habitatmodellen quantitativ dargestellt werden.

Längerfristig wirken sich diese Prozesse auf die Artenvielfalt, die Abundanz und Biomasse der Organismen in der Schwallstrecke aus (Bruder et al. 2012). Da das Abflussregime zusätzlich ein wichtiger Faktor für viele Verhaltensweisen von Organismen ist (z.B. Eiablage, Migration oder Stoffwechsel; Bruder et al. 2012 und Referenzen darin), dürften noch weitere, hier nicht genannte Störungen durch den Kraftwerkbetrieb auftreten. Diese Effekte können längerfristig zusätzliche Beeinträchtigungen verursachen, die über jene von einzelnen Schwallphasen hinausgehen. Für ihre Prognostizierung ist eine gezielte Auswertung der Habitatmodelle (z.B. IRKA 2012) oder ein Vergleich mit Referenzstrecken oder -zuständen notwendig (Baumann et al. 2012). In diesem Bereich besteht jedoch noch ein grösserer Forschungsbedarf (vgl. Tabelle 2 und Kapitel 6).

5. Weitere Erkenntnisse für die Planung von Massnahmen

5.1 Die Bedeutung des räumlichen und zeitlichen Kontexts

Die ausgewerteten Sanierungsprojekte haben klar aufgezeigt, dass für die Prognostizierung der Auswirkungen von Schwall und Sunk und zur Planung von Massnahmen die lokalen Bedingungen detailliert untersucht werden müssen. Die Erkenntnisse sind dabei nur sehr eingeschränkt zwischen verschiedenen Schwallstrecken übertragbar. Die Betriebsweise der Kraftwerke und Einflüsse aus dem Einzugsgebiet (z.B. mit Auswirkungen auf die physikalische und chemische Wasserqualität) und von oberhalb liegenden Kraftwerken aber auch die Eigenschaften der Schwallstrecke (Morphologie, laterale und longitudinale Vernetzung, usw.) und des betroffenen Ökosystems (vorhandene Organismengruppen und Arten) bestimmen die effektiven Auswirkungen von Schwall und Sunk auf die Gewässerökologie. Bei der Auswahl einer möglichst effektiven Sanierungsvariante spielen aus ökologischer Sicht auch die vorhandenen Organismengruppen sowie deren Artenvielfalt und Populationsstruktur eine entscheidende Rolle. Zusätzlich wird die Auswahl der Sanierungsvarianten durch sozioökonomische Rahmenbedingungen (z.B. Landnutzung im Umfeld der Einleitung und der Schwallstrecke, Distanz zum nächsten See) mitbestimmt.

Aus ähnlichen Gründen ist die Saisonalität der Auswirkungen von Schwall und Sunk zu berücksichtigen. Diese beeinflusst die hydrologischen Eigenschaften von Schwall und Sunk, die im Winter in der Regel ausgeprägter sind, aber auch die Sensibilität der Organismen aufgrund unterschiedlicher Lebensstadien und Habitatsansprüchen (Bruder et al. 2012). Folglich ist bei der Interpretation der Untersuchungsergebnisse und der Planung von Sanierungsmassnahmen der frühzeitige Einbezug von Experten, von Interessengruppen und Personen mit guten Kenntnissen der lokalen Bedingungen und Organismen entscheidend.

5.2 Die Bedeutung der Morphologie

Die Morphologie eines Gewässers hat einen sehr grossen Einfluss auf die Qualität des Lebensraumes und interagiert mit den Auswirkungen von Schwall und Sunk auf die Gewässerökologie. Morphologisch vielfältige Abschnitte bieten Habitate für unterschiedliche Arten und Lebensstadien (z.B. Jungfische), die in kanalisierten

Abschnitten nicht mehr vorhanden sind. Diese Vielfalt an Habitaten bietet zusätzlich Refugien (Rückzugsräume) während Schwallereignissen oder natürlichen Hochwassern. Eine vielfältige Morphologie kann aufgrund einer erhöhten Rauheit und einer gewissen Retentionswirkung zusätzlich die hydrologischen Effekte von Schwall und Sunk etwas dämpfen (v.a. Pegeländerungsraten; Meile et al. 2005). Dabei ist aber auch zu berücksichtigen, dass die Gefahr des Strandens und Blockierens von Fischen und Makroinvertebraten in Abschnitten mit vielfältiger Morphologie erhöht sein kann (Schweizer et al. 2009, Nagrodski et al. 2012, Bruder et al. 2012). Diesen Effekten muss in der Sanierungsplanung Rechnung getragen werden (z.B. Reduktion der Abflussrückgangsraten). In den allermeisten Fällen überwiegen jedoch die positiven Effekte der vielfältigen Morphologie für die Strukturvielfalt und die Verfügbarkeit von Lebensräumen.

5.3 Koordination mit anderen Revitalisierungs- und Renaturierungsbestrebungen

Die vielfältigen Interaktionen von Schwall und Sunk mit der Gewässermorphologie machen die Bedeutung von koordinierten Revitalisierungs- (morphologische Aufwertungen) und Renaturierungsbestrebungen (Sanierung von Schwall und Sunk, Geschiebehauhalt und Fischwanderung) deutlich. In den kanalisierten Abschnitten des Alpenrheins würde beispielsweise eine Schwall/Sunk-Sanierung die Habitatverfügbarkeit für die Zielarten nicht entscheidend erhöhen, da aufgrund der homogenen Morphologie diese Habitate nicht vorhanden sind (IRKA 2012). Dies dürfte in ähnlichem Ausmass auch für die meisten anderen Schwallstrecken gelten. Für eine effektive Sanierung von Schwallstrecken muss deshalb angestrebt werden, die gewässerökologische Beeinträchtigung auf die Auswirkungen von Schwall und Sunk, der verarmten Morphologie oder von weiteren wie Wasserqualität, Fischbesatz, Durchgängigkeit usw. oder von einer Kombination zurückzuführen. Auf der anderen Seite eignen sich Revitalisierungen nicht als alleinstehende Schwall/Sunk-Sanierungsmassnahmen, da ihre Wirkung zur Schwalldämpfung zu gering ist (Bruder et al. 2012).

5.4 Die Bedeutung von Erfolgskontrollen

Das Erreichen der beabsichtigten Sanierungswirkung entsprechend vorher festgelegten gewässerökologischen Zielwer-

ten muss mit Erfolgskontrollen überprüft werden (Art. 41g Abs. 3 GSchV). Diese sind ein elementarer Bestandteil von Renaturierungsprojekten und sollten schon in der Projektplanung berücksichtigt und mit den Untersuchungen vor der Umsetzung der Sanierungsmassnahmen koordiniert werden (Peter und Scheidegger 2012). Erfolgskontrollen sollten erst durchgeführt werden, wenn sich der Zustand des Ökosystems wieder an die neuen hydromorphologischen Bedingungen angepasst hat. Dies dürfte bei Schwall/Sunk-Sanierungen mehrere Jahre, für einige Indikatoren unter Umständen Jahrzehnte dauern (z.B. wenn zusätzlich noch Hochwasserereignisse auftreten oder die Durchgängigkeit für bestimmte Fischarten erst viel später ermöglicht wird). Die analysierten Fallstudien sind noch nicht bis zu den Erfolgskontrollen fortgeschritten (Tabelle 1), diese sind aber in allen Fällen vorgesehen.

5.5 Die Bedeutung von partizipativen Verfahren

Ein partizipatives Vorgehen bei der Ausgestaltung der Sanierungsplanung ist für die Definition der Ziele der Sanierung (gewässerökologischer Zielzustand) und der dafür notwendigen Untersuchungen entscheidend. Durch den frühen Einbezug der Interessengruppen kann zusätzliche Expertise in den Planungsprozess integriert werden. Eine frühe Kompromissfindung durch geeignete Partizipation kann aber auch Einsparungen der Interessengruppen und Verzögerungen im Bewilligungsverfahren verhindern. Bei der Planung der aktuellen Ausbauvorhaben der Kraftwerke Oberhasli AG konnte beispielsweise durch intensive Partizipation trotz einer schwierigen Vorgeschichte ein zufriedenstellender Kompromiss erreicht werden – auch bezüglich Schwall und Sunk (Schweizer et al. 2012). Die Partizipation sollte nicht mit Beginn der Bauarbeiten abgeschlossen werden, sondern auch die Erfolgskontrolle und die Planung von allfälligen Anpassungen der Sanierungsmassnahmen oder von Kompensationsmassnahmen umfassen.

6. Offene Forschungsfragen

Bei der Auswertung der wissenschaftlichen Literatur und der Fallstudien sowie in Diskussionen mit Experten konnten Wissenslücken identifiziert werden, die für die Planung von Sanierungsmassnahmen von Bedeutung sind. Daraus lassen sich Vorschläge für Forschungsprojekte ableiten. Dabei standen Forschungsfragen im Vordergrund, welche die Anwendung des vorgeschlagenen Indikatorensets

zur Prognostizierung der Auswirkungen der Sanierungsmassnahmen unterstützen würden (Tabelle 2). Basierend auf der zugrundeliegenden Bewertung werden für die Prognostizierbarkeit der Indikatoren in den gelben Feldern der Tabelle 2 (Sedimentregime, Stranden des Makrozoobenthos, Biomasse/Abundanz von Fischen und EPT-Familien des Makrozoobenthos) gewisse Schwierigkeiten oder Unklarheiten erwartet. Für einige der in Tabelle 2 genannten Indikatoren müssen auch die Wertefunktionen noch definiert werden (vgl. Baumann et al. 2012). In jedem Fall sollte das ganze Indikatorenset in einer konkreten Fallstudie angewandt und optimiert werden. Zur Zeit laufen an vielen Forschungsinstituten und Kraftwerken in der Schweiz und im Ausland Projekte zur Untersuchung der Auswirkungen von Schwall und Sunk sowie von Sanierungsmassnahmen. Für einen möglichst grossen und effizienten Erkenntnisgewinn ist es entscheidend, diese Projekte zu koordinieren. Folgende Forschungsfragen wurden von den beteiligten Experten als prioritär eingestuft.

6.1 Prognostizierung des Sedimentregimes

Dies wird als schwierig angesehen obwohl numerische Modellansätze für die meisten Prozesse (z.B. Resuspension, Sedimentation und Sedimentumlagerungen) bestehen (z.B. das Modell BASEMENT der VAW; Rousselot et al. 2012). Für andere Prozesse sollten sie jedoch noch erarbeitet oder verbessert werden, zum Beispiel für den Einfluss von Schwall und Sunk auf die innere Kolmation. Diese Modelle und die zugrundeliegenden Parameter sollten ausserdem in Schwallstrecken getestet werden.

6.2 Prognostizierung der Diversität und der Biomasse von Fischen und Makroinvertebraten

Sie kann mit einer gezielten Auswertung der Defizitanalysen der ersten Phase der Sanierungsplanungen (Baumann et al. 2012) verbessert werden. Diese Untersuchungen bieten Daten aus vielen Schwallstrecken und Referenzstrecken, die mit ähnlichen Methoden erhoben wurden. Ausserdem kann auf diese Weise die Entwicklung und Verbesserung von numerischen Modellen (z.B. Präferenzkurven von Habitatmodellen, mechanistische Modelle; Schweizer 2006, Borsuk et al. 2006, Schuwirth und Reichert 2012) für Schwallstrecken unterstützt werden.

6.3 Stranden und Verdriften von Fischen und Makroinvertebraten

Die Kenntnisse über die Einflussgrössen für diese Prozesse sowie die Auswirkungen von Stranden und Verdriften auf die Gesamtpopulationen sind noch ungenügend. Für quantitative Abschätzungen sind Grenzwerte von hydromorphologischen Grössen (z.B. Sohlenschubspannung) entscheidend. Dabei sind unterschiedliche Grenzwerte für verschiedene Arten und Lebensstadien sowie deren spezifischen Eigenschaften (z.B. Reaktionszeiten) zu untersuchen.

6.4 Morphologie: Generelle Interaktionen mit Schwall und Sunk und mit der Effektivität von Sanierungsmassnahmen

Der heutige Kenntnisstand über diese Interaktionen eignet sich nur eingeschränkt zur Planung von Sanierungsmassnahmen und muss mit Forschungsprojekten (z.B. mit vergleichenden Untersuchungen in Gewässerabschnitten mit unterschiedlicher Morphologie) und der gezielten Auswertung von Erfolgskontrollen von Sanierungsprojekten erweitert werden.

6.5 Auswertung von Sanierungs- und Forschungsprojekten

Die Erkenntnisse aus individuellen Sanierungsprojekten, Erfolgskontrollen und Forschungsprojekten sollen fortlaufend projektübergreifend ausgewertet werden. Dadurch könnten zeitgerecht konkrete Empfehlungen für die Planung und Umsetzung von Sanierungsmassnahmen erarbeitet und für die Planung späterer Sanierungen zur Verfügung gestellt werden. Ein übergreifendes Forschungsprojekt wird auch dazu beitragen, die Anwendung der Indikatoren für die Defizitanalyse (Baumann et al. 2012) zu optimieren.

7. Schlussfolgerungen und Ausblick

Im Rahmen des Projekts konnte gezeigt werden, dass eine gründliche und umfangreiche Prognostizierung der Auswirkungen von Schwall/Sunk-Sanierungsmassnahmen eine entscheidende Grundlage für die Auswahl und Planung der Massnahmen ist. Die Auswirkungen auf die Gewässerökologie sind komplex und ihre Prognostizierung daher ambitioniert. Für die Prognostizierung stehen verschiedene Ansätze zur Verfügung, über deren Anwendung schon gewisse Erfahrungen bestehen. Die zugrundeliegenden gewässerökologischen Untersuchungen sind mit

einem beträchtlichen Aufwand verbunden, wenn sie aussagekräftige Resultate liefern sollen. Dieser Aufwand richtet sich auch nach der Komplexität des Kraftwerkssystems in einem Einzugsgebiet und der Schwallstrecke. Da die Prognostizierung aber die Grundlage für die Auswahl und Dimensionierung der Sanierungsmassnahmen bietet, kommt ihr eine entscheidende Bedeutung für die Planung zu. Dies und die Grösse der Sanierungsprojekte (bzgl. Landbedarf, Bauten, usw.) und die damit verbundenen Kosten und Schwierigkeiten, diese Massnahmen nachträglich anzupassen, rechtfertigen bereits in der Planungsphase einen dementsprechend grossen Aufwand. Breit angelegte Forschungsprojekte zum Thema Schwall und Sunk werden zusätzliche wichtige Erkenntnisse liefern, insbesondere wenn die Sanierungsprojekte eng von Experten begleitet werden. Damit dürfte sich künftig auch die Genauigkeit der Prognostizierungen und der Erkenntnisgewinn aus den Sanierungsprojekten weiter erhöhen lassen.

Die in diesem Projekt entwickelten Erkenntnisse werden eine Grundlage des Moduls für die zweite Phase der Sanierungsplanungen als Teil der Vollzugshilfe «Renaturierung der Gewässer» des BAFU bieten. In einem Folgeprojekt werden die oben genannten offenen Forschungsfragen konkretisiert und entsprechende Forschungsanträge vorbereitet, um die Schwall/Sunk-Sanierung möglichst zeitgerecht zu unterstützen.

Danksagung

Wir möchten uns herzlich bei folgenden Personen für Diskussionen und Auskünfte bedanken. Aus dem Projektteam: M. Kummer, I. Schmidli, M. Huber-Gysi (alle BAFU), A. Wüest und A. Peter (beide Eawag) sowie P. Baumann (posthum). Ausserdem bei den Teilnehmern des Expertenworkshops: T. H. Bakken (SINTEF, Norwegen), D. Courret (IMFT, Frankreich), J. H. Halleraker (DIRNAT, Norwegen), Dr. C. Hauer (BOKU, Österreich), Prof. Dr. K. Jorde (ENTEC), Dr. B. Maiolini (IASMA, Italien), Dr. A. Melcher (BOKU, Österreich), Dr. P. Parasiewicz (S. Sakowicz Institut für Binnenfischerei, Polen), Dr. U. Pulg (Universität Bergen, Norwegen), Prof. Dr. A. Schleiss (EPFL), Dr. M. Schneider (Schneider & Jorde Ecological Engineering, Deutschland), J. Schnell (Landesfischereiverband Bayern, Deutschland), Dr. A. Siviglia und Dr. G. Zolezzi (beide Universität Trento, Italien). Sowie für Auskünfte im Zusammenhang mit den Fallstudien: 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) sowie D. Tanno (eawag) für die CASiMiR-Darstellung.

Literatur

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.

Borsuk, M., P. Reichert, A. Peter, E. Schager und P. Burkhardt-Holm (2006). Assessing the decline of brown trout (*Salmo trutta*) in Swiss rivers using a Bayesian probability network. *Ecological Modelling* 192, 224–244.

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

IRKA (2012). Zukunft Alpenrhein. Quantitative Analyse von Schwall/Sunk-Ganglinien für unterschiedliche Anforderungsprofile. IRKA – Projektgruppe Gewässer- und Fischökologie.

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 Untersuchungen von Hasliaare und Lüttschine. Beurteilung der Schwall-Auswirkungen in je zwei Strecken und Szenarien. Bericht z. H. KWO. 41 S.

Meile, T., M. Fette und P. Baumann (2005). Synthesebericht Schwall/Sunk. Publikation des Rhone-Thur Projekts. Eawag, Kastanienbaum. 48 S.

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.

Peter A. und C. Scheidegger (2012). Erfolgskontrolle bei Revitalisierungen. In: Merkblatt-Sammlung Wasserbau und Ökologie. BAFU, Bern. Merkblatt 8. 6 S.

Rousselot, P., D. Vetsch und R. Fähr (2012). Numerische Fließgewässermodellierung. In: Merkblatt-Sammlung Wasserbau und Ökologie. BAFU, Bern. Merkblatt 7. 8 S.

Schuwirth, N. und P. Reichert (2012). Das Vorkommen von Lebewesen vorhersagen. Eawag News 72.

Schweizer, S. (2006). Predicting the consequences of river rehabilitation measures on morphology, hydraulics, periphyton and on invertebrates. Dissertation. ETH Zürich, Switzerland. 119 Seiten.

Schweizer, S., J. Neuner und N. Heuberger (2009). Bewertung von Schwall/Sunk - Herleitung eines ökologisch abgestützten Bewertungskonzepts. «Wasser Energie Luft» 101 (3), 194–202.

Schweizer, S., M. Meyer, N. Heuberger, S. Brechbühl und M. Ursin (2010). Zahlreiche ge-

wässerökologische Untersuchungen im Oberhasli. «Wasser Energie Luft» 102 (4), 289–300.

Schweizer, S., H. Zeh Weissmann und M. Ursin (2012). Der Begleitgruppenprozess zu den Ausbauprojekten und zur Restwassersanierung im Oberhasli. «Wasser Energie Luft» 104 (1), 11–17.

Zurwerra, A. und M. Bur (2009). Abschätzung der Schäden an Fischen und Nährtieren in einer Schwall-Sunk-Strecke der Saane (Freiburg, Schweiz). «Wasser Energie Luft» 101 (4), 309–315.

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

terra
vermessungen

terra vermessungen ag
Tel.: 043 500 10 77
terra@terra.ch
www.terra.ch

Unsere Referenz – Rundum zufriedene Kunden

HYDROGRAPHIE | STRÖMUNGSMESSUNG | SEEGRUNDKARTIERUNG